

ELECTRÓNICA DE POTENCIA

Asignatura Obligatoria de 3º I. T. I. esp. Electricidad

CURSO 2011/2012

Profesor: Fernando Martínez Rodrigo

email: fer_mart@tele.uva.es

INDICE DEL MATERIAL

1. Introducción a la asignatura, 3
2. Exámenes de cursos anteriores, 7
3. Problemas propuestos (por temas), 22
4. Introducción al aprendizaje cooperativo, 29
5. Enunciados de prácticas, 30
6. Capítulo 1, 31
7. Capítulo 2
 - a. Apuntes, 32
 - b. Presentaciones, 43
 - c. Plantillas gráficas, 56
 - d. Organización del capítulo, 60
 - e. Problemas resueltos, 65
8. Capítulo 3
 - a. Apuntes, 71
 - b. Presentaciones, 76
 - c. Organización del capítulo, 93
 - d. Problemas resueltos, 94
9. Capítulo 4
 - a. Presentaciones, 97
 - b. Organización del capítulo y problemas resueltos, 105
10. Capítulo 5
 - a. Presentaciones, 108
 - b. Organización del capítulo y problemas resueltos, 118
11. Capítulo 6
 - a. Presentaciones, 119
 - b. Organización del capítulo y problemas resueltos, 125
 - c. Hojas de características, 127

PROGRAMA DE TEORÍA

CAPÍTULO 1: Introducción.

- 1.1. Tipos de convertidores electrónicos de potencia.
- 1.2. Semiconductores de potencia.

CAPÍTULO 2: Convertidores CA/CC.

- 2.1. Topologías fundamentales.
- 2.2. Convertidores con matriz general de conversión.
- 2.3. Convertidores con matriz de conversión ca/cc.
- 2.4. Convertidores en puente.
- 2.5. Fenómeno de conmutación.
- 2.6. Rectificadores con carga L-R-E.
- 2.7. Rectificadores de cuatro cuadrantes.

CAPÍTULO 3: Convertidores CC/CA.

- 3.1. Introducción.
- 3.2. Convertidores de pulso único por semiciclo.
- 3.3. Convertidores de pulso múltiple.
- 3.4. Filtro de salida.

3.5. Aplicaciones.

CAPÍTULO 4: EL tiristor.

- 4.1. Estructura.
- 4.2. Características estáticas.
- 4.3. Características de puerta.
- 4.4. Pérdidas de potencia.

CAPÍTULO 5: EL IGBT.

- 5.1. Estructura básica.
- 5.2. Características V-I.
- 5.3. Operación física del componente.
- 5.4. Conmutación del IGBT.
- 5.5. Pérdidas de potencia.

CAPÍTULO 6: Régimen térmico.

- 6.1. Régimen térmico permanente.
- 6.2. Régimen térmico transitorio.

PROGRAMACIÓN DE TEORÍA (LIBRO DE TEXTO)

CAPÍTULO 2 (CONVERTIDORES CA/CC): Referencia [1], pág. 80 a 88, pág. 237 a 255, pág. 257 a 260, pág. 264 a 281, pág. 288 a 293, pág. 300 a 302.

CAPÍTULO 3 (CONVERTIDORES CC/CA): Referencia [1], pág. 381 a 403.

CAPÍTULO 4 (EL TIRISTOR): Referencia [1], pág. 34 a 47.

CAPÍTULO 5 (EL IGBT): Referencia [3], pág. 626 a 632.

CAPÍTULO 6 (RÉGIMEN TÉRMICO): Referencia [2], pág. 179 a 183.

[1] S. Lorenzo Matilla, J.M. Ruiz González, A. Martín Miranda. Simulación, Control Digital y Diseño de *Convertidores Electrónicos de Potencia mediante PC*. Departamento de Tecnología Electrónica. Universidad de Valladolid.

[2] J.A. Gualda, S. Martínez, P.M. Martínez. *Electrónica Industrial: Técnicas de Potencia*. Editorial Marcombo. 1992.

[3] N. Mohan, T.M. Undeland. *Power Electronics*. Editorial John Wiley and Sons. 1995. (Referencia Biblioteca, A-6574)

CALIFICACIÓN

- Teoría 20 %, cuestiones/problemas 60 % y laboratorio 20 %.
- Teoría: dos temas elegidos de la lista de Objetivos Formativos Generales. El examen del primer tema se realiza en octubre o noviembre (la fecha se comunicará con tiempo suficiente) y su contenido serán los capítulos 1 a 3. El examen del segundo tema se realiza en el examen ordinario, y su contenido serán los capítulos 4 a 6.
- Prácticas: se realizará la evaluación en el laboratorio. El resultado de esta evaluación se utilizará para computar la nota de la convocatoria ordinaria y extraordinaria.

METODOLOGÍA: Aprendizaje Cooperativo

PRÁCTICAS: Grupos Oficiales: 1L (desde A hasta ...), 2L (desde ... hasta Z). Tener esto en cuenta a la hora de elegir grupo en otras asignaturas. Comienzo de las prácticas: lunes 17 de octubre. **No se convalidarán las prácticas realizadas en cursos anteriores, ni se guardará la nota para los siguientes.**

OBJETIVOS FORMATIVOS

OBJETIVOS FORMATIVOS GENERALES

- Los objetivos formativos generales constituyen una lista de lo que los estudiantes tienen que saber hacer en el examen.

Capítulo 1

- Saber componer una pregunta de teoría sobre tipos de convertidores electrónicos de potencia y sobre tipos de semiconductores de potencia.

Capítulo 2

- Saber componer una pregunta de teoría y resolver cuestiones sobre:
 - Topologías fundamentales de convertidores CA/CC: no controlados, controlados y semicontrolados
 - Convertidores con matriz de conversión CA/CC
 - Convertidores CA/CC en puente
 - Rectificadores de cuatro cuadrantes
 - Rectificadores con carga RLE
- Saber resolver problemas sobre:
 - Forma de onda de tensiones y corrientes de diferentes tipos de rectificadores no controlados, controlados o semicontrolados
 - Identificación de cuál es el semiconductor que conduce en cada intervalo temporal de funcionamiento de un rectificador
 - Cálculo de las siguientes variables: tensión media de salida, armónicos de la tensión de salida, corriente media de los semiconductores, corriente eficaz de los semiconductores, corriente media del transformador, corriente eficaz del transformador, tensión máxima en los semiconductores
 - Determinación del tipo de carga en rectificadores con carga RLE, a partir de las formas de onda

Capítulo 3

- Saber componer una pregunta de teoría y resolver cuestiones sobre:
 - Topologías de inversores
 - Control de la tensión de salida de inversores
 - Inversores de pulso único por semiciclo: montaje semipuerto, montaje monofásico en puente, montaje trifásico
 - Inversores de pulso múltiple por semiciclo con control PWM senoidal: montaje semipuerto, montaje monofásico en puente
 - Filtro de la tensión de salida
- Saber resolver problemas sobre:
 - Cálculo del armónico fundamental y los armónicos sucesivos en inversores de pulso único por semiciclo
 - Cálculo del armónico fundamental en inversores de pulso múltiple por semiciclo
 - Diseño del filtro de salida

Capítulo 4

- Saber componer una pregunta de teoría y resolver cuestiones de tiristores sobre:
 - Estructura y funcionamiento básico
 - Características estáticas (tensión – corriente)
 - Características de puerta
 - Pérdidas de potencia
- Saber resolver problemas sobre:
 - Condiciones de disparo
 - Cálculo de potencia disipada

Capítulo 5

- Saber componer una pregunta de teoría y resolver cuestiones de IGBTs sobre:
 - Características V-I
 - Operación física del componente

- Conmutación del IGBT
- Pérdidas de potencia
- Saber resolver problemas sobre:
 - Cálculo del punto de trabajo
 - Cálculo de las pérdidas de potencia

Capítulo 6

- Saber componer una pregunta de teoría y resolver cuestiones sobre Régimen Térmico (permanente y transitorio)
- Saber resolver problemas sobre:
 - Régimen térmico permanente
 - Régimen térmico transitorio

OBJETIVOS FORMATIVOS ESPECÍFICOS

- Los objetivos formativos específicos son una lista de adquisiciones muy concretas que deben realizar los alumnos. Indican lo que el profesor espera que el alumno sea capaz de hacer cuando termine de cursar la asignatura.
- Estos objetivos no son una lista cerrada, pero indican la mayor parte de las adquisiciones que debe realizar el estudiante.

Capítulo 2

- Determinar el ángulo de disparo y el tipo de rectificador a partir de la gráfica de la tensión de salida de un rectificador.
- Determinar el tipo de carga de un rectificador (R, L y/o E) a partir de las gráficas de tensión y/o corriente.
- Calcular el valor medio de la tensión de salida en rectificadores con carga resistiva o inductiva.
- Calcular el valor de los armónicos de la tensión de salida en rectificadores con conducción continua.
- Calcular el valor medio de la corriente en los semiconductores y en el transformador de un rectificador con carga resistiva o inductiva.
- Calcular el valor eficaz de la corriente en el transformador de un rectificador con carga resistiva o inductiva.
- Calcular el valor máximo de la tensión que tiene que soportar un semiconductor en un rectificador controlado o no controlado.
- Determinar la forma de onda de la tensión en un semiconductor de un rectificador no controlado o controlado.
- Explicar las gráficas de las tensiones o de las corrientes de un rectificador con carga RLE.
- Diseñar un rectificador para que realice una función dada. En el examen se indicará cómo es la tensión de entrada disponible y se pedirá que se diseñe un rectificador para que cumpla unas especificaciones.

Capítulo 3

- Calcular el valor del armónico fundamental y de los armónicos sucesivos en inversores de pulso único por semiciclo.
- Calcular el valor del armónico fundamental en inversores con modulación de anchura de pulsos.
- Determinar qué semiconductor conduce en cada instante en un inversor, en función de la corriente y la tensión de salida.
- Obtener las fórmulas de cálculo de la tensión de salida y sus armónicos, en un inversor.
- Indicar la influencia que tienen sobre la forma de onda de la tensión de salida, los ángulos de desfase de portadoras y moduladoras en un inversor en puente monofásico.
- Determinar qué tipo de inversor es el más adecuado para una aplicación dada y explicar los criterios utilizados.

Capítulo 4

- Interpretar las curvas estáticas del tiristor.
- Calcular la potencia disipada por un tiristor montado en un rectificador con carga resistiva o inductiva.
- Calcular la recta de carga del circuito de puerta de un tiristor y relacionarla con las curvas de disparo.

Capítulo 5

- Calcular las pérdidas de potencia en un IGBT en conducción y en conmutación.
- Responder cuestiones sobre el funcionamiento básico de un IGBT.
- Calcular el punto de trabajo de un IGBT.

Capítulo 6

- Calcular la tensión en la unión de un semiconductor en régimen estacionario y en régimen permanente.

Laboratorio

- Saber realizar montajes de rectificadores e inversores en laboratorio, utilizando los medios disponibles en el mismo.
- Saber realizar medidas con el osciloscopio y el polímetro (tensiones y corrientes, en alterna y continua) sobre los montajes de rectificadores e inversores.

REPARTO DEL TIEMPO PRESENCIAL Y FUERA DE CLASE DEL ESTUDIANTE

TEMA	Actividad presencial	Horas en clase	Total clase	Actividad no presencial	Horas fuera de clase	Total fuera de clase	Total por tema
	Presentación asignat.	1					
1	Introducción	1	2			0	2
2	Clase expositiva	3		Estudio	9		
	Apr. cooperativo puzzle	5		Trabajo en grupo	3		
	Apr. coop. laboratorio	8	16	Prep. exam. lab.	3	15	31
3	Clase expositiva	4		Estudio	8		
	Apr. cooperativo puzzle	3		Trabajo en grupo	3		
	Apr. coop. laboratorio	6	13	Prep. exam. lab.	3	14	27
4	Clase expositiva	4		Estudio	4		
	Apr. cooperativo puzzle	1	5	Trabajo en grupo	2	6	11
5	Clase expositiva	3		Estudio	4		
	Apr. cooperativo puzzle	2	5	Trabajo en grupo	2	6	11
6	Clase expositiva	2		Estudio	3		
	Apr. cooperativo puzzle	2	4	Trabajo en grupo	1	4	8
TOTAL		45	45		45	45	90

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

Electrónica de Potencia

3º I.T.I. Esp. Electricidad

Fecha: 29/01/09
Aula SA4 - 17:00h

1	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input checked="" type="checkbox"/>	10	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
2	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input checked="" type="checkbox"/>	11	<input type="checkbox"/> A	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D	12	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> D
4	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input checked="" type="checkbox"/>	13	<input type="checkbox"/> A	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D	14	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> D
6	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> D	15	<input type="checkbox"/> A	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
7	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> D	16	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
8	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> D	17	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> D
9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D					

CORREC. INCOR. SIN RESP. NOTA TEST

NOTA TEORÍA

INSTRUCCIONES:

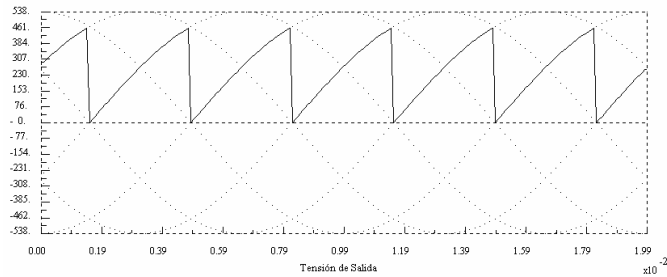
- Las respuestas se indicarán marcando con una **X** la casilla correspondiente. Para invalidar una casilla y elegir otra respuesta, se rodeará con un círculo la opción no válida y se marcará con una nueva **X** el cuadro correcto. Cada pregunta tiene una única respuesta, si se señala más de una se considerará nula.
- Las respuestas acertadas suman un punto, las incorrectas se calificarán con - 1/3 y las no contestadas ni suman ni restan.

APELLIDOS Y NOMBRE:	FIRMA:

- Sea un rectificador en puente trifásico controlado, que se alimenta desde una red trifásica de 400V eficaces de línea y 50Hz. Se conecta a la salida una carga altamente inductiva que consume una corriente prácticamente constante de 40A. Calcular el valor del ángulo de disparo necesario para que la tensión de salida sea de 250V.
 - 32,43°
 - 42,43°
 - 52,43°
 - 62,43°

2. La gráfica siguiente corresponde a un rectificador en puente trifásico, indicar el valor del ángulo de disparo.

- a) 60°
- b) 180°
- c) 240°
- d) 300°



3. Un rectificador trifásico en puente controlado se alimenta con una tensión eficaz fase-fase de 380 V. La carga es una fuente de corriente constante de 500 A. Si la frecuencia de entrada del rectificador es de 50 Hz, calcular la amplitud del armónico de 450 Hz cuando el ángulo de disparo es de 30° .

- a) 0 V
- b) 75,34 V
- c) 85,34 V
- d) 95,34 V

4. En el rectificador anterior, calcular el máximo valor de la tensión en los tiristores.

- a) 220 V
- b) 311,1 V
- c) 380 V
- d) 537,4 V

5. Un rectificador trifásico en puente controlado se alimenta con una tensión eficaz fase-fase de 380 V. La carga es una resistencia de 10Ω . Calcular el valor medio de la tensión de salida cuando el ángulo de disparo es 100° .

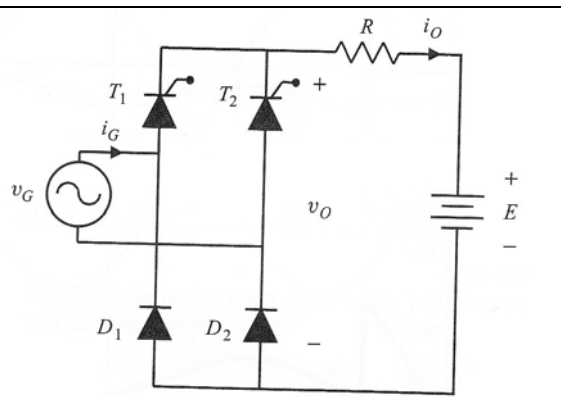
- a) 30,95 V
- b) 37,95 V
- c) 42,95 V
- d) 49,95 V

6. En el rectificador anterior, calcular el valor eficaz de la corriente de cada fase del transformador.

- a) 4,044 A
- b) 4,544 A
- c) 5,044 A
- d) 5,544 A

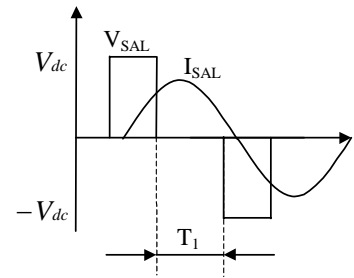
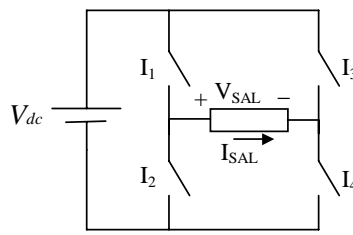
7. La figura muestra un rectificador semicontrolado que alimenta una carga RE a partir de una tensión v_G de 220V eficaces. Los semiconductores se consideran ideales y los valores de la carga son: $R=8\Omega$, $E=100V$. Calcular el valor medio de la tensión de salida v_O , cuando el ángulo de disparo de los tiristores es de 90° .

- a) 124,19 V
- b) 139,19 V
- c) 154,19 V
- d) 169,19 V



8. En el inversor de la figura, indicar cuáles son los semiconductores que conducen durante el tiempo T_1 .

- a) Transistor1-Transistor4
 b) Diodo2-Diodo3
 c) Transistor1-Diodo3
 d) Transistor2-Diodo4



9. Un inversor monofásico semipunte está alimentado con una tensión de 100V en cada semibatería. Calcular el **valor eficaz** del armónico fundamental de la tensión de salida cuando se controla mediante pulso único por semiciclo.

- a) 90,03 V
 b) 127,32 V
 c) 180,06 V
 d) 254,64 V

10. Un inversor monofásico semipunte está alimentado con una tensión de 100V en cada semibatería. Calcular el **valor eficaz** del quinto armónico de la tensión de salida cuando se controla mediante pulso único por semiciclo.

- a) 18,01 V
 b) 25,46 V
 c) 36,02 V
 d) 50,92 V

11. Sea un inversor trifásico con modulación PWM. La tensión de cada semibatería es $V_{DC}/2 = 100$ V y el índice de modulación es $x = 0,6$. Calcular la **amplitud** del primer armónico de la tensión fase-fase.

- a) 60 V
 b) 103,9 V
 c) 120 V
 d) 207,8 V

12. Sea un inversor monofásico semipunte, controlado mediante modulación senoidal de pulsos. Indicar cuál es la expresión de la tensión de salida.

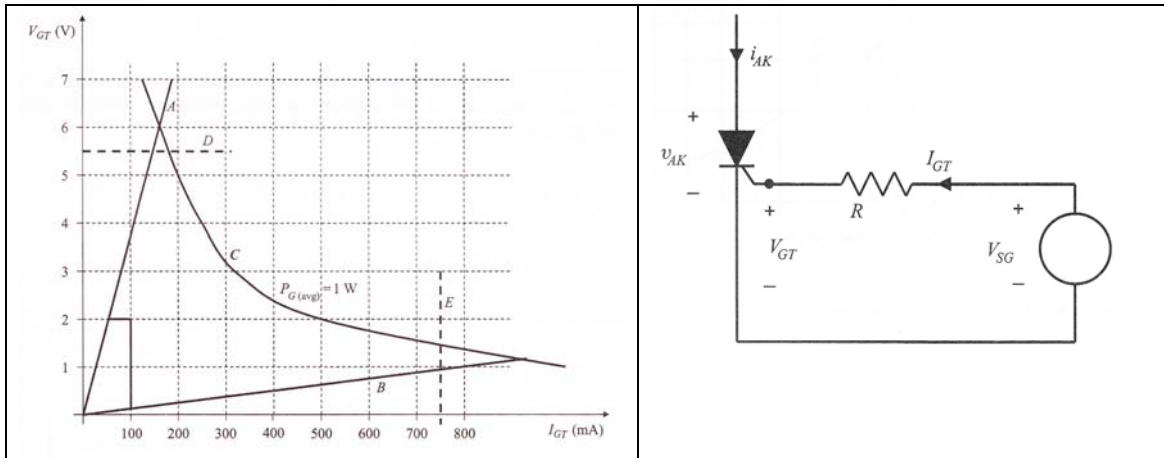
a)
$$V_{SAL} = \frac{4V_{dc}}{\pi} \sum_{n=1, \text{impar}}^{\infty} \frac{\text{sen} \frac{n\pi}{2}}{n} \cos n\omega t$$

b)
$$V_{SAL} = \frac{2V_{dc}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen} \frac{n\pi}{2}}{n} \cos n\omega t$$

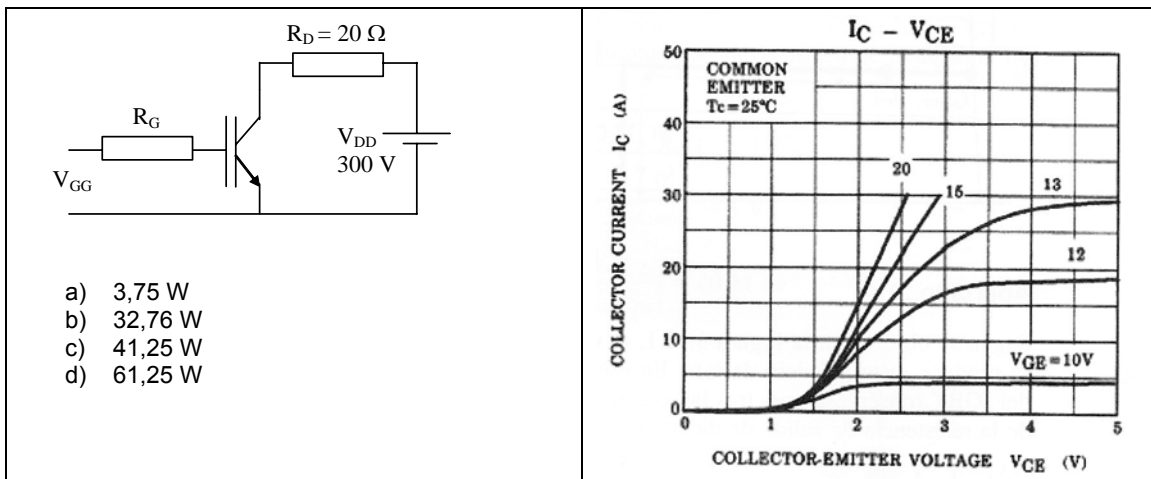
c)
$$V_{SAL} = \frac{xV_{dc}}{2} \cos \omega t + \frac{2V_{dc}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen} \frac{n\pi}{2} (1 + x \cos \omega t)}{n} \cos n\omega t$$

d)
$$V_{SAL} = xV_{dc} \cos \omega t + \frac{2V_{dc}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\text{sen} \frac{n\pi}{2} (1 + x \cos \omega t)}{n} \cos n\omega t - \frac{\text{sen} \frac{n\pi}{2} (1 - x \cos \omega t)}{n} \cos [n(\omega t + \phi_2)] \right]$$

13. En la figura se representan las curvas características que delimitan la zona de disparo seguro del tiristor representado en la figura. Si la fuente de tensión continua V_{SG} puede tomar valores entre 6V y 7V, ¿qué rango de valores puede tomar la resistencia R?



