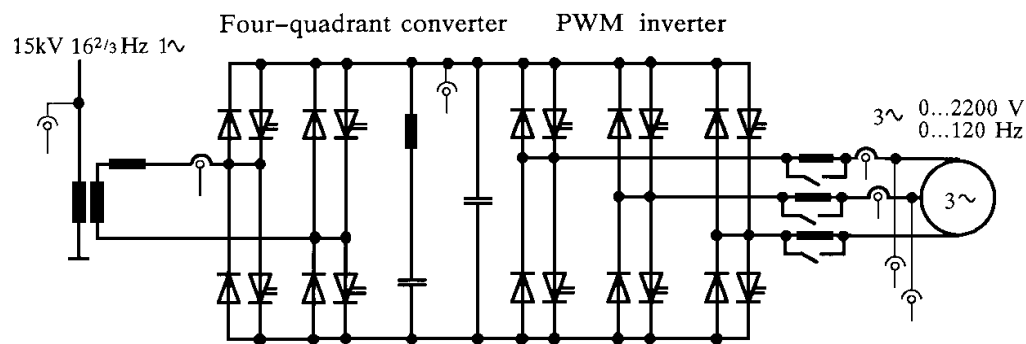


Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Electrónica
Valparaíso-Chile



ELECTRÓNICA INDUSTRIAL



José Rodríguez

Julio de 2000.

Introducción.

Este apunte contiene las figuras más importantes que se emplearán en la asignatura Electrónica Industrial. Debo resaltar que este material no incluye las explicaciones ni las ecuaciones que serán deducidas en clases.

Este apunte es un apoyo para entender más los conceptos y para facilitar el trabajo del alumno en clases y durante el estudio personal y **de ninguna manera constituye un sustituto de la asistencia a clases y a la ayudantía.**

Se recomienda a los estudiantes llevar este material a las clases.

José Rodríguez.
Julio de 2000.

Indice.

CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1) <i>ESQUEMA DE ACCIÓN DE LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA</i>	1
1.2) <i>FAMILIA DE CONVERTIDORES ESTÁTICOS</i>	2
1.2.1) Clasificación según la forma de la energía.	2
1.2.2) Convertidores mixtos.	3
1.3) <i>EL INTERRUPTOR SEMICONDUCTOR</i>	3
1.4) <i>CARACTERÍSTICAS DEL INTERRUPTOR SEMICONDUCTOR IDEAL</i>	4
1.5) <i>UN CONVERTIDOR BÁSICO</i>	4
1.6) <i>ALGUNOS CONVERTIDORES TÍPICOS</i>	5
1.7) <i>APLICACIONES</i>	5
1.8) <i>NATURALEZA INTERDISCIPLINARIA DE LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA</i>	7
CAPÍTULO 2.....	8
DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES DE POTENCIA.....	8
2.1) <i>EL DIODO DE POTENCIA</i>	8
2.2) <i>EL TIRISTOR</i>	9
2.2.1) Ejemplo de funcionamiento de un tiristor.....	10
2.3) <i>EL TRIAC</i>	11
2.4) <i>EL TRANSISTOR BIPOLAR</i>	11
2.5) <i>EL TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO</i>	12
2.6) <i>EL TIRISTOR APAGADO POR EL GATE</i>	13
2.7) <i>EL TRANSISTOR IGBT</i>	13
2.8) <i>COMPARACIÓN DE SEMICONDUCTORES CON CAPACIDAD DE CORTE</i>	14
2.9) <i>CLASIFICACIÓN DE SEMICONDUCTORES SEGÚN SU CONTROLABILIDAD</i>	14
CAPÍTULO 3.....	17
CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE LOS SEMICONDUCTORES DE POTENCIA.....	17
3.1) <i>COMPORTAMIENTO DINÁMICO</i>	17
3.1.1) Encendido de un tiristor.....	17
3.1.2) Encendido falso por efectos capacitivos:.....	18
3.1.3) Efecto de punto caliente en un tiristor:.....	19
3.1.4) Corte del estado de conducción.....	21
3.2) <i>PÉRDIDAS, CALENTAMIENTO Y REFRIGERACIÓN</i>	22
3.2.1) Pérdidas:.....	22
Pérdidas de conducción.....	22
Pérdidas de conmutación.	22
3.2.2) Calentamiento y refrigeración:.....	23
Modelo térmico estacionario:.....	23
Modelo térmico dinámico:.....	24
Disipadores:.....	25
CAPÍTULO 4.....	27
CONVERTIDORES DE CONMUTACIÓN NATURAL (RECTIFICADORES)	27
4.1) <i>TIPOS BÁSICOS DE RECTIFICADORES</i>	27
4.1.1) Rectificador monofásico de media onda	28
4.1.2) Rectificador estrella monofásico.	31
4.1.3) Rectificador puente monofásico.	32
4.1.4) Rectificador estrella trifásico.	35
4.1.5) Rectificador trifásico puente. (Puente de Graetz).....	38
4.1.6) Rectificador hexafásico.	42
4.2) <i>RECTIFICADORES CON DIODO VOLANTE</i>	43
4.3) <i>OPERACIÓN DE UN RECTIFICADOR COMO INVERSOR</i>	45

4.4) EL NÚMERO DE PULSOS DE UN RECTIFICADOR.....	45
4.5) OPERACIÓN DE RECTIFICADORES CON CARGA ACTIVA.....	46
4.6) OPERACIÓN CON CARGA CAPACITIVA	48
4.7) TRANSFORMADORES PARA RECTIFICADORES.....	50
4.8) EL PROCESO DE CONMUTACIÓN.....	51
4.9) CONEXIONES MÚLTIPLES DE RECTIFICADORES.....	56
4.9.1) Rectificadores en serie.....	56
4.9.2) Rectificadores en paralelo.....	59
4.9.3) Rectificadores en antiparalelo: el convertidor dual.....	60
CAPÍTULO 5.....	63
CICLOCONVERSORES	63
5.1) PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	63
5.2) CICLOCONVERSORES DE TRES PULSOS.....	64
5.3) CICLOCONVERSORES DE 6 PULSOS	67
5.4) CICLOCONVERSORES DE 12 PULSOS.....	69
CAPÍTULO 6.....	71
CONVERTIDORES DIRECTOS DE FRECUENCIA FIJA (AC-AC)	71
6.1) INTERRUPTOR BIDIRECCIONAL DE ESTADO SÓLIDO	71
6.1.1) Convertidor AC-AC monofásico con control de fase.....	72
6.1.2) Convertidor AC-AC monofásico con control integral de ciclos.....	73
6.2) CONVERTIDOR AC-AC TRIFÁSICO.....	73
CAPÍTULO 7.....	78
CONVERTIDORES DE CONMUTACIÓN FORZADA.....	78
7.1) PULSADORES.-	78
7.1.1) Principio de funcionamiento.....	78
7.2) INVERSORES.-	85
7.2.1) Inversores monofásicos.-	85
Inversor semipunto monofásico.....	85
Inversor puente monofásico.....	86
7.2.2) Inversor trifásico fuente de voltaje.....	87
CAPÍTULO 8.....	90
CIRCUITOS DE DISPARO PARA SEMICONDUCTORES	90
8.1) ELEMENTOS BÁSICOS DE UN CIRCUITO DE DISPARO.-	90
8.2) CIRCUITOS DE DISPARO CON TRANSISTORES MONOJUNTA.....	92
8.3) CIRCUITOS DE DISPARO AISLADOS PARA SCR.....	93
8.4) CIRCUITOS DE DISPARO INTEGRADOS PARA TIRISTORES.....	94
8.5) CIRCUITOS DE DISPARO PARA TRANSISTORES DE POTENCIA.....	98
CAPÍTULO 9.....	102
APLICACIONES Y CONTROL DE CONVERTIDORES ESTÁTICOS.....	102
9.1) CONTROL DE RECTIFICADORES.-	102
9.2) CONTROL DE CHOPPERS.....	107
9.2.1) El control de corriente de dos posiciones (histéresis).....	107
9.2.2) Modulación del ancho de los pulsos (Pulse Width Modulation = PWM).....	110
9.3) CONTROL DE INVERSORES.....	113
9.3.1) Inversor monofásico controlado por histéresis.....	113
9.3.2) Inversor monofásico con modulación PWM.....	114
9.3.3) Inversor trifásico con control de corriente.....	117
9.3.4) Inversor trifásico con modulación PWM.....	118

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1) ESQUEMA DE ACCIÓN DE LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA.

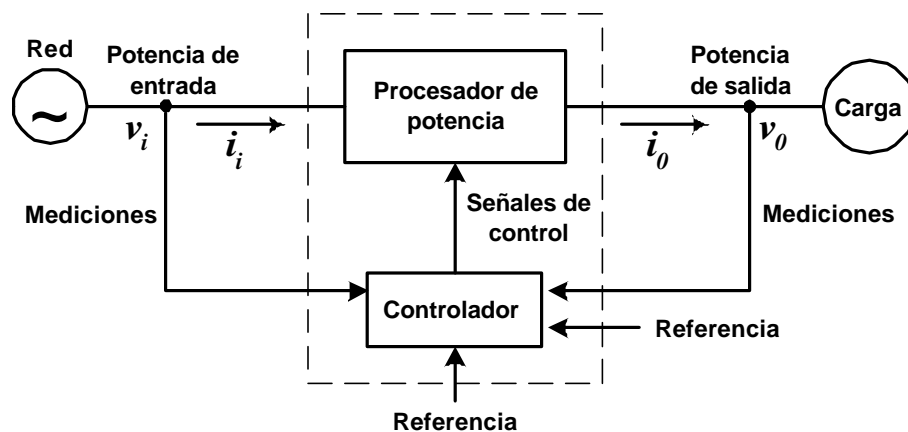


Fig.1.1.: Diagrama de bloques de un sistema convertidor de potencia.

1.2) FAMILIA DE CONVERTIDORES ESTÁTICOS.

1.2.1) Clasificación según la forma de la energía.

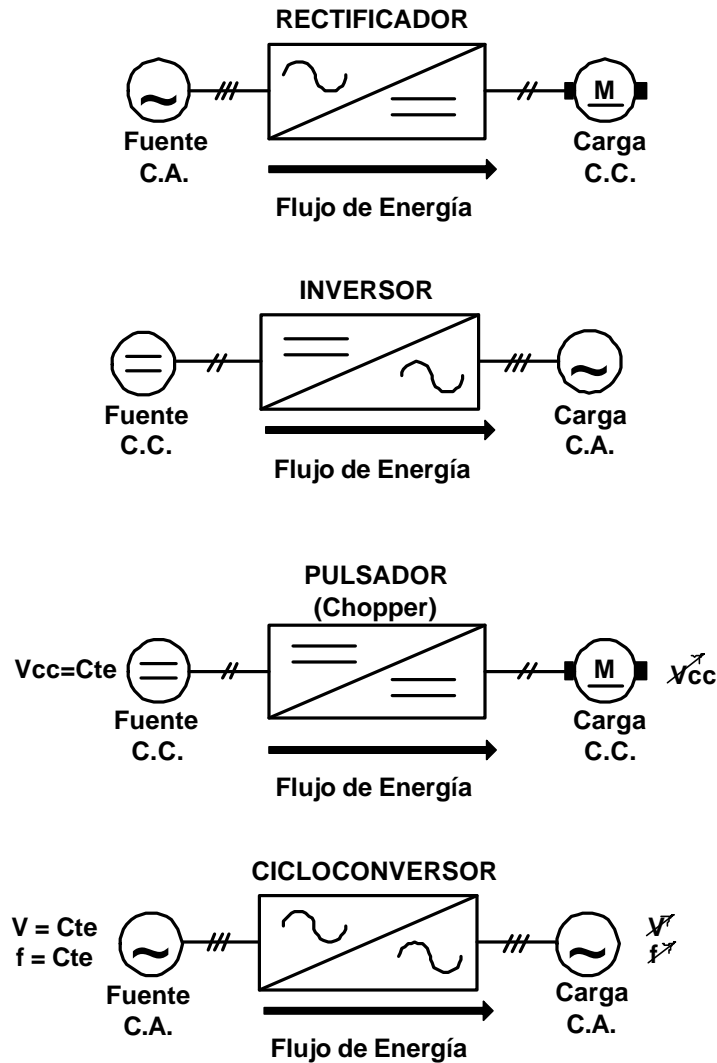


Fig.1.2.: Diferentes familias de convertidores de potencia.

1.2.2) Convertidores mixtos.

➡ **Convertidor de frecuencia: fuente de tensión.**

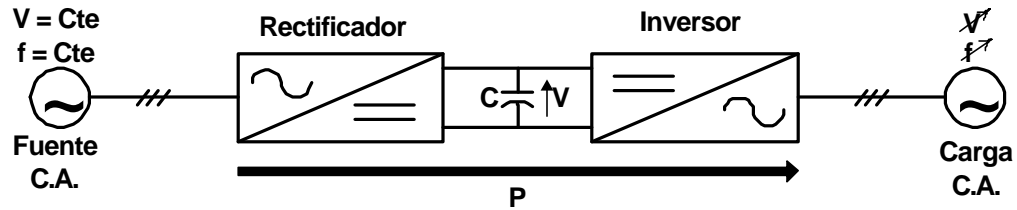


Fig.1.3.: Convertidor de frecuencia mixto con enlace de tensión continua (fuente de tensión).

➡ **Convertidor de frecuencia: fuente de corriente.**

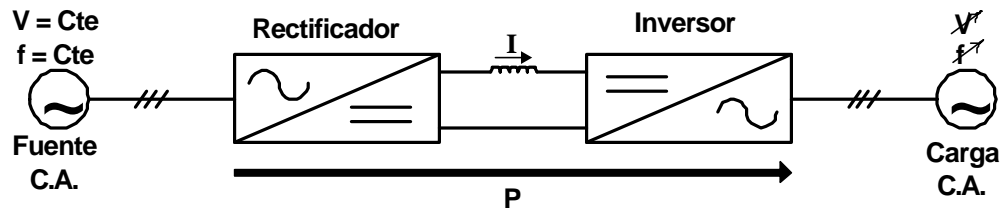


Fig.1.4.: Convertidor de frecuencia mixto con enlace de corriente continua (fuente de corriente).

1.3) EL INTERRUPTOR SEMICONDUCTOR.

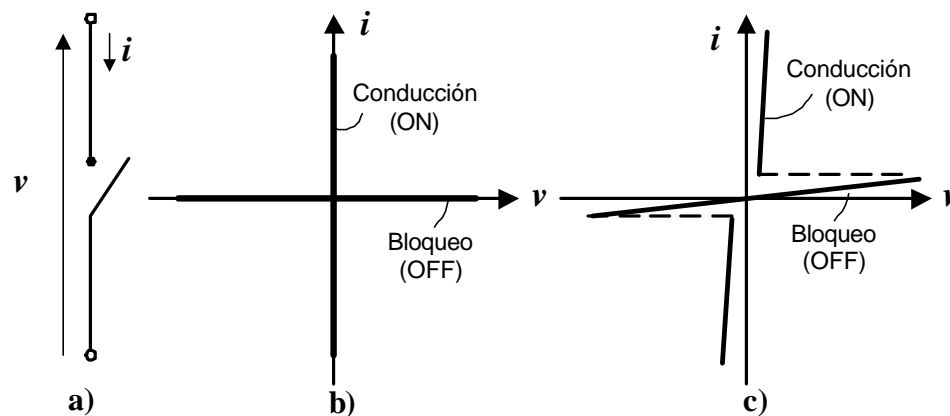


Fig.1.5.: Interruptor semiconductor. a) Símbolo; b) característica ideal; c) característica real.

1.4) CARACTERÍSTICAS DEL INTERRUPTOR SEMICONDUCTOR IDEAL.

- ➔ Puede bloquear voltajes de cualquier polaridad.
- ➔ Conduce corrientes en ambas direcciones sin caída de voltaje.
- ➔ Puede pasar a corte y conducción instantáneamente obedeciendo a una señal de control.
- ➔ La señal de control demanda potencia despreciable.

1.5) UN CONVERTIDOR BÁSICO.

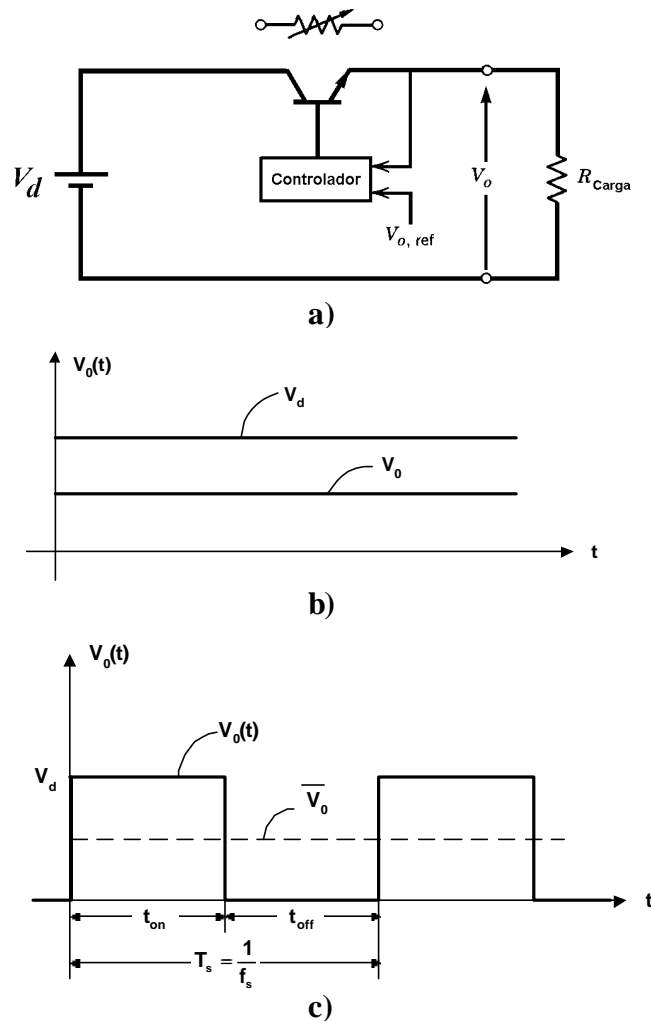


Fig.1.6.: Fuente de alimentación: a) circuito de potencia; b) funcionamiento lineal; c) funcionamiento en conmutación.

1.6) ALGUNOS CONVERTIDORES TÍPICOS.

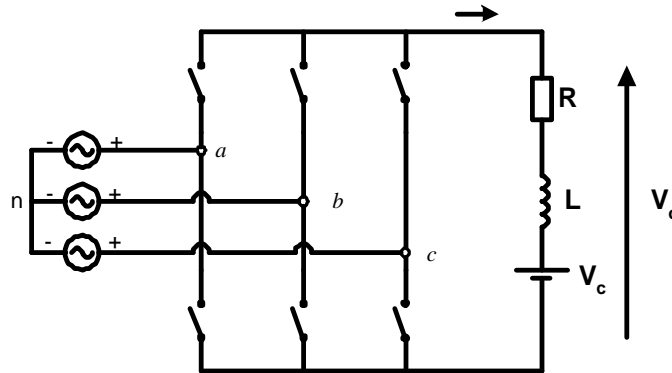


Fig.1.7.: Rectificador puente trifásico.

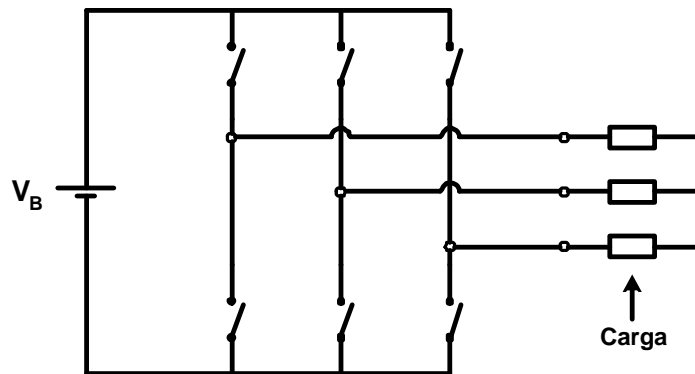


Fig.1.8.: Inversor trifásico.

1.7) APLICACIONES.

- ➡ **Transporte:**
Trenes, funiculares, trolebuses, automóviles, camiones, metros, barcos, ascensores, ...
- ➡ **Comercio:**
Refrigeración, aire acondicionado, iluminación, computadores, fuentes de alimentación ininterrumpibles (UPS), escalas mecánicas, ...
- ➡ **Energía:**
Transmisión de corriente continua, enlaces de frecuencia, control de potencia reactiva, compensación de armónicas, ...

➡ **Industrias:**

Bombas, ventiladores, grúas, palas, refinadoras, molinos, correas transportadoras, máquinas herramientas, robots, hornos, lasers, bobinadoras, laminadoras,...

➡ **Residencial:**

Televisión, estufas, cocinas, electrodomésticos, herramientas, iluminación, ...

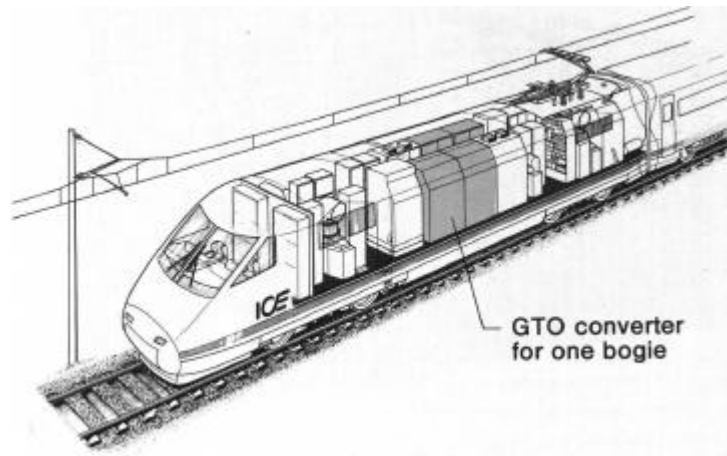


Fig.1.9: Ubicación de convertidores en una locomotora.

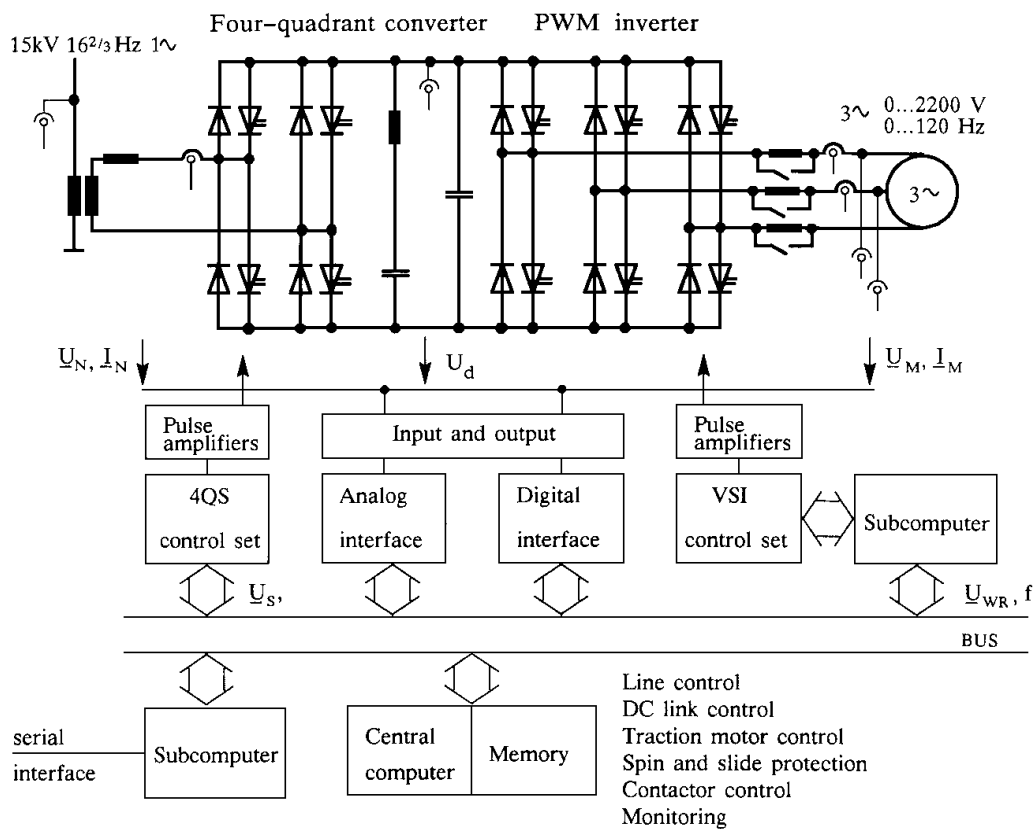


Fig.1.10: Diagrama de bloques de un sistema de tracción (locomotora).

1.8) NATURALEZA INTERDISCIPLINARIA DE LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA.

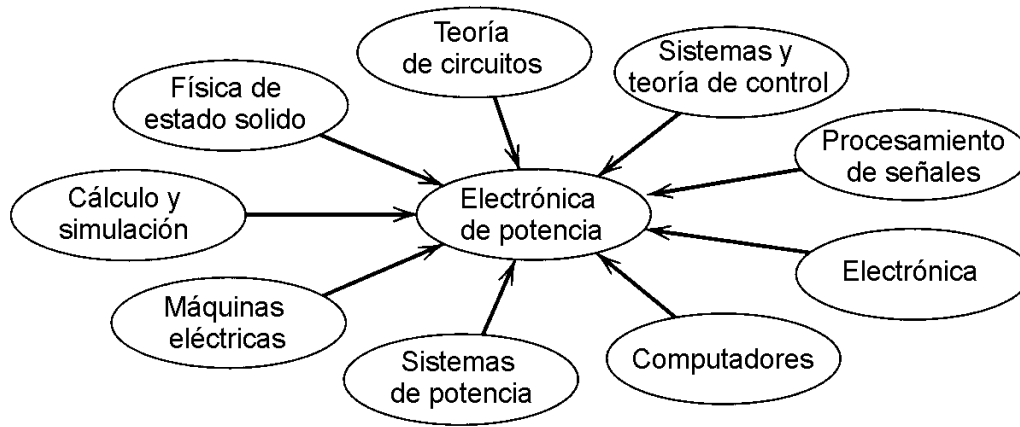


Fig.1.11.: Especialidades que interactúan en la electrónica de potencia.

CAPÍTULO 2

DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES DE POTENCIA

2.1) EL DIODO DE POTENCIA.

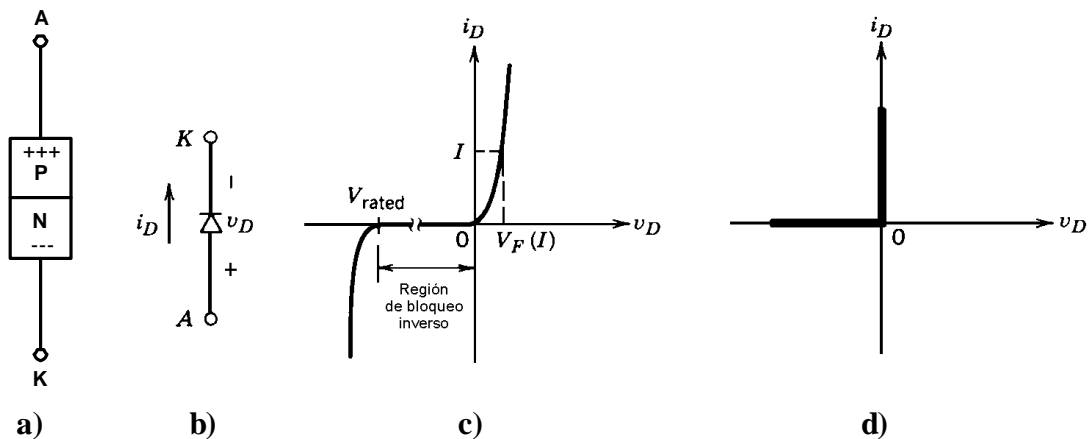


Fig.2.1.: Diodo semiconductor: **a)** estructura; **b)** símbolo; **c)** característica $v-i$; **d)** característica $v-i$ ideal.

2.2) EL TIRISTOR.

Silicon Controlled Rectifier (SCR)

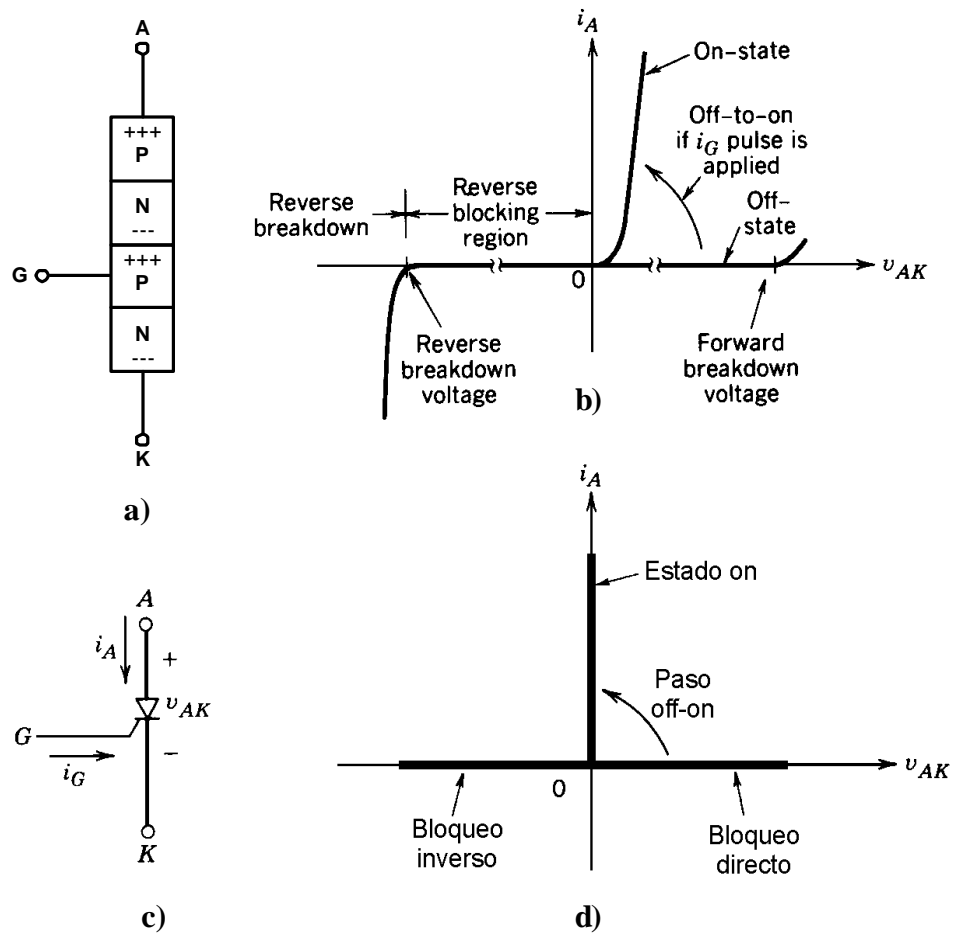


Fig.2.2.: Tiristor: **a)** estructura; **b)** característica $v-i$; **c)** símbolo; **d)** característica $v-i$ ideal.

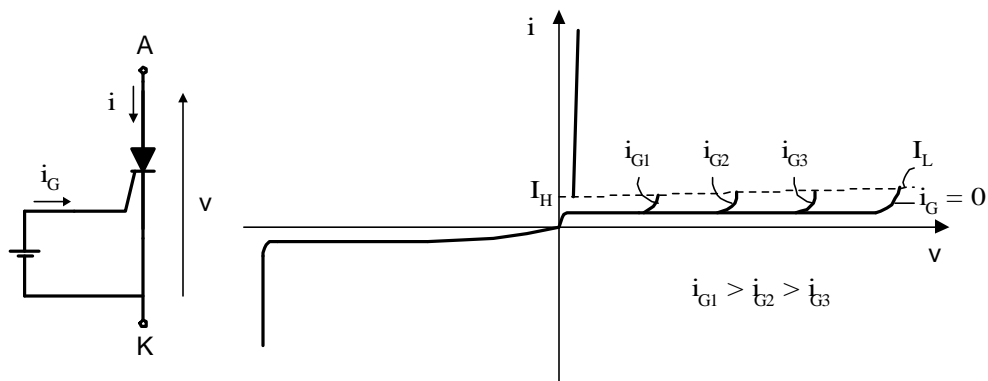


Fig.2.3.: Tiristor con corriente en el gate.

2.2.1) Ejemplo de funcionamiento de un tiristor.

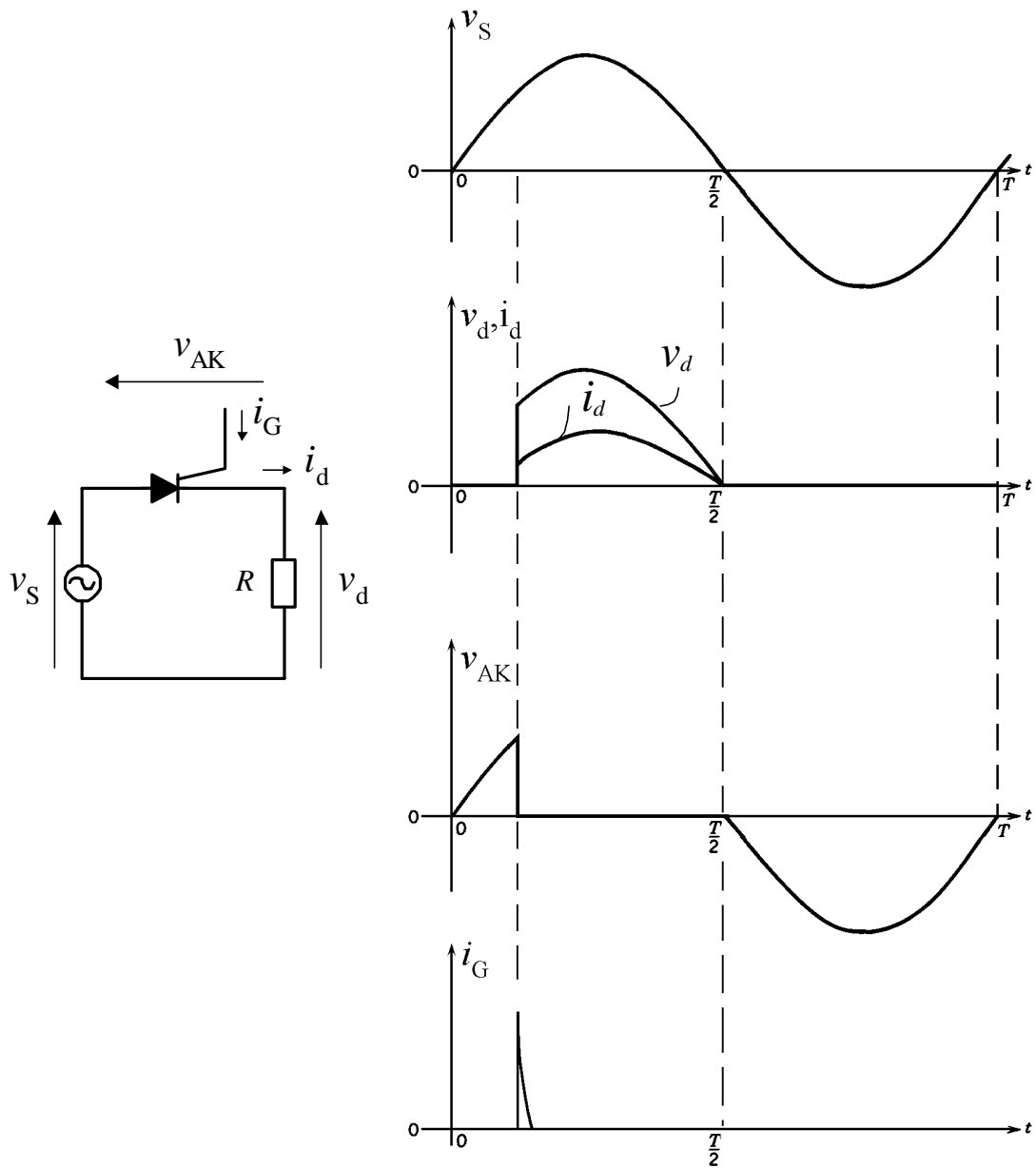


Fig.2.4.: Funcionamiento de un tiristor.

2.3) EL TRIAC.

Triode Alternating Current Switch

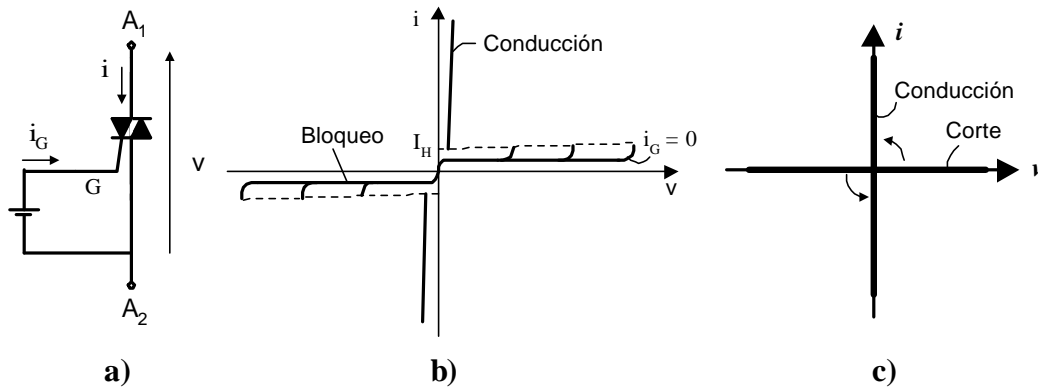


Fig.2.5.: Triac: a) símbolo; b) característica $v-i$; c) característica $v-i$ ideal.

2.4) EL TRANSISTOR BIPOLAR.

Bipolar Junction Transistor (BJT)

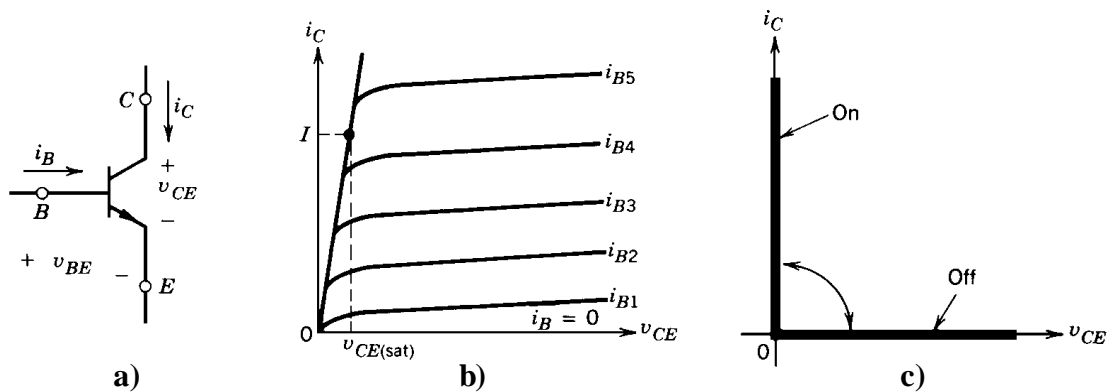


Fig.2.6.: Transistor bipolar NPN: a) símbolo; b) característica $v-i$; c) característica $v-i$ ideal.

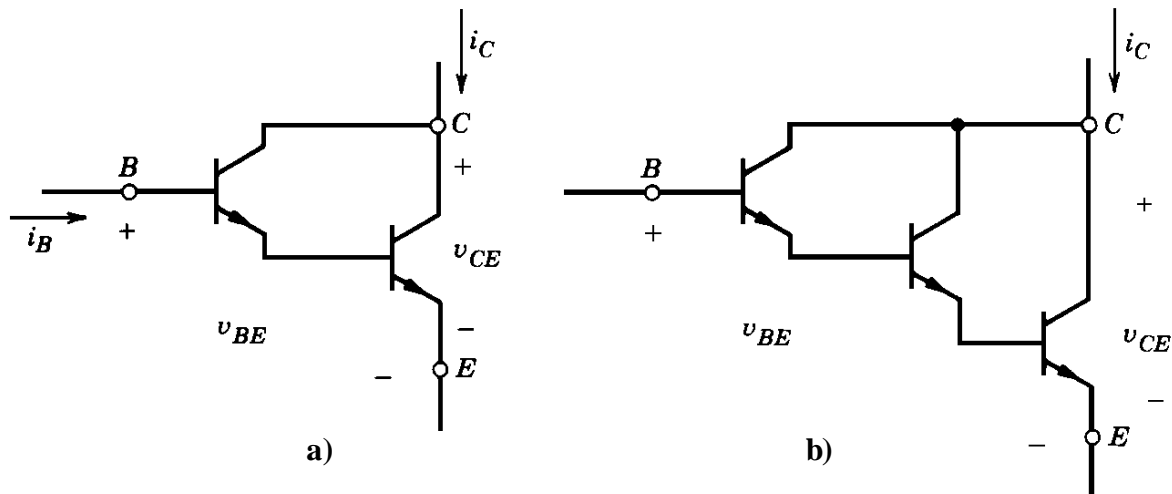


Fig.2.7.: Transistor bipolar; a) Darlington; b) triple Darlington.

2.5) EL TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO.

Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)

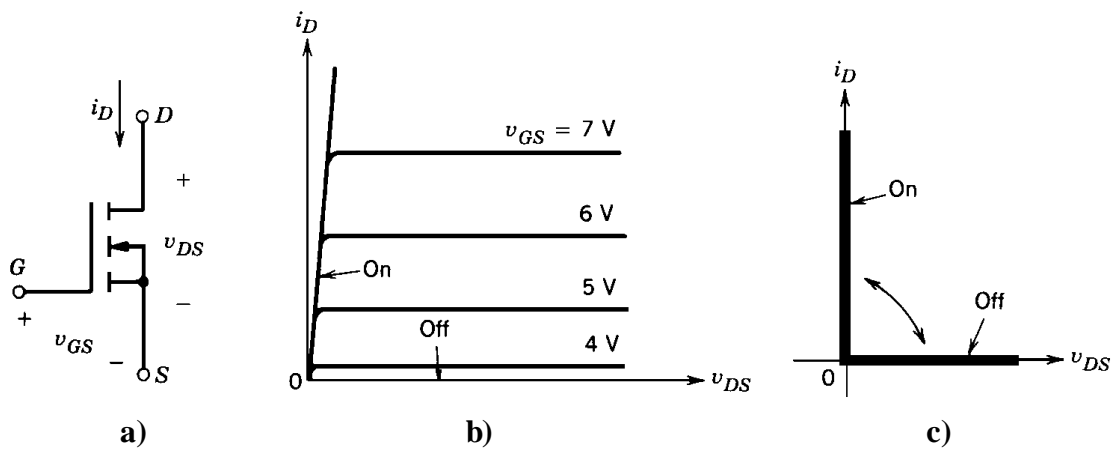


Fig.2.8.: Transistor de efecto de campo canal N; a) símbolo; b) característica $v-i$; b) característica $v-i$ ideal.

2.6) EL TIRISTOR APAGADO POR EL GATE.

Gate Turn Off Thystor (GTO)

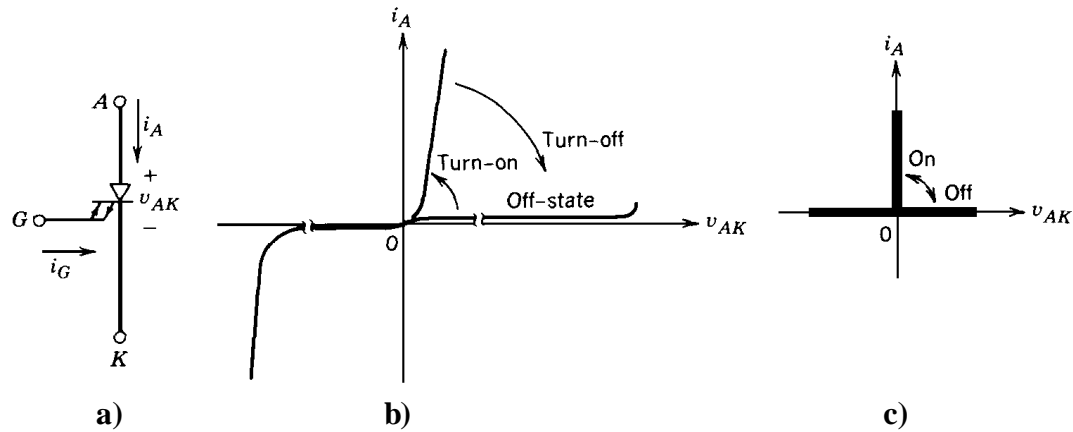


Fig.2.9.: GTO: a) símbolo; b) característica v - i ; c) característica v - i ideal.

2.7) EL TRANSISTOR IGBT.

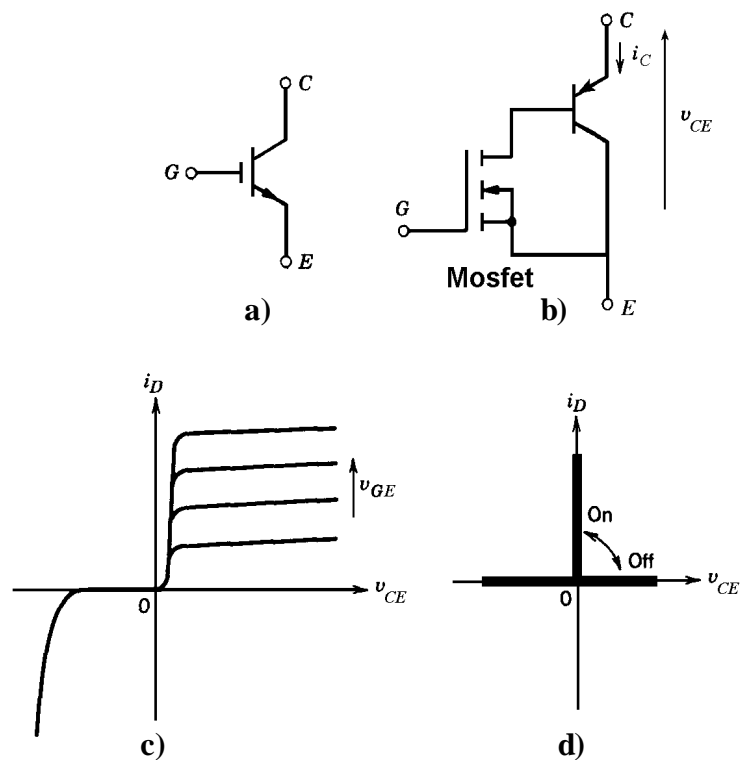


Fig.2.10.: IGBT: a) símbolo; b) circuito equivalente; c) característica v - i ; c) característica v - i ideal.

2.8) COMPARACIÓN DE SEMICONDUCTORES CON CAPACIDAD DE CORTE.

Elemento	Potencia	Rapidez de conmutación
MOSFET	Baja	Alta
BIPOLAR	Media	Media
IGBT	Media	Media
GTO	Alta	Baja

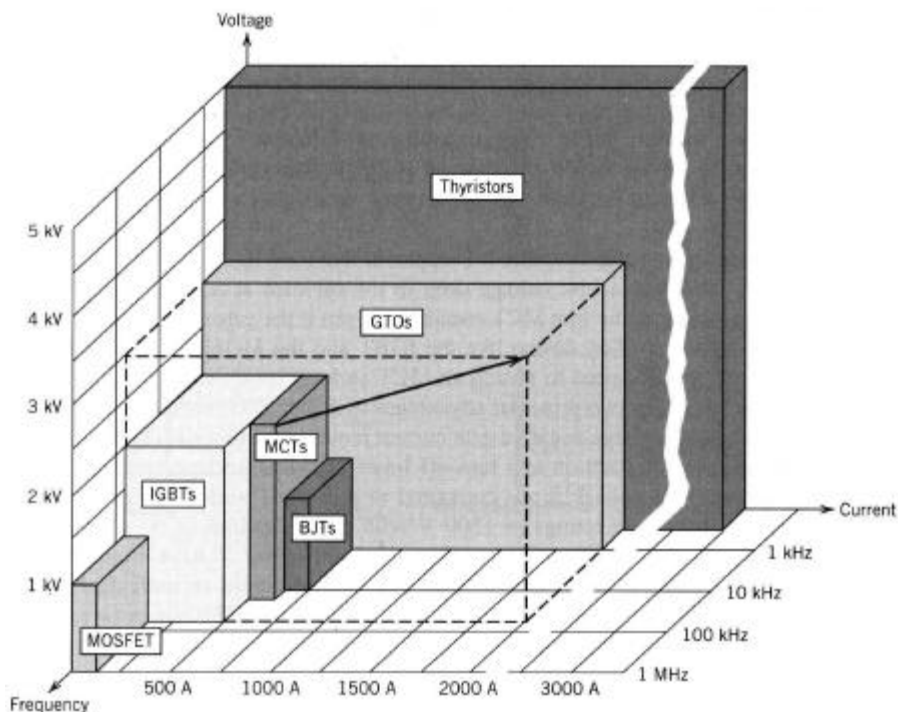


Fig.2.11.: Capacidad de semiconductores de potencia. Estado al año 1995 (aprox.).

2.9) CLASIFICACIÓN DE SEMICONDUCTORES SEGÚN SU CONTROLABILIDAD.

DIODOS: Paso al estado de conducción (ON) y al estado de corte (OFF) controlado por el circuito de potencia.

TIRISTORES: Paso a conducción (ON) mediante pulso de control. Paso al estado de corte (OFF) controlado por el circuito de potencia.

INTERRUPTORES CONTROLADOS: Paso a conducción (ON) y a corte (OFF) mediante pulsos de control



Fig.2.12.: Diferentes tipos de semiconductores.

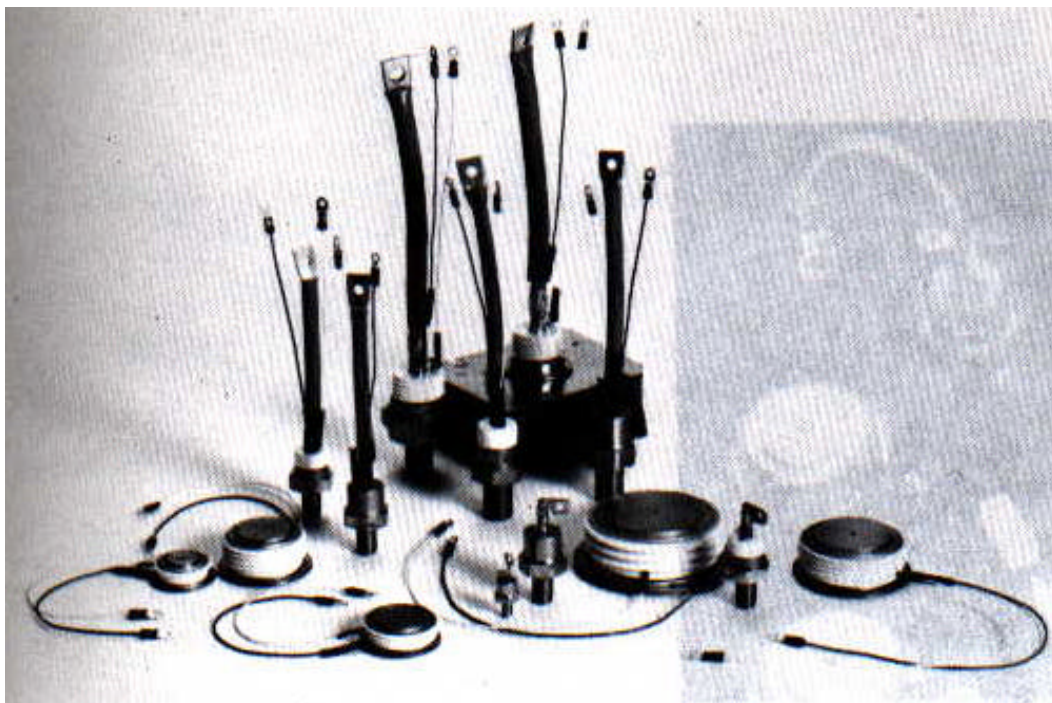
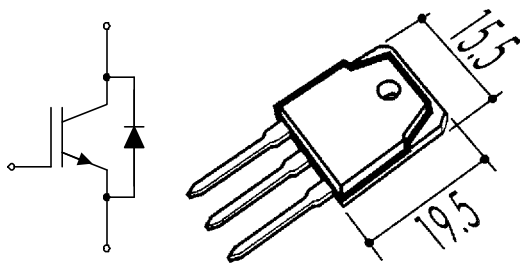
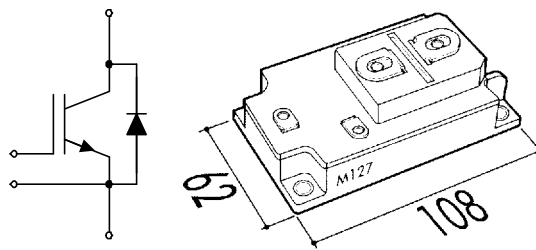


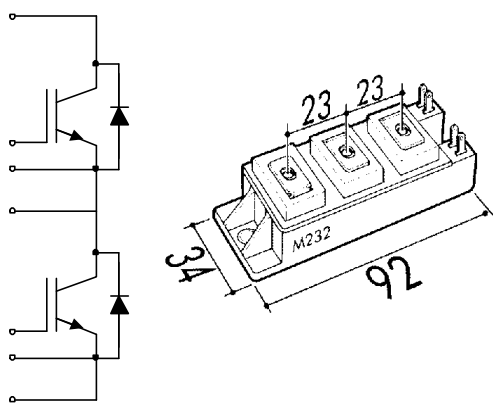
Fig.2.13.: Diferentes tipos de semiconductores.



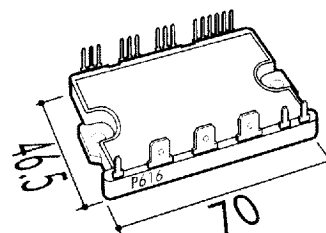
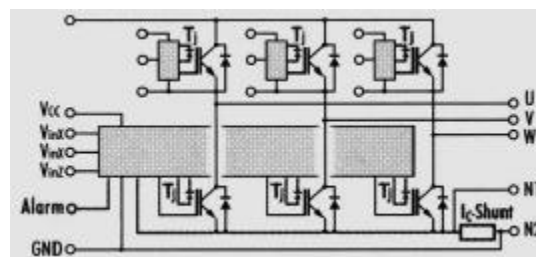
IGBT. 1200 [V] / 10 [A].



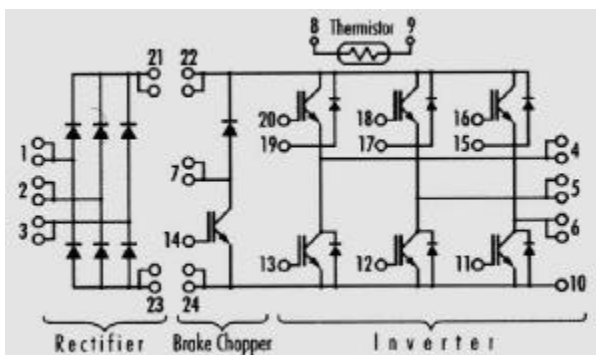
IGBT. 1200 [V] / 400 [A].



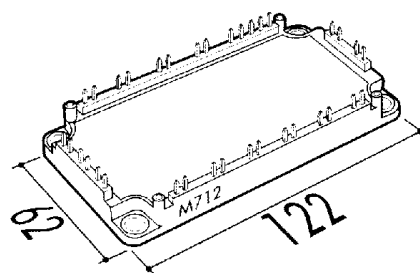
2 IGBT'S 1200[V] / 150 [A].



INVERSOR TRIFÁSICO.



INVERSOR – RECTIFICADOR Y CHOPPER DE FRENADO.

**Fig.2.14.:** Diversos semiconductores de potencia.

CAPÍTULO 3

CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE LOS SEMICONDUCTORES DE POTENCIA

3.1) COMPORTAMIENTO DINÁMICO.

3.1.1) Encendido de un tiristor.

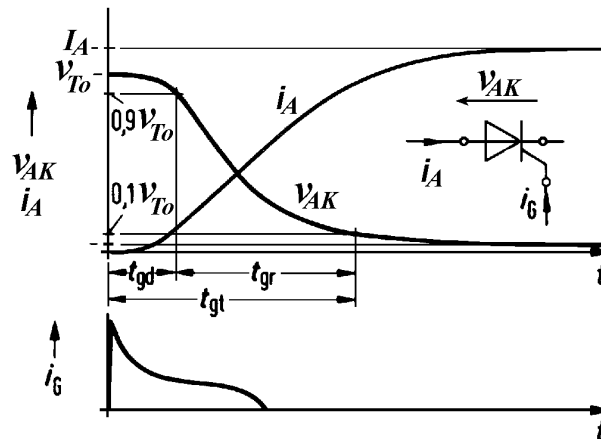


Fig.3.1.: Encendido de un tiristor.

