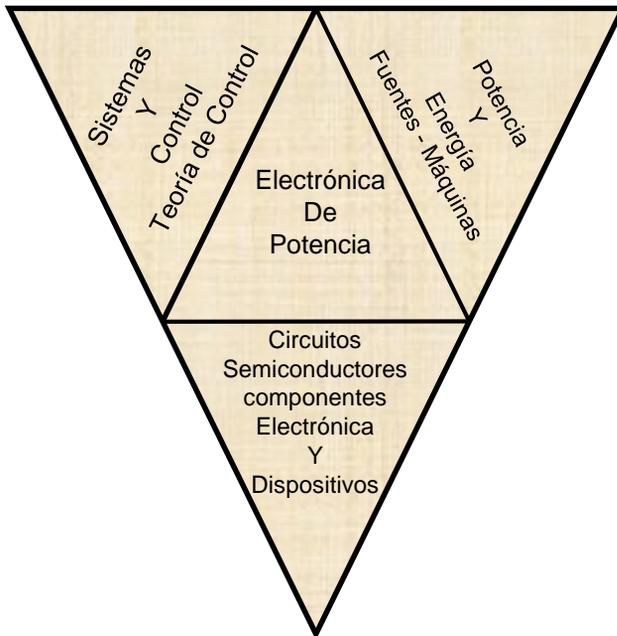


# UNIDAD I

## CONCEPTOS BASICOS DE ELECTRONICA DE POTENCIA

## 1.1 NATURALEZA Y APLICACIONES DE LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA



La electrónica de potencia es un saber de la ingeniería, que utiliza los conceptos, métodos y teorías de la electrónica (analógica y digital), la teoría de control y la electrotecnia (circuitos eléctricos, medidas, y máquinas eléctricas, sistemas de distribución y transmisión), para convertir y controlar la energía eléctrica disponible, generalmente alterna trifásica o monofásica con diferentes niveles de voltaje, en la clase de energía requerida por la carga.

Fig. 1.01. La Electrónica de Potencia 6.

La electrónica de potencia moderna se origina con la invención del SCR en 1958, por General Electric. En años sucesivos aparecen el TRIAC y otros tiristores, y se desarrollan los transistores de potencia (BJT, MOSFET, IGBT). Finalizando la década de los 80's aparece el MCT. Los circuitos de control se optimizan en la década de los 90's con las tecnologías FPGA y ASIC.

El propósito de la electrónica de potencia se obtiene mediante los sistemas de electrónica de potencia, que se caracterizan por una alta eficiencia.

La alta eficiencia repercute en ahorro en el consumo de energía, y además las bajas pérdidas de potencia permiten reducir el volumen y el peso del sistema de electrónica de potencia (S.E.P.)

# 1.2 SISTEMA DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA (SEP) 5

## 1.2.1 DIAGRAMA DE BLOQUES

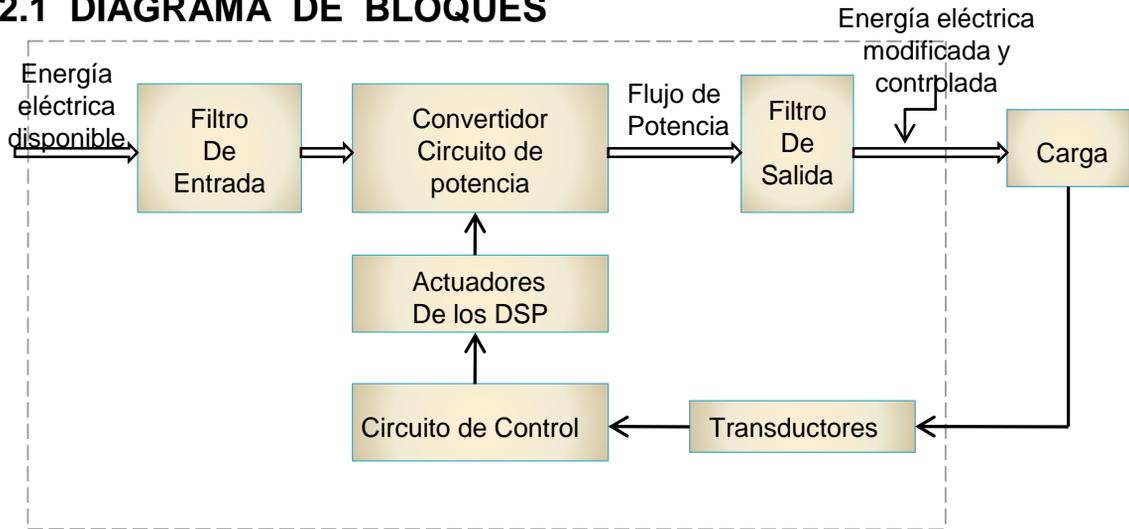


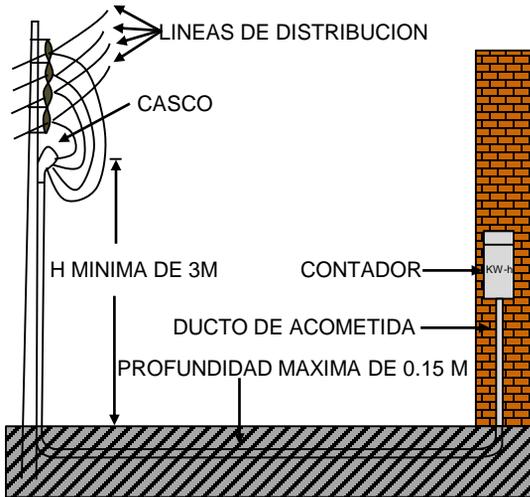
Fig. 1.02 Diagrama de bloques de un SEP<sup>(5)</sup>

## 1.2.2 FUNCIONES Y ELEMENTOS DE LOS BLOQUES DE UN SEP

DENOMINACION	FUNCION	ELEMENTOS
Filtro de Entrada	Reducir la cantidad de armónicos de corriente en la fuente y minimizar las interferencias electromagnéticas.	Capacitores Inductores
Convertidor (circuito de potencia)	Transformar la naturaleza de la energía eléctrica, utilizando dispositivos semiconductores de potencia(DSP) como interruptores.	Dispositivos semiconductores de potencia Tiristores Transistores de potencia Híbridos
Filtros de Salida	Adecuar la forma de onda de voltaje del convertidor, al requerido por la carga	Capacitores Inductores
Actuadores de los DSP	Adecuar en voltaje y corriente las señales de control , a los requerimientos de los DSP.	Transformador de pulso Optoacopladores Transistores
Circuito de control	Implementar la estrategia de control del convertidor	Microcontroladores Electrónica discreta
Transductores	Transformar las variables mecánicas,eléctricas, térmicas, etc, de la carga, en señales eléctricas.	Transformadores de instrumentos Termistores Tacómetros Encoders
Carga	Transformar la energía eléctrica en energía mecánica, química, lumínica, térmica.	Motores, Hornos, Lámparas, Procesos electroquímicos, etc.

## 1.3 FUENTES DE ENERGÍA PRIMARIA 10

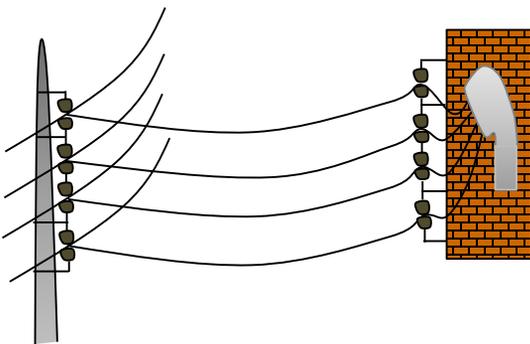
### 1.3.1 RED DE SUMINISTRO DE VOLTAJE ALTERNO



Se dispone de una red de voltaje alterno de  $f = 60 \text{ hz}$ , en los países americanos, con diferentes niveles de voltaje; En baja tensión se normalizan los siguientes voltajes; 120, 120/240, 208/120, 440/254 voltios.

La alimentación en baja tensión se realiza mediante acometida aérea o subterránea. Los conductores aéreos de la acometida, van desde un poste hasta el contador eléctrico.

#### a) Acometida subterránea(10)



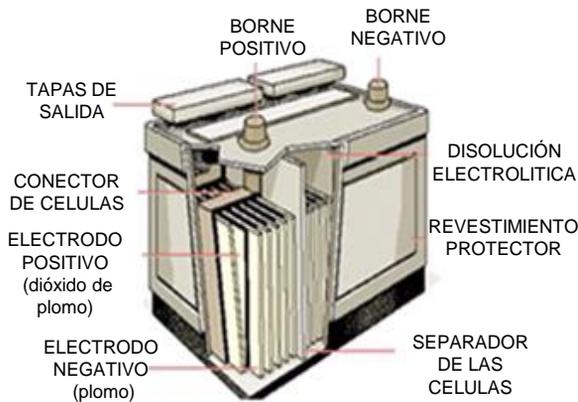
En la acometida subterránea, se conectan los conductores a las líneas áreas de distribución, y se bajan por una tubería hasta tierra, y se llevan en forma subterránea hasta el contador de energía.

En las instalaciones industriales se dispone a través de una subestación de 13,2 o 34,5kv, de voltajes en media tensión de 440/254 o 480/277 v. El valor límite de perturbación del voltaje es  $\pm 10\%$  del valor nominal, el de la frecuencia es  $\pm 1 \text{ Hz}$  y el desequilibrio admitido es 2%.

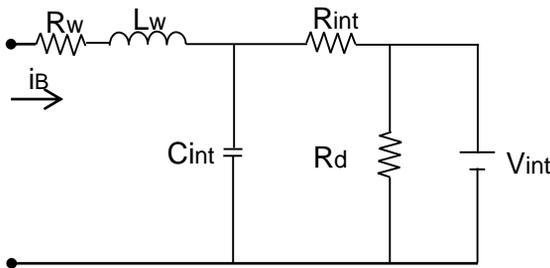
#### b) Acometida aérea(10)

Fig. 1.03 Acometidas en baja tensión

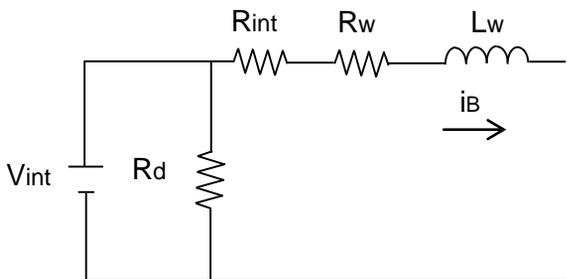
### 1.3.2 BATERÍAS 6



a) Estructura física



b) Circuito equivalente para el modo pasivo (carga)(6).



c) Circuito equivalente para el modo activo (fuente)(6).

Fig. 1.04 Circuitos equivalentes de la batería de ácido – plomo.

Son fuentes de energía recargables. Las más comunes son las de plomo – ácido y la de níquel-cadmio; por consideraciones económicas, la más utilizada es la de plomo-ácido, conformada por un ánodo de dióxido de plomo, cátodo de plomo y electrolito de ácido sulfúrico diluido en agua.

El circuito equivalente para modo pasivo lo conforman:  $V_{int}$  = potencial electroquímico interno; depende de la temperatura y la concentración del electrolito;  $R_d$ , modela el proceso de descarga interna;  $R_{int}$ , modela la resistencia del electrolito y la estructura interna (celdas), depende de la temperatura y concentración del electrolito.  $C_{int}$  modela la capacitancia de las placas;  $R_w$  y  $L_w$ , son la resistencia y la inductancia de los cables externos. En el circuito equivalente en modo activo,  $V_{int}$  representa la fuerza electromotriz interna de la batería, de naturaleza, electroquímica; depende de la temperatura y de la concentración del electrolito. Un valor típico de  $R_{int} = 0,1\Omega$ , para la batería de 12 voltios.  $L_w$  tiene un valor de  $500\text{nH/m}$ , cuando la relación  $D/r = 10$ ;  $D$  = distancia entre cables,  $r$  = radio de cable.

### 1.3.3 GENERADOR EÓLICO 2

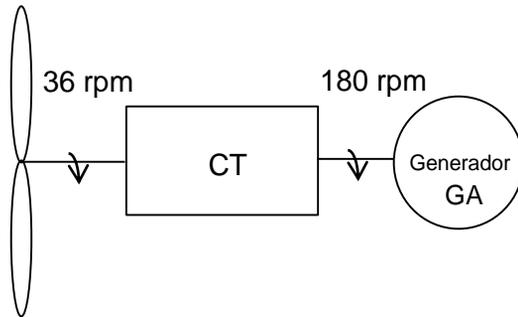


Fig. 1.05 Elementos de un aerogenerador.(2)

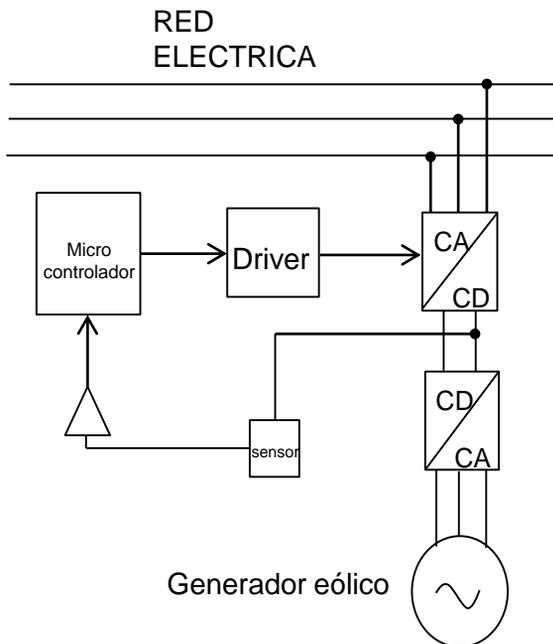


Fig. 1.06 Conexión del aerogenerador a la red (2)

Se utiliza la energía del viento, para generar energía eléctrica. España y Holanda son líderes en esta energía alternativa.

Los elementos de un aerogenerador son:

**Palas del rotor (PR):** El diseño, es similar al ala de un avión, su longitud depende de la potencia (20 metros para 600Kw).

**Caja de transmisión (CT) o tren de engranajes,** multiplica por casi 50 la velocidad de las palas. La tendencia es a eliminarlas para reducir peso y mejorar eficiencia.

**El generador asíncrono (GA) o generador de inducción:** las potencias actuales están en el orden de hasta 20Mw.

La conexión del aerogenerador a la red (fig.1.06), se realiza rectificando el voltaje trifásico del generador eólico, y acoplado el voltaje CD mediante un convertidor CD/CA(inversor), a la red alterna de suministro eléctrico. El control del proceso de acoplamiento se hace mediante un microprocesador.

### 1.3.4 GENERADOR FOTOVOLTAICO



Fig. 1.07 Panel solar

Utiliza la energía solar para generar energía eléctrica (CD), mediante muchas celdas solares asociadas en serie y en paralelo. Esta energía alternativa tiene un gran futuro.

La tecnología actual de las celdas es en base a semiconductores, y la eficiencia es del 14 al 20%. Se investiga la utilización de materiales orgánicos.

Una limitación del sistema es su costo superior, con respecto a otras alternativas de generación.

Un elemento esencial del sistema de generación fotovoltaico (fig. 1.08) es el acondicionador de potencia (A.P.) cuyas funciones son la conversión CD/CA y la regulación de carga de la batería.

El generador auxiliar (GA), es un grupo electrógeno, en la mayoría de los casos, que sirve de respaldo al generador fotovoltaico (GF) y las baterías tienen como función, regular la producción de energía de acuerdo a la demanda.

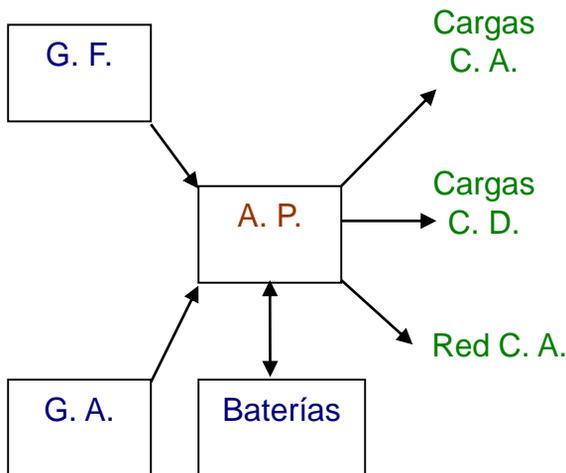


Fig.1.08 Sistema de generación fotovoltaico(2)

# 1.4 MODELAMIENTO DE COMPONENTES ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS

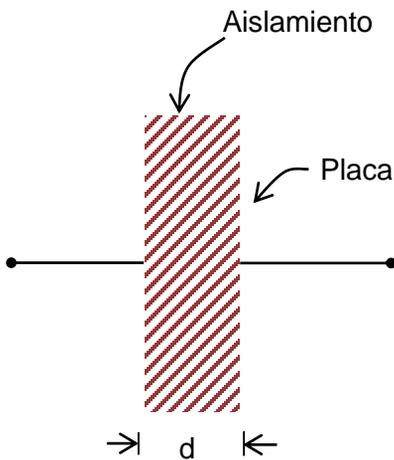
## 1.4.1 EL CAPACITOR

### 1.4.1.1 GENERALIDADES

El capacitor está conformado por 2 placas conductoras, separadas por un material dieléctrico, en donde se establece una polarización dieléctrica. El valor de la capacitancia ideal es:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} = \frac{Q}{V} \quad (1.01)$$

$\epsilon$  = permitividad eléctrica del aislamiento.  
 $A$  = área de las placas paralelas.  
 $d$  = distancia entre placas.  
 $Q$  = carga eléctrica de cada placa.  
 $V$  = voltaje aplicado a las placas.  
 $\rho$  = resistividad del dieléctrico



La corriente que un capacitor intercambia con un circuito es:

$$i_c = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cv)}{dt} = C \frac{dv}{dt} \quad (1.02)$$

Se conocen tres clases de capacitores: de dieléctrico normal, electrolíticos y de doble capa.

a) Geometría del capacitor de placas paralelas

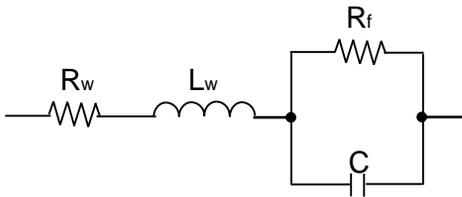
El capacitor real difiere del ideal en 4 aspectos:

- a) Existe  $i$  para  $V = V_{dc}$ .
- b) Existe una  $L$  que puede generar resonancia.
- c) Se descarga naturalmente, al desconectarlo de la fuente
- c) Presenta pérdidas de potencia.

Fig. 1.09 El capacitor

# 1.4 MODELAMIENTO DE COMPONENTES ELECTRICOS Y MAGNETICOS

## 1.4.1.2 MODELO CIRCUITAL DEL CAPACITOR(6)



a) Circuito equivalente general de un capacitor

Las características reales del capacitor se representan, en el circuito equivalente general (fig.1.10 a).

$R_w$  y  $L_w$  modelan la resistencia e inductancia, de los alambres conductores de conexión.

$R_f$  modela la resistencia de fuga, responsable de la descarga del capacitor y  $C$  es la capacitancia.

Mediante asociaciones serie y paralelo del circuito equivalente general, se puede reducir al circuito equivalente serie normalizado(fig. 1.10 b)



b) Circuito serie normalizado

$$ESR = R_w + \frac{1}{\omega^2 R_f C^2} \cong \frac{\tan \delta}{\omega C} \quad (1.03)$$

ESR=Resistencia equivalente serie

$$ESL = L_w; R_f = \frac{\rho d}{A} \quad (1.04)$$

ESL=Inductancia equivalente serie

$$\tan \delta = \frac{ESR}{X} = \frac{1}{\omega \rho \epsilon} \quad (1.05)$$

$\delta$  =ángulo de pérdidas=Diferencia entre el desfase ideal de la corriente( $90^\circ$ ) y el desfase real.

Fig. 1.10 Modelo circuital del capacitor

Para  $\omega \geq \frac{1}{\sqrt{L_w C}}$  el capacitor se comporta como un inductor.