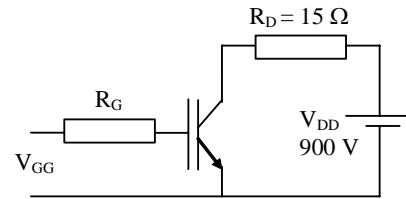
- a) $9,52\Omega - 40\Omega$
 b) $12,73\Omega - 40\Omega$
 c) $9,52\Omega - 51,85\Omega$
 d) $12,73\Omega - 51,85\Omega$
14. Sea un rectificador bifásico simple controlado, con tensión fase-neutro de 110 V eficaces. Calcular la potencia disipada en cada tiristor cuando la carga es una resistencia de 15Ω y el ángulo de disparo es 60° . Datos del tiristor: $V_{umbral} = 1,1\text{ V}$, $r_{dinámica} = 20\text{ m}\Omega$.
- a) 2,156 W
 b) 2,656 W
 c) 3,156 W
 d) 3,656 W
15. Calcular la potencia que disipa el IGBT de la figura, sabiendo que la tensión puerta emisor V_{GE} es de 15V.



- a) 3,75 W
 b) 32,76 W
 c) 41,25 W
 d) 61,25 W

16. Calcular la potencia disipada por el IGBT de la figura. Datos: $f = 2 \text{ kHz}$, $V_{DS(SAT)} = 1.2 \text{ V}$, ciclo de servicio = $t_{on}/T = 0.2$, $t_r = 450 \text{ ns}$, $t_f = 950 \text{ ns}$, $t_{d(on)} = 450 \text{ ns}$, $t_{d(off)} = 700 \text{ ns}$, $R_D = 15 \Omega$, $V_{DD} = 900 \text{ V}$.

- a) 39,58 W
- b) 46,58 W
- c) 53,58 W
- d) 60,58 W



17. Un tiristor montado sobre un radiador presenta la impedancia térmica transitoria de la figura. Desde $t = 0$ hasta $t = 160 \text{ s}$, el tiristor disipa 700 W . A partir de ese momento pasa a disipar 0 W . Si la temperatura ambiente es de $40 \text{ }^\circ\text{C}$, calcular la temperatura en la unión cuando han transcurrido 200 segundos .

- a) $70 \text{ }^\circ\text{C}$
- b) $76 \text{ }^\circ\text{C}$
- c) $82 \text{ }^\circ\text{C}$
- d) $88 \text{ }^\circ\text{C}$

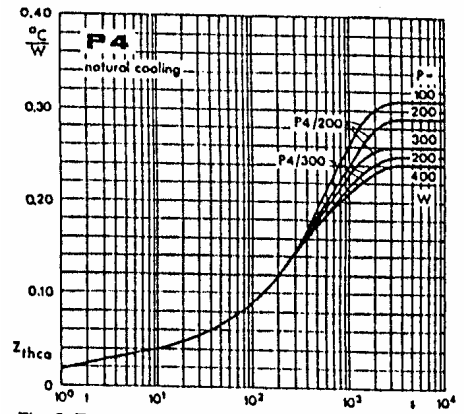


Fig. 9 Transient thermal impedance vs. time

TEORÍA 2. Régimen Térmico Permanente y Transitorio.

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

Electrónica de Potencia

3º I.T.I. Esp. Electricidad

Fecha: 02/02/10
Aula PA3 - 10:00h

1	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input checked="" type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D	10	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input checked="" type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
2	<input type="checkbox"/> A	<input checked="" type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D	11	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input checked="" type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
3	<input checked="" type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D	12	<input checked="" type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
4	<input type="checkbox"/> A	<input checked="" type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D	13	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input checked="" type="checkbox"/> D
5	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input checked="" type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D	14	<input type="checkbox"/> A	<input checked="" type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
6	<input type="checkbox"/> A	<input checked="" type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D	15	<input type="checkbox"/> A	<input checked="" type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
7	<input type="checkbox"/> A	<input checked="" type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D	16	<input checked="" type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
8	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input checked="" type="checkbox"/> D	17	<input checked="" type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
9	<input type="checkbox"/> A	<input checked="" type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D					

CORREC. INCOR. SIN RESP. NOTA TEST

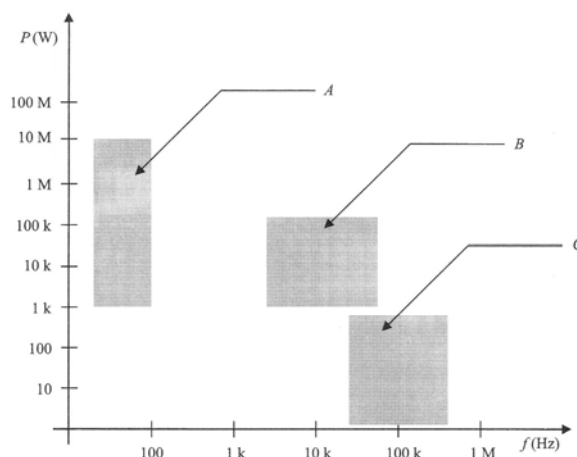
NOTA TEORÍA

INSTRUCCIONES:

- Las respuestas se indicarán marcando con una **X** la casilla correspondiente. Para invalidar una casilla y elegir otra respuesta, se rodeará con un círculo la opción no válida y se marcará con una nueva **X** el cuadro correcto. Cada pregunta tiene una única respuesta, si se señala más de una se considerará nula.
- Las respuestas acertadas suman un punto, las incorrectas se calificarán con - 1/3 y las no contestadas ni suman ni restan.

APELLIDOS Y NOMBRE:	FIRMA:
----------------------------	---------------

1. La figura adjunta representa la potencia procesada por el sistema de potencia frente a la frecuencia de operación de los conmutadores. Indica cuál es el semiconductor de potencia que se emplea en la región sombreada B.
- Transistor bipolar
 - MOSFET
 - IGBT
 - Tiristor

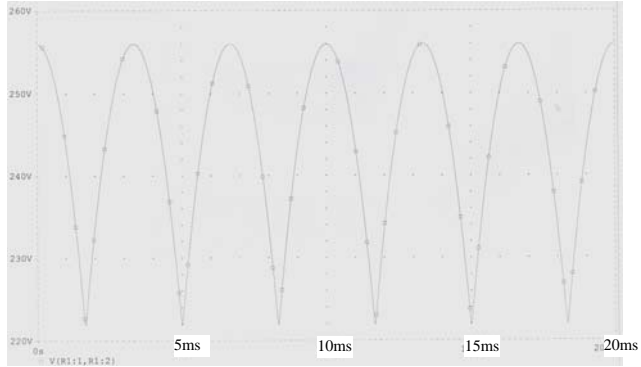


2. ¿Cuál es el margen de variación de α (ángulo de disparo) en un rectificador trifásico en puente con carga resistiva?

- a) 0-60°
- b) 0-120°
- c) 0-150°
- d) 0-180°

3. La gráfica de la figura representa la tensión de salida de un rectificador alimentado con tensiones que tienen una frecuencia de 50 Hz. Indicar el tipo de rectificador.

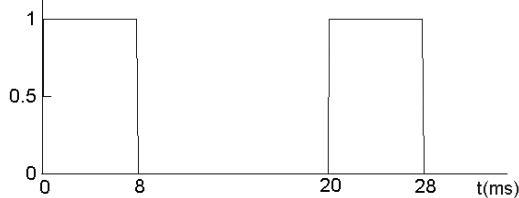
- a) Puente trifásico con ángulo de disparo 0°
- b) Trifásico simple con ángulo de disparo 0°
- c) Hexafásico con ángulo de disparo 30°
- d) Puente monofásico con ángulo de disparo 0°



4. La tensión de salida (valor medio) de un convertidor CA/CC trifásico en puente con carga resistiva vale 381'2 V. Si la tensión de alimentación es de 380 V eficaces entre fases, determina con qué valor de α se está trabajando.

- a) 29°
- b) 42°
- c) 55°
- d) 68°

5. ¿Qué valor tiene ' α ' en la Función Existencial representada en la figura?



$$H(t) = \frac{1}{A} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} \right] \cdot \cos(n\omega t - \alpha)$$

- a) 0°
- b) 36°
- c) 72°
- d) 144°

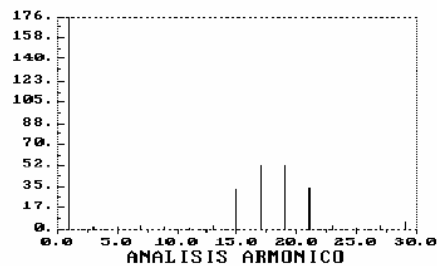
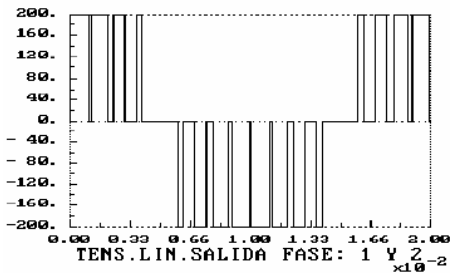
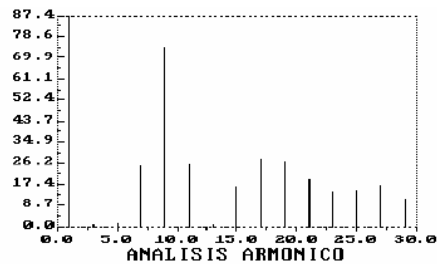
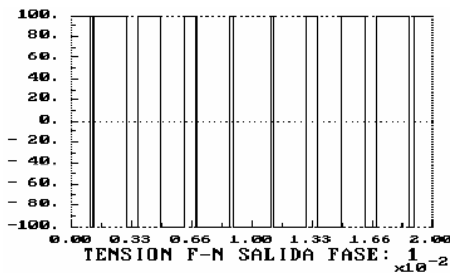
6. Determina el valor medio de la corriente que circula por cada uno de los tiristores de un rectificador hexafásico simple alimentado con una tensión alterna fase-neutro de 200 V eficaces, cuando la carga es una resistencia de 10Ω y el ángulo de disparo es de 30°.

- a) 3,40A
- b) 3,90 A
- c) 4,40 A
- d) 4,90 A

7. En el rectificador anterior, calcular el valor medio de la tensión de salida.

- a) 165,4 V
- b) 233,9 V
- c) 286,5 V
- d) 405,1 V

8. Un rectificador trifásico simple no controlado se alimenta con una tensión fase-neutro de 127 V eficaces. La carga es una resistencia de 2Ω . Determinar la corriente eficaz en cada diodo.
- 28,59 A
 - 33,59 A
 - 38,59 A
 - 43,59 A
9. Un inversor monofásico semipunto y pulso único por semiciclo tiene una tensión en cada semibatería de 48 V. Calcular la **amplitud** del armónico fundamental de la tensión de salida.
- 43,22 V
 - 61,12 V
 - 86,43 V
 - 122,2 V
10. Un inversor monofásico en puente con modulación senoidal tiene una tensión en cada semibatería de 48 V. El desfase entre moduladoras (desfase entre los dos semipuentes) es de 180° . El índice de modulación es 0,4. Calcular el **valor de pico** del armónico fundamental de la tensión de salida.
- 19,2 V
 - 33,3 V
 - 38,4 V
 - 66,5 V
11. Las gráficas siguientes son la tensión fase-neutro y fase-fase de un inversor. Indicar cuál es la afirmación correcta respecto del tipo de inversor.



- Inversor trifásico con ángulo de desfase de portadoras 0 grados.
- Inversor en puente monofásico con ángulo de desfase de moduladoras de 0 grados, y con ángulo de desfase de portadoras de 0 grados.
- Inversor en puente monofásico con ángulo de desfase de moduladoras de 180 grados, y con ángulo de desfase de portadoras de 0 grados.
- Inversor en puente monofásico con ángulo de desfase de moduladoras de 180 grados, y con ángulo de desfase de portadoras de 180 grados.

12. Un inversor monofásico presenta una tensión de salida con el siguiente contenido armónico

Frecuencia (Hz)	50	5000	10000	15000
Amplitud (V)	100	100	80	60

Indicar cuáles son los mejores valores para un filtro LC que se coloque a la salida del inversor.

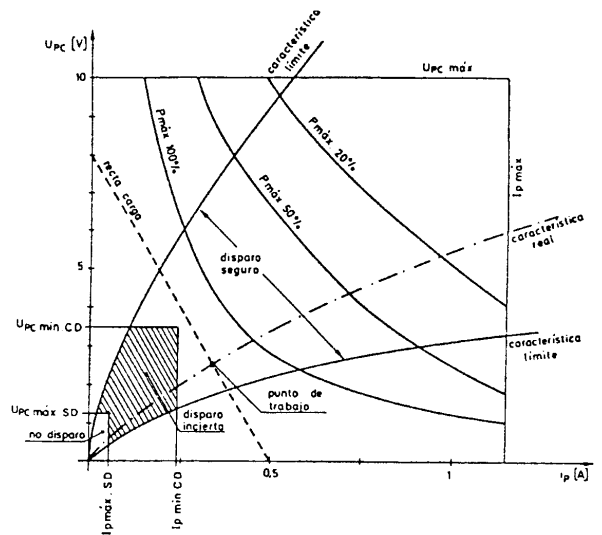
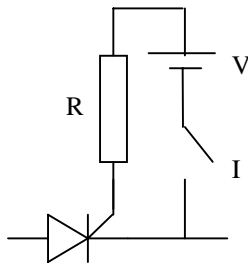
- a) $L = 5 \text{ mH}$, $C = 100 \mu\text{F}$
- b) $L = 100 \text{ mH}$, $C = 500 \mu\text{F}$
- c) $L = 500 \mu\text{H}$, $C = 10 \mu\text{F}$
- d) $L = 50 \mu\text{H}$, $C = 10 \mu\text{F}$

13. Un rectificador bifásico simple controlado está alimentado por una tensión simple (fase-neutro) de 100 V eficaces. El rectificador alimenta una resistencia de 1Ω . La tensión umbral del tiristor es de 2 V y su resistencia dinámica de $40 \text{ m}\Omega$. Calcular la potencia que disipa cada tiristor cuando el ángulo de disparo es 45° .

- a) 168,7 W
- b) 198,7 W
- c) 228,7 W
- d) 258,7 W

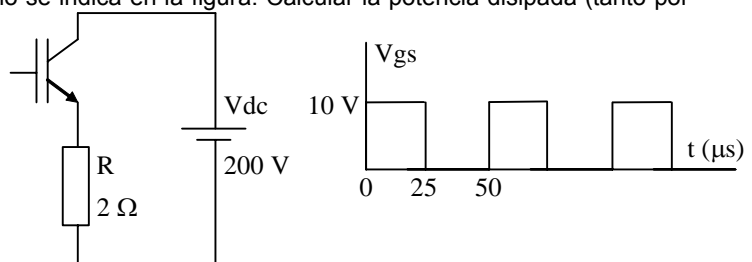
14. Un tiristor presenta unas características de puerta como las de la figura. Se dispara mediante el cierre del interruptor I. Indicar cuál es la forma correcta de disparar el tiristor.

- a) $V = 10 \text{ V}$, $R = 40 \Omega$, duración del pulso = 50 %
- b) $V = 8 \text{ V}$, $R = 16 \Omega$, duración del pulso = 100 %
- c) $V = 8 \text{ V}$, $R = 8 \Omega$, duración del pulso = 100 %
- d) $V = 5 \text{ V}$, $R = 10 \Omega$, duración del pulso = 100 %



15. Un IGBT se monta en un circuito con una fuente de tensión continua y una resistencia. Tiene aplicada una tensión de puerta periódica, como se indica en la figura. Calcular la potencia disipada (tanto por conmutación como por conducción) en el IGBT. Datos del IGBT: $V_{ds(on)}=1,1\text{V}$, $t_{d(on)}=60\text{ns}$, $t_r=300\text{ns}$, $t_d(off)=350\text{ns}$, $t_f=400\text{ns}$.

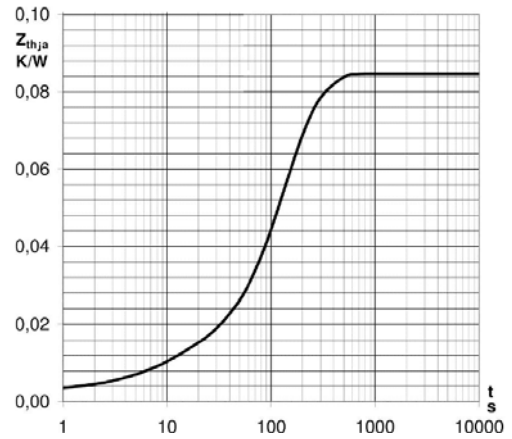
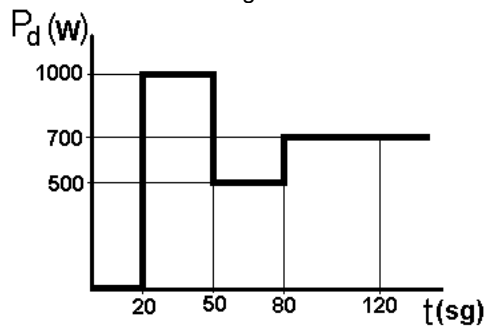
- a) 91,7 W
- b) 101,7 W
- c) 111,7 W
- d) 121,7 W



16. Sea un inversor en puente monofásico con pulso único por semiciclo, la tensión de batería es $V_{DC} = 1000 \text{ V}$ y el desfase entre ambas ramas del inversor es de 180° . Calcular la potencia media disipada en conducción en cada IGBT cuando la carga es una resistencia de 150Ω . Datos: $V_{DS(SAT)} = 1,2 \text{ V}$.

- a) 4 W
- b) 4,4 W
- c) 4,8 W
- d) 5,2 W

17. Durante el funcionamiento de un rectificador, sus tiristores sufren un régimen de carga representado en la figura por la potencia disipada por cada tiristor en función del tiempo. Si la temperatura ambiente del emplazamiento del rectificador es de 30°C , determina la temperatura de la unión de los tiristores en e instantes $t_2 = 120\text{sg}$.



- a) 62°C
- b) 74°C
- c) 86°C
- d) 98°C

TEORÍA 2. Régimen Térmico Transitorio

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

Electrónica de Potencia

3º I.T.I. Esp. Electricidad

Fecha: 17/01/2011
Aula BA1 - 17:00h

1	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input checked="" type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D	10	<input type="checkbox"/> A	<input checked="" type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
2	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input checked="" type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D	11	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input checked="" type="checkbox"/> D
3	<input type="checkbox"/> A	<input checked="" type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D	12	<input checked="" type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
4	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input checked="" type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D	13	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input checked="" type="checkbox"/> D
5	<input type="checkbox"/> A	<input checked="" type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D	14	<input type="checkbox"/> A	<input checked="" type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
6	<input checked="" type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D	15	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input checked="" type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
7	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input checked="" type="checkbox"/> D	16	<input type="checkbox"/> A	<input checked="" type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
8	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input checked="" type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D	17	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input checked="" type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D
9	<input type="checkbox"/> A	<input checked="" type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D					

CORREC. INCOR. SIN RESP. NOTA TEST NOTA TEORÍA

INSTRUCCIONES:

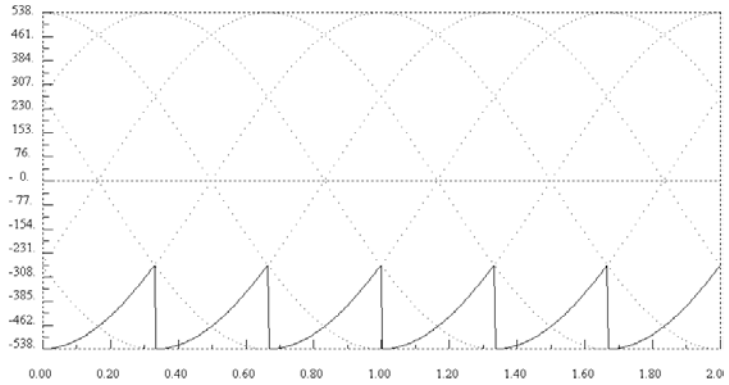
- Las respuestas se indicarán marcando con una **X** la casilla correspondiente. Para invalidar una casilla y elegir otra respuesta, se rodeará con un círculo la opción no válida y se marcará con una nueva **X** el cuadro correcto. Cada pregunta tiene una única respuesta, si se señala más de una se considerará nula.
- Las respuestas acertadas suman un punto, las incorrectas se calificarán con $- 1/3$ y las no contestadas ni suman ni restan.