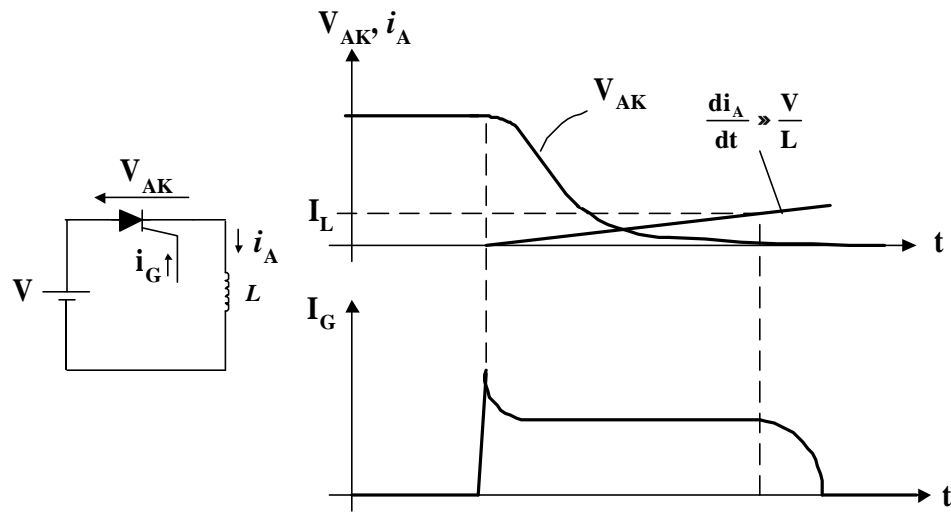


Fig.3.2.: Encendido de un tiristor con carga inductiva.

3.1.2) Encendido falso por efectos capacitivos:

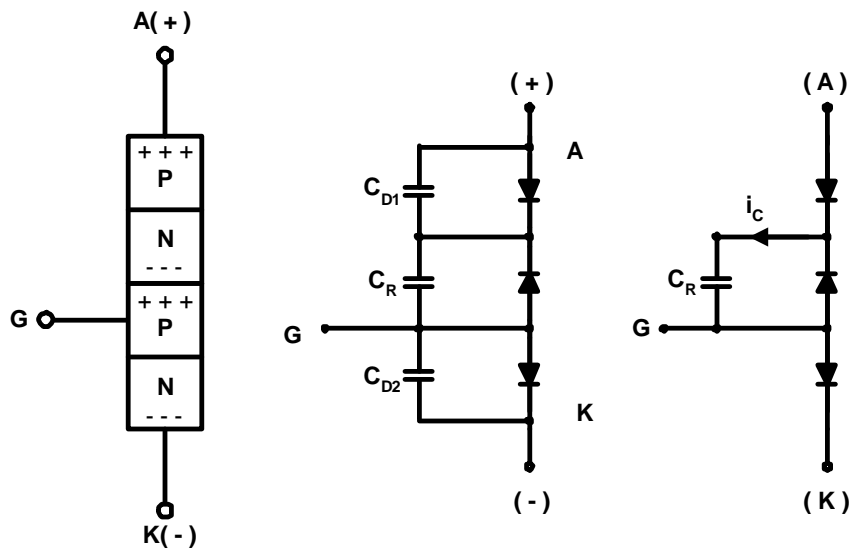


Fig.3.3.: Tiristor: a) estructura; b) modelo de capacidades; c) modelo simplificado sin capacidades de difusión.

3.1.3) Efecto de punto caliente en un tiristor:

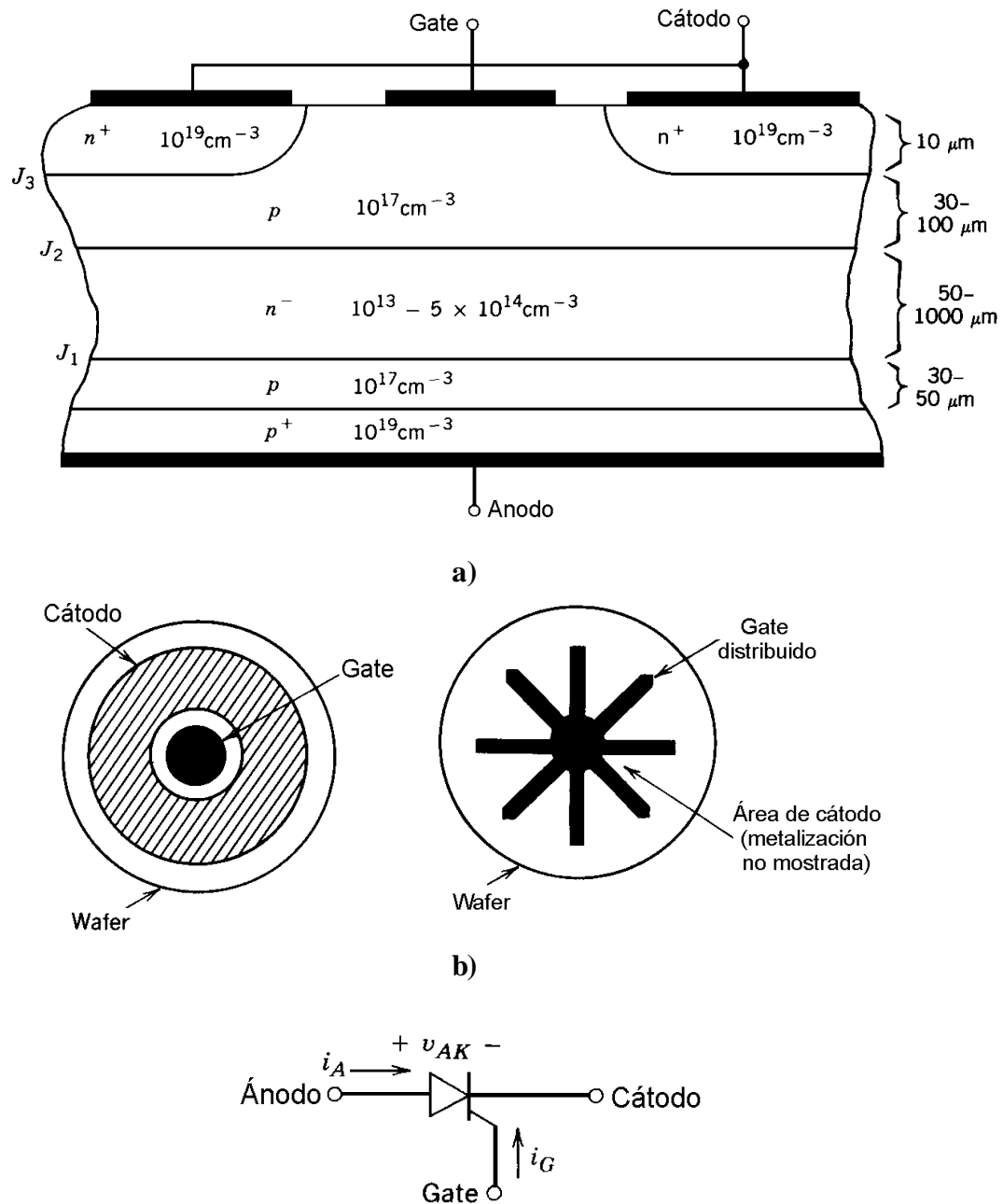


Fig.3.4.: Aspectos estructurales de un tiristor: **a)** corte vertical; **b)** arreglos de gate; **c)** símbolo.

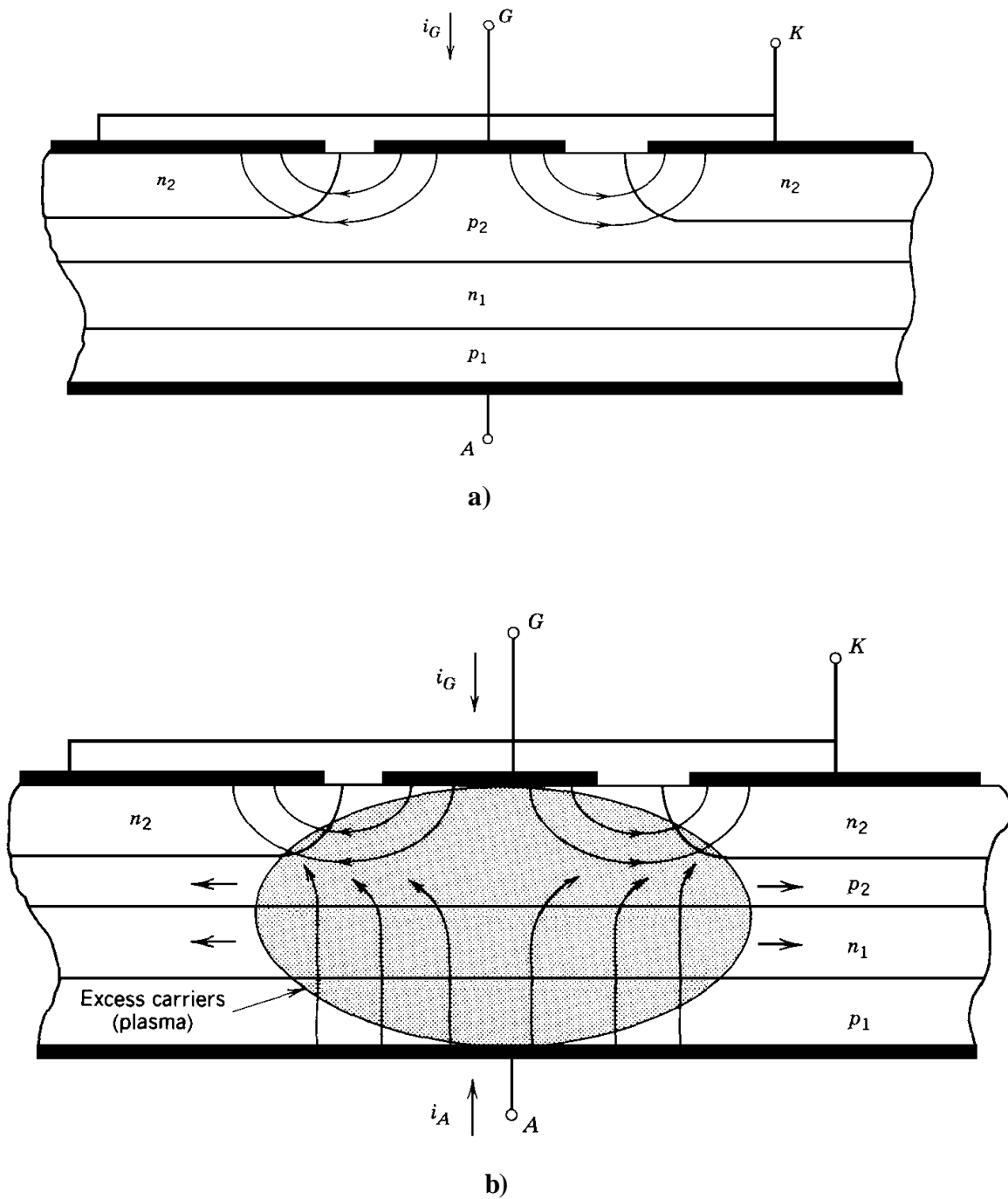


Fig.3.5.: Crecimiento del área de conducción en un tiristor; **a)** Inyección de portadores a la región p_2 por la corriente de gate; **b)** crecimiento del área de conducción.

3.1.4) Corte del estado de conducción.

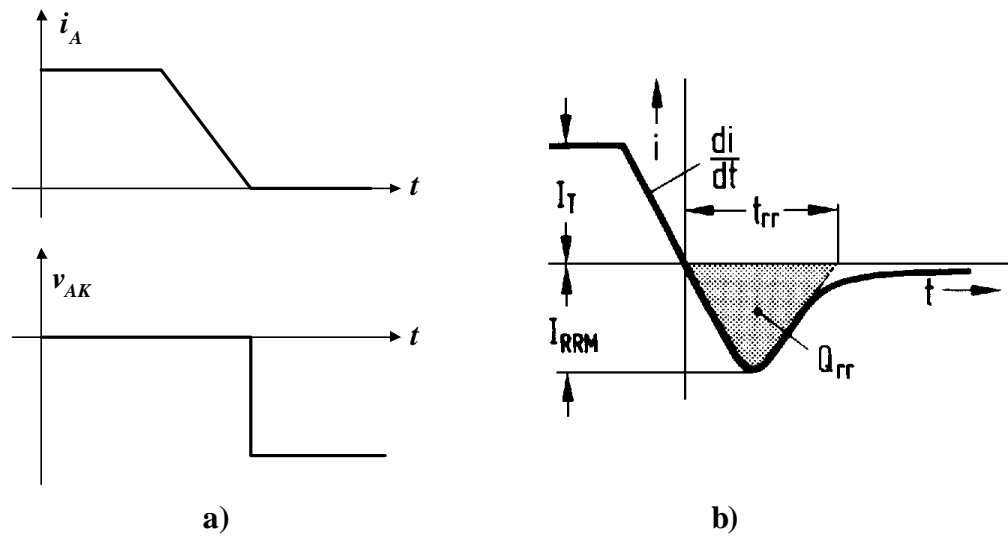


Fig.3.6.: Corriente inversa en un diodo o tiristor: a) ideal; b) real.

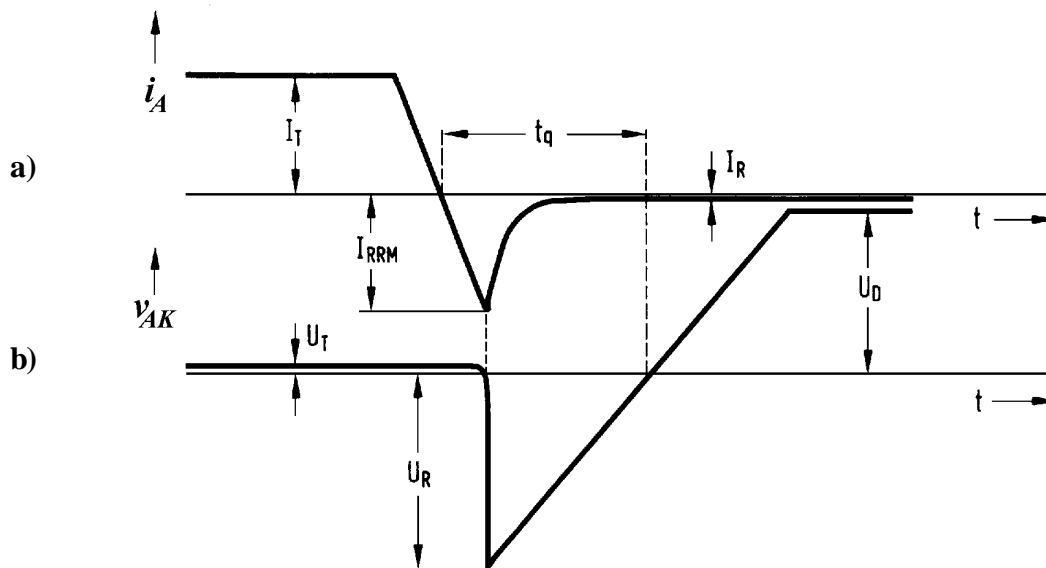


Fig.3.7.: Corte de un tiristor: a) corriente; b) tensión ánodo-cátodo.

3.2) PÉRDIDAS, CALENTAMIENTO Y REFRIGERACIÓN.

3.2.1) Pérdidas:

Pérdidas de conducción:

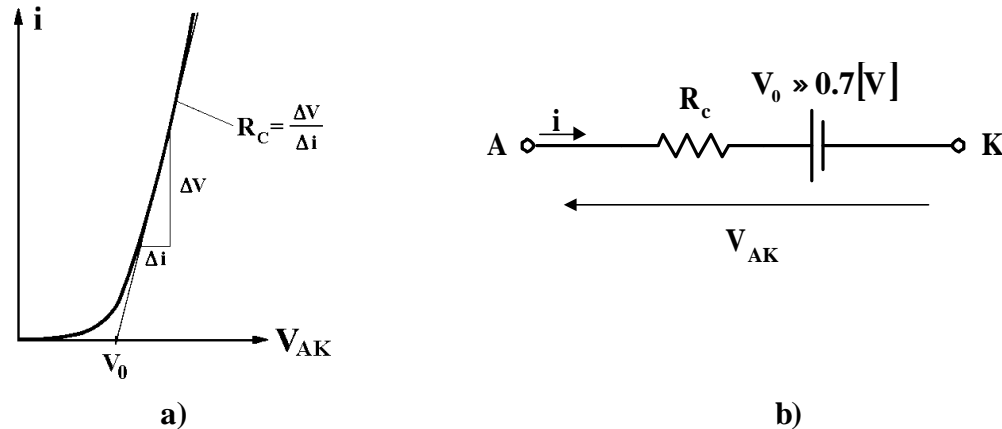


Fig.3.8: a) Característica de conducción de un diodo; b) modelo circuital.

Pérdidas de conmutación.

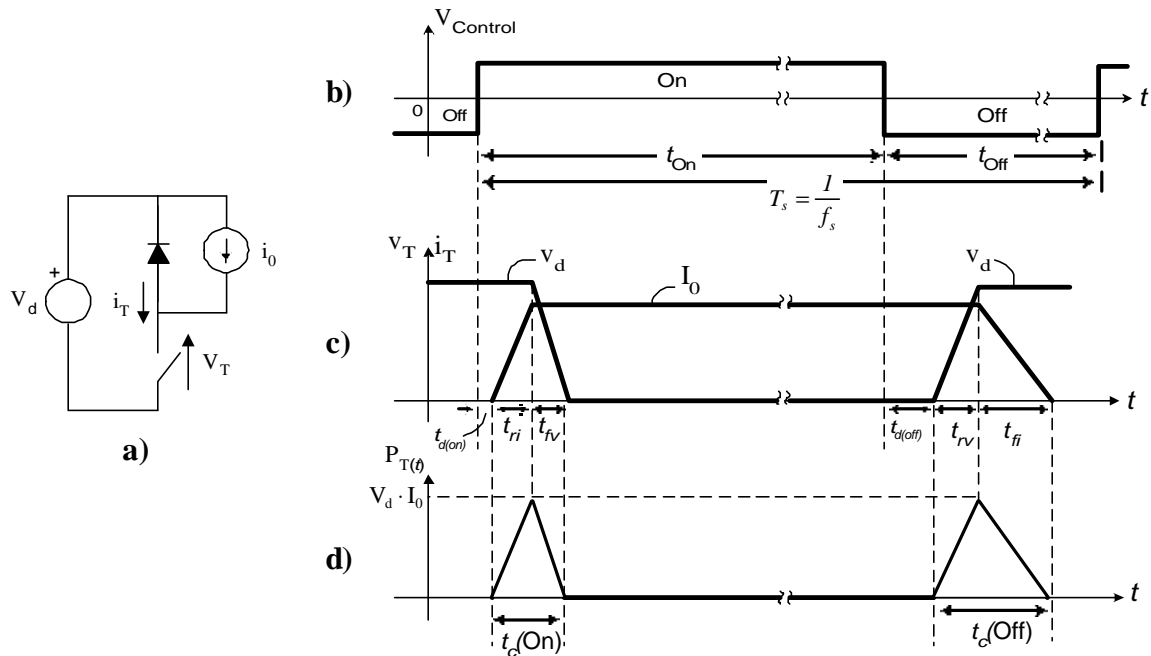


Fig.3.9: Conmutación de un semiconductor controlado: a) circuito; b) tensión de control; c) tensión y corriente y d) potencia.

3.2.2) Calentamiento y refrigeración:

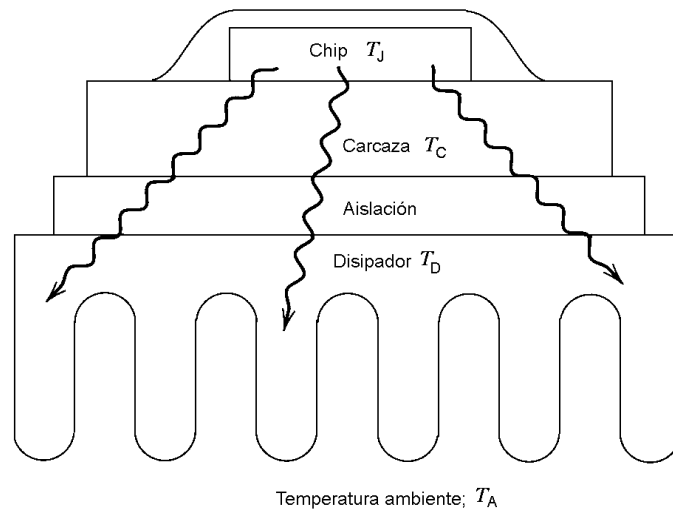


Fig.3.10.: Flujo de calor en el semiconductor.

Modelo térmico estacionario:

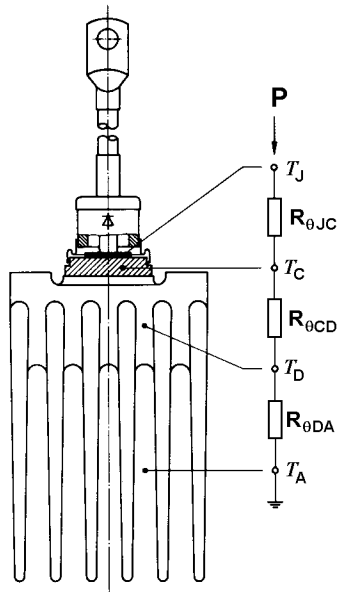


Fig.3.11.: Diodo montado en un disipador.

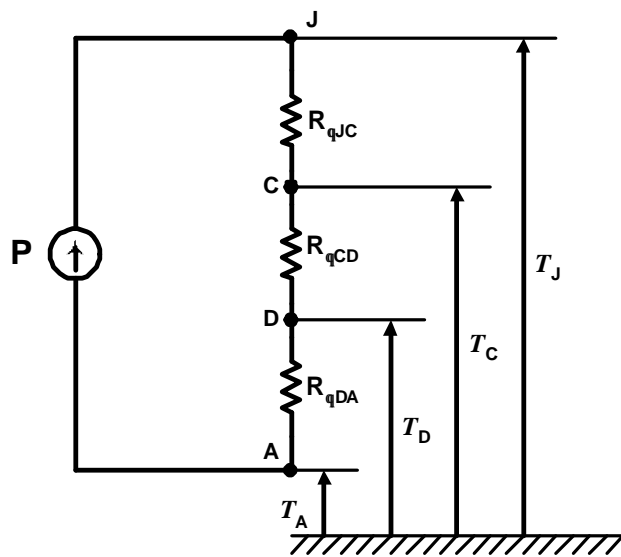


Fig.3.12.: Modelo térmico estacionario.

Modelo térmico dinámico:

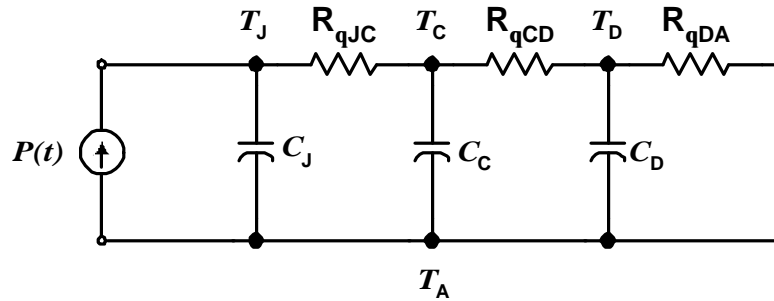


Fig.3.13.: Modelo térmico dinámico.

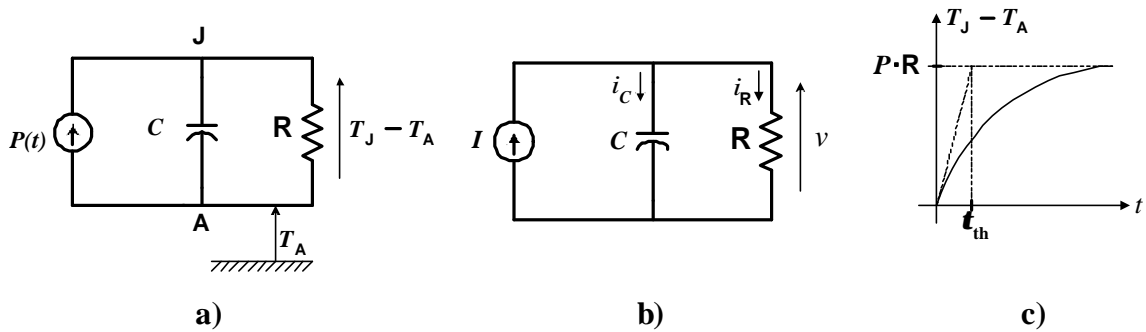


Fig.3.14.: a) Modelo dinámico simplificado; b) análogo eléctrico; c) temperatura.

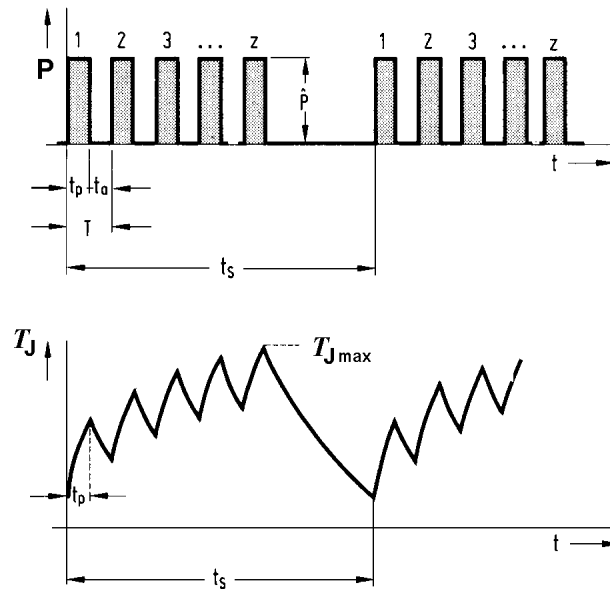
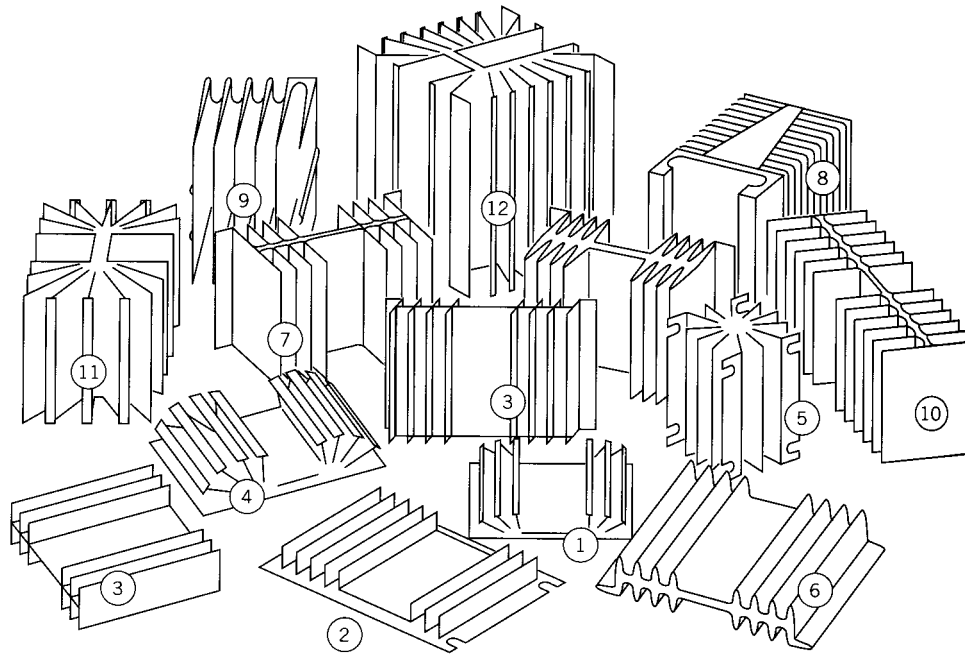
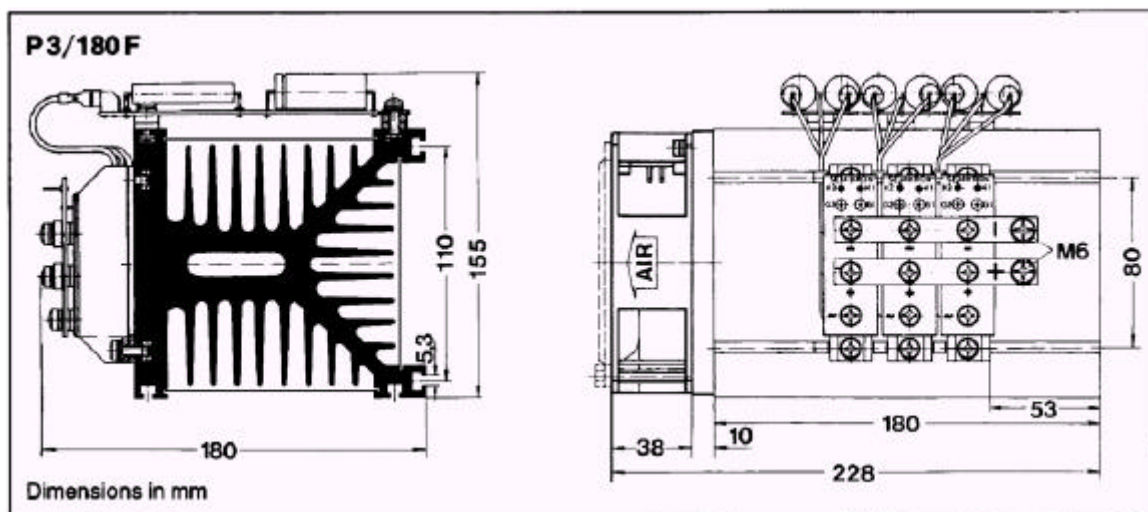


Fig.3.15.: Comportamiento dinámico de la temperatura.

Disipadores:

Heat sink no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$R_{\theta_{sa}}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	3.2	2.3	2.2	—	2.1	1.7	1.3	1.3	1.25	1.2	0.8	0.65
Vol. (cm^3)	76	99	181	—	198	298	435	675	608	634	695	1311

Fig.3.16. Diversos disipadores para semiconductores de potencia.**Fig.3.17.** Disipador para rectificador puente trifásico.

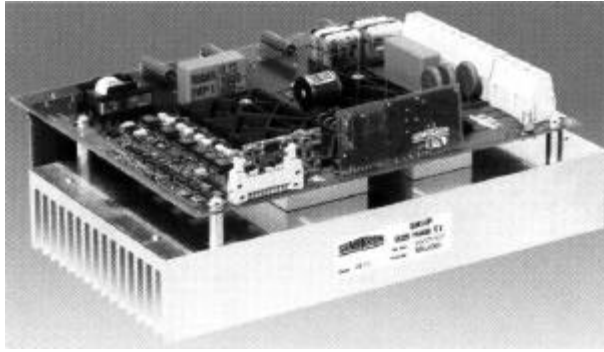


Fig.3.18. Inversor trifásico montado en un disipador.

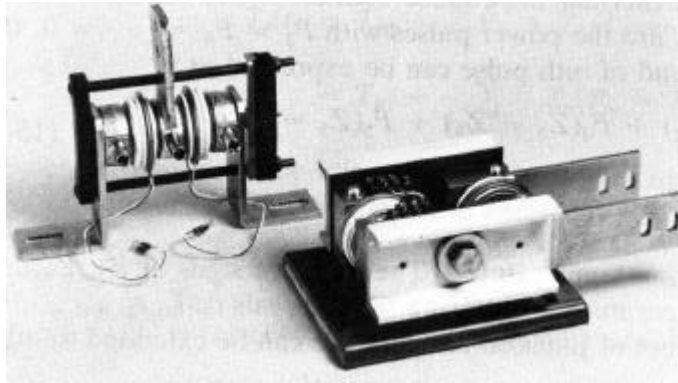


Fig.3.19. Tiristores refrigerados por agua.

CAPÍTULO 4

CONVERTIDORES DE CONMUTACIÓN NATURAL (RECTIFICADORES)

4.1) TIPOS BÁSICOS DE RECTIFICADORES.

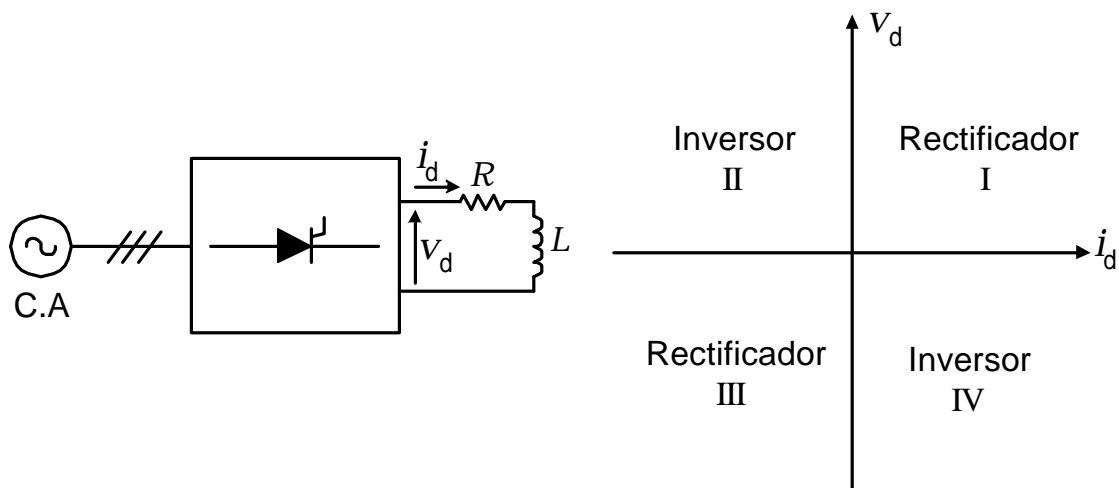


Fig.4.1.: Cuadrantes de operación de un rectificador.

4.1.1) Rectificador monofásico de media onda.

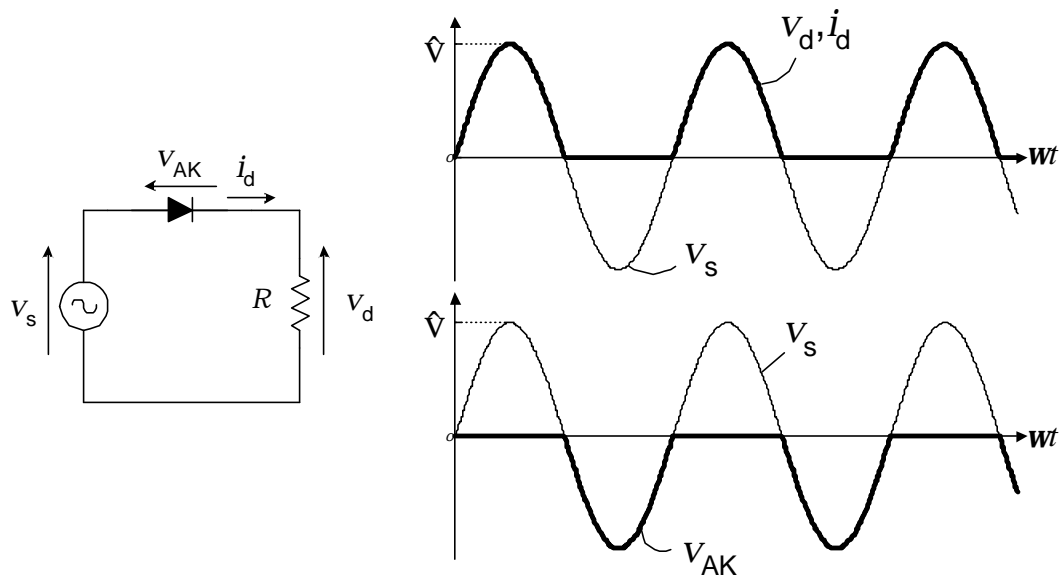


Fig.4.2.: Rectificador monofásico no controlado con carga resistiva.

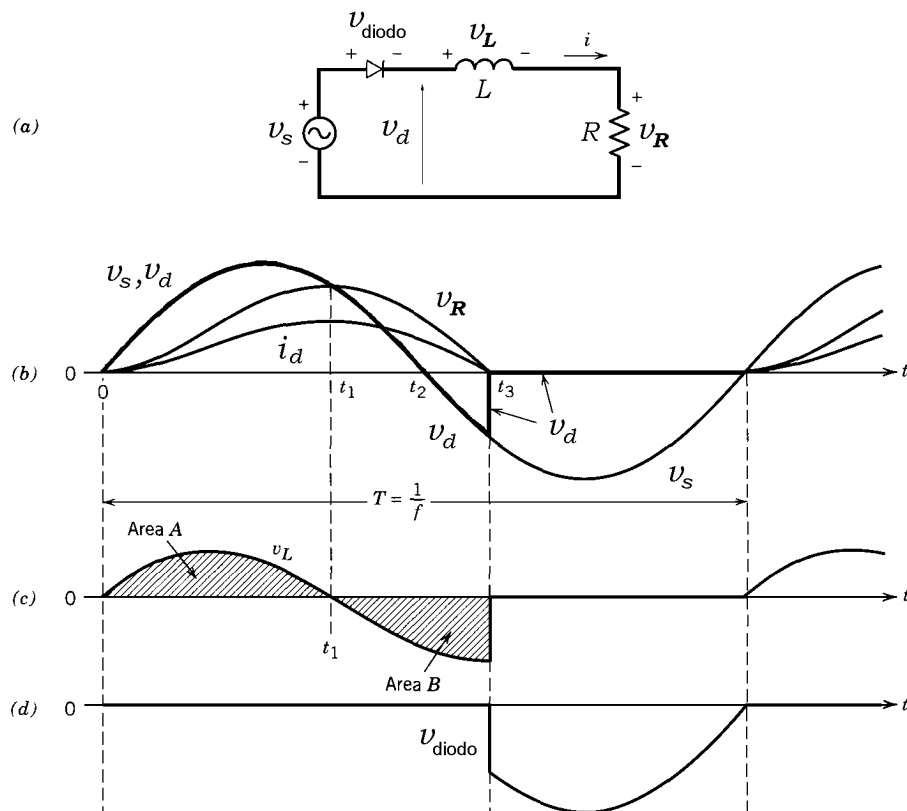


Fig.4.3.: Rectificador monofásico no controlado con carga inductiva.

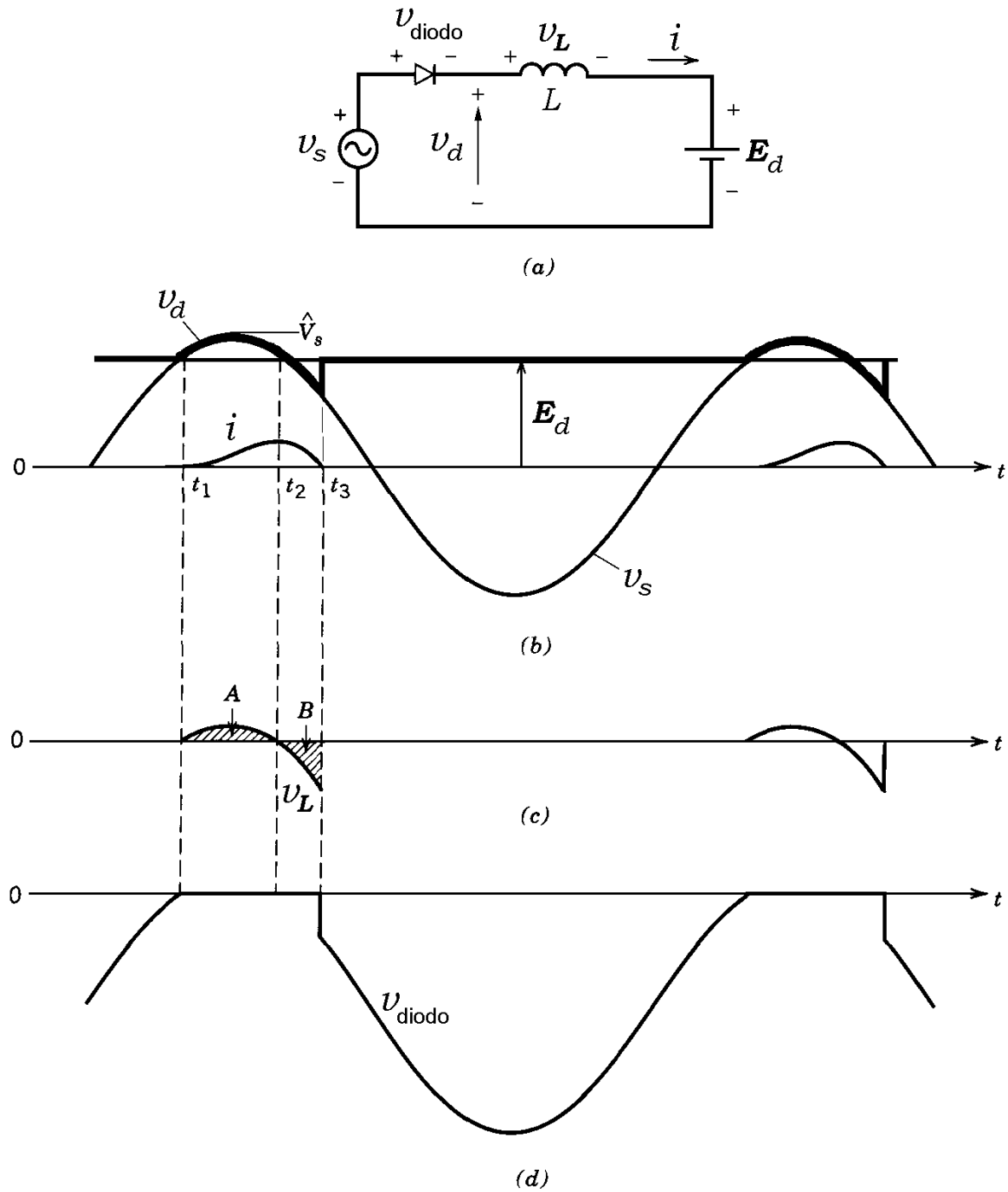
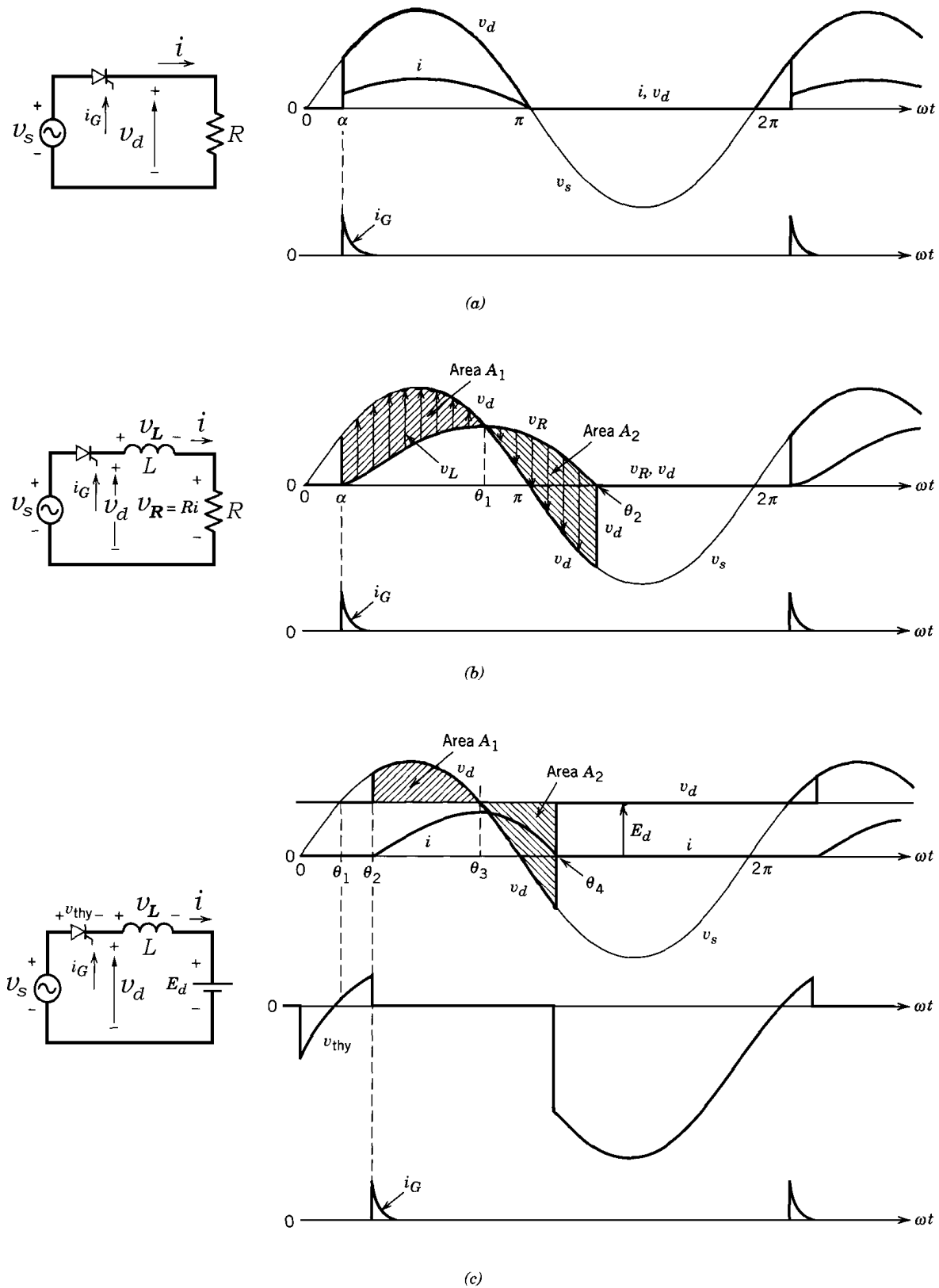


Fig.4.4.: Rectificador monofásico no controlado con carga inductiva-activa.

**Fig.4.5.:** Rectificador monofásico controlado.

4.1.2) Rectificador estrella monofásico.

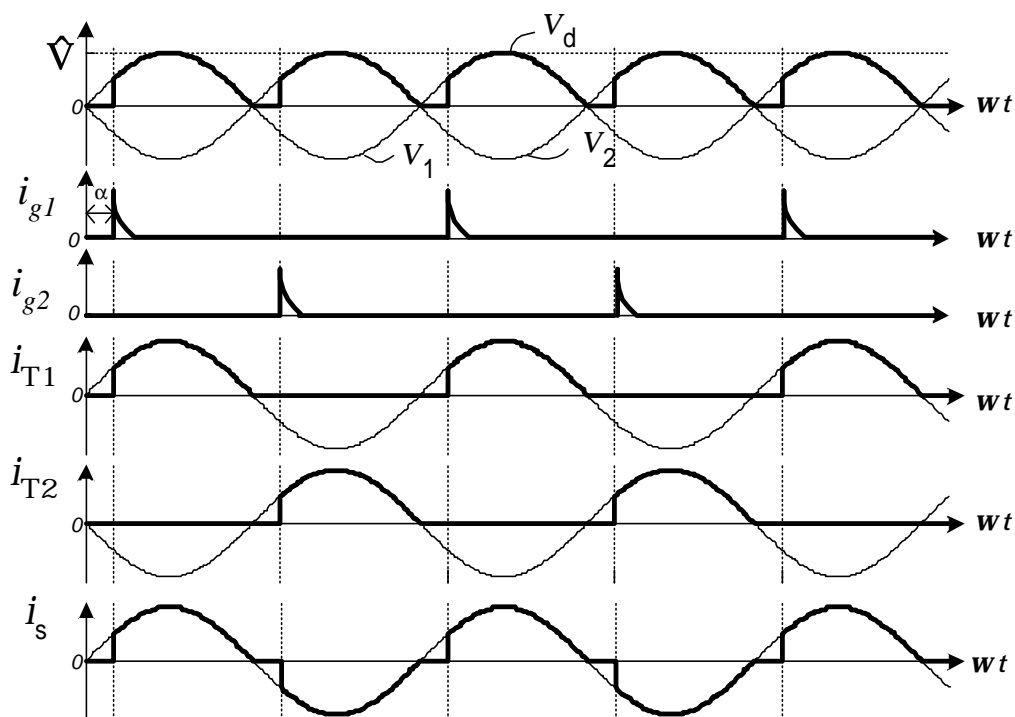
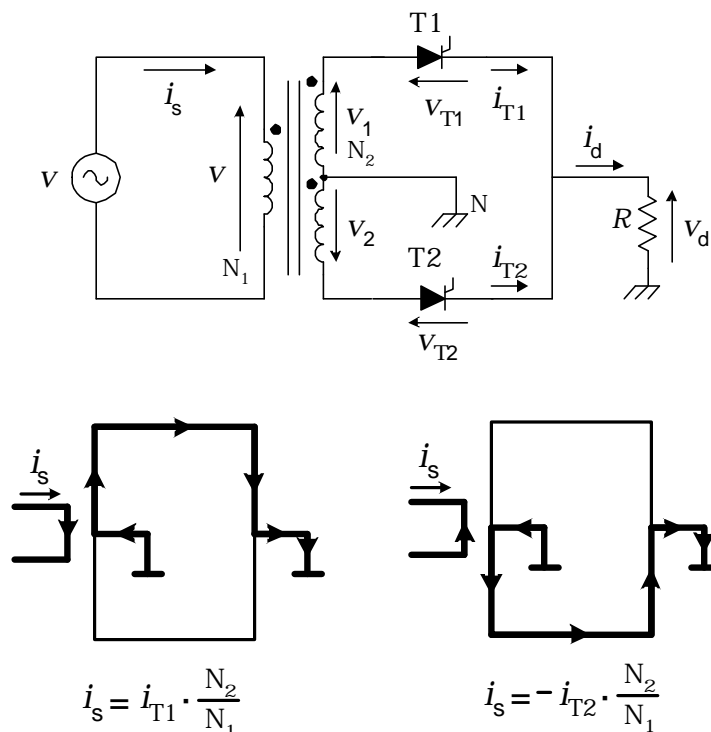


Fig.4.6.: Rectificador estrella monofásico con carga resistiva.

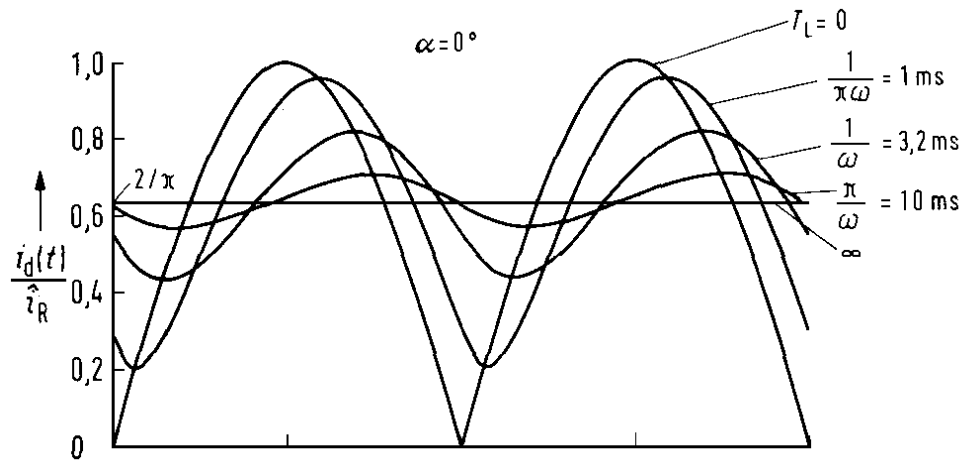


Fig.4.7.: Efecto de la constante de tiempo de la carga sobre la corriente.

4.1.3) Rectificador puente monofásico.

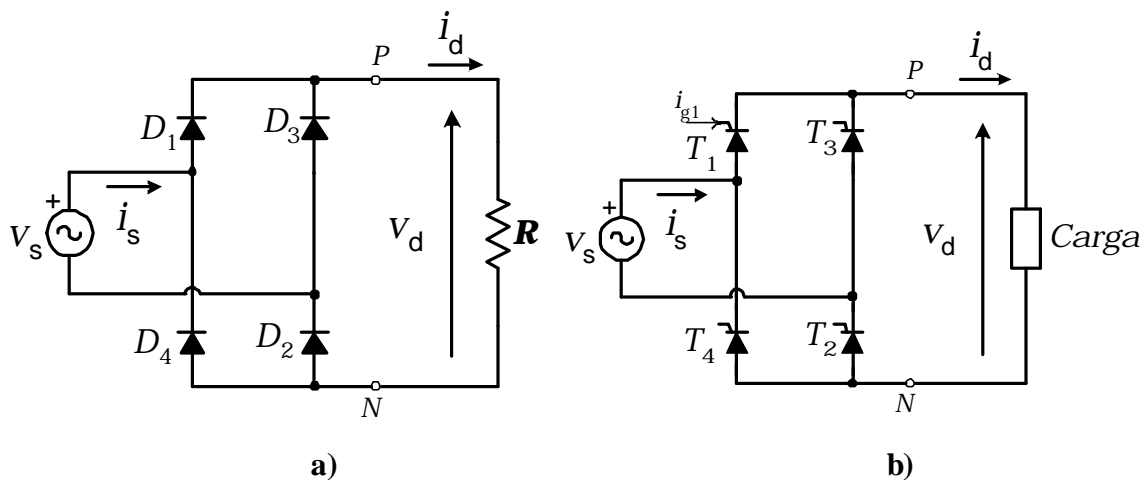


Fig.4.8.: Rectificador puente monofásico: **a)** no controlado; **b)** totalmente controlado.

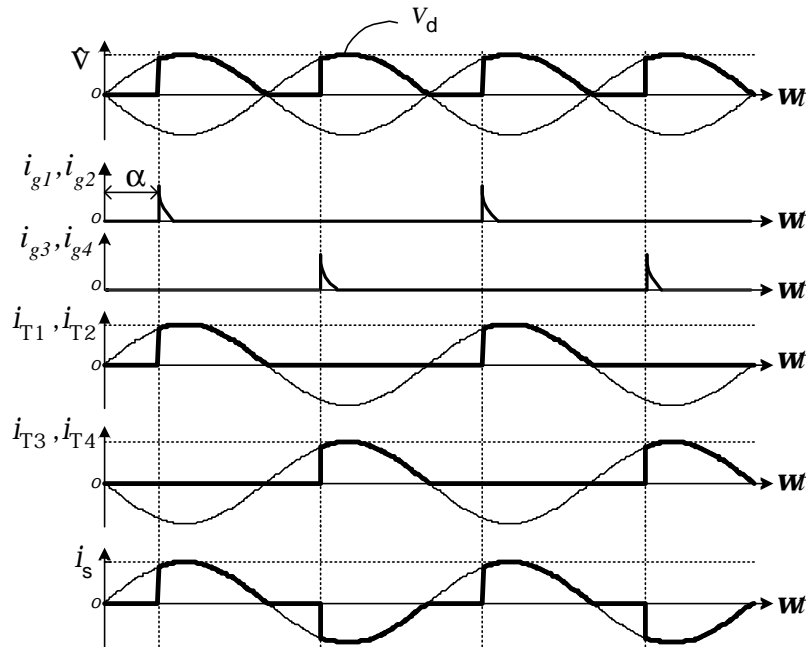


Fig.4.9.: Formas de onda del rectificador puente monofásico totalmente controlado con carga resistiva. (Ver Fig.4.8-b).

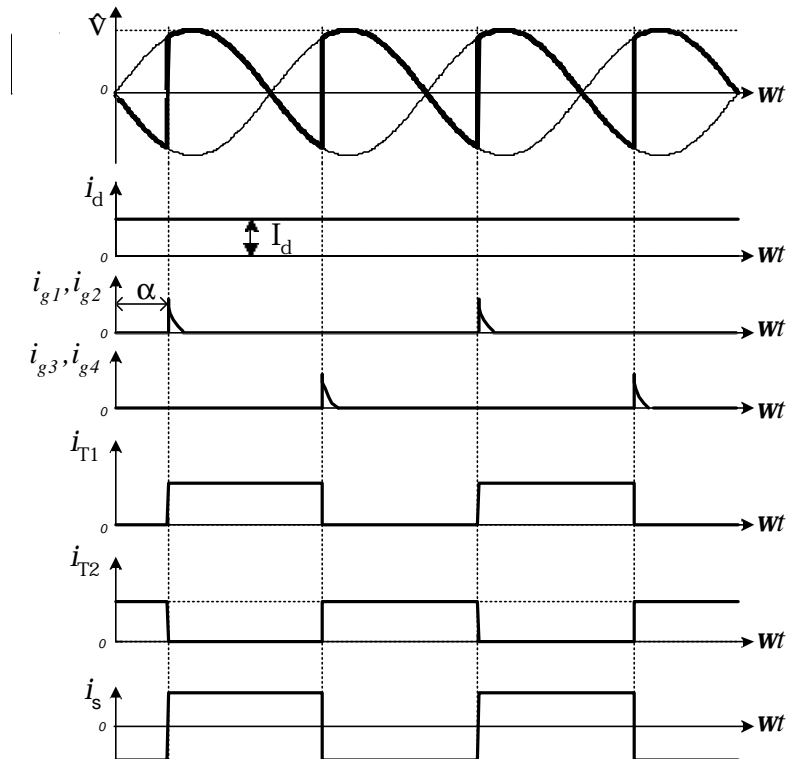


Fig.4.10.: Formas de onda del rectificador puente monofásico totalmente controlado con carga inductiva ($L \rightarrow \infty$).