# 1.4 MODELAMIENTO DE COMPONENTES ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS

## 1.4.1.3 CLASES DE CAPACITORES

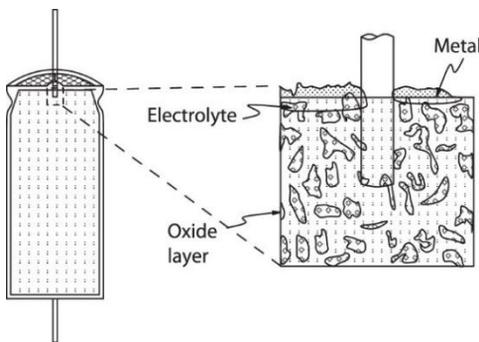


Los capacitores se caracterizan por los siguientes valores nominales :  $C_n$ , tolerancia de  $C_n$ ,  $V_n$ ,  $V_p$ ,  $I_n$ ,  $I_{fuga}$ , y factor de pérdidas( $\tan \delta$ ).

Los capacitores electrolíticos tienen como dieléctrico óxido de aluminio(figura 1.10 a1) o de tántalio(figura 1.10 a2).

### 1) Electrolíticos de óxido de aluminio

Los capacitores electrolíticos son polarizados, y al utilizarlos se debe respetar la polaridad indicada en la carcasa, pues de lo contrario pueden explotar



Se caracterizan por tener valores bajos de resistencia de fuga , y su voltaje nominal es hasta de 500V, con capacitancias de cientos de miles de  $\mu F$ . Y son de baja confiabilidad

### 2)Electrolítico de tantalio



Los capacitores electrolíticos de doble capa alcanzan valores altos de capacitancia. Los que se muestran en la figura 1.10 a3),presentan capacitancias de 2600 faradios(F).

### 3) Electrolíticos de doble capa

#### a)Electrolíticos

Se aplican en filtros CD de entrada y salida, y en procesos que requieran tiempos cortos de almacenamiento de energía.

Fig.1.10 Clases de capacitores

# 1.4 MODELAMIENTO DE COMPONENTES ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS

## 1.4.1.3 CLASES DE CAPACITORES

Los capacitores de plástico tienen alta resistencia de aislamiento (pequeñas corrientes de fuga) y alta temperatura.

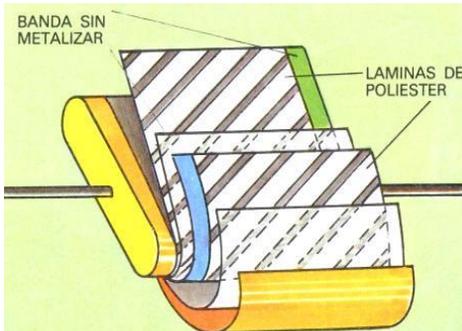
Dependiendo de la armadura, pueden ser tipo M(metal) o MKT(metal vaporizado). Los metalizados de poliéster (fig. 1.10 b) presentan bajos valores de capacitancia (hasta  $10\mu\text{F}$ ) y valores altos de  $V_n$  (40Kv).

Se aplican en circuitos de corriente alterna.

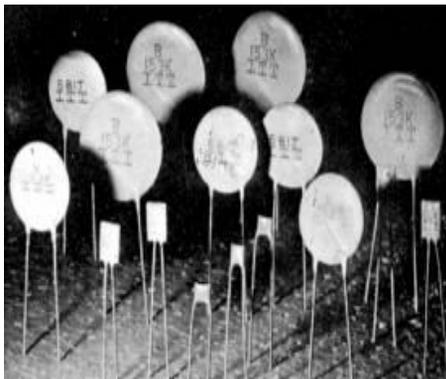
Se aplican en filtros CD, para suprimir los transitorios de conmutación. El MKT se utiliza en aplicaciones hasta de 600V. Los metalizados de polipropileno tienen valores altos de  $V_n$  e  $I_n$  y se aplican en convertidores resonantes.

Los capacitores cerámicos(fig.1.10c) tienen un rango de capacitancia entre 1p y  $1\mu\text{F}$ , pero varían considerablemente con la temperatura, el voltaje y el tiempo.

Se aplican en circuitos de corriente alterna .



b)Plástico

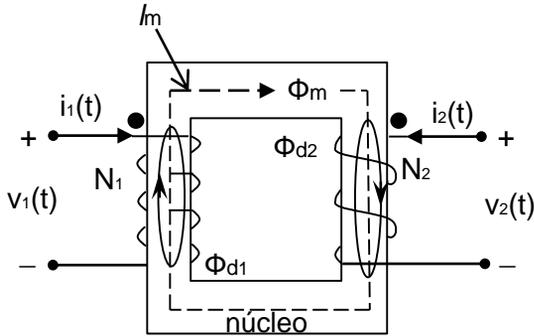


c)Cerámico

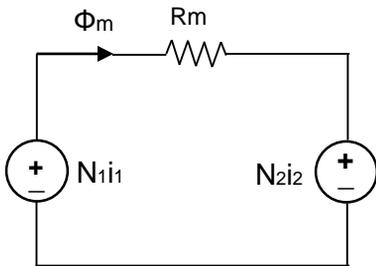
Fig.1.10 Clases de capacitores

## 1.4.2 EL TRANSFORMADOR

### 1.4.2.1 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y OPERACIONALES



a) Circuito



b) Modelo del circuito magnético

Se forma con 2 circuitos eléctricos, acoplados con un circuito de material ferro-magnético de permeabilidad  $\mu$ .

El flujo encadenado ( $\lambda$ ) al circuito 1 de  $N_1$  espiras es:

$$\lambda = N_1 \Phi_1 \quad ; \quad \Phi_1 = \Phi_m + \Phi_{d1} \quad (1.06)$$

$\Phi_m$  = flujo mutuo ;

$\Phi_{d1}$  = flujo de dispersión del devanado 1

Para el circuito 2

$$\lambda_2 = N_2 \Phi_2 \quad \Phi_2 = \Phi_m + \Phi_{d2} \quad (1.06b)$$

Aplicando la ley de Ampere al circuito magnético, sobre la trayectoria media  $l_m$ , se obtiene:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \vec{J} \cdot d\vec{s} \quad (1.07)$$

$$\frac{B}{\mu} l_m = N_1 i_1 - N_2 i_2 = BA \frac{l_m}{\mu A} =$$

$$\Phi_m \mathcal{R}_m =$$

$$N_1 i_m \quad (1.08)$$

$i_m$  = corriente de magnetización

$\mathcal{R}_m$  = Reluctancia del circuito magnético

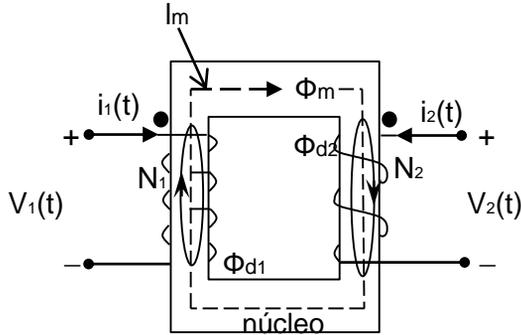
$A$  = área seccional del circuito magnético

Fig. 1.11 El transformador

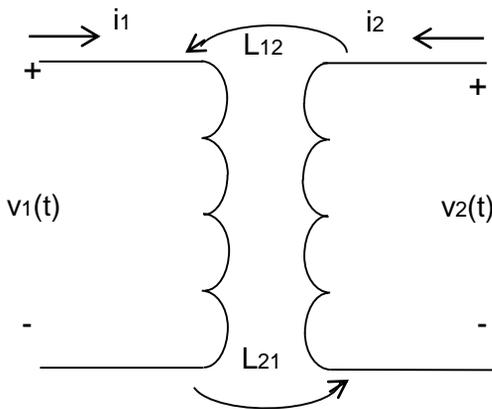
El circuito equivalente de la ecuación 1.08 se muestra en la fig. 1.11b

## 1.4.2 EL TRANSFORMADOR

### 1.4.2.1 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y OPERACIONALES



a) Circuito



c) Circuito equivalente

$$\text{Se define: } N_1 \Phi_{d1} = L_{d1} i_1 \quad (1.09)$$

De las ec.1.06, y 1.08

$$\lambda_1 = \frac{N_1}{\mathfrak{R}_m} (N_1 i_1 - N_2 i_2) + N_1 \Phi_{d1} \quad (1.10)$$

$$v_1 = \frac{d\lambda_1}{dt}; \quad v_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} \quad (1.11)$$

De la ley de Faraday, y 1.10 y 1.11

$$v_1 = N_1 \frac{d\Phi_1}{dt}; \quad v_2 = N_2 \frac{d\Phi_2}{dt} \quad (1.12)$$

De la ec. 1.08,1.09, 1.10 y 1.11

$$v_1 = \left( \frac{N_1^2}{\mathfrak{R}_m} + L_{d1} \right) \frac{di_1}{dt} - \frac{N_1 N_2}{\mathfrak{R}_m} \frac{di_2}{dt}$$

$$v_1 = (L_m + L_{d1}) \frac{di_1}{dt} - L_{12} \frac{di_2}{dt}$$

$$L_m = \frac{N_1^2}{\mathfrak{R}_m} \quad L_{12} = \frac{N_1 N_2}{\mathfrak{R}_m}$$

$$L_{11} = L_m + L_{d1}$$

Se define

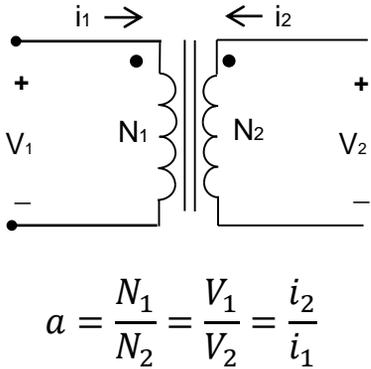
$$v_1 = (L_{11}) \frac{di_1}{dt} - L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (1.13a)$$

Por analogía se obtiene

$$v_2 = -(L_{21}) \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} \quad (1.13b)$$

Fig. 1.11. El transformador

### 1.4.2.2 EL TRANSFORMADOR IDEAL



a) Modelo circuital

Conductor ideal:  $r_{cu} = 0$  Material magnético ideal:  $\mu = \infty$ .

Los puntos de polaridad (•) representan los puntos del transformador, cuyos potenciales tienen simultáneamente la misma polaridad.

Si  $\mu \rightarrow \infty \therefore L_m \rightarrow \infty \therefore \mathfrak{R}_m \rightarrow 0 \therefore i_m \rightarrow 0$

$\mu \rightarrow \infty \therefore \varphi_{d1} = \varphi_{d2} \rightarrow 0 \therefore \varphi_1 = \varphi_2$

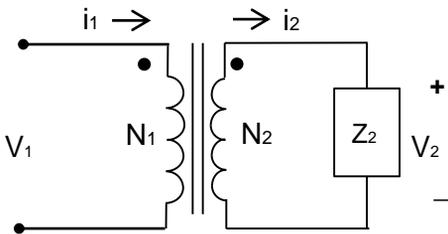
De 1.09 
$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{i_2}{i_1} \quad (1.14)$$

De 1.12 
$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1.15)$$

Fig.1.12 El transformador ideal

El modelo circuital del transformador ideal se muestra en la fig.1.12 a)

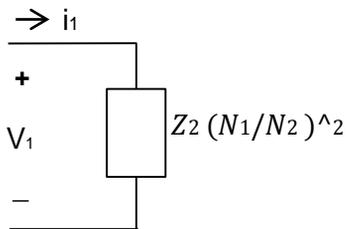
### 1.4.2.3 ACOPLAMIENTO DE IMPEDANCIAS



Se analiza el efecto del transformador, sobre la carga reflejada en la fuente.

De la fig.1.13 y las ec. 1.14 y 1.15, se obtiene:

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{aV_2}{I_2/a} = a^2 \frac{V_2}{I_2} = a^2 Z_2 \quad (1.16)$$



Transformación de impedancias.

En el primario se refleja la impedancia del secundario, multiplicada por el cuadrado de la relación de transformación. El transformador le modifica a la fuente la impedancia de la carga, dependiendo de la relación de transformación.

Fig.1.13 El transformador ideal

### 1.4.2.4 MATERIAL MAGNÉTICO REAL

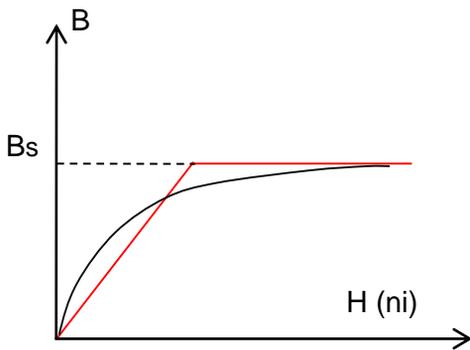


Fig. 1.14. Curva de magnetización.

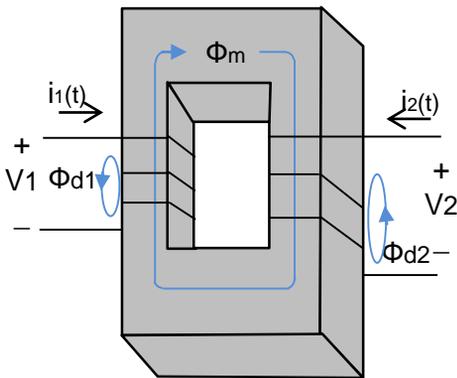
El material magnético real ( $\mu$  finito) se caracteriza por la curva B-H (línea media de la curva de histéresis). B es proporcional al voltaje inducido y H a  $l_m$ ;

$$\mu = \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (1.17)$$

$\mu$ , pendiente de la curva, es variable. La curva se linealiza (línea en rojo) a una recta de pendiente  $\mu$  promedia, y otra de pendiente nula para  $B=B_s$ .(fig. 1.14)

### 1.4.2.5 TRANSFORMADOR DE PERMEABILIDAD FINITA

Se modela el transformador con material magnético real ( $\mu$  finito), pero sin pérdidas de energía en el hierro, (se ignoran corrientes parásitas y el fenómeno de histéresis) y conductor eléctrico ideal..



De 1.09  $\mu = \text{finito} \therefore \mathcal{R}_m \text{finito} \therefore i_m \text{ y } L_d \neq 0$

$$i_m = \frac{N_1 i_1 - N_2 i_2}{N_1} \quad (1.18)$$

$$v'_1 = L_m \frac{di_m}{dt} \therefore i_m = \frac{1}{L_m} \int v'_1 dt \quad (1.19)$$

Fig. 1.14 Flujos con  $\mu$  finito.  $v'_1 = N_1 A \frac{dB}{dt} \therefore \int_0^{B_s} dB = \frac{1}{N_1} \int_0^{T/2} v'_1 dt$

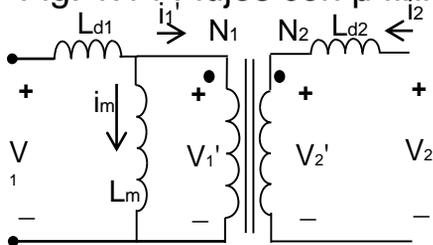


Fig. 1.15 Modelo circuítal con  $\mu$  finito.

Si los voltio-segundo ( $\int_0^{T/2} v_1 dt$ ) que se aplican al primario, durante medio ciclo sobrepasan un límite, B se incrementa hasta alcanzar la saturación (condición de corto circuito)

$$\text{Si } L_m \rightarrow 0 \therefore i_m \rightarrow \infty \quad (1.20)$$



## 1.4.3 EL INDUCTOR

### 1.4.3.1 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y OPERACIONALES

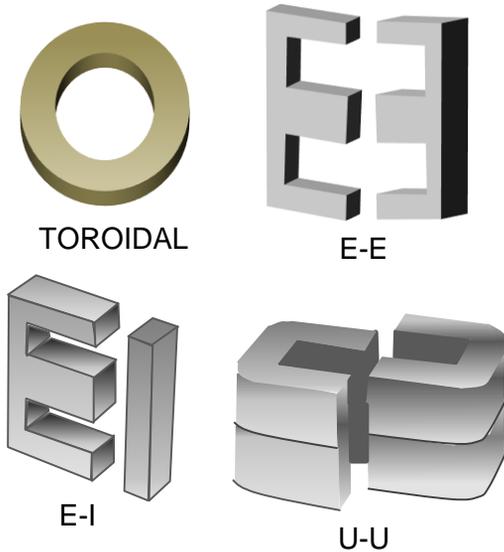


Fig. 1.17 Núcleos magnéticos

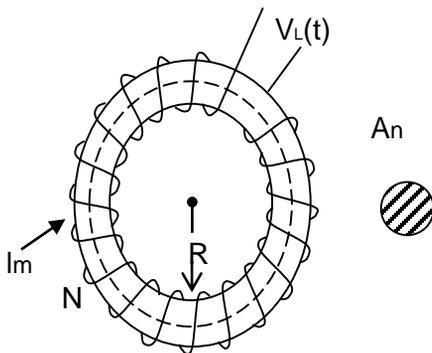


Fig. 1.18 Inductor toroidal

Un inductor es un circuito eléctrico (bobina) arrollado sobre un núcleo magnético, de láminas de acero al silicio (baja frecuencia), o ferrita (alta frecuencia). Los núcleos pueden ser de diferente forma: toroidal, E-E, EI, C, etc.

Aplicando la ley de Ampere al inductor toroidal (fig. 1.18).

$$\int_{\ell_m} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \vec{J} \cdot d\vec{s}$$

$$H\ell_m = Ni = \frac{B}{\mu} \ell_m \quad (1.22)$$

Definición:

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{NBA_n}{i} = \frac{N^2 A_n \mu}{\ell_m} \quad (1.23)$$

$$\mu = f(B) \rightarrow L = f(i)$$

Ley de Faraday :

$$v_L(t) = \frac{d\lambda}{dt} = NA \frac{dB}{dt}$$

$$= L \frac{di}{dt} \quad (1.24)$$

L se opone a los cambios temporales de corriente (**inercia electromagnética**) .

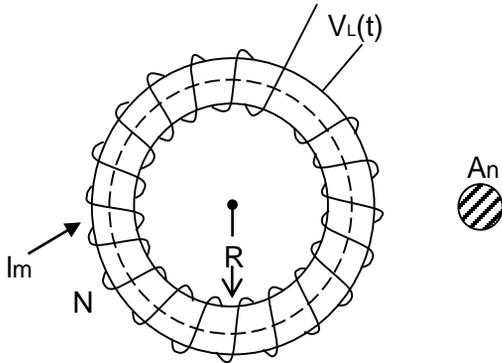
Si :

$$B \rightarrow B_s(\text{sat}) \rightarrow \frac{dB}{dt} = 0 \rightarrow V_L = 0$$

La saturación del núcleo magnético equivale a cortocircuitar el inductor 49

## 1.4.3.2 COMPORTAMIENTO DEL INDUCTOR

### 1.4.3.2.1 EXCITACIÓN SINUSOIDAL



$$i(t) = I_m \sin(\omega t)$$

$$B = B_m \sin(\omega t)$$

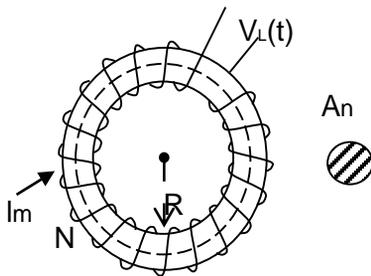
$$v_L = NA_n \frac{dB}{dt} = \omega NA_n B_m \cos(\omega t)$$

$$V_L = 4.44 f NA_n B_m; \quad B_m \leq B_s \quad (1.25)$$

Si  $L$  representa un motor de AC, la relación  $V_L/f$  debe permanecer constante, para impedir saturación del núcleo.