APELLIDOS Y NOMBRE:	FIRMA:

- Sea un rectificador en puente trifásico controlado, que se alimenta desde una red trifásica de 380V eficaces de línea y 50Hz. Se conecta a la salida una carga altamente inductiva que consume una corriente prácticamente constante de 100A. Calcular el valor del ángulo de disparo necesario para que el valor medio de la tensión de salida sea de 100V.
 - 58,76°
 - 68,76°
 - 78,76°
 - 88,76°

2. La gráfica siguiente corresponde a un rectificador en puente trifásico, indicar el valor del ángulo de disparo.

- a) 150°
- b) 180°
- c) 210°
- d) 240°

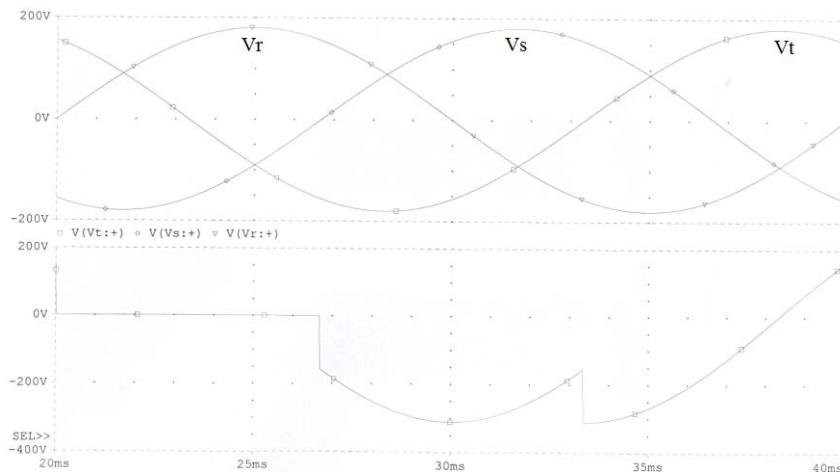
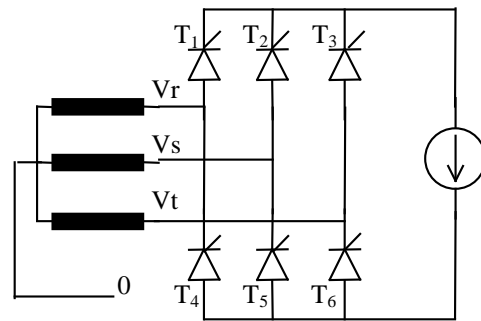


3. Un rectificador trifásico simple controlado se alimenta con una tensión eficaz fase-neutro de 220 V. La carga es una fuente de corriente constante de 100 A. Si la frecuencia de entrada del rectificador es de 50 Hz, calcular la amplitud del armónico de 750 Hz cuando el ángulo de disparo es de 30° .

- a) 12,26 V
- b) 17,34 V
- c) 21,24 V
- d) 30,04 V

4. La gráfica inferior muestra las tensiones de entrada y la tensión en un tiristor. Indicar de qué tiristor se trata.

- a) T4
- b) T2
- c) T5
- d) T1



5. Un rectificador trifásico simple controlado se alimenta con una tensión eficaz fase-fase de 380 V. La carga es una resistencia de 3Ω . Calcular el valor medio de la tensión de salida cuando el ángulo de disparo es 95° .

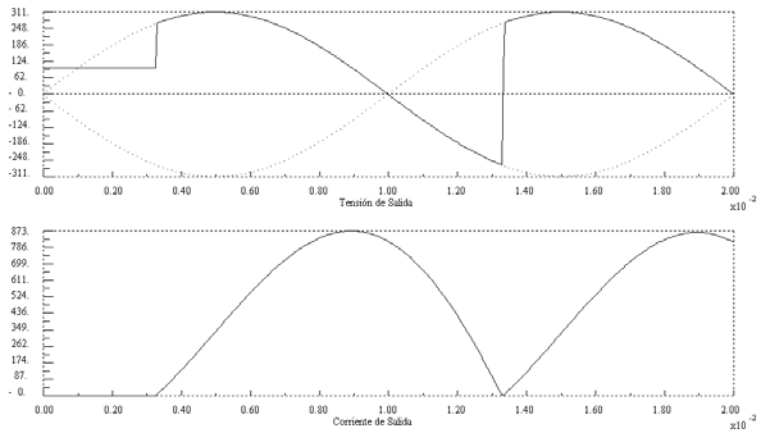
- a) 44,67 V
- b) 63,17 V
- c) 77,37 V
- d) 109,41 V

6. En el rectificador anterior, calcular el valor eficaz de la corriente de cada fase del transformador.

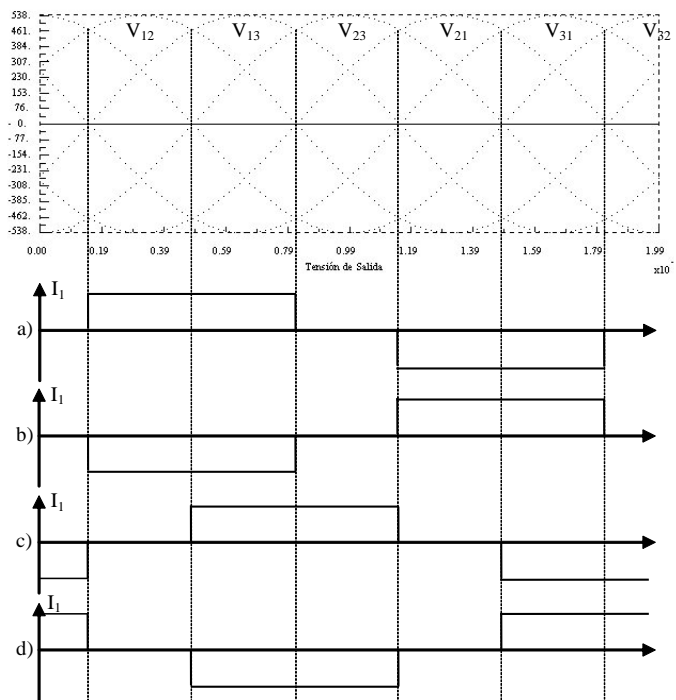
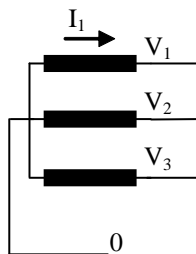
- a) 20,42 A
- b) 25,42 A
- c) 30,42 A
- d) 35,42 A

7. En la figura aparece la tensión de salida y la corriente de salida de un rectificador. Indicar las características del mismo.

- a) $E=0V, \alpha=60^\circ, L \neq 0$
- b) $E=100V, \alpha=60^\circ, L=0$
- c) $E=0V, \alpha=60^\circ, L=0$
- d) $E=100V, \alpha=60^\circ, L \neq 0$

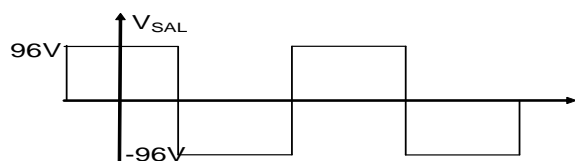


8. Sea un rectificador controlado de cuatro cuadrantes con carga inductiva. Indicar la forma de onda de la corriente en la fase 1 (I_1) del transformador cuando el ángulo de disparo es de 240° .



9. La gráfica siguiente muestra la tensión de salida de un inversor. Calcular el valor eficaz del armónico fundamental de la tensión de salida.

- a) 43,22 V
- b) 86,43 V
- c) 129,65 V
- d) 172,86 V



10. En el inversor del problema anterior, calcular el **valor eficaz** del armónico de 350 Hz de la tensión de salida. La frecuencia del armónico fundamental es de 50 Hz.

- a) 6,17 V
- b) 12,35 V
- c) 18,52 V
- d) 24,69 V

11. Sea un inversor trifásico con modulación PWM. La forma de onda de la tensión de salida aparece en la figura, y el índice de modulación es $x = 0,9$. Calcular la **amplitud** del primer armónico de la tensión fase-fase.

- a) 45,00 V
- b) 77,94 V
- c) 90,00 V
- d) 155,9 V



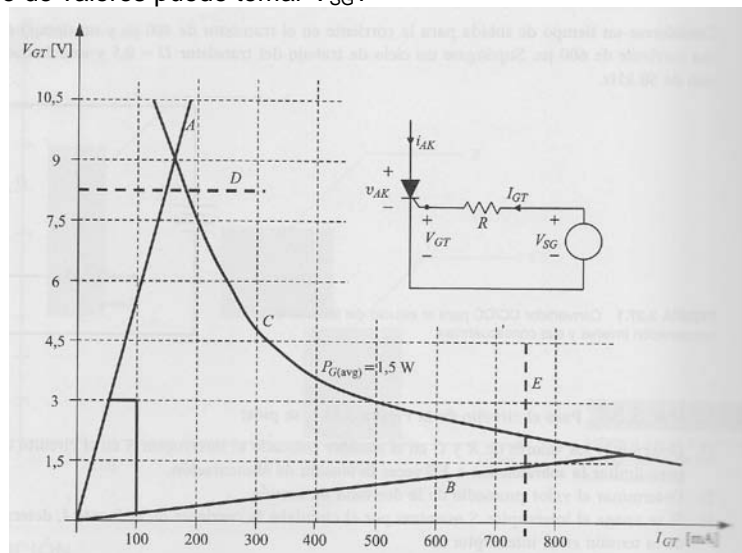
12. Un inversor monofásico presenta una tensión de salida con el contenido armónico de la tabla siguiente. Indicar cuáles son los mejores valores para un filtro LC que se coloque a la salida del inversor.

Frecuencia (Hz)	50	2500	5000	7500
Amplitud (V)	300	300	150	75

- a) $L = 6,33 \text{ mH}$, $C = 100 \mu\text{F}$
- b) $L = 40,5 \text{ mH}$, $C = 1000 \mu\text{F}$
- c) $L = 1,01 \text{ mH}$, $C = 1 \mu\text{F}$
- d) $L = 101 \mu\text{H}$, $C = 10 \mu\text{F}$

13. En la figura se representan las curvas características que delimitan la zona de disparo seguro del tiristor representado en dicha figura. Si la resistencia R es de 36Ω y tiene una tolerancia del 10%, ¿qué rango de valores puede tomar V_{SG} ?

- a) $6,96 \text{ V} \div 7,54 \text{ V}$
- b) $5,53 \text{ V} \div 8,25 \text{ V}$
- c) $5,53 \text{ V} \div 7,54 \text{ V}$
- d) $6,96 \text{ V} \div 8,25 \text{ V}$

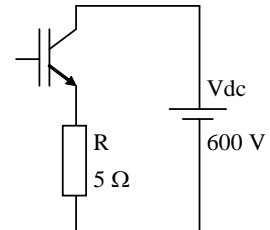


14. Sea un rectificador trifásico simple controlado, con tensión fase-neutro de 127V eficaces. Calcular la potencia disipada en cada tiristor cuando la carga es una fuente de corriente de 20A y el ángulo de disparo es de 45°. Datos del tiristor: $V_{umbral} = 1,2 \text{ V}$, $r_{dinámica} = 20 \text{ m}\Omega$.

- a) 6,67 W
- b) 10,67 W
- c) 14,67 W
- d) 18,67 W

15. Calcular la potencia disipada por el IGBT de la figura. Datos: $f = 2,5 \text{ kHz}$, $V_{DS(SAT)} = 1.2 \text{ V}$, ciclo de servicio = $t_{on}/T = 0.45$, $t_r = 500 \text{ ns}$, $t_f = 750 \text{ ns}$, $t_{d(on)} = 350 \text{ ns}$, $t_{d(off)} = 600 \text{ ns}$, $R_D = 5 \Omega$, $V_{DD} = 600 \text{ V}$.

- a) 72,3 W
- b) 87,3 W
- c) 102,3 W
- d) 117,3 W



16. Un tiristor montado sobre un radiador presenta la impedancia térmica transitoria de la figura. Desde $t = 0$ hasta $t = 160 \text{ s}$, el tiristor disipa 500 W. A partir de ese momento pasa a disipar 100 W. Si la temperatura ambiente es de 40 °C, calcular la temperatura en la unión cuando han transcurrido 200 segundos.

- a) 68 °C
- b) 76 °C
- c) 84 °C
- d) 92 °C

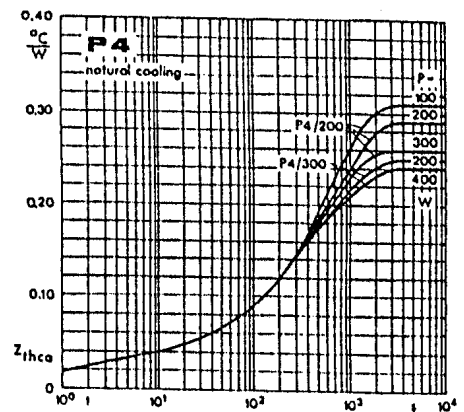


Fig. 9 Transient thermal impedance vs. time

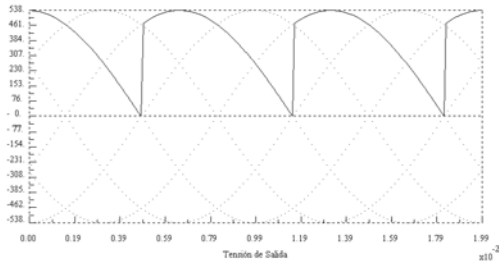
17. Un semiconductor disipa una potencia de 7W. La temperatura ambiente es de 40°C y la máxima temperatura que soporta el semiconductor es de 150°C. Las resistencias térmicas unión-caja, caja-disipador y unión-ambiente (sin disipador) son, respectivamente, 1°C/W, 0,4°C/W y 50°C/W. Hay que decidir si es necesario emplear un radiador y, si fuera necesario, hay que elegir el de menor tamaño (menor volumen) que cumpla las condiciones térmicas.

- a) Sin radiador
- b) LS80. Rdisipador-ambiente = 7,1°C/W (longitud x anchura x altura = 25 x 42 x 38 mm)
- c) LS300. Rdisipador-ambiente = 12°C/W (longitud x anchura x altura = 10 x 44 x 37 mm)
- d) PF752. Rdisipador-ambiente = 23°C/W (longitud x anchura x altura = 11 x 22 x 19 mm)

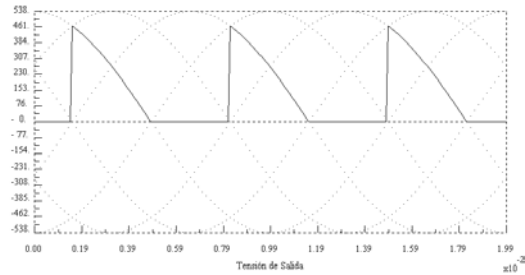
TEORÍA 2. Control de la tensión de salida de inversores.

CAPITULO 2: CONVERTIDORES CA/CC

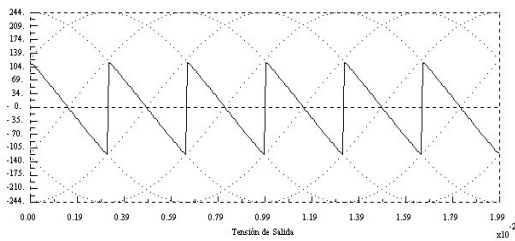
1. Dibujar la forma de onda de un rectificador:
 - a) en puente monofásico (o bifásico) semicontrolado, carga inductiva y ángulo de disparo de 90° .
 - b) en puente trifásico semicontrolado, carga inductiva y ángulo de disparo de 90° .
2. Indicar a qué tipo de rectificador y a qué ángulo de disparo corresponden las siguientes gráficas de la tensión de salida de un rectificador.



a)

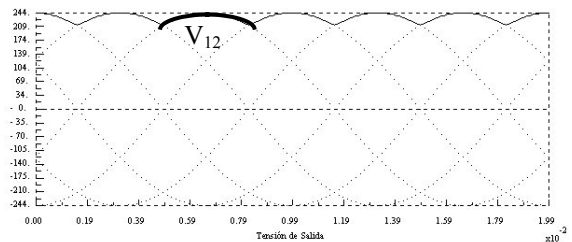


b)



c)

3. La gráfica de la figura corresponde a un rectificador en puente trifásico semicontrolado. Indicar qué semiconductores conducen en el intervalo marcado.

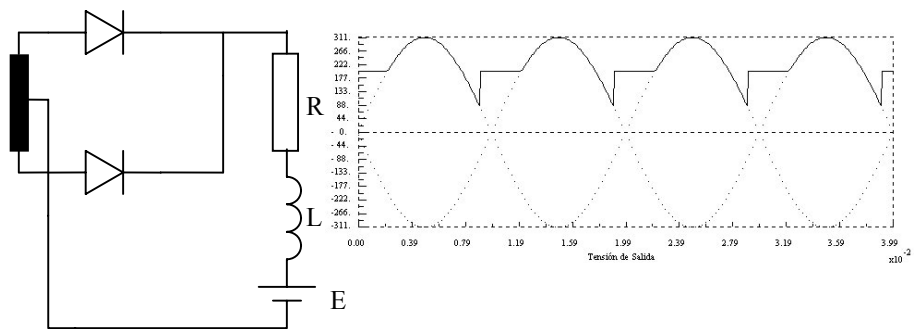


4. Sea un rectificador trifásico simple, con tensión fase-neutro 220 V.
 - a) Cuando la carga es inductiva y $\alpha = 15^\circ$, calcular:
 - a1) El valor medio de la tensión de salida
 - a2) La amplitud de los dos primeros armónicos
 - b) Cuando la carga es resistiva y $\alpha = 45^\circ$, calcular el valor medio de la tensión de salida.
5. Sea un rectificador en puente trifásico, alimentado desde una línea de 380 V entre fases.
 - a) Cuando la carga es inductiva y $\alpha = 75^\circ$, calcular:
 - a1) El valor medio de la tensión de salida
 - a2) La amplitud de los dos primeros armónicos
 - b) Cuando la carga es resistiva y $\alpha = 90^\circ$, calcular el valor medio de la tensión de salida.
6. Sea un rectificador bifásico simple no controlado, alimentado con una tensión fase-neutro de 100 V eficaces y 50 Hz. La corriente por la carga es constante y de valor 20 A. Calcular el valor de la inductancia de dispersión (fugas) del transformador sabiendo que el ángulo de conmutación es 10° .
7. Sea un rectificador trifásico simple bidireccional en corriente con carga inductiva pura. Dibujar las formas de onda de la tensión de salida y la corriente por la fase 1 del transformador cuando el ángulo de disparo es: 30° , 120° , 210° y 300° .

8. Sea un rectificador en puente trifásico bidireccional en corriente con carga inductiva pura. Dibujar las formas de onda de la tensión de salida y la corriente por la fase 1 del transformador cuando el ángulo de disparo es: 30° , 120° , 210° y 300° .
9. Sea un rectificador en puente trifásico cuya tensión de entrada es de 380 V eficaces fase-fase. Calcular el valor medio y eficaz de la corriente en cada tiristor, el valor eficaz de la corriente en cada devanado del transformador y la máxima tensión en cada tiristor para $\alpha = 30^\circ$ cuando:
 - a) la corriente de salida es constante $I = 500$ A.
 - b) la carga es resistiva, $R = 1 \Omega$.
10. Un rectificador trifásico en puente no controlado se alimenta con una tensión fase-neutro de 100 V eficaces. La carga es una resistencia de 1Ω .
 - a) Determinar la corriente media por cada diodo.
 - b) Determinar la tensión de pico en cada diodo.
 - c) Determinar la corriente eficaz en cada devanado del transformador.
11. Un rectificador hexafásico simple no controlado se alimenta con una tensión fase-neutro de 100 V eficaces. La carga es una resistencia de 1Ω .
 - a) Determinar la corriente media por cada diodo.
 - b) Determinar la tensión de pico en cada diodo.
 - c) Determinar la corriente eficaz en cada devanado del secundario del transformador.

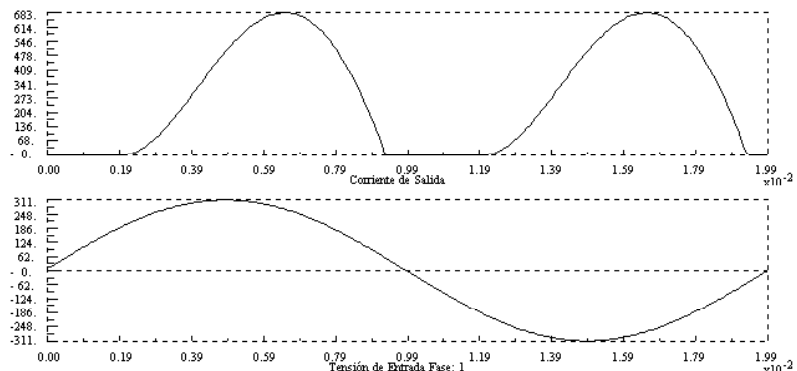
12. Para el rectificador con carga RLE y la tensión de salida de la figura, indicar la afirmación correcta:

- a) $L \neq 0, R \neq 0$ y $E = 200V$
- b) $L = 0, R \neq 0$ y $E = 200V$
- c) $L \neq 0, R \neq 0$ y $E = 0V$
- d) $L \neq 0, R = 0$ y $E = 0V$



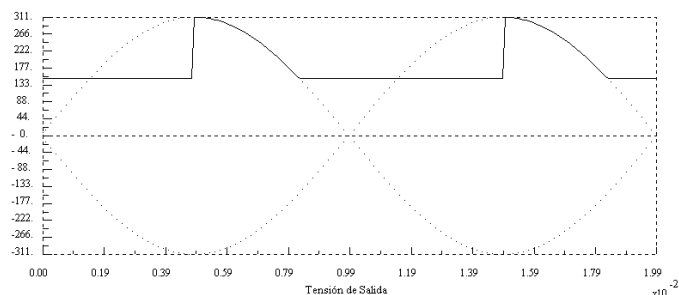
13. La gráfica de la figura corresponde a un rectificador bifásico simple no controlado y carga R-L-E. La figura superior es la corriente de salida y la figura inferior es la tensión de entrada de la fase 1. Indicar cuál es el valor de la carga.