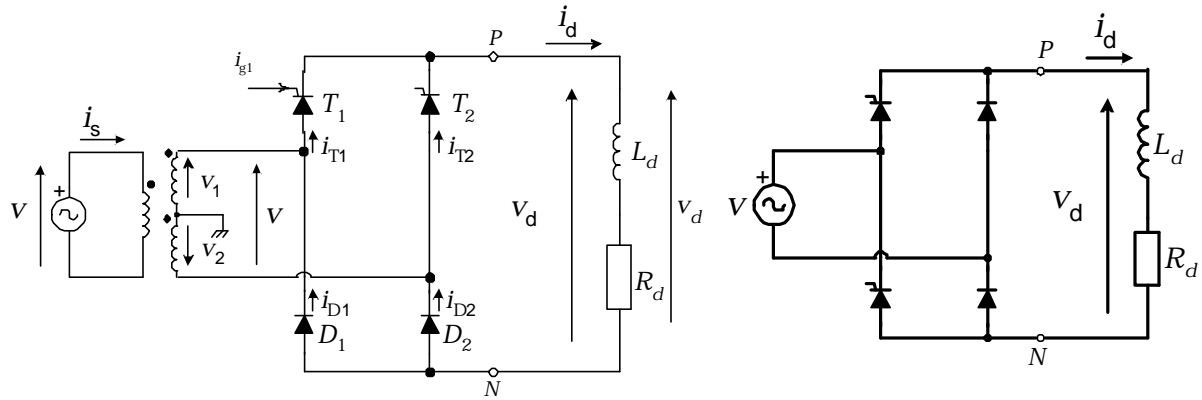


Fig.4.11.: Rectificador puente monofásico semicontrolado: **a)** simétrico; **b)** asimétrico.

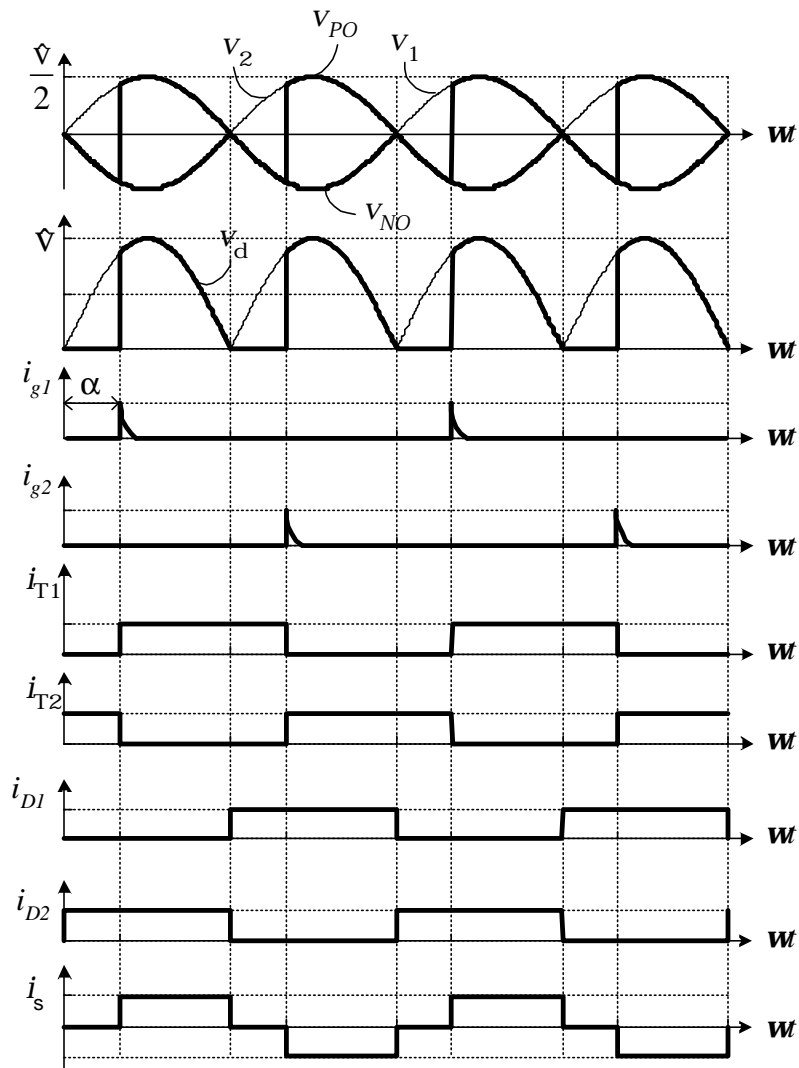


Fig.4.12.: Formas de onda del rectificador semicontrolado simétrico de la fig.4.11-a), con carga $L_d \rightarrow \infty$.

4.1.4) Rectificador estrella trifásico.

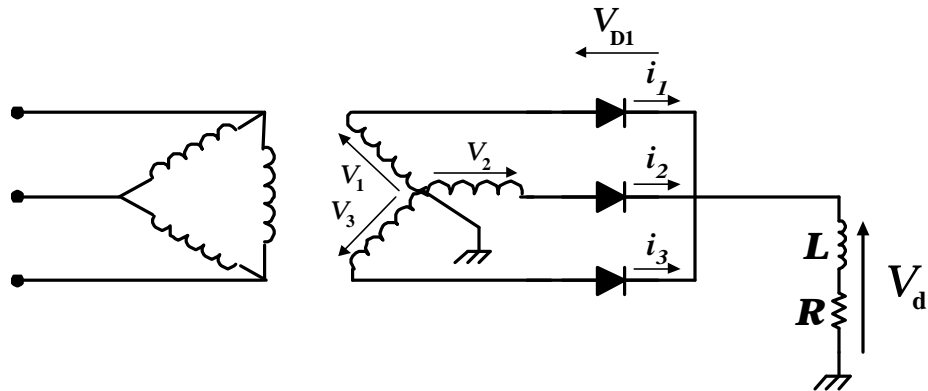


Fig.4.13.: Rectificador estrella trifásico no controlado.

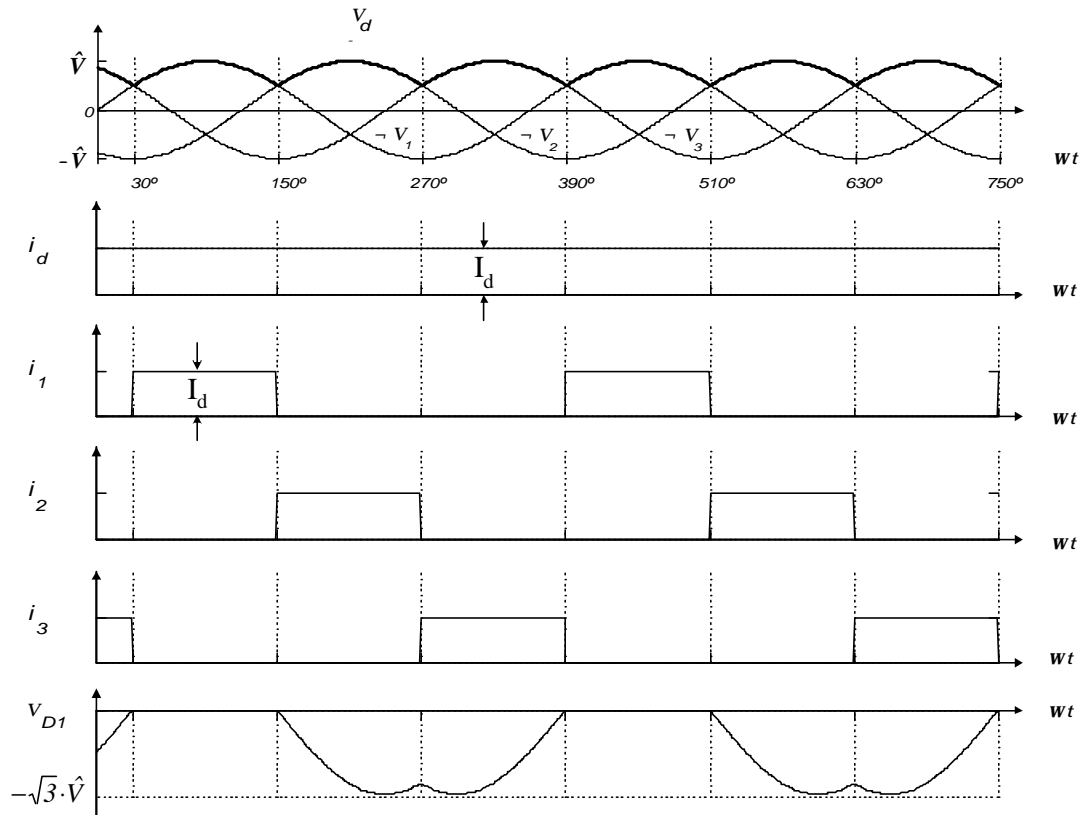


Fig.4.14.: Formas de onda del rectificador estrella de la figura 4.13.

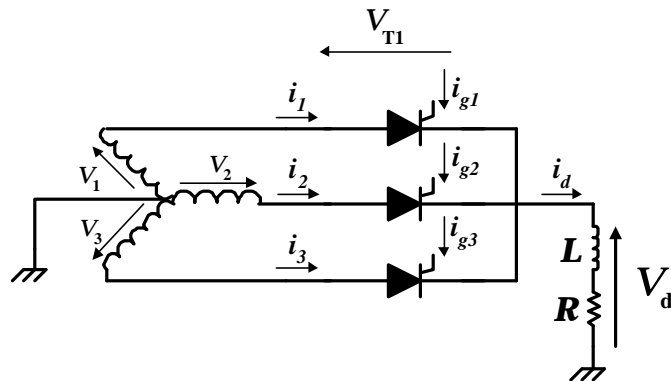


Fig.4.15.: Rectificador estrella trifásico controlado.

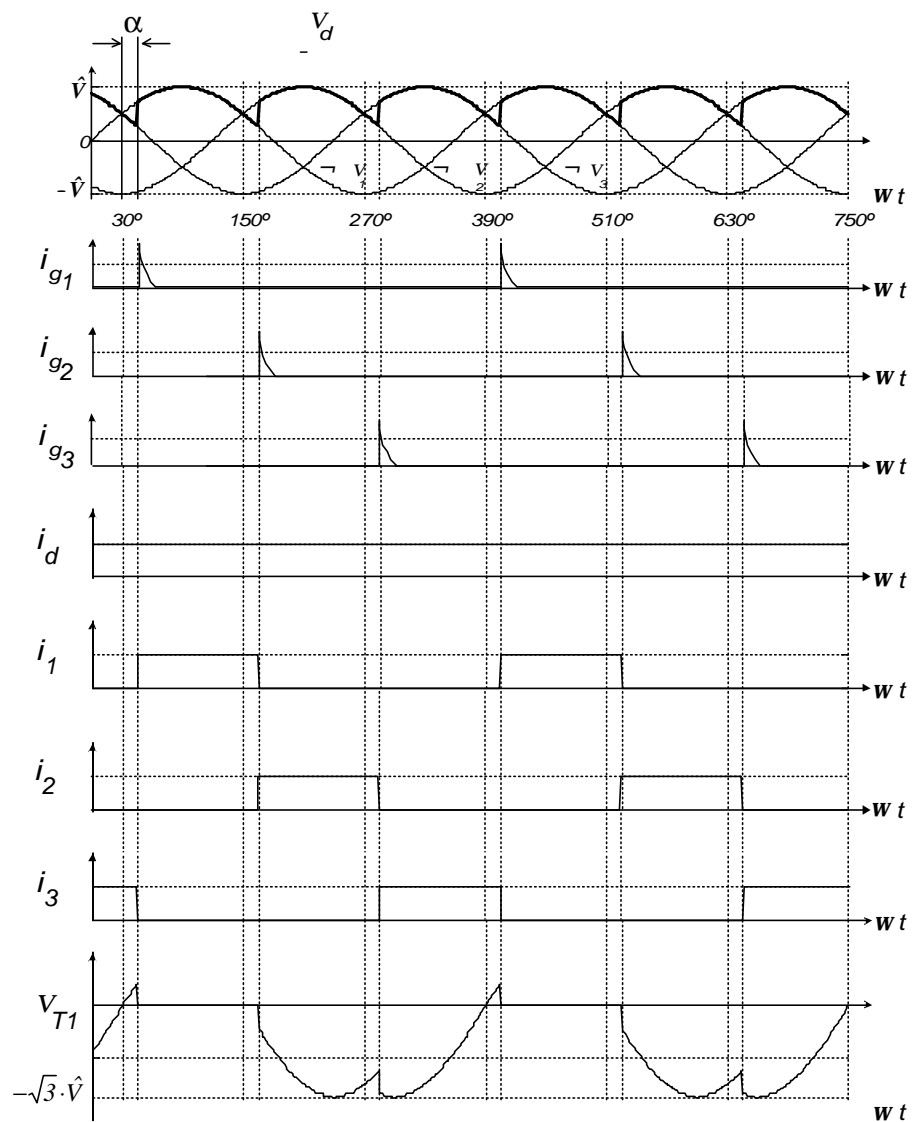


Fig.4.16.: Formas de onda del rectificador estrella de la figura 4.15.

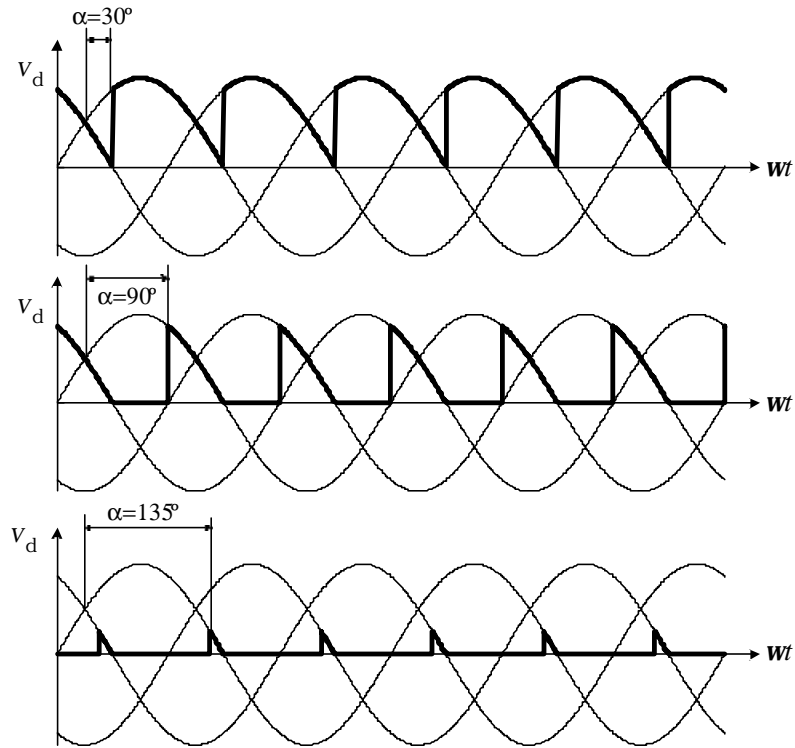


Fig.4.17.: Tensión en la carga de un rectificador estrella trifásico con carga resistiva pura.

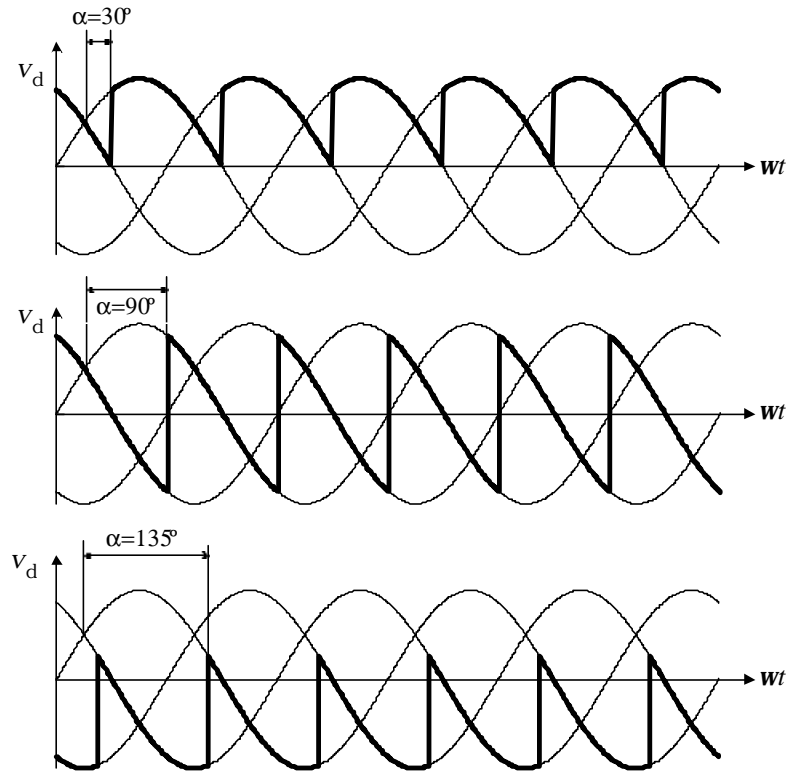


Fig.4.18.: Tensión en la carga de un rectificador estrella trifásico con carga R-L ($L_d \rightarrow \infty$).

4.1.5) Rectificador trifásico puente. (Puente de Graetz).

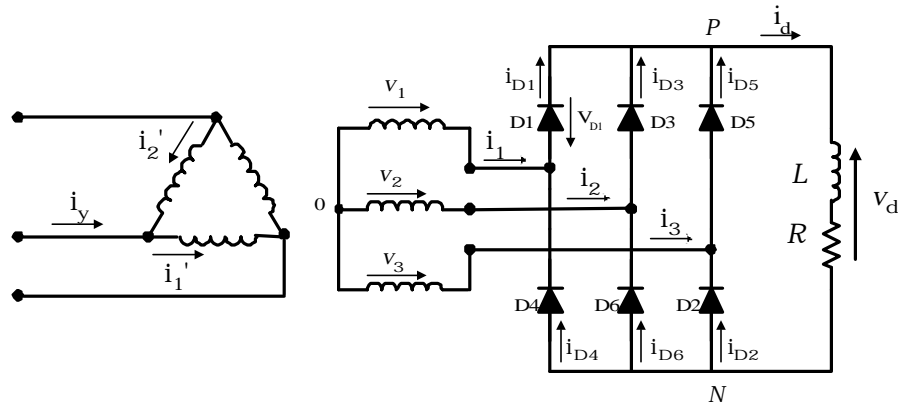


Fig.4.19.: Rectificador puente trifásico no controlado.

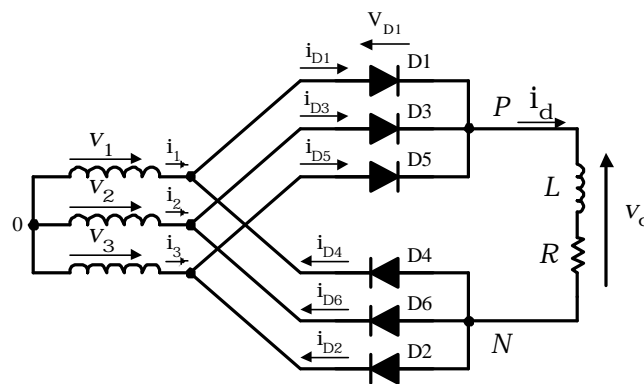


Fig.4.20.: Otra forma de ver el rectificador de la figura 4.19.

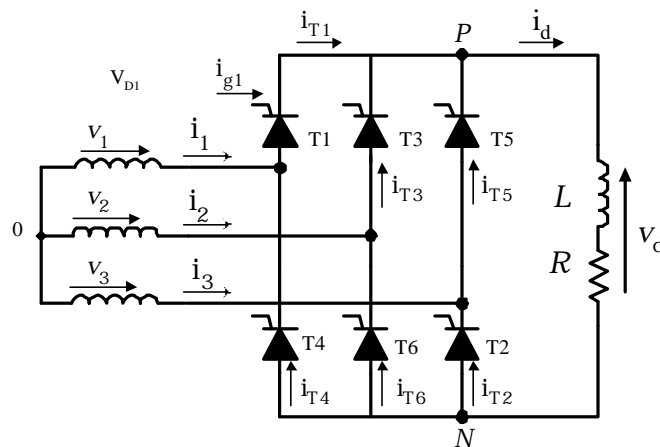


Fig.4.21.: Rectificador puente trifásico controlado.

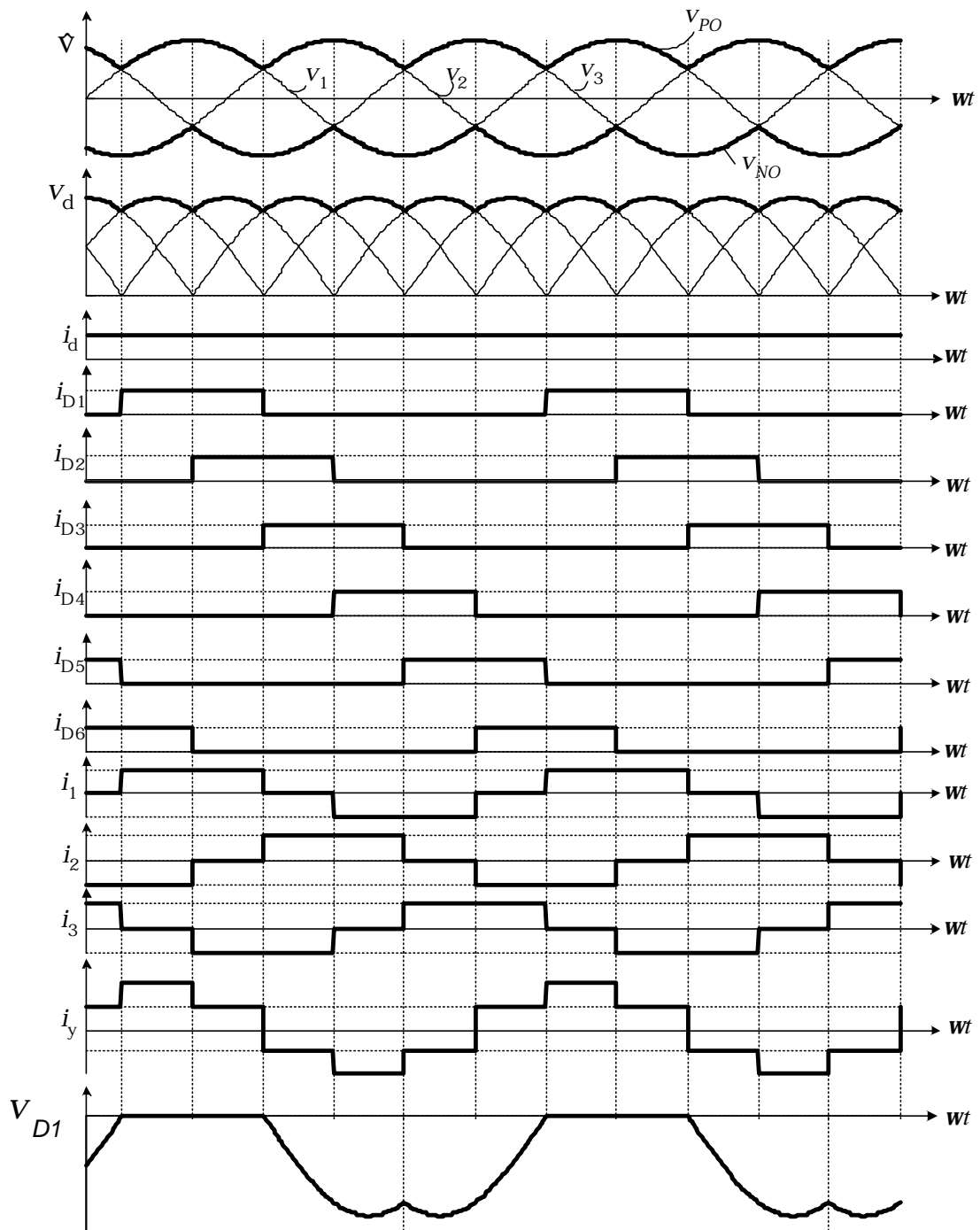


Fig.4.22.: Formas de onda del rectificador puente controlado de las figuras 4.19 y 4.20.

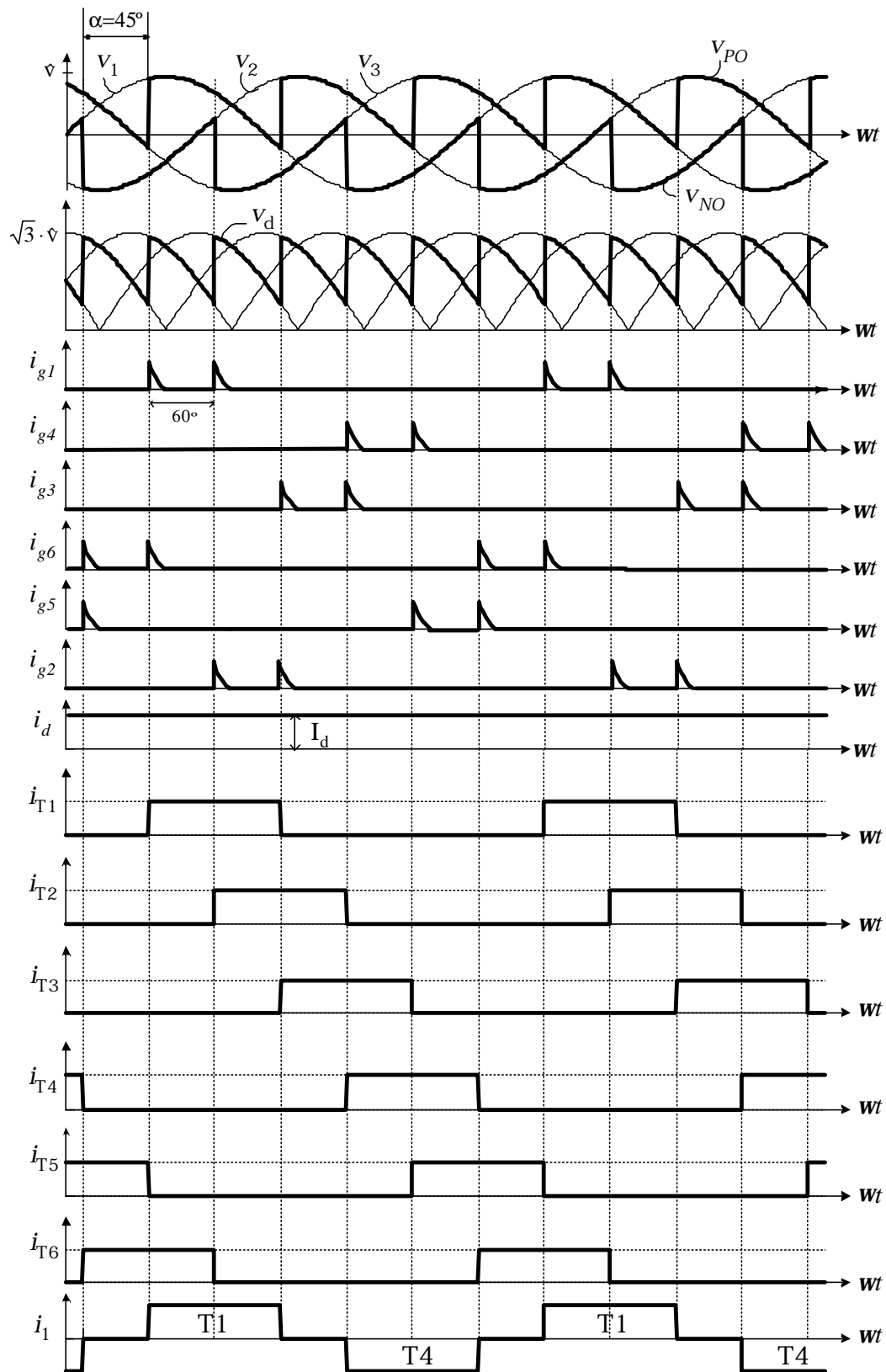


Fig.4.23. Formas de onda del rectificador puente controlado.

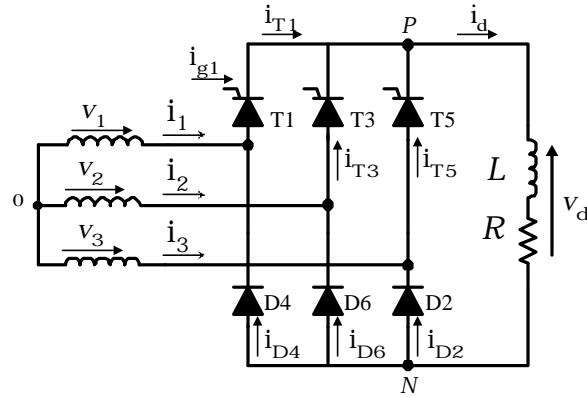


Fig.4.24.: Rectificador puente trifásico semicontrolado.

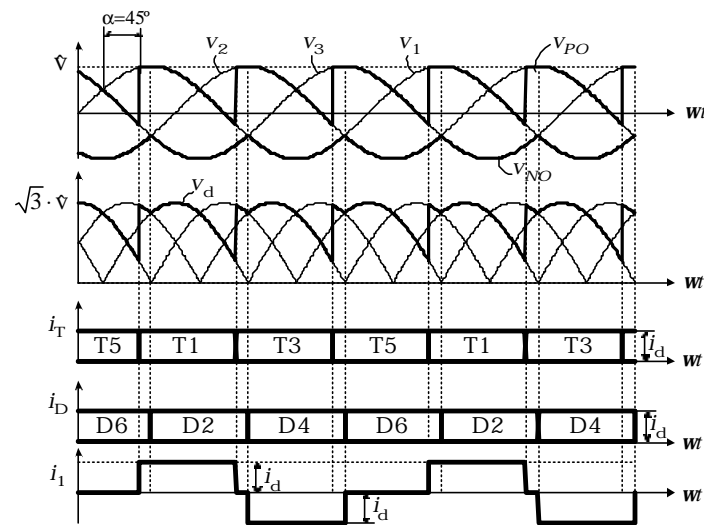


Fig.4.25.: Formas de onda del rectificador de la figura 4.24 con $\alpha = 45^\circ$.

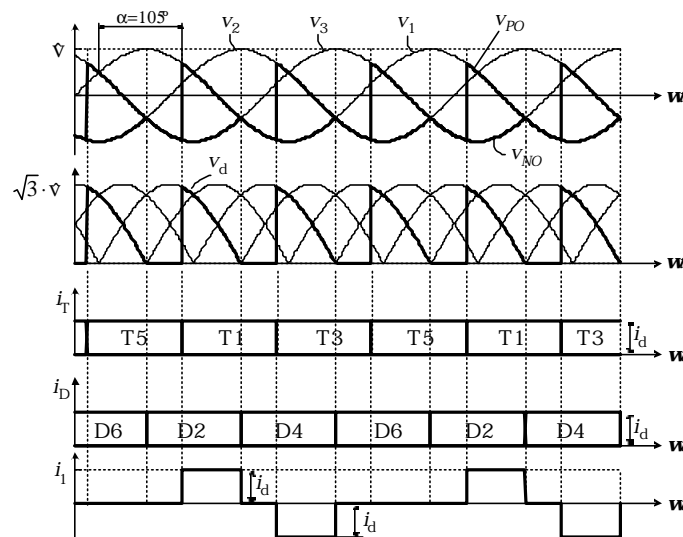


Fig.4.26.: Formas de onda del rectificador de la figura 4.24 con $\alpha = 105^\circ$.

4.1.6) Rectificador hexafásico.

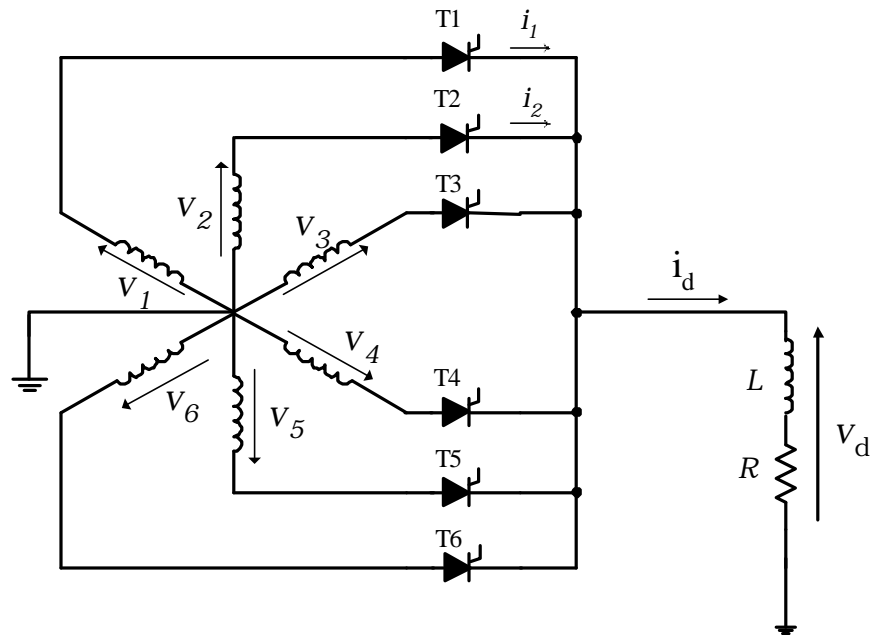


Fig.4.27.: Rectificador hexafásico.

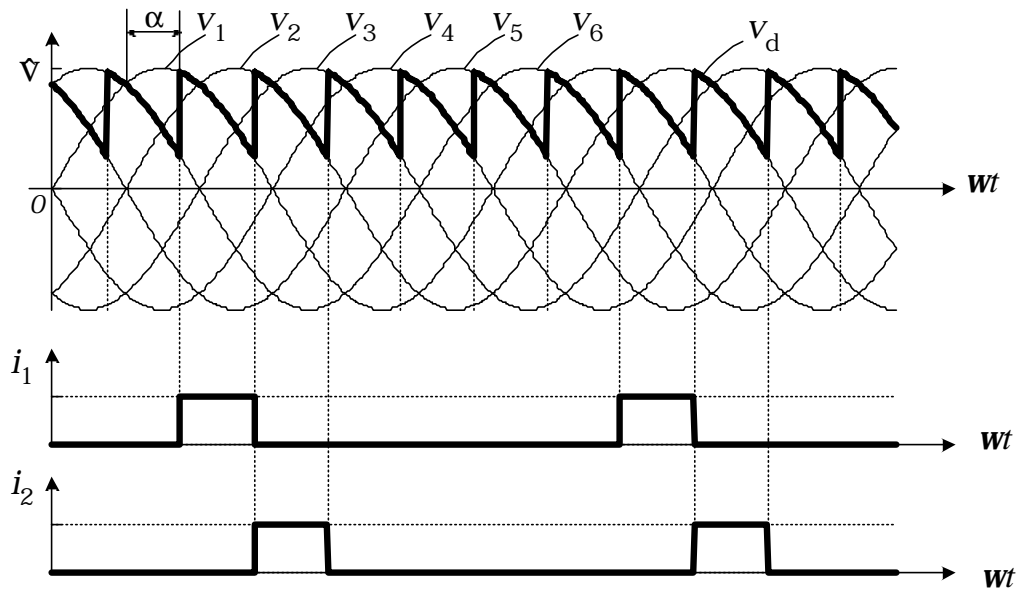


Fig.4.28.: Formas de onda del rectificador hexafásico.

4.2) RECTIFICADORES CON DIODO VOLANTE.

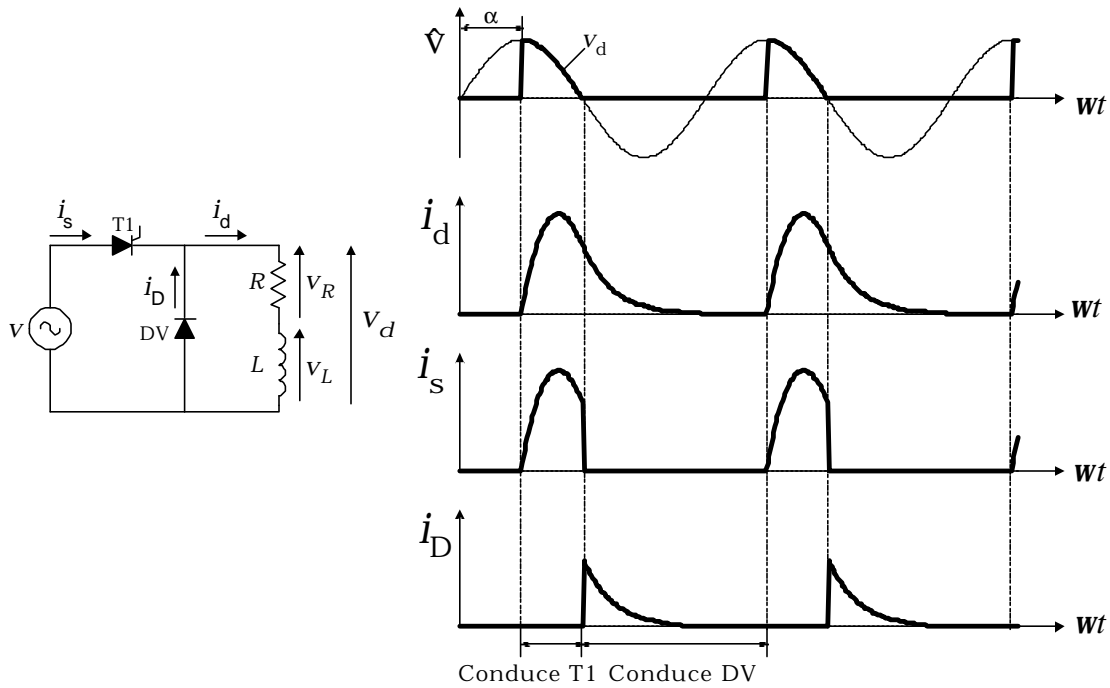


Fig.4.29.: Rectificador monofásico con diodo volante.

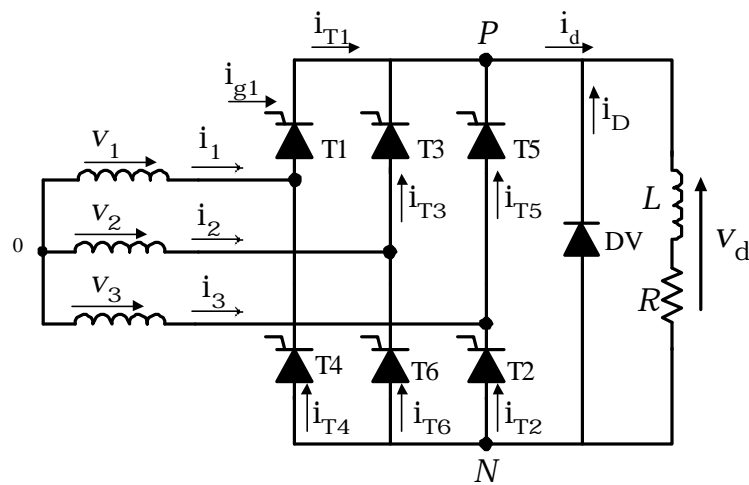


Fig.4.30.: Rectificador trifásico puente con diodo volante.

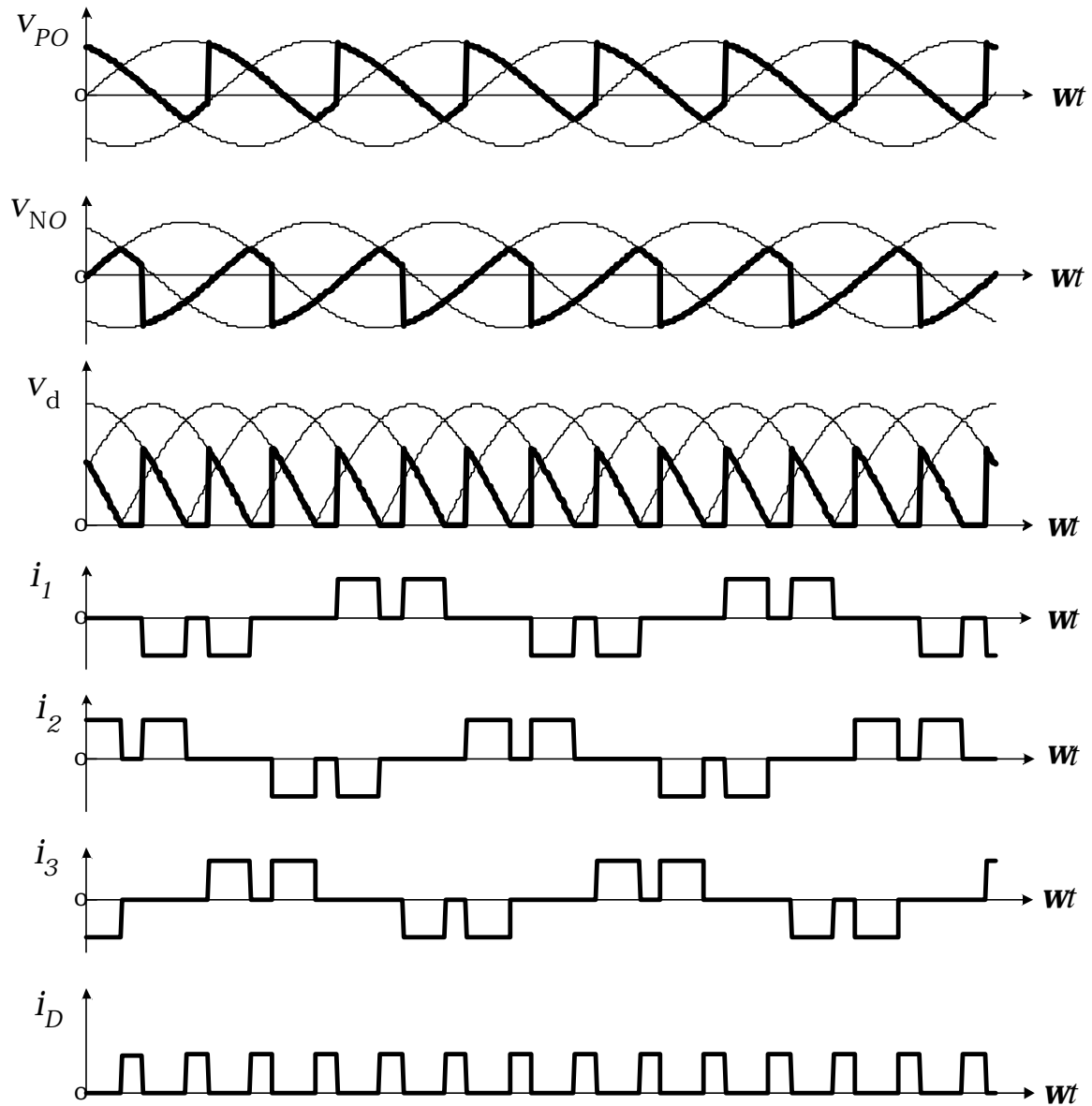


Fig.4.31.: Formas de onda del rectificador trifásico puente con diodo volante.

4.3) OPERACIÓN DE UN RECTIFICADOR COMO INVERSOR.

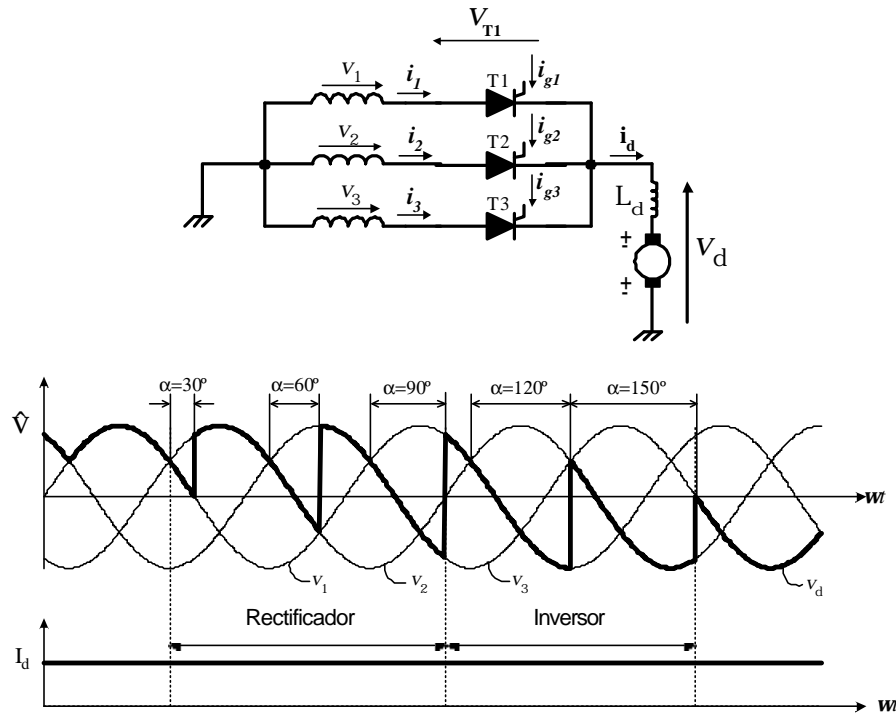


Fig.4.32.: Operación de un rectificador con ángulo de disparo variable.

4.4) EL NÚMERO DE PULSOS DE UN RECTIFICADOR

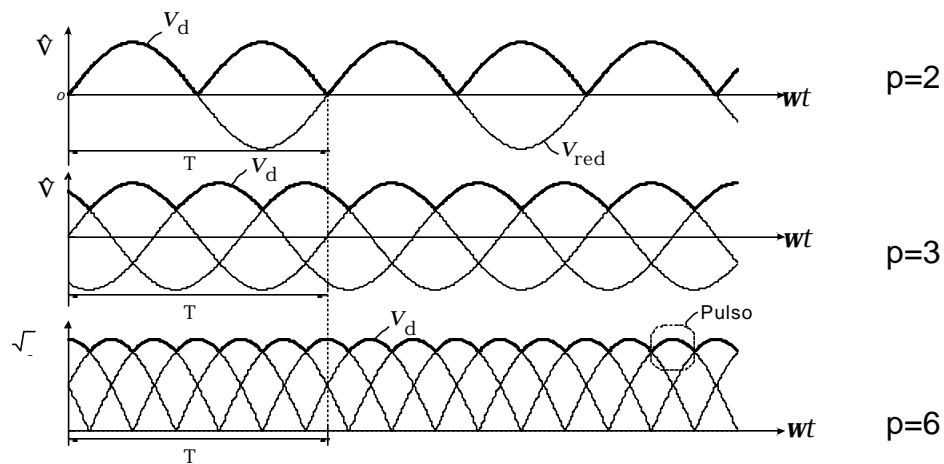


Fig.4.33.: Sobre la definición del número de pulsos de un rectificador.

4.5) OPERACIÓN DE RECTIFICADORES CON CARGA ACTIVA

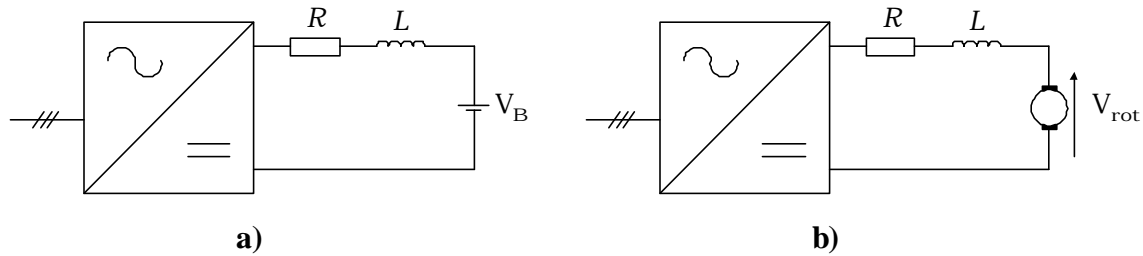


Fig.4.34.: Rectificadores con carga activa: **a)** batería; **b)** motor de corriente continua.

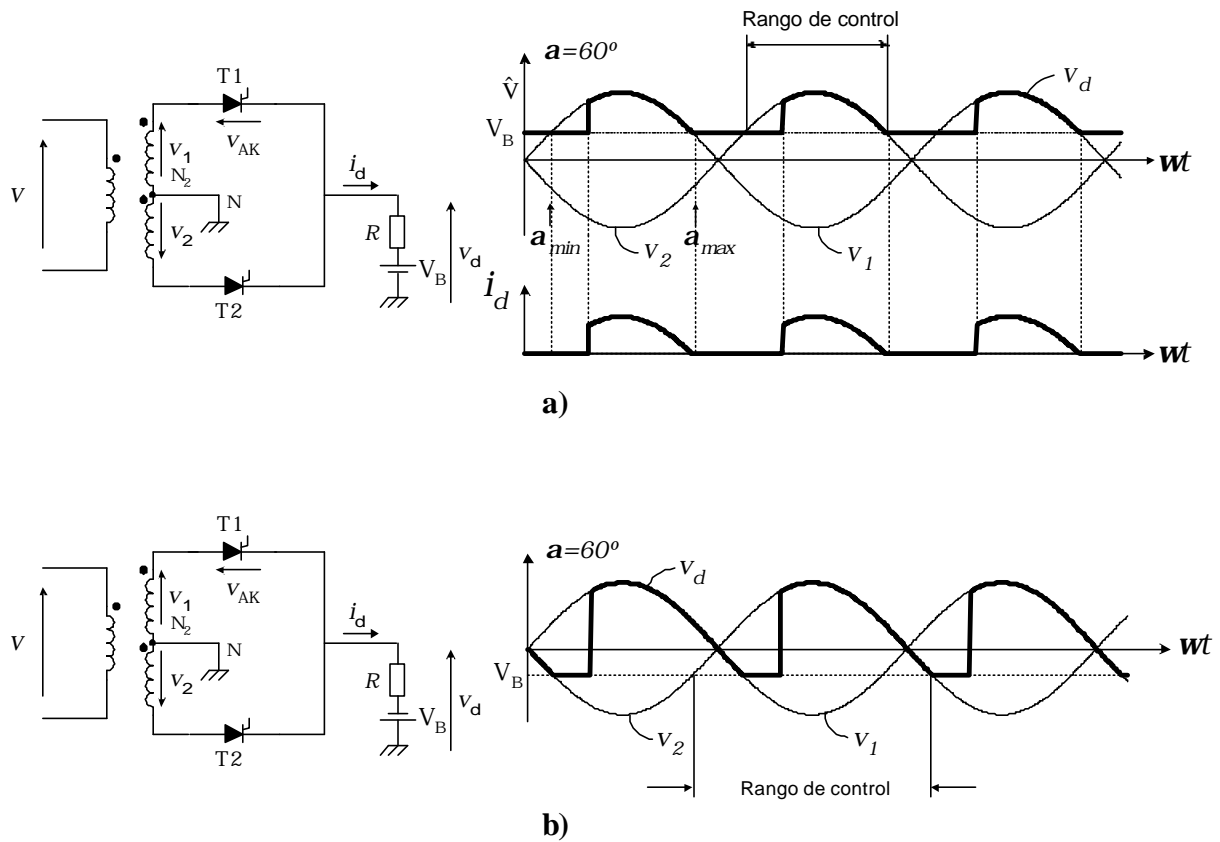


Fig.4.35.: Rectificador con carga activa-resistiva: **a)** $V_B > 0$; **b)** $V_B < 0$.

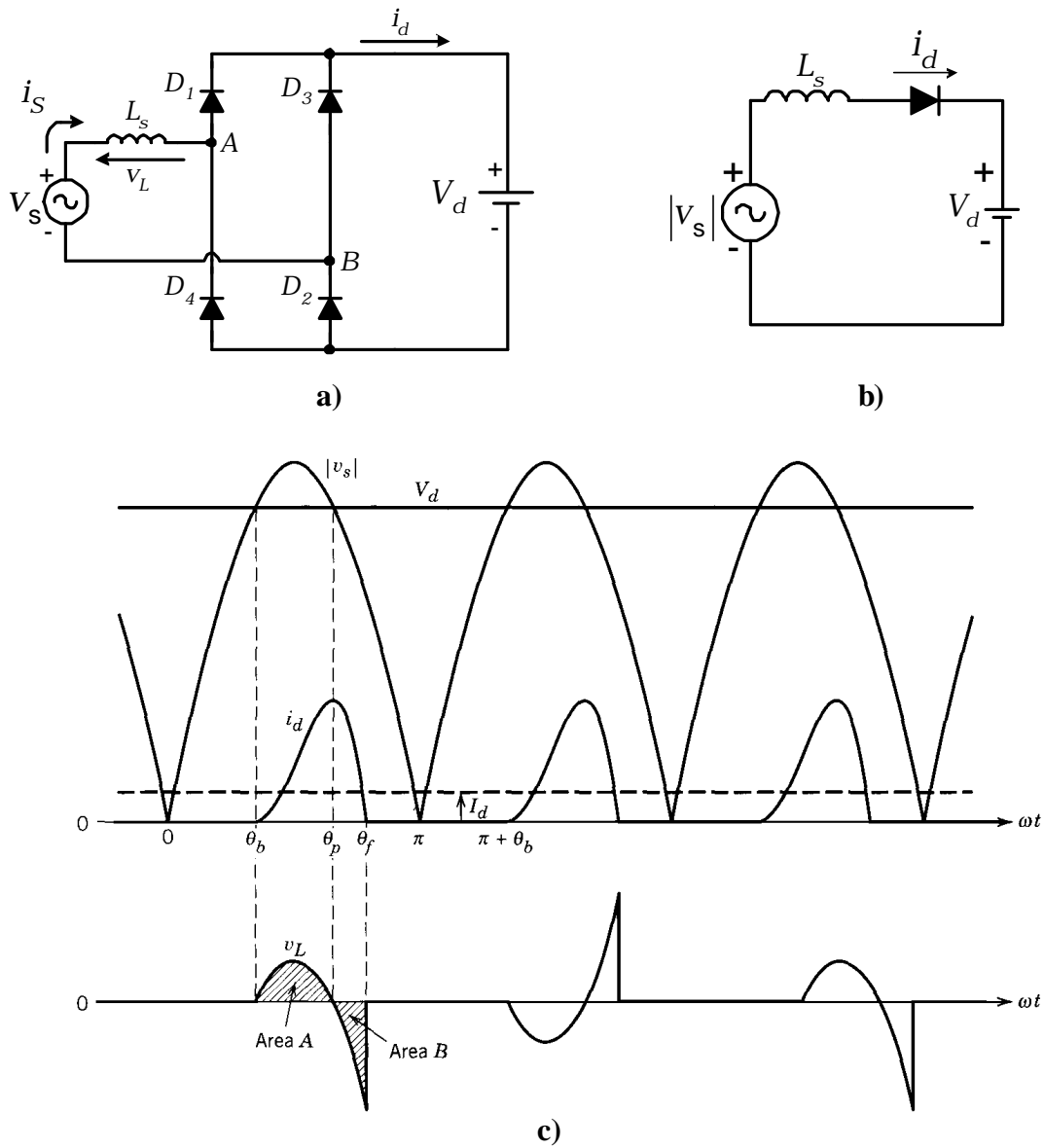


Fig.4.36.: Rectificador monofásico con carga activa-inductiva: **a)** circuito; **b)** circuito equivalente; **c)** formas de onda.