Fig. 1.19 Excitación sinusoidal

### 1.4.3.2.2 EXCITACIÓN ALTERNA CUADRADA

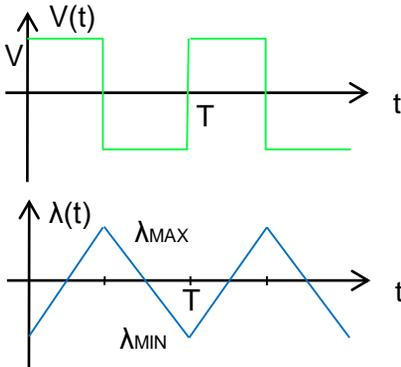


$$v(t) = V \quad 0 < t < T/2$$

$$v(t) = -V \quad T/2 < t < T$$

$$v(t) = v_L(t) = \frac{d\lambda}{dt} \approx \frac{\Delta\lambda}{\Delta t}$$

a) Circuito



b) Formas de onda

para  $\Delta t = T/2$ ,  $v_L = V$

$$\Delta\lambda = \lambda_{max} - \lambda_{min}$$

$$\Delta\lambda = 2\lambda_{max}$$

$$\lambda_{max} = NA_n B_{max}$$

$$v_L \cong \frac{2NA_n B_{max}}{T/2} = v(t) = V$$

$$V_L = 4NA_n f B_{max} \quad (1.26)$$

Fig.1.20 Excitación alterna cuadrada

### 1.4.3.3 PÉRDIDAS DE POTENCIA EN COMPONENTES MAGNÉTICOS

#### PÉRDIDAS POR HISTÉRESIS

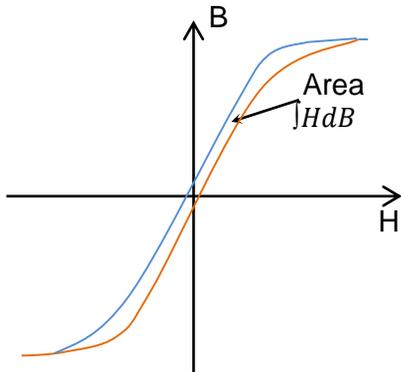


Fig. 1.21 Lazo de histéresis

Se genera por el proceso de inversión no elástico, de los dipolos magnéticos, al invertirse H.

$W$  disipada por ciclo = (volumen del núcleo) \* (área del lazo de histéresis)

$$P_h = K_h f B_m^\alpha \quad * \text{Volumen núcleo} \quad (1.27)$$

$$1.6 < \alpha < 2.0$$

#### PÉRDIDAS POR CORRIENTES PARÁSITAS

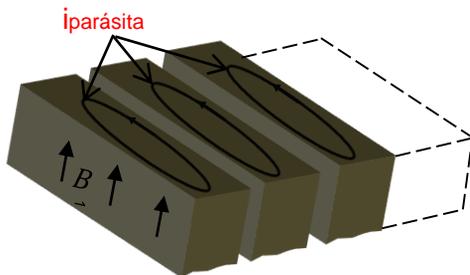


Fig. 1.22 Corrientes parásitas

Las generan las corrientes inducidas dentro del núcleo ferro-magnético, por el flujo variable del componente magnético. Para reducir las pérdidas, se incrementa la resistividad del material magnético (se adiciona silicio). En alta frecuencia se utilizan cerámicas magnéticas (ferritas), que presentan alta resistividad y permiten reducir las pérdidas parásitas, que aumentan mucho con la frecuencia

#### PÉRDIDAS EN EL COBRE

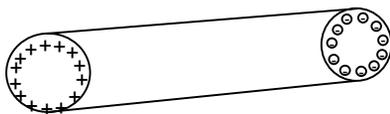


Fig. 1.23 Efecto Piel

Se generan por efecto Joule en la resistencia del conductor. La resistencia varía con la frecuencia (efecto piel) debido a la inductancia interna de los hilos centrales del conductor. La corriente se concentra en la periferia del conductor, al aumentar la frecuencia.

### 1.4.3.4 MODELO CIRCUITAL DEL INDUCTOR

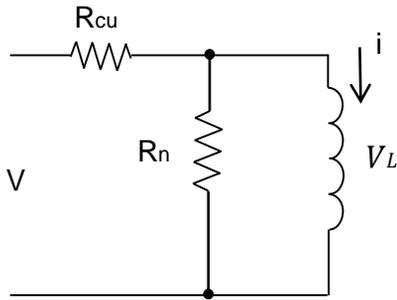


Fig. 1.24 Modelo circuital

$R_{cu}$  modela las pérdidas en el cobre (efecto Joule).

$R_n$ : modela las pérdidas en el núcleo magnético, debido al fenómeno de histéresis y corriente parásita.

:  $f ( B_m , frecuencia)$

$L$  : modela el almacenamiento de energía en forma de campo magnético.

$L$  :  $f (geometría, i)$

### 1.4.3.5 CÁLCULO DE LA INDUCTANCIA SIN ENTREHIERRO

$$W_a = L_W H_W = N \frac{A_{cu}}{K_u} \quad (1.28)$$

$A_{cu}$  = Área del conductor de cobre

$K_u$  = Factor de utilización de la ventana

$N$  = Número de espiras

De 1.28

$$N = \frac{W_a K_u}{A_{cu}} = \frac{W_a K_u J}{I_e} \quad (1.29a)$$

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} = \frac{N A_n B}{i} = \frac{N A_n B_{max}}{i_{max}} \quad (1.29b)$$

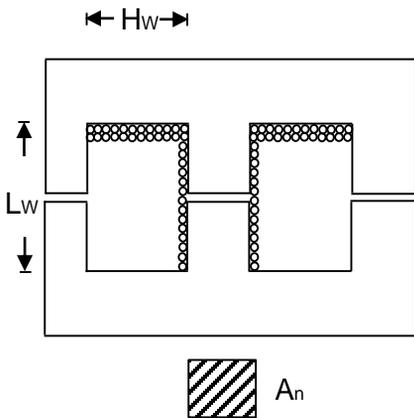


Fig.1.25 Caracterización del núcleo.

Se asume lineal, la curva de magnetización .De 1.28 y 1.29

$W_a = L_w * H_w = \text{área de la ventana}$

$A_n = \text{área seccional del núcleo ferromagnético}$

$W_a * A_n = \text{área producto del núcleo}$

$$L = \frac{W_a A_n K_u B_{max} J}{i_{max} I_e} \quad (1.30)$$

La ec. 1.29 a) establece un requerimiento geométrico y la 1.29 b) un requerimiento electromagnético.

# 1.5 DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES IDEALES

## 1.5.1 DIODOS - TIRISTORES

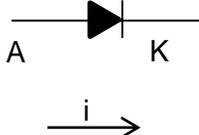
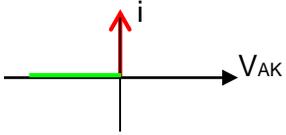
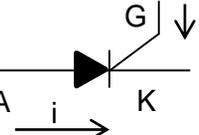
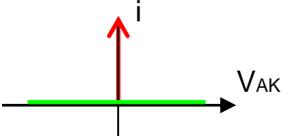
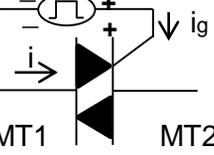
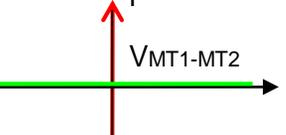
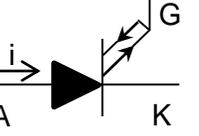
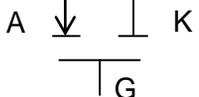
DISPOSITIVOS	SÍMBOLO	CARACTERÍSTICAS v-i IDEAL	CONDICIONES OPERATIVAS COMO INTERRUPTOR
DIODO			$v_{AK} > 0 \quad i > 0 \quad S_{on}$ $v_{AK} < 0 \quad i = 0 \quad S_{off}$
SCR			$v_{AK} > 0 \quad i_{GK} > 0 \quad i > 0$ $v_{AK} > 0 \quad i_{GK} = 0 \quad i = 0$
TRIAC			$V_{MT1-MT2} < 0 \quad i_g < 0 \quad i > 0 \quad S_{on}$ $V_{MT1-MT2} > 0 \quad i_g < 0 \quad i > 0 \quad S_{on}$ $V_{MT1-MT2} < 0 \quad i_g = 0 \quad i = 0 \quad S_{off}$
GTO			$V_{AK} > 0 \quad i_{GK} > 0 \quad i > 0 \quad S_{on}$ $V_{AK} > 0 \quad i_{GK} < 0 \quad i = 0 \quad S_{off}$ $V_{AK} > 0 \quad i_{GK} = 0 \quad i = 0 \quad S_{off}$
MCT			$V_{AK} > 0 \quad V_{GK} < 0 \quad i > 0 \quad S_{on}$ $V_{AK} < 0 \quad V_{GK} > 0 \quad i = 0 \quad S_{off}$ $V_{AK} > 0 \quad V_{GK} = 0 \quad i = 0 \quad S_{off}$

Tabla 1.01 Símbolo, Característica v-i ideal de diodos y tiristores.

## 1.5.2 TRANSISTORES DE POTENCIA

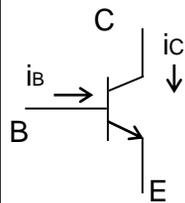
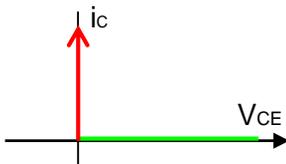
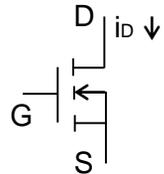
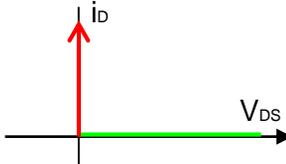
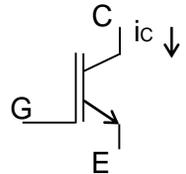
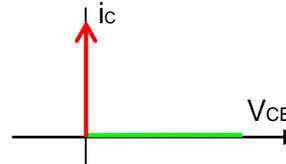
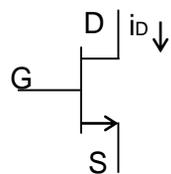
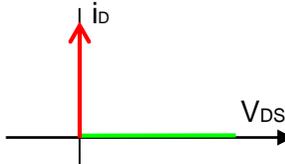
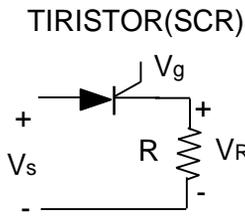
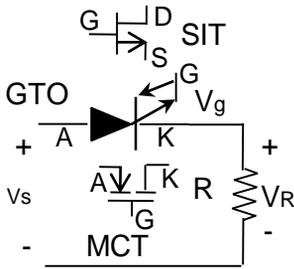
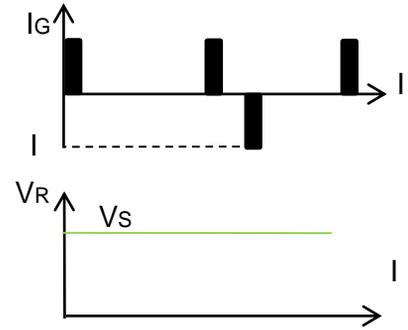
DISPOSITIVOS	SÍMBOLO	CARACTERÍSTICAS v-i IDEAL	CONDICIONES OPERATIVAS COMO INTERRUPTOR
BJT(NPN)			$i_B > 0 \quad i_C > 0 \quad S_{on}$ $i_B \leq 0 \quad i_C = 0 \quad S_{off}$
MOSFET CANAL N			$V_{GS} > 0 \quad i_D > 0 \quad S_{on}$ $V_{GS} \leq 0 \quad i_D = 0 \quad S_{off}$
IGBT			$V_{GE} > 0 \quad i_C > 0 \quad S_{on}$ $V_{GE} \leq 0 \quad i_C = 0 \quad S_{off}$
SIT			$V_{GS} > 0 \quad i_D > 0 \quad S_{on}$ $V_{GS} \leq 0 \quad i_D = 0 \quad S_{off}$

Tabla 1.02 Símbolo, Característica v-i ideal de transistores

### 1.5.3 CARACTERÍSTICAS DE CONTROL DE LOS SEMICONDUCTORES DE POTENCIA 14

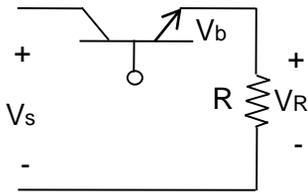
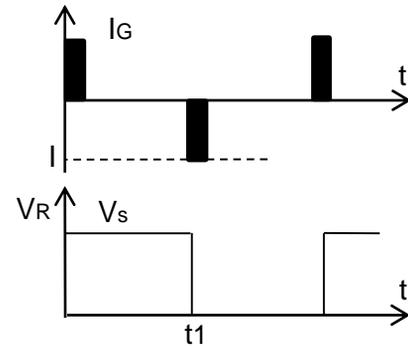


CONMUTACIÓN DEL TIRISTOR

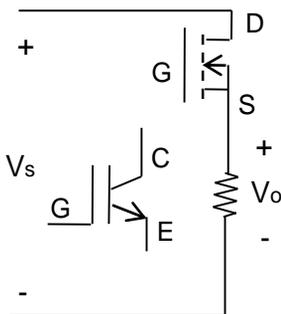
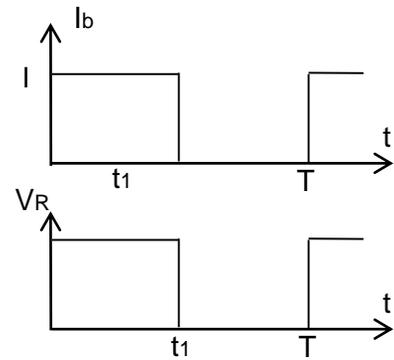


CONMUTACIÓN DEL SIT, GTO Y MCT

(La lógica de operación del MCT es inversa a la del GTO)



CONMUTACIÓN DEL TRANSISTOR



CONMUTACIÓN DEL MOSFET, IGBT

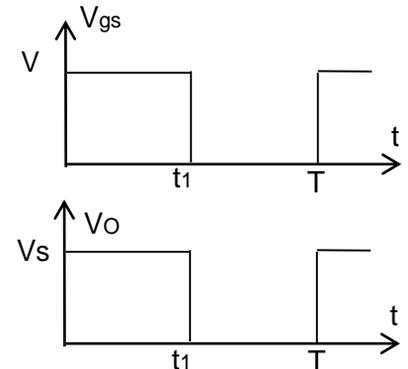
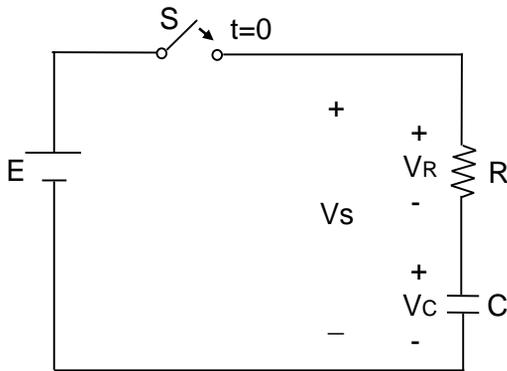


Tabla 1.03 Característica de control de dispositivos semiconductores.

# 1.6 CIRCUITOS EXCITADOS POR FUENTES CONTINUAS

## 1.6.1 CIRCUITO RC



a) Circuito.

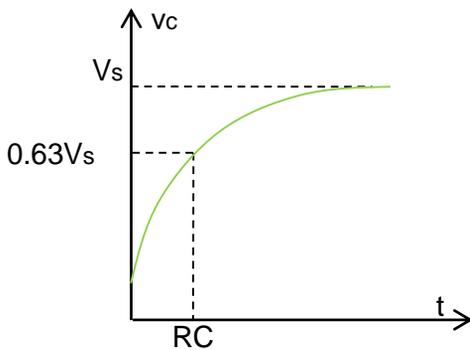
$$E = V_s = iR + \frac{1}{C} \int idt + V_c(t = 0)$$

Si  $V_c(t = 0) = 0$

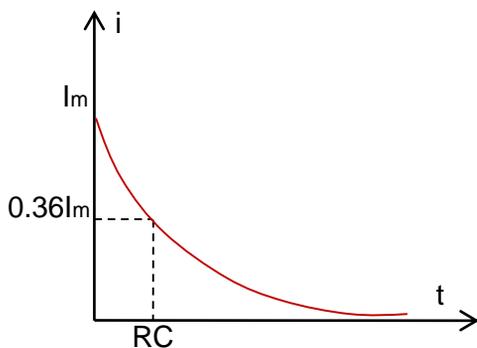
$$i = \frac{V_s}{R} e^{-t/RC} \quad (1.31)$$

$$V_R = V_s e^{-t/RC}$$

$$V_c = V_s (1 - e^{-t/RC}) \quad (1.32)$$



b) Forma de onda de  $v_c$ .



c) Forma de onda de  $i$   
Fig. 1.26 Circuito RC.

Definición:  $\tau = RC$  = Constante de tiempo

$$V_c = V_s (1 - e^{-t/\tau})$$

Para  $t = \tau$ ,  $v_c = 0.632V_s$

$$i = \frac{V_s}{R} e^{-t/\tau} \quad I_m = \frac{V_s}{R}$$

En  $t=0+$  el capacitor se comporta como un corto circuito.

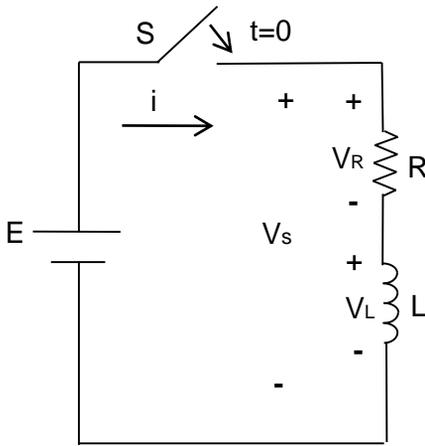
Para  $t = \tau$ ,  $i = 0,368I_m$

$t = 5\tau$ ,  $i = 7 \times 10^{-3}I_m$

Se considera  $t = 5\tau$ , el fin del proceso transitorio

En  $t = 5\tau$ , el capacitor se comporta como un circuito abierto

## 1.6.2 CIRCUITO R-L



a) Circuito

$$E = V_s = iR + L \frac{di}{dt}$$

$$i = \frac{V_s}{R} \left( 1 - e^{-R/Lt} \right) \quad (1.33)$$

$$V_R = V_s \left( 1 - e^{-R/Lt} \right)$$

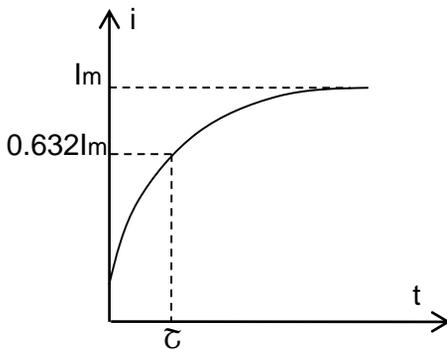
$$V_L = V_s e^{-R/Lt} \quad (1.34)$$

Definición:  $\tau = \frac{L}{R}$  (Constante de tiempo)

Para  $t = \tau$

$$i = I_m \left( 1 - e^{-t/\tau} \right) = 0,632 I_m$$

$$I_m = \frac{V_s}{R}$$



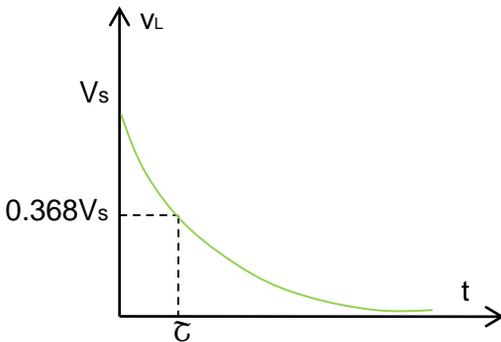
b) Forma de onda de i

En  $t=0+$  el inductor se comporta como circuito abierto.

$$V_L = V_s e^{-t/\tau}$$

Para  $t = \tau, V_L = 0,368 V_s$

$$t = 5\tau, V_L = 7 \times 10^{-3} V_s$$

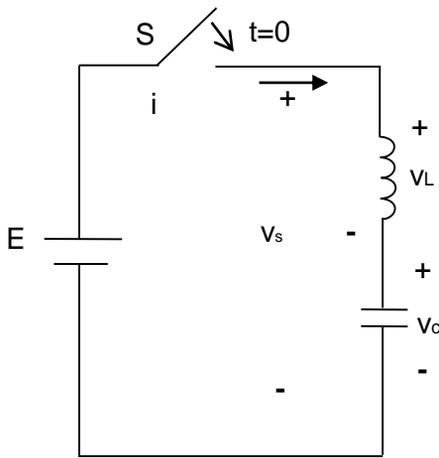


c) Forma de onda de  $v_L$

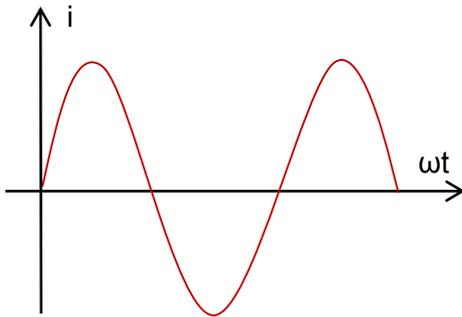
Se considera  $t = 5\tau$  el fin del proceso transitorio..El inductor se comporta como un corto circuito.