- a) $L \neq 0, R \neq 0$ y $E = 200$ V
- b) $L = 0, R \neq 0$ y $E = 200V$
- c) $L \neq 0, R \neq 0$ y $E = 0V$
- d) $L = 0, R \neq 0$ y $E = 0V$



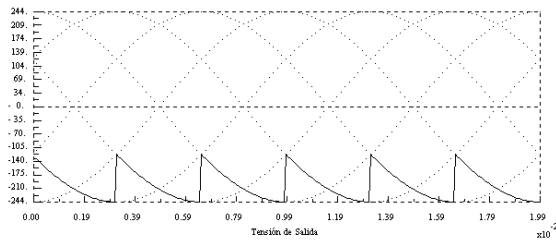
14. La gráfica de la figura corresponde a la tensión de salida de un rectificador con carga R-L-E. Indicar cuál es el valor de la carga.

- a) $L \neq 0, E = 150$ V y $\alpha = 90^\circ$
- b) $L = 0, E = 150V$ y $\alpha = 90^\circ$
- c) $L \neq 0, E = 0V$ y $\alpha = 150^\circ$
- d) $L = 0, E = 0V$ y $\alpha = 150^\circ$

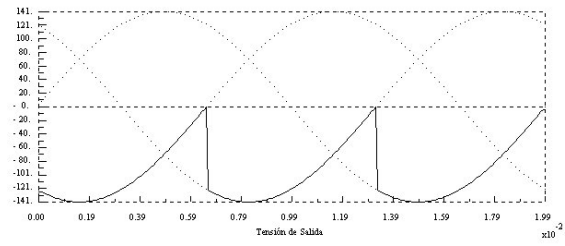


15. Las gráficas siguientes corresponden a dos rectificadores reversibles en corriente, indicar el ángulo de disparo de cada uno:

a)



b)



CAPITULO 3: CONVERTIDORES CC/CA

1. Un inversor monofásico semipunte y con pulso único por semiciclo, tiene una tensión de 24 V en cada semibatería. Calcular la tensión del armónico fundamental.
2. Un inversor monofásico en puente y pulso único por semiciclo tiene una tensión en cada semibatería de 100 V. El ángulo de control (desfase entre los dos semipuentes) es de 180° . Calcular el valor de pico del armónico fundamental de la tensión de salida.
3. Un inversor monofásico semipunte con modulación senoidal e índice de modulación $x = 0,65$, tiene una tensión de 24 V en cada semibatería. Calcular la tensión del armónico fundamental.
4. Un inversor monofásico en puente con modulación senoidal tiene una tensión en cada semibatería de 100 V. El desfase entre moduladoras (desfase entre los dos semipuentes) es de 180° . El índice de modulación es 0,85. Calcular el valor de pico del armónico fundamental de la tensión de salida.

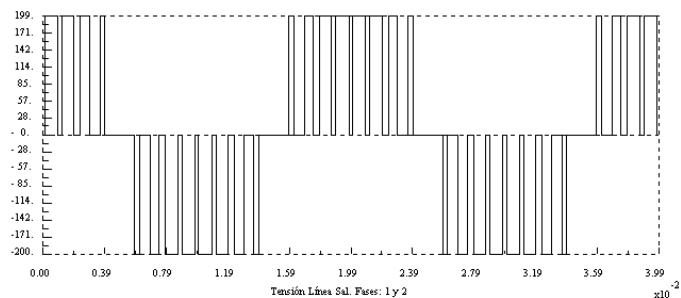
5. Un inversor monofásico presenta una tensión de salida con el siguiente contenido armónico

Frecuencia (Hz)	50	1000	2000	3000
Amplitud (V)	100	100	80	60

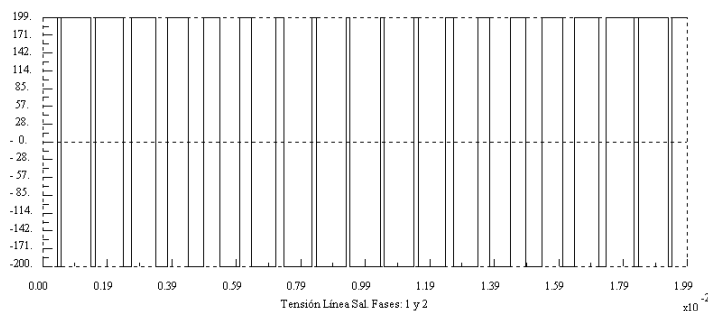
Calcular un filtro LC que se coloque a la salida del inversor.

6. Sea un inversor PWM de dos niveles con frecuencia portadora 50 Hz y $k = 40$. Calcular el filtro necesario para reducir el valor del primer armónico al 1 %.
7. En un inversor semipunte la corriente por la carga tiene forma senoidal, su valor eficaz es 60 A y su frecuencia 50 Hz. La tensión de cada semibatería es 250 V y la frecuencia de conmutación 20 kHz. Calcular la potencia disipada por conmutación en cada IGBT. Datos del IGBT: $t_d(\text{on}) = 50$ ns, $t_r = 40$ ns, $t_d(\text{off}) = 300$ ns, $t_f = 35$ ns.

8. Sea un inversor en puente monofásico. La tensión de salida (entre fases) aparece en la figura. Indicar el valor de los ángulos de desfase de moduladoras y portadoras, ϕ_1 y ϕ_2 .



9. Sea un inversor en puente monofásico. La tensión de salida (entre fases) aparece en la figura. Indicar el valor de los ángulos de desfase de moduladoras y portadoras, ϕ_1 y ϕ_2 .

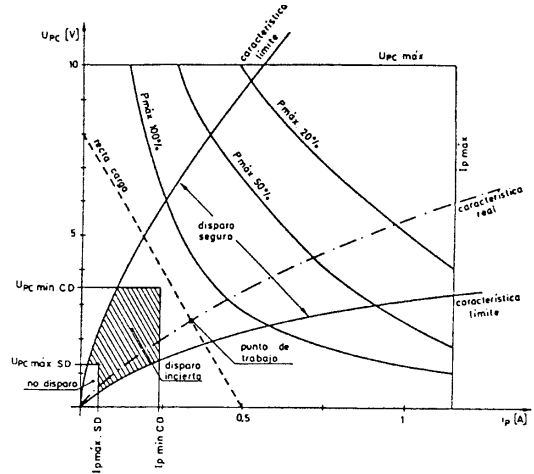
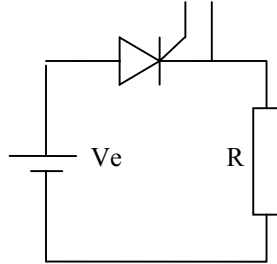


CAPITULO 4: EL TIRISTOR

1. Un rectificador bifásico simple controlado está alimentado por una tensión simple (fase-neutro) de 100 V eficaces. El rectificador alimenta una resistencia de 1 Ω. La tensión umbral del tiristor es de 2 V y su resistencia dinámica de 40 mΩ. Calcular la potencia que disipa cada tiristor cuando el ángulo de disparo es 90°.

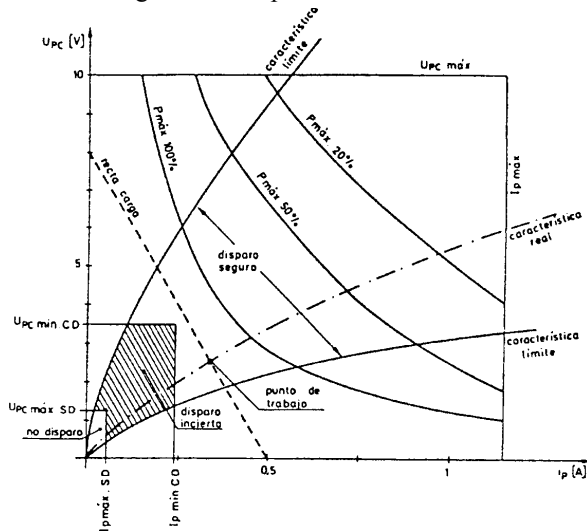
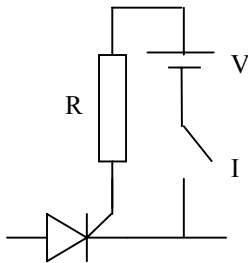
2. En el circuito de la figura, la corriente de puerta I_p es de 0,5 A, $R = 1000 \Omega$, $I_{enclavamiento} = 120 \text{ mA}$. Calcular la corriente por el tiristor cuando se deja de aplicar la corriente de puerta y:

- a) $V_e = 100 \text{ V}$
- b) $V_e = 200 \text{ V}$



3. Un tiristor presenta unas características de puerta como las de la figura. Se dispara mediante el cierre del interruptor I. Indicar cuál es la forma correcta de disparar el tiristor.

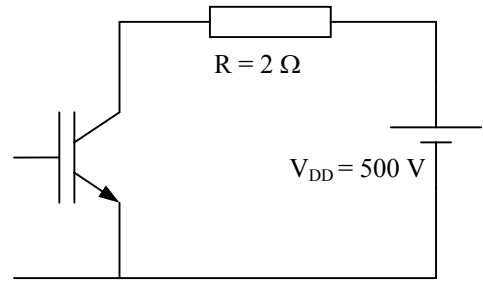
- a) $V = 5 \text{ V}$, $R = 10 \Omega$, duración del pulso = 50 %
- b) $V = 10 \text{ V}$, $R = 10 \Omega$, duración del pulso = 50 %
- c) $V = 10 \text{ V}$, $R = 10 \Omega$, duración del pulso = 100 %
- d) $V = 5 \text{ V}$, $R = 20 \Omega$, duración del pulso = 100 %



4. Sea un rectificador bifásico simple controlado, con tensión fase-neutro de 110 V eficaces. Calcular la potencia disipada en cada tiristor cuando la carga es una fuente de corriente de 20 A y el ángulo de disparo es 90°. Datos del tiristor: $V_{umbral} = 1,5 \text{ V}$, $r_{dinámica} = 30 \text{ m}\Omega$.

CAPITULO 5: EL IGBT

1. El IGBT SKM400GA102D de la marca SEMIKRON se emplea en el circuito de la figura. Calcular la potencia que disipa cuando conmuta a una frecuencia de 10 kHz. Datos: $V_{DS(SAT)} = 2.5 \text{ V}$, $t_r = 700 \text{ ns}$, $t_f = 500 \text{ ns}$, ciclo de servicio = 0.5



2. Calcular el punto de trabajo del IGBT de la figura anterior cuando $V_{GS} = 15 \text{ V}$, empleando sus gráficas $I_C - V_{CE}$.

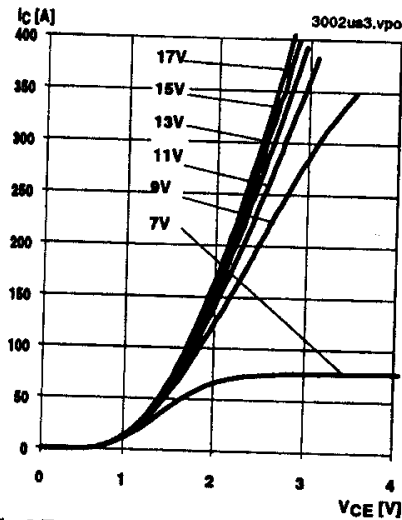
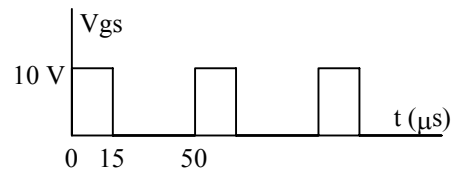
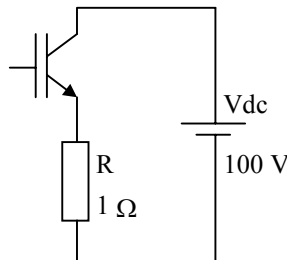


Fig. 9 Typ. output characteristic, $t_p = 80 \mu\text{s}$; $25 \text{ }^\circ\text{C}$

3. Un IGBT se monta en un circuito con una fuente de tensión continua y una resistencia. Tiene aplicada una tensión de puerta periódica, como se indica en la figura. Calcular la potencia disipada (tanto por conmutación como por conducción) en el IGBT. Datos del IGBT: $V_{ds(on)} = 1 \text{ V}$, $t_d(on) = 50 \text{ ns}$, $t_r = 40 \text{ ns}$, $t_d(off) = 300 \text{ ns}$, $t_f = 35 \text{ ns}$.



CAPITULO 6: REGIMEN TERMICO

1. Un diodo tiene una temperatura en la unión de $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ cuando disipa una potencia de 200 W . La temperatura ambiente es de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las resistencias térmicas unión-caja y caja-radiador son $0,10$ y $0,05\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ respectivamente. Calcular la resistencia térmica del radiador que debe montarse.
2. Un tiristor montado sobre un radiador presenta la impedancia térmica transitoria de la figura. La potencia que disipa el tiristor es de 450 W . Si la temperatura ambiente es de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, calcular la temperatura en la unión cuando han transcurrido 200 segundos.
3. Un tiristor montado sobre un radiador presenta la impedancia térmica transitoria de la figura. En el arranque de un motor, la potencia que disipa el tiristor es de 900 W durante los primeros 130 segundos y 450 W a partir de ese instante. Si la temperatura ambiente es de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, calcular la temperatura en la unión cuando han transcurrido 200 segundos.
4. Un tiristor montado sobre un radiador presenta la impedancia térmica transitoria de la figura. Desde $t = 0$ hasta $t = 160\text{ s}$ el tiristor disipa 1000 W . A partir de ese momento pasa a disipar 0 W . Si la temperatura ambiente es de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, calcular la temperatura en la unión cuando han transcurrido 200 segundos.

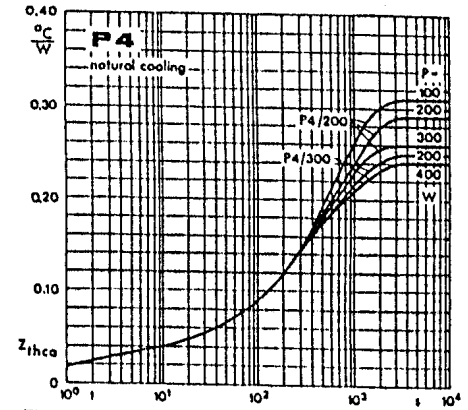


Fig. 9 Transient thermal impedance vs. time

INTRODUCCIÓN AL APRENDIZAJE COOPERATIVO

1. ALGUNOS ASPECTOS BÁSICOS

- La clase se organiza de forma activa. En clase, el alumno hace, no se dedica a escuchar y escribir
- Se trabaja en grupos de tres alumnos. Se pretende que los grupos sean estables
- El profesor actúa de orientador y organizador
- La presencia de los compañeros de grupo es una ayuda: plantean dudas, resuelven dudas, animan a trabajar, ...
- Es una actividad más parecida al entorno laboral

2. VENTAJAS DEL APRENDIZAJE COOPERATIVO

- Los investigadores indican que, independientemente de la materia, los estudiantes que trabajan en pequeños grupos logran un mayor rendimiento, que cuando se emplean otros métodos de enseñanza. Estos alumnos consiguen: mayor rendimiento académico, mayor persistencia después de la graduación, mayor habilidad para el razonamiento y el pensamiento crítico, comprensión más profunda de la materia, menores niveles de estrés y ansiedad, mayor motivación, mayor habilidad para ver situaciones desde otras perspectivas, relación más positiva y de apoyo mutuo con compañeros, actitud más positiva hacia la materia y mayor autoestima.
- Hay muchos estudios que demuestran que los estudiantes que aprenden cooperativamente consiguen mejores calificaciones que los que trabajan el material de forma individual. Felder indica una mejora del número de aprobados del 36 % al 58 y 65 %.
- Los estudiantes aprenden más haciendo que escuchando.
- Los estudiantes débiles, cuando se encuentran atascados con una asignatura, tiran antes la toalla cuando trabajan solos, mientras que utilizando el trabajo en grupo permanecen más. Los estudiantes fuertes, al explicar y clarificar el material a los alumnos más débiles, habitualmente descubren y llenan sus lagunas.
- Se necesita responsabilidad individual, ya que hay alumnos que tienen tendencia natural a dominar el grupo y otros a no tomar responsabilidad.
- Evaluación del trabajo del grupo: cuestionarios.
- Cuando los estudiantes trabajan como Ingenieros Técnicos, trabajarán en equipos.
- El 38,82 % de las empresas que contratan titulados universitarios utilizan entrevistas en grupo¹.

3. POSIBLES DIFICULTADES O RETICENCIAS

- Es mejor utilizar el tiempo escuchando al profesor que trabajando con compañeros que saben tan poco como uno mismo.
- Me ha ido bien fiándome de mi propio esfuerzo y no quiero que me estorben otros alumnos con diferentes métodos de trabajo.
- Timidez o falta de costumbre de compartir el trabajo con los compañeros.
- Los estudiantes fuertes pueden pensar que sus compañeros les van a retrasar. Los estudiantes débiles pueden pensar que van a ser ignorados en las reuniones de grupo.

BIBLIOGRAFÍA:

- J. Bará, M. Valero, Taller de Formación: Técnicas de Aprendizaje Cooperativo, Universidad Politécnica de Cataluña.
- R.M. Felder, R. Brent, Cooperative Learning in Technical Courses: Procedures, Pitfalls, and Payoffs, October 1994.
- Speaking of Teaching, Stanford University Newsletter on Teaching, Winter 1999, Vol. 10, No. 2.

¹ Las empresas piden más, EL PAIS, domingo 3 de octubre de 2004.

**PRACTICAS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA (3º I. T. I. ELECTRICIDAD)
CURSO 2009/2010**

Condición general: la asistencia al laboratorio es obligatoria, cada falta de asistencia supone una reducción de 0,5 puntos en la nota individual sobre 2 puntos de calificación máxima del laboratorio.

PRÁCTICA 1: RECTIFICADORES SEMICONTROLADOS (1 punto)

Cada grupo debe prepararse para la realización de un examen (en grupo) de montaje de dos rectificadores semicontrolados en el laboratorio. Los montajes son el puente bifásico (monofásico) semicontrolado y el rectificador bifásico simple semicontrolado.

El examen a realizar se presenta a continuación. Se realizará el cuarto día de prácticas sin ningún tipo de material.

EXAMEN

1. Comprobar que se encuentran en correcto estado los siguientes elementos: dos generadores de impulsos, dos tiristores, sonda para el osciloscopio.
Notas: Si sobre un componente (tiristor o generador de impulsos) pone alguna indicación de encontrarse deteriorado (“MAL”, “NO”, etc.) no de debe utilizar.
2. Realizar el montaje de un rectificador en puente bifásico (monofásico) semicontrolado alimentado desde 44 V eficaces, situando un ángulo de disparo de ____°. Utilizar como carga una resistencia de 50 Ω. Cuando el circuito funcione correctamente **AVISAR AL PROFESOR PARA COMPROBAR EL FUNCIONAMIENTO. Dibujar de forma correlativa** la forma de onda de la tensión de entrada, la tensión en T1 y D1 y la tensión de salida (**poner valores de tensión en el dibujo**). *Nota: se recomienda dibujar el esquema completo en primer lugar (incluyendo las conexiones de los transformadores de impulsos y generadores de impulsos).*
3. Medir la corriente media por: entrada, carga, un tiristor y un diodo. **AVISAR AL PROFESOR PARA COMPROBAR LA MEDIDA.**

I_{entrada}= , I_{carga}= , I_{tiristor}= , I_{diodo}=
4. Calcular teóricamente el valor medio de la tensión de salida. Medir el valor medio de la tensión de salida. **AVISAR AL PROFESOR PARA COMPROBAR LA MEDIDA.**
5. Sustituir, en el circuito anterior, la carga resistiva de 50 Ω por una carga formada por una resistencia de 50 Ω en serie con una inductancia de 200 mH. Visualizar en el osciloscopio la tensión de salida y la corriente de salida, y dibujarlas **de forma correlativa. AVISAR AL PROFESOR PARA COMPROBAR EL FUNCIONAMIENTO.**
6. Realizar el montaje de un rectificador bifásico simple semicontrolado alimentado 22-0-22 V eficaces, situando un ángulo de disparo de ____°. Utilizar como carga una resistencia de 50 Ω. Cuando el circuito funcione correctamente **AVISAR AL PROFESOR PARA COMPROBAR EL FUNCIONAMIENTO.** Dibujar de forma correlativa la forma de onda de la tensión de entrada, la tensión en T1 y D y la tensión de salida (poner valores de tensión en el dibujo). *Nota: se recomienda dibujar el esquema completo en primer lugar (incluyendo las conexiones de los transformadores de impulsos y generadores de impulsos).*
7. Sustituir, en el circuito anterior, la carga resistiva de 50 Ω por una carga formada por una resistencia de 50 Ω en serie con una inductancia de 200 mH. Visualizar en el osciloscopio la tensión de salida y la corriente de salida, y dibujarlas **de forma correlativa. AVISAR AL PROFESOR PARA COMPROBAR EL FUNCIONAMIENTO.**

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. TIPOS DE CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE POTENCIA

- **CONVERTIDORES CA/CC (RECTIFICADORES)**
 - **FUNCIÓN:** Generar una tensión continua a partir de una tensión alterna.
 - **CONTROL:** Tensión de salida continua regulada.
 - **EJEMPLOS DE APLICACIONES:** Fuente de Alimentación, Control de Máquinas de CC, Cargador de Baterías, etc.
- **CONVERTIDORES CC/CA (INVERSORES)**
 - **FUNCIÓN:** Generar una tensión alterna a partir de una tensión continua.
 - **CONTROL:** Tensión de salida alterna regulada en frecuencia y tensión.
 - **EJEMPLOS DE APLICACIONES:** Control de Velocidad de Máquinas de CA, Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI), Energías Renovables, etc.
- **CONVERTIDORES CC/CC**
 - **FUNCIÓN:** Generar una tensión continua a partir de una tensión continua de diferente valor.
 - **CONTROL:** Tensión de salida continua regulada, mayor y/o menor que la tensión de entrada.
 - **CON/SIN TRANSFORMADOR:** Con/sin aislamiento entre entrada y salida.
 - **EJEMPLOS DE APLICACIONES:** Fuentes de Alimentación, Control de Máquinas de CC.
- **CONVERTIDORES CA/CA (CICLOCONVERTIDORES)**
 - **FUNCIÓN:** Generar una tensión alterna a partir de una tensión alterna de diferente tensión y frecuencia.
 - **CONTROL:** Tensión de salida alterna regulada en frecuencia y tensión.
 - **EJEMPLOS DE APLICACIONES:** Control de Velocidad de Motores de CA de muy alta potencia.