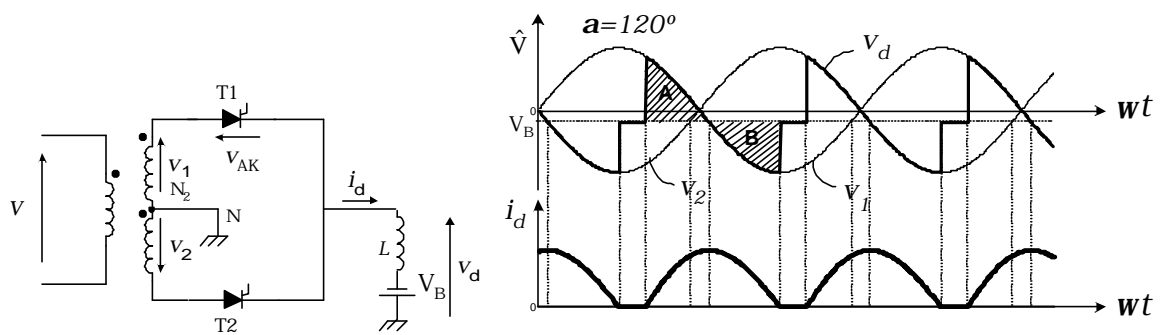
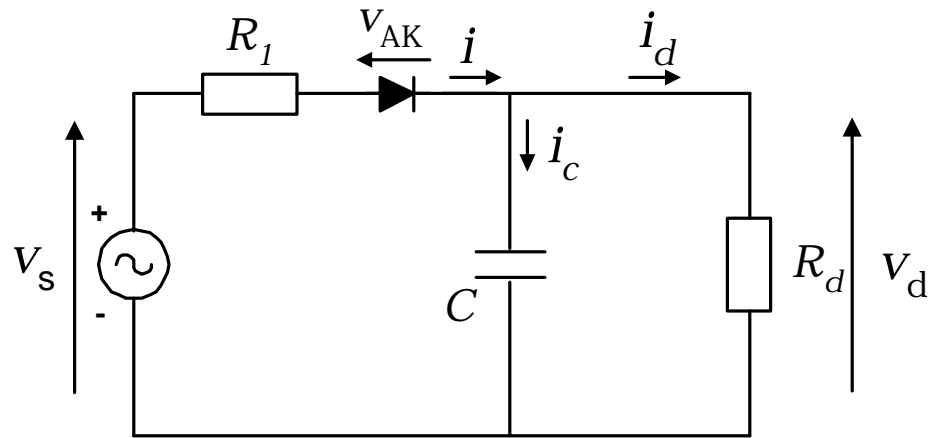
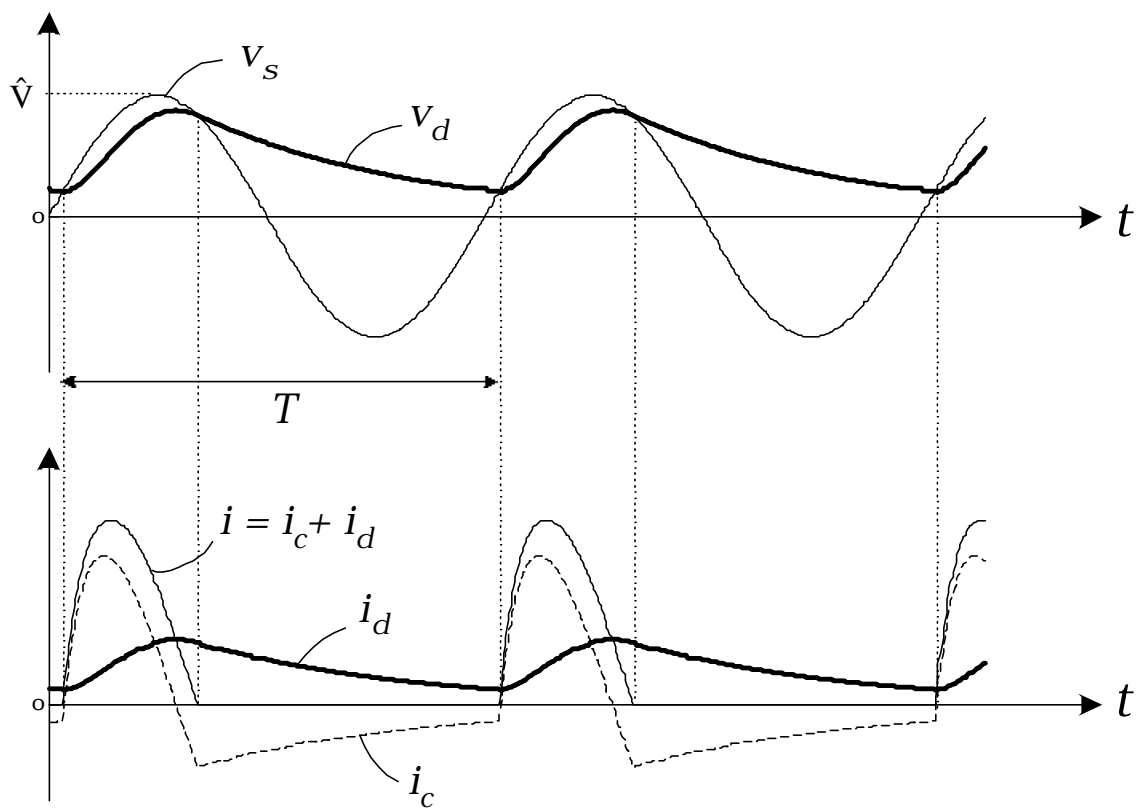


Fig.4.37: Rectificador monofásico con carga activa-inductiva ($V_B < 0$).

4.6) OPERACIÓN CON CARGA CAPACITIVA



a)



b)

Fig.4.38.: Rectificador monofásico de media onda con carga capacitiva: **a)** circuito; **b)** formas de onda.

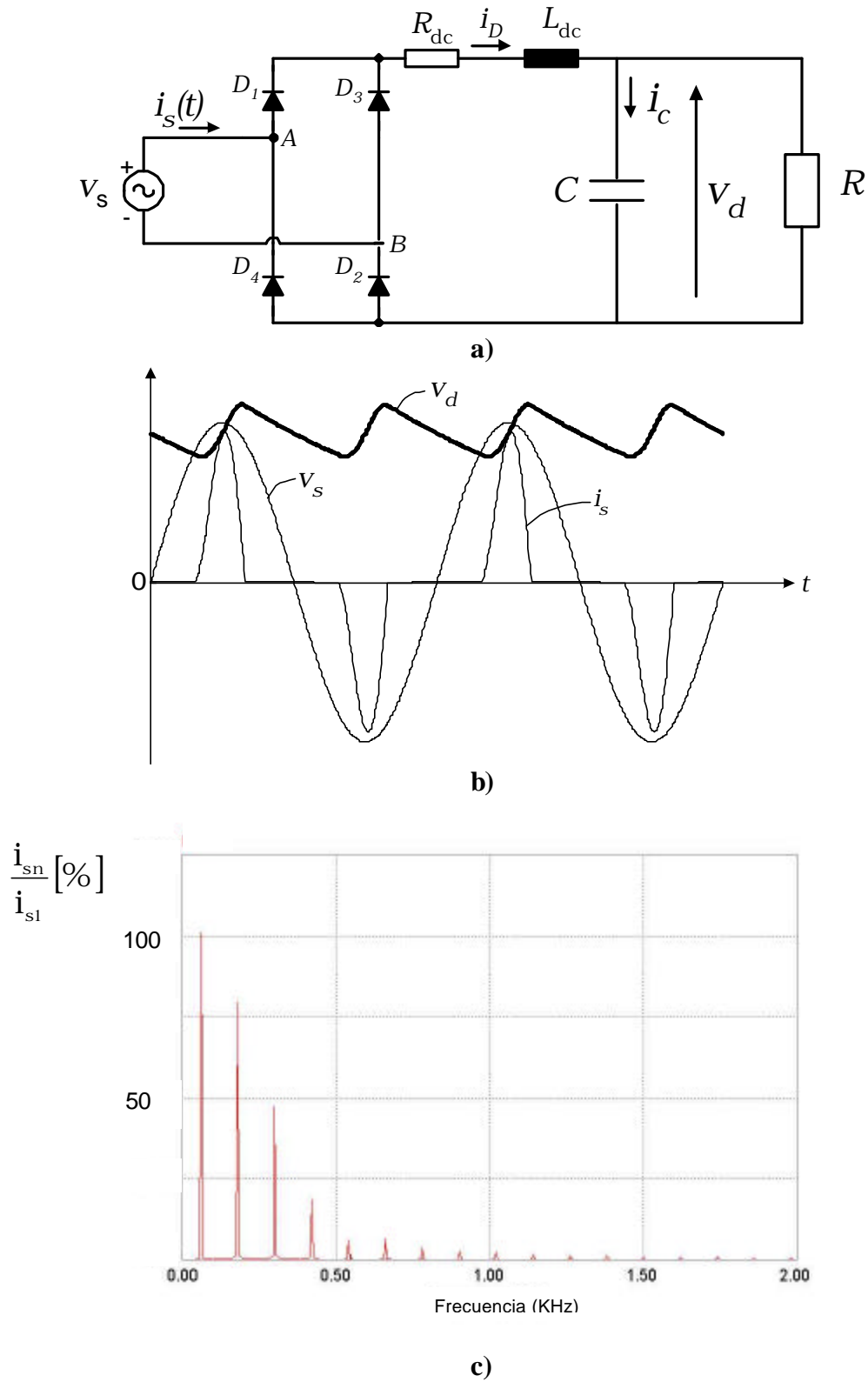


Fig.4.39. Rectificador puente monofásico con carga capacitiva: **a)** circuito; **b)** formas de onda; **c)** armónicas de la corriente $i_s(t)$.

4.7) TRANSFORMADORES PARA RECTIFICADORES.

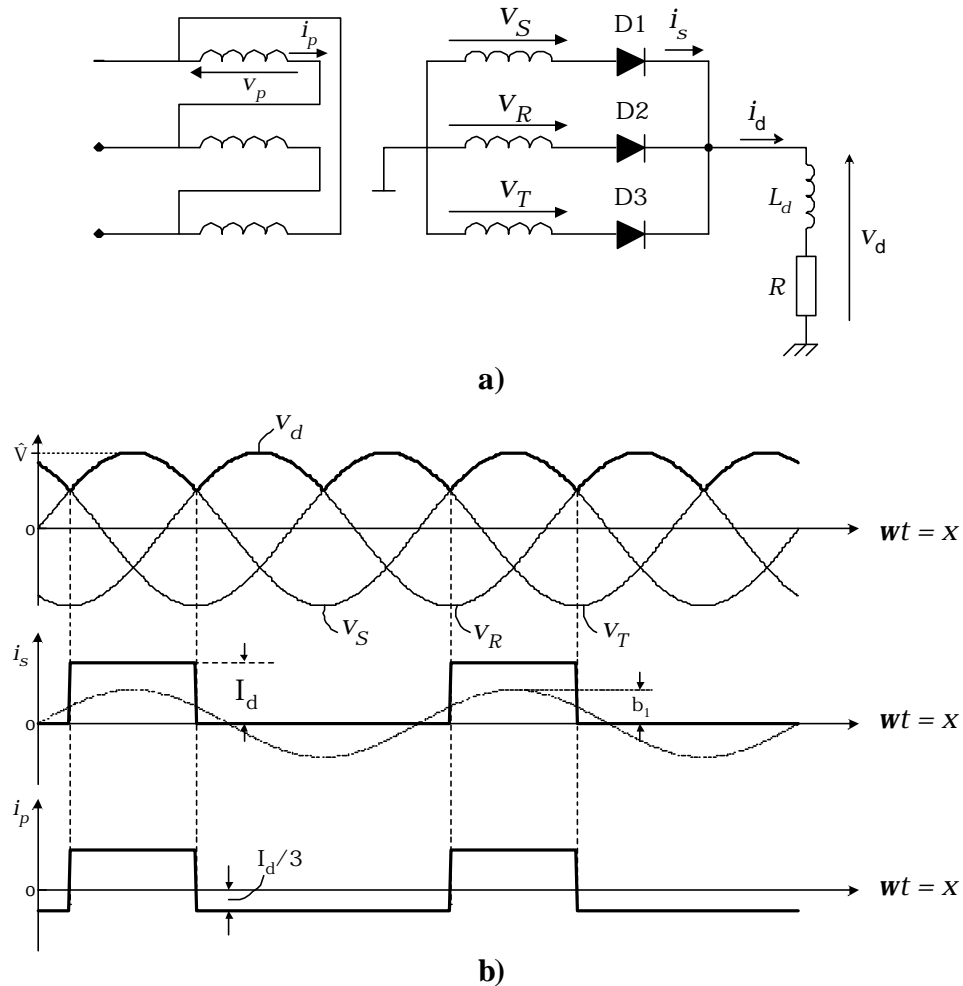


Fig.4.40.: Transformador delta-estrella alimentando a un rectificador estrella trifásico: a) circuito; b) formas de onda.

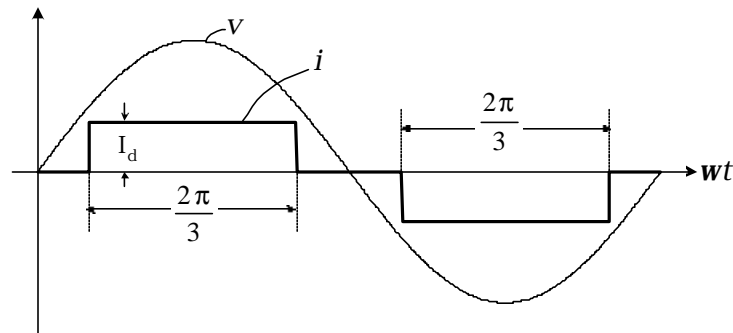
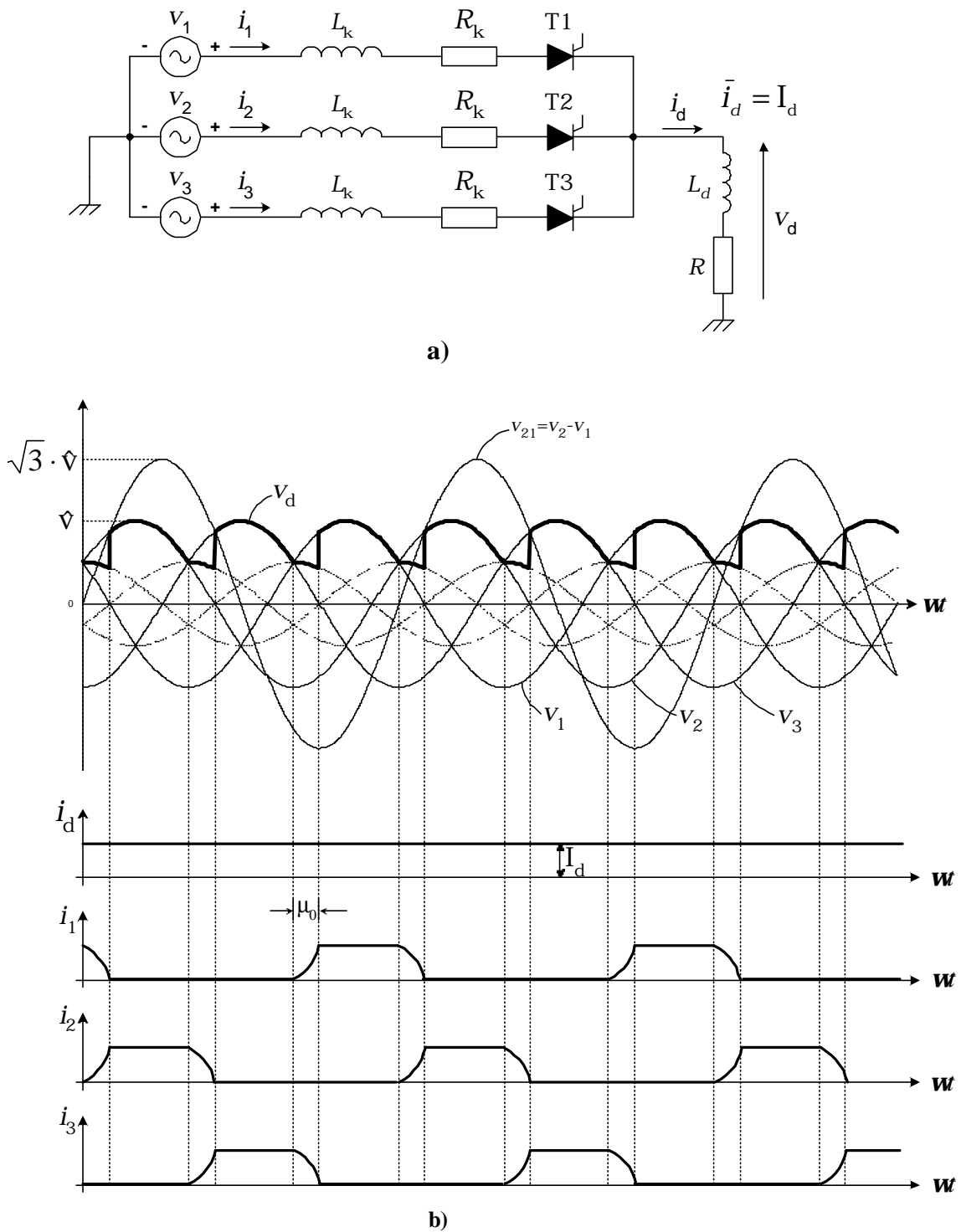


Fig.4.41.: Corriente en el primario y en el secundario de un transformador estrella-estrella alimentando a un rectificador puente trifásico.

4.8) EL PROCESO DE CONMUTACIÓN.



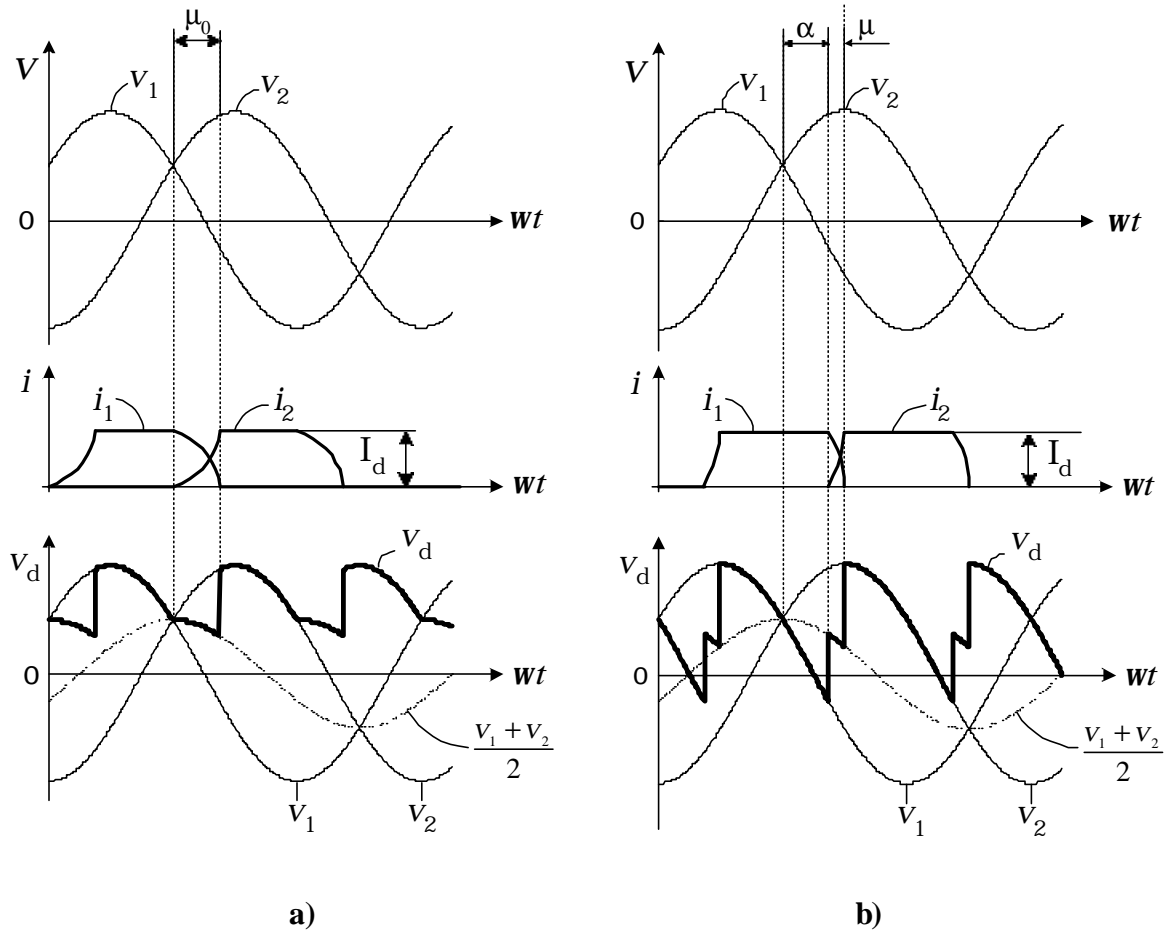


Fig.4.43.: Efecto del ángulo de disparo α sobre el ángulo de conmutación μ : a) $\alpha = 0$; b) $\alpha = 45^\circ$.

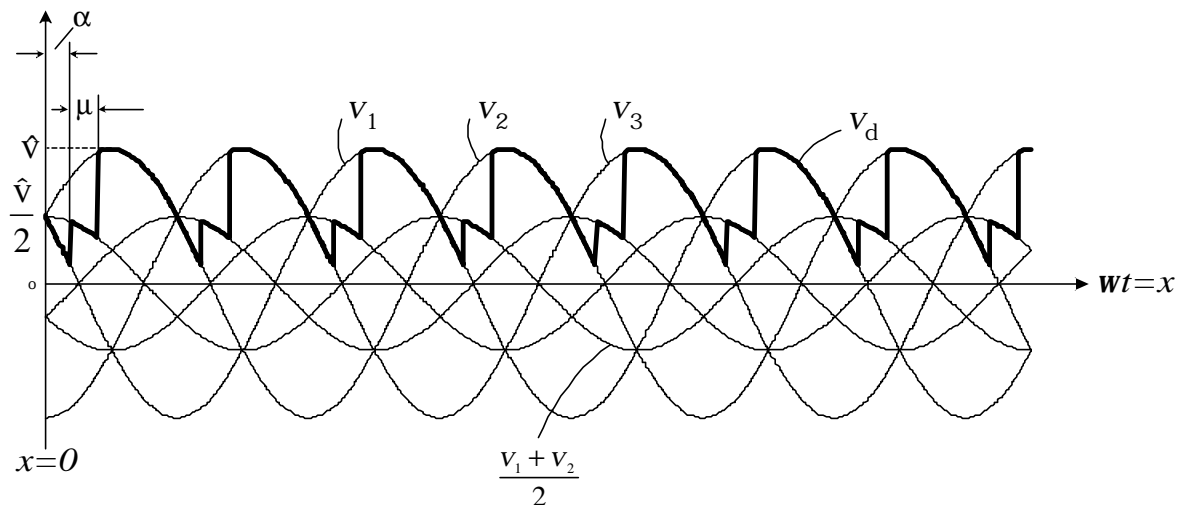
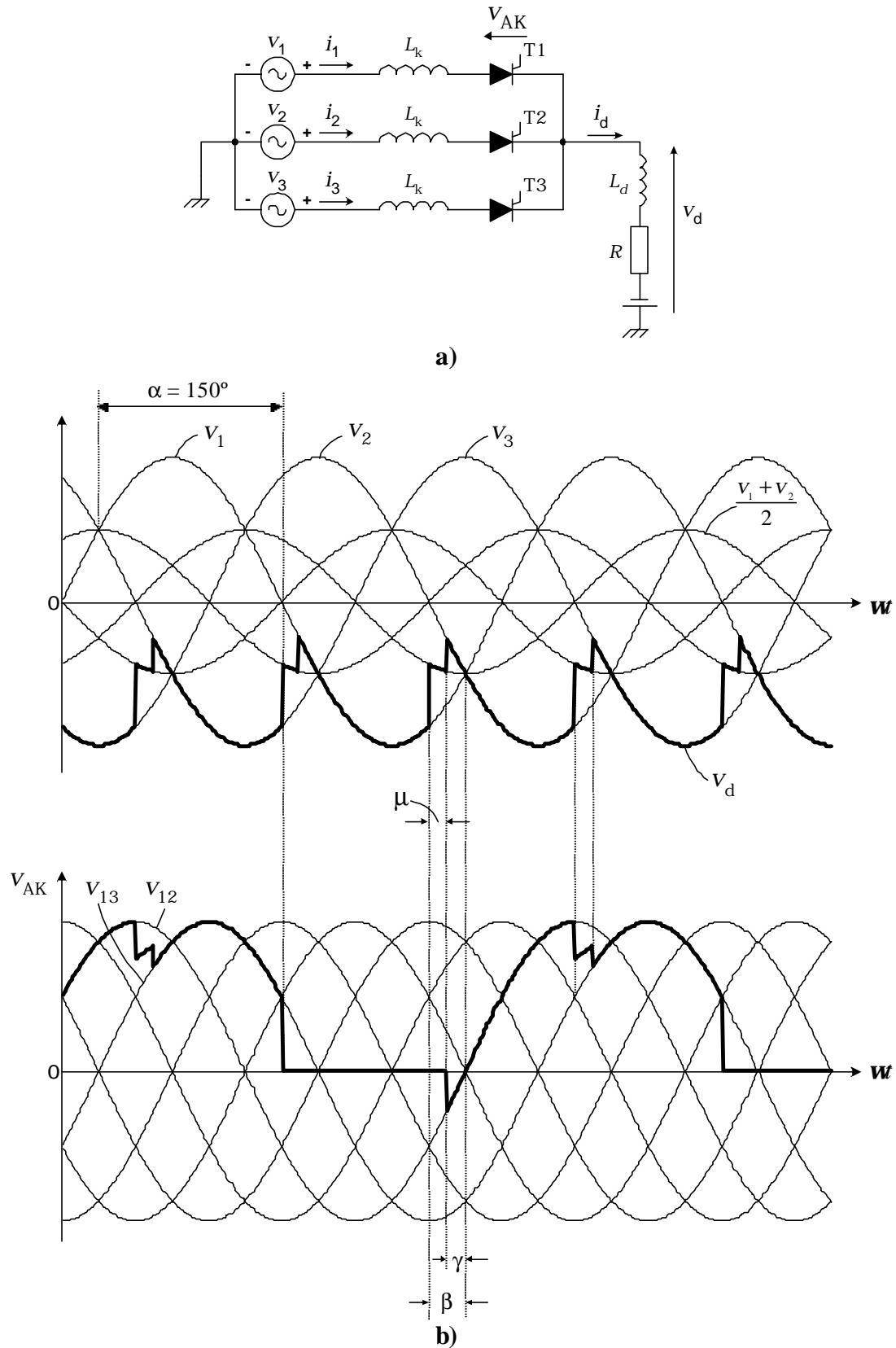


Fig.4.44.: Formas de onda para calcular la tensión en la carga considerando la conmutación.



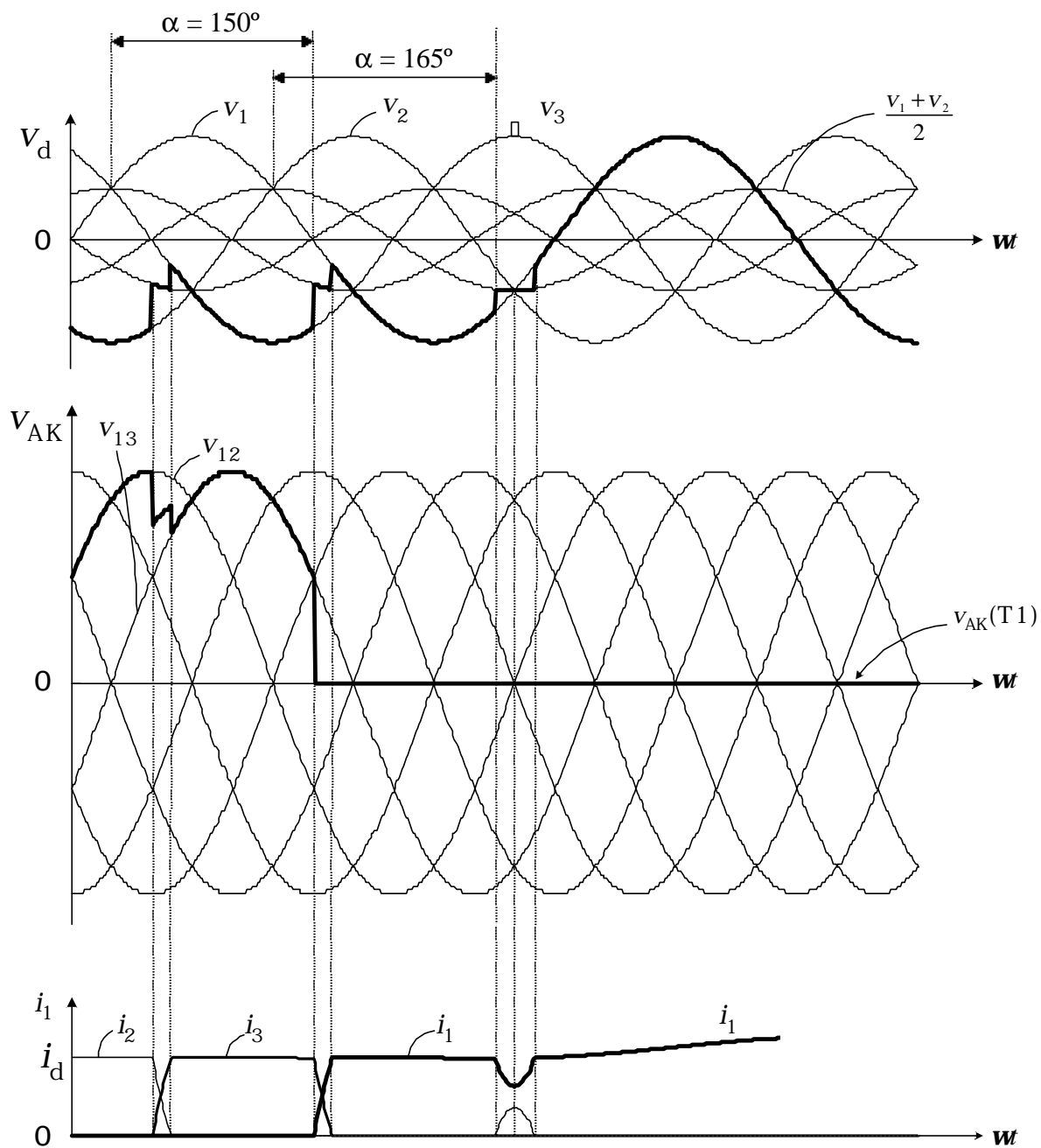


Fig.4.46.: Falla en la conmutación de un rectificador.

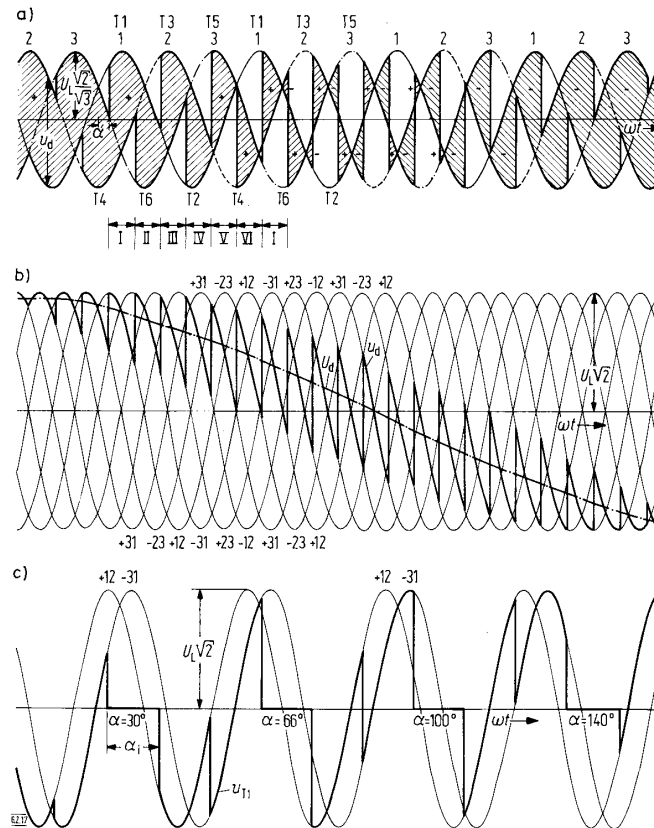


Fig.4.47: Rectificador puente trifásico con ángulo de disparo variable: **a)** tensiones de grupos positivo y negativo; **b)** tensión en la carga; **c)** tensión ánodo-cátodo de un tiristor. Conmutación ideal.

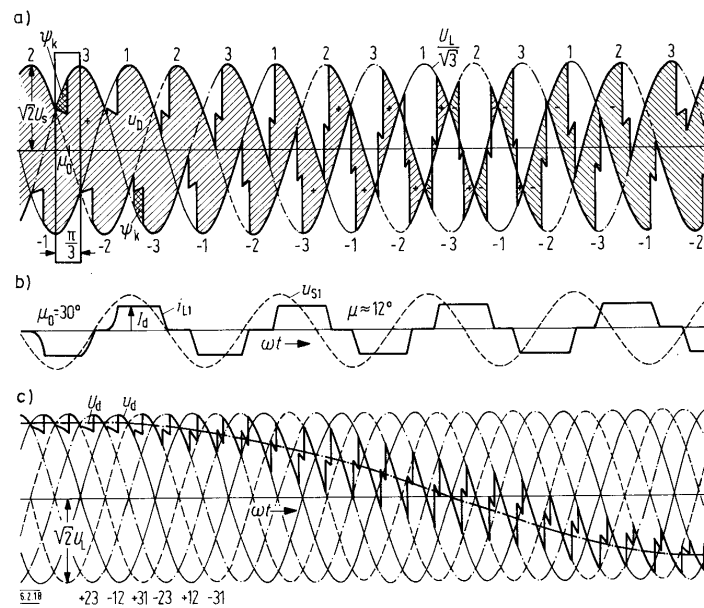


Fig.4.48: Rectificador puente trifásico con ángulo de disparo variable: **a)** tensiones de grupos positivo y negativo; **b)** corriente de entrada; **c)** tensión en la carga. Conmutación real.

4.9) CONEXIONES MULTIPLES DE RECTIFICADORES.

4.9.1) Rectificadores en serie.

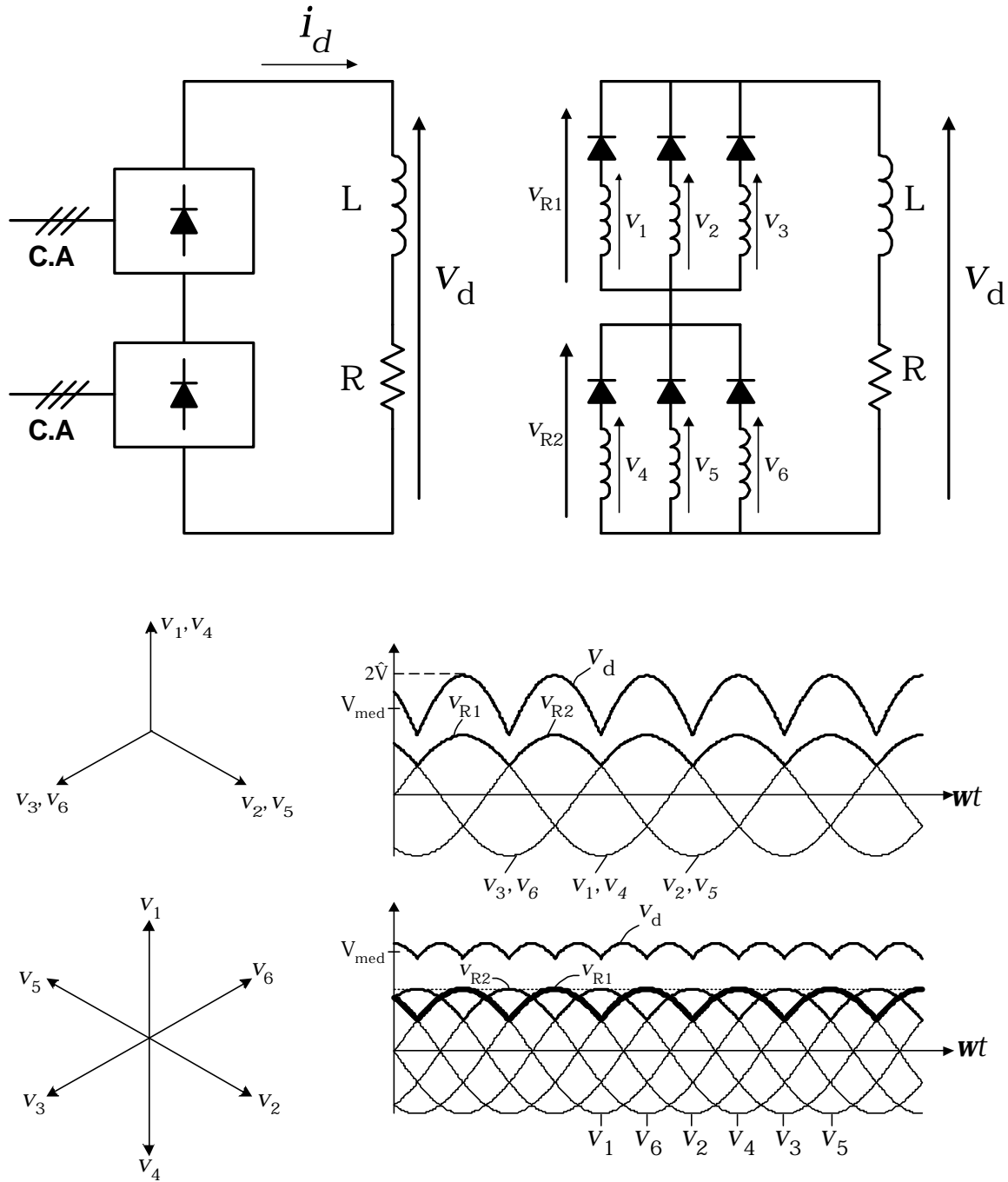


Fig.4.49: Rectificadores en serie.

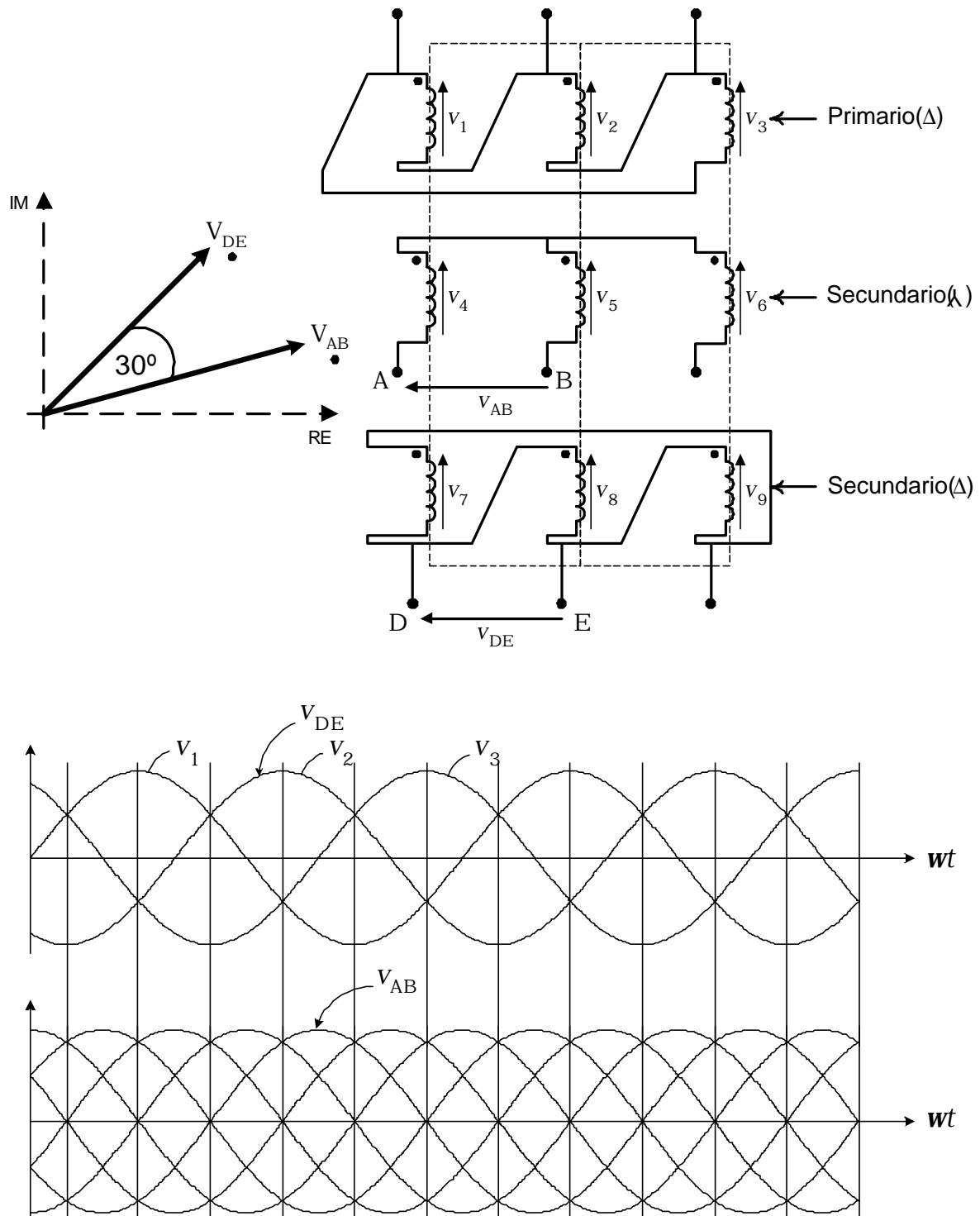


Fig.4.50.: Transformador de tres devanados.

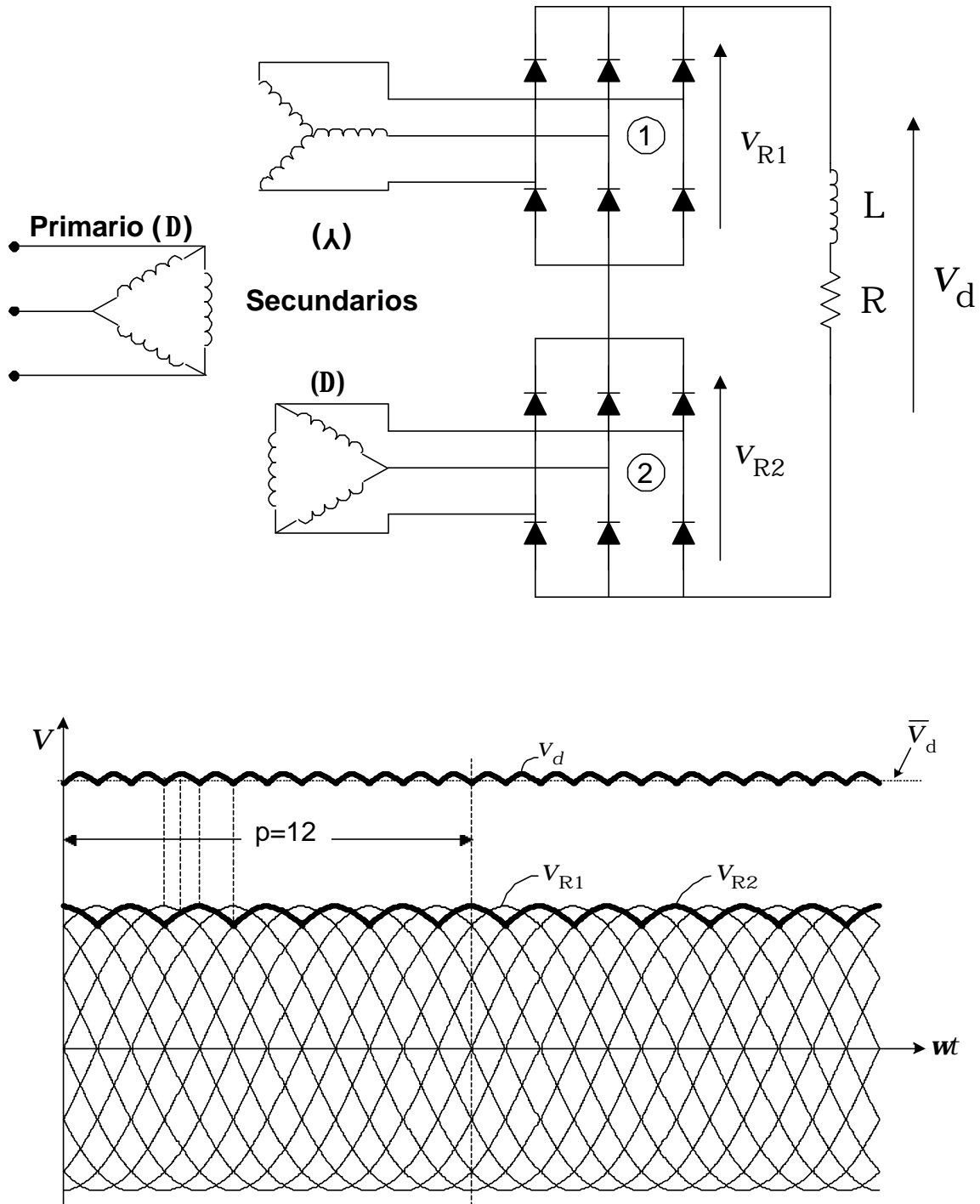


Fig.4.51.: Rectificador de doce pulsos.

4.9.2) Rectificadores en paralelo

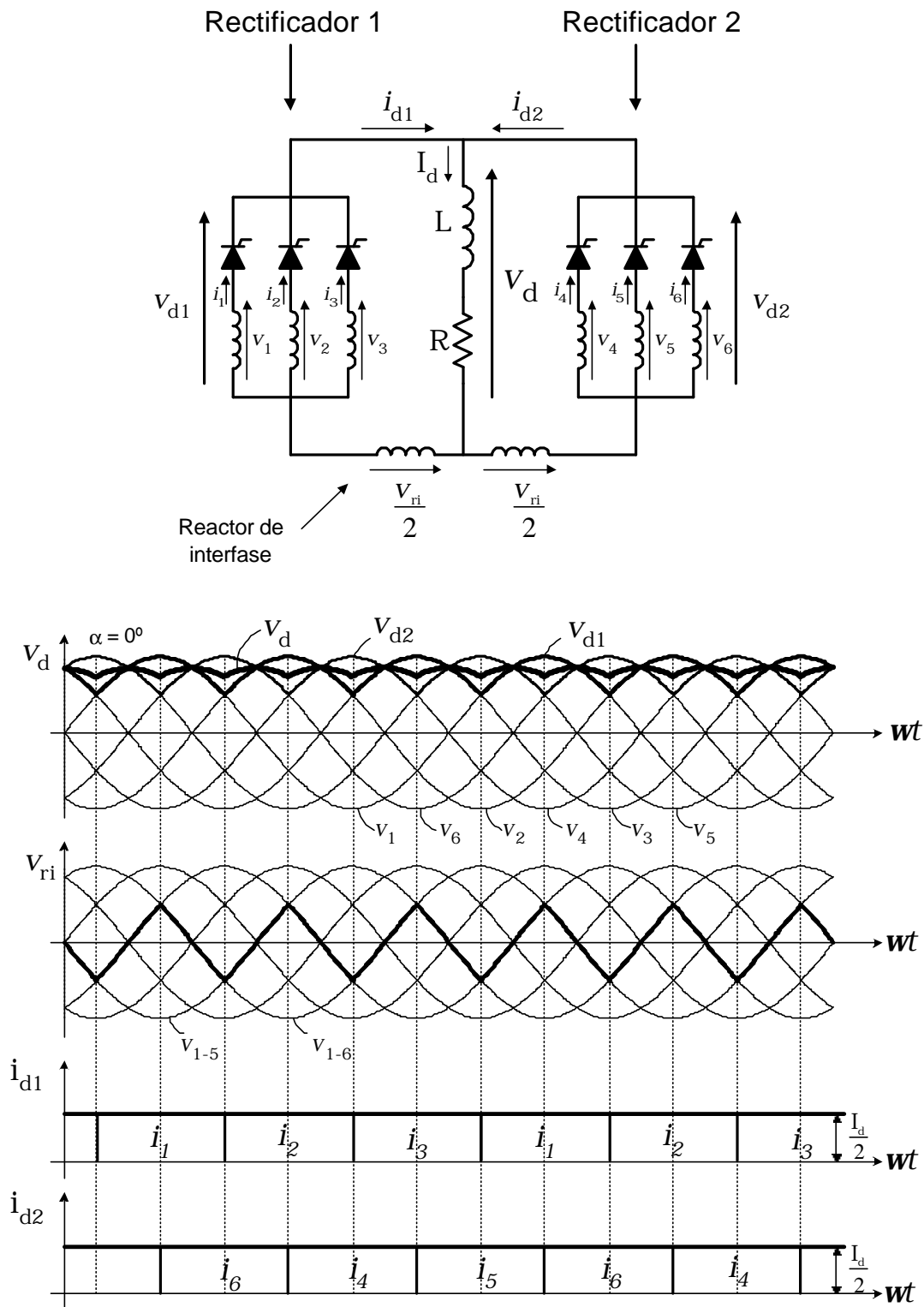


Fig.4.52: Rectificador doble estrella con reactancia de interfase.

4.9.3) Rectificadores en antiparalelo: el convertidor dual.

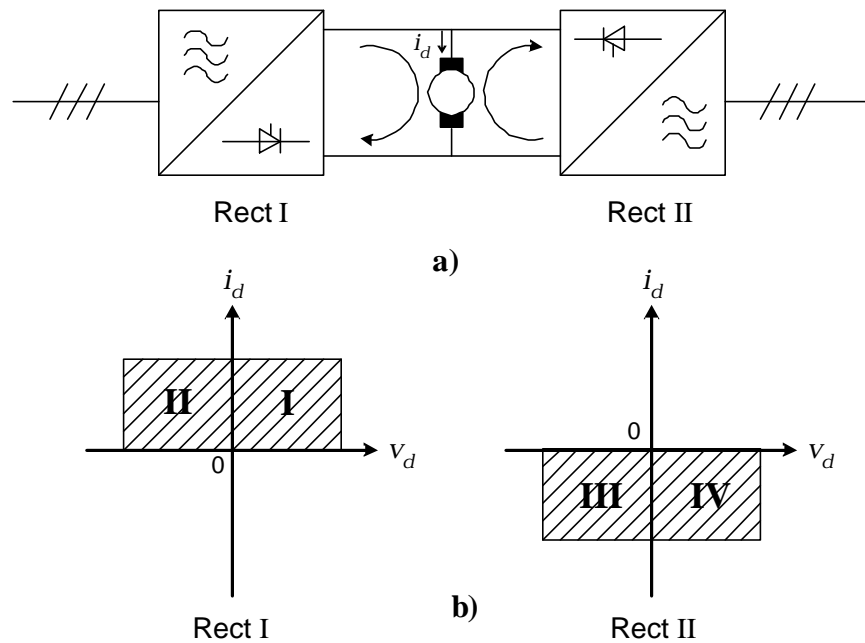


Fig.4.53: Convertidor dual: a) esquema básico; b) cuadrantes de operación.

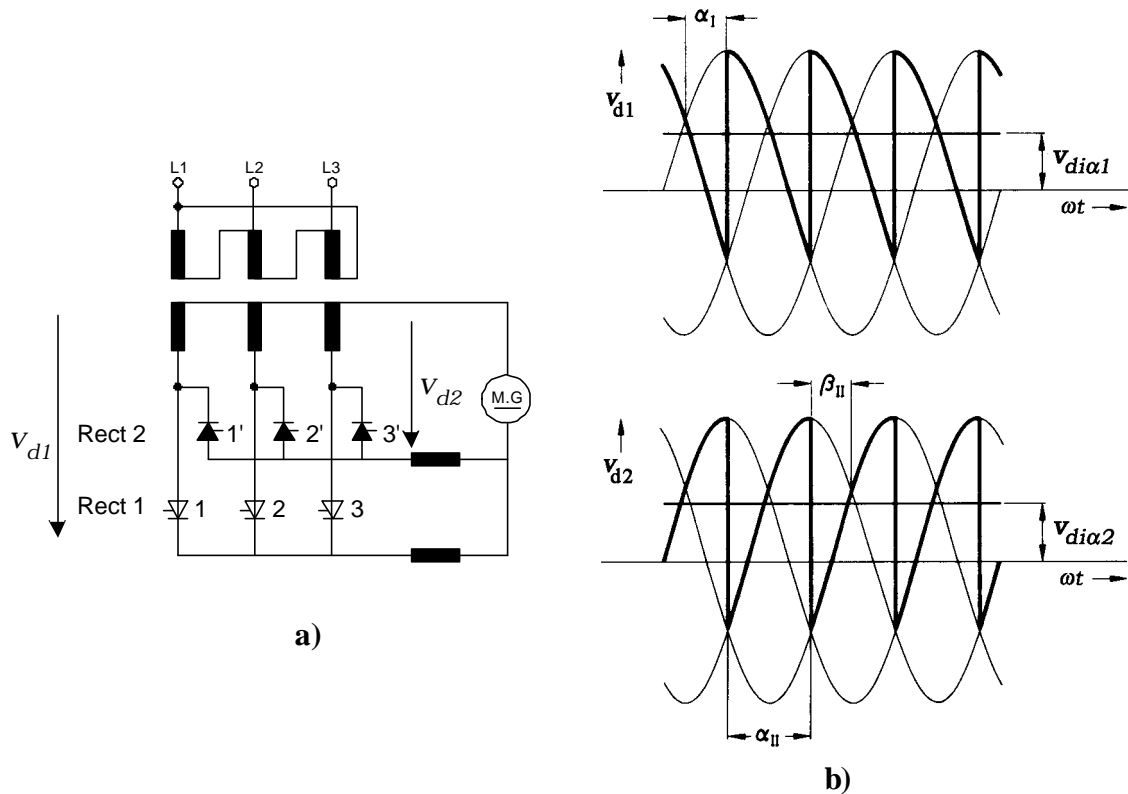


Fig.4.54: Convertidor dual de 3 pulsos: a) circuito; b) formas de onda.

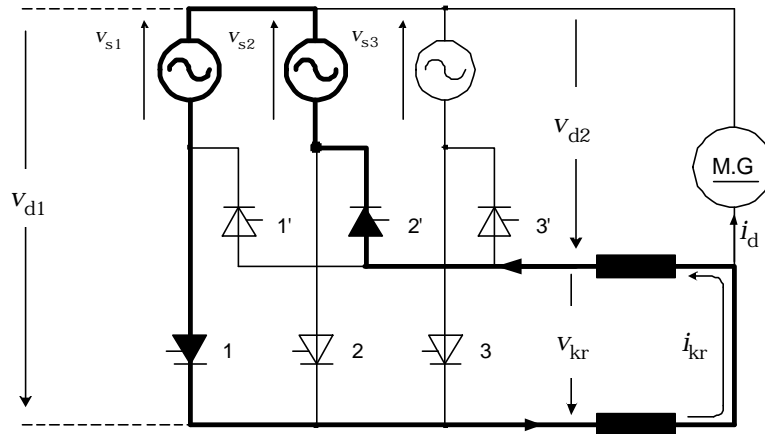


Fig.4.56.: Camino de la corriente circulante.

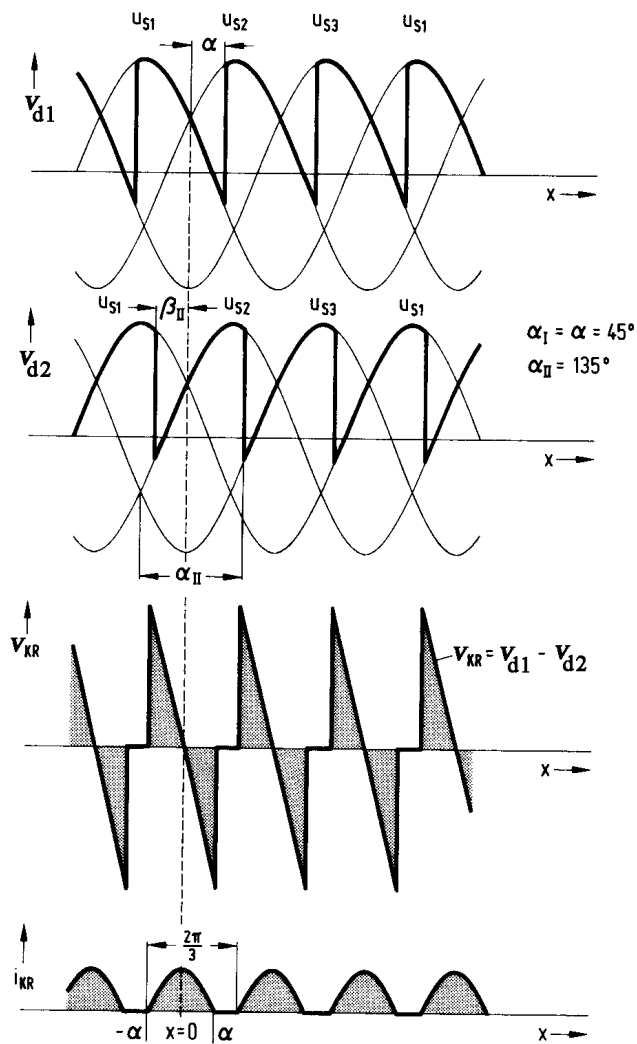


Fig.4.57.: Formas de onda del convertidor dual con corriente circulante de la figura 4.53.