Fig. 1.27 Circuito RL

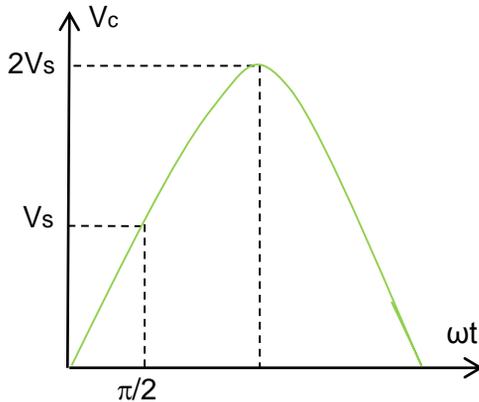
### 1.6.3 CIRCUITO LC



a) Circuito



b) Forma de onda de i



c) Forma de onda de v<sub>c</sub>

$$E = V_s = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + V_c(t = 0)$$

$$i(t = 0) = 0$$

$$V_c(t = 0) = 0$$

El circuito oscila con una frecuencia angular de

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Se transfiere la energía del campo magnético del inductor a la del capacitor y viceversa.

$$i =$$

$$V_s \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_0 t \quad (1.35)$$

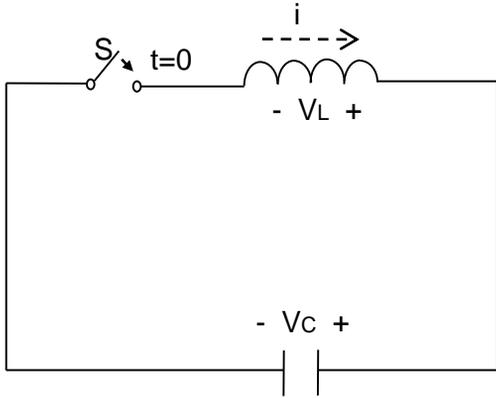
$$V_L = V_s \cos \omega_0 t \quad (1.36)$$

$$V_C = V_s(1 - \cos \omega_0 t) \quad (1.37)$$

En  $t = \frac{\pi\sqrt{LC}}{2}$ , se invierte el voltaje en el inductor, y el voltaje en el capacitor es la suma del voltaje de la fuente, más el del inductor.

Fig. 1.28 Circuito LC .

### 1.6.4 CIRCUITO LC DE FUNCIONAMIENTO LIBRE

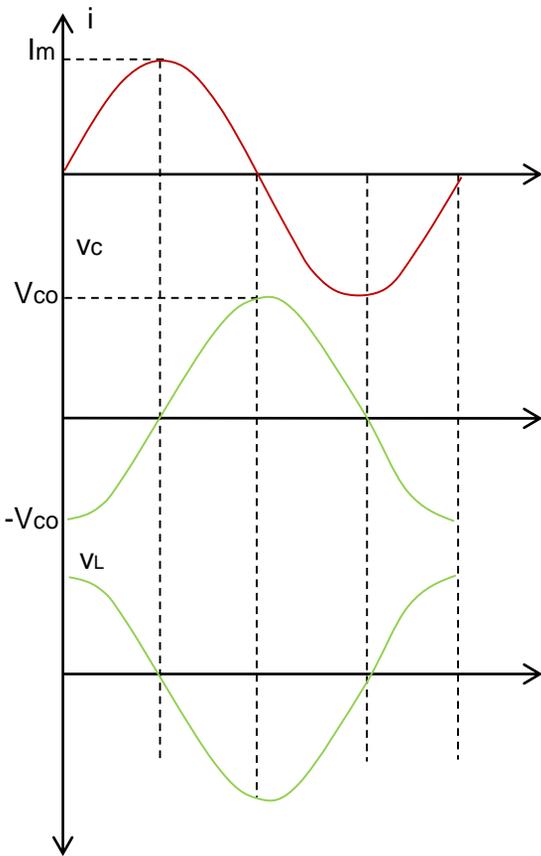


a) Circuito.

$$V_L + V_C = 0$$

$$L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = 0$$

$$V_C(t = 0) = -V_{C_0}$$



b) Forma de onda de  $i, V_c, V_L$

$$0 = L_s I(s) + \frac{1}{sC} I_s + \frac{V_{C_0}}{s}$$

$$I_s = \frac{V_{C_0}}{L(s^2 + 1/LC)} \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

$\omega_0$  = Frecuencia angular de oscilación

$$i(t) = V_{C_0} \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_0 t \quad (1.38)$$

$$I_m = V_{C_0} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega_0 t)$$

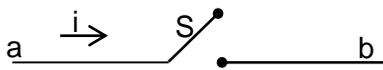
$$V_C = -V_L = -V_{C_0} \cos \omega_0 t \quad (1.39)$$

Este circuito se utilizaba para el apagado forzado de los SCR, cuando se utilizaban en circuitos de corriente continua.

Fig. 1.29 Circuito LC oscilante.

## 1.7 MODELAMIENTO DE INTERRUPTORES

### 1.7.1 CARACTERÍSTICAS DE UN INTERRUPTOR IDEAL



S abierto(  $i = 0$  para cualquier  $V_{ab}$ ).

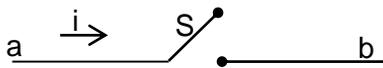


S cerrado(  $V_{ab} = 0$  para cualquier  $i$ ).

El cambio de estado es instantáneo

Fig. 1.30 Interruptor ideal.

### 1.7.2 CARACTERÍSTICAS DE UN INTERRUPTOR REAL



S abierto;  $i$  muy pequeño para  $V_{ab} \leq V_{nom}$

S cerrado,  $V_{ab}$  pequeño para  $I \leq I_{nom}$



Los interruptores se caracterizan por valores nominales de voltaje y corriente, que no se pueden sobrepasar. El cambio de estado no es instantáneo. Los semiconductores de potencia se comportan en un SEP como interruptores reales.

Fig. 1.31 Interruptor real.

### 1.7.3 CARACTERÍSTICAS DE UN INTERRUPTOR EN CONMUTACIÓN

El interruptor conmuta a una frecuencia

$$(f_c) \quad f_c = 1/T_c \quad (1.40)$$

Se define relación de trabajo (D).

$$D = \frac{t_{on}}{T_c} \quad (1.41)$$

$t_{on}$  = tiempo que dura S cerrado

$$t_{off} = (1 - D)T_c \quad (1.42)$$

$t_{off}$  = tiempo que dura S abierto.

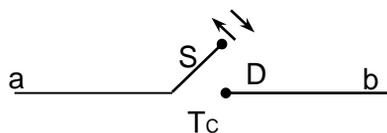
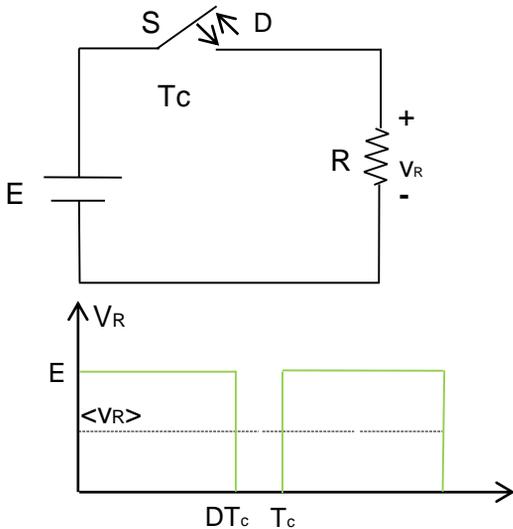


Fig. 1.32. Interruptor conmutado

# 1.8 CIRCUITOS CONMUTADOS CON EXCITACIÓN CONSTANTE

## 1.8.1 CIRCUITO RESISTIVO



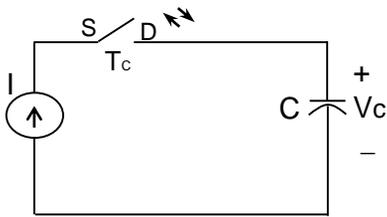
$\langle V_R \rangle =$  Voltaje medio en el resistor

$$\langle v_R \rangle = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} V_R dt$$

$$\langle v_R \rangle = DE \quad (1.43)$$

Fig. 1.33 Circuito resistivo

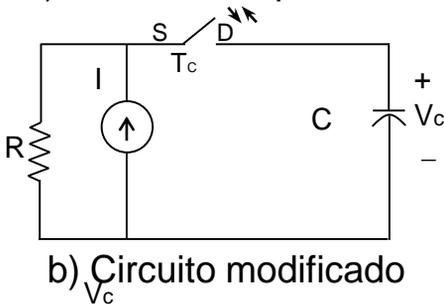
## 1.8.2 CIRCUITO CAPACITIVO



a) Circuito no operativo.

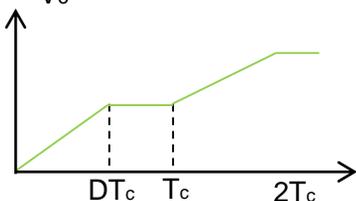
Al cerrar S  $v_c = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{I}{C} t \quad (1.44)$

Al abrir S, desaparece el camino para la corriente, y el voltaje de la fuente tiende a infinito.



b) Circuito modificado

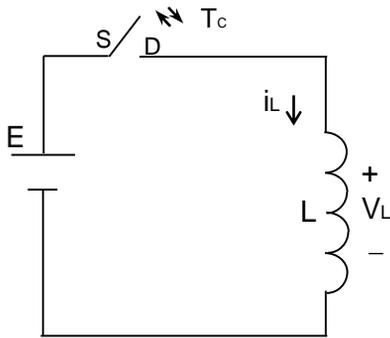
Se debe modificar el circuito, adicionando un resistor en paralelo a la fuente de corriente.



El voltaje en el capacitor no es periódico, sino que crece indefinidamente.

Fig. 1.34 Circuito capacitivo .

### 1.8.3 CIRCUITO INDUCTIVO

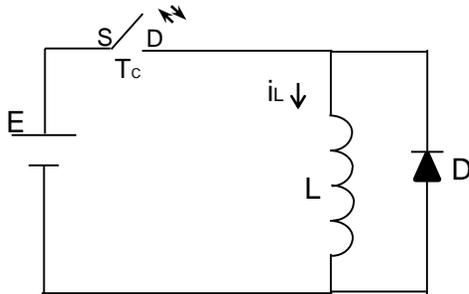


a) Circuito no operativo

Al cerrar S ( $t = 0^+$ )  $v_L = L \frac{di}{dt} = E$

Si  $i(t = 0^-) = 0$

$$i = \frac{E}{L}t \quad (1.45)$$



b) Circuito modificado

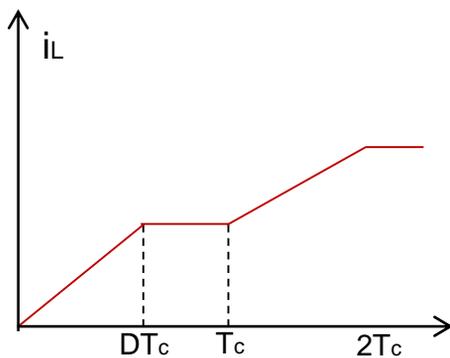
Al abrir S en  $t = t_1$

$$i(t = t_1^-) = \frac{E}{L}t_1; \quad i(t = t_1^+) = 0$$

La corriente desaparece súbitamente

$$\frac{di}{dt} \rightarrow \infty \quad v_L \rightarrow \infty \quad (1.46)$$

El circuito(fig.1.35a) no es operativo (colapsa el aislamiento)



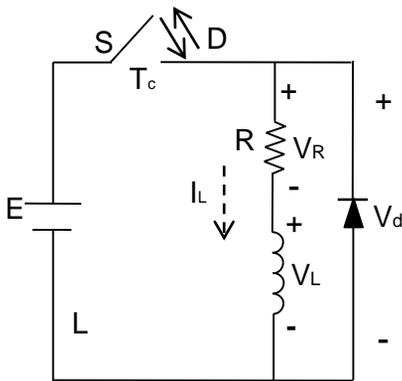
c) Forma de onda de  $i_L$

Se adiciona en antiparalelo con el inductor, un diodo (diodo de rueda libre) para que la corriente sea una función continua (  $di/dt$  es de valor finito).El diodo provee un camino para la corriente, cuando se abre el interruptor.

La corriente en el inductor crece indefinidamente al aumentar el tiempo. Este comportamiento no ocurre en la realidad, por la resistencia del inductor .

Fig. 1.35 Circuito inductivo

### 1.8.4 CIRCUITO R – L



a) Circuito

El diodo de rueda libre provee continuidad en la corriente al abrir S. En régimen permanente la conmutación periódica del interruptor, hace que las variables corriente y voltaje sean periódicas

$$i_L(t) = i_L(t + T)$$

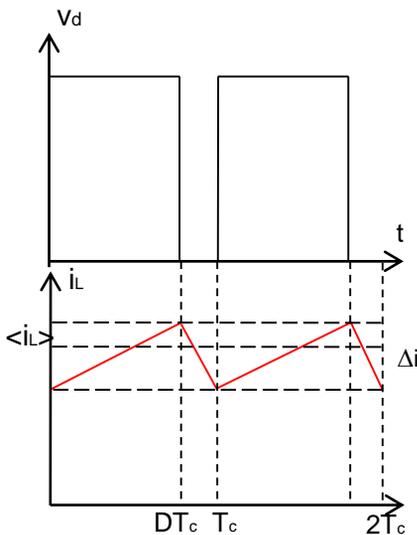
$$\int_t^{t+T} v_L dt = L \int_t^{t+T} di_L = \frac{T}{L} \langle v_L \rangle = 0 \quad (1.47)$$

El voltaje promedio del inductor en régimen permanente es nulo.

Aplicando Kirchhoff para voltajes promedios

$$\langle v_d \rangle = DE = \langle v_L \rangle + \langle v_R \rangle = \langle i_L R \rangle$$

$$\langle i_L \rangle = \frac{DE}{R} \quad (1.48)$$



b) Formas de onda

Para  $0 \leq t \leq DT_c$

$$L \frac{\Delta i_L}{\Delta t} \cong E - \langle i_L R \rangle; \quad \Delta t = DT_c$$

$$\Delta i_L \cong \frac{E(1 - D)DT_c}{L} \quad (1.49)$$

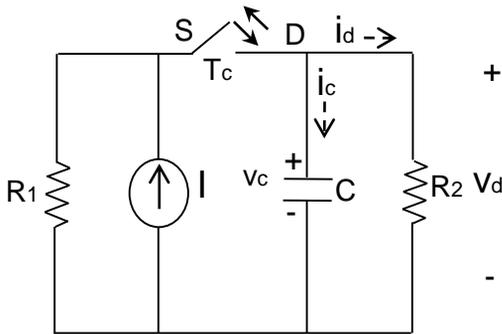
Para  $DT_c \leq t \leq T_c$

$$L \frac{\Delta i_L}{\Delta t} \cong \langle i_L \rangle R; \quad \Delta t = (1 - D)T_c$$

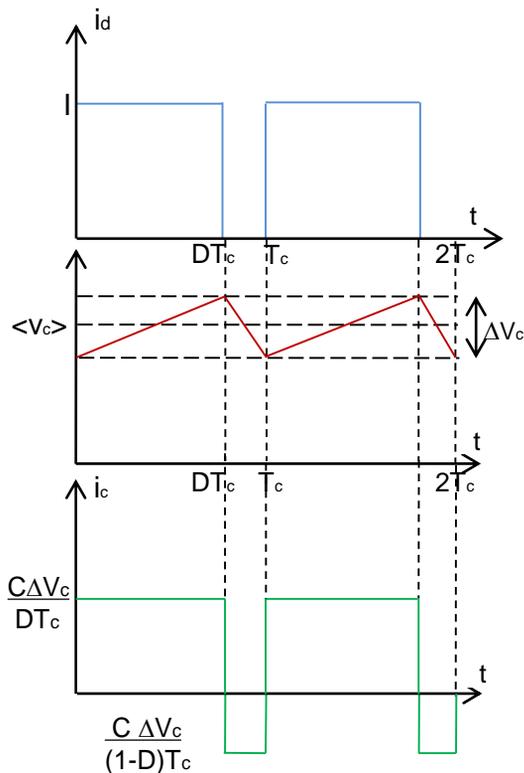
$$\Delta i_L = \frac{DET_c(1 - D)}{L} \quad (1.50)$$

Fig. 1.36 Circuito R – L

## 1.8.5 CIRCUITO RC



a) Circuito



b) Formas de onda en régimen permanente

Fig. 1.37 Circuito R – C conmutado

La conmutación del interruptor hace que las variables de corriente y voltaje sean periódicas, con período igual al de conmutación

$$v_c(t) = v_c(t + T)$$

$$i_c = C dv_c / dt$$

$$\int_t^{t+T} i_c dt = C \int_{v_c(t)}^{v_c(t+T)} dv_c = T \langle i_c \rangle = 0 \quad (1.51)$$

La corriente promedia en un capacitor en régimen permanente es nula. Aplicando Kirchhoff de corrientes, para valores promedios

$$\langle i_d \rangle = \langle i_c \rangle + \langle i_{R2} \rangle = DI$$

$$\langle v_d \rangle = \langle v_c \rangle = \langle i_{R2} \rangle R_2 = DIR_2$$

Para  $0 \leq t \leq DT_c$

$$C \frac{\Delta v_c}{\Delta t} = I - \frac{\langle v_d \rangle}{R_2}$$

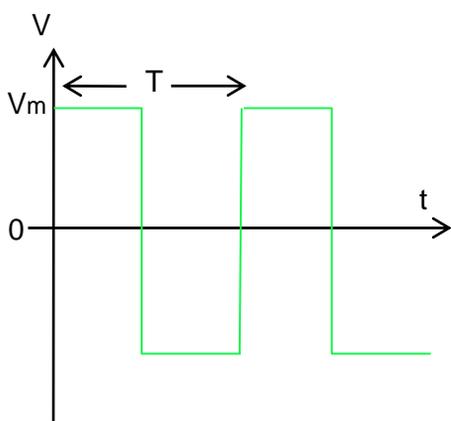
$$\Delta v_c = \frac{I(1-D)DT_c}{C} \quad (1.52)$$

$$DT_c \leq t \leq T_c ; C \frac{\Delta v_c}{\Delta t} = -\langle i_{R2} \rangle$$

$$\Delta v_c = \frac{DT_c(1-D)I}{C} \quad (1.53)$$

## 1.9 CARACTERÍSTICAS DE SEÑALES

### 1.9.1 SEÑALES PERIÓDICAS BIPOLARES



a) Señal alterna cuadrada

Se define por período de una señal periódica, al intervalo de tiempo en el cual la variable adquiere el mismo valor.

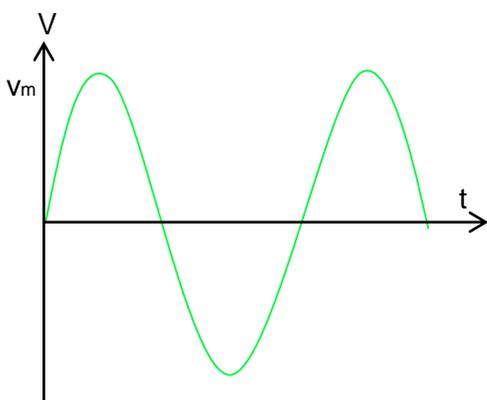
$$v(t) = v(t + T) \quad (1.54)$$

$T$  = período

La señal bipolar es positiva y negativa dentro del período.