Bibliografía: Hart.

1.2. SEMICONDUCTORES DE POTENCIA

	DIODO	TIRISTOR	IGBT	MOSFET
Tensión Máxima				
Corriente Máxima				
Potencia				
Tiempos de conmutación		Td(on)		
		Tr		
		Td(off)		
		Tf		

CONVERTIDORES CA/CC (RECTIFICADORES)

Los convertidores CA/CC se encargan de transformar energía eléctrica de corriente alterna a corriente continua. La tensión de entrada es un sistema de tensiones polifásico (habitualmente monofásico o trifásico).

Antes de comenzar un estudio analítico de este tipo de convertidores se van a presentar las topologías fundamentales empleadas. Sobre ellas se van a analizar las formas de onda de las tensiones y las corrientes de los convertidores.

Los rectificadores se van a clasificar en tres grupos según el tipo de semiconductores que utilicen. Se denominan rectificadores no controlados a aquellos que emplean solamente diodos, rectificadores controlados a los que utilizan exclusivamente tiristores, y rectificadores semicontrolados a los que usan ambos tipos de semiconductores simultáneamente.

Se van a utilizar dos tipos de cargas para analizar las formas de onda de los rectificadores, carga resistiva y carga fuente de corriente constante. La segunda de ellas representa una carga fuertemente inductiva, capaz de mantener la corriente prácticamente constante durante un número elevado de ciclos de la tensión de alimentación. En las gráficas que ilustran el comportamiento de los rectificadores con carga inductiva, la corriente constante tiene un valor de 1000 A.

1. TOPOLOGÍAS FUNDAMENTALES

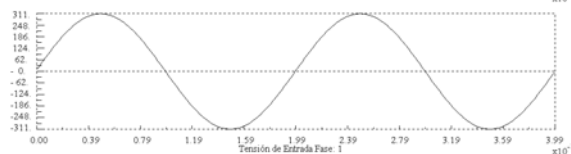
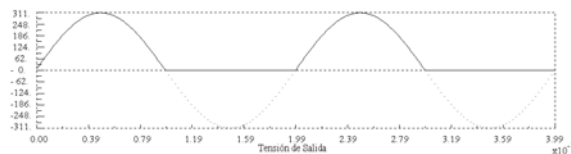
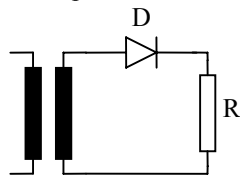
Todos los rectificadores que se van a analizar se van a alimentar desde un transformador. Su misión es triple. En primer lugar, proporcionar aislamiento eléctrico respecto de la red de alimentación. En segundo lugar, suministrar el nivel de tensión apropiado a la aplicación del rectificador. Y en tercer lugar, proporcionar el número de fases adecuado a la aplicación (1, 2, 3, 6, ...).

1.1. RECTIFICADORES NO CONTROLADOS

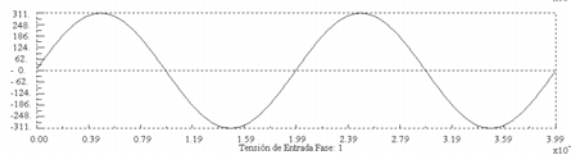
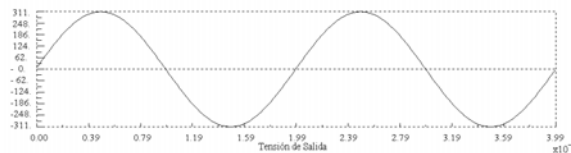
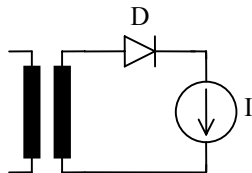
Los rectificadores no controlados sólo utilizan diodos, por lo que no pueden hacer un control de la tensión de salida, sino que ésta viene determinada por el valor de la tensión de entrada y la relación de transformación del transformador.

a) Rectificador Monofásico

Cuando la tensión de alimentación es monofásica y la carga es resistiva, el diodo conduce cuando la tensión de entrada es positiva.



Si la carga es una fuente de corriente constante, el diodo conduce en todo momento y, por tanto, las tensiones de salida y de entrada son iguales.

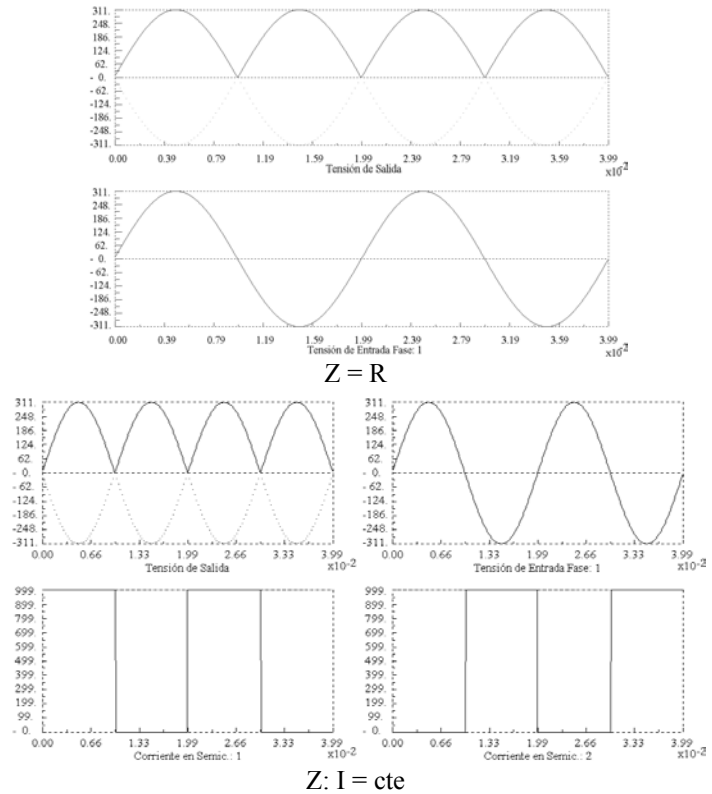
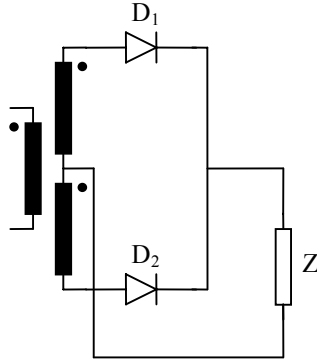


b) Rectificador bifásico simple

En este caso el rectificador se alimenta con dos tensiones que tienen un desfase de 180° . Estas dos tensiones se generan mediante un transformador con toma intermedia en el secundario.

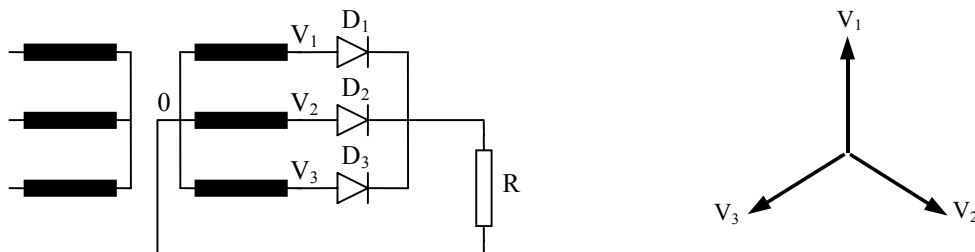
Cuando la carga es resistiva, conduce el diodo que tiene mayor tensión en su ánodo, por lo que a la salida aparece una tensión compuesta por las semiondas positivas.

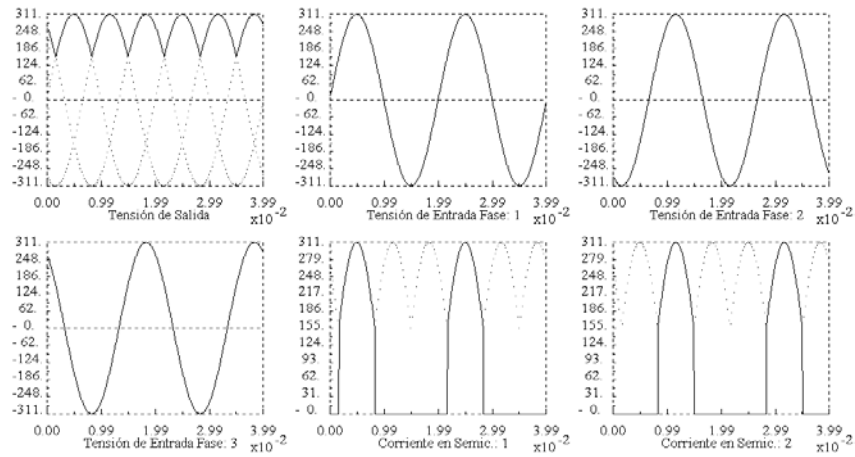
Si la carga es inductiva (fuente de corriente constante), la corriente de salida tiene que circular siempre por uno de los dos diodos. Como se puede apreciar en las figuras, la corriente conmuta entre los dos diodos, conduciendo en cada instante aquel que tiene mayor tensión aplicada al ánodo.



c) Rectificador trifásico simple

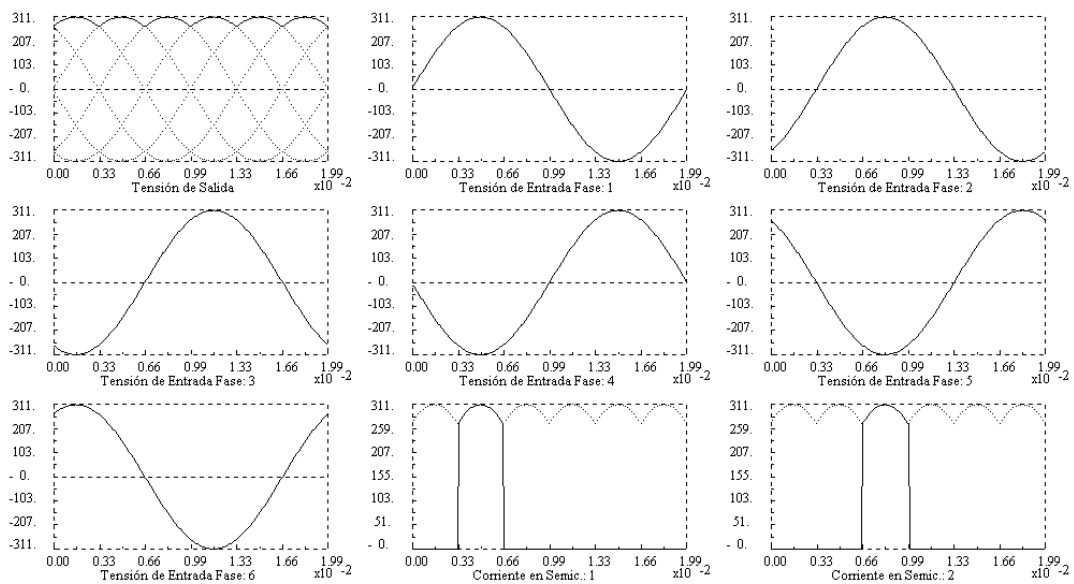
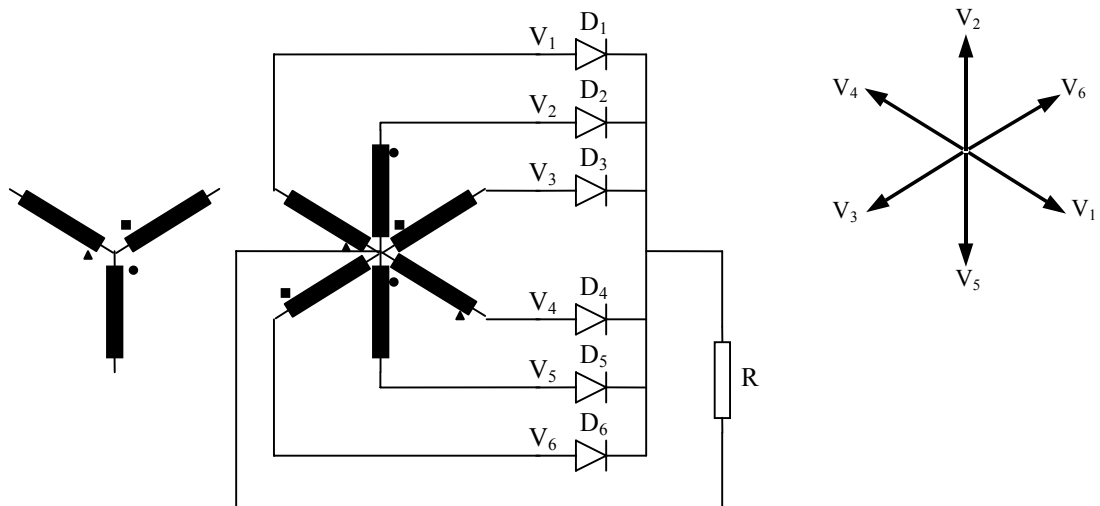
El rectificador trifásico simple se alimenta desde un transformador trifásico conectado en estrella. Cada fase se conecta a un ánodo. Todos los cátodos se unen con un extremo de la carga, mientras que el otro extremo de la carga se une al neutro del transformador. El diagrama de fases de la tensión del secundario muestra tres vectores desfasados 120° , como se puede ver también en las gráficas de las tensiones de entrada. En cada instante va a conducir el diodo que tenga mayor tensión aplicada al ánodo, por lo que la tensión de salida está formada por las cúpulas del sistema trifásico de tensiones.





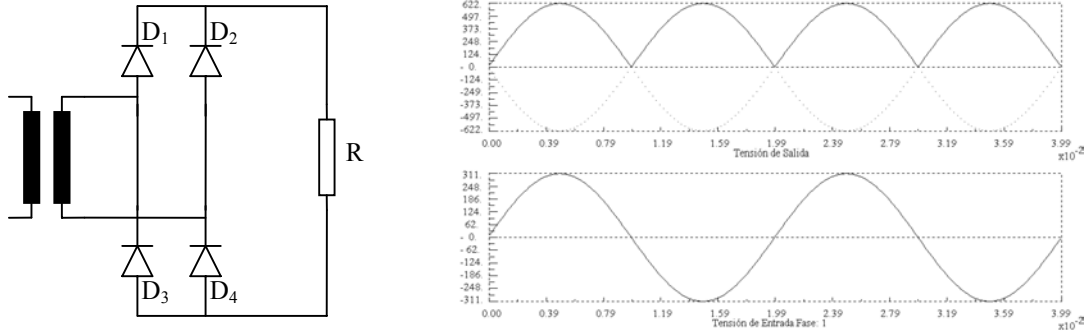
d) Rectificador hexafásico simple

Este rectificador es totalmente similar al anterior en cuanto a comportamiento. Se alimenta desde un transformador con seis fases en el secundario, desfasadas 60° , conectadas en estrella. El primario es trifásico, mientras que el secundario tiene tres fases con toma intermedia en cada una de ellas. Si se unen las tomas intermedias de las tres fases del secundario se obtienen seis fases de salida. Por lo demás el comportamiento es similar al caso anterior.



e) Rectificador bifásico en puente

Este rectificador también se puede denominar rectificador monofásico simple, aunque en este curso se va a denominar bifásico, y se va a suponer que hay una toma intermedia en el secundario, aunque no se va a utilizar. Cuando la tensión del secundario es positiva conducen los diodos 1 y 4, mientras que cuando la tensión es negativa lo hacen los diodos 2 y 3. El resultado es que en la salida aparecen los semiperiodos positivos de la tensión de entrada. Hay que notar que en la gráfica inferior aparece la tensión de entrada de la fase 1, es decir, la mitad de la tensión del secundario.



f) Rectificador trifásico en puente

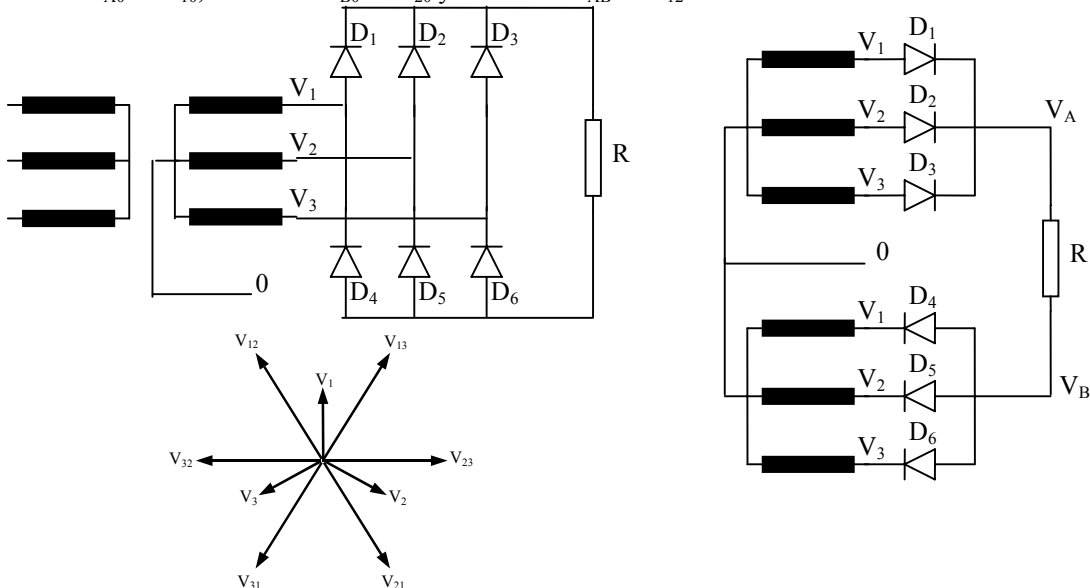
El rectificador trifásico en puente utiliza un transformador trifásico, pero no conecta el neutro. Cada fase va unida a una rama formada por dos diodos.

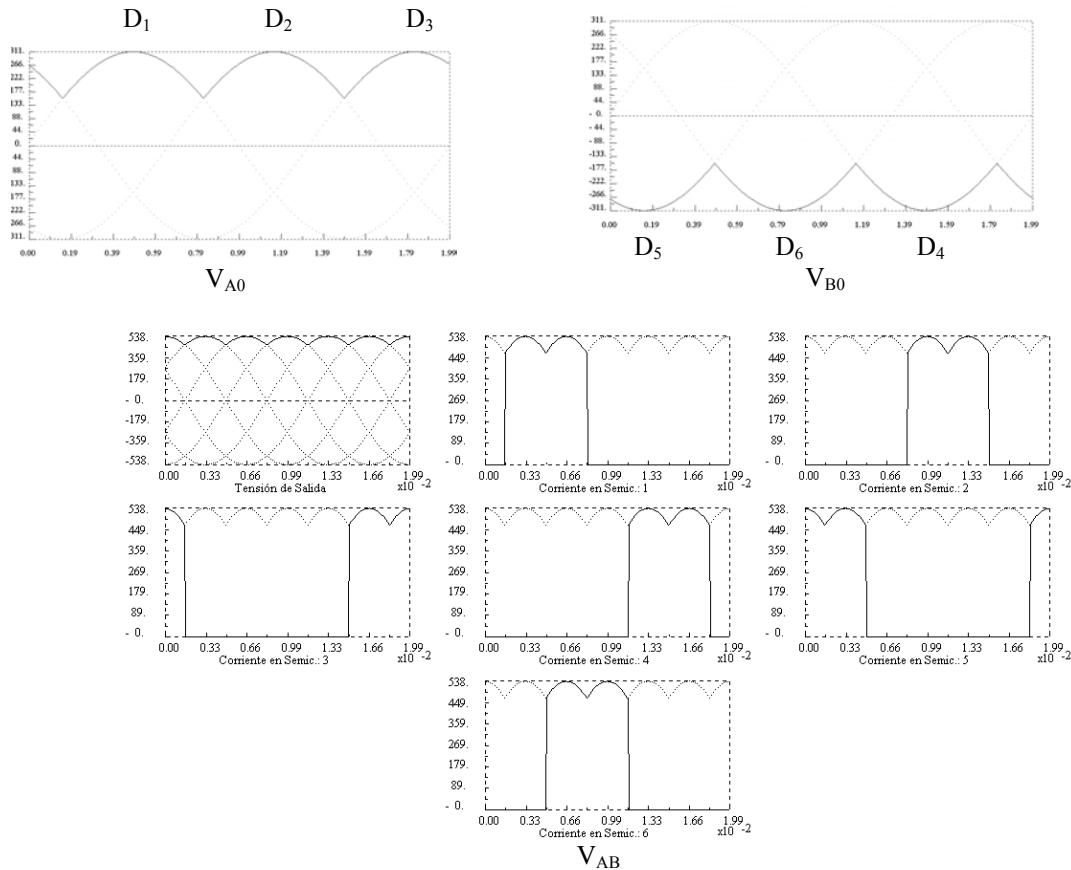
En un rectificador de este tipo intervienen las tensiones simples y las tensiones de compuestas, cuyos desfases se puede apreciar en la figura.

Este rectificador se puede considerar que es igual que dos rectificadores trifásicos simples en serie, donde uno tiene los cátodos unidos y el otro tiene los ánodos unidos, como se ve en la figura de la derecha. La tensión del rectificador trifásico simple superior V_{A0} está formada por las cúpulas de las tres tensiones simples (V_{10}, V_{20}, V_{30}). La tensión del rectificador trifásico simple inferior V_{B0} está formada por las cúpulas inferiores de las tensiones simples, ya que en este caso los diodos tienen los ánodos unidos, por lo que conduce, en cada instante, el diodo que tiene menor tensión aplicada al cátodo. En ambas figuras se indica qué diodo conduce en cada instante. El diodo D_1 conduce cuando la tensión V_{10} es la mayor de las tres tensiones simples, mientras que el diodo D_4 conduce cuando la tensión V_{10} es la menor de las tres tensiones simples.