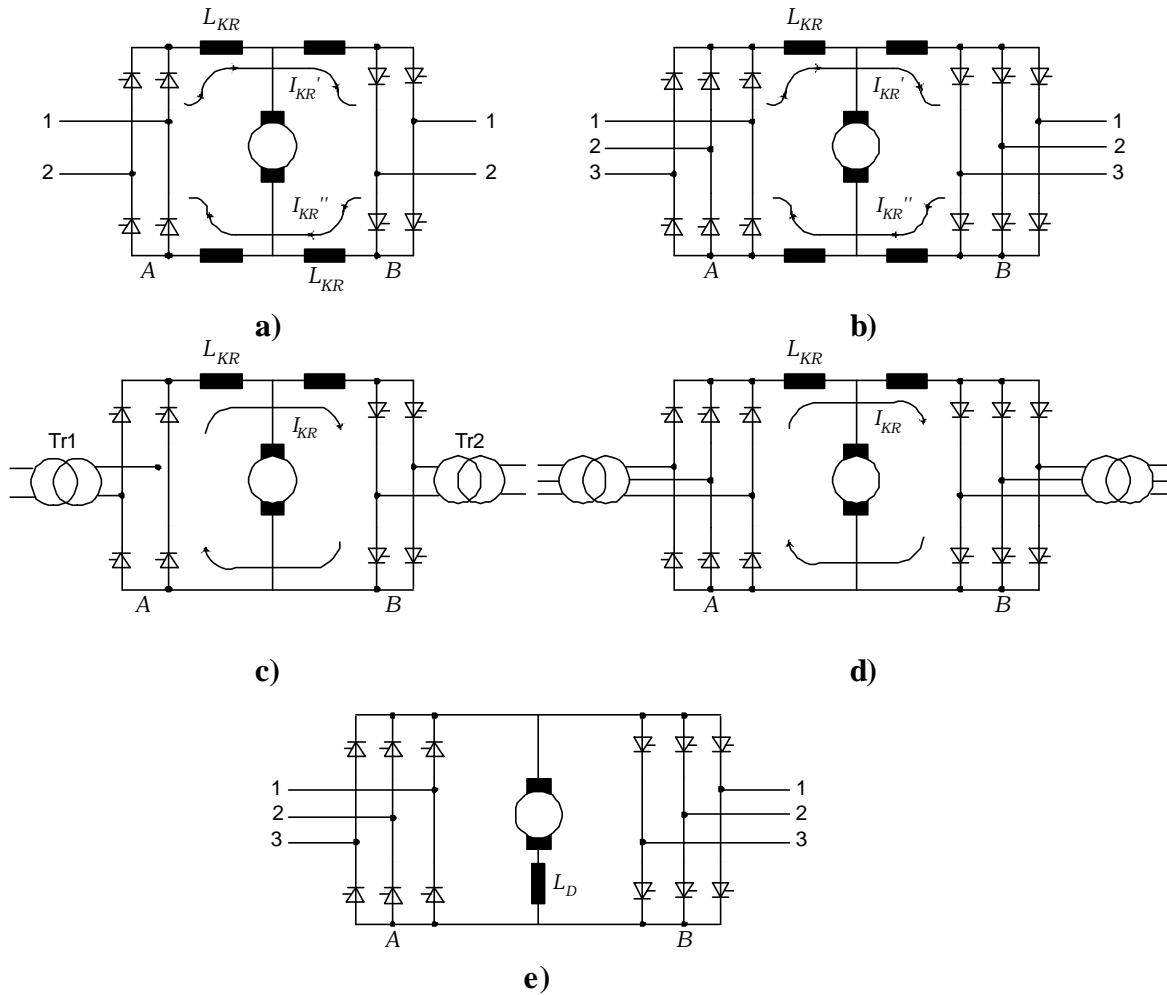


Fig.4.58.: Algunos convertidores duales: **a)** y **c)** monofásicos; **b)** y **c)** trifásicos con corriente circulante y **e)** trifásico sin corriente circulante.

CAPÍTULO 5

CICLOCONVERSORES

5.1) PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

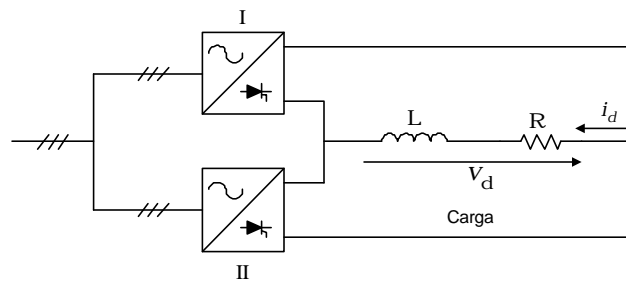


Fig.5.1.: Esquema de un cicloconversor.

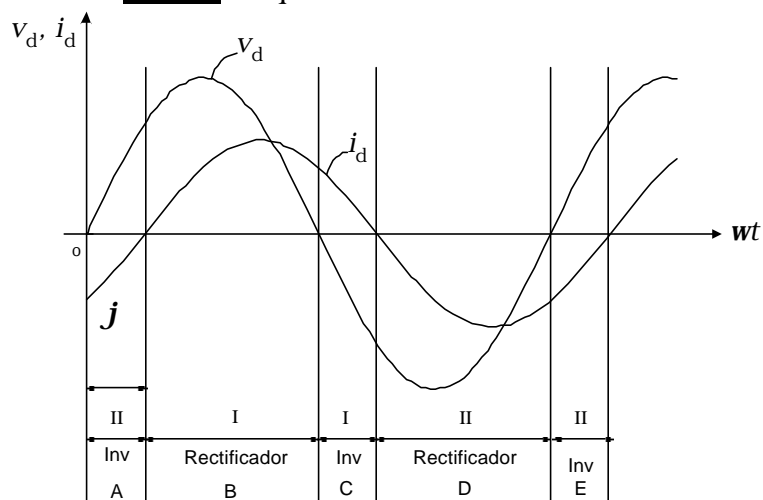


Fig.5.2.: Formas de onda de un cicloconversor.

5.2) CICLOCONVERSORES DE TRES PULSOS

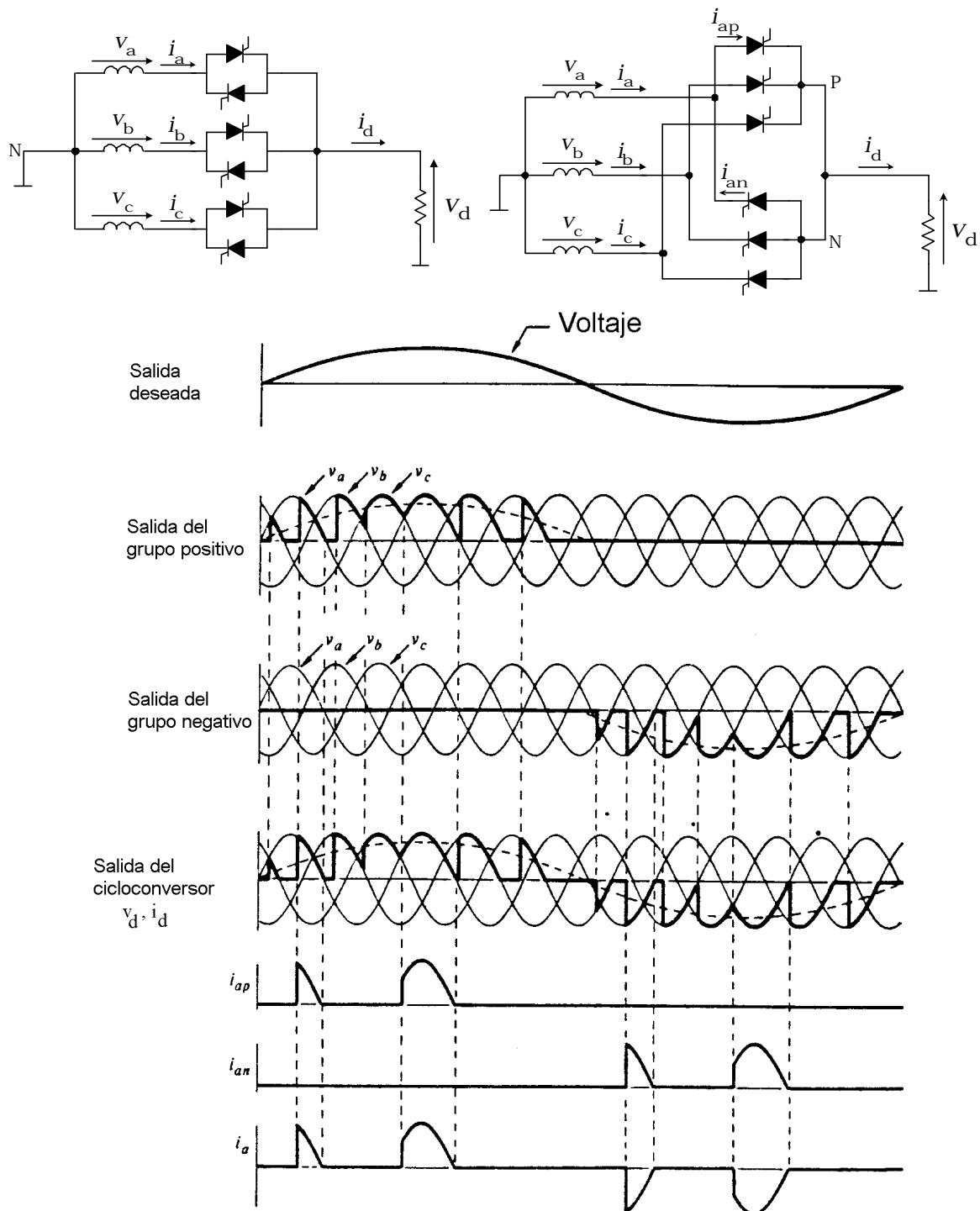


Fig.5.3.: Formas de onda de un cicloconversor de punto medio con carga resistiva.

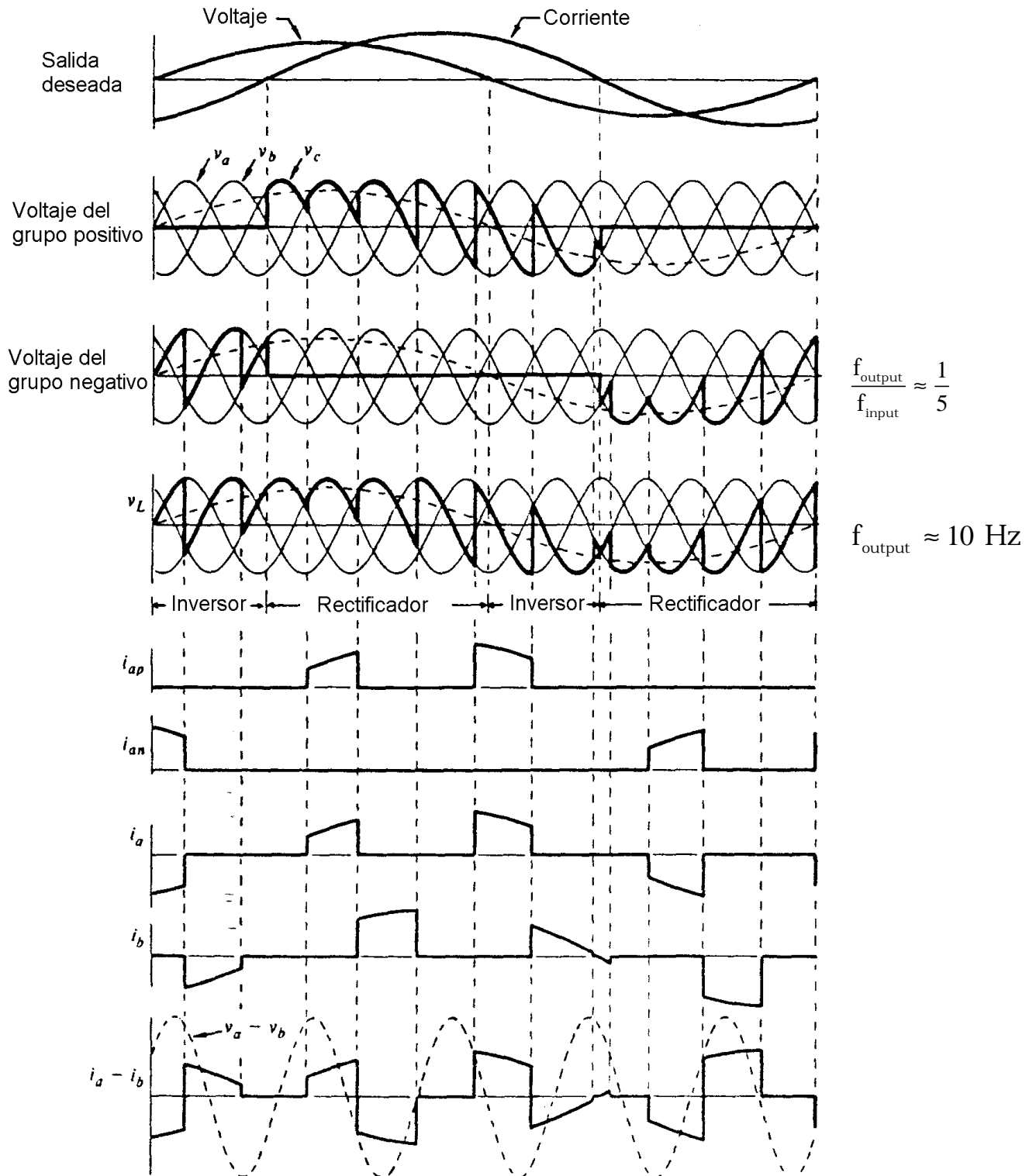


Fig.5.4.: Formas de onda de un cicloconversor de tres pulsos con carga inductiva.

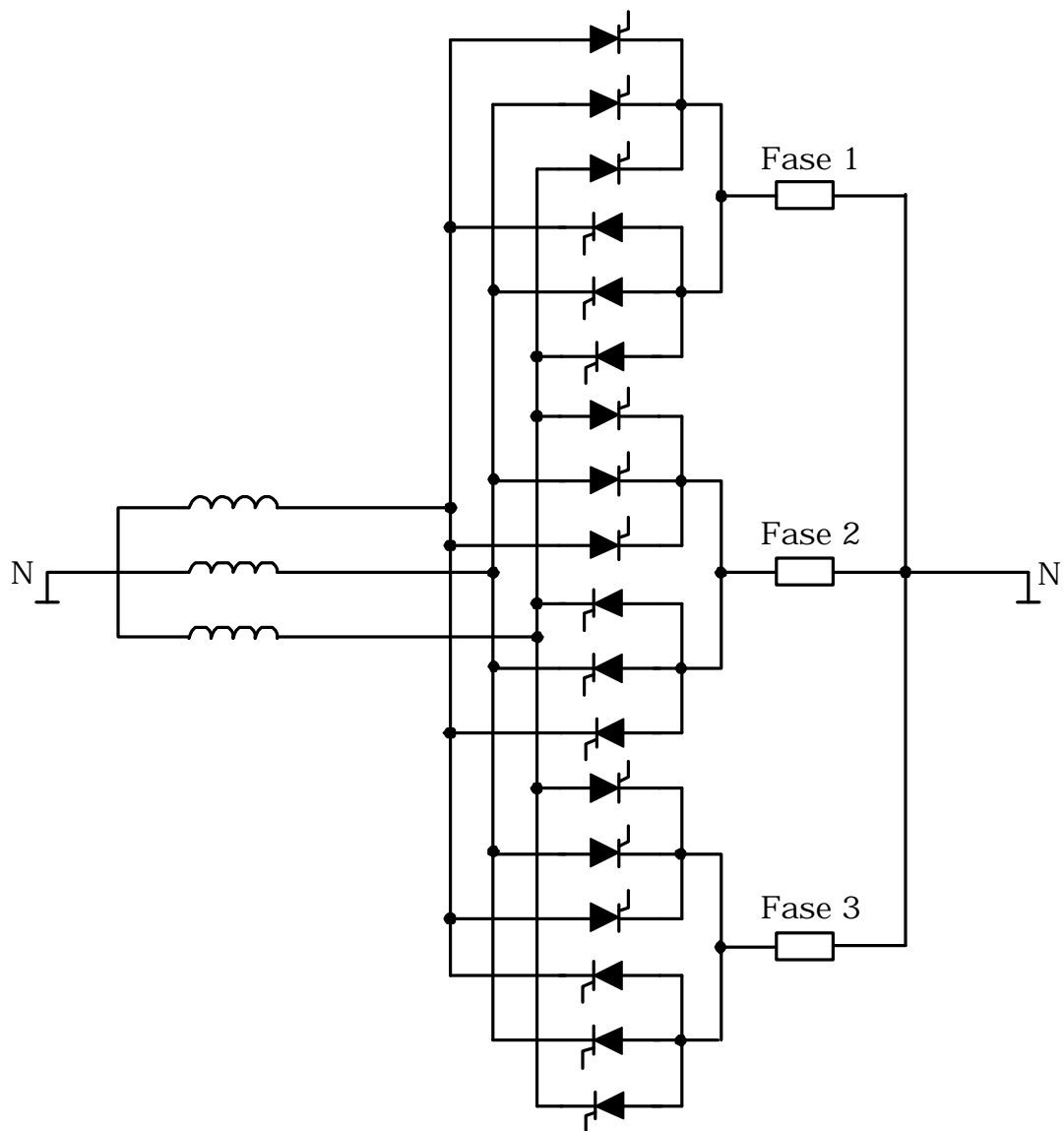


Fig.5.5.: Cicloconversor de 3 pulsos con carga trifásica.

5.3) CICLOCONVERSORES DE 6 PULSOS

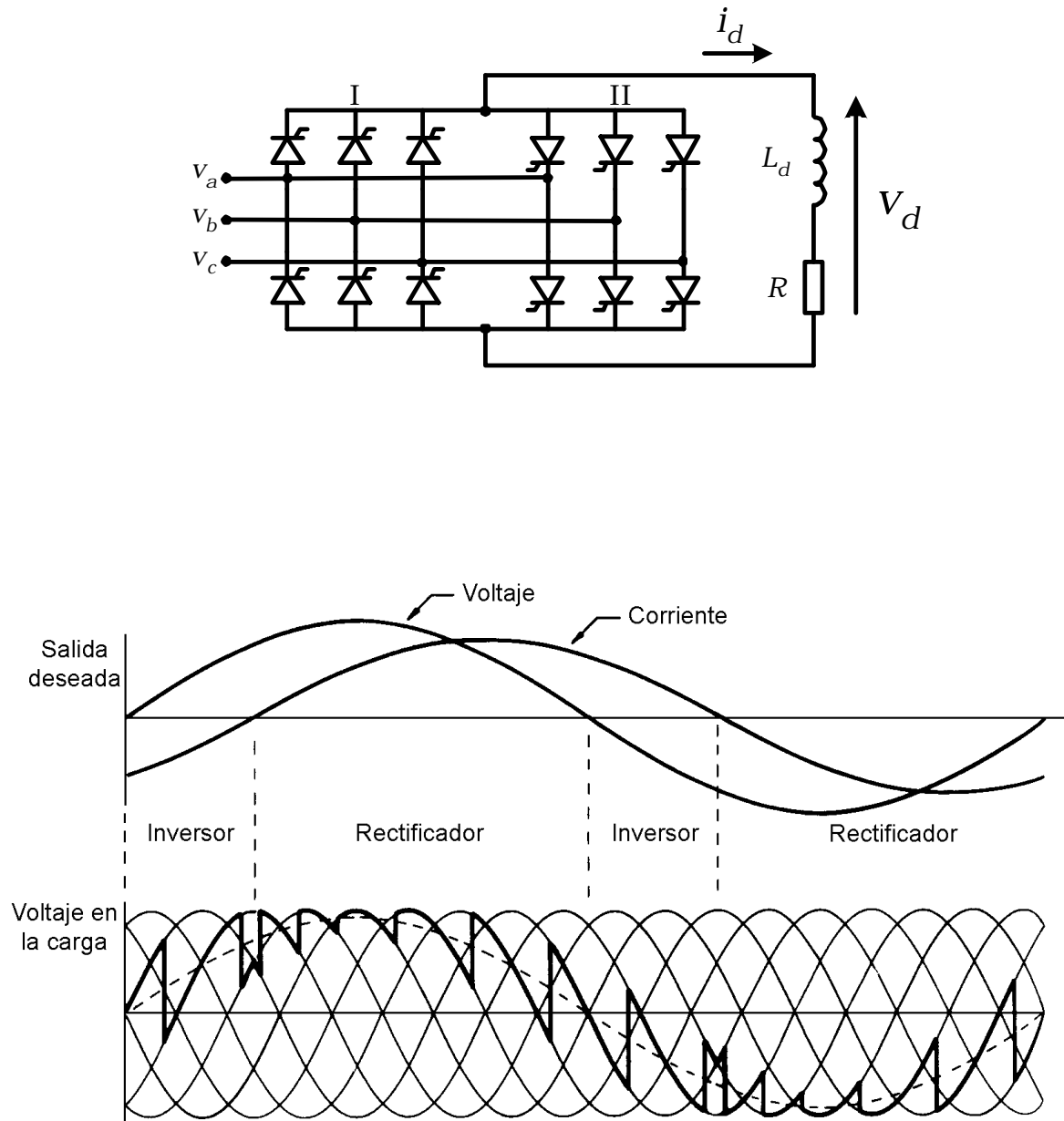


Fig.5.6.: Cicloconversor de 6 pulsos con carga monofásica.

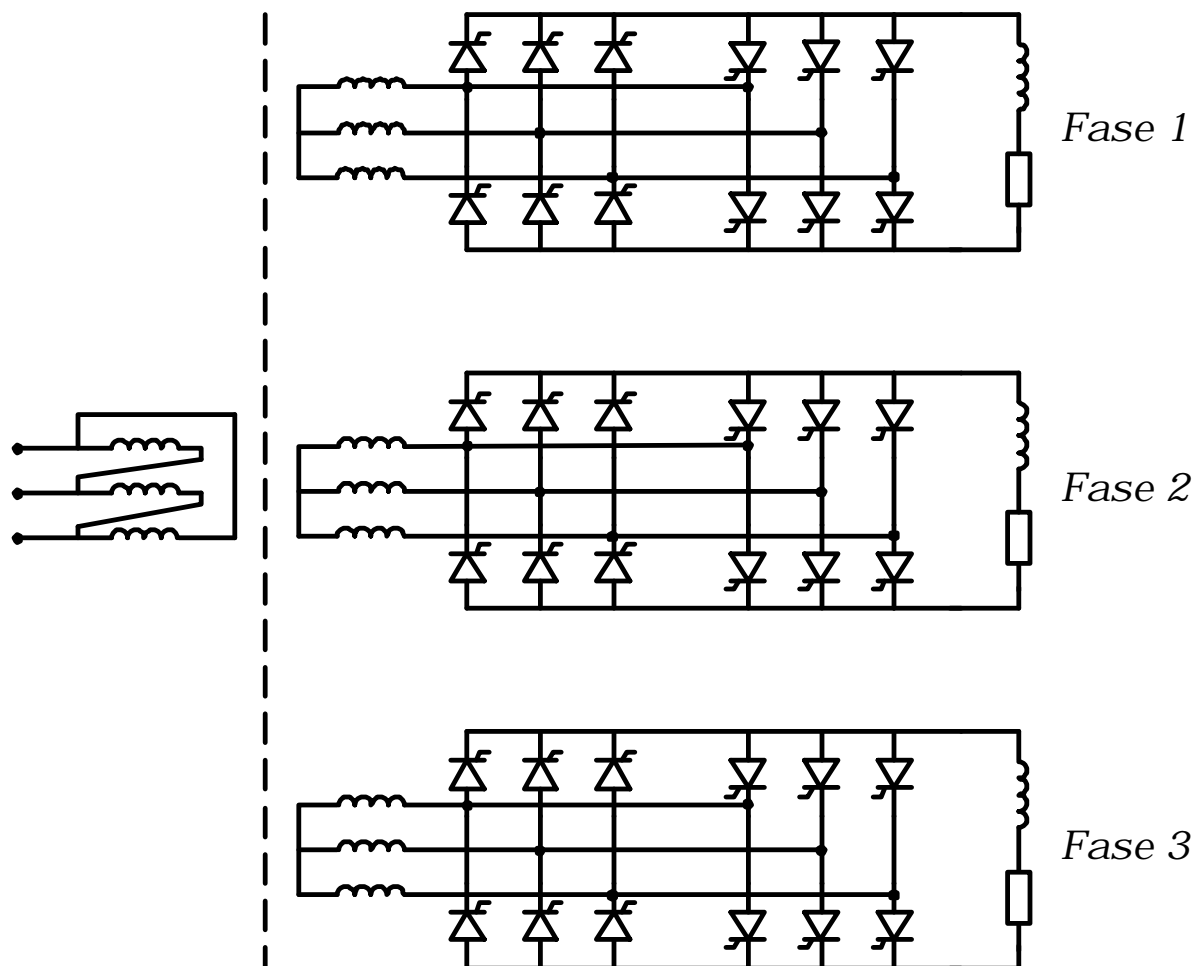


Fig.5.7.: Cicloconversor de 6 pulsos trifásico.

5.4) CICLOCONVERSIONES DE 12 PULSOS

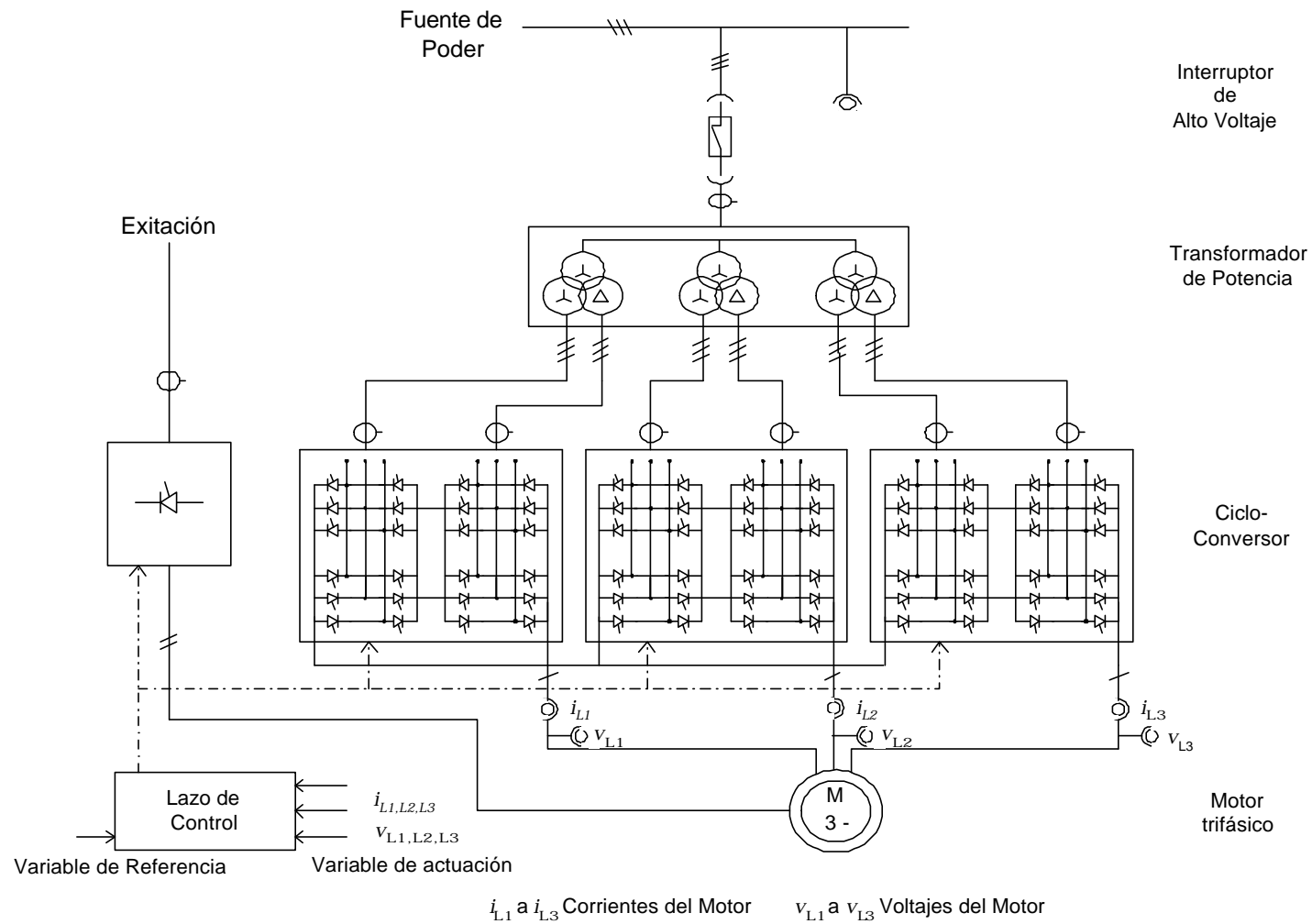


Fig.5.8.: Cicloconvertor de 12 pulsos alimentando un motor sincrónico.

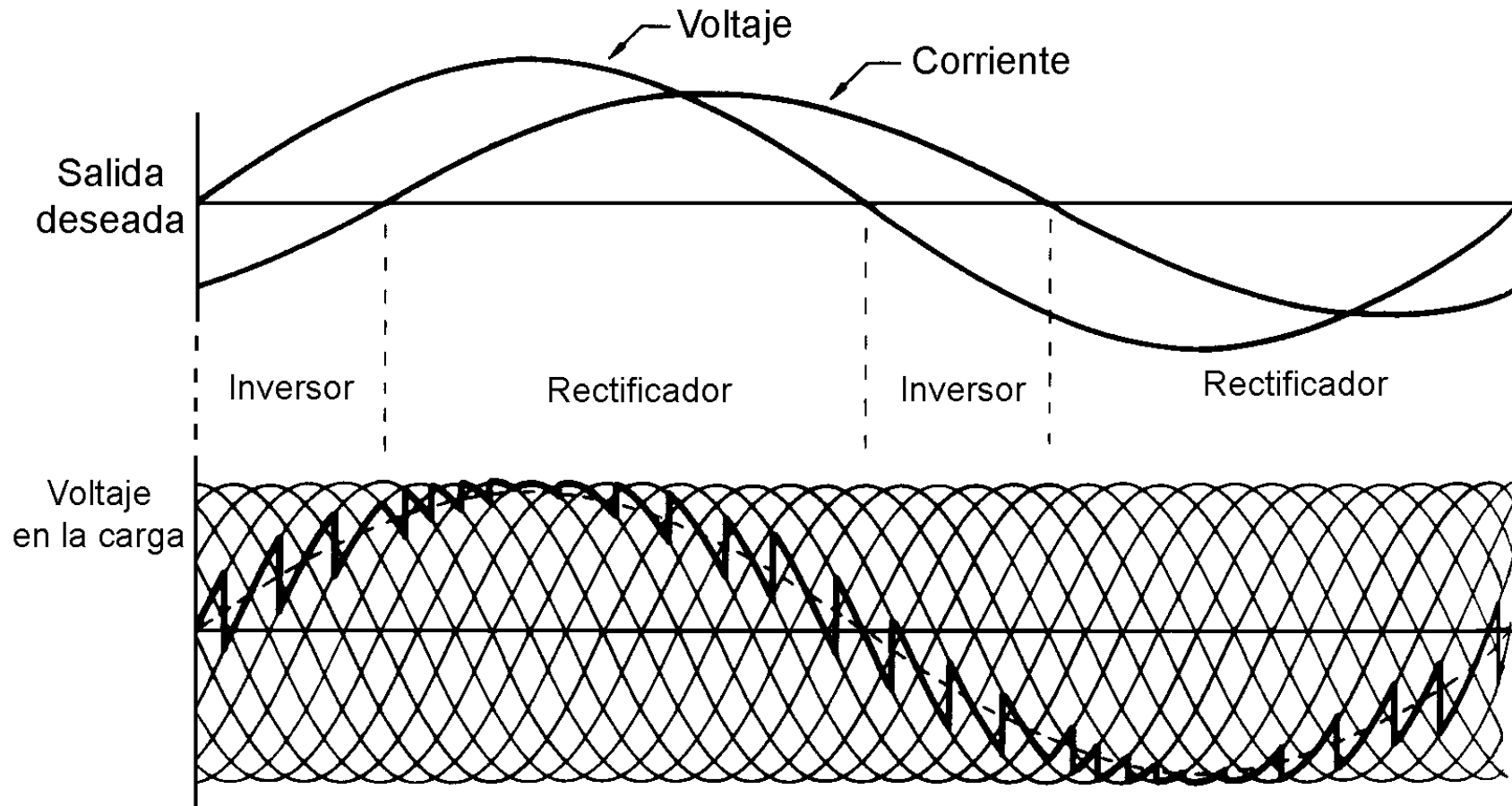


Fig.5.9.: Formas de onda del voltaje generado por el cicloconvertor de 12 pulsos.

CAPÍTULO 6

CONVERTIDORES DIRECTOS DE FRECUENCIA FIJA (AC-AC)

6.1) INTERRUPTOR BIDIRECCIONAL DE ESTADO SÓLIDO

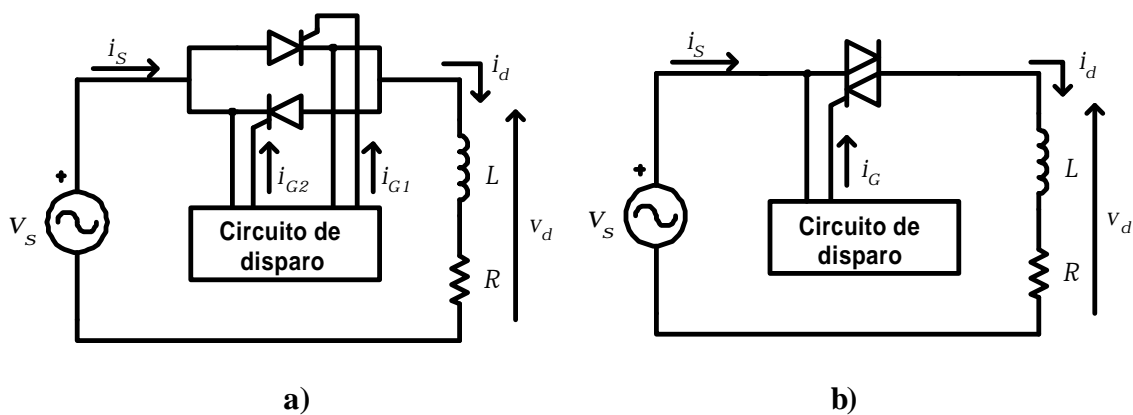


Fig.6.1. Interruptor estático de corriente alterna con: a) tiristores; b) triacs.

6.1.1) Convertidor AC-AC monofásico con control de fase.-

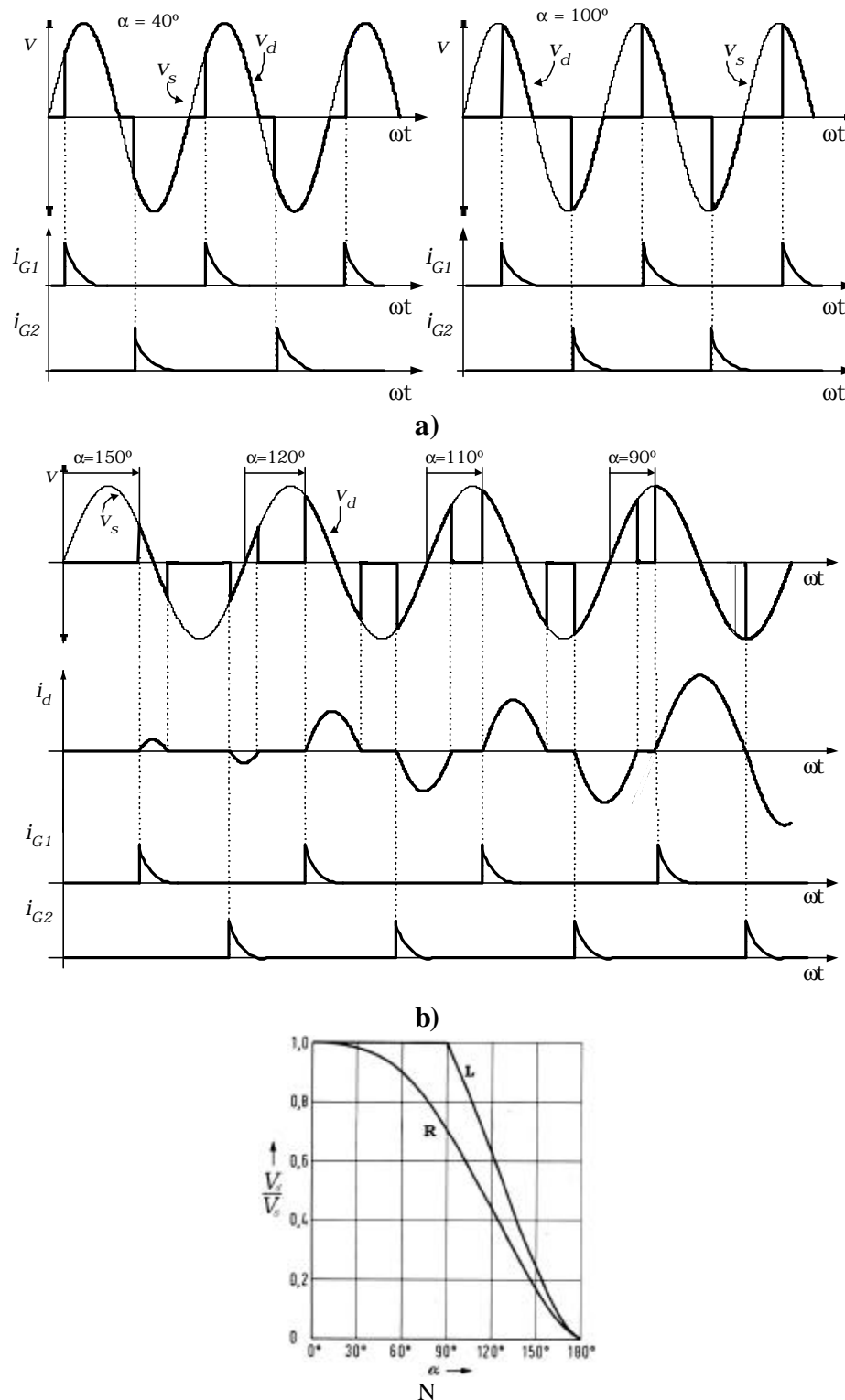


Fig.6.2.: Convertidor AC-AC monofásico con control de fase: **a)** carga resistiva; **b)** carga inductiva; **c)** característica de tensión en la carga.

6.1.2) Convertidor AC-AC monofásico con control integral de ciclos.

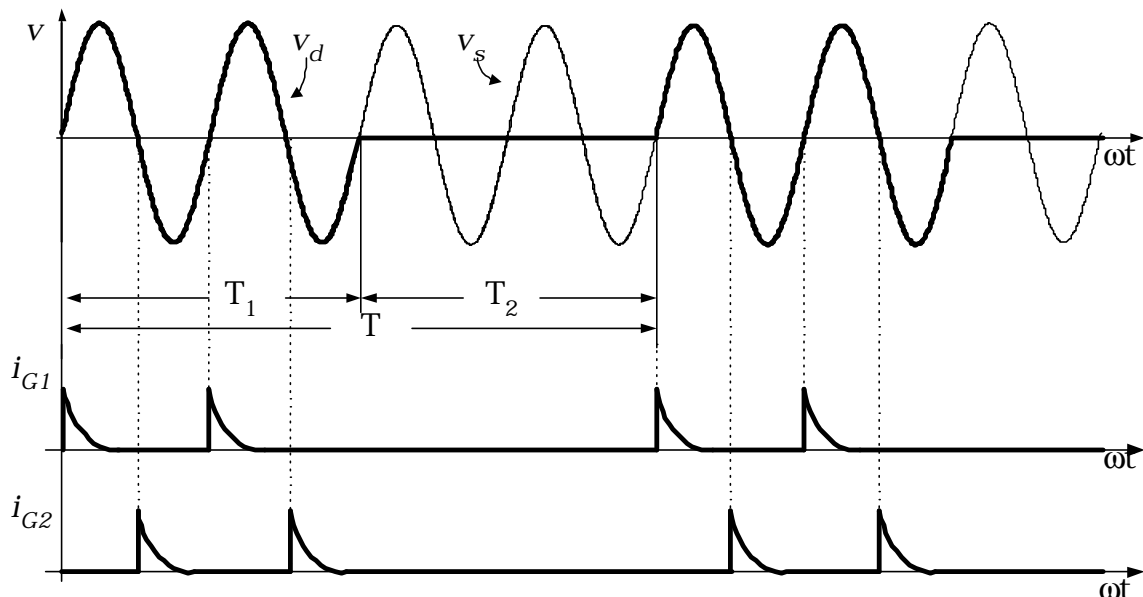


Fig.6.3.: Formas de onda del convertidor AC-AC monofásico de la figura 6.1 con control integral de ciclos.-

6.2) CONVERTIDOR AC-AC TRIFÁSICO.

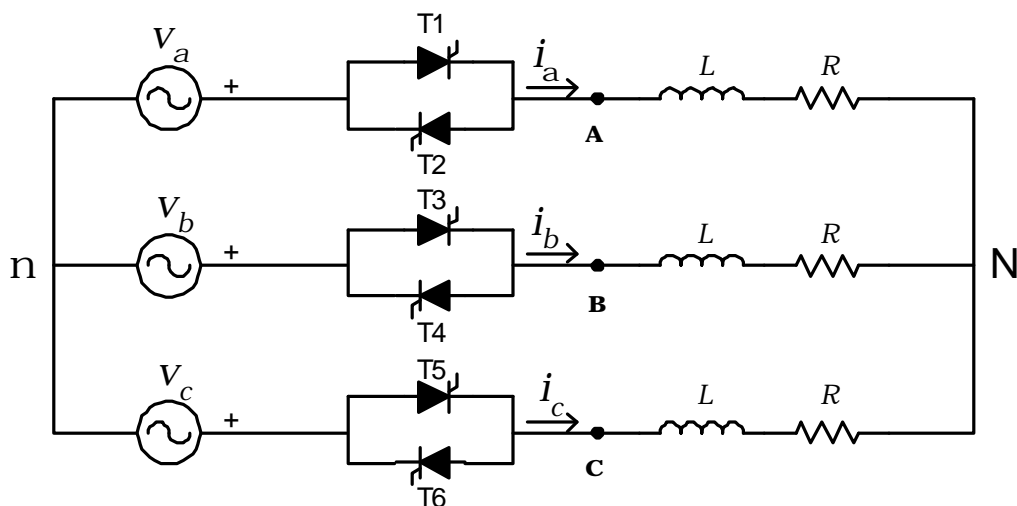


Fig.6.4.: Circuito de potencia de un convertidor AC-AC trifásico completamente controlado.

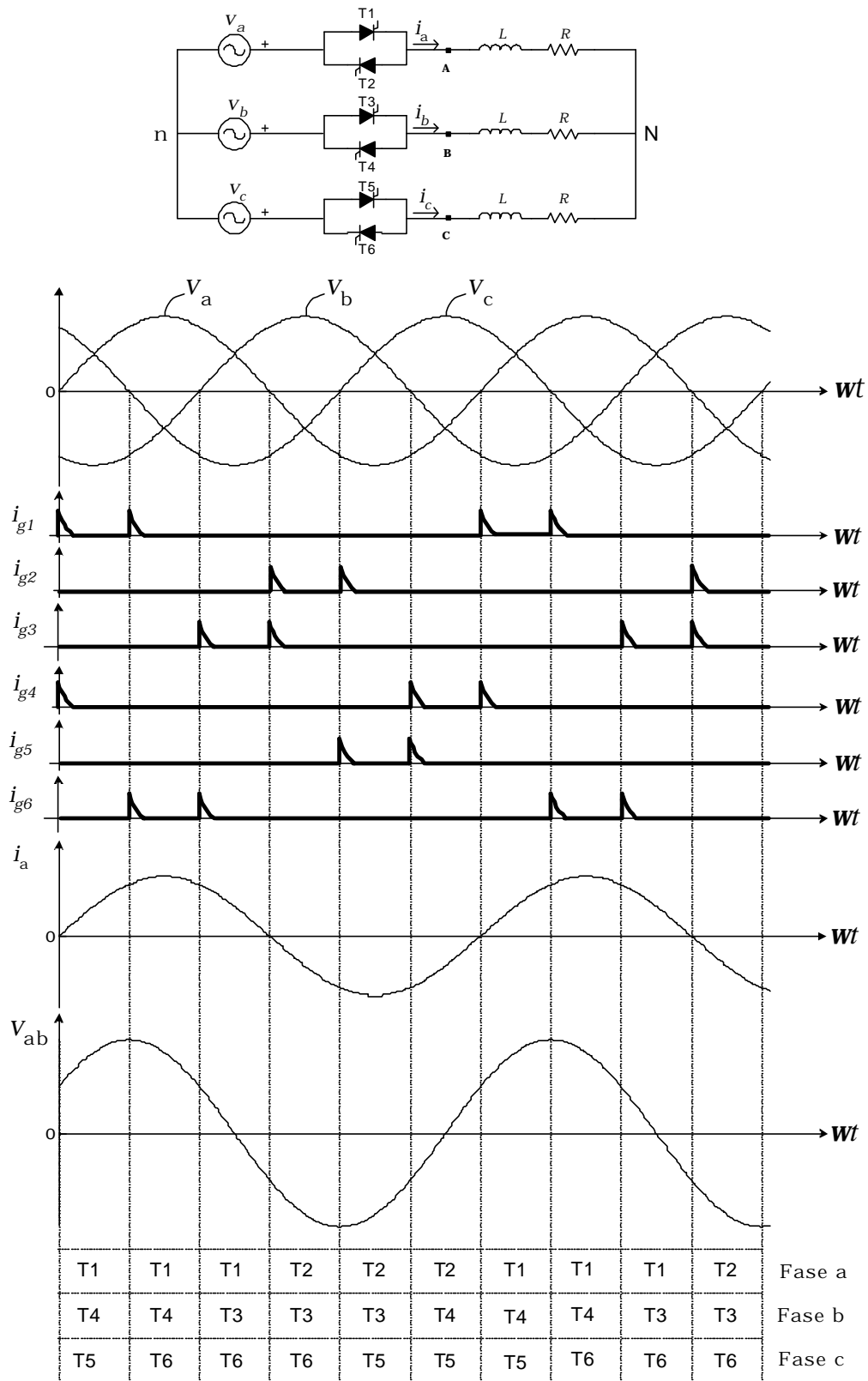


Fig.6.5.: Convertidor AC-AC trifásico completamente controlado con carga resistiva y $\alpha = 0^\circ$.

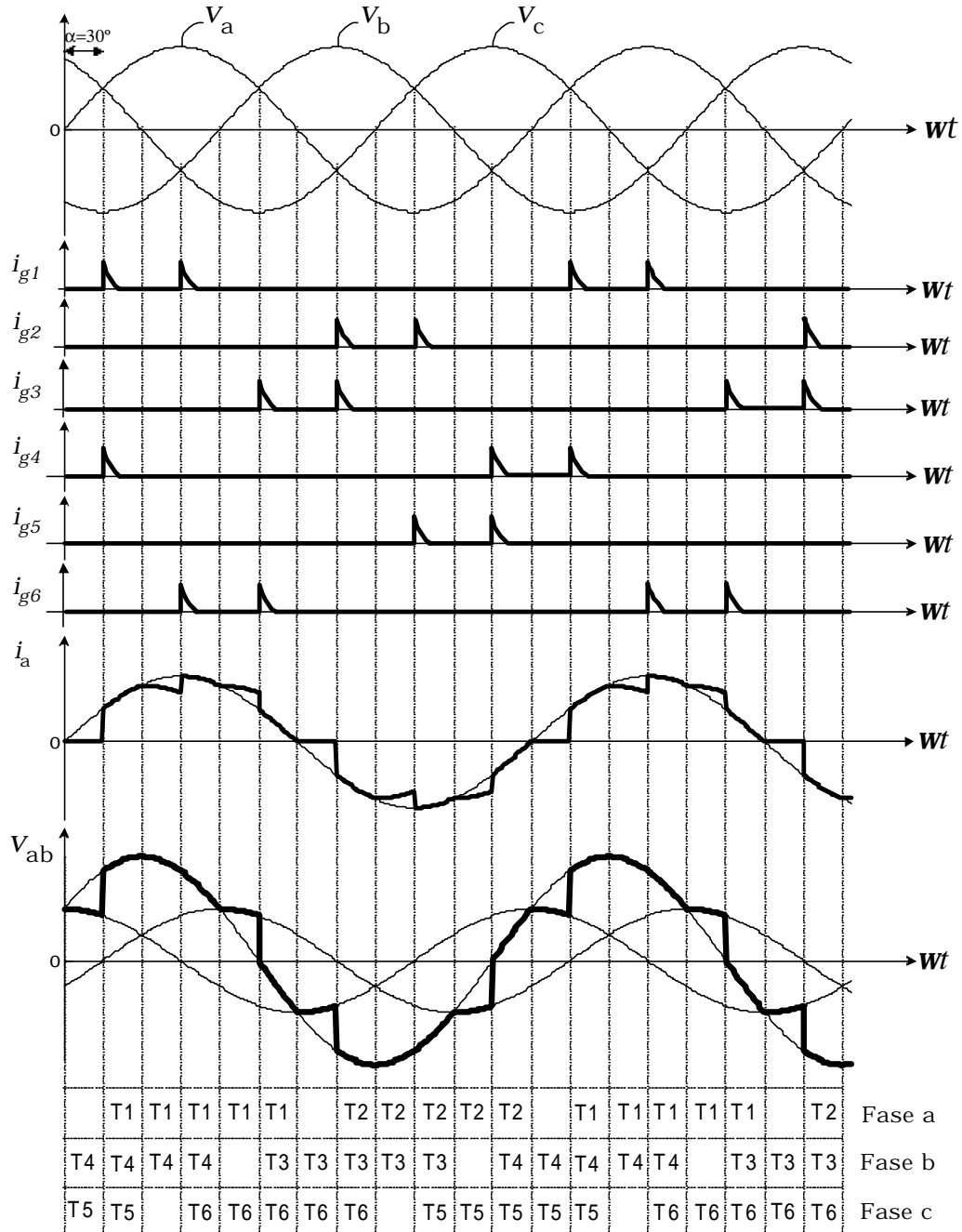
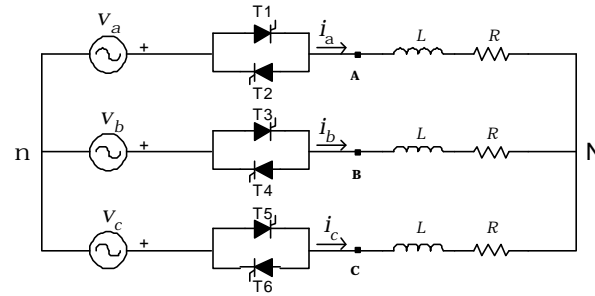


Fig.6.6.: Formas de onda de un convertidor AC-AC trifásico completamente controlado ($\alpha = 30^\circ$).

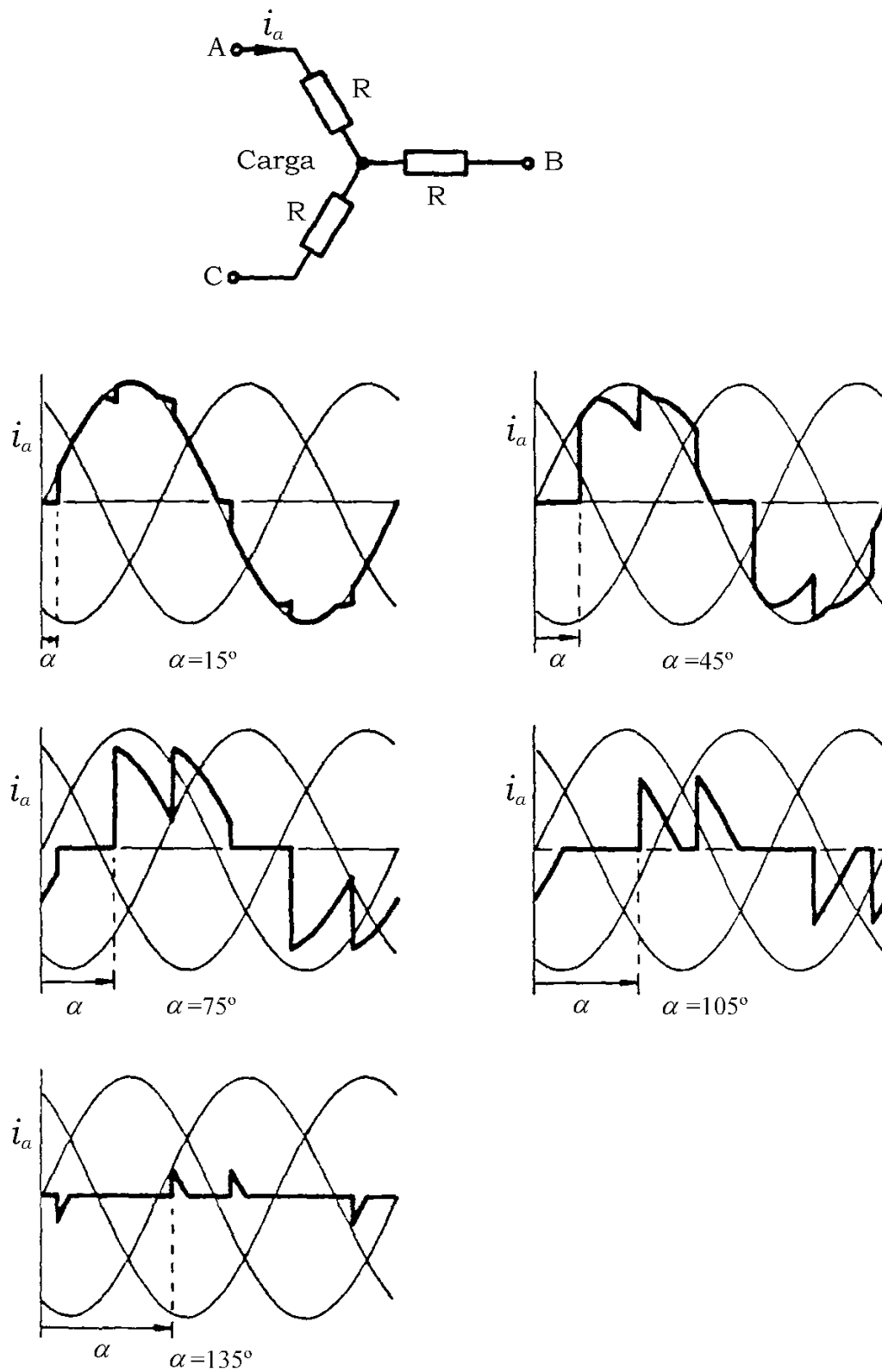


Fig.6.7.: Corriente i_a en un convertidor AC-AC trifásico con carga resistiva y diferentes ángulos de disparo α .

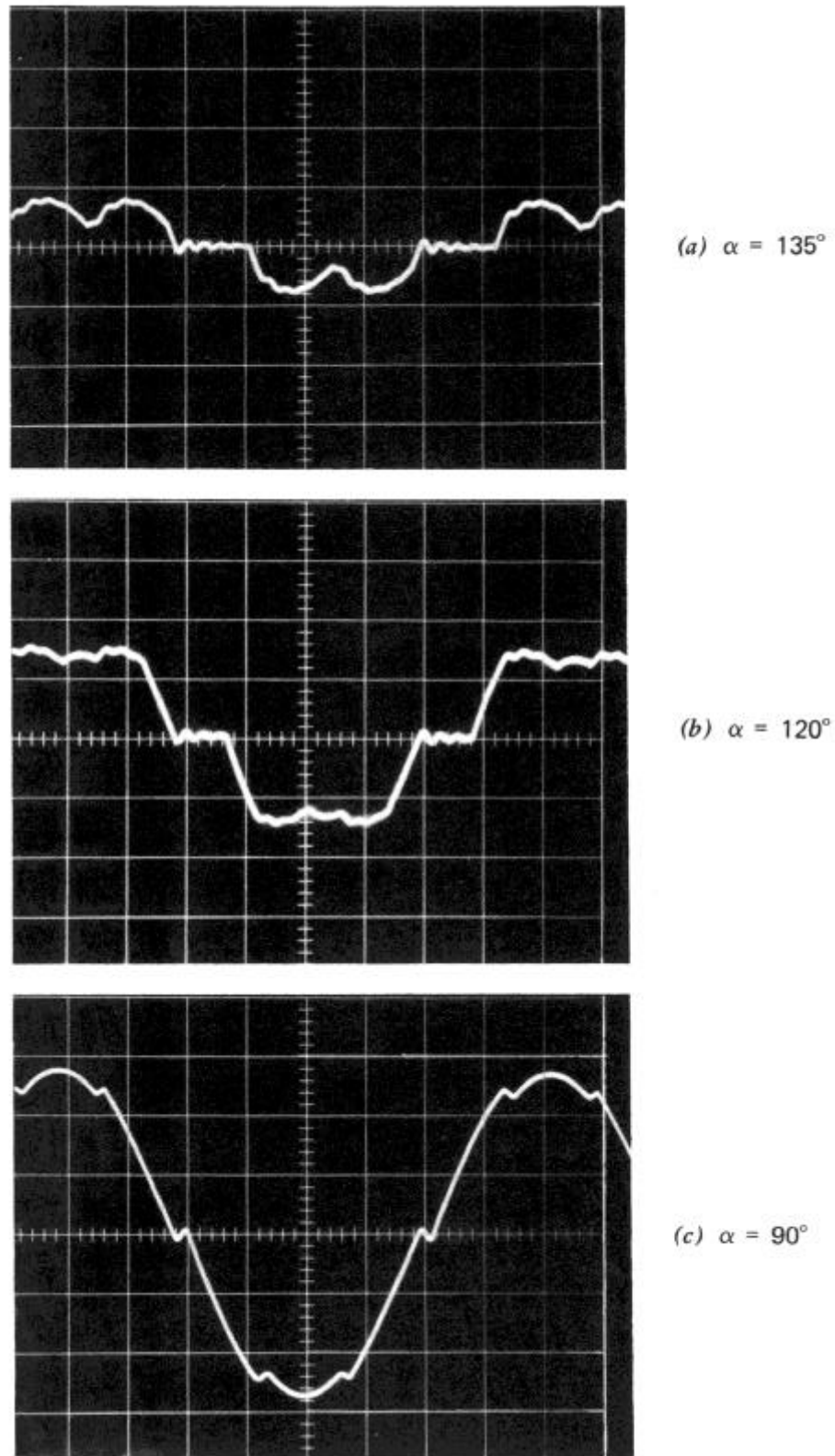


Fig.6.8.: Oscilogramas de la corriente en el convertidor AC-AC trifásico de la figura 6.4 con carga inductiva-resistiva.