Se define valor medio de la señal a:

$$\langle v \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v dt \quad (1.55)$$



b) Señal sinusoidal

Si la señal es simétrica con respecto al eje de las abscisas, el valor medio es nulo.

Se define valor eficaz o r.m.s. a:

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt} \quad (1.56)$$

El valor eficaz se asocia a la transferencia de energía en el circuito

Para la señal alterna cuadrada

$$V_e = V \quad (1.57)$$

Para la señal sinusoidal

$$V_e = V_m / \sqrt{2} \quad (1.57b)$$

Fig. 1.38 Señal periódica bipolar

## 1.9.2 SEÑAL PERIÓDICA UNIPOLAR

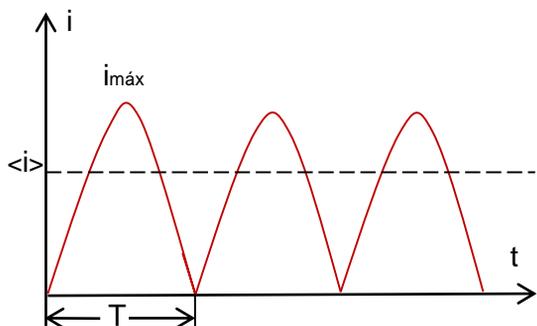


Fig. 1.39 Señal periódica unipolar

$$\langle i \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T i(dt) \neq 0$$

El valor medio se asocia con transferencia de carga.

$$\text{Si } i = \langle i \rangle + i'(t) \quad (1.58)$$

$i'$  = Componente alterna de  $i$  sobre  $\langle i \rangle$ .

Factor de rizado

$$F_r = \frac{I'_e}{\langle i \rangle} \quad (1.59)$$

Factor de forma

$$F_f = \frac{I_e}{\langle i \rangle} \quad (1.60)$$

## 1.9.3 SEÑAL PERIÓDICA PWM

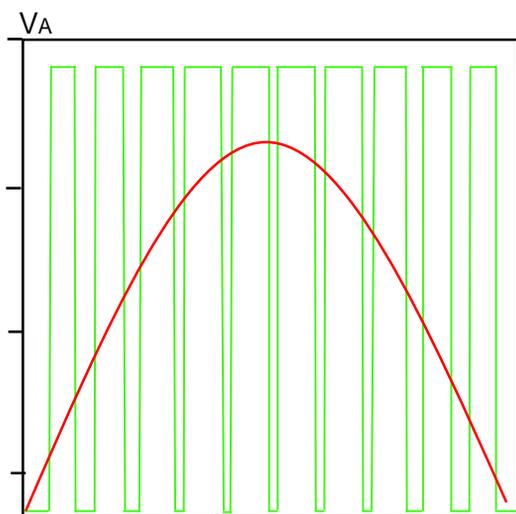


Fig. 1.40 Señal periódica PWM

La modulación del ancho de pulso(PWM), se refiere al control del valor promedio local de una variable conmutada.

$$\langle v_A \rangle = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t v_A(\tau) d\tau \quad (1.61)$$

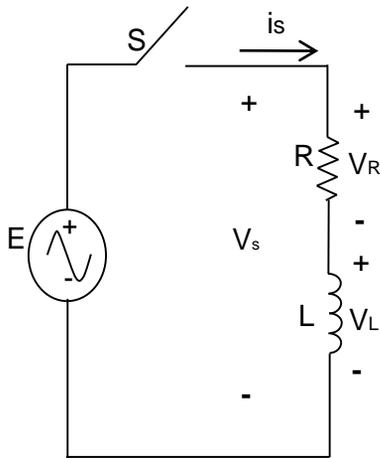
Duración del pulso =  $dT_c$

Para la fig. 1.40,  $d$  varía de acuerdo a una ley sinusoidal

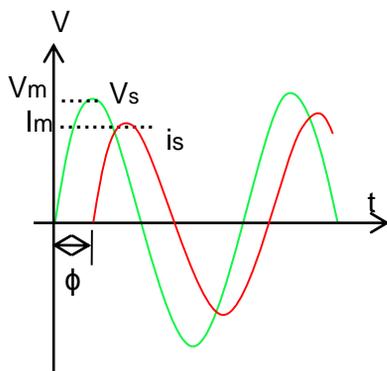
En los convertidores conmutados a alta frecuencia de E.P., las variables presentan componentes de AF debido a la conmutación, y de BF debido a los cambios de la carga o de la fuente

# 1.10 CIRCUITOS CON EXCITACIÓN SINUSOIDAL Y CARGA LINEAL

## 1.10.1 CIRCUITO R-L



a) Circuito



b) Formas de onda

Fig. 1.41 Circuito RL con excitación sinusoidal

### REGIMEN TRANSITORIO

$$v_s = V_m \sin(\omega t) = iR + L \frac{di}{dt}$$

$$\text{Si } i(t = 0) = I_0$$

$$i_s = \left( I_0 + \frac{V_m}{Z} \sin \varphi \right) e^{-Rt/L} + \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) \quad (1.62)$$

$$Z = \sqrt{(\omega L)^2 + R^2} \quad \dots \quad \varphi = \tan^{-1}(\omega L/R)$$

$$(1.63)$$

### REGIMEN PERMANENTE

$$i_s = I_m \sin(\omega t - \phi)$$

$$p(t) = v_s i_s = \frac{V_m I_m}{2} \cos \phi (1 - \cos 2\omega t) -$$

$$\frac{V_m I_m}{2} \sin(\phi) \sin(2\omega t) \quad (1.64)$$

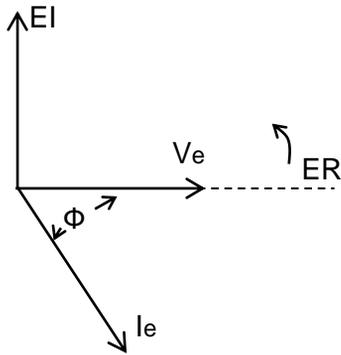
Se define potencia activa o real a la potencia promedio consumida en el circuito

$$\langle p \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = V_e I_e \cos \phi \quad (1.65)$$

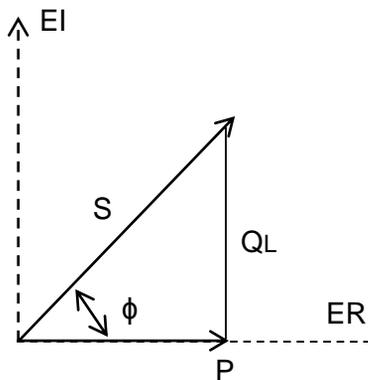
**<p> se asocia al flujo neto de energía, de ahí su nombre: Potencia activa**

## 1.10 CIRCUITOS CON EXCITACIÓN SINUSOIDAL Y CARGA LINEAL

### 1.10.1 CIRCUITO R-L



c) Diagrama fasorial



d) Triángulo de potencias

La potencia reactiva  $q(t)$  se expresa por :

$$q(t) = V_e I_e \sin \phi \sin 2\omega t \quad (1.66)$$

$\langle q(t) \rangle = 0$  (No aporta a la transferencia de energía.).

La demanda de  $q(t)$  se asocia a la generación de campos electromagnéticos

$$\begin{aligned} i_s &= I_m \sin(\omega t - \phi) \\ &= \text{imag}\{I_m e^{-j\phi} e^{j\omega t}\} \end{aligned}$$

$$\vec{I}^s = I_m (e^{-j\phi}) \quad (\text{fasor}) \quad (1.67)$$

La corriente atrasa al voltaje.

El diagrama fasorial del circuito (fig.1.41 c) muestra la posición relativa de la corriente en el circuito, en relación con el voltaje en un plano complejo

Se define potencia aparente(S)

$$S = P + jQ_L = V_e I_e \cos \phi + jV_e I_e \sin \phi$$

$$S = \vec{V}_s I_s^* \quad (1.68)$$

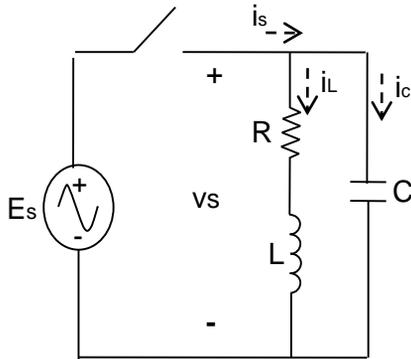
$$F_p = \frac{P}{S} = \cos \phi \quad (1.69)$$

$F_p$ =factor de potencia

Fig. 1.41 Circuito RL excitación sinusoidal

## 1.10.2 CIRCUITO R - L - C

### REGIMEN PERMANENTE



a) Circuito

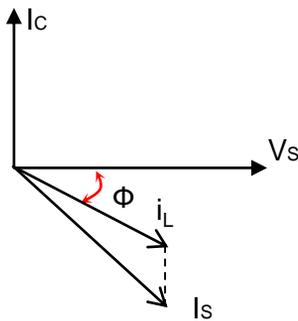
$$v_s = V_m \sin \omega t$$

$$= i_L R + L \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{C} \int i_c dt$$

$$i_s = i_L + i_c \quad (1.70)$$

$$i_s = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \phi)$$

$$Z = (R + jX_L) \parallel X_C ; \phi = \tan^{-1} \frac{X_L - X_C}{R} \quad (1.71)$$

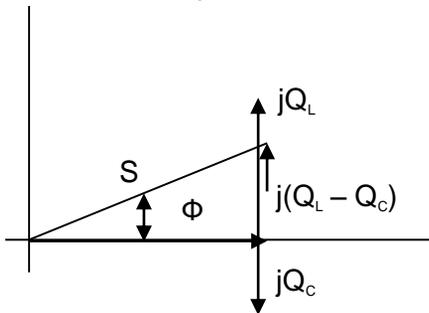


b) Diagrama fasorial

Los requerimientos de potencia reactiva del capacitor y del inductor son opuestos en el tiempo (contrafase). El inductor retorna potencia reactiva a la fuente, cuando el capacitor la solicita.

$$\tan \phi = \frac{(Q_L - Q_C)}{P} \quad (1.72)$$

$$\cos \phi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q_L^2 - Q_C^2)}} \quad (1.73)$$



d) Triángulo de potencias

Los requerimientos de potencia reactiva de una carga R-L, asociados a la generación del campo magnético (B), se pueden proveer mediante los reactivos demandados por un capacitor, asociados a la generación del campo eléctrico (E.)

Fig. 1.42 Circuito R LC con excitación sinusoidal

En E.P. ocurren situaciones, en las cuales la demanda de reactivos, no está asociada a la generación de campos eléctricos o magnéticos.

## 1.11 FLUJO DE POTENCIA EN REDES NO LINEALES Y EXCITACIÓN NO SINUSOIDAL 7

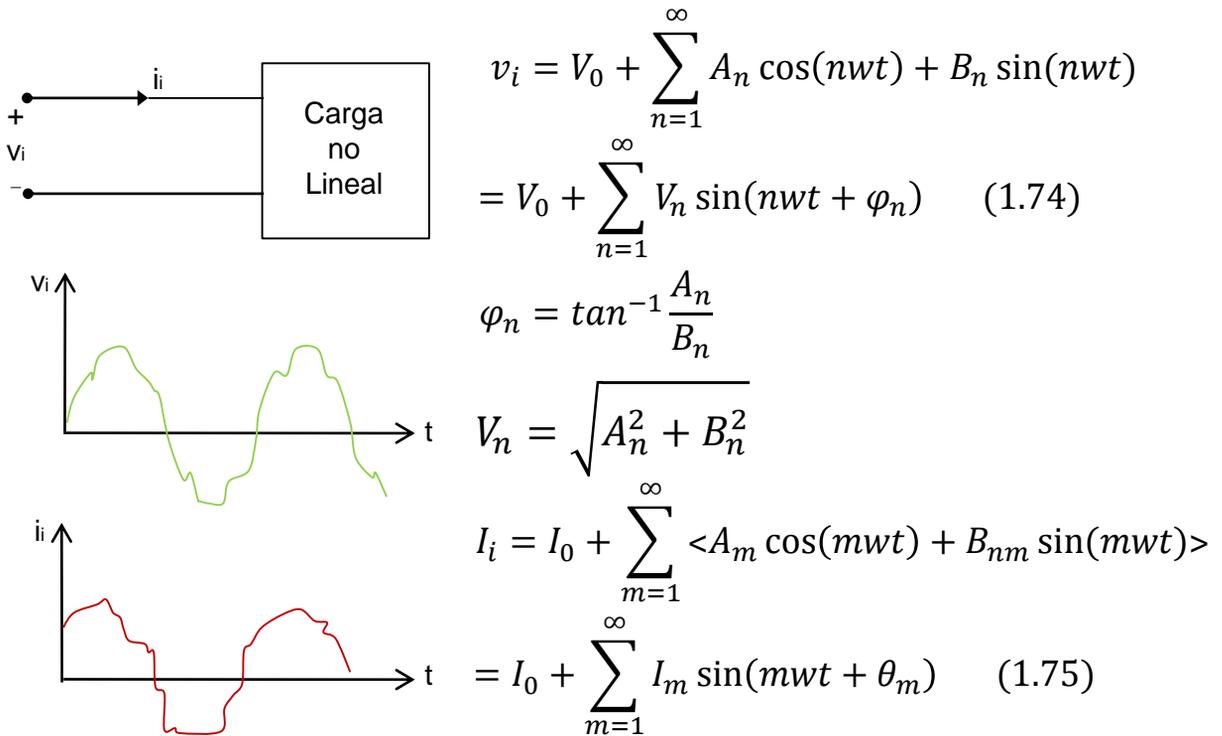


Fig. 1..43 Formas de onda  $\theta_m = \tan^{-1} \frac{A_m}{B_m}$  ;  $I_m = \sqrt{A_m^2 + B_m^2}$  de un circuito no lineal con excitación no sinusoidal.

$$\langle p \rangle = P_i = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T v i dt \quad (1.76)$$

$$\int_0^{2\pi} \sin(nx) \sin(mx) dx = \int_0^{2\pi} \cos(nx) \cos(mx) dx = \pi \delta_{mn}$$

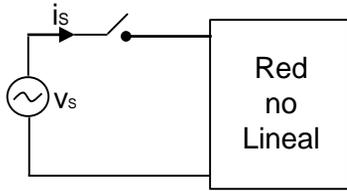
$$\int_0^{2\pi} \sin(mx) \cos(nx) dx = 0 \quad \delta_{mn} = \begin{cases} 0 & m \neq n \\ 1 & m = n \end{cases}$$

con

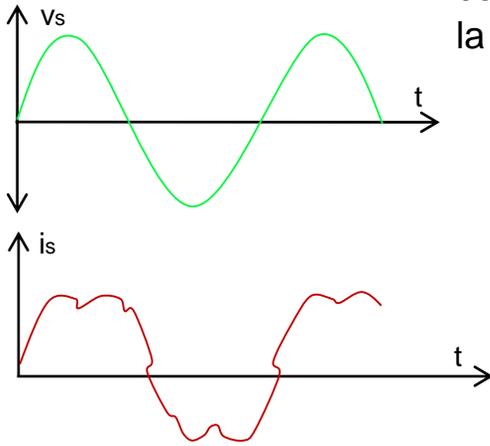
$$P_i = V_0 I_0 + \frac{V_1 I_1}{2} \cos(\varphi_1 - \theta_1) + \frac{V_2 I_2}{2} \cos(\varphi_2 - \theta_2) + \dots \quad (1.77)$$

Solamente las componentes de igual frecuencia de la corriente y el voltaje, contribuyen a la transferencia de energía.

## 1.12 FACTOR DE POTENCIA Y DISTORSIÓN DE CIRCUITOS CON FUENTE SINUSOIDAL Y CARGA NO LINEAL



En una carga no lineal, si la excitación (voltaje) es sinusoidal, la respuesta (corriente) no es sinusoidal, y si la potencia de la carga es pequeña comparada con la fuente, la distorsión de la corriente afecta muy poco al voltaje.



$$v_s = \sqrt{2}V \sin(\omega t)$$

$$i_s = \sum_{n=0}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

$$\langle p \rangle = P = \frac{1}{T} \int_0^T v_s i_s dt = VI_1 \cos \varphi_1$$

Fig. 1.44 Formas de onda de un circuito no lineal y excitación sinusoidal

$$P = F_p S = VI_e \frac{I_1}{I_e} \cos \varphi_1 = F_d F_\varphi S \quad (1.78)$$

$$F_p = P/S$$

Factor de potencia (1.78a)

$$F_\varphi = \cos \varphi_1$$

Factor de desfase (1.78b)

$$F_d = I_1/I_e$$

Factor de distorsión (1.78c)

$$I_e = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}$$

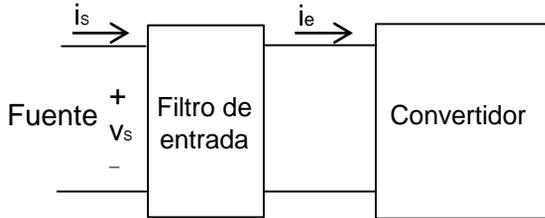
Corriente eficaz de la fuente (1.79)

$$THD = \text{Distorsión total de armónicos} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \quad (1.80)$$

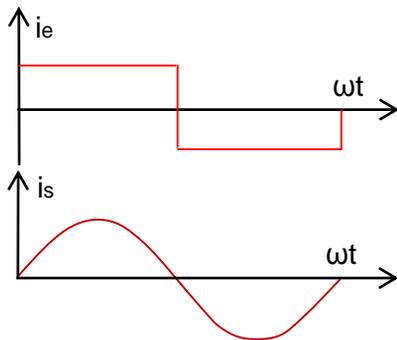
$$THD = \sqrt{\frac{I_e^2 - I_1^2}{I_1^2}} = \sqrt{\left(\frac{I_e}{I_1}\right)^2 - 1} = \sqrt{\frac{1}{F_d^2} - 1} \quad (1.81)$$

## 1.13 FILTROS

### 1.13.1 FILTRO DE ENTRADA



a) Diagrama de bloques



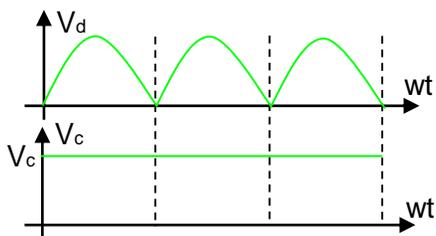
b) Formas de onda

Fig. 1.45 a) Filtro de entrada

### 1.13.2 FILTRO DE SALIDA



a) Diagrama de bloques



b) Formas de onda

Fig. 1.45 b) Filtro de salida de un SEP.

La naturaleza de la carga y el modo de operación del convertidor, distorsionan la corriente de entrada ( $i_e$ ) al convertidor ( $\text{THD} \neq 0$ ) y a su vez la que demanda de la fuente. Se originan armónicos de corriente, que generan interferencia electromagnética y una condición de transferencia de energía, indeseable para la fuente.

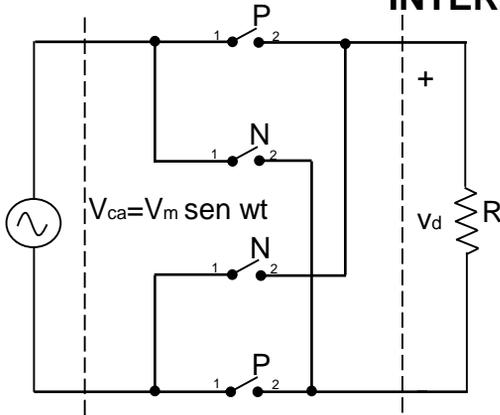
El filtro de entrada ideal debe producir una corriente en la fuente ( $i_s$ ) libre de armónicos ( $\text{THD} = 0$ ), para evitar la interferencia electromagnética en los equipos adyacentes, y mejorar la transferencia de energía, reduciendo el THD y el factor de potencia

El voltaje de salida del convertidor ( $v_d$ ) presenta una forma de onda con un  $F_r$  diferente de cero.