La tensión de salida del puente rectificador V_{AB} es la diferencia las tensiones de cada rectificador simple $V_{A0} - V_{B0}$. La gráfica de la tensión del rectificador en puente V_{AB} se puede obtener, gráficamente, restando punto a punto las gráficas de las tensiones V_{A0} y V_{B0} .

La corriente de salida del rectificador en puente circula, en cada instante, por un diodo de los tres superiores y por un diodo de los tres inferiores. Cuando conducen, por ejemplo, los diodos D_1 y D_5 la tensión V_{A0} es V_{10} , la tensión V_{B0} es V_{20} y la tensión V_{AB} es V_{12} .





1.2. RECTIFICADORES CONTROLADOS

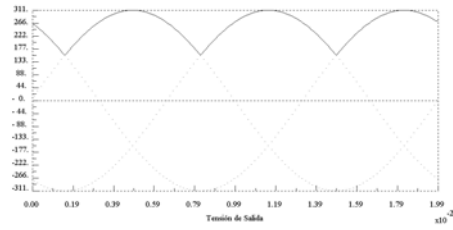
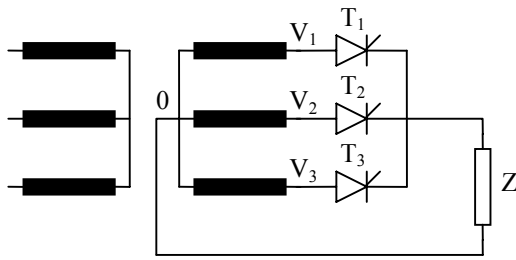
Los rectificadores controlados tienen las mismas topologías que los rectificadores no controlados, pero en vez de tener diodos, están compuestos por tiristores. Aparece una nueva variable que es el ángulo de disparo α de los tiristores. Éste es el ángulo que se retrasa el disparo de los tiristores respecto del punto de conmutación natural (instante de conmutación si se tratara de diodos). Cuando el ángulo de disparo es de 0° el comportamiento es igual que si se tratara de un rectificador de diodos.

a) Rectificador trifásico simple

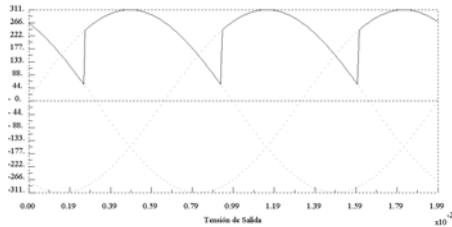
Cuando la carga es resistiva hay que tener en cuenta dos cosas. La primera es que la tensión de salida no puede ser negativa, por lo que cuando la tensión de salida se hace cero, el tiristor se corta. La segunda es que cuando un tiristor está conduciendo y se dispara otro, sólo uno permanecerá conduciendo, y será aquel que tenga mayor tensión de ánodo.

La primera figura de la derecha corresponde a carga resistiva y ángulo de disparo α de 0° . Los tiristores se disparan en el punto de conmutación natural y la forma de onda es igual que la de un rectificador de diodos. Cuando el ángulo de disparo es de 20° , los tiristores se disparan 20° después del punto de conmutación natural, por lo que durante 20° la tensión de salida sigue siendo igual que la tensión de la fase del tiristor anterior. Cuando el ángulo de disparo es de 60° , la tensión de salida se hace cero antes de que se dispare el tiristor siguiente, por lo que hay tiempos en que la tensión de salida es cero. Este caso se denomina “conducción discontinua”.

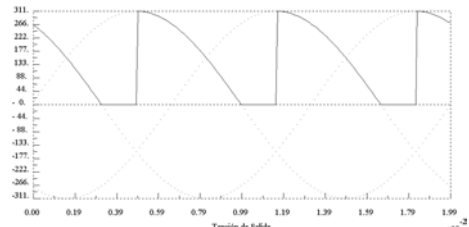
Cuando la carga es inductiva y el ángulo de disparo es menor de 30° , la tensión de salida no llega a hacerse cero y su forma de onda es igual que cuando la carga es resistiva. La forma de onda se hace diferente cuando el ángulo supera dicho valor. Como la corriente de salida es constante siempre debe de conducir algún tiristor. Por ello, el tiristor que viene conduciendo permanece en este estado hasta que se dispara el siguiente tiristor, aunque la tensión de su fase se haga negativa, como se observa en la figura.



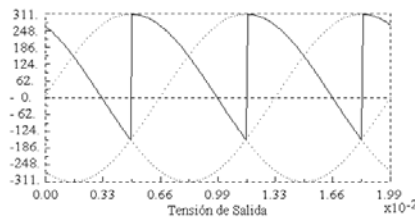
$Z = R, \alpha = 0^\circ$



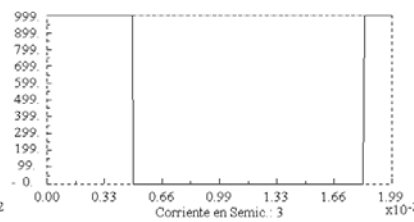
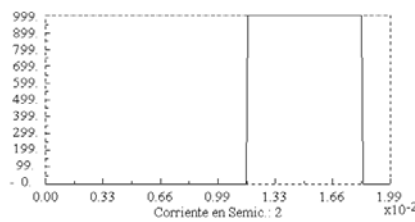
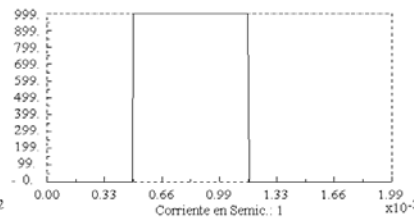
$Z = R, \alpha = 20^\circ$



$Z = R, \alpha = 60^\circ$



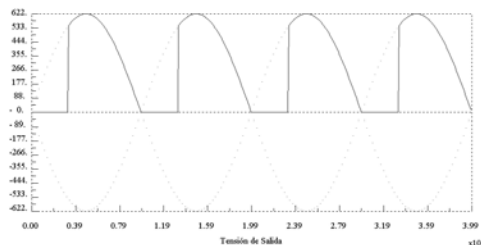
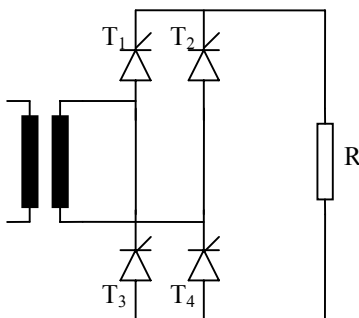
$Z: I = \text{cte}, \alpha = 60^\circ$



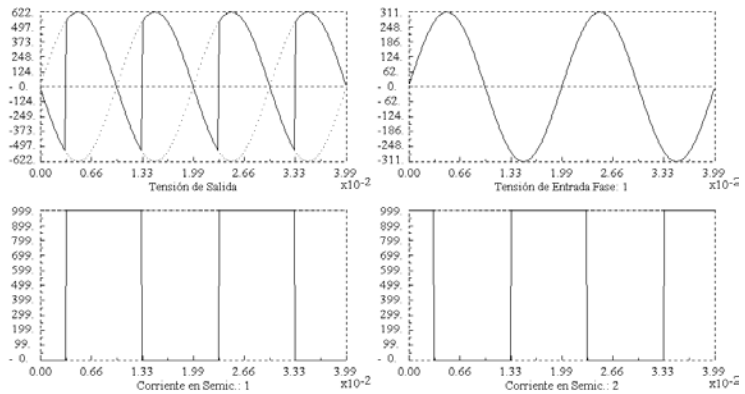
b) Rectificador bifásico en puente

En el rectificador en puente bifásico los tiristores se disparan por pares, los tiristores T_1 y T_4 se disparan simultáneamente y lo mismo ocurre con T_2 y T_3 . Cuando la carga es resistiva y el ángulo de disparo de 60° , se dispara cada par de tiristores 60° después del punto de conmutación natural (diodos). Cuando la tensión se hace cero, los tiristores se cortan.

Cuando la carga es inductiva de valor 1000 A , la corriente por la carga no se puede cortar, por lo que siempre tiene que conducir un tiristor superior y un tiristor inferior. Los tiristores T_1 y T_4 no se cortan, aunque la tensión de entrada se haga negativa, hasta que se disparan los tiristores T_2 y T_3 .



$Z = R, \alpha = 60^\circ$



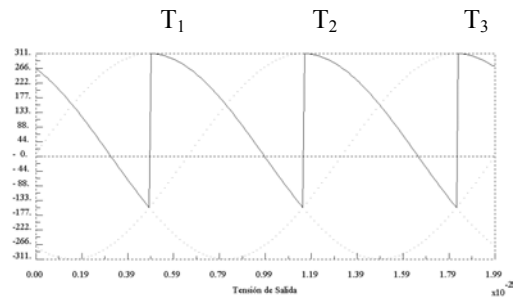
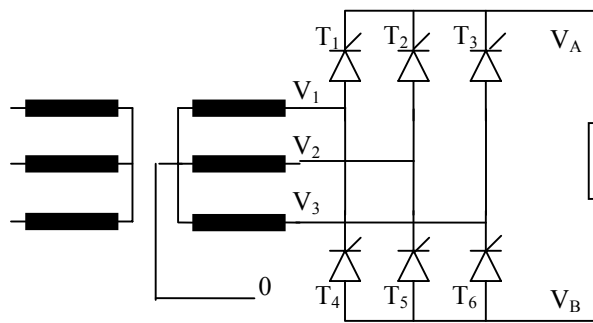
$$Z: I = \text{cte}, \alpha = 60^\circ$$

c) Rectificador trifásico en puente

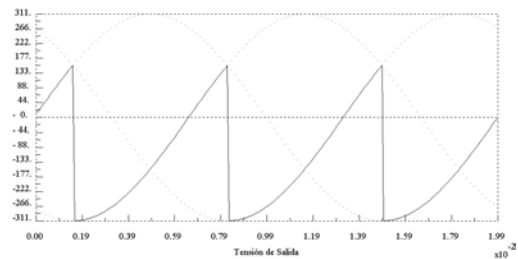
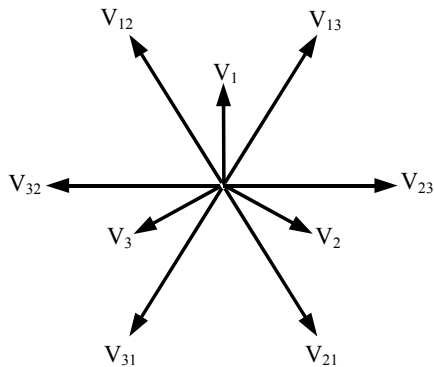
El rectificador trifásico en puente se puede considerar compuesto por dos rectificadores trifásicos simples conectados en serie, como se ha indicado en el caso del rectificador no controlado. La tensión de salida del puente rectificador V_{AB} es la diferencia de las tensiones de cada rectificador simple $V_{A0} - V_{B0}$. En las figuras aparecen las gráficas de estas tensiones (V_{A0} , V_{B0} y V_{AB}) cuando el ángulo de disparo es de 60° . Se indican cuáles son los tiristores que conducen en cada instante. En la tercera gráfica aparece la tensión de salida V_{AB} junto con las corrientes de cada tiristor, cuando la carga es resistiva. Los intervalos de conducción de cada tiristor coinciden con los que aparecen en las dos primeras gráficas.

Las generatrices de la tensión de salida del rectificador en puente V_{AB} son las tensiones compuestas, V_{12} , V_{13} , V_{23} , V_{21} , V_{31} y V_{32} . Cuando la generatriz que aparece en la tensión de salida es V_{12} , las tensiones V_{A0} y V_{B0} son, respectivamente, V_1 y V_2 . Los tiristores que se encuentran en conducción son T_1 y T_5 .

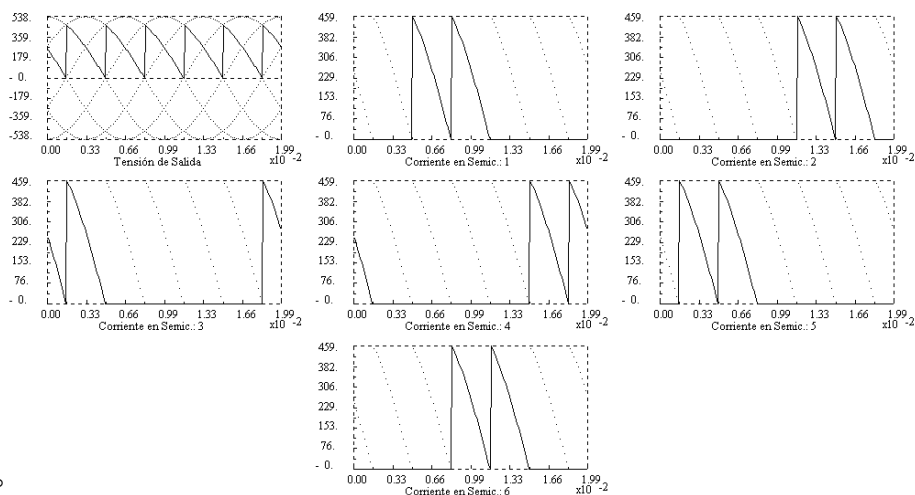
Si la carga es resistiva y el ángulo de disparo mayor de 60° , el rectificador presenta conducción discontinua, la tensión de salida se hace cero durante un cierto ángulo, como se puede ver en la figura correspondiente (90°). Cuando la carga es inductiva la tensión no es nunca cero, ya que siempre tiene que conducir un tiristor superior y uno inferior, como se puede apreciar en la última figura para un ángulo de 90° .



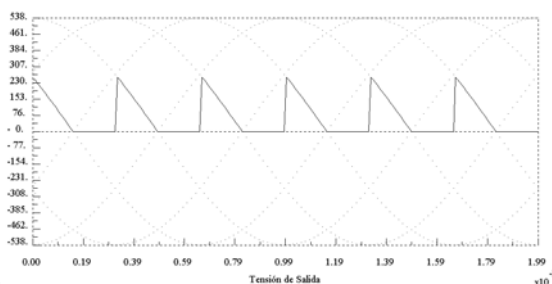
$V_{A0}, \alpha = 60^\circ$



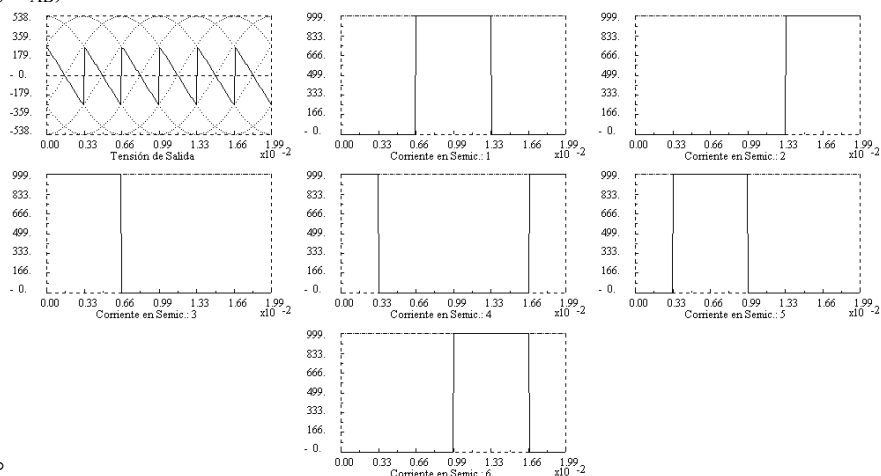
$V_{B0}, \alpha = 60^\circ$



$Z = R, V_{AB}, \alpha = 60^\circ$



$Z = R, V_{AB}, \alpha = 90^\circ$



$Z: I = \text{cte}, V_{AB}, \alpha = 90^\circ$

1.3. RECTIFICADORES SEMICONTROLADOS

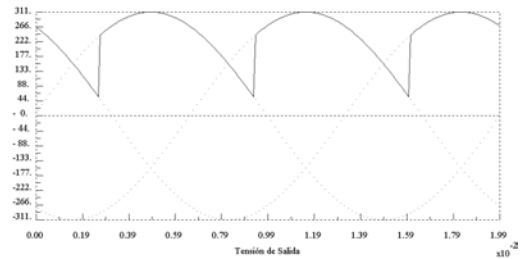
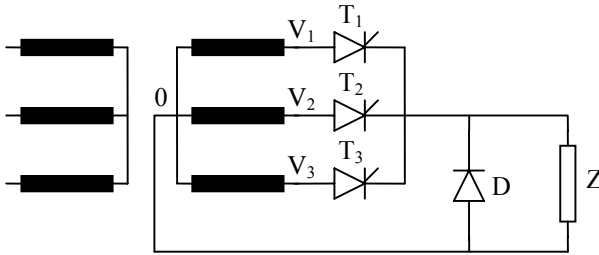
Los rectificadores semicontrolados tienen diodos y tiristores. Sus formas de onda son similares a las de los rectificadores con carga resistiva aunque presenten carga inductiva. Esto se consigue mediante el efecto de libre circulación de corriente que proporcionan los diodos.

a) Rectificador trifásico simple semicontrolado

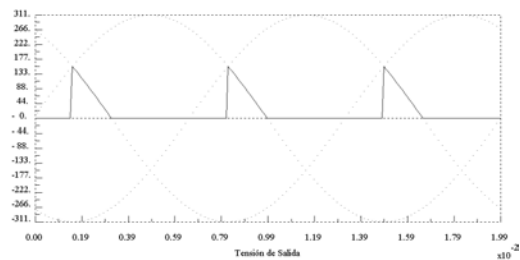
En los rectificadores simples, la topología semicontrolada sitúa un diodo en paralelo con la carga, en la posición que se observa en la figura. Si la carga es resistiva, entonces la tensión de salida será mayor que cero, por lo que el diodo no conducirá nunca. Cuando la carga es inductiva, el diodo conduce la corriente de la carga al hacerse cero la tensión de salida, permitiendo que los tiristores se corten al llegar a cero la tensión de su fase.

Cuando el ángulo de disparo es 20° , la tensión de salida es positiva, independientemente del tipo de carga, y el diodo siempre está cortado. Cuando el ángulo de disparo supera los 30° (en la figura 120°), la tensión se hace nula durante un cierto ángulo. Mientras la tensión de salida es positiva, conduce el tiristor correspondiente a la generatriz de la tensión simple, por ejemplo, cuando conduce T_1 aparece en la salida

la tensión V_1 . Al llegar la tensión a cero, el comportamiento es diferente según la carga sea resistiva o inductiva. Si es resistiva, el tiristor se extingue y no hay corriente hasta que se dispare el tiristor siguiente. Si la carga es inductiva, el tiristor se extingue y entra en conducción el diodo, que se encarga de suministrar una vía de circulación a la corriente de la carga.



$$\alpha = 20^\circ$$



$$\alpha = 120^\circ$$

b) Rectificador en puente trifásico semicontrolado

El rectificador en puente trifásico semicontrolado tiene tres tiristores en la parte superior, que forman un rectificador trifásico simple controlado, mientras que los tres diodos de la parte inferior forman un rectificador trifásico simple no controlado. La modificación del ángulo de disparo sólo afecta a los tiristores, los diodos conmutan siempre en el punto de conmutación natural (0°).

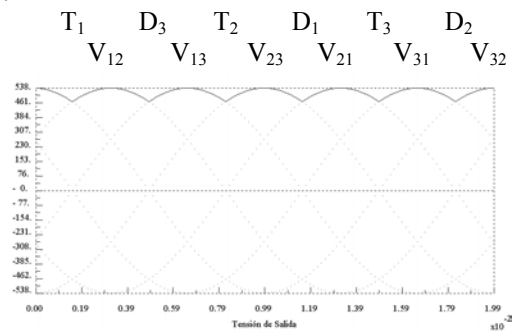
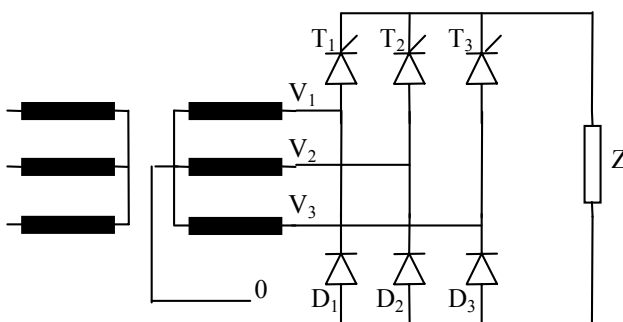
En todas las gráficas que se van a presentar se va a suponer que la carga es inductiva.

Cuando el ángulo de disparo es de 0° , los diodos y los tiristores conmutan en el punto de conmutación natural. En la gráfica se ha indicado cuáles son las generatrices de la tensión compuesta que aparecen en la tensión de salida en cada instante, junto con el instante en que entra en conducción cada semiconductor.

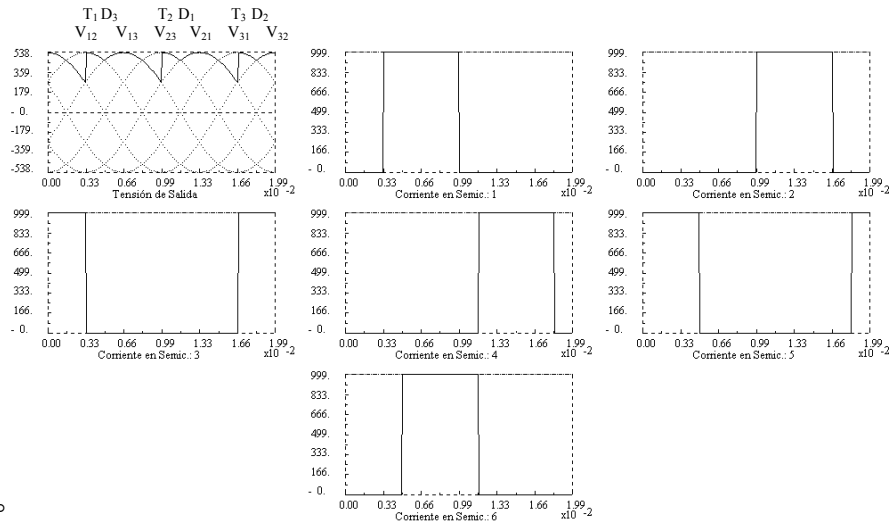
Si el ángulo es de 30° , el disparo de los tiristores se retrasa 30° , pero la conmutación de los diodos permanece en el mismo punto, como puede verse en la gráfica correspondiente. En ella se ha indicado cuándo entra en conducción cada semiconductor. También se puede ver el intervalo de conducción de cada semiconductor en las gráficas de corriente que acompañan a la de la tensión de salida.