CAPÍTULO 7

CONVERTIDORES DE CONMUTACIÓN FORZADA

7.1) PULSADORES.-

Se los conoce también como:

- * Convertidores CC-CC.
- * Choppers.

7.1.1) Principio de funcionamiento.-

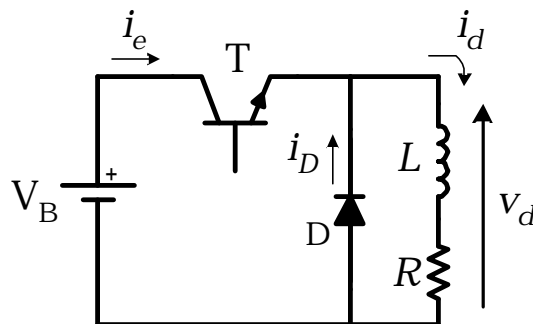


Fig.7.1.: Chopper reductor (Buck).

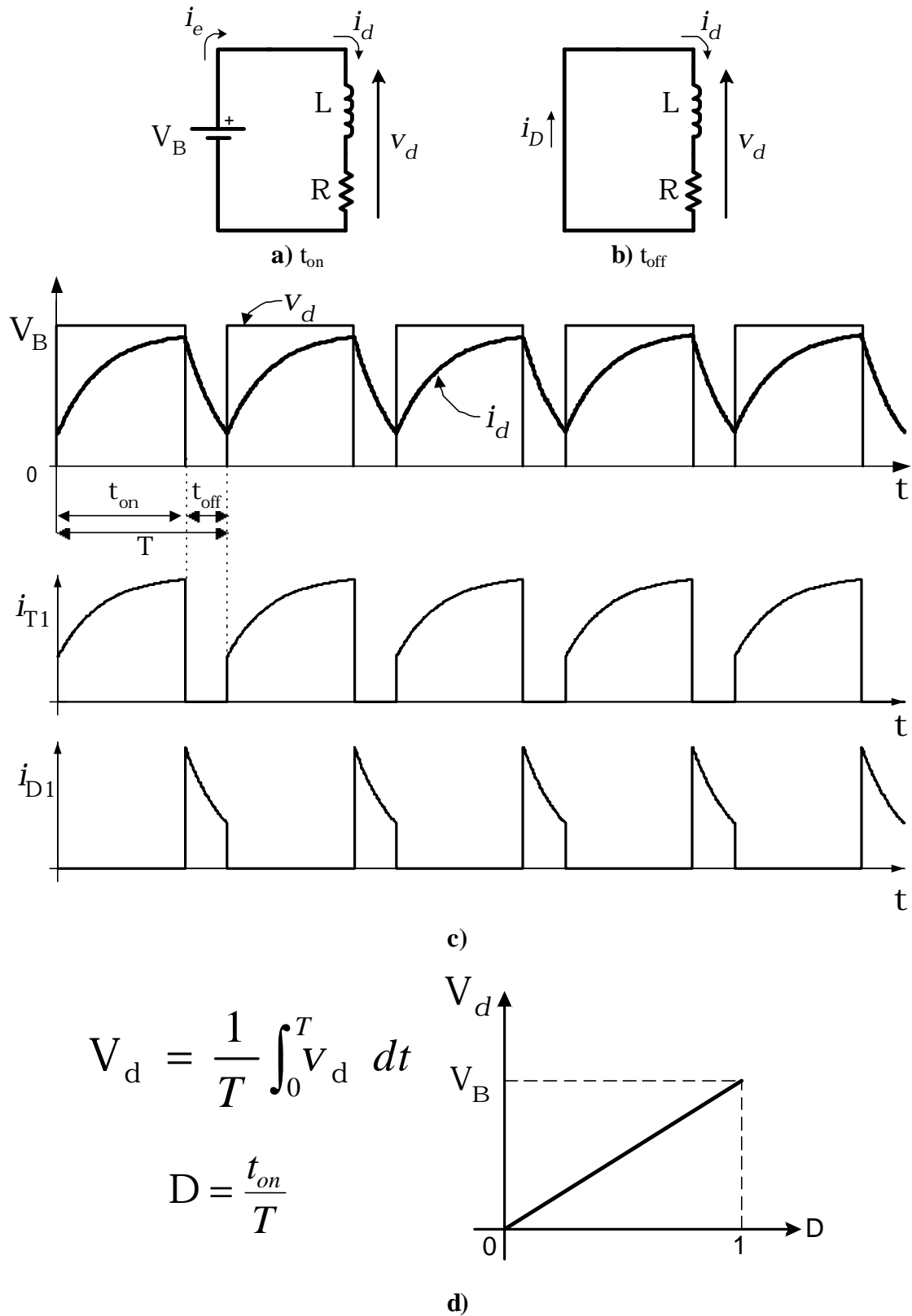


Fig.7.2.: Chopper reductor: a) y b) circuitos equivalentes; c) formas de onda; d) tensión versus ciclo de trabajo D.

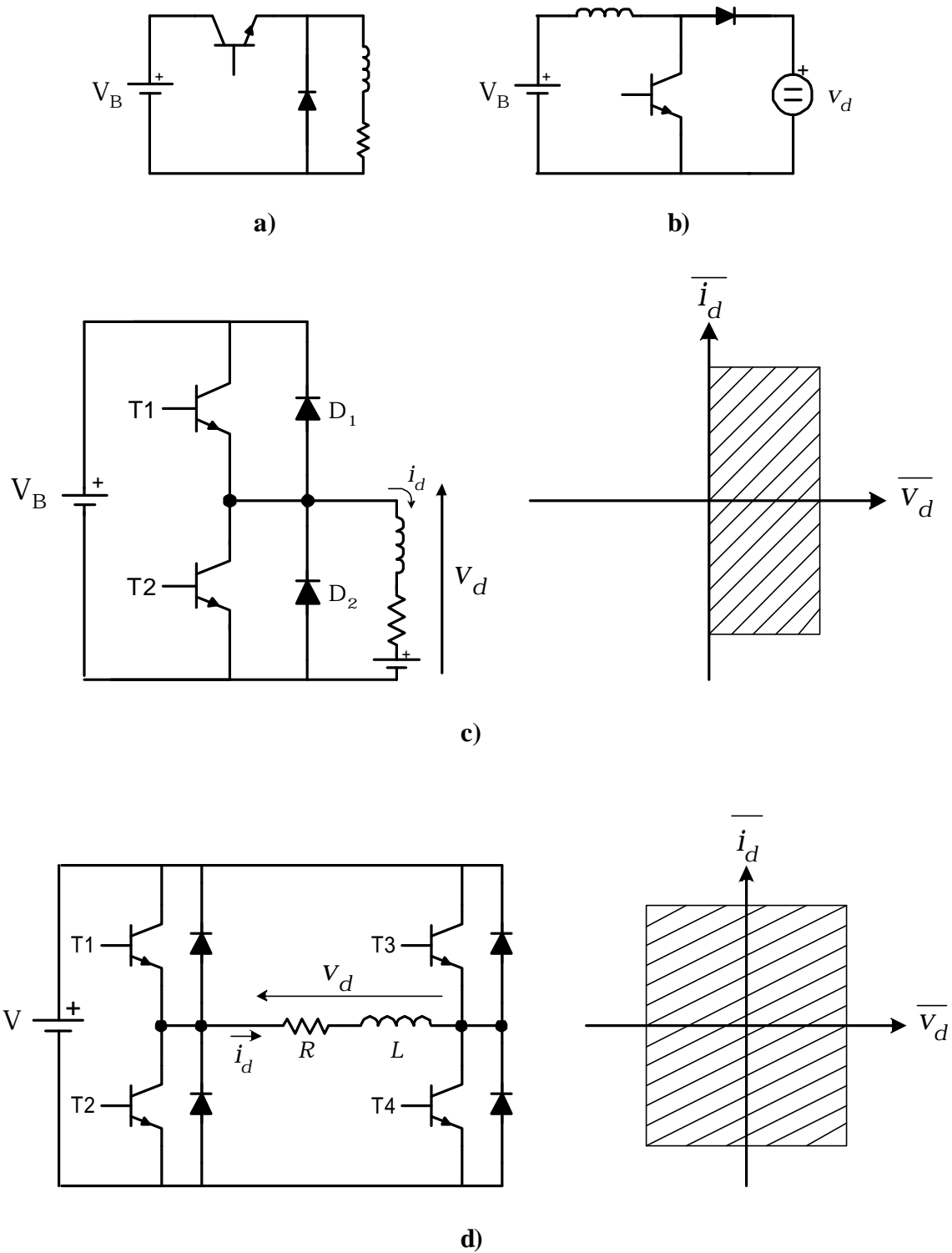


Fig. 7.3. Estructuras básicas de convertidores CC-CC: **a)** reductor (Buck); **b)** elevador (Boost); **c)** de dos cuadrantes; **d)** de 4 cuadrantes (puente).

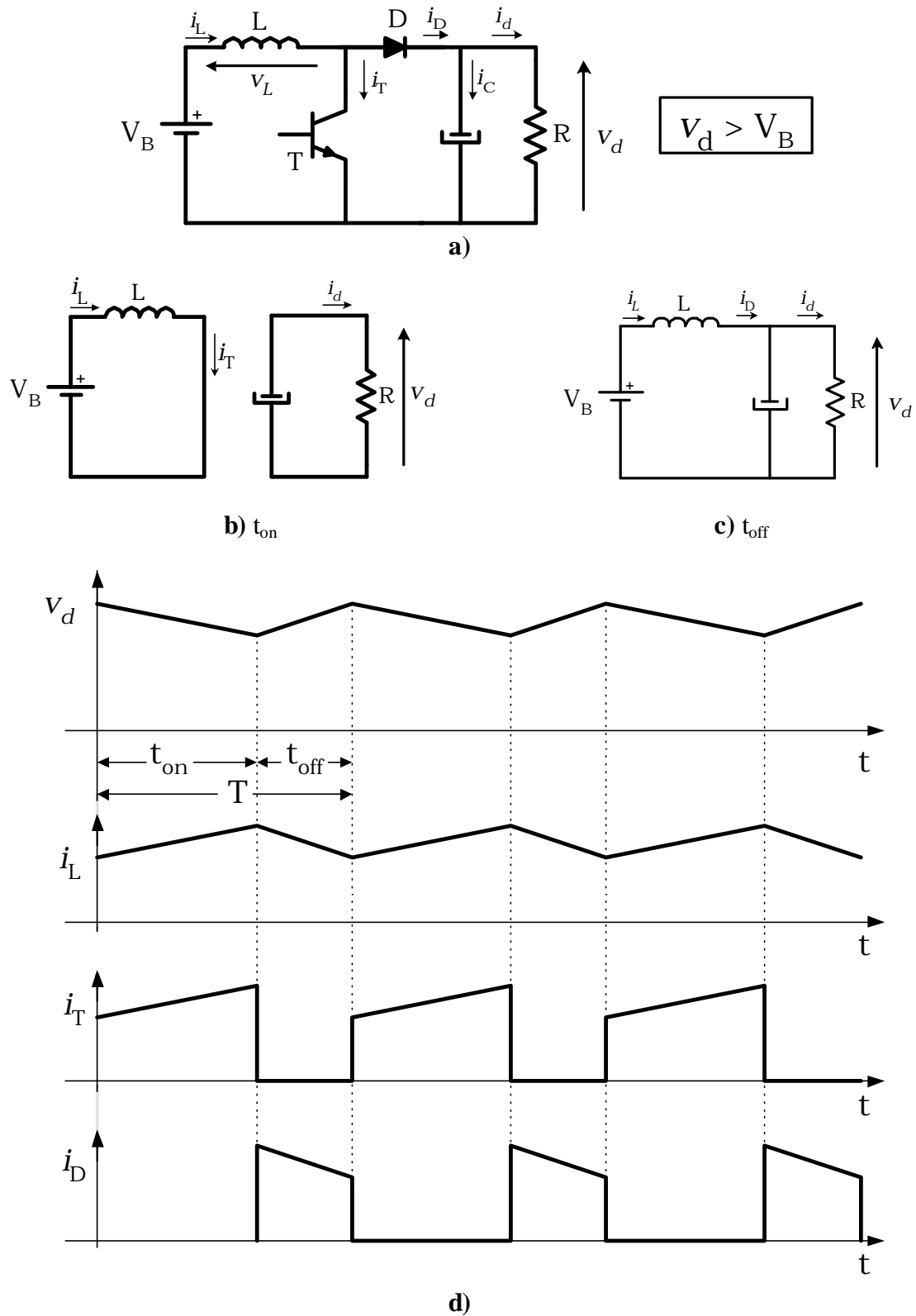
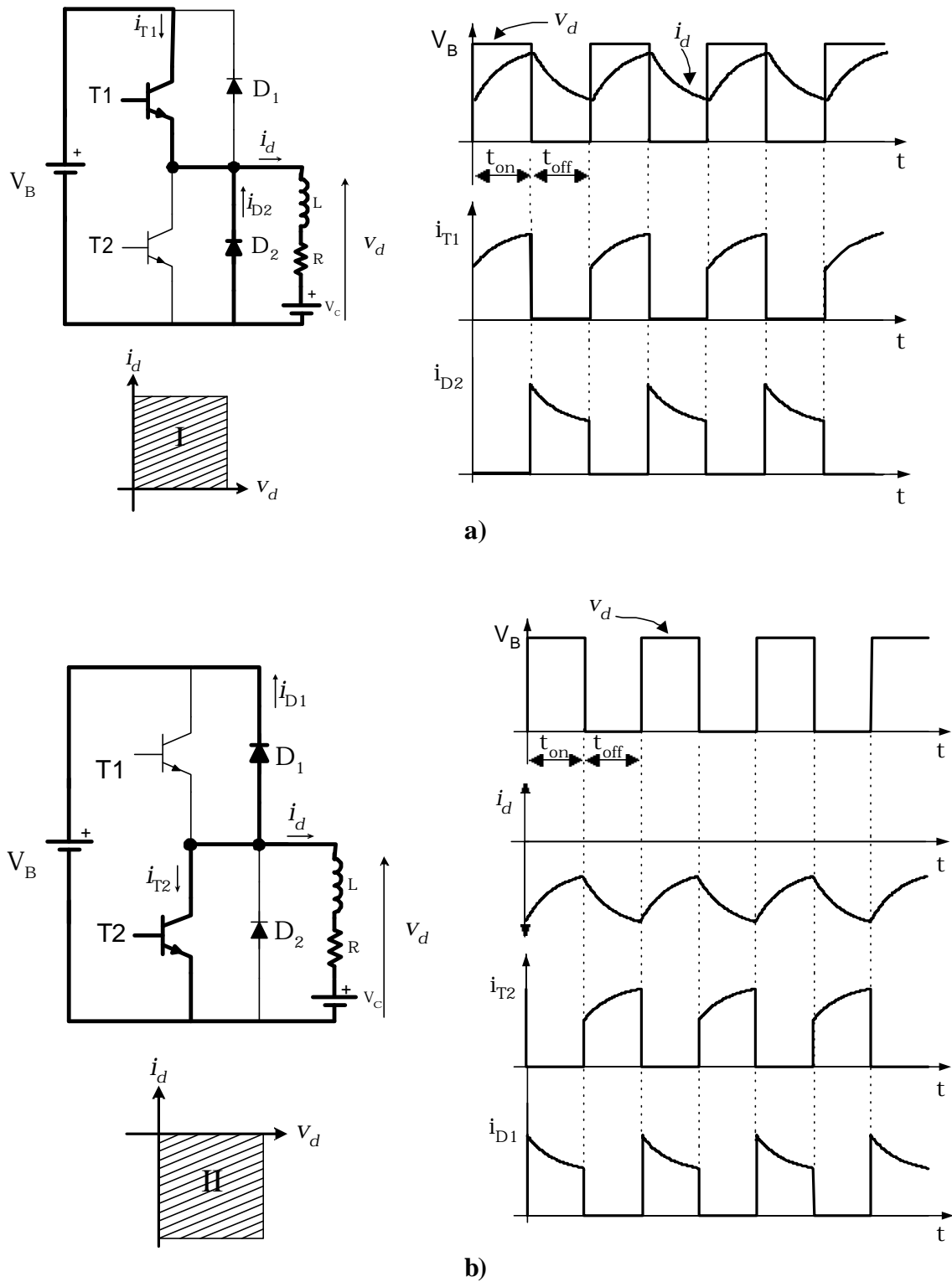


Fig.7.4.: Convertidor CC-CC elevador (Boost): **a)**, **b)** y **c)** circuitos de potencia y equivalentes; **d)** formas de onda.

**Fig.7.5.:** Chopper de dos cuadrantes.

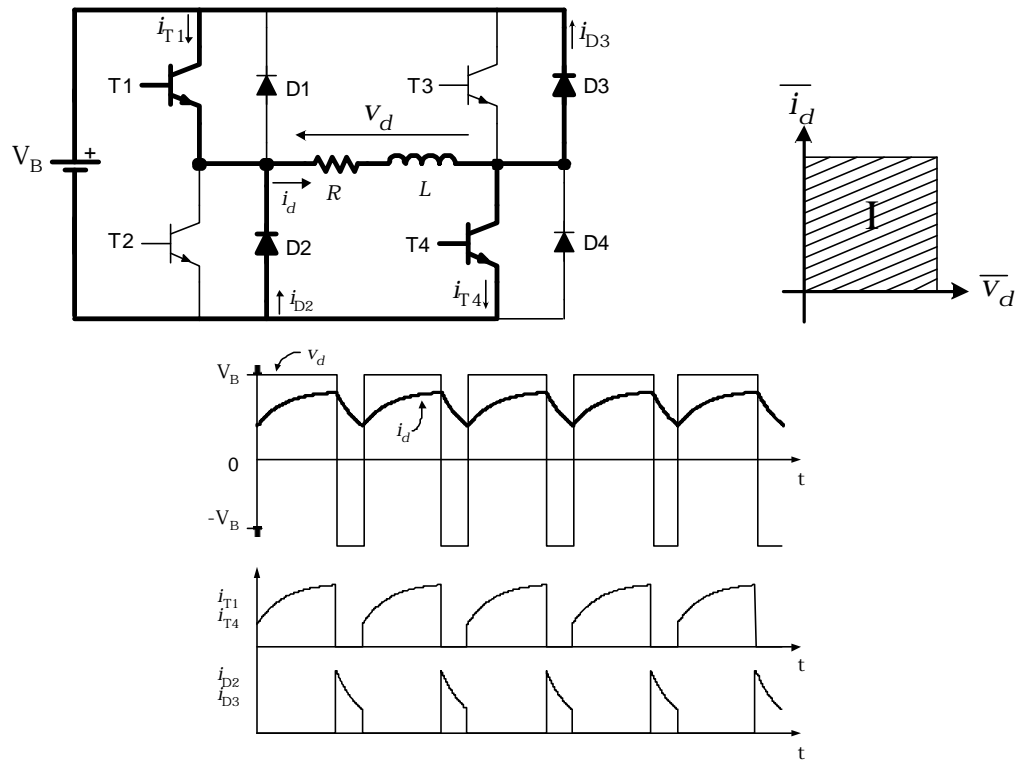


Fig.7.6.: Chopper de 4 cuadrantes (figura 7.3-d), en cuadrante I.

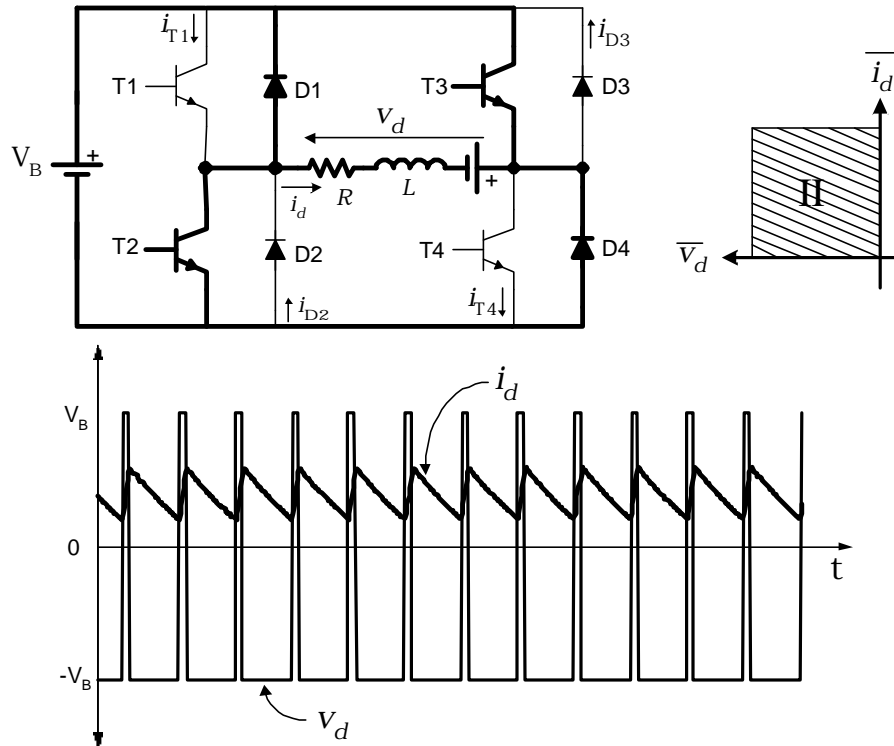


Fig.7.7.: Chopper de 4 cuadrantes (figura 7.3-d), en cuadrante II.

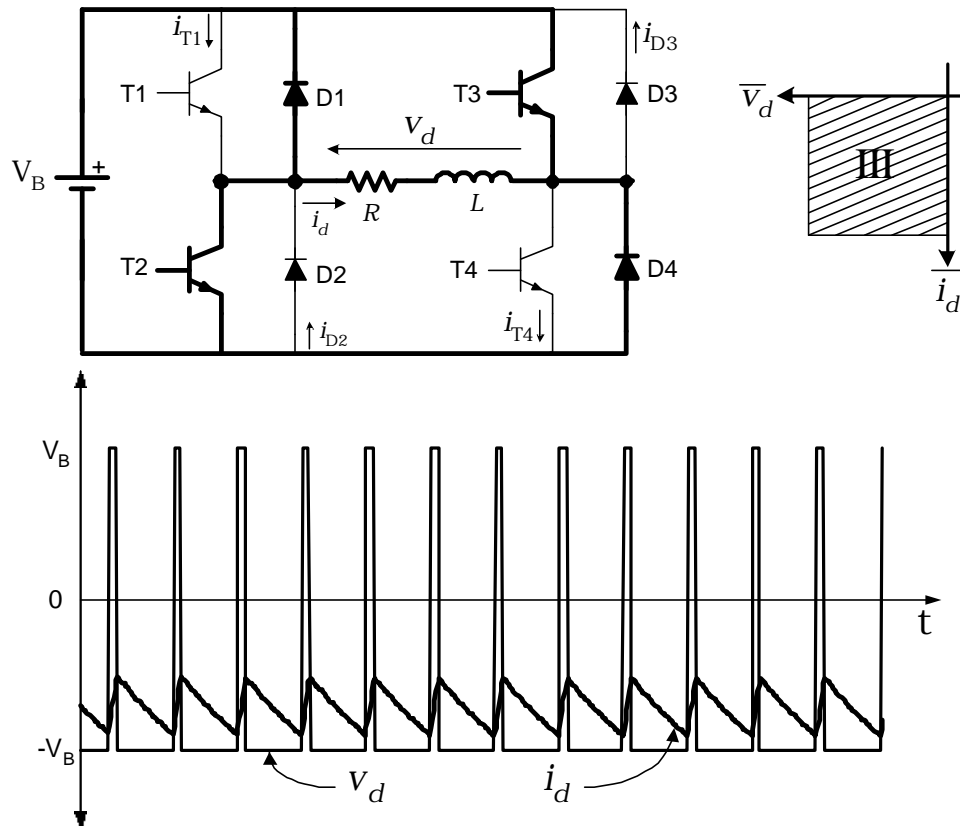


Fig.7.8.: Chopper de 4 cuadrantes (figura 7.3-d), en cuadrante III.

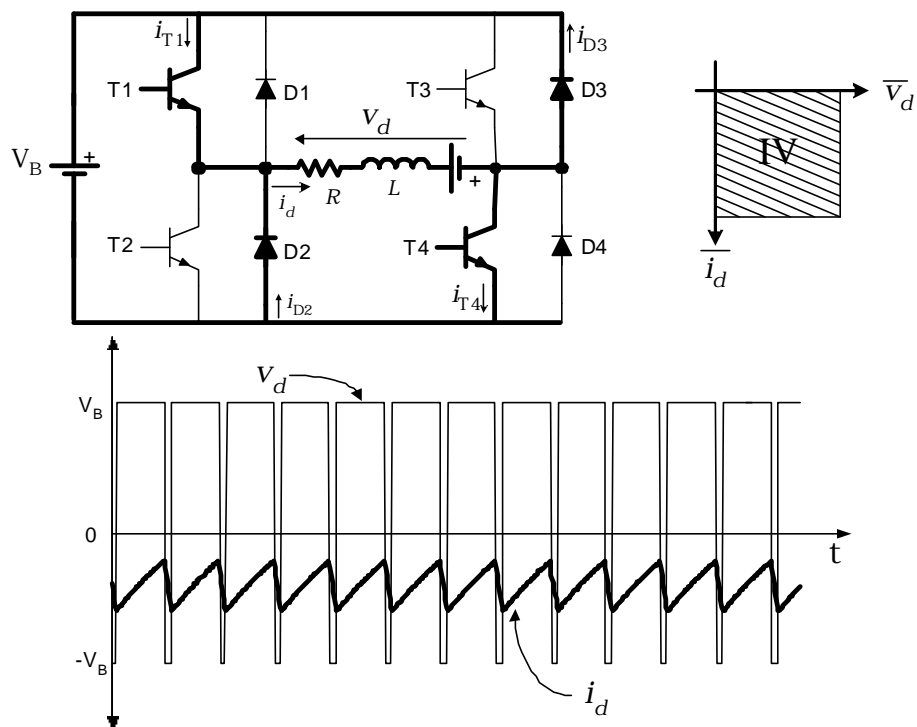


Fig.7.9.: Chopper de 4 cuadrantes (figura 7.3-d), en cuadrante IV.

7.2) INVERSORES.-

7.2.1) Inversores monofásicos.-

Inversor semipunte monofásico

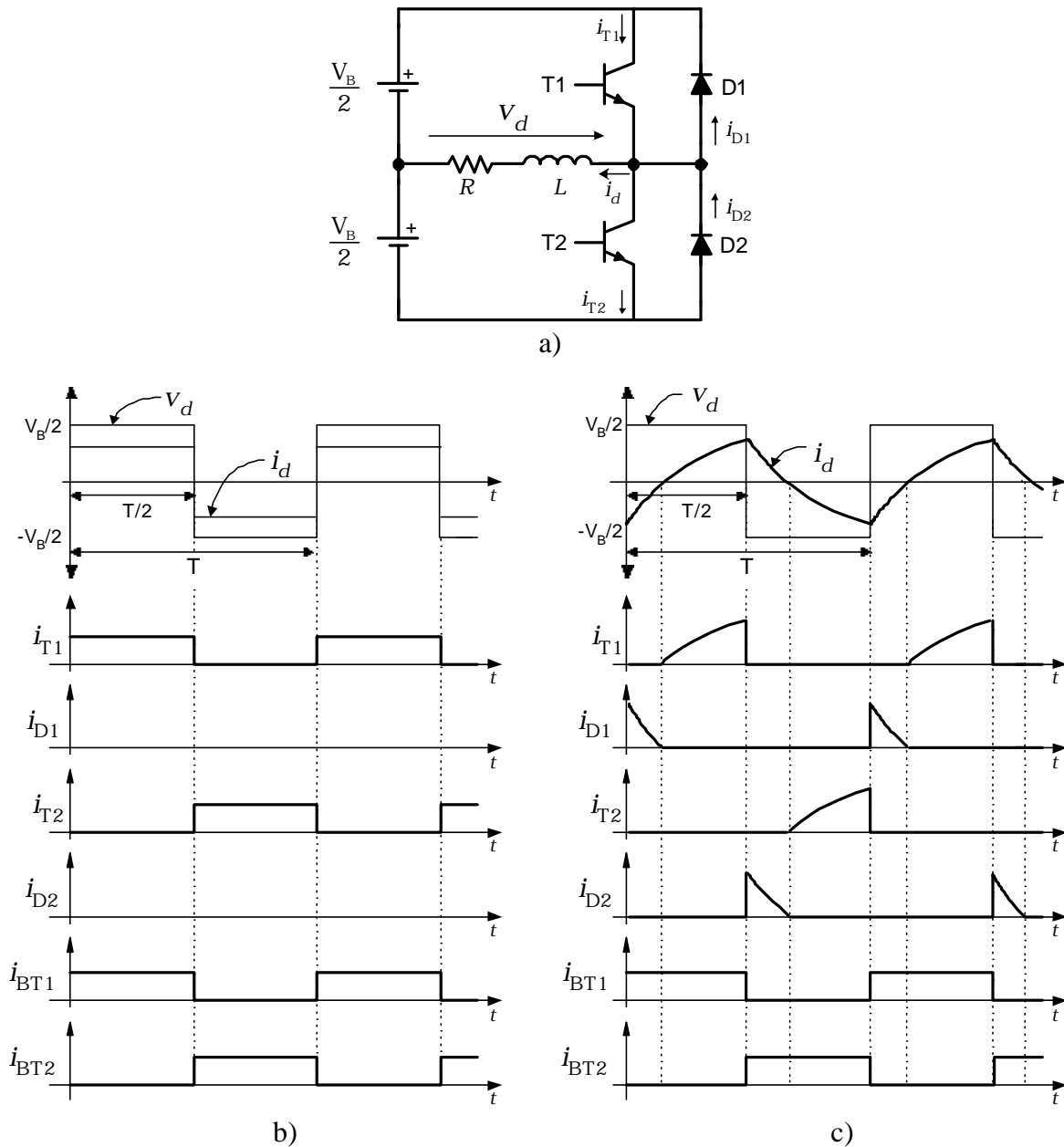
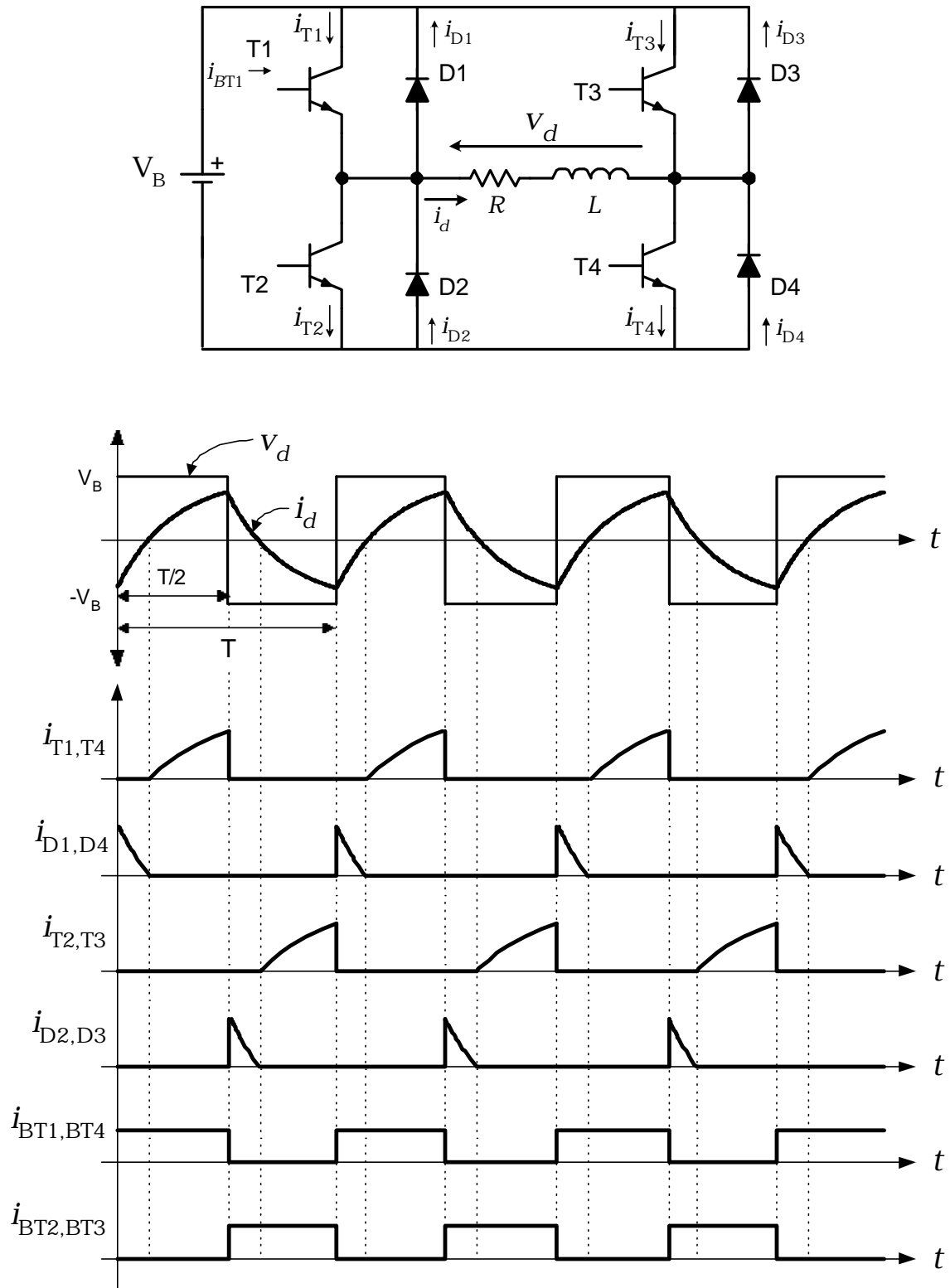


Fig.7.10.: Inversor semipunte monofásico: **a)** circuito; **b)** formas de onda con carga resistiva; **c)** formas de onda con carga resistiva-inductiva.

Inversor puente monofásico**Fig.7.11.:** Inversor puente monofásico: **a)** circuito; **b)** formas de onda.

7.2.2) Inversor trifásico fuente de voltaje.-

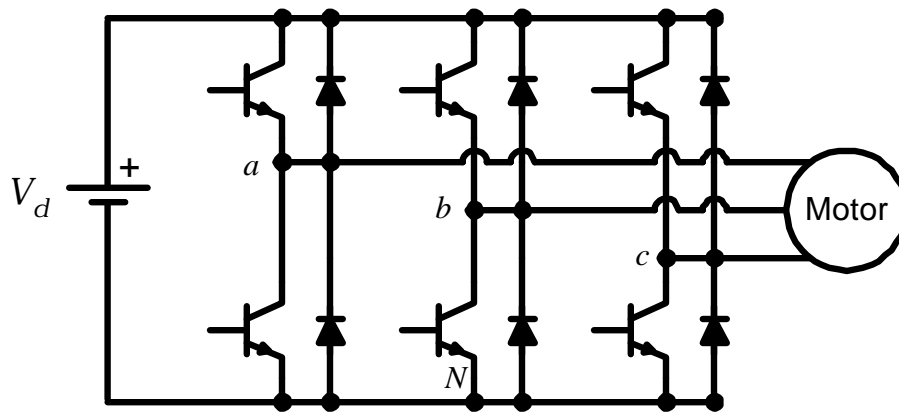


Fig.7.12.: Circuito de potencia de un inversor trifásico fuente de voltaje.

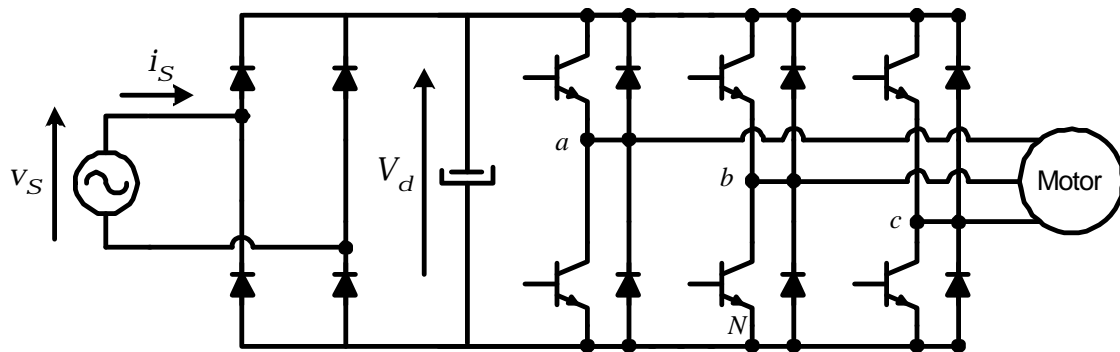


Fig.7.13.: Inversor trifásico conectado a una red monofásica.

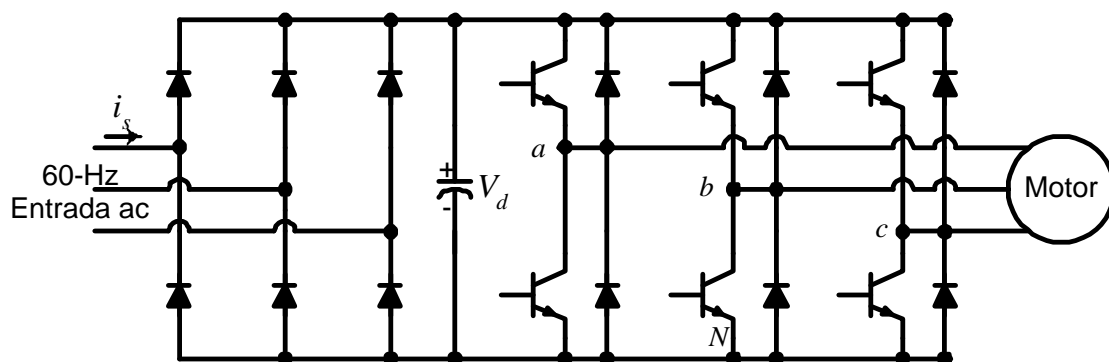


Fig.7.14.: Inversor trifásico conectado a una red trifásica.

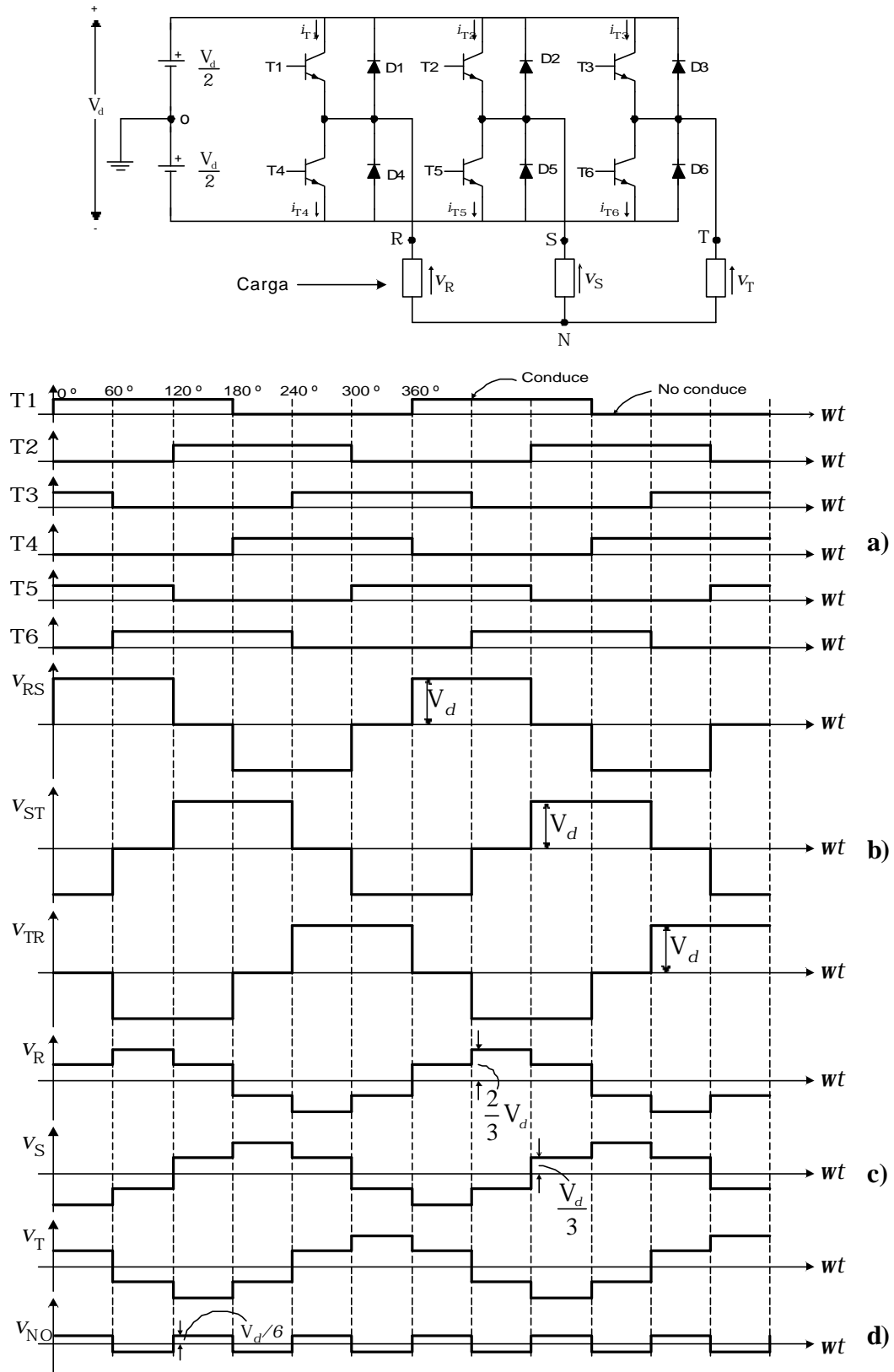


Fig.7.15.: Formas de onda de voltajes en un inversor trifásico: **a)** estados de conducción; **b)** tensiones entre líneas; **c)** tensiones fase-neutro en la carga; **d)** tensión del neutro.

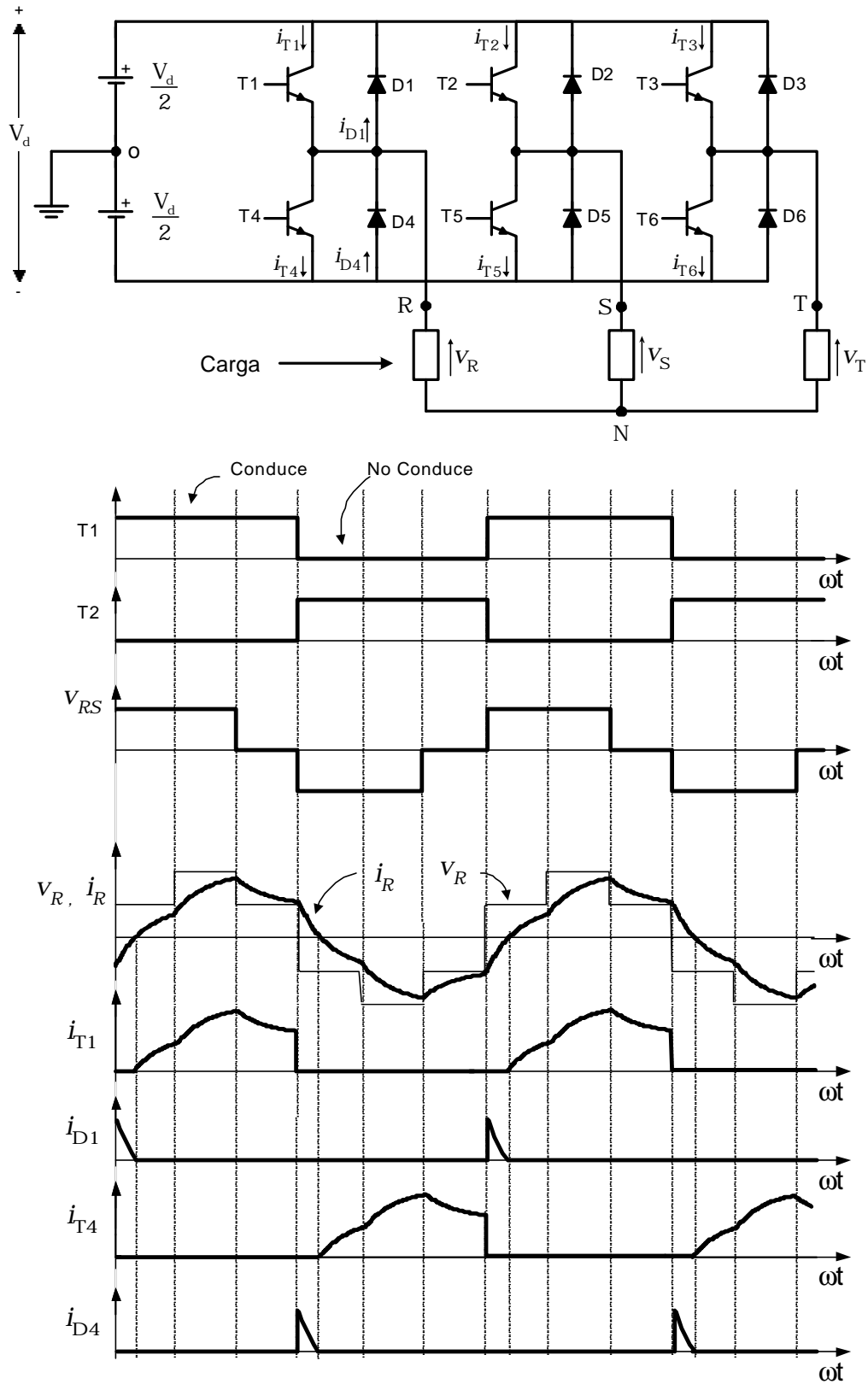


Fig.7.16.: Formas de onda de voltajes y corrientes en un inversor trifásico sin modulación

CAPÍTULO 8

CIRCUITOS DE DISPARO PARA SEMICONDUCTORES

8.1) ELEMENTOS BÁSICOS DE UN CIRCUITO DE DISPARO.-

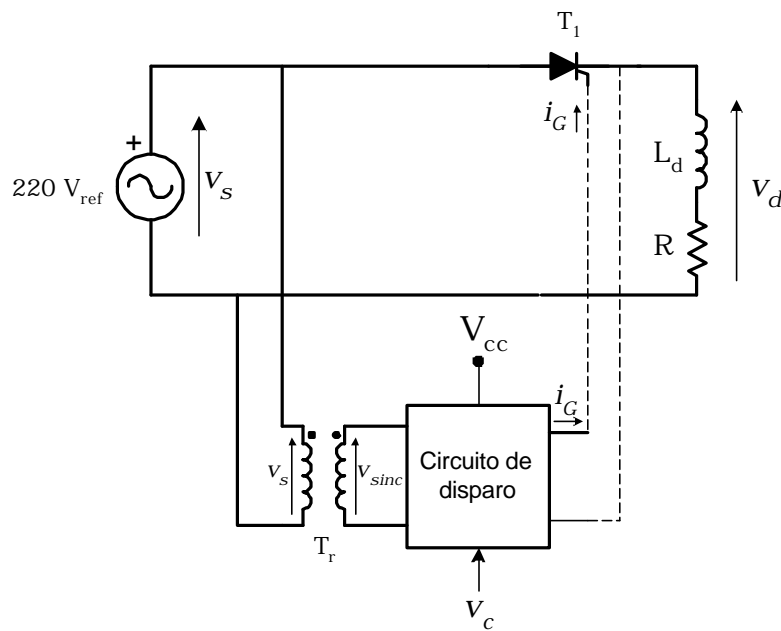


Fig. 8.1.: Esquema básico de un circuito de disparo.

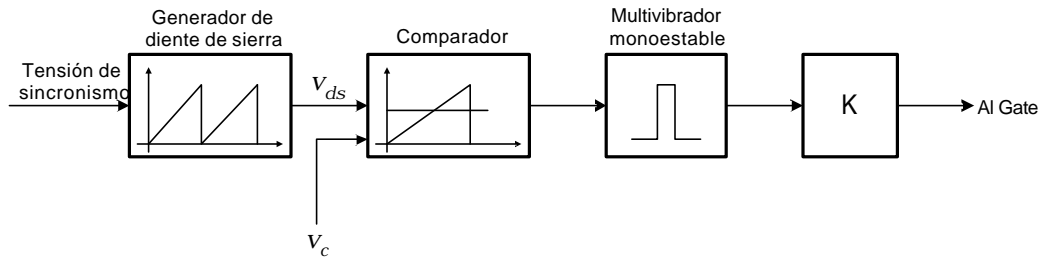


Fig. 8.2.: Diagrama en bloques de un circuito de disparo elemental.

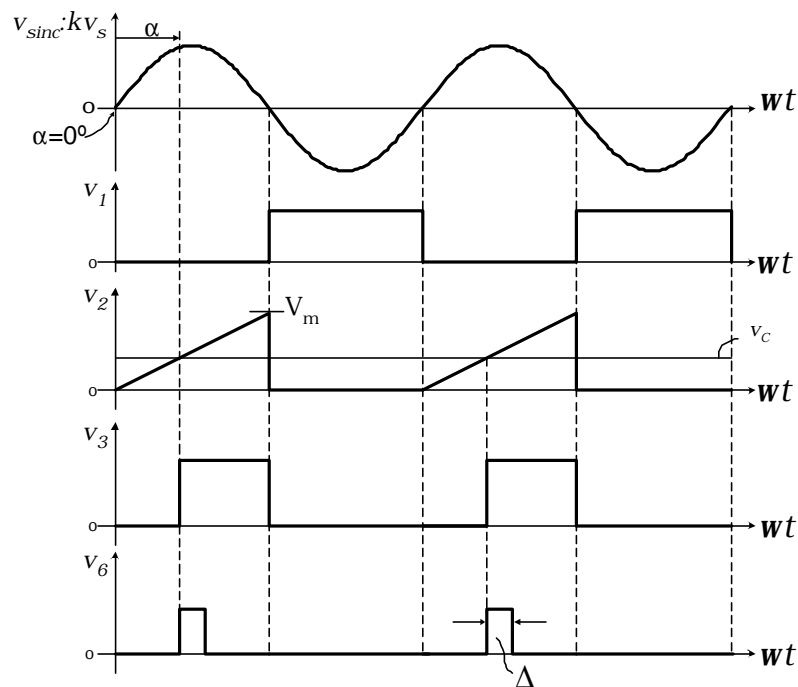
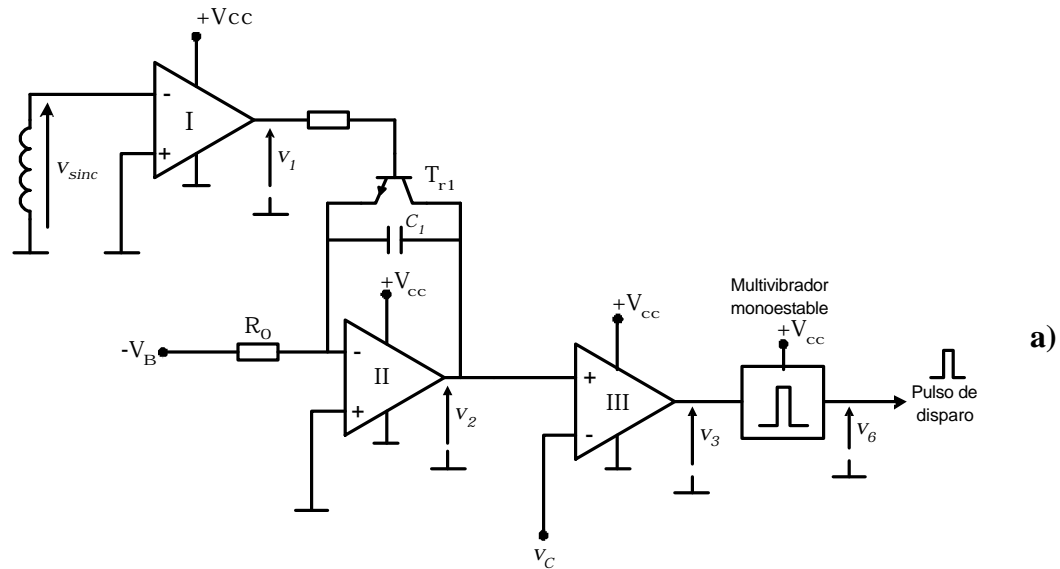


Fig. 8.3.: Circuito de disparo con amplificadores operacionales: a) circuito; b) formas de onda.

8.2) CIRCUITOS DE DISPARO CON TRANSISTORES MONOJUNTURA.

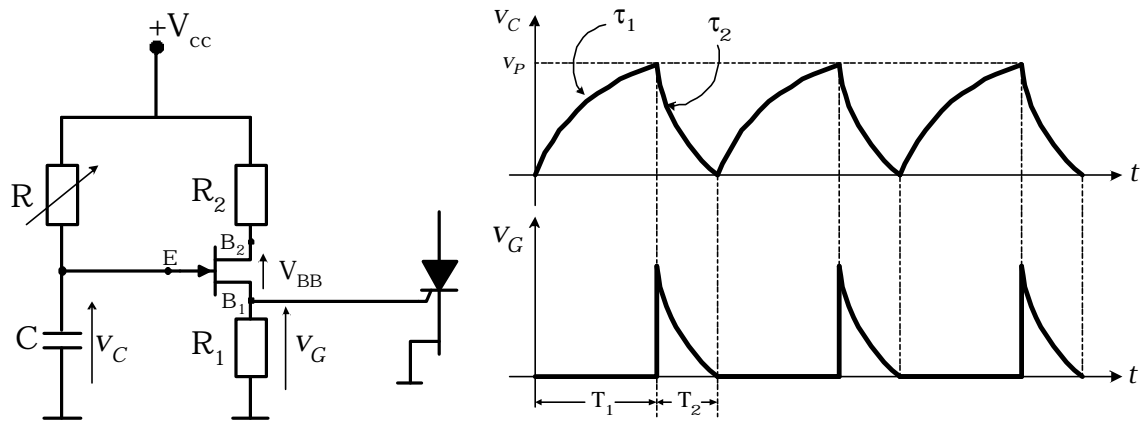


Fig. 8.4. Oscilador de relajación con transistor monojuntura.

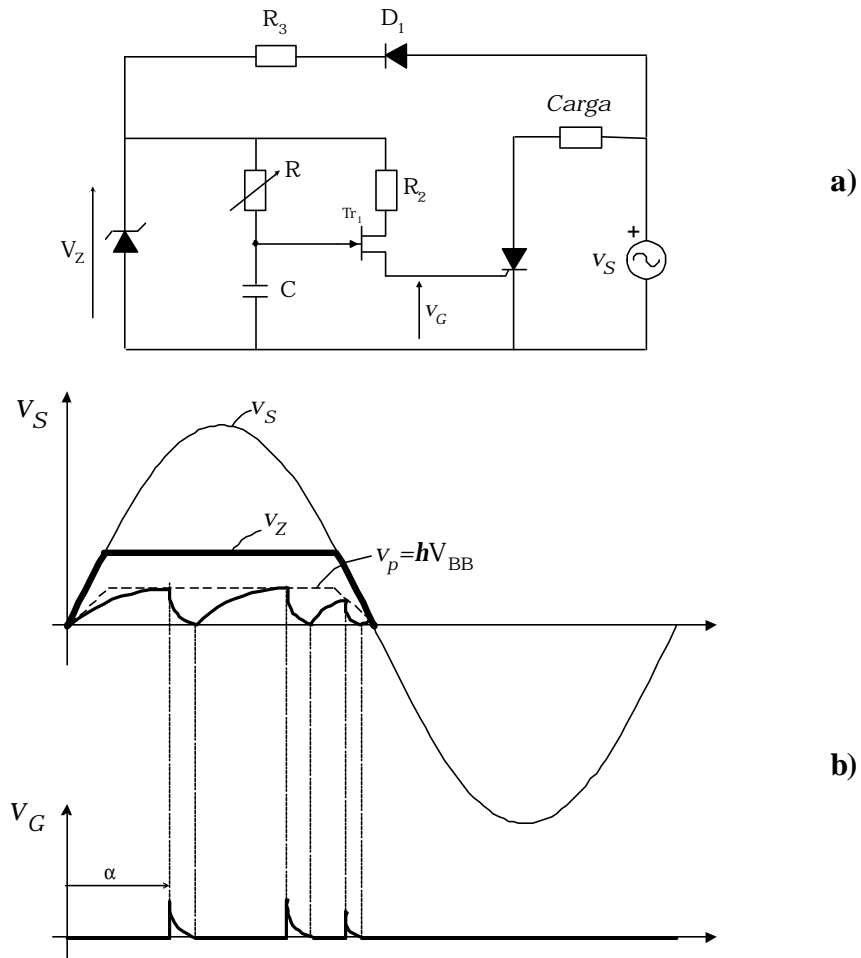


Fig. 8.5. Circuito de control con transistor monojuntura.