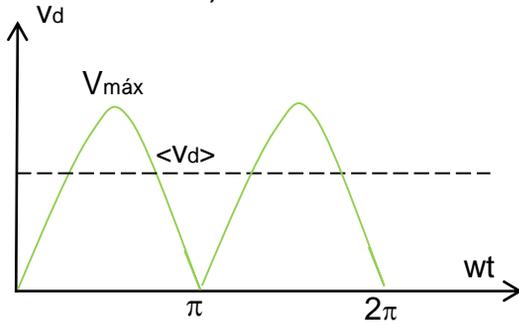
En algunos convertidores la carga requiere un voltaje constante ( $F_r=0$ ), en otros un voltaje sinusoidal, y el filtro de salida ideal, debe transformar el voltaje de salida del convertidor, al voltaje ideal requerido por la carga. Los elementos del filtro son inductores y capacitores.

# 1.14 TOPOLOGÍAS DE CIRCUITOS CONVERTIDORES

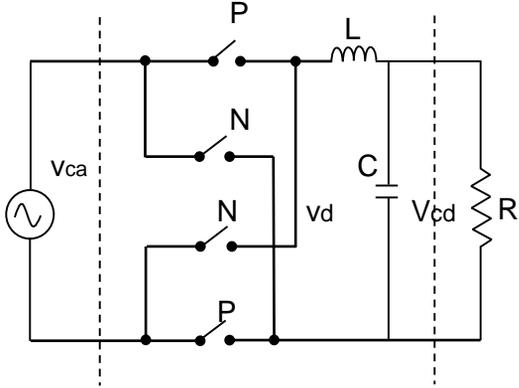
## 1.14.1 CONVERTIDOR CA/CD NO CONTROLADO CON CUATRO INTERRUPTORES



a) Circuito



b) Forma de onda



c) Convertidor con filtro LC

Los interruptores P cierran cuando se inicia el semiperíodo positivo, y los N con el semiperíodo negativo.

Los interruptores P y N son complementarios ( $D_P + D_N = 1$ ) y ( $D_P = D_N$ )

El voltaje promedio en la carga es :

$$\langle v_d \rangle = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin(\omega t) d(\omega t)$$

$$\langle v_d \rangle = \frac{2V_m}{\pi} \quad (1.82)$$

La serie de Fourier de  $v_d$  es :

$$v_d = \frac{2V_m}{\pi} - \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4}^{\infty} \frac{1}{(n-1)(n+1)} \cos(n\omega t) \quad (1.83)$$

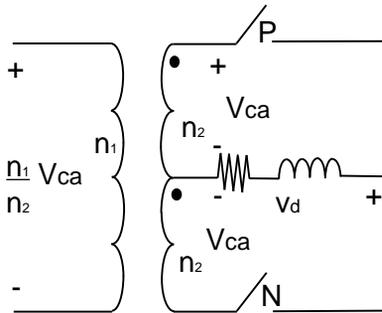
El armónico dominante es  $n=2$ . Para minimizar éste armónico se utiliza un Filtro LC. La función de L es “atrapar” los armónicos de voltaje y la función de C es servir de derivación a los armónicos de corriente , para minimizar el factor de rizado en la carga

El cálculo de L y C se hará en la unidad III

Fig. 1.46 Convertidor CA/CD no controlado.

# 1.14 TOPOLOGÍAS DE CIRCUITOS CONVERTIDORES

## 1.14.2 CONVERTIDOR CA/CD NO CONTROLADO CON DOS INTERRUPTORES



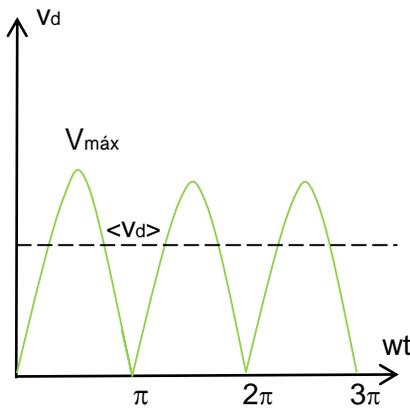
a) Circuito

Se requieren dos fuentes conectadas en serie (dos arrollamientos iguales del secundario) y dos interruptores un P y un N (fig.1.47a). Al iniciarse el semiperíodo positivo cierra P, y al iniciarse el semiperíodo negativo cierra N. Las fuentes trabajan alternadamente.

$$v_{ca} = V_m \sin(\omega t)$$

$$\langle v_d \rangle = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin(\omega t) d\omega t$$

$$\langle v_d \rangle = \frac{2V_m}{\pi} \tag{1.82}$$



b) Forma de onda

La serie de Fourier de  $v_d$  es:

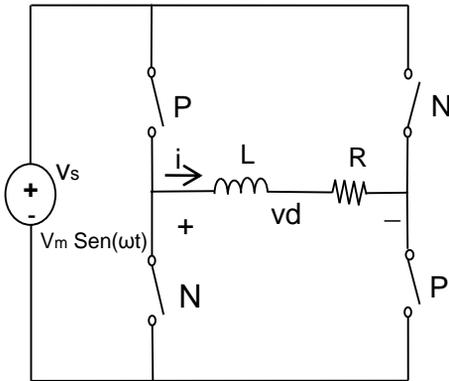
$$v_d = \frac{2V_m}{\pi} - \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4}^{\infty} \frac{1}{(n-1)(n+1)} \cos(n\omega t) \tag{1.83}$$

Cada fuente transporta corriente solamente durante un semiperíodo. La operación de este convertidor es idéntica al convertidor que utiliza 4 interruptores.

En la práctica las dos fuentes en serie se obtienen con un transformador, cuyo secundario tiene una bobina con derivación intermedia (fig.1.47 a)

Fig. 1.47 Convertidor CA/CD no controlado con 2 interruptores

### 1.14.3 CONVERTIDOR CA/CD CONTROLADO 5

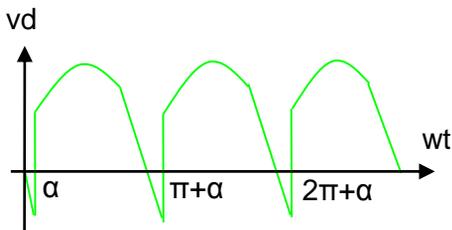


a) Circuito

Los interruptores P, cierran en  $wt = \alpha$ , después de iniciado el semiperíodo positivo, y los interruptores N cierran en  $wt = (\pi + \alpha)$ .

Los interruptores P y N son complementarios ( $D_p + D_n = 1$ ), y tienen idéntica relación de trabajo ( $D_p = D_n$ )

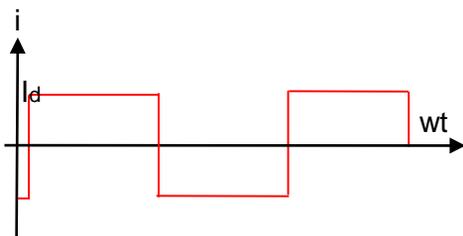
$$\text{Si } \frac{L}{R} \geq 10 \times \frac{\pi}{\omega} \rightarrow i_d \cong I_d$$



b) Forma de onda del voltaje de salida.

$$\langle v_d \rangle = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \sin(\omega t) d(\omega t)$$

$$\langle v_d \rangle = \frac{2}{\pi} V_m \cos \alpha \quad (1.84)$$



c) Forma de onda de corriente en la fuente.

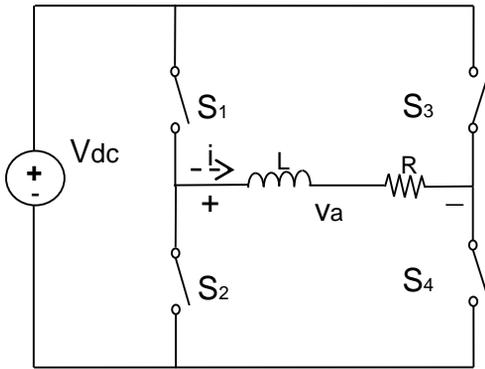
Para  $\alpha$  menor a  $90^\circ$   $v_d$  es positivo y la energía fluye de CA a CD, en régimen permanente (rectificador). Para  $\alpha$  menor a  $180^\circ$  y mayor a  $90^\circ$ ,  $v_d$  es negativo y la energía fluye de CD a CA en régimen transitorio (Inversor), debido a la limitada capacidad de energía del inductor.

La naturaleza altamente inductiva de la carga ( $\omega L > 10\pi R$ ) distorsiona la corriente de la fuente alterna, transformándola en una corriente alterna rectangular, lo que degrada el factor de potencia de la fuente

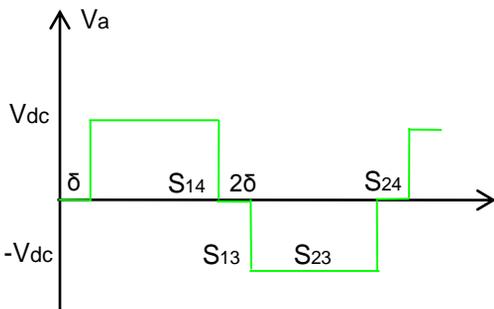
Fig. 1.48 Convertidor CA/CD controlado.

Los interruptores deben tener capacidad para soportar voltaje bipolar.

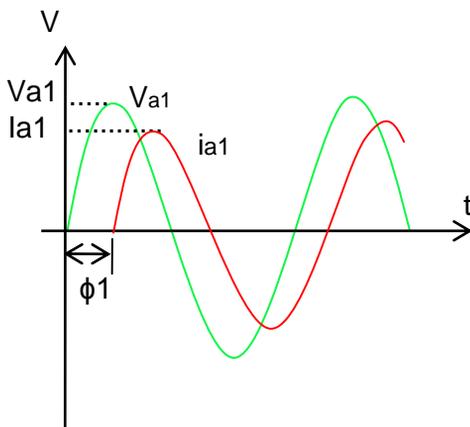
### 1.14.4 CONVERTIDOR CD/CA CONMUTACION BAJA FRECUENCIA 5



a) Circuito



b) Voltaje de salida.



b) Formas de onda

Si  $v_a$  es de baja frecuencia, los interruptores conmutan a baja frecuencia. Los interruptores deben tener capacidad bidireccional de corriente. (1.85)

$$V_{ac} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_{\delta}^{\pi-\delta} V_{dc}^2 d(\omega t)} = V_{dc} \sqrt{1 - \frac{2\delta}{\pi}}$$

El estado  $v_a = 0$  ( $S_1$  y  $S_3$ , o  $S_2$  y  $S_4$  cerrados) tiene una duración de  $2\delta$ .

Si  $\omega L \leq R$  se pueden ignorar los armónicos de  $i_a$

$$i_a = I_{a1} \sin(\omega t - \theta_1); \theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

$$I_{a1} = \frac{V_{a1}}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}}; \quad (1.86)$$

$$V_{a1} = \frac{2V_{dc}}{\pi} \int_{\delta}^{\pi-\delta} \sin(\omega t) d\omega t \quad (1.87)$$

$$V_{a1} = \frac{4V_{dc}}{\pi} \cos \delta$$

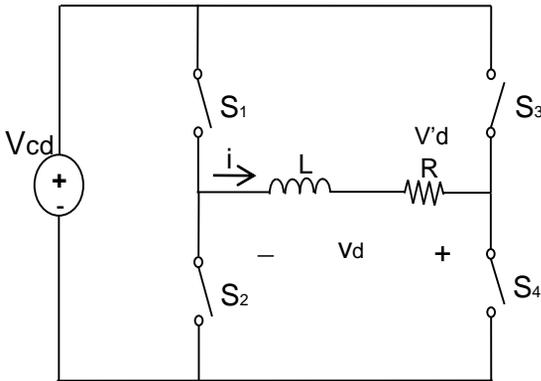
$$\langle P \rangle = P = \frac{V_{a1} I_{a1}}{2} \cos \theta_1 \quad (1.88)$$

$$P = \frac{8V_{dc}^2}{\pi^2 \sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} \cos^2 \delta \cos \theta_1$$

Fig. 1.49 Convertidor CD/CA conmutado a baja frecuencia.

$\theta_1$  depende de la naturaleza de la carga.  $\delta$  es la variable de control de la potencia

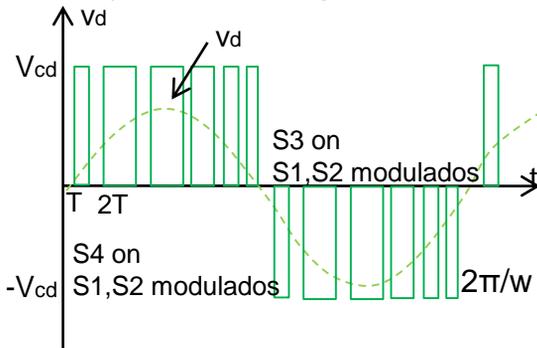
### 1.14.5 CONVERTIDOR CD/CA CON MODULACIÓN DEL ANCHO DE PULSO ( PWM) 5



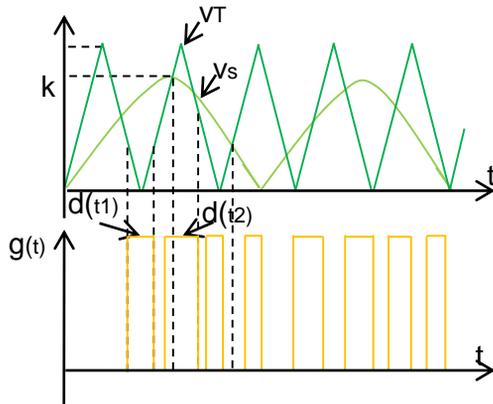
Los interruptores  $S_1$  y  $S_2$  conmutan a alta frecuencia( $T$ ) con una relación de trabajo( $d$ ) variable, según una ley sinusoidal. $S_3$  y  $S_4$  conmutan a baja frecuencia. $S_1$  funciona con  $S_4$  y  $S_2$  con  $S_3$

$$d(t) = K|\sin(\omega t)| \quad (1.89)$$

a) Circuito de potencia



b) Formas de onda en la carga(5)



c) Formas de onda del circuito de control(5)

$K$  = magnitud de modulación. Es la amplitud de la señal rectificad de  $\sin(\omega t)(v_s)$  del circuito de control

La frecuencia del voltaje en la carga es la de conmutación de  $S_3$  y  $S_4$

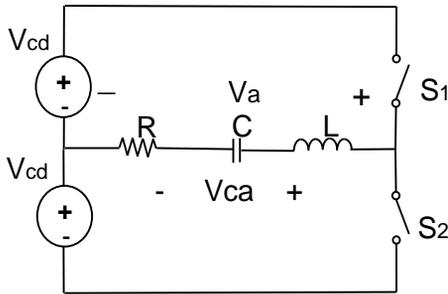
La forma de onda de  $v_d$  está conformada por pulsos, cuya duración varía con una ley sinusoidal, lo que determina que el valor promediado durante el tiempo que dura el pulso(valor promedio local) es sinusoidal ( $v'd$ )

El inductor actúa como filtro para la corriente de alta frecuencia. La amplitud de la fundamental del voltaje en la carga se varía con  $K$ .

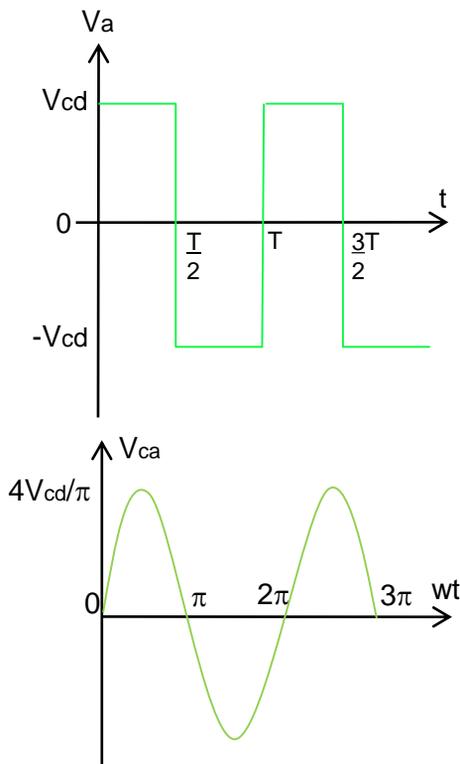
Todos los interruptores deben tener capacidad bidireccional de corriente, para permitir el flujo de potencia reactiva de la carga a la fuente.

Fig. 1.50 Convertidor CD/CA PWM

### 1.14.6 CONVERTIDOR CD/CA RESONANTE 5



a) Circuito



b) Formas de onda de voltaje

Utiliza dos interruptores conmutados (S1 y S2) y un filtro resonante (L-C) en serie con la carga, cuya función de transferencia varía significativamente con la frecuencia.

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$$

$$Z = \frac{1 - \omega^2 LC + j\omega CR}{j\omega C}$$

$$Y(j\omega) = \frac{j\omega C}{1 - \omega^2 LC + j\omega CR} \quad (1.90)$$

$\omega$  = Frecuencia de conmutación de los interruptores = frecuencia angular del voltaje en la carga

$$v_a = \sum_{n=1,3,5} \frac{4V_{cd}}{n\pi} \sin(n\omega t) \quad (1.91)$$

$$v_{ca} = v_a Y(j\omega) R$$

Si  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$  (resonancia)  $\rightarrow$

$$|V_{ca}| \cong V_{a1} = \frac{4}{\pi} V_{cd} \quad (1.92)$$

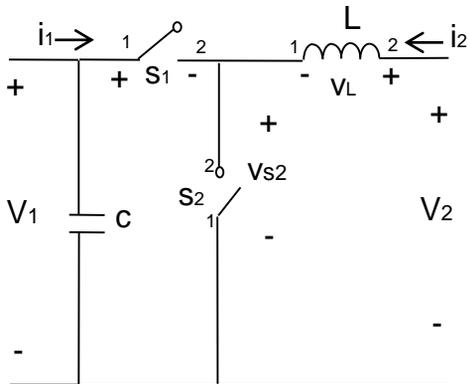
$V_{a1}$  = Amplitud de la componente fundamental. El voltaje en la carga es bastante sinusoidal. Variando  $\omega$ , se regula la potencia entregada a la carga, pero se distorsiona el voltaje

Esta topología se utiliza con alta frecuencia de conmutación, para aplicación en hornos de inducción.

Fig. 1.51 Convertidor CD/CA resonante

## 1.14.7 CONVERTIDOR CD/CD – ALTA FRECUENCIA DE CONMUTACIÓN

### 1.14.7.1 CONVERTIDOR CD/CD DIRECTO 5



a) Circuito

$D$  es la relación de trabajo de  $S_1$  y por ser  $S_2$  complementario, su relación de trabajo es  $(1 - D)$ .

Si la transferencia de energía es de 1 hacia 2, se infiere:

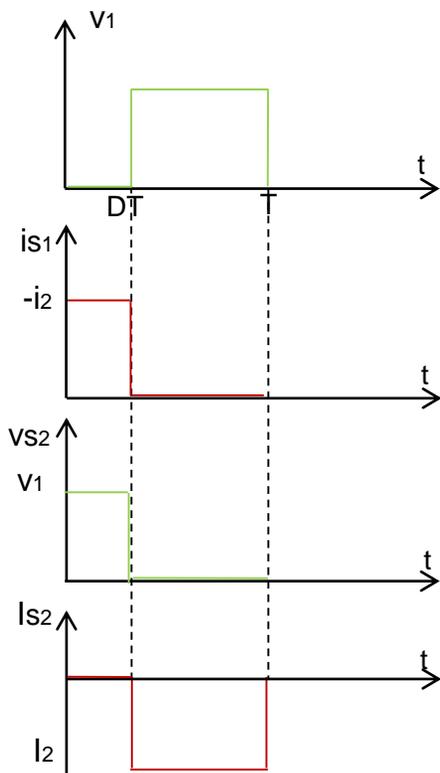
$$v_1 > 0 \rightarrow i_1 > 0 ; v_2 > 0 \rightarrow i_2 < 0$$

Se denomina convertidor directo, por que hay un camino para la corriente CD entre el puerto 1 y el 2.

$$\langle v_{s2} \rangle + \langle v_L \rangle = \langle v_2 \rangle = V_2$$

$$\langle v_{s2} \rangle = DV_1 ; 0 \leq D \leq 1.0 \quad (1.93)$$

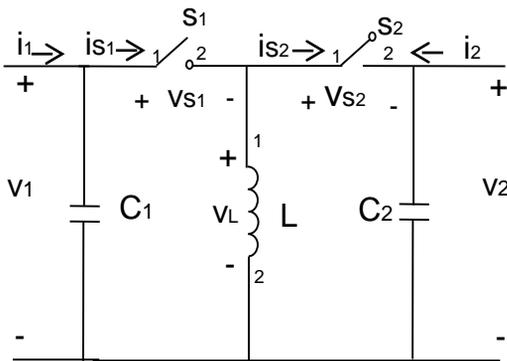
$V_2 < V_1$  (convertidor reductor). Si el flujo de energía es de 2 a 1, el convertidor es elevador.



b) Formas de onda  
Fig. 1.52 Convertidor  
CD/CD directo

Para minimizar el rizado de corriente en el puerto de entrada ( $i_1$ ), se coloca un capacitor a la entrada, y para minimizar el rizado del voltaje de salida ( $v_2$ ), se coloca un inductor en serie con la carga. Para minimizar el tamaño del filtro ( $L, C$ ), se utilizan altas frecuencias de conmutación, en el orden de decenas de khz. Una aplicación típica de este convertidor (fly-back) es en la fuente de poder de TV, computadoras etc.