Cuando el ángulo es de 90° , la lógica de funcionamiento es igual que en los dos casos anteriores, aunque el efecto es un poco diferente. El disparo de los tiristores se retrasa 90° , mientras que los diodos conmutan en su punto de conmutación natural, esto hace que el disparo de cada tiristor se produzca después de la conmutación del diodo que iba a continuación. Por ello, hay un pequeño tiempo en que conducen simultáneamente el diodo y el tiristor de la misma rama, motivo por el cual la tensión de salida es nula durante ese tiempo. Hay que notar que, aunque la tensión de salida es nula, la corriente no lo es. El motivo es que la carga es inductiva.

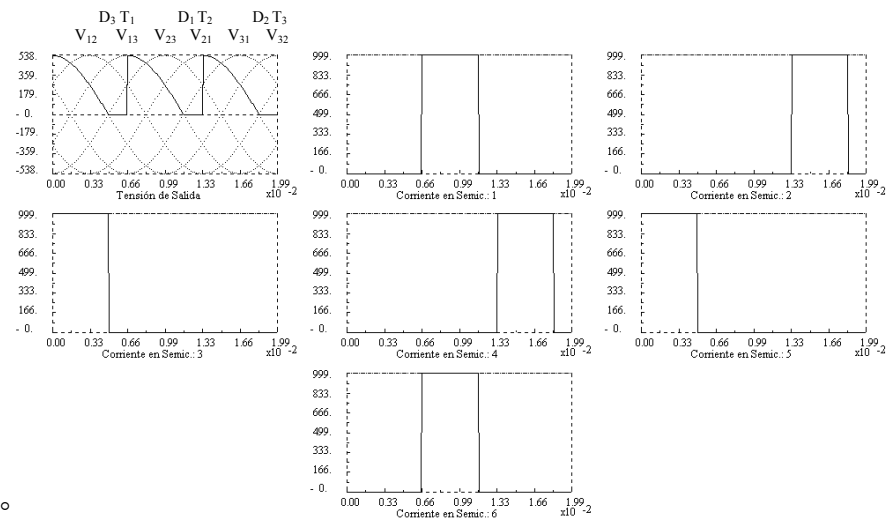
Si la carga fuera resistiva, las formas de onda serían iguales, pero cuando la tensión de salida es nula, no habría conducción de corriente por los semiconductores.



$$\alpha = 0^\circ$$



$\alpha = 30^\circ$



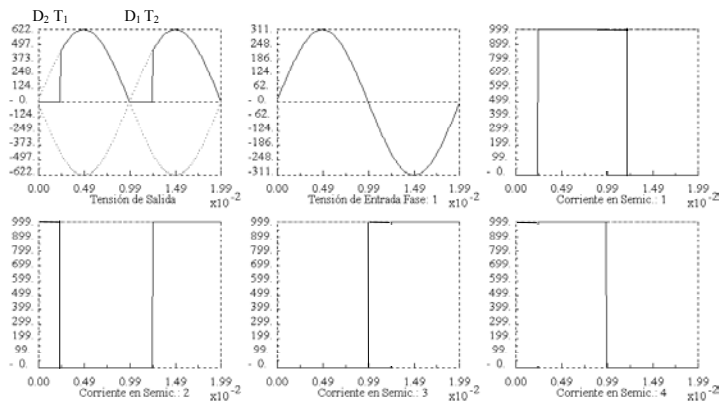
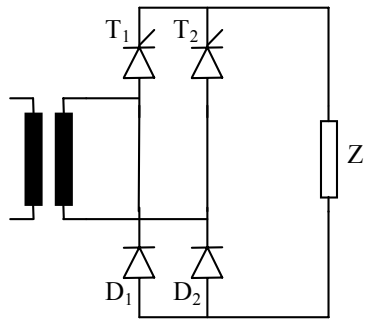
$\alpha = 90^\circ$

c) Rectificador en puente bifásico semicontrolado

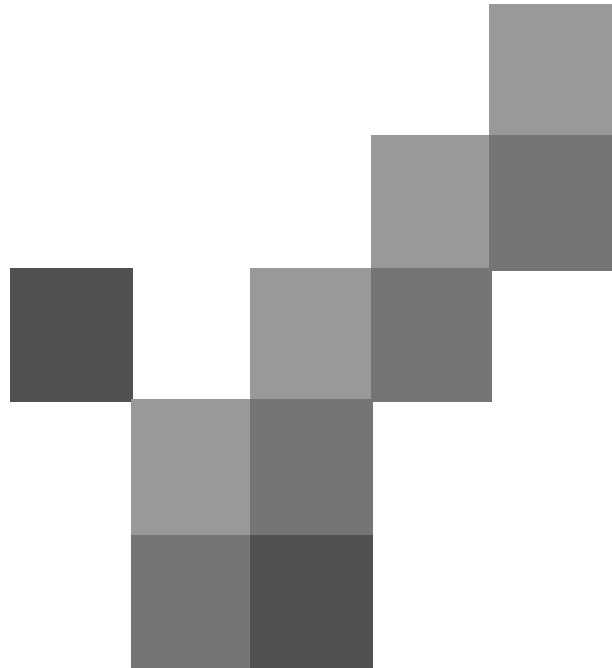
Como se indicaba en otros rectificadores en puente bifásico, también se puede denominar rectificador monofásico en puente semicontrolado. Igual que ocurre en el rectificador en puente trifásico, este rectificador está formado por dos rectificadores simples, uno superior constituido por los tiristores y uno inferior por los diodos. El punto de conmutación de los tiristores se controla mediante el ángulo de disparo, mientras que los diodos conmutan en el punto de conmutación natural.

En la figura aparecen las tensiones y corrientes cuando el ángulo de disparo es de 45° y la carga es inductiva. Cuando la tensión de salida es positiva, conducen un tiristor y un diodo cruzados. Pero cuando la tensión se hace nula, entra en conducción el diodo de la misma rama del tiristor que está conduciendo, motivo por el cual la tensión de salida se hace nula. Aunque la tensión de salida sea cero, la corriente de salida no se anula ya que la carga es inductiva, como se puede ver en las gráficas de las corrientes.

Si la carga es resistiva, la corriente se hace cero cuando la tensión se anula.



$\alpha = 45^\circ$



CAPÍTULO 2

CONVERTIDORES CA/CC

(RECTIFICADORES)

TEXTO:

S. Lorenzo, J.M. Ruiz, A. Martín. Simulación, Control Digital y Diseño de *Convertidores Electrónicos de Potencia mediante PC*. Departamento de Tecnología Electrónica. Universidad de Valladolid

pág. 80 a 88, pág. 237 a 255, pág. 257 a 260, pág. 264 a 281, pág. 288 a 293, pág. 300 a 302

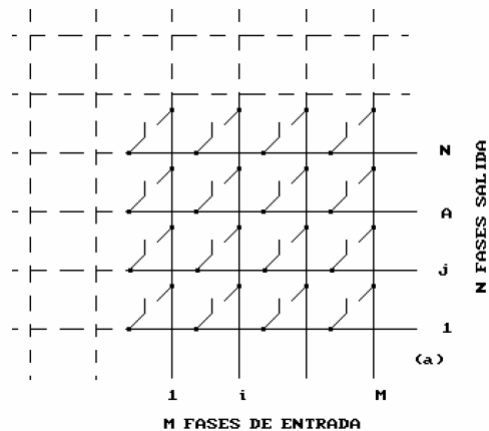


Índice

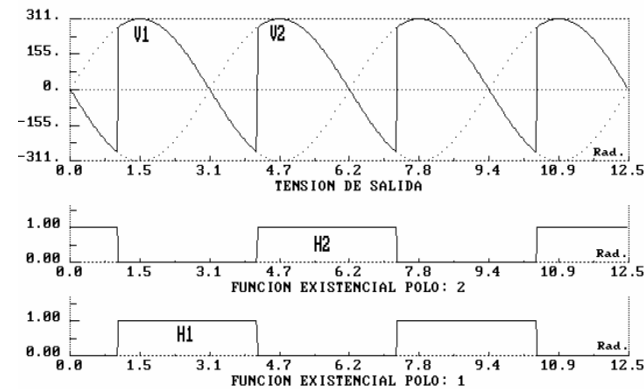
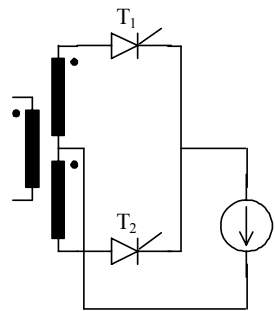
- Topologías fundamentales
- Convertidores con matriz general de conversión CA/CC
- Convertidores en puente
- Rectificadores con carga L-R-E
- Rectificadores de cuatro cuadrantes

Convertidores con matriz general de conversión (I)

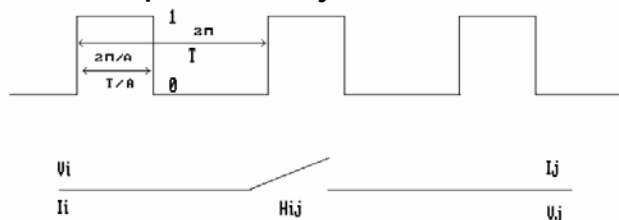
Matriz de conversión



Ejemplo: rectificador bifásico con carga inductiva



Polo de potencia y Función Existencial



A = n° fases
Duración $2\pi/A$

Variables Independientes: Ventrada e Isalida
Variables dependientes: Vsalida e Ientrada

Vsalida (suma de trozos de la tensión de entrada)

$$V_j = \sum_{i=1}^M H_{ij} \cdot V_i \rightarrow j = 1, \dots, N$$

Ientrada (suma de trozos de la corriente de salida)

$$I_i = \sum_{j=1}^N H_{ij} \cdot I_j \rightarrow i = 1, \dots, M$$

Convertidores con matriz general de conversión: formulación matemática (II)

Desarrollo en serie de Fourier 

$$H(\omega t) = \sum_{n=0}^{\infty} [C_n \cos(n\omega t) + S_n \text{sen}(n\omega t)]$$

Coefficientes del desarrollo en serie

$$S_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} H \text{sen}(n\omega t) dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/A}^{\pi/A} H \text{sen}(n\omega t) d(\omega t) = 0$$

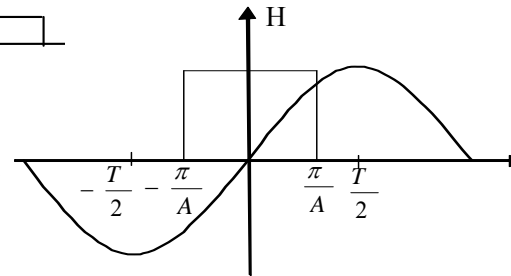
$$C_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} H \cos(n\omega t) dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/A}^{\pi/A} H \cos(n\omega t) d(\omega t) = \frac{2}{\pi} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n}$$

$$C_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} H dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/A}^{\pi/A} H d(\omega t) = \frac{1}{A}$$

Expresión de la Función Existencial

$$H(\omega t) = \frac{1}{A} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} \right] \cos(n\omega t)$$

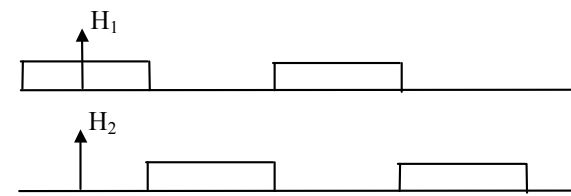
Función impar



Función Existencial de A fases (desfase $2\pi/A$)

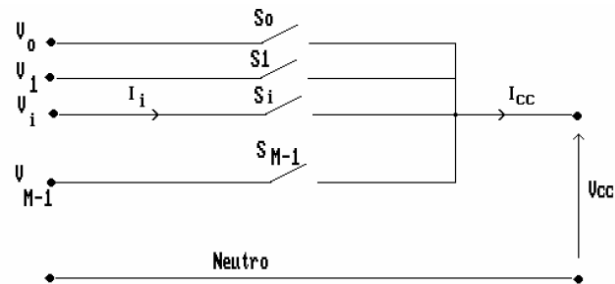
$$H_K = \frac{1}{A} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} \right] \cos\left[n\left(\omega t - \frac{2K\pi}{A}\right)\right]$$

$\sum_{K=0}^{A-1} H_K = 1$ En cada instante sólo una función existencial vale 1



Convertidores con matriz de conversión CA/CC

Rectificador con matriz de conversión o simple Voltaje de las fases de entrada: $V_i = V \cos\left(\omega t - \frac{2i\pi}{A}\right)$



Voltaje de salida

$$V_{CC} = \sum_{i=0}^{A-1} H_i \cdot V_i = \sum_{i=0}^{A-1} \left[\frac{1}{A} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\sin\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} \right] \cos\left[n\left(\omega t - \frac{2i\pi}{A} - \alpha\right)\right] \right] \cdot V \cos\left(\omega t - \frac{2i\pi}{A}\right)$$

$$V_{CC} = V_{CC, CONT} + V_{CC, ARM}$$

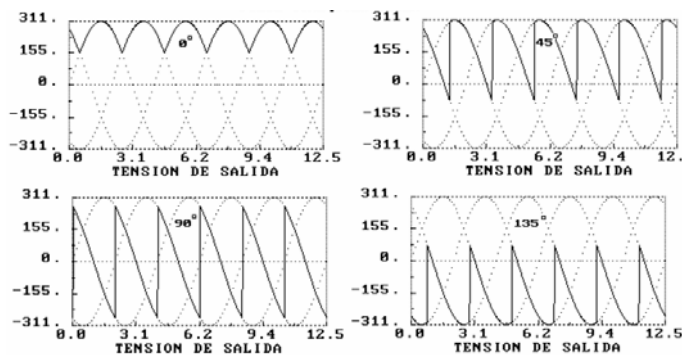
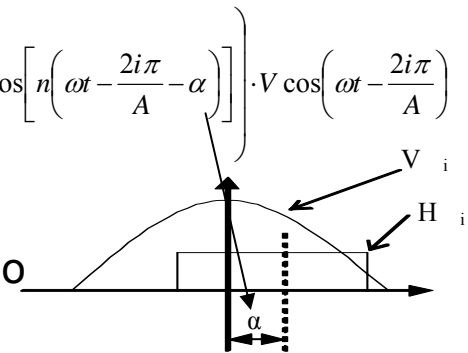
Voltaje de salida, valor medio

$$V_{CC, CONT} = \frac{AV}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{A}\right) \cos \alpha$$

Voltaje de salida, armónicos

$$V_{CC, ARM} = V_{CC, CONT}(\alpha = 0) \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^p \left[\frac{2}{(pA)^2 - 1} \right] \sqrt{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha (pA)^2} \cos(pA\omega t - \beta)$$

$$|V_{CC, ARM}(p)| = V_{CC, CONT}(\alpha = 0) \left[\frac{2}{(pA)^2 - 1} \right] \sqrt{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha (pA)^2}$$

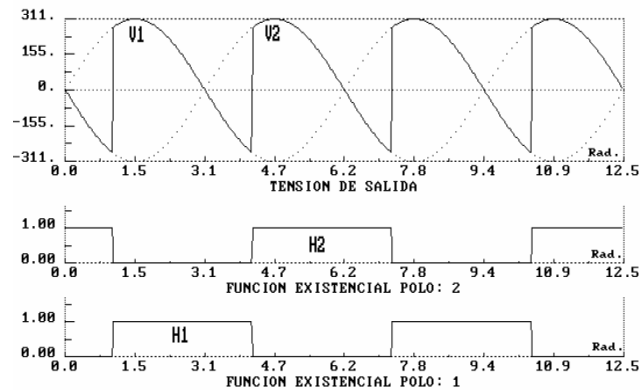


Vin: 50 Hz Vout: 150 Hz

p=1, 2, 3, ... → armónico 150, 300, 450, ... Hz

Convertidores con matriz de conversión CA/CC. Conducción continua/discontinua

Conducción continua

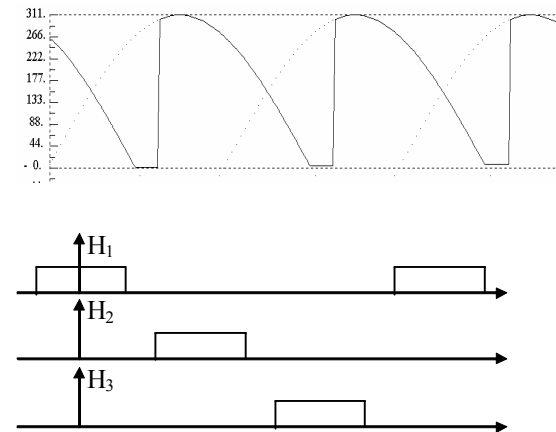


$$V_{CC} = \sum_{i=0}^{A-1} H_i \cdot V_i$$

$$V_{CC, CONT} = \frac{AV}{\pi} \text{sen}\left(\frac{\pi}{A}\right) \cos \alpha$$

$$|V_{CC, ARM}(p)| = V_{CC, CONT}(\alpha = 0) \left[\frac{2}{[(pA)^2 - 1]} \right] \sqrt{\cos^2 \alpha + \text{sen}^2 \alpha (pA)^2}$$

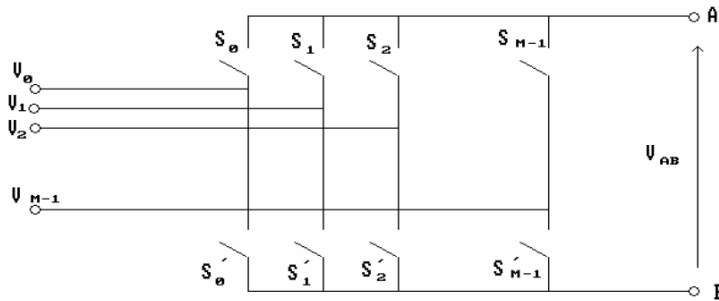
Conducción discontinua



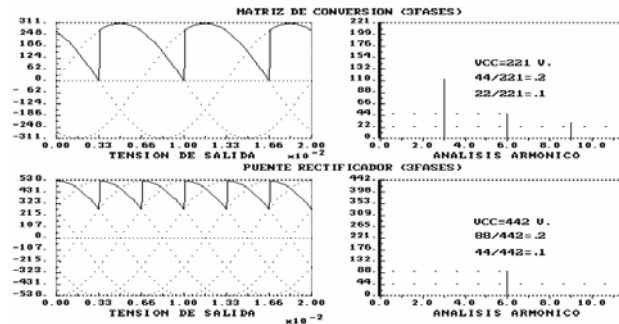
$$V_{CC} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt = \frac{1}{T} 3 \int_{75}^{180} V \text{sen} x dx$$

Convertidores en puente

Rectificador en puente



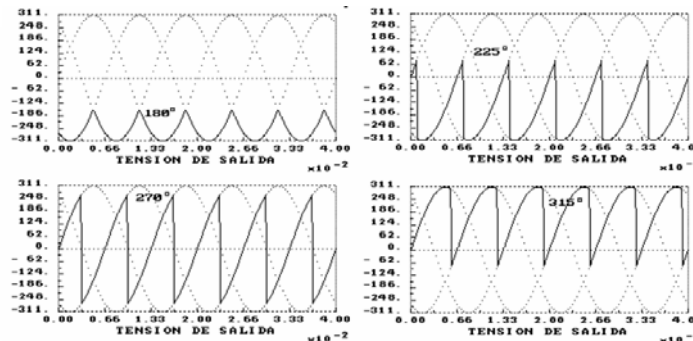
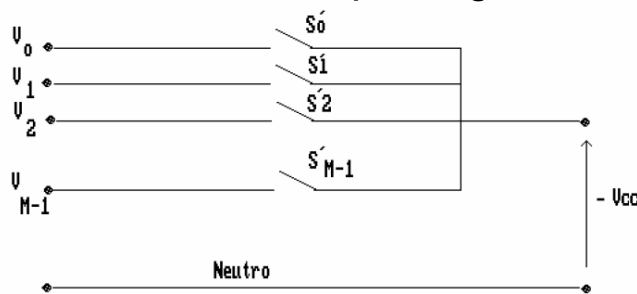
Armónicos



R. simple
150, 300, 450, ... Hz
 $p=1, 2, 3, \dots$

R. en puente
300, 600, 900, ... Hz
 $p=2, 4, 6, \dots$

Rectificador simple negativo



$$V_{CC, CONT} = \frac{AV}{\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{A}\right) \cos(\pi + \alpha) = -\frac{AV}{\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{A}\right) \cos(\alpha)$$

$$V_{CC, CONT, PUENTE} = V_{CC, CONT, AN} - V_{CC, CONT, BN} = 2 \frac{AV}{\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{A}\right) \cos(\alpha)$$

$$V_{CC, ARM, PUENTE} = \frac{1}{2} V_{CC, CONT, PUENTE}(\alpha = 0) \sum_{p=1}^{\infty} [1 + \cos(pA\pi)] (-1)^p \frac{2}{[(pA)^2 - 1]} \sqrt{\cos^2 \alpha + \operatorname{sen}^2 \alpha (pA)^2} \cos(pA\omega t - \beta)$$

$$|V_{CC, ARM, PUENTE}(p)| = V_{CC, CONT, PUENTE}(\alpha = 0) \frac{2}{[(pA)^2 - 1]} \sqrt{\cos^2 \alpha + \operatorname{sen}^2 \alpha (pA)^2}$$

Capítulo 2: Convertidores CA/CC
(Rectificadores)