8.3) CIRCUITOS DE DISPARO AISLADOS PARA SCR.

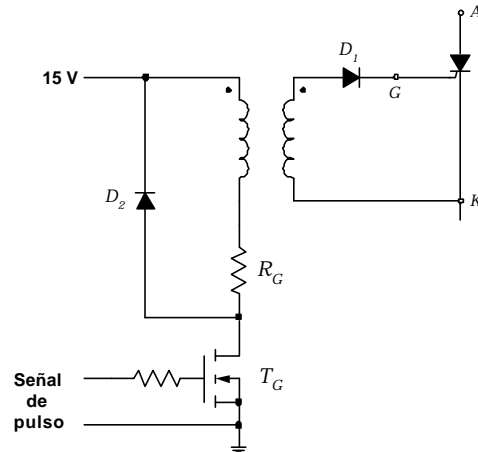


Fig. 8.6.: Uso de transformador de pulso para aislar SCR.

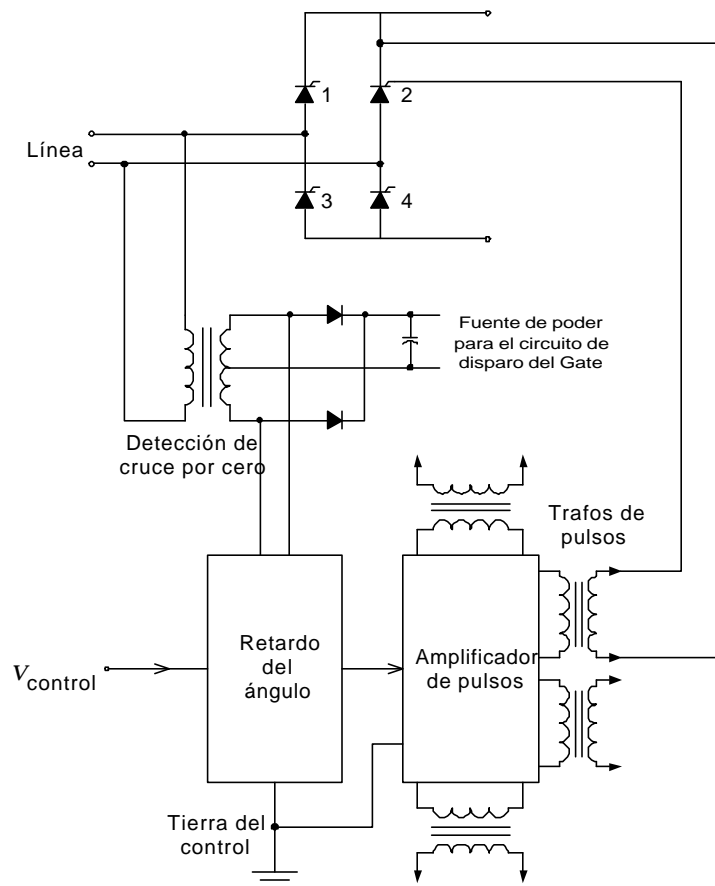


Fig. 8.7.: Diagrama general del circuito de disparo para un rectificador monofásico.

8.4) CIRCUITOS DE DISPARO INTEGRADOS PARA TIRISTORES.

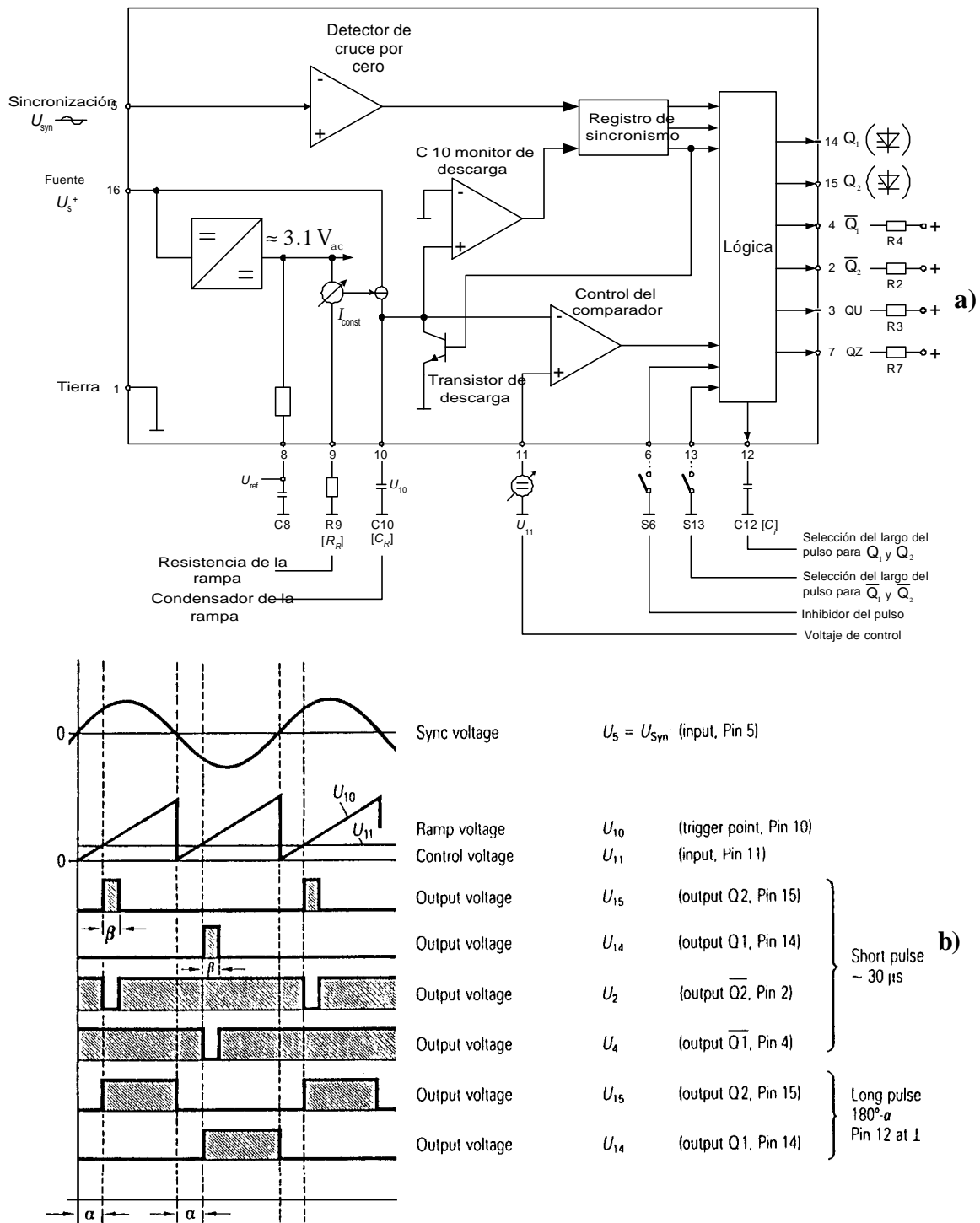


Fig. 8.8: Circuito de disparo integrado TCA 785: **a)** diagrama de bloques; **b)** formas de onda.

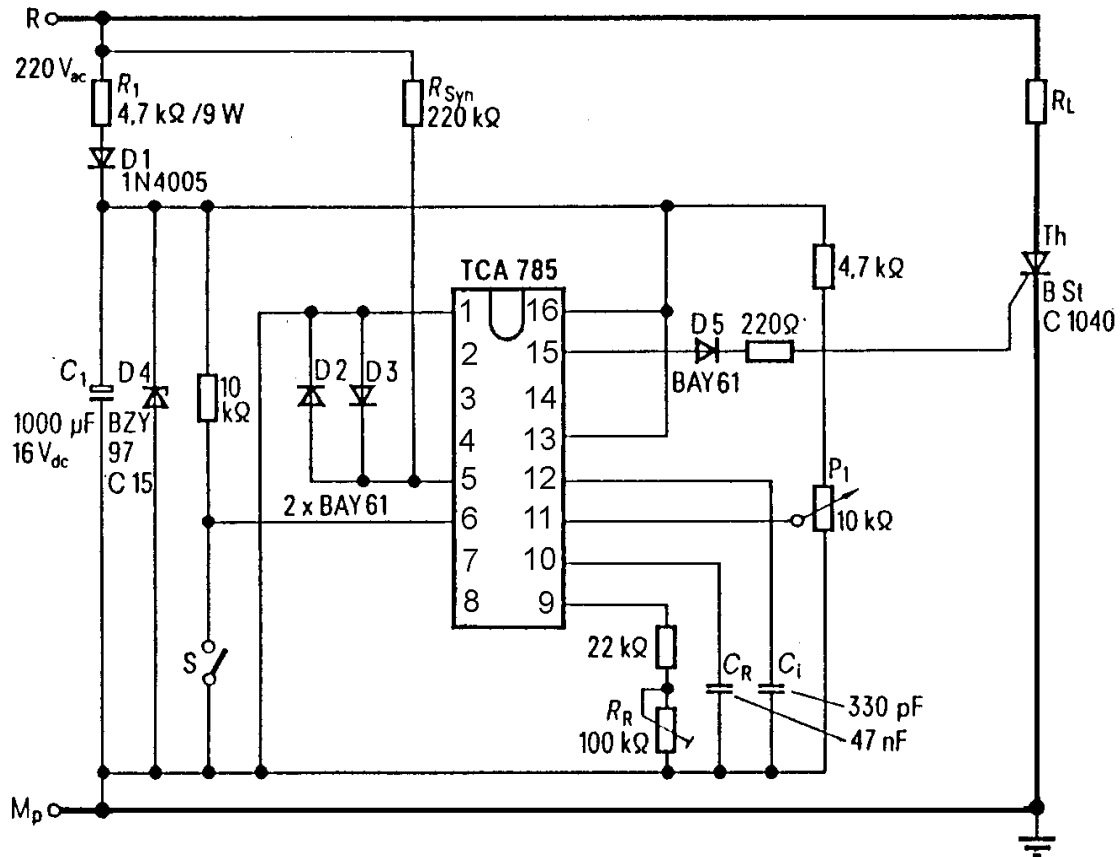


Fig. 8.9.: Control de un tiristor en el circuito TCA 785.

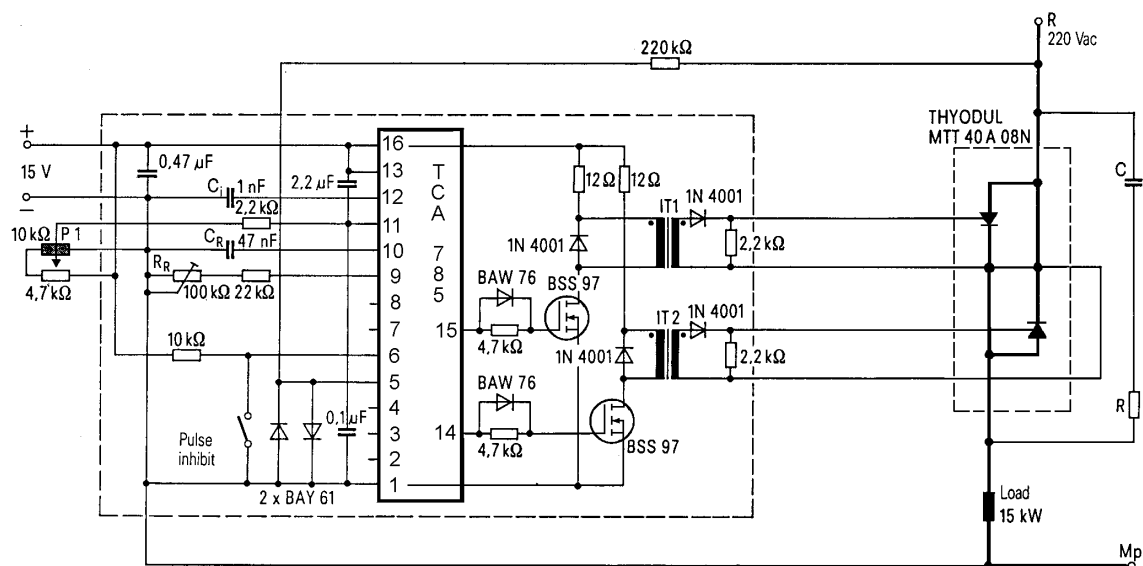


Fig. 8.10.: Circuito de control de fase de un convertidor AC-AC monofásico.

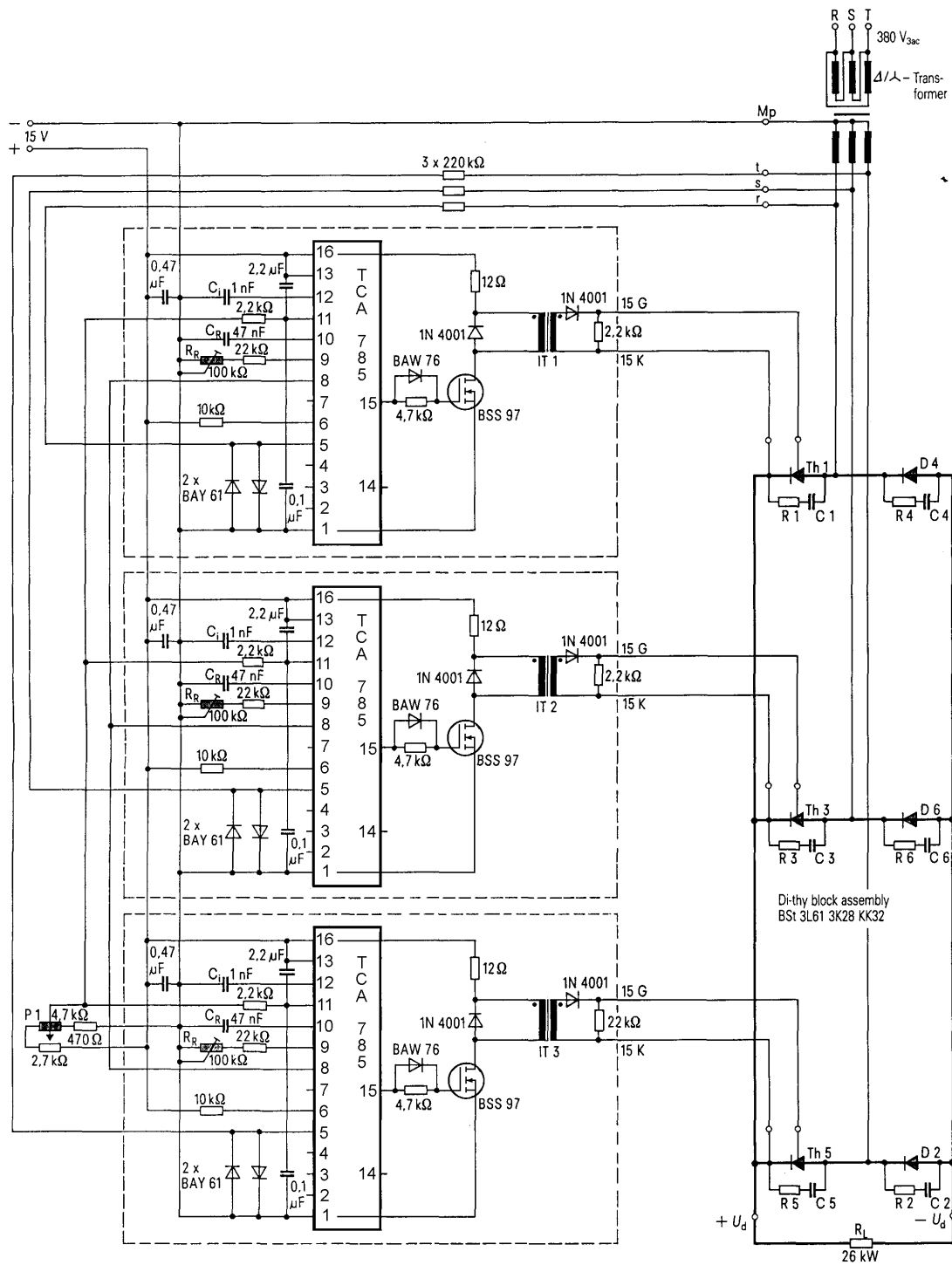


Fig. 8.11.: Circuito de disparo para un rectificador trifásico semicontrolado.

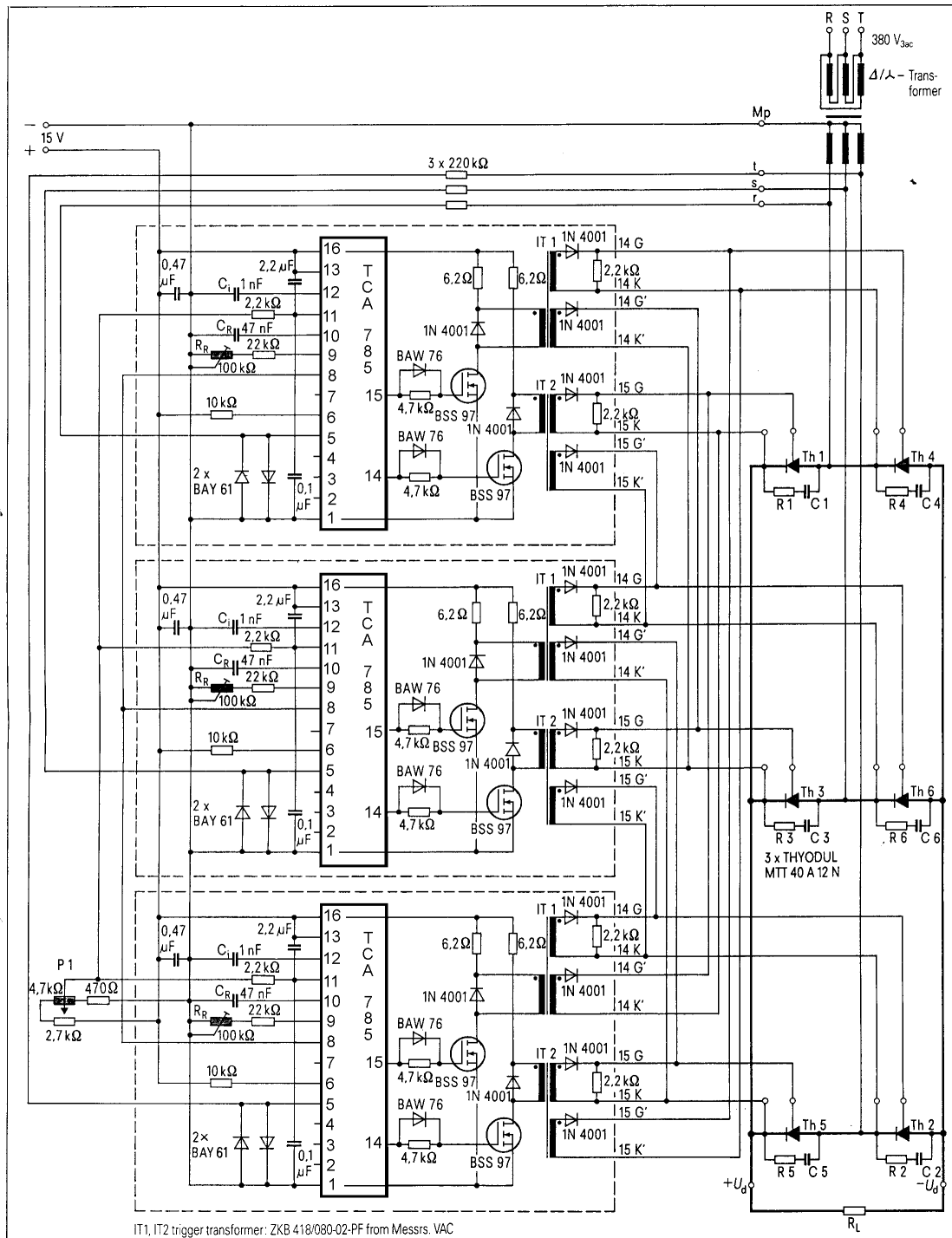


Fig. 8.12.: Circuito de disparo con doble pulso para un rectificador trifásico puente totalmente controlado.

8.5) CIRCUITOS DE DISPARO PARA TRANSISTORES DE POTENCIA.

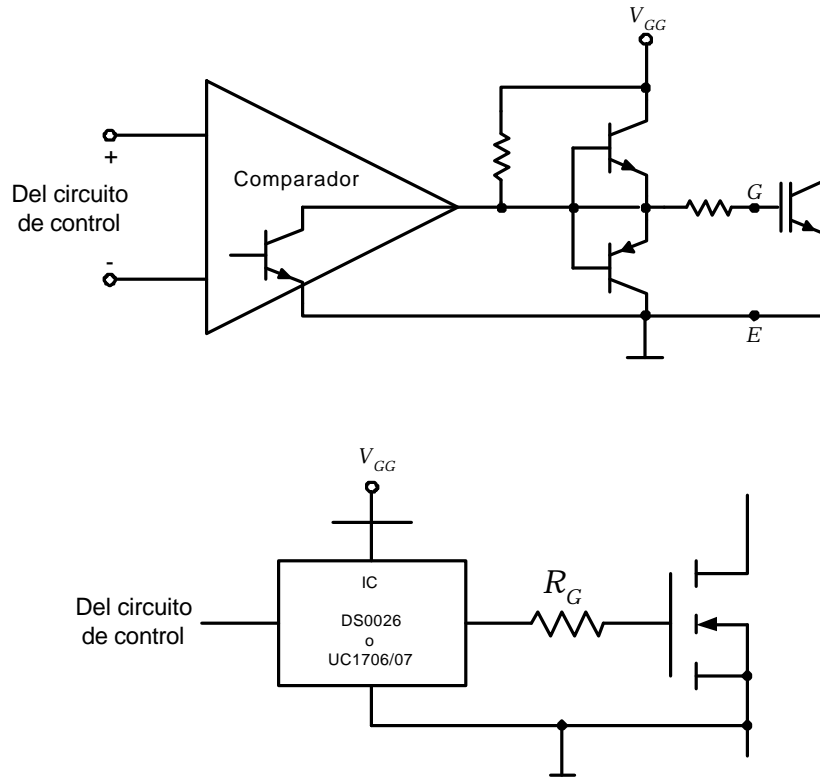


Fig. 8.13.: Amplificación de la corriente por el gate.

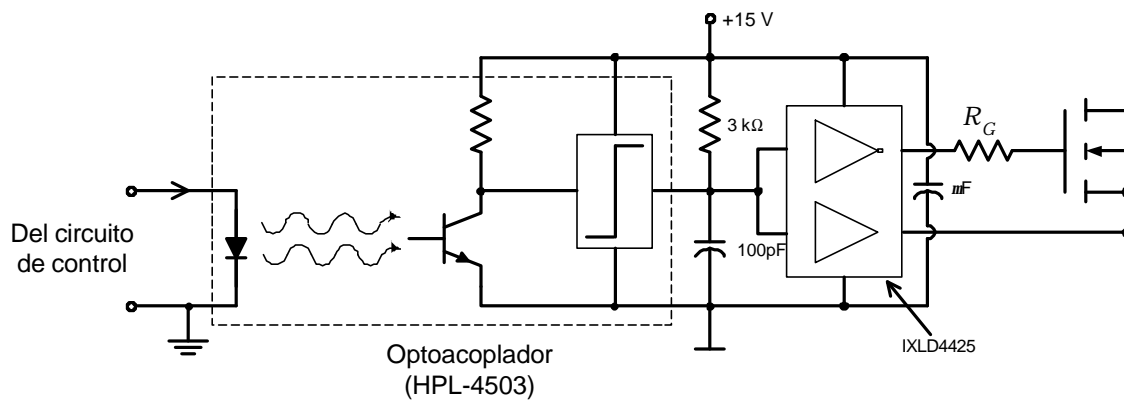


Fig. 8.14.: Circuito de disparo con aislación galvánica mediante acoplador óptico.

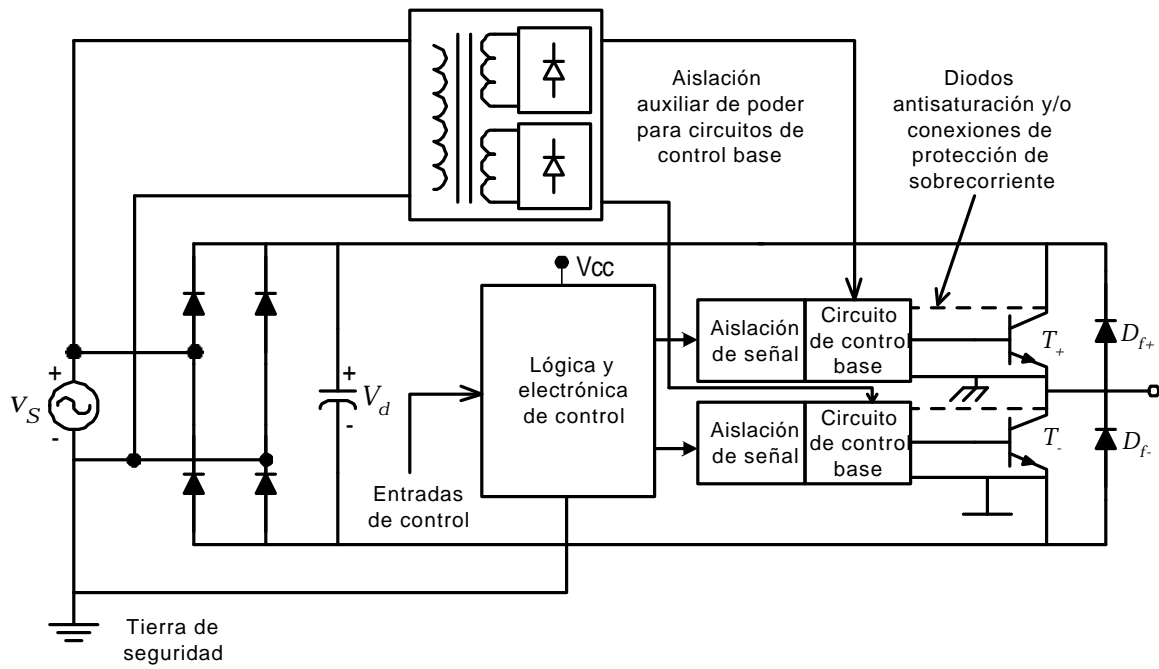


Fig. 8.15.: Sobre la necesidad de la aislación de los pulsos de disparo.

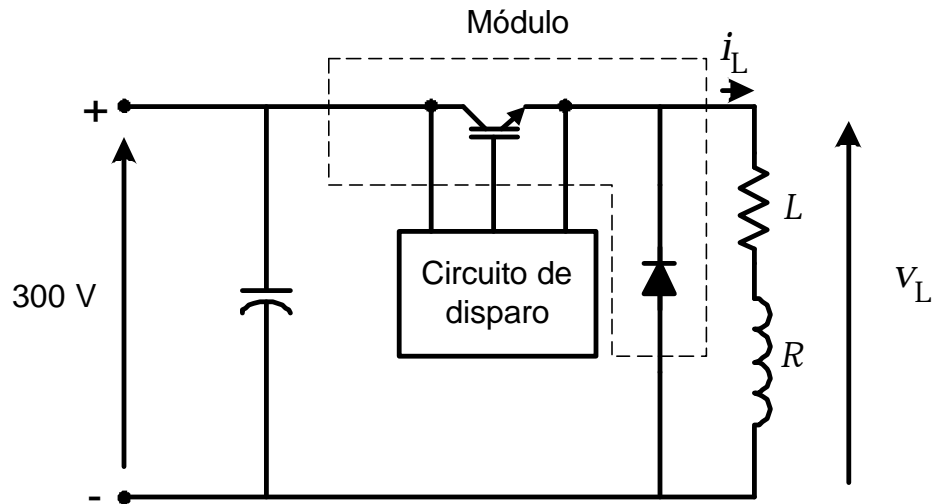


Fig.8.16.: Chopper de un cuadrante.

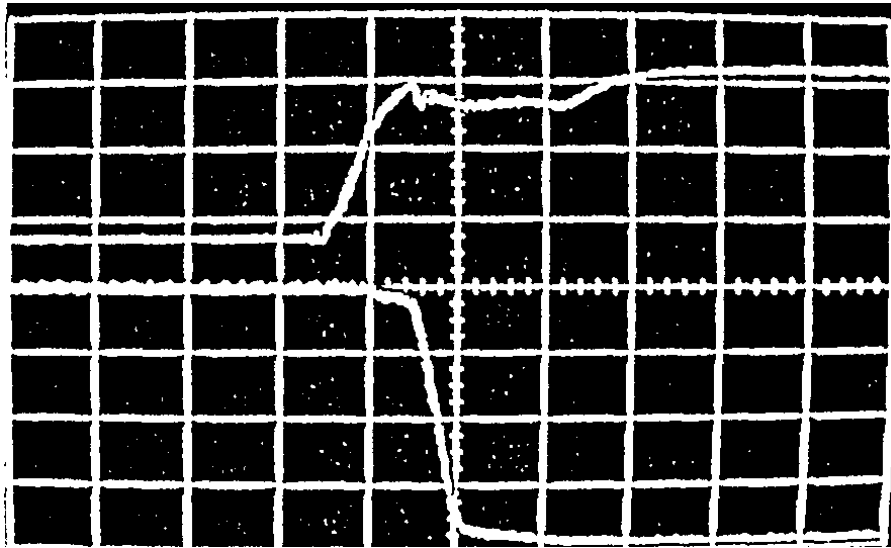


Fig.8.17: Encendido del transistor; a) V_{GE} : 5V/div; b) V_{CE} : 50V/div, tiempo: 500ns/div.

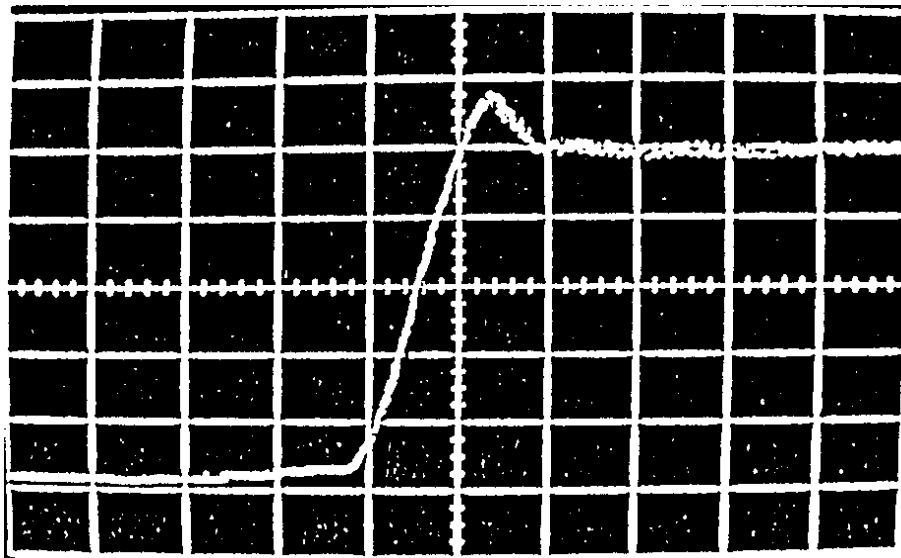


Fig.8.18: Corte del transistor, V_{CE} : 50V/div, tiempo: 100ns/div.

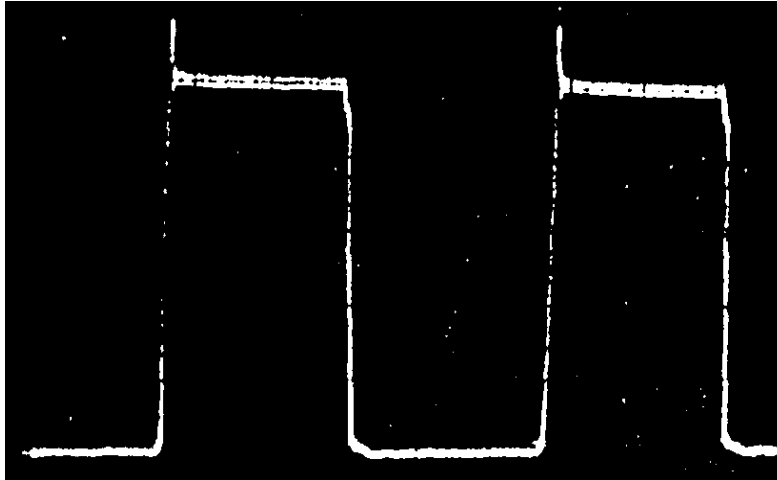


Fig.8.19: Operación a 100 kHz, V_{CE} : 50 V/div, I_C : 10 A/div, Tiempo: 2 μ s/div.

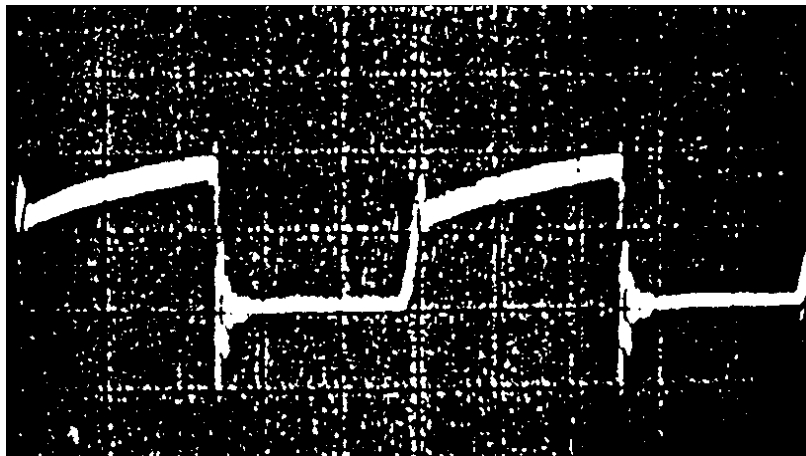


Fig.8.20: Operación a 100 kHz, I_C : 10 A/div, Tiempo: 2 μ s/div.

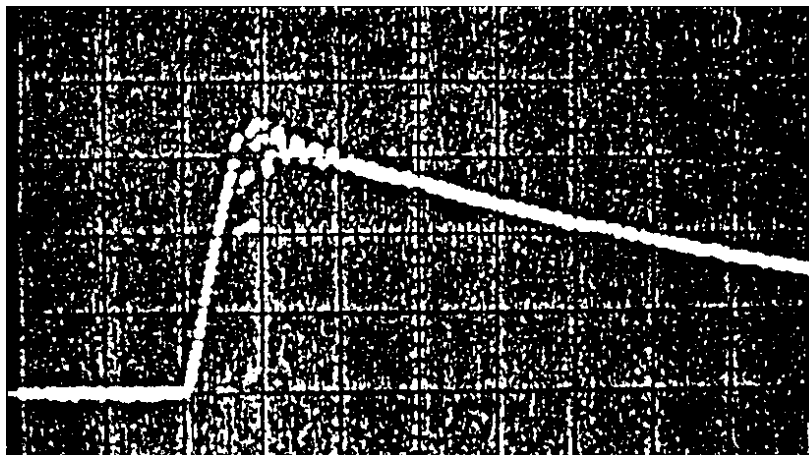


Fig.8.21: Cortocircuito en la carga, I_C : 20 A/div, Tiempo: 2 μ s/div.

CAPÍTULO 9

APLICACIONES Y CONTROL DE CONVERTIDORES ESTÁTICOS

9.1) CONTROL DE RECTIFICADORES.-

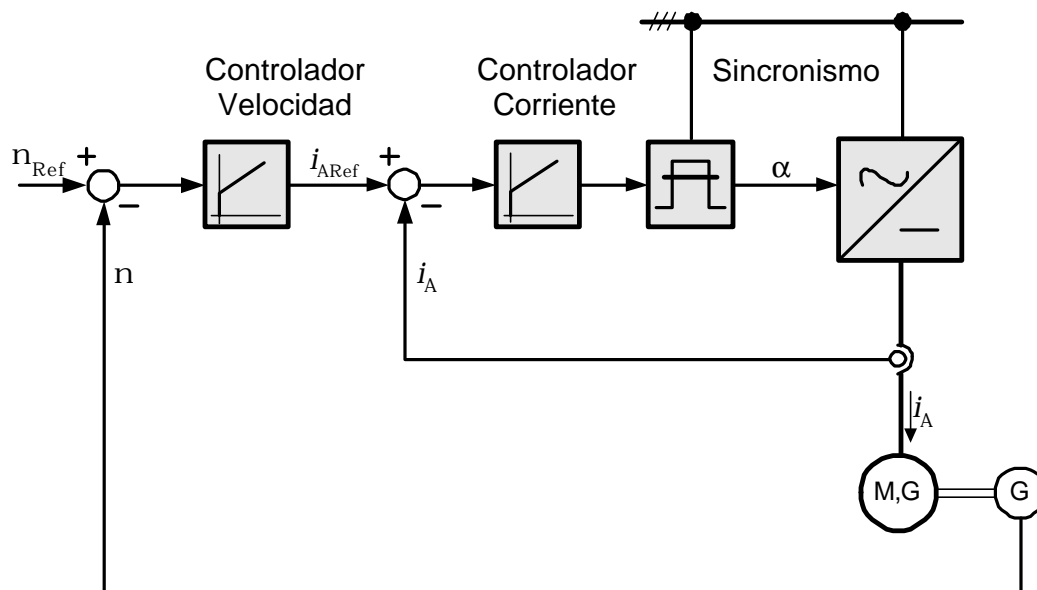


Fig. 9.1.: Esquema de control básico de un motor de corriente continua

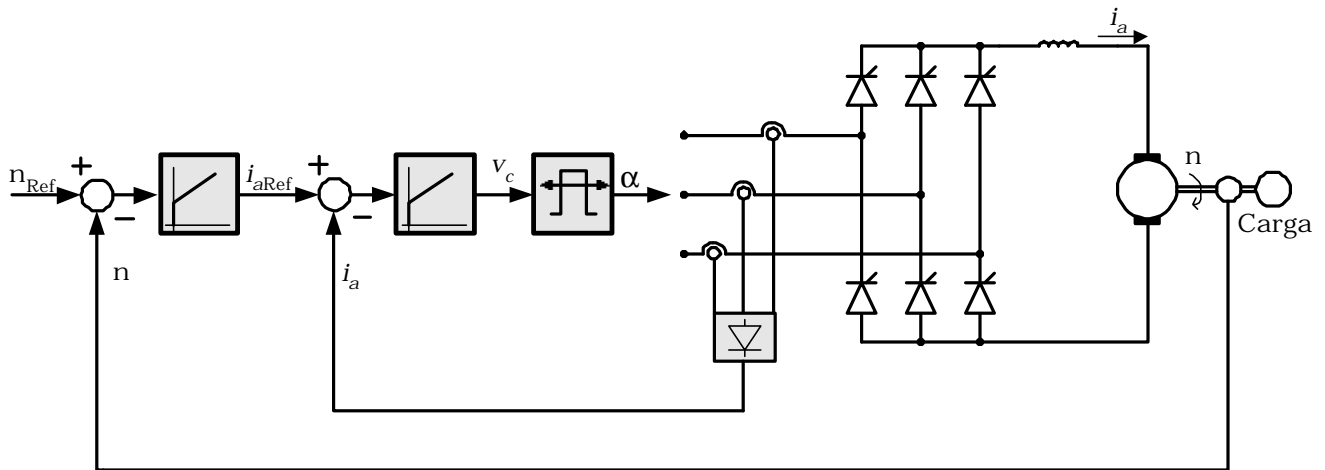


Fig. 9.2.: Control de una máquina de corriente continua alimentada por un rectificador puente.

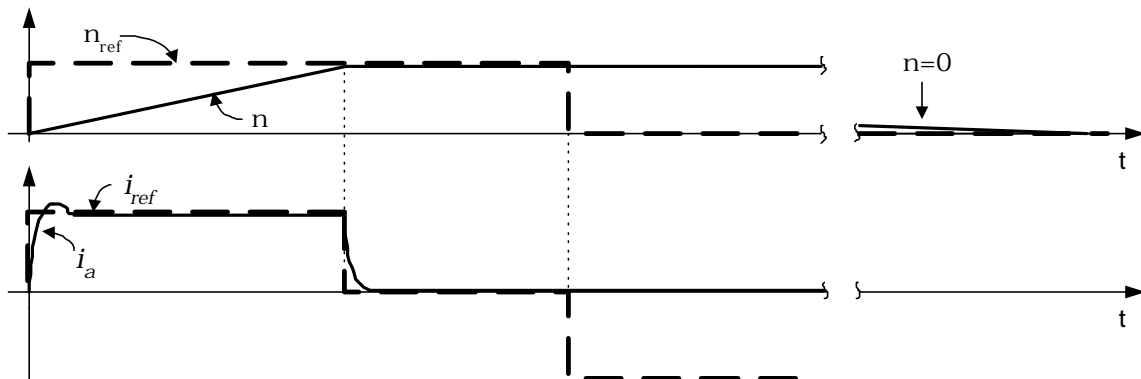


Fig. 9.3.: Comportamiento de las variables en el sistema de la figura 9.2.

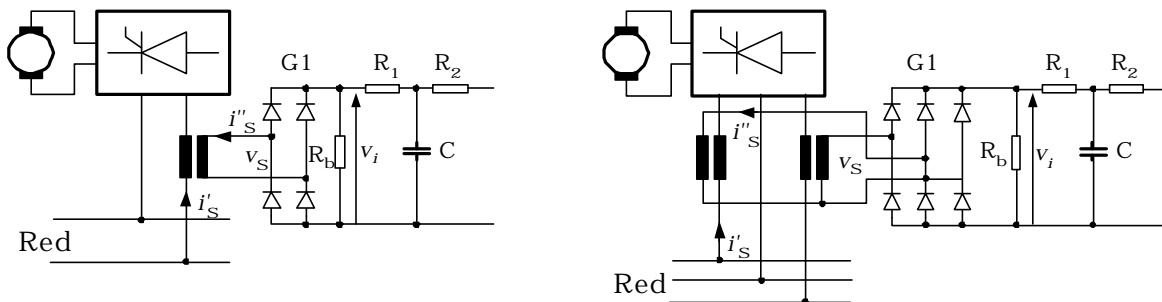


Fig. 9.4.: Transductores de corriente alterna para medir la corriente de salida del rectificador.

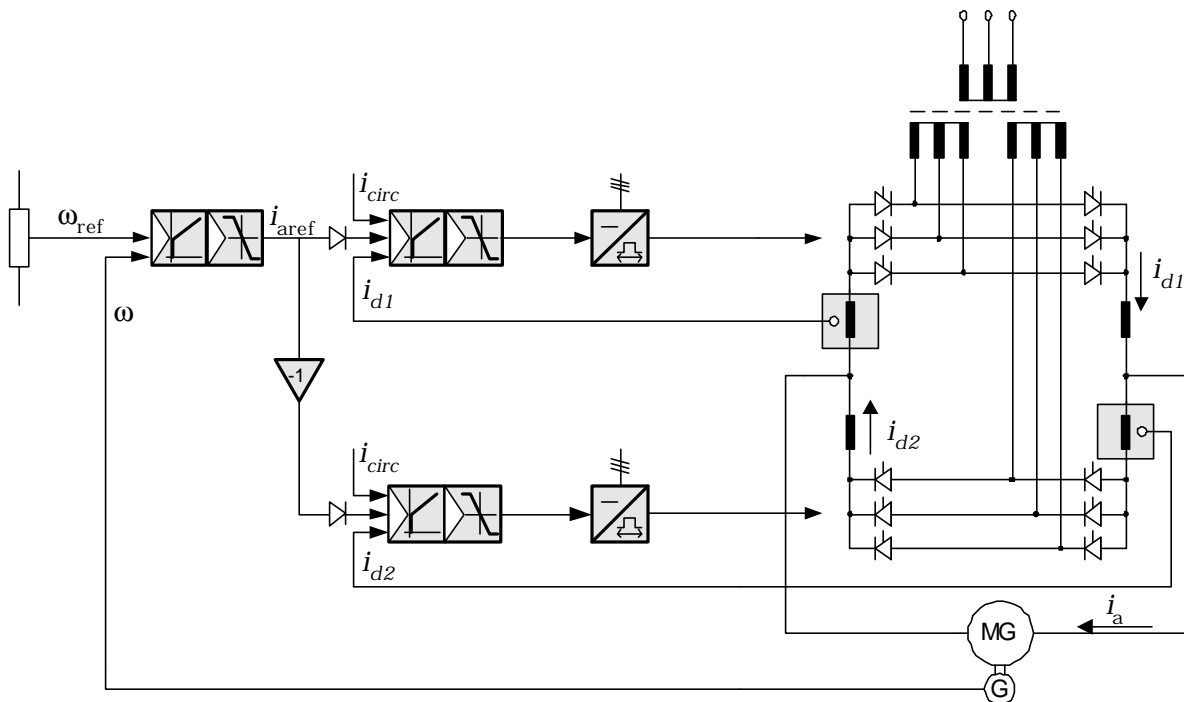


Fig. 9.5.: Control de velocidad en 4 cuadrantes con un convertidor dual con corriente circulante.

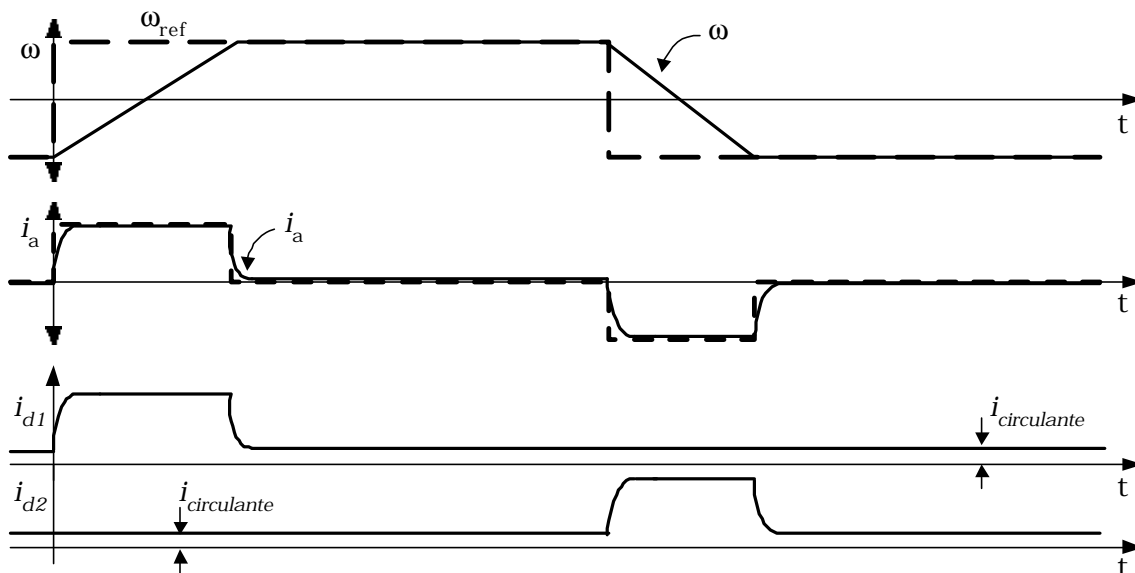


Fig. 9.6.: Inversión de marcha del motor de la figura 9.5.

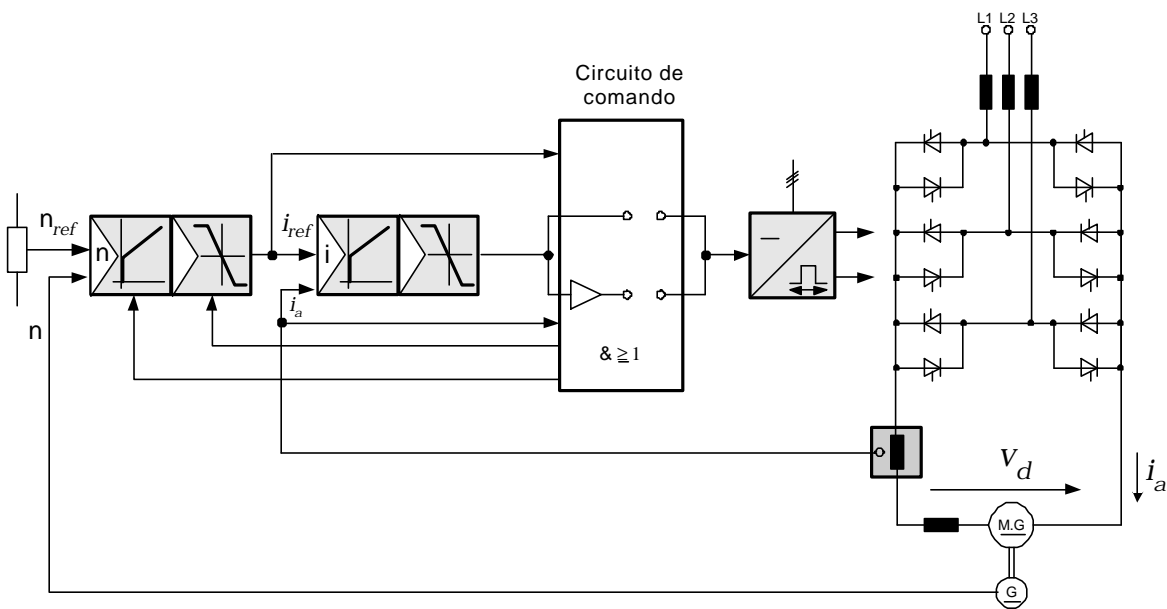


Fig. 9.7.: Control en 4 cuadrantes con un conversor dual sin corriente circulante.

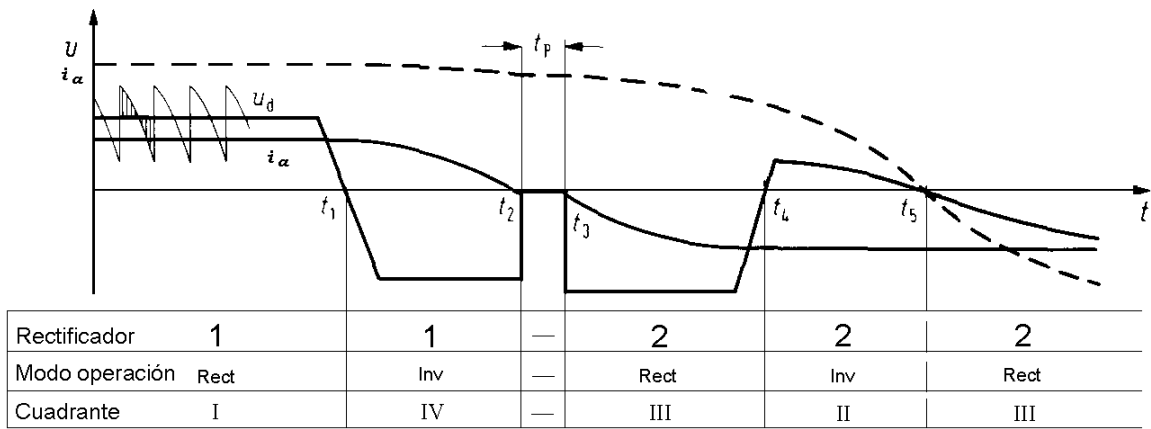


Fig. 9.8.: Comportamiento temporal de variables de la figura 9.7 en una inversión de giro.

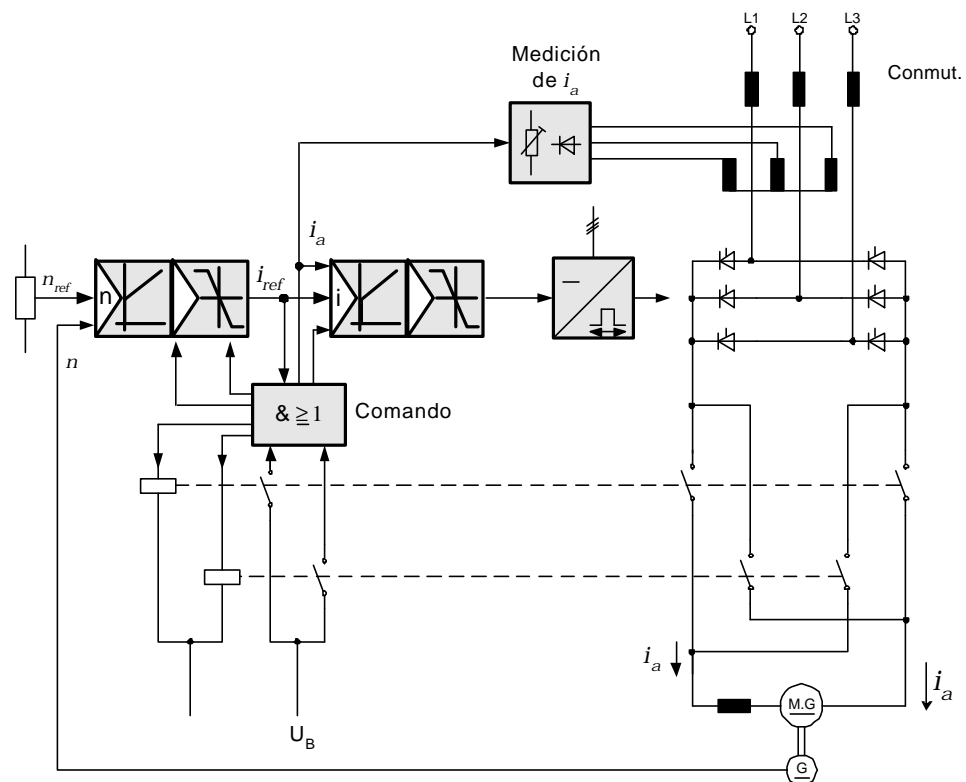


Fig. 9.9.: Accionamiento de 4 cuadrantes con inversión del rotor.

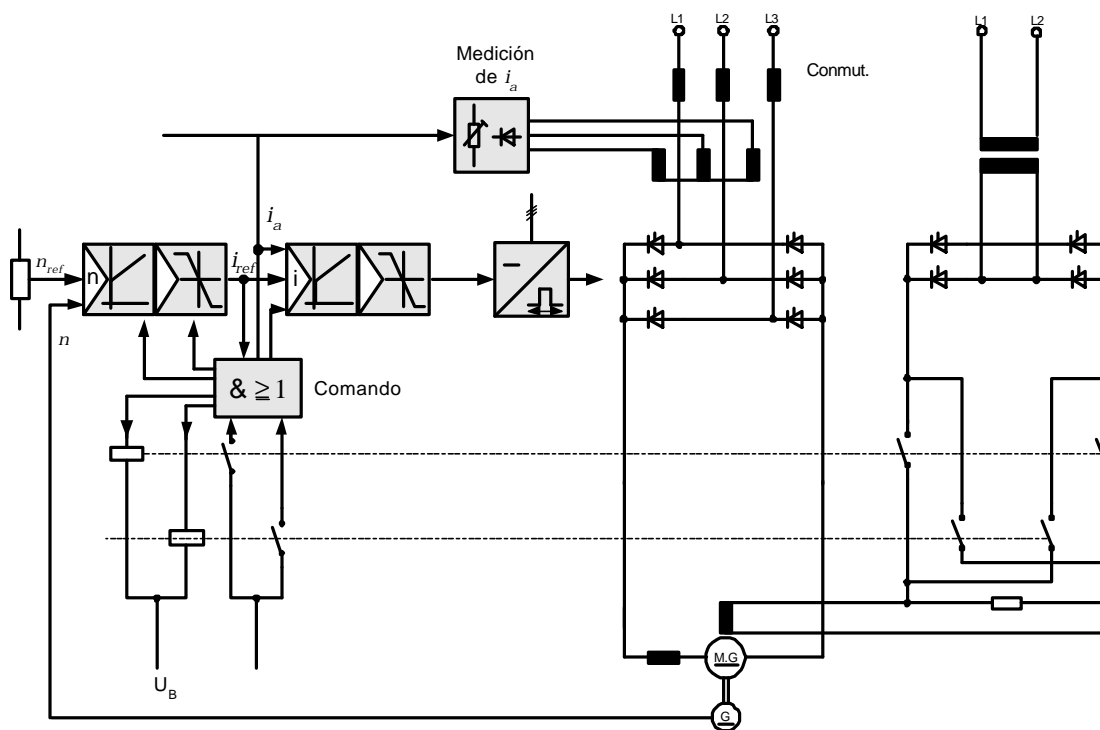


Fig. 9.10.: Accionamiento de 4 cuadrantes con inversión del campo.