### 1.14.7.2 CONVERTIDOR CD/CD INDIRECTO



No existe un camino para la corriente CD, entre el puerto 1 y el 2.

Si la transferencia de energía es del puerto 1 al 2, se infiere:

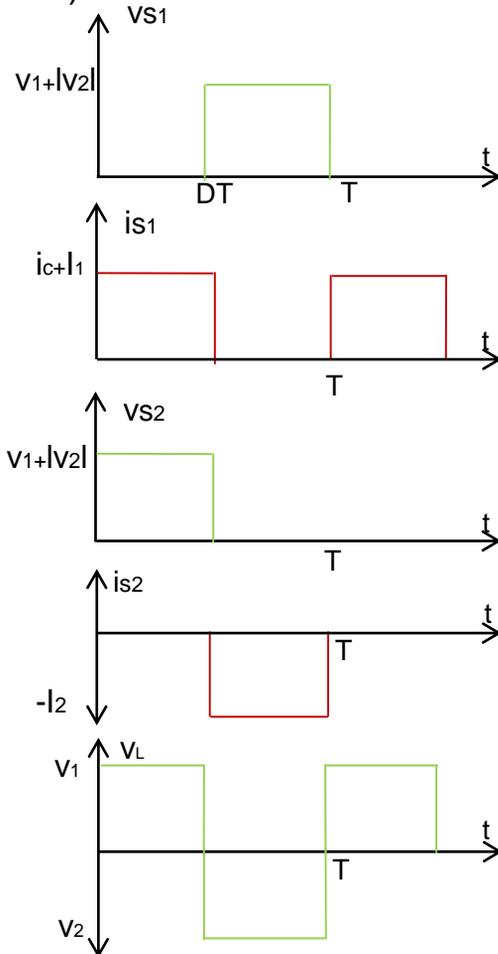
$$v_1 i_1 > 0 \quad \text{y} \quad v_2 i_2 < 0$$

De la forma de onda de  $v_L$ , se infiere:

$$\langle v_L \rangle = V_1 D T + V_2 (1 - D) T = 0$$

$$V_2 = -V_1 \frac{D}{1 - D} \quad (1.92)$$

a) Circuito



El convertidor invierte el voltaje;

Si  $D \geq 0,5$ ;  $|V_2| > V_1$  (elevador)

Si  $D \leq 0,5$ ;  $|V_2| < V_1$  (reductor)

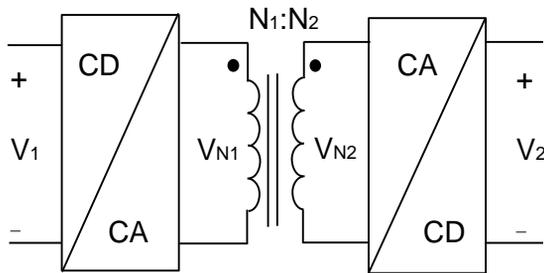
L atrapa los armónicos de voltaje, para que no aparezcan en el puerto de salida ( $v_2$ ).

$C_1$  y  $C_2$  forman un bypass (derivación) a las armónicas de corriente, para que no aparezcan en el puerto de entrada.  $C_1$  contribuye a reducir la impedancia del puerto 1.

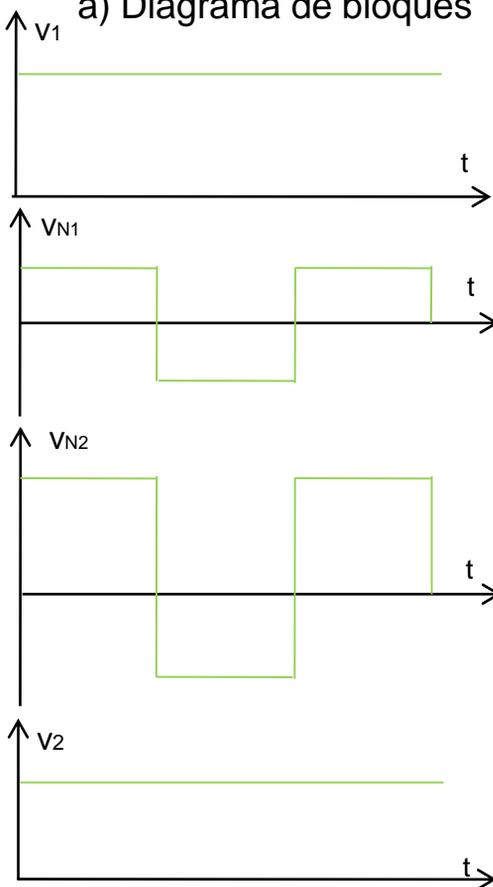
El convertidor cambia de reductor a elevador, variando la relación de trabajo.

Fig. 1.53 Convertidor CD/CD buck/boost

### 1.14.7.3 CONVERTIDOR CD/CD CON ENCADENAMIENTO CA



a) Diagrama de bloques



b) Formas de onda

Fig. 1.54 Convertidor CD/CD con encadenamiento en CA.

Los convertidores de alta frecuencia de conmutación tienen un límite para el voltaje de salida, debido al parámetro de esfuerzos ( $V_{pico} * I_{pico}$ ) de los semiconductores. Al sobrepasar estos valores, se destruye el dispositivo

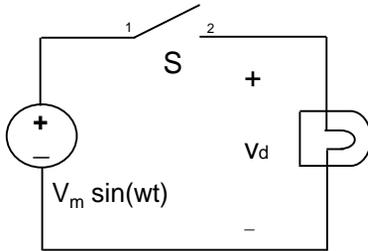
Para obtener relaciones altas entre el voltaje de salida al de entrada, se utiliza.

- a) Un convertidor CD/CA
- b) Un transformador para cambiar el nivel de voltaje y aislar eléctricamente la salida de la entrada. La limitación del convertidor la determina la capacidad de aislamiento del transformador
- c) Un convertidor CA/CD

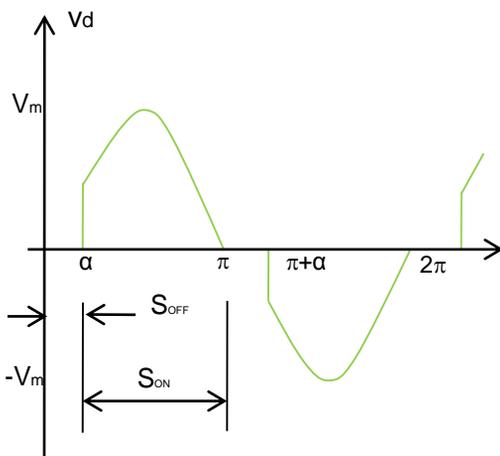
La desventaja es el mayor costo por duplicidad de semiconductores, filtros y sistemas de control.

## 1.14.8 CONVERTIDORES CA/CA

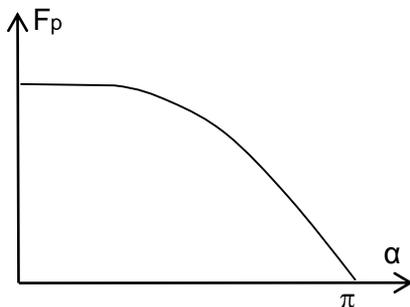
### 1.14.8.1 CONVERTIDOR CA/CA – CONTROLADOR CA 1



a) Circuito



b) Forma de onda



c) Factor de potencia

El controlador CA es la topología más simple del convertidor CA/CA. Se modifica el voltaje eficaz de C.A. en la salida, eliminando pedazos simétricos del semiperíodo positivo y del negativo del voltaje de entrada (fig. 1.55b).

$$V_d = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \sin^2(wt) d(wt)}$$

$$V_d = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \sin \frac{2\alpha}{2} \right)} \quad (1.95)$$

Para carga resistiva

$$F_p = \frac{P}{S} = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha} \quad (1.96)$$

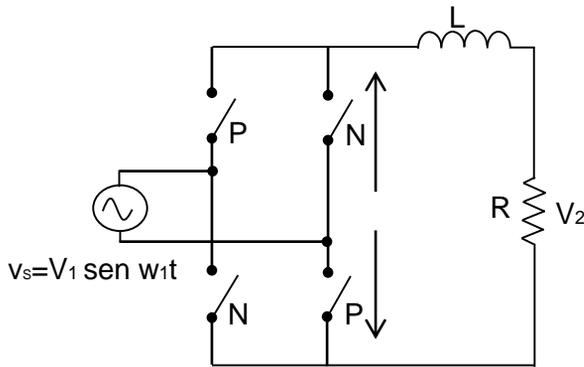
$\alpha$ , el ángulo de disparo, es un factor operativo.

La frecuencia del voltaje de salida es la misma frecuencia de entrada. **La potencia reactiva que demanda este sistema, no está asociada a la generación de campos magnéticos.**

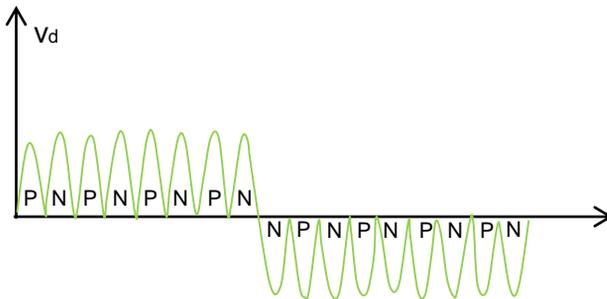
Las aplicaciones típicas del controlador son para regular la luz incandescente (dimmer), y para controlar la velocidad de pequeños motores universales.

Fig. 1.55 Controlador CA

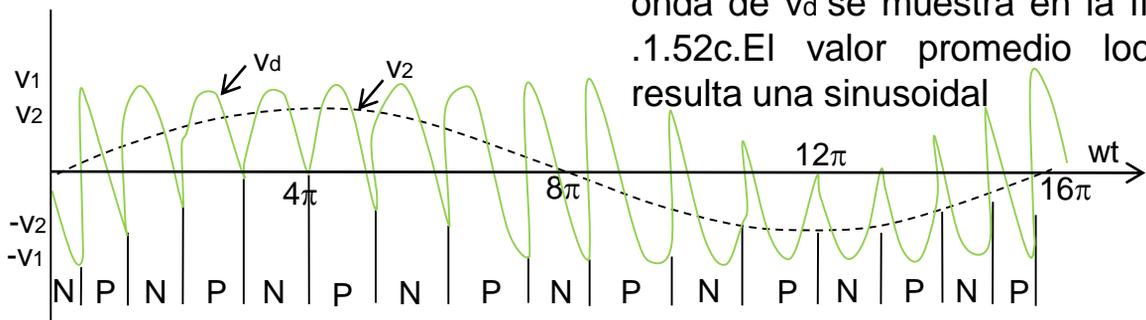
### 1.14.8.2 CONVERTIDOR CA/CA – CICLOCONVERTIDOR



a) circuito



b) Forma de onda con  $\alpha=0$



c) Formas de onda con  $\alpha$  variando sinusoidalmente

Si el filtro cumple con  $\frac{2\pi}{\omega_2} \gg \frac{L}{R} \gg \frac{2\pi}{\omega_1}$ ,  $v_2$  es casi sinusoidal.

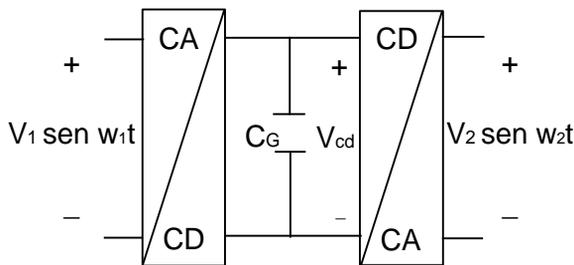
Utiliza una topología idéntica al convertidor CA/CD. Para que  $v_2$  sea positivo, se cierran los interruptores P cuando  $v_1$  es positivo, y los interruptores N cuando  $v_1$  es negativo. El voltaje  $v_2$  será negativo si se cierran los interruptores P cuando  $v_1$  es negativo y los N cuando  $v_1$  es positivo.

Si los interruptores P están sincronizados con el inicio del semiperíodo positivo, y los N con el inicio del semiperíodo negativo ( $\alpha = 0$ ), la forma de onda de  $v_d$  se muestra en la fig.1.55b.

Si se controla el ángulo, al cual se cierran los interruptores ( $\alpha$ ) de acuerdo a una ley sinusoidal,  $\alpha = K |\sin(\omega t)|$ , la forma de onda de  $v_d$  se muestra en la fig. .1.52c. El valor promedio local resulta una sinusoidal

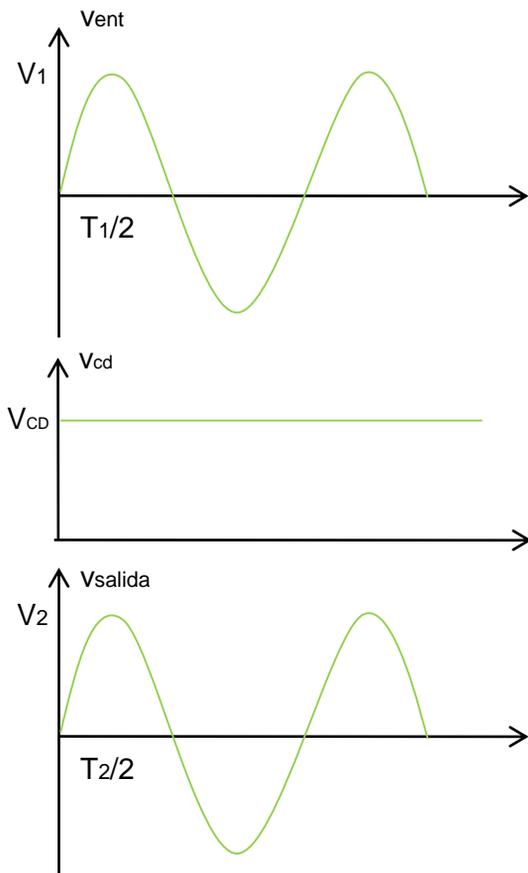
Fig. 1.56 Ciclo-convertidor

### 1.14.8.3 CONVERTIDOR CA/CA CON ENCADENAMIENTO CD



Utiliza un convertidor CA/CD y un convertidor CD/CA encadenados en CD, por un capacitor o por una batería. Si el encadenamiento CD utiliza un capacitor  $V_2$  y  $w_2$  son diferentes de  $V_1$  y  $w_1$ .

a) Diagrama de bloques



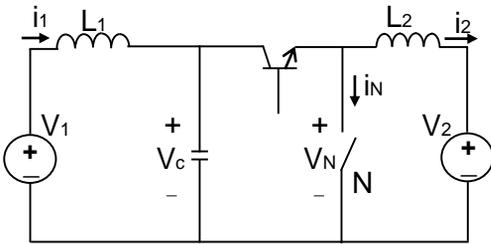
b) Formas de onda.

Sí el convertidor se utiliza como variador de velocidad de motores polifásicos de inducción,  $V_2$  y  $w_2$  deben ser variables y se debe mantener constante la relación  $V_2/w_2$ , para impedir la saturación del circuito magnético del motor, en el caso que se utilice el control escalar para la variación de la velocidad

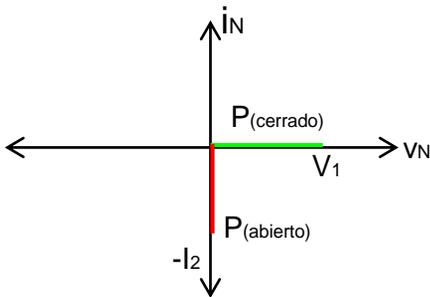
Sí el encadenamiento CD utiliza una batería y si  $V_1=V_2$ , el convertidor se denomina UPS (sistema de potencia no interrumpida), y se utiliza para alimentar las cargas críticas de una instalación eléctrica, que requieren de una confiabilidad de 100%, en la continuidad de la energía (área de quirófanos de un hospital, sala de computación, etc).

Fig. 1.57 Convertidor CA/CA con encadenamiento CD.

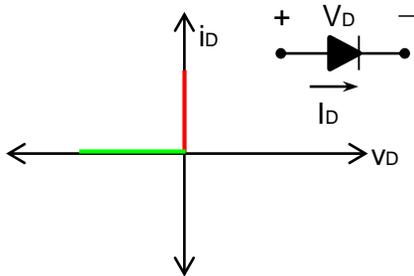
## 1.15 IMPLEMENTACIÓN DE UN INTERRUPTOR POR UN DISPOSITIVO SEMICONDUCTOR 5



a) Circuito



b)  $i_N - v_N$  del interruptor N



c)  $i_D - v_D$  de un diodo con polarización directa

Fig. 1.58 Implementación del interruptor N en un convertidor CD/CD directo reductor.

El convertidor de electrónica de potencia se conforma por una matriz de interruptores, que se implementan por dispositivos semiconductores de potencia. La implementación de un interruptor por un dispositivo semiconductor, se realiza de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se definen para el interruptor la polaridad del voltaje ( $V_s$ ) y la corriente ( $i_s$ ).
- Se determina del circuito en donde se ubica el interruptor, el gráfico
- $v_s - i_s$ , de cada interruptor, de acuerdo al trabajo realizado por cada uno de ellos,
- Se compara el gráfico  $v_s - i_s$  de cada interruptor, con los gráficos  $v_d - i_d$ , de los diferentes dispositivos semiconductores disponibles.

Para el caso del interruptor N, de un convertidor CD/CD directo reductor, (fig.1.58 a) se muestra el gráfico  $i_N - v_N$  del interruptor, y el gráfico  $i_D - v_D$  de un diodo con polarización directa. Al compararlos se concluye, que el gráfico  $i_N - v_N$  corresponde al de un diodo con polarización inversa

## **BIBLIOGRAFÍA**

- 1)Gualda J.A. y otros ELECTRÓNICA INDUSTRIAL. TECNICAS DE POTENCIA . Edición 1992. Editorial Alfa Omega
- 2)Segui S.,Gimeno F. J. y otros ELECTRÓNICA DE POTENCIA Fundamentos Básicos. 2004 . Editorial Alfa Omega
- 3)Dewan S. B.; Straughen A..POWER SEMICONDUCTOR CIRCUITS. 1975. Editorial John Wiley
- 4)JaiP.Agrawal POWER ELECTRONIC SYSTEMS. Theory and design.2001 .Editorial Prentice -Hall
- 5)Kassakian J.G ;Schlecht M.F; Verghese G.C. PRINCIPLES OF POWER ELECTRONICS. 1995 Editorial Addison- Wesley
- 6)Krein P.T. ELEMENTS OF POWER ELECTRONICS. 1998.Editorial Oxford University Press.
- 7)Erickson R.W. Maksimovic D. FUNDAMENTALS OF POWER ELECTRONICS.2003 Editorial Kluwer Academic Publishers
- 8)Mohan N.; Undeland T.M.;Robbins W.P. POWER ELECTRONICS. 2003. Editorial John Wiley & sons Inc
- 9)R.G. Hoft(editor) SCR APPLICATONS HANBOOK 1974. International Rectifie.r
- 10)Leiva L.F.MANUAL DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS DOMICILIARIAS.2004 Editada por Schneider Electric
- 11)Rashid M. H. POWER ELECTRONICS:CIRCUITS,DEVICES,AND APPLICATIONS 1993.Editorial Prentice-Hall

12) Rashid M.H.(editor) POWER ELECTRONIC HANDBOOK  
1993. [www.rapidshare.com/filea/97921259](http://www.rapidshare.com/filea/97921259). septiembre 24 2008

13) INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY POWER ELECTRONIC  
pdf. [www.onlinefreebooks.net](http://www.onlinefreebooks.net). Julio 13 2008

14) Williams B. POWER ELECTRONICS DEVICES  
DRIVERS, APPLICATIONS AND PASSIVE COMPONENTS Editorial Mc.  
Graw-Hill. 1992

15) W. Shepherd, L.N. Hulley, D.T.W. Liang .POWER ELECTRONICS AND  
MOTOR CONTROL 1995. Cambridge University Press

# ACTIVIDADES

## TEORÍA

- 1) Describir la naturaleza y el propósito de la Electrónica de Potencia
- 2) Dibujar el diagrama de bloques de un SEP, y explicar la función de cada bloque y enumerar los elementos que lo conforman.
- 3) ¿Por qué se normalizan los valores eficaces de los voltajes en las redes de servicio? ¿Cuál es el criterio para utilizar estos voltajes?
- 4) Dibujar e interpretar los circuitos equivalentes en modo activo y pasivo de la batería ácido-plomo
- 5) Dibujar y analizar la conexión de un aerogenerador a la red de servicio eléctrico.
- 6) ¿Qué es un panel solar? ¿Cómo se conecta un sistema fotovoltaico con la red de servicio eléctrico?
- 7) ¿Cómo se define un capacitor ideal? ¿Cuáles son las diferencias con el capacitor real?
- 8) Dibujar e interpretar el circuito equivalente general del capacitor real y deducir a partir de este circuito el equivalente serie. Proponer un procedimiento experimental para determinar el circuito equivalente,
- 9) ¿Qué es el ángulo de pérdidas de un capacitor? ¿Cómo se define?
- 10) Describir aspectos constructivos, características y aplicaciones de los capacitores de :a) Electrolíticos. b) Plástico. c) Cerámica.
- 11) ¿Cuáles son los flujos magnéticos que se originan en un transformador? ¿Por qué se originan? ¿Qué representan?
- 12) ¿Qué se entiende por corriente de magnetización de un transformador? ¿Cómo se define? ¿Qué representa?
- 13) Escribir para el primario y el secundario de un transformador, las ecuaciones que describen su comportamiento desde la teoría circuital
- 14) Dibujar e interpretar el modelo circuital del transformador ideal.
- 15) ¿Qué se entiende por acoplamiento de impedancias?
- 16) Dibujar e interpretar la curva de magnetización de un material magnético real.
- 17) Dibujar e interpretar el modelo circuital de un transformador, con permeabilidad finita si se ignoran las resistencias. Proponer un procedimiento experimental para determinar el circuito equivalente

# ACTIVIDADES

## TEORÍA

- 18) ¿Qué situación conduce a la saturación del transformador? ¿Cuáles son las consecuencias?
- 19) Interpretar la forma de onda del voltaje en el secundario de un transformador de pulsos ,utilizando el circuito equivalente del transformador de pulsos.
- 20) Deducir el valor de la inductancia de un toroide.
- 21) Deducir la caída de voltaje en inductor excitado por :a)Un voltaje alterno sinusoidal; b)Un voltaje alterno cuadrado
- 22) Definir para un componente magnético: a) Pérdidas por histéresis ;b) Pérdidas por corrientes parásitas, c) Pérdidas en el cobre.
- 23) Para cada una de las pérdidas anteriores , se pide determinar los factores que las determinan, e indicar las soluciones que pueden aminorarlas.
- 23) Dibujar e interpretar el modelo circuital de un inductor real. Proponer un procedimiento experimental ,para determinar el circuito equivalente del inductor real.
- 24) Demostrar que el área-producto de un núcleo, es directamente proporcional a la inductancia del inductor construido sobre ese núcleo.
- 25) Dibujar e interpretar la característica v-i de los siguientes semiconductores de potencia: SCR, TRIAC, GTO, MCT,IGBT,MOSFET canal n; BJT pnp.
- 26) Dibujar e interpretar la característica de control de los siguientes semiconductores :SCR,GTO,MCT,IGBT
- 27) ¿Cuáles son las diferencias entre el interruptor real y el ideal?.
- 28) ¿Cómo se caracteriza a un interruptor conmutable?
- 30) Demostrar que en un circuito conmutado, el valor promedio del voltaje en un inductor y el valor promedio de la corriente en un capacitor ,son nulos.
- 31) Para el circuito R- L conmutado (fig. 1.36a), se pide demostrar que la variación de corriente en la carga, es menor al aumentar la frecuencia de conmutación.

## ACTIVIDADES

### TEORÍA

32) Para formas de onda periódicas se pide :

a) Definir : 1) Período; 2) Voltaje eficaz; 3) Voltaje promedio; 4) Factor de rizo; 5) Factor de forma; 6) Valor promedio local de una variable conmutada PWM; b) Indicar una aplicación para cada uno de los conceptos definidos en a). c) ¿Cuál es la relación entre el factor de forma y el factor de rizado?

33) Demostrar que en un circuito R-L con fuente alterna sinusoidal, la potencia reactiva no transfiere energía.

34) ¿Por qué es posible compensar los requerimientos de potencia reactiva de un inductor, con los requerimientos de potencia reactiva de un capacitor.?

35) Deducir paso a paso, la ecuación 1.77.

36) Definir para un SEP los siguientes conceptos: a) Factor de potencia; b) Factor de distorsión; c) Distorsión total de armónicas.

37) Deducir la relación entre el THD y  $K_d$  de un circuito.

38) ¿Por qué en un SEP se deben instalar filtros a la entrada y salida del convertidor? ¿Cuál es la función de estos filtros?

39) Para el convertidor CA/CD no controlado de 4 interruptores, se pide:

a) Justificar que los interruptores se pueden implementar por diodos. b) Determinar el factor de rizo y de forma, del voltaje de salida.

40) Para el convertidor CA/CD no controlado de 2 interruptores (fig. 1.47 a) se pide determinar: a) el factor de potencia de la fuente; b) ¿Cómo se puede implementar las 2 fuentes utilizando un transformador?

41) Para el convertidor CA/CD controlado (fig. 1.48 a) se pide : a) Describir la operación. b) Determinar los semiconductores que pueden implementar los interruptores. c) ¿Por qué el circuito funciona como inversor durante un tiempo limitado? ¿Qué se debería hacer para que trabaje en régimen permanente?

42) Para el convertidor CD/CA conmutado a baja frecuencia (fig. 1.49a) se pide : a) Describir la operación. b) Determinar los semiconductores que pueden implementar los interruptores, c) Deducir y analizar la expresión para la potencia transferida por el convertidor

43) Para el convertidor CD/CA PWM (fig. 1.50a) se pide : a) Describir la operación. b) ¿Cómo se puede variar la magnitud del voltaje de alterna.?

## ACTIVIDADES

### TEORÍA

44) Hacer un análisis comparativo entre el convertidor CD/CA, PWM y el de baja frecuencia de conmutación.

45) Para el convertidor CD/CA resonante (fig. 1.51a) se pide: a) Describir la operación. b) Deducir los semiconductores que pueden implementar los interruptores. c) ¿Cuál es el orden de las frecuencias a utilizar? ¿Por qué?

46) Para el convertidor CD/CD directo (fig. 1.52 a) se pide: a) Deducir la relación entre el voltaje de salida y el de entrada. b) Deducir los semiconductores que pueden implementar a los interruptores.

47) Para el convertidor CD/CD indirecto (fig. 1.53 a) se pide: a) Indicar la razón para la denominación de indirecto. b) Deducir la relación voltaje de salida al voltaje de entrada. c) Determinar los semiconductores que pueden implementar a los interruptores.

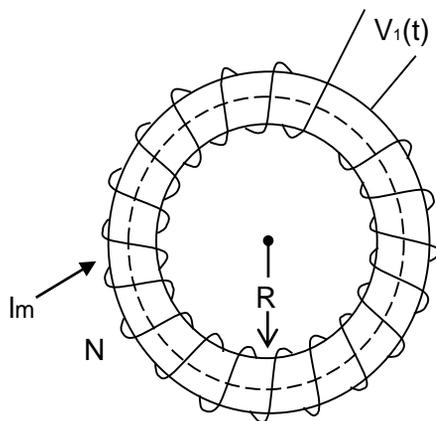
48) ¿Cuál es la frecuencia utilizada en el convertidor CD/CD con encadenamiento CA (fig. 1.54 a)? ¿Por qué?

49) Para el convertidor CA/CA tipo controlador CA (fig. 1.55 a) se pide a) Deducir el semiconductor que puede implementar al interruptor. b) Determinar la potencia reactiva del convertidor? c) ¿Cómo es posible explicar que si la carga es resistiva, exista una potencia reactiva?

50) Para el convertidor CA/CA ciclo-convertidor (fig. 1.56a) se pide: a) Describir la operación b) Deducir que tipo de semiconductor se puede utilizar como interruptor.

51) ¿En que casos se utiliza un convertidor CA/CA con encadenamiento en CD?

## PROBLEMAS



### Problema 1

1) Se requiere de un inductor de las siguientes características :

$L=50\text{mH}$ ;  $f=9\text{kHz}$ ;  $V=20V_{\text{rms}}$ . (excitación sinusoidal)

Se propone para construir este inductor un núcleo toroidal, de material pulverizado análogo al moly-permalloy de MAGNETICS de permeabilidad relativa de 125 , y densidad de campo magnético máxima ( $B_{\text{max}}$ ) de 0.15 T y con la siguiente geometría:

Diámetro exterior=26.9 mm.

Diámetro interno=11.1mm.

Espesor=0.4mm.

área seccional rectangular.

El bobinado se construye con un factor de utilización de 0.4 y se selecciona una densidad de corriente para el alambre magneto de  $500 \text{ A}/(\text{cm})^2$ .

Se pregunta:

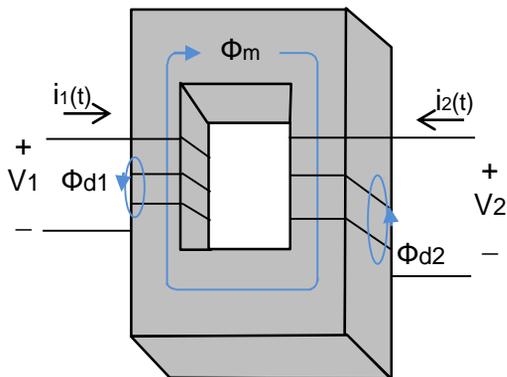
a) ¿Sirve el núcleo propuesto para resolver el problema?

b) ¿Cuál es el calibre del conductor a utilizar en el bobinado?

c) ¿Cuántas espiras debe tener la bobina?

d) ¿Si se utiliza este inductor como filtro (se conecta en serie ,cual es el valor de la inductancia ?

## PROBLEMAS



Problema 2

2) La característica de placa de un transformador de láminas de acero al silicio, muestra la siguiente información: 500 VA, 208/24 V, 60 Hz.

Se mide la corriente de vacío y resulta de 0.2 A.

La corriente en el primario al ocurrir un cortocircuito en el secundario es de 240 A, se pide:

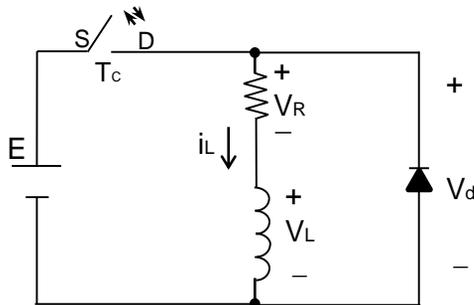
a) Dibujar el circuito equivalente del transformador ignorando las resistencias. Indicar los valores de los parámetros del circuito equivalente.

b) Argumentar por qué se requiere conocer los puntos de polaridad del transformador.

c) Sugerir un procedimiento para determinar los puntos de polaridad del transformador.

d) ¿Cuál es el máximo valor de voltio-segundo que se le puede aplicar al transformador, si se asume que la densidad de campo magnético de operación es el 80% del valor de saturación.

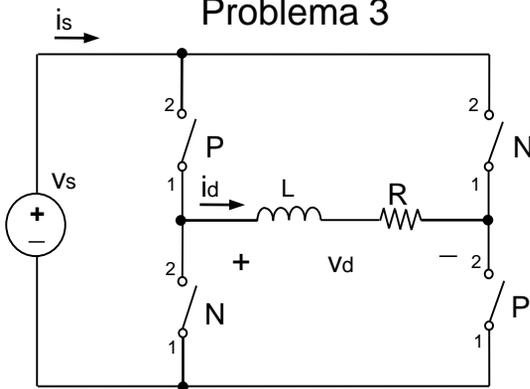
# PROBLEMAS



3) Para el circuito de la figura adjunta,  $E=100V$ ,  $R=20\Omega$ ,  $D=0.4$  y  $T_c=1ms$ . Se pide responder:

- ¿Cuál es la función del diodo? ¿Qué ocurriría si no existiera?
- Si el rizado pico-pico de la corriente ( $\Delta i$ ) es del 5% ¿Cual debe ser el valor de la inductancia?
- ¿Cual es la potencia disipada en el circuito?

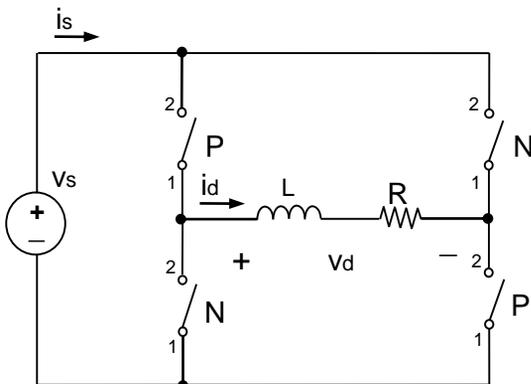
Problema 3



4) Para el convertidor CA/CD controlado de la figura adjunta,  $v_s = V_m \sin(\omega t)$ . Se pide determinar el factor de potencia de la fuente para:

- L muy grande
- L muy pequeño

Problema 4



5) El convertidor CA/CD no controlado de la figura adjunta, presenta las siguientes variables de corriente y voltaje:

$$v_s = 120 \sqrt{2} \sin \omega t; \quad i_s = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{80}{n\pi} \sin(n\omega t)$$

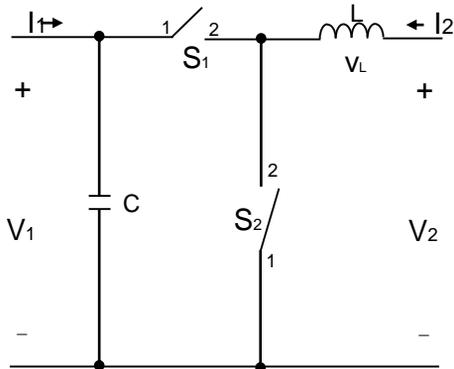
$n = \text{impar}$

Se pide determinar:

- El factor de potencia;
- La distorsión total de armónicas
- Valor de R

Problema 5

## PROBLEMAS

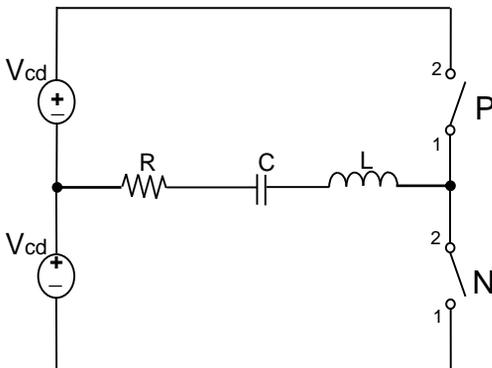


Problema 6

6) En el convertidor CD/CD de la figura el flujo de energía es del lado 2 a 1.  $L=10\text{mH}$ ;  $V_2=100\text{V}$ ;  $I_2=20\text{A}$ ;  $V_1=160\text{V}$ . Los interruptores conmutan a  $20\text{KHz}$ , y la variación permitida del voltaje en el puerto de salida es  $5\%$ .

Se pide:

- Deducir los interruptores que pueden implementar a los interruptores.
- Determinar las relaciones de trabajo de los interruptores.
- Determinar la máxima variación de corriente en el puerto de entrada.
- Valor de la capacitancia.



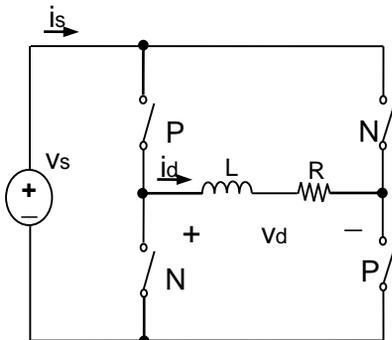
Problema 7

7) Para el convertidor resonante de la figura adjunta,  $L=159\mu\text{H}$ ;  $C=0.25\mu\text{F}$ ;  $V_{cd}=100\text{V}$ ;  $R=5\Omega$ .

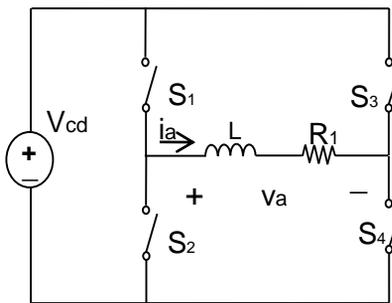
Se pide determinar para la frecuencia de resonancia:

- Potencia entregada a la carga, incluyendo a la tercera armónica
- Amplitud de la tercera armónica del voltaje en la carga.
- Si la frecuencia de conmutación es tres veces la de resonancia, cuánto vale la potencia entregada a la carga

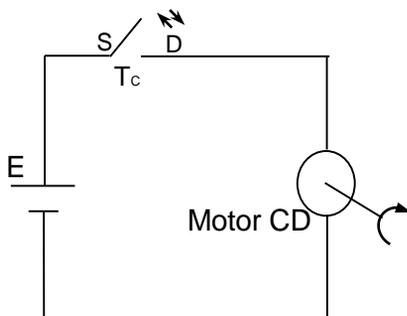
## PROBLEMAS



Problema 8



Problema 9



Problema 10

8) En el convertidor CA/CD de la figura adjunta,  $v_s = 170 \sin(120\pi t) \text{ V}$ .  $R = 5 \Omega$ . La corriente en la carga debe ser constante. Los interruptores P cierran en  $\omega t = 30^\circ$  y los N en  $\omega t = 210^\circ$ . Se pide: a) ¿Cuál debe ser el valor mínimo de la inductancia? b) ¿Cuál es el valor de potencia transferida a la carga. c) ¿Cuál es el valor de la potencia aparente en la fuente?

9) El convertidor CD/CA de baja frecuencia de conmutación (60 hz) de la figura adjunta presenta los siguientes parámetros:  $V_{cd} = 100 \text{ V}$ ;  $L = 500 \text{ mH}$ ;  $R = 5 \Omega$ ;  $2\delta = \pi/6$ .

Se pide determinar : a) Potencia transferida a la carga. b) Deducir el tipo de semiconductor para implementar los interruptores

10) Se dispone de un motor CD de imán permanente de las siguientes características:  $V_{base} = 90 \text{ V}$ , velocidad base = 2000 rpm,  $I_{nom} = 5 \text{ A}$ ,  $\Delta i_{max} = 5\%$ . La caracterización circuital del motor es :  $R_a = 0.5 \Omega$ ,  $L_a = 5 \text{ mH}$ .

Se dispone de una fuente CD de 100 V, 10A. Se pide proponer un sistema para variar la velocidad del motor, utilizando un interruptor que conmuta a 5 KHz. La máxima variación de la corriente ( $\Delta i$ ) no puede sobrepasar el 5% de la corriente nominal. Para ello debe responder las siguientes preguntas:

a) ¿Cuál es el rango de velocidad posible?  
 b) Determinar del circuito equivalente el valor  $\Delta i$  para condición nominal. c) Se puede operar el motor dentro del rango posible de velocidad sin sobrepasar el  $\Delta i_{max} = 5\%$ ?