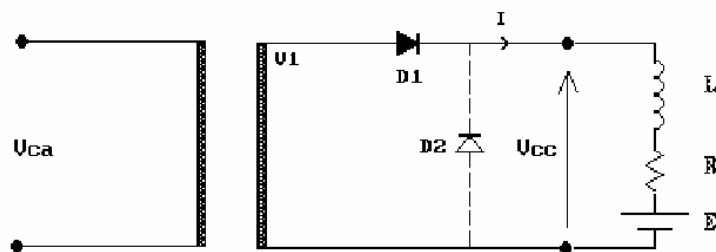


Rectificadores con carga L-R-E

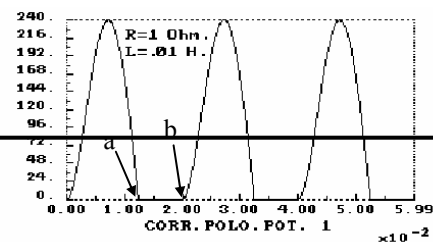
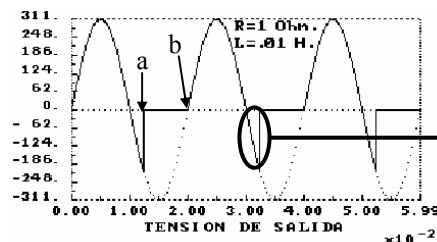
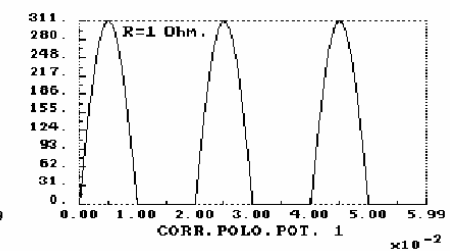
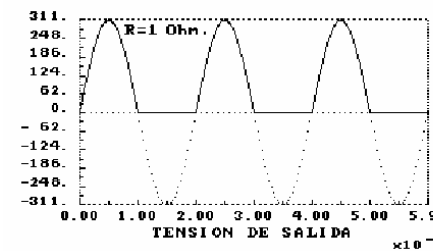
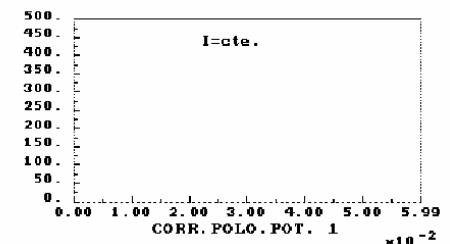
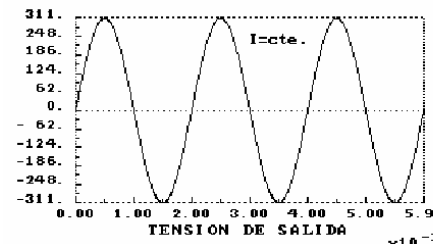
- Rectificador monofásico con carga L-R-E
- Rectificador bifásico simple con carga L-R-E
- Rectificador trifásico simple con carga L-R-E
- Rectificador trifásico simple controlado con carga L-R-E

Rectificadores con carga RLE

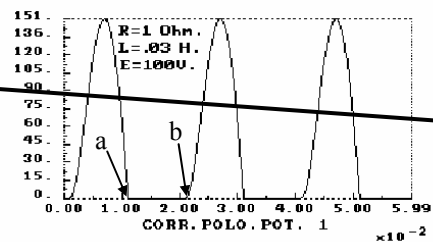
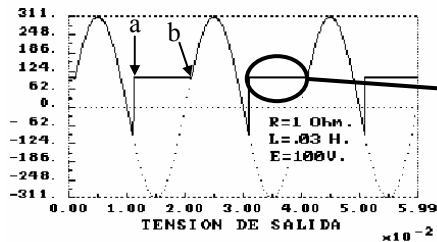
Rectificador monofásico



$$V_{cc} = L \frac{dI}{dt} + IR + E$$



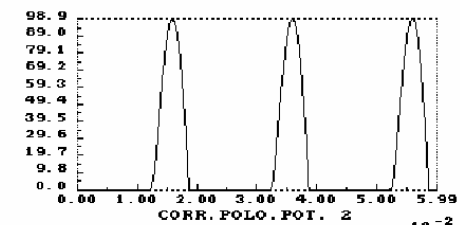
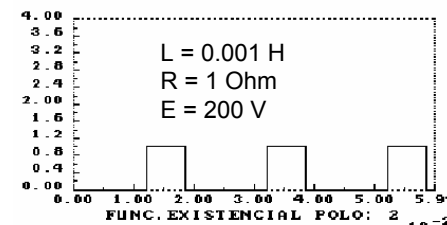
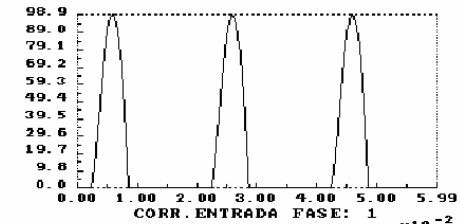
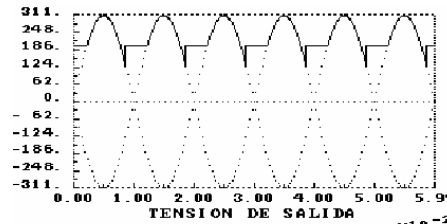
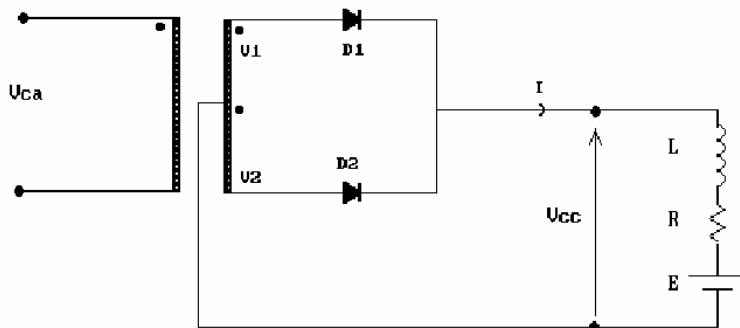
a: extinción de la corriente del diodo
 b: puesta en conducción del diodo
 Pico causado por la bobina



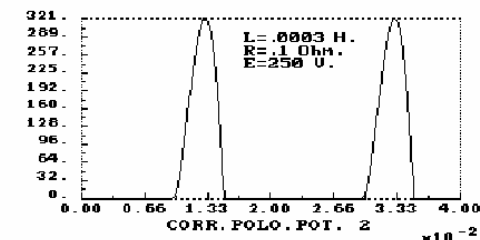
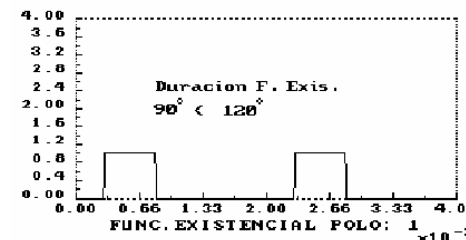
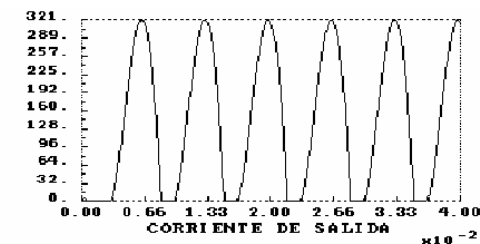
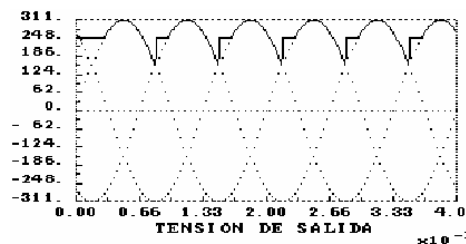
a ↔ b: Vo = E

Rectificadores con carga RLE

Rectificador bifásico simple

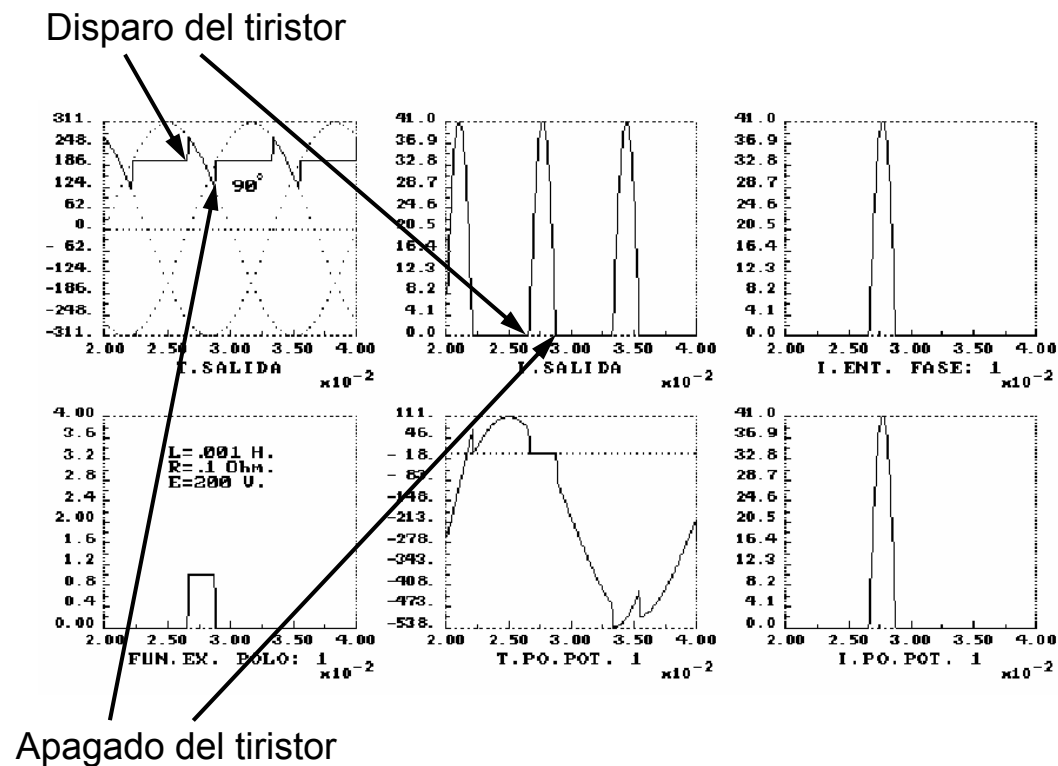


Rectificador trifásico simple

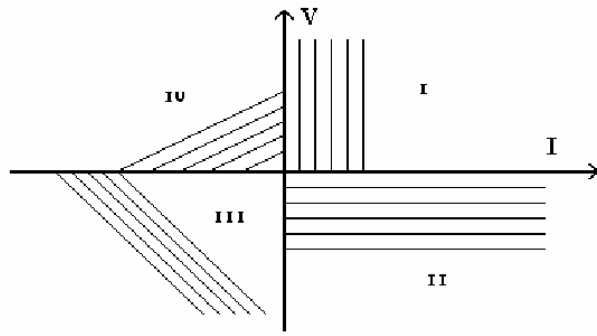


Rectificadores con carga RLE

Rectificador trifásico simple controlado



Rectificadores de cuatro cuadrantes

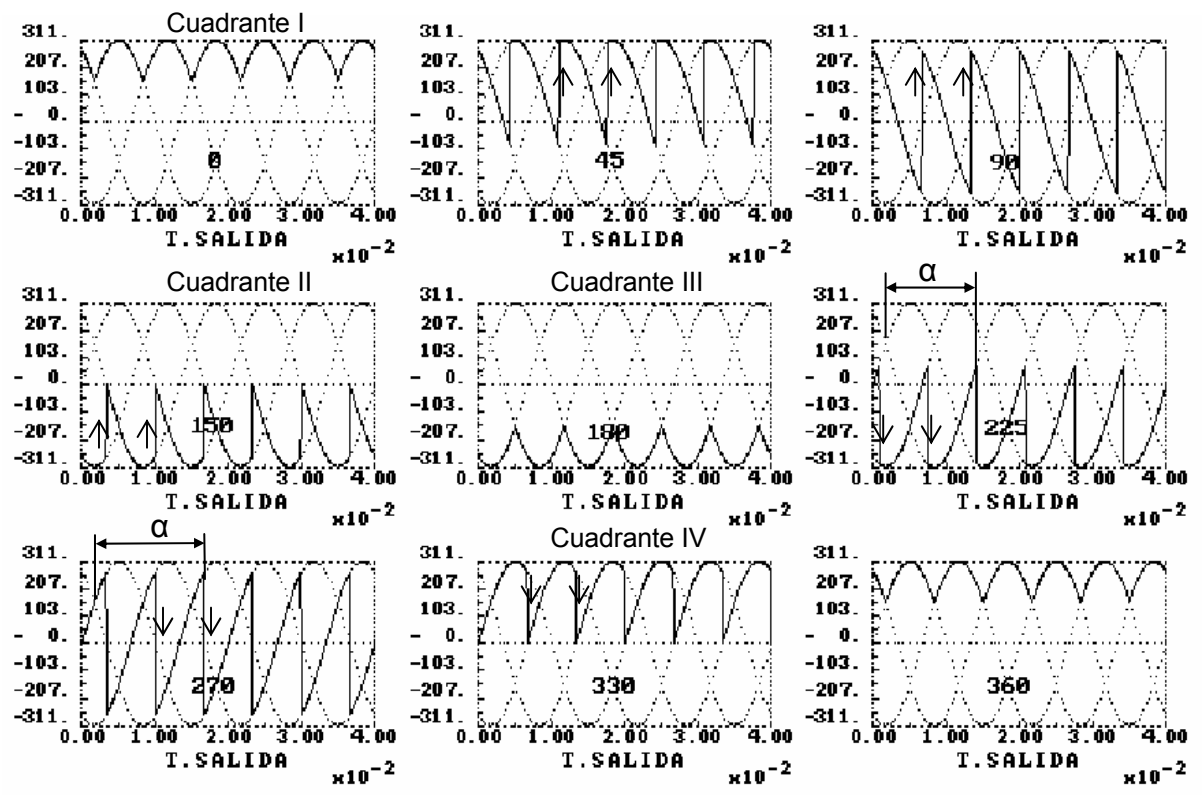
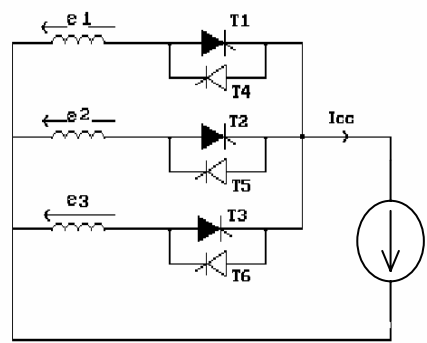


Dirección del flujo de potencia:

I y III: red → carga

II y IV: carga → red

Rectificador trifásico simple



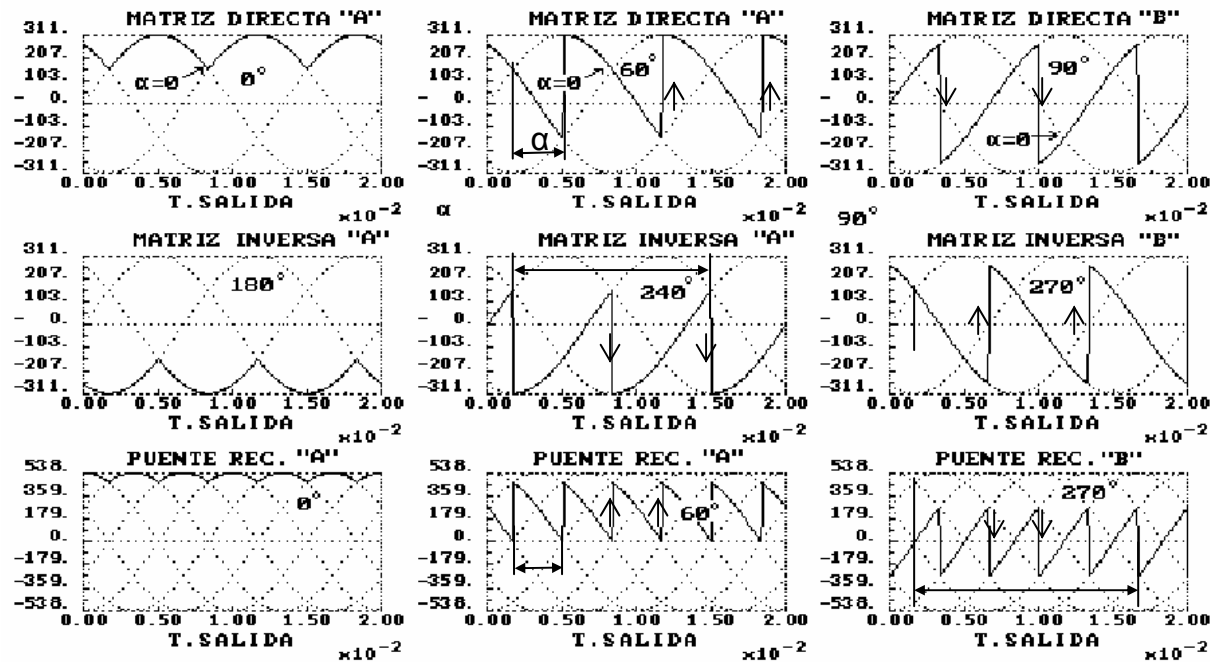
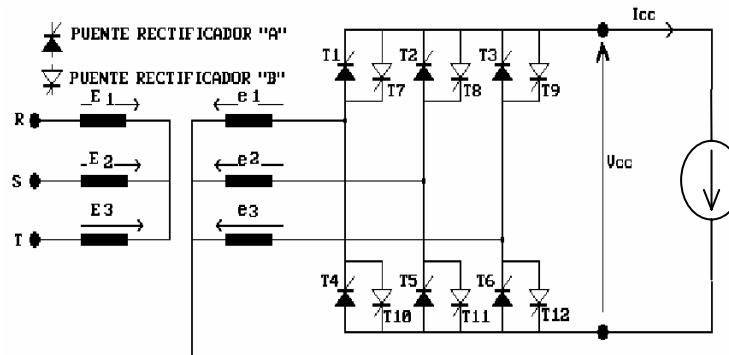
$\alpha: 0-179^\circ, I_{cc} > 0, T1-T2-T3$
 $\alpha: 180-359^\circ, I_{cc} < 0, T4-T5-T6$

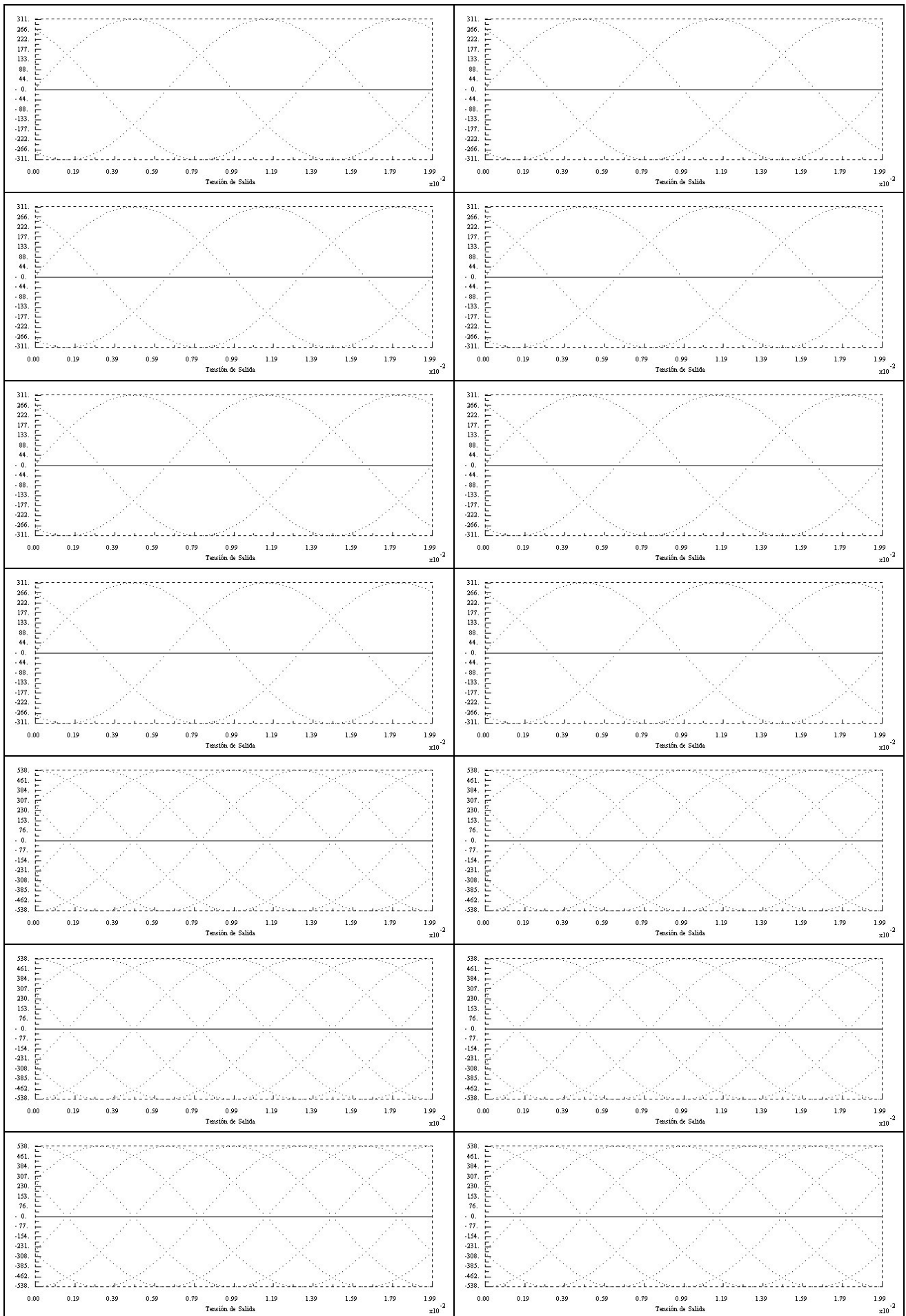
Rectificadores de cuatro cuadrantes