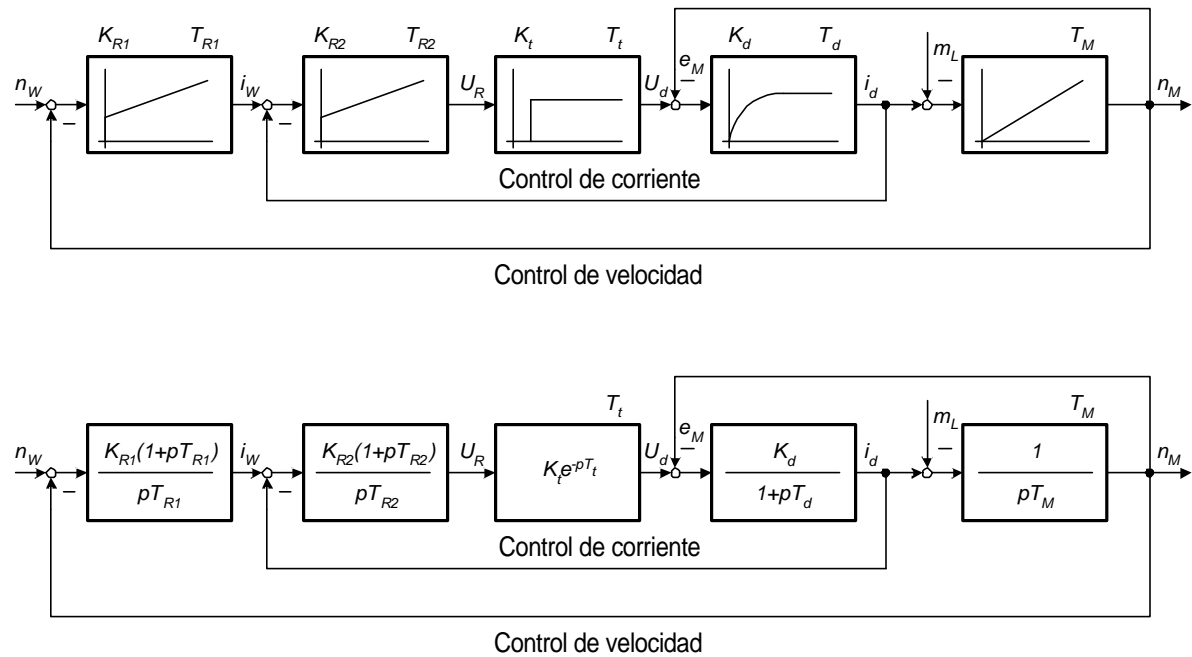


Fig. 9.11.: Diagramas de bloques de un motor de corriente continua controlado.

9.2) CONTROL DE CHOPPERS.

9.2.1) El control de corriente de dos posiciones (histéresis).

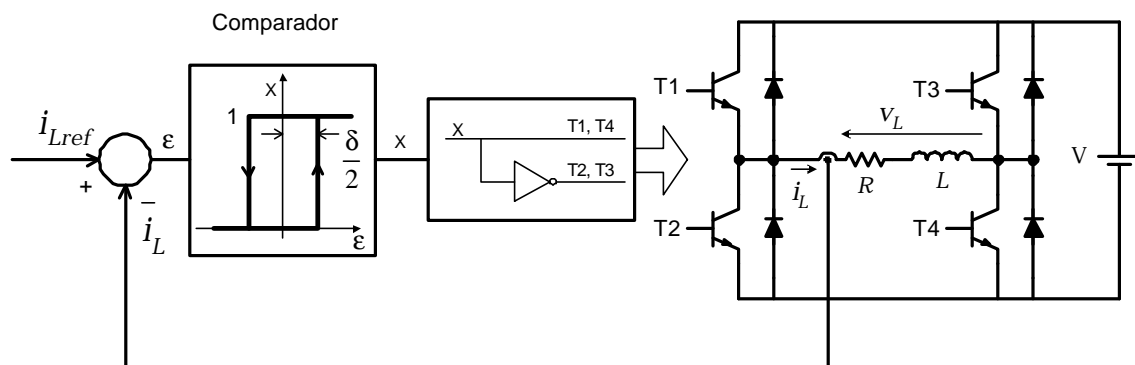


Fig. 9.12.: Control de corriente de 2 posiciones (Bang-Bang).

Estrategia de control:

Si $i_{Lref} > i_L \Rightarrow i_L$ debe aumentar

Si $\varepsilon = i_{Lref} - i_L > \delta/2$, $x = "1"$.

\Rightarrow T1 y T4 conducen y $v_L = V \Rightarrow i_L$ aumenta.

Si $i_{Lref} < i_L \Rightarrow i_L$ debe disminuir

Si $\varepsilon = i_{Lref} - i_L < -\delta/2$, $x = "0"$.

\Rightarrow T2 y T3 conducen y $v_L = -V \Rightarrow i_L$ disminuye.

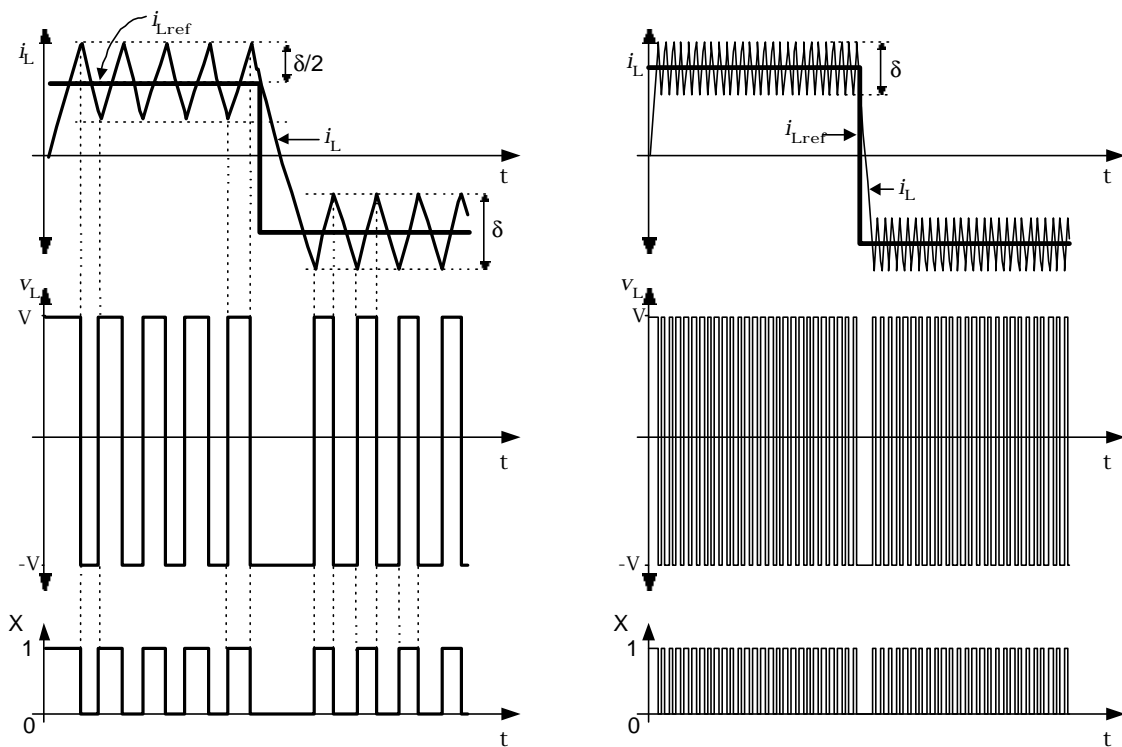


Fig. 9.13.: Formas de onda del control de corriente de 2 posiciones: **a)** histéresis ancha; **b)** histéresis angosta.

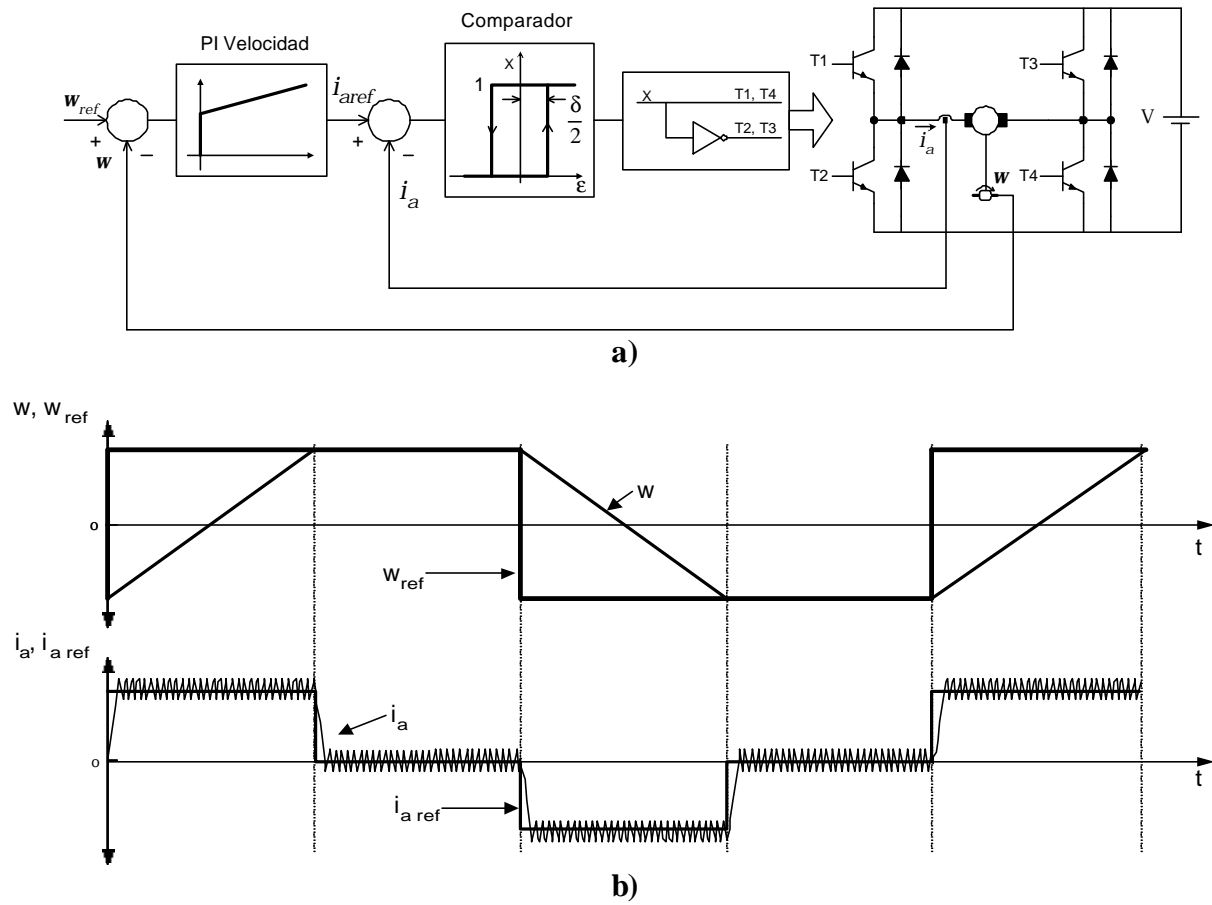


Fig. 9.14.: Máquina de C.C. alimentado por un chopper de 4 cuadrantes. Control de corriente con histéresis: a) diagrama de bloques; b) formas de onda durante inversión de marcha.

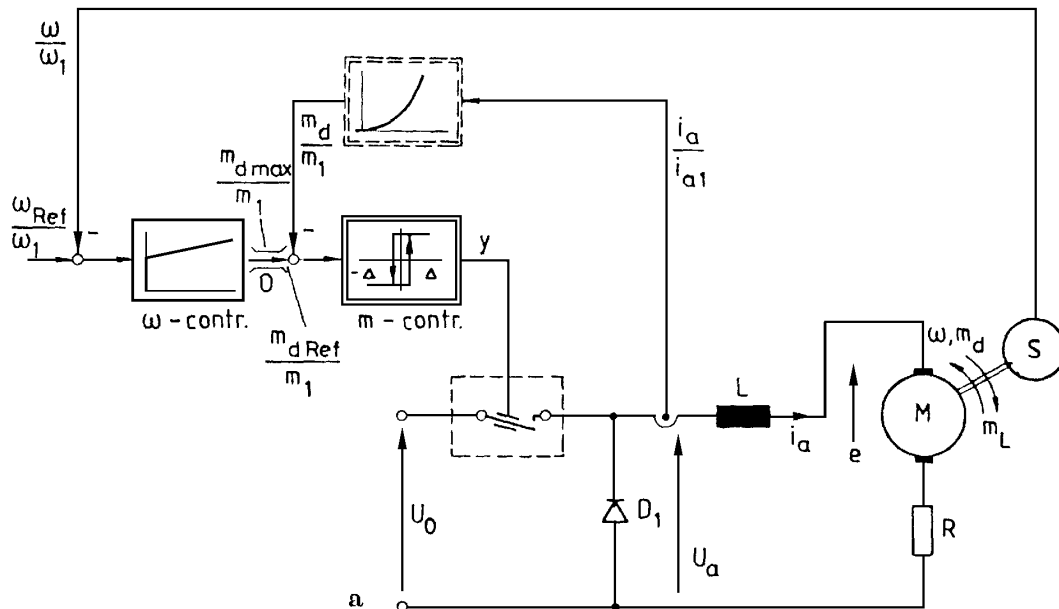


Fig. 9.15.: Motor de C.C. alimentado por un chopper de 1 cuadrante. Control de corriente con histéresis.

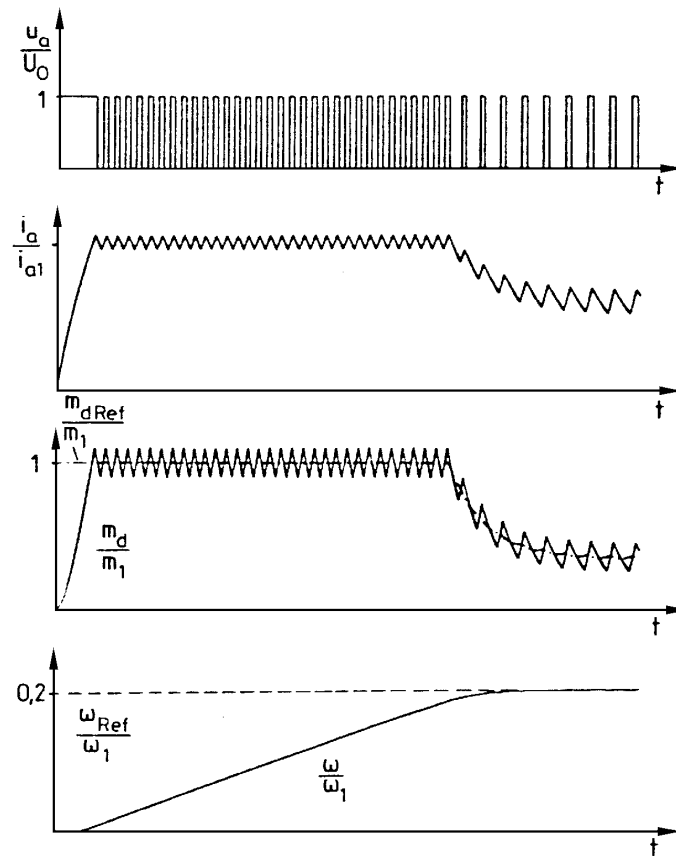


Fig. 9.16.: Arranque del motor de la figura 9.15.

9.2.2) Modulación del ancho de los pulsos (Pulse Width Modulation = PWM).

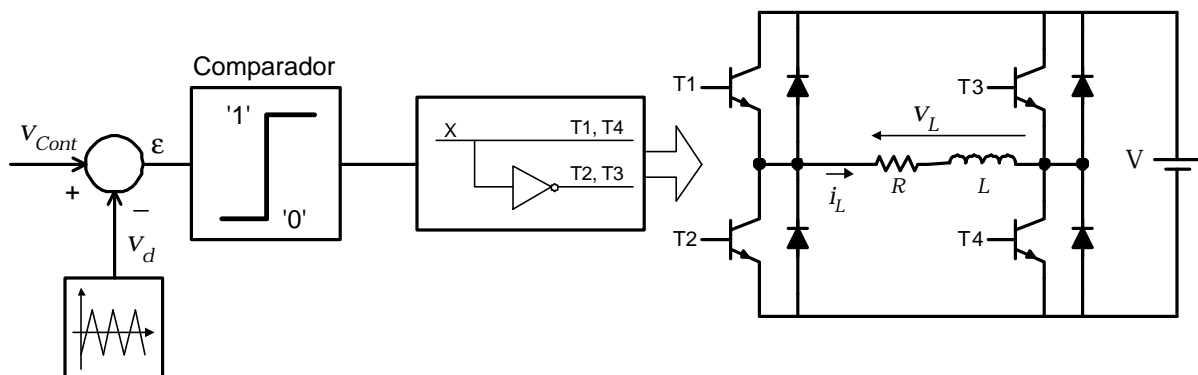


Fig. 9.17.: Chopper con control PWM.

Principio de funcionamiento:

Si $V_{\text{cont}} > V_d \Rightarrow x = "1"$.

\Rightarrow T1 y T4 conducen y $v_L = V$.

Si $V_{\text{cont}} < V_d \Rightarrow x = "0"$.

\Rightarrow T2 y T3 conducen y $v_L = -V$.

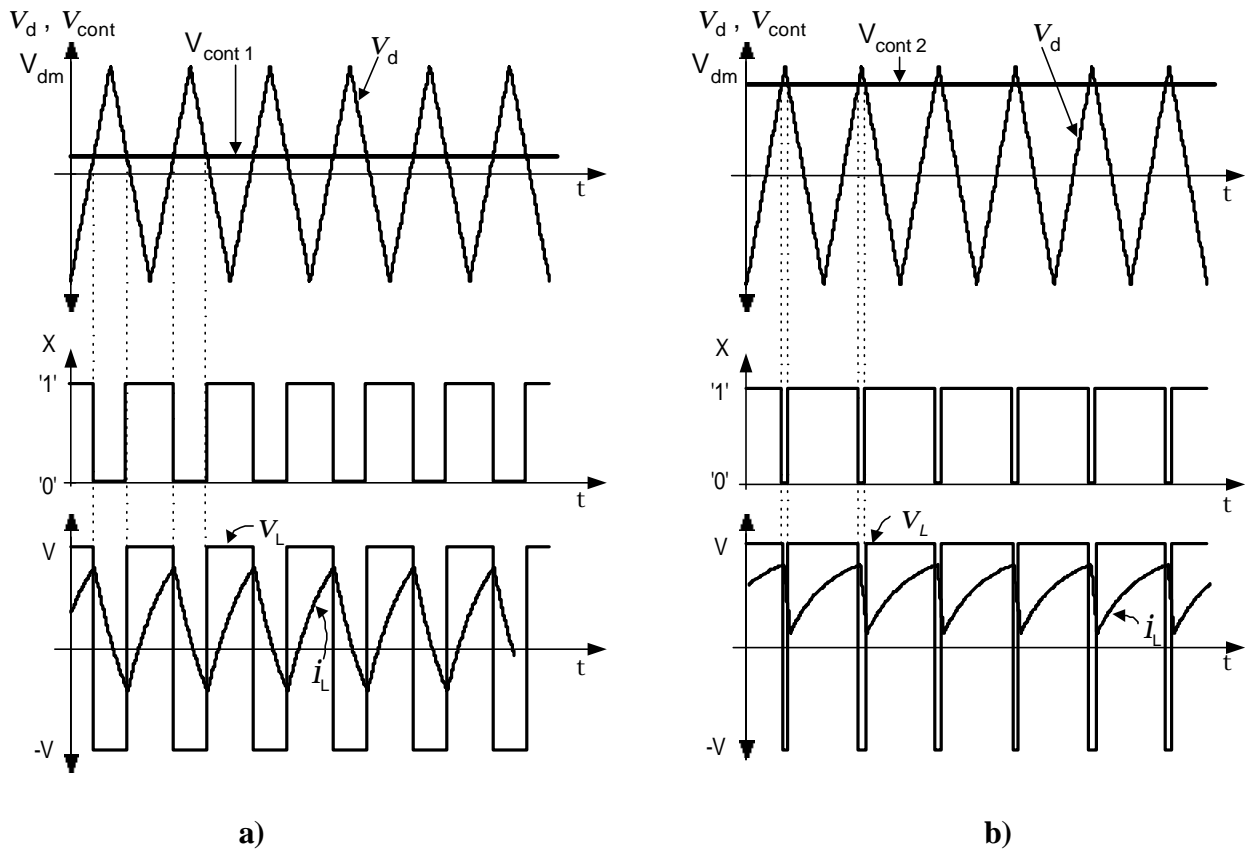


Fig. 9.18: Chopper con control PWM: **a)** $V_{\text{cont}1} > 0$; **b)** $V_{\text{cont}2} > V_{\text{cont}1}$.

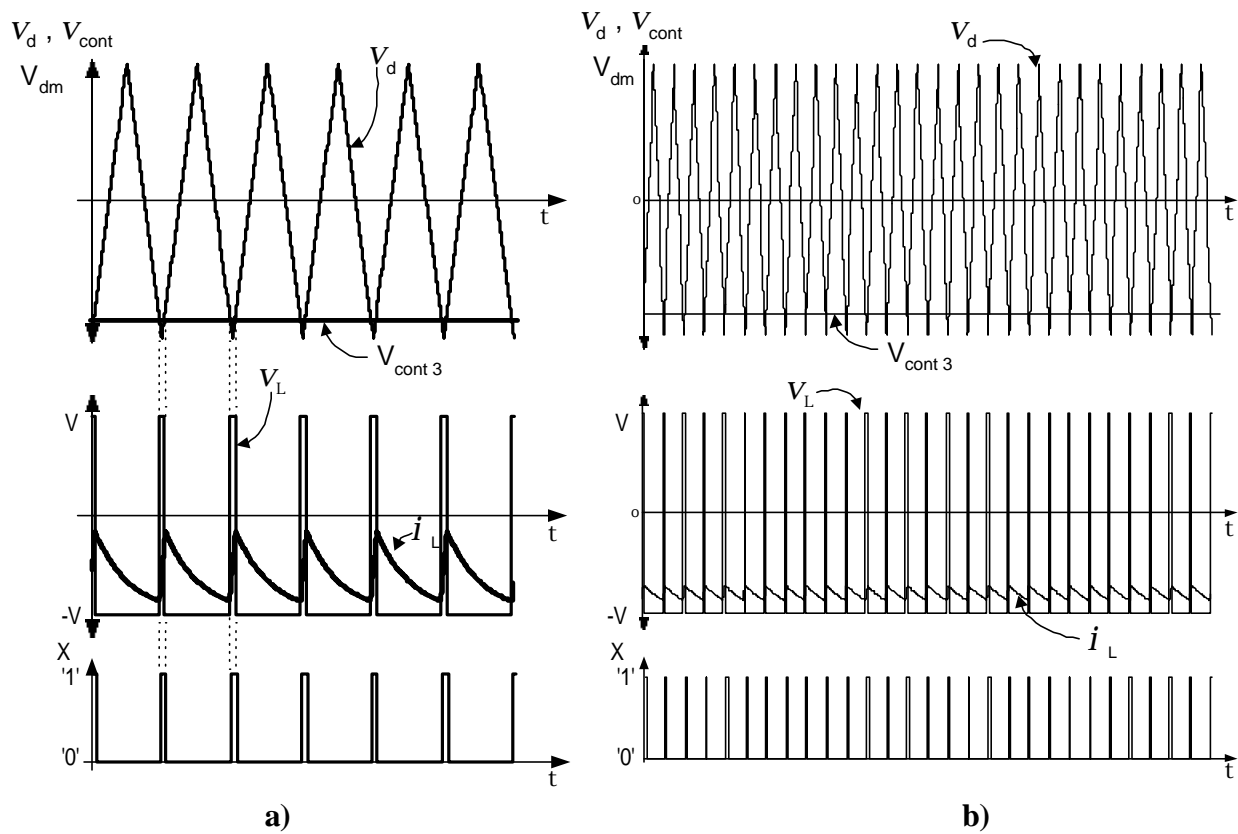


Fig. 9.19.: Chopper con control PWM: a) $V_{cont3} < 0$; b) Mayor frecuencia de conmutación.

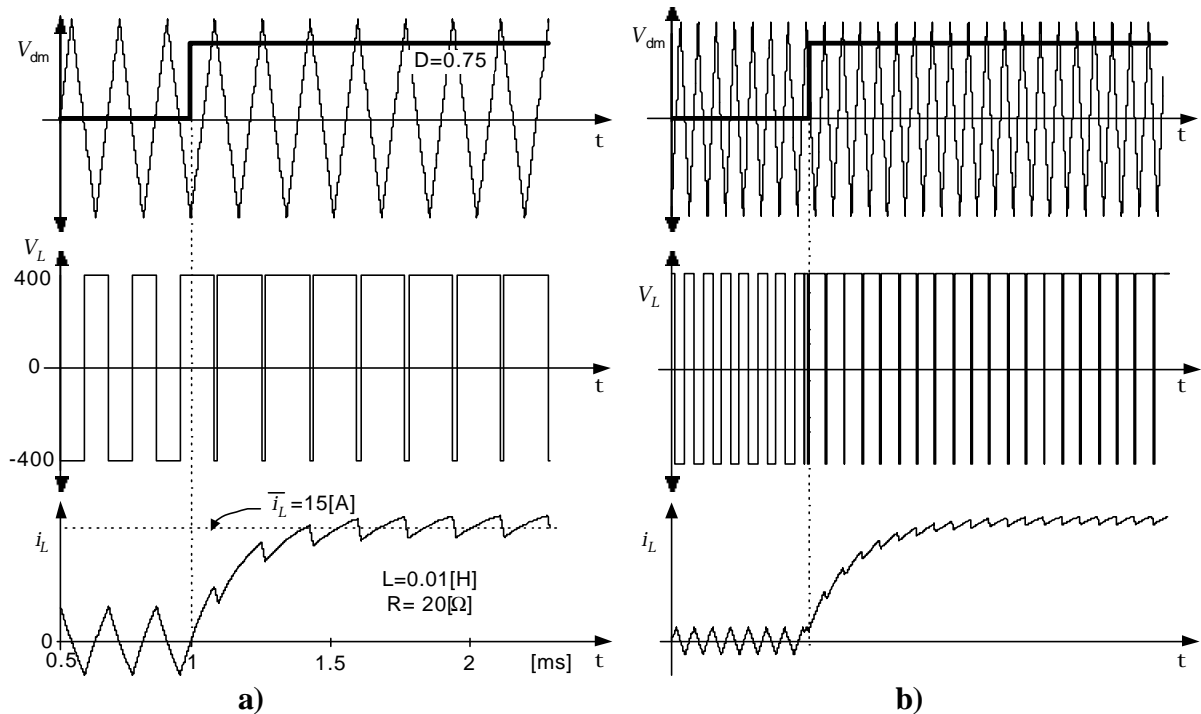


Fig. 9.20.: Respuesta a escalón de referencia del modulador PWM con frecuencia de conmutación: a) baja; b) más alta.

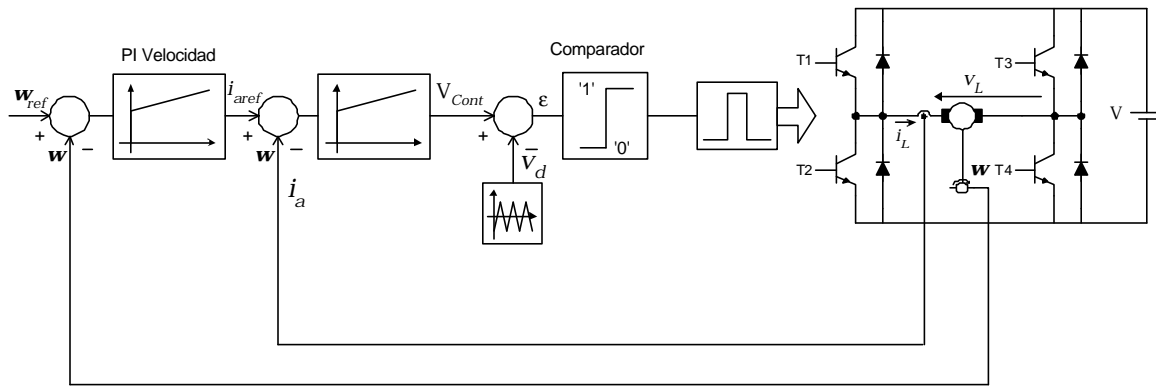


Fig. 9.21.: Control de velocidad de un motor C.C. alimentado por un chopper con control PWM.

9.3) CONTROL DE INVERSORES.

9.3.1) Inversor monofásico controlado por histéresis.

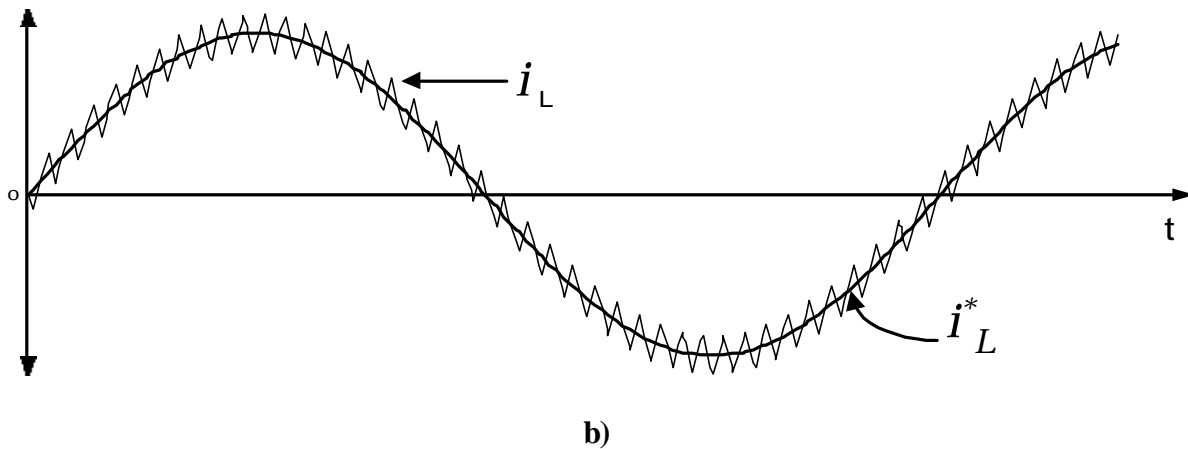
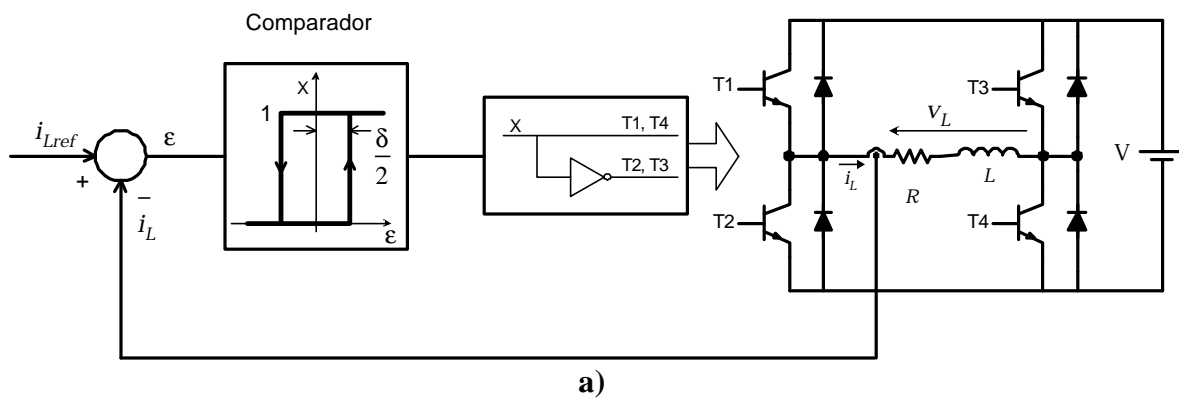


Fig. 9.22.: Inversor monofásico con control por histéresis: **a)** diagrama funcional; **b)** formas de onda.

9.3.2) Inversor monofásico con modulación PWM.

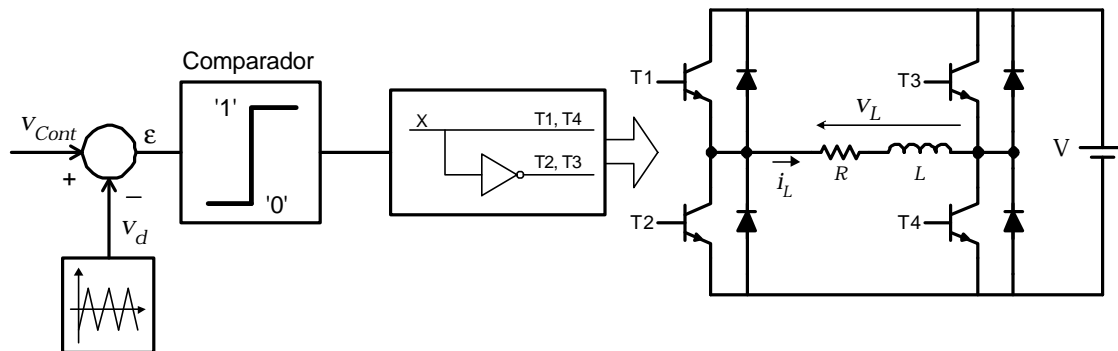


Fig. 9.23.: Inversor monofásico con modulación PWM.

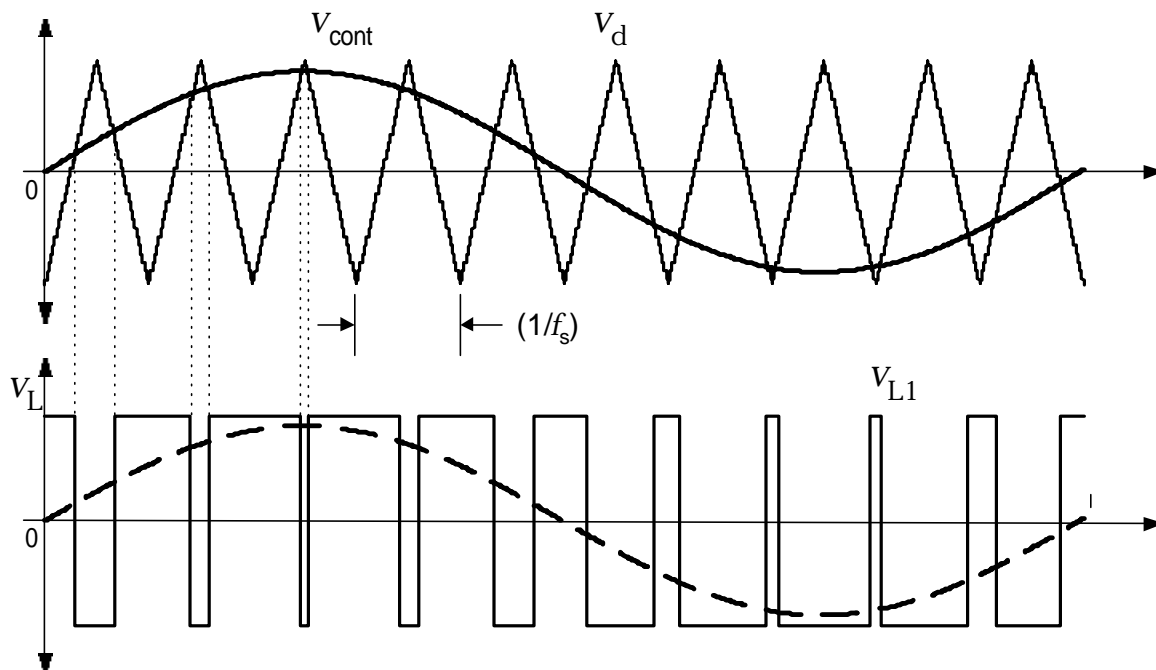
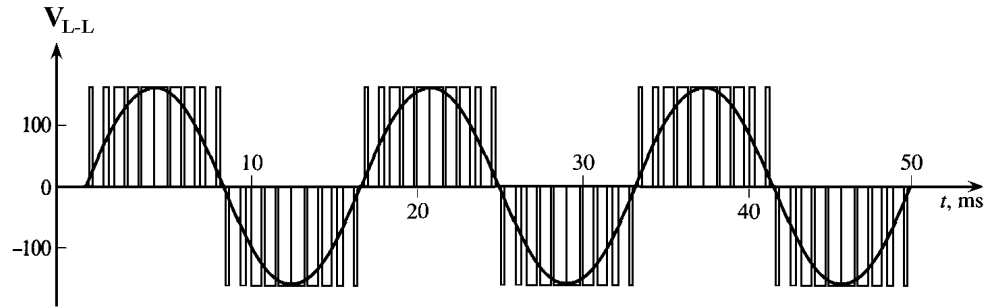
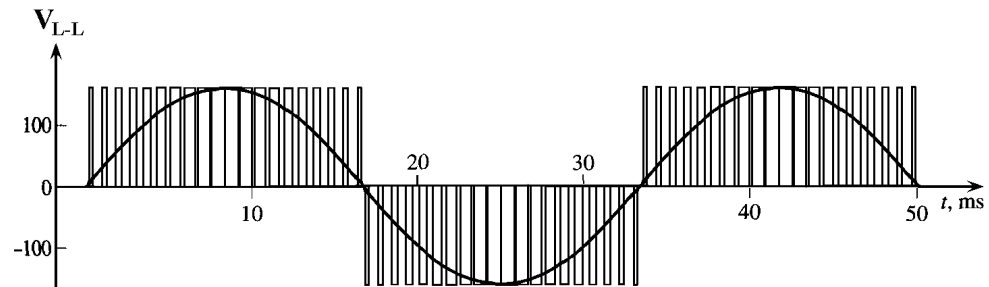


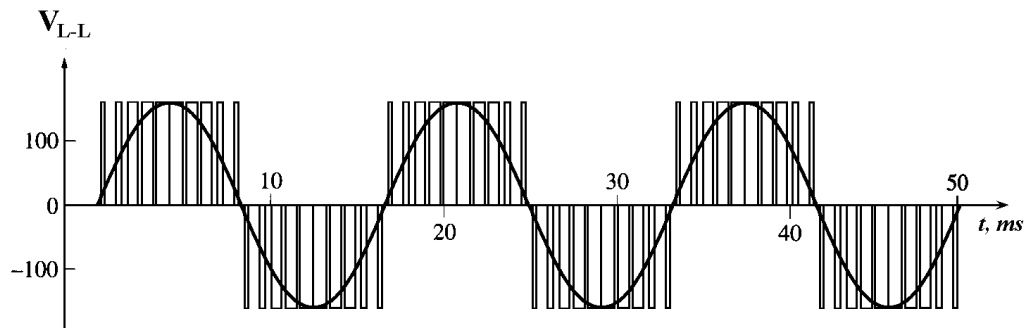
Fig. 9.24.: Formas de onda del inversor monofásico con modulación PWM de la figura 9.23.



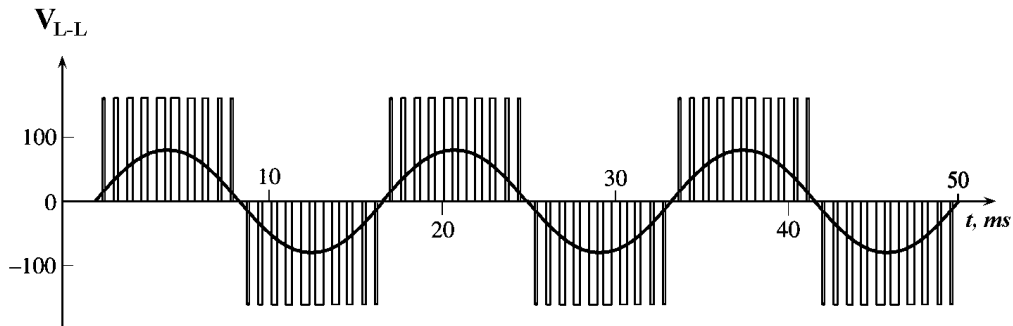
a)



b)

Fig. 9.25.: Variación de frecuencia con modulación PWM: a) 120 V- 60 Hz; 120 V- 30 Hz.

a)



b)

Fig. 9.26.: Variación de amplitud con modulación PWM: a) 120 V – 60 Hz; 60 V – 60 Hz.

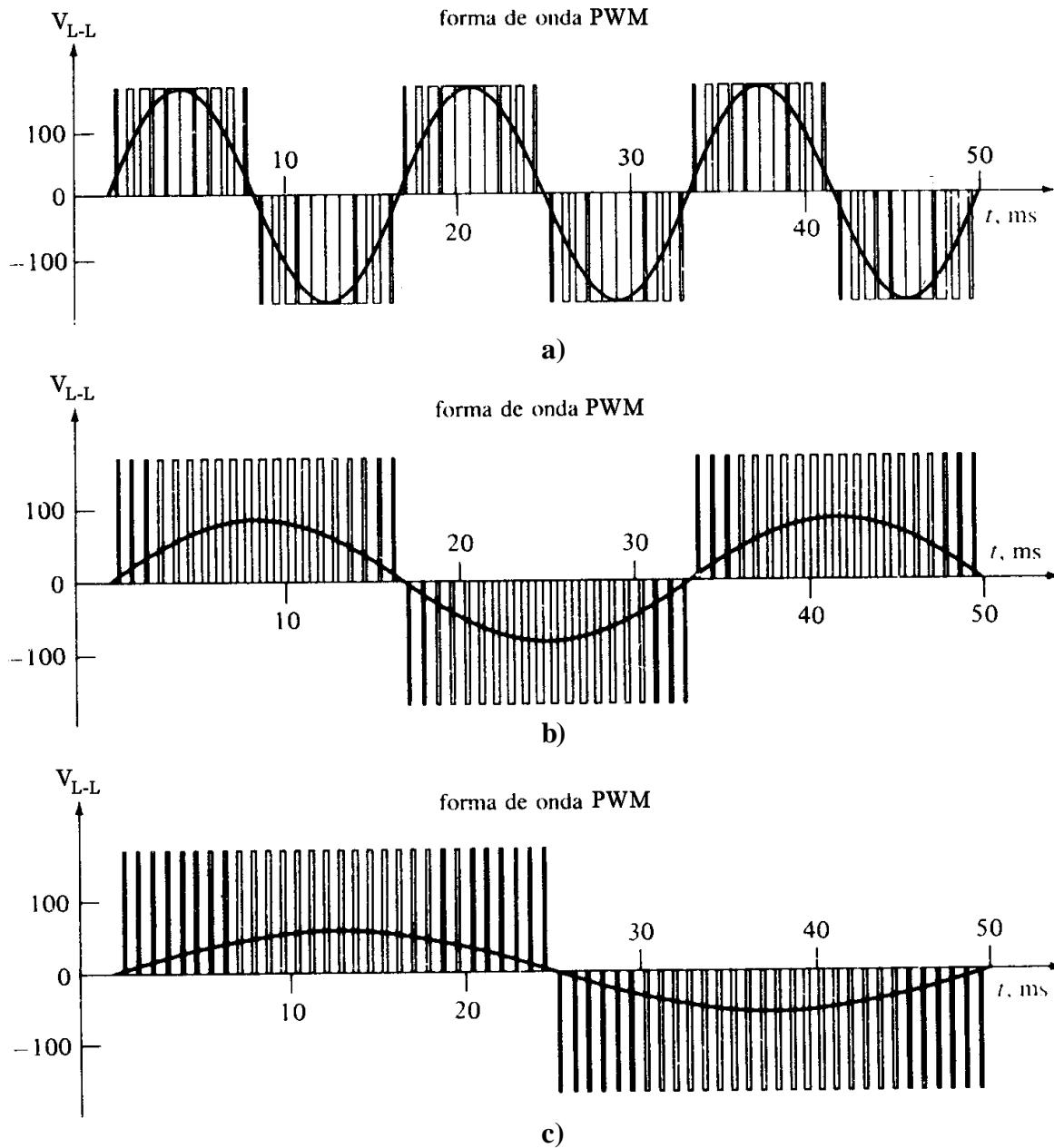
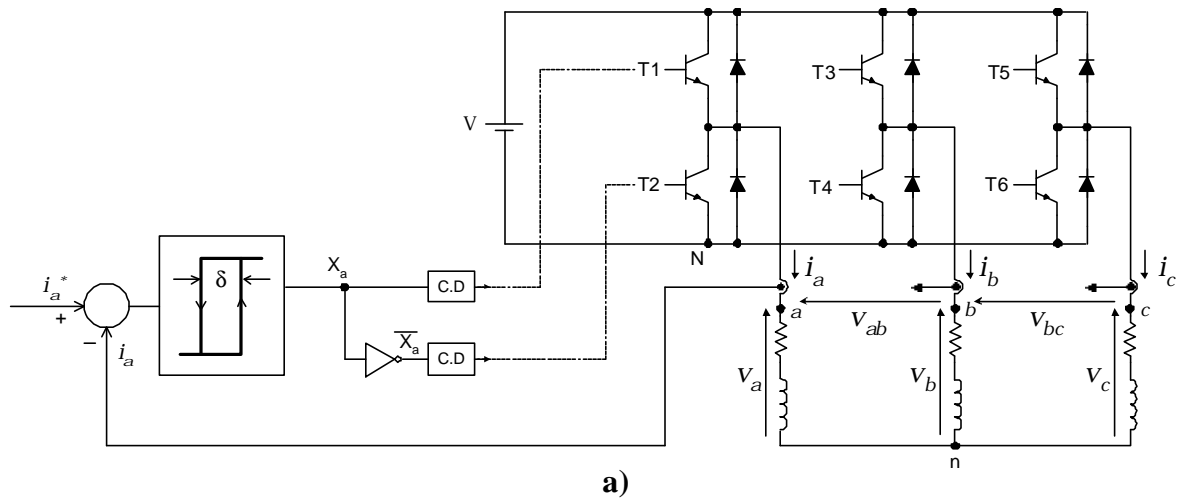


Fig. 9.27.: Variación de voltaje y frecuencia en un inversor monofásico con modulación PWM: a) 60 Hz – 120 V; b) 30 Hz – 60 V; c) 20 Hz – 40 V.

9.3.3) Inversor trifásico con control de corriente.



Nota: Las fases b y c tienen un control similar.

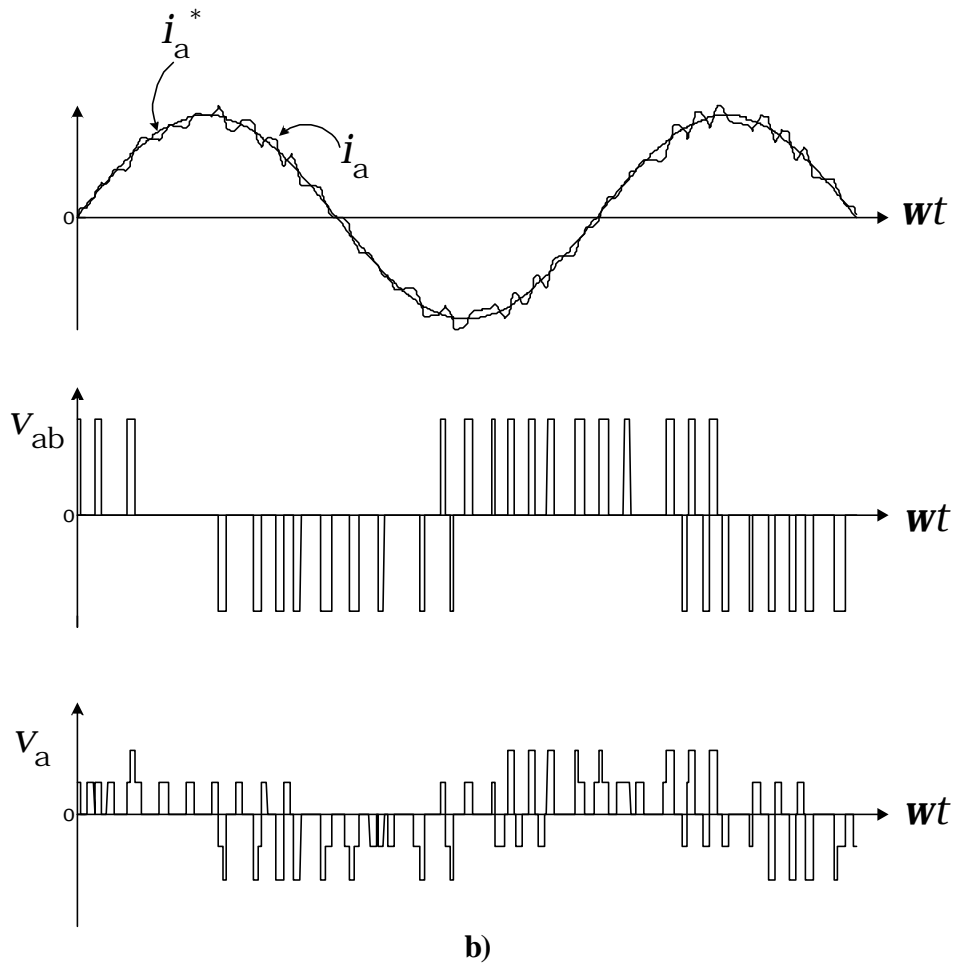
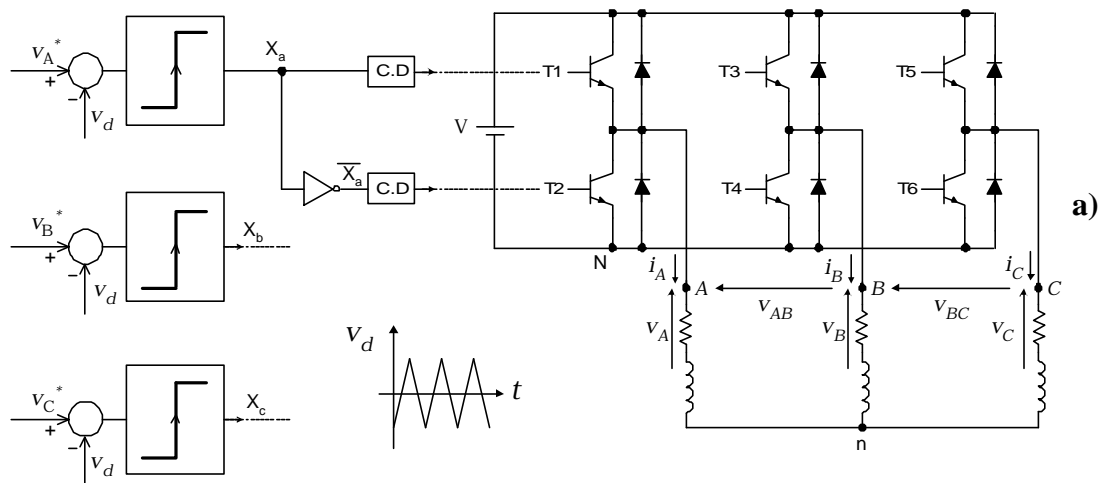


Fig. 9.28. Inversor trifásico con control de corriente por histéresis: **a)** circuito; **b)** formas de onda.

9.3.4) Inversor trifásico con modulación PWM.



Nota: Las fases b y c tienen un control similar.

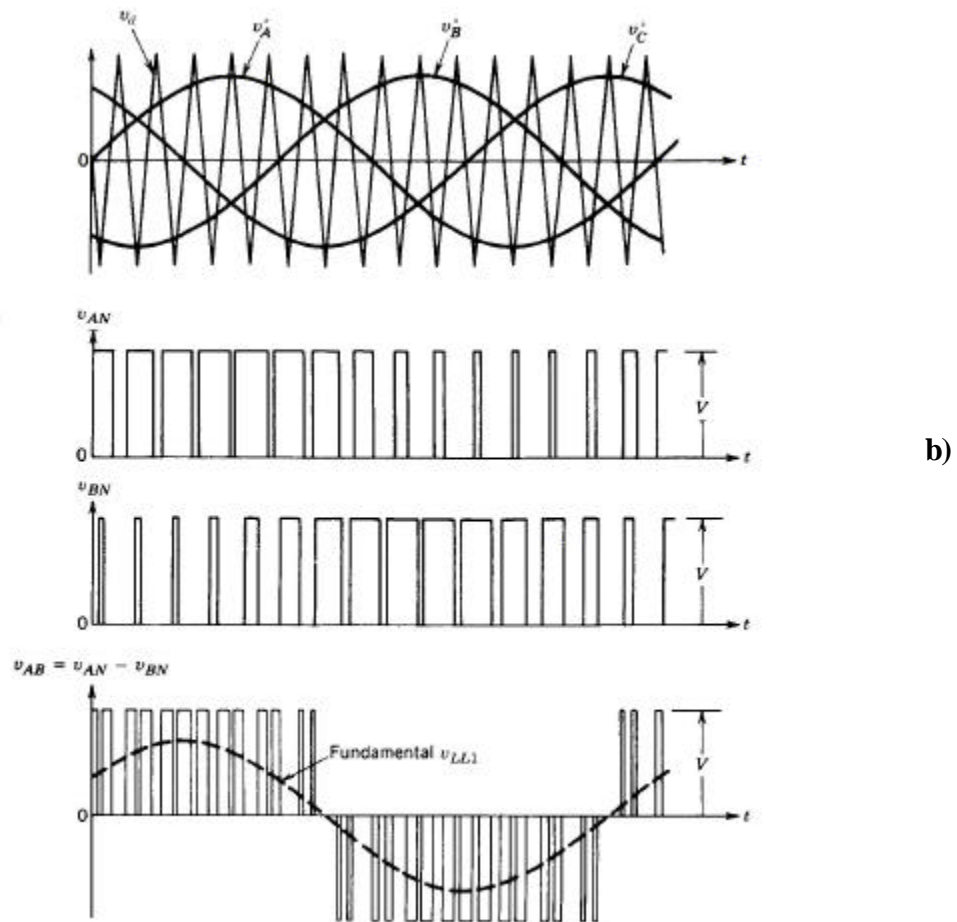


Fig. 9.29.: Inversor trifásico con modulación PWM: **a)** circuito; **b)** formas de onda.

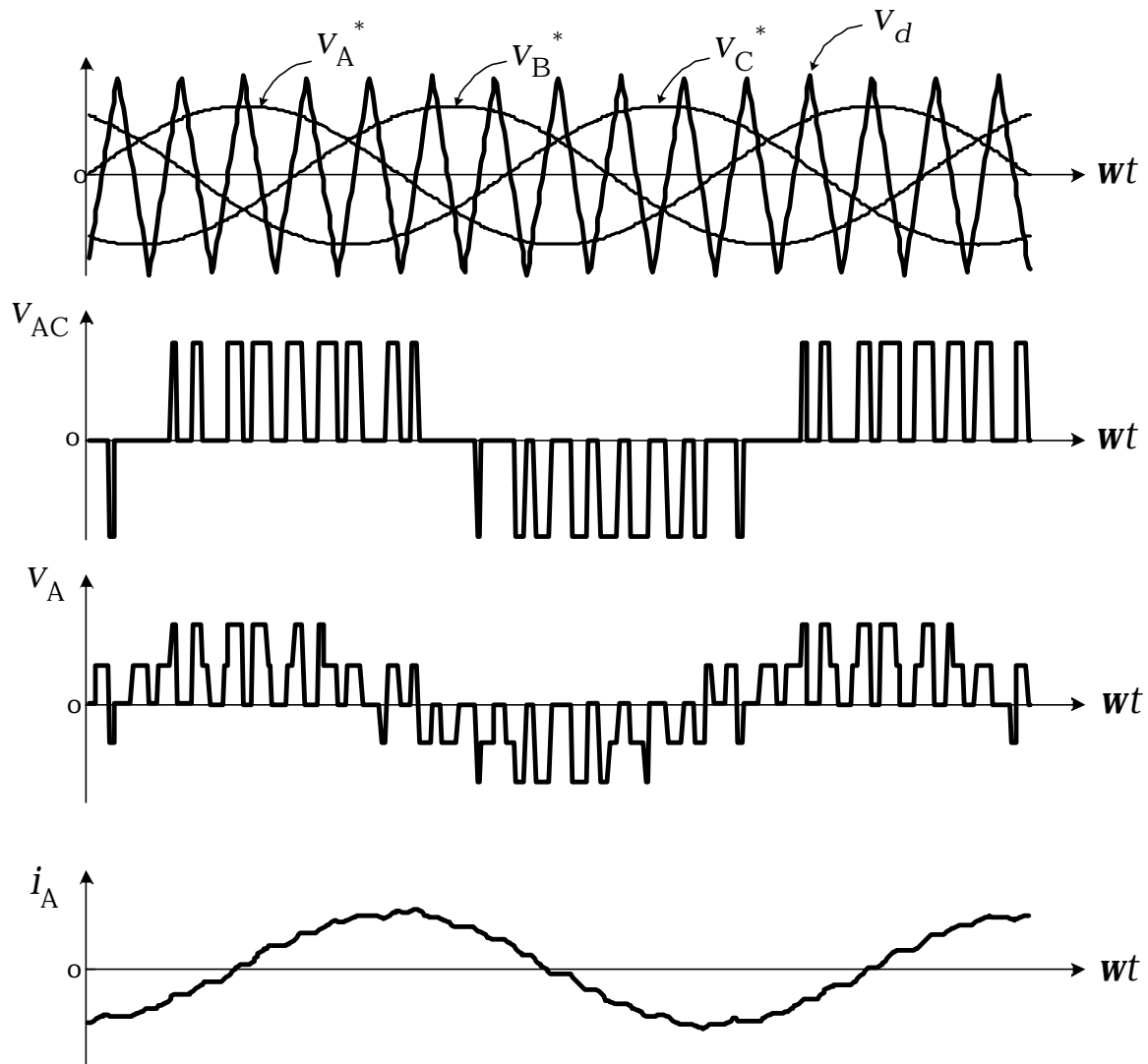


Fig. 9.30.: Inversor trifásico con modulación PWM, comportamiento de la corriente de carga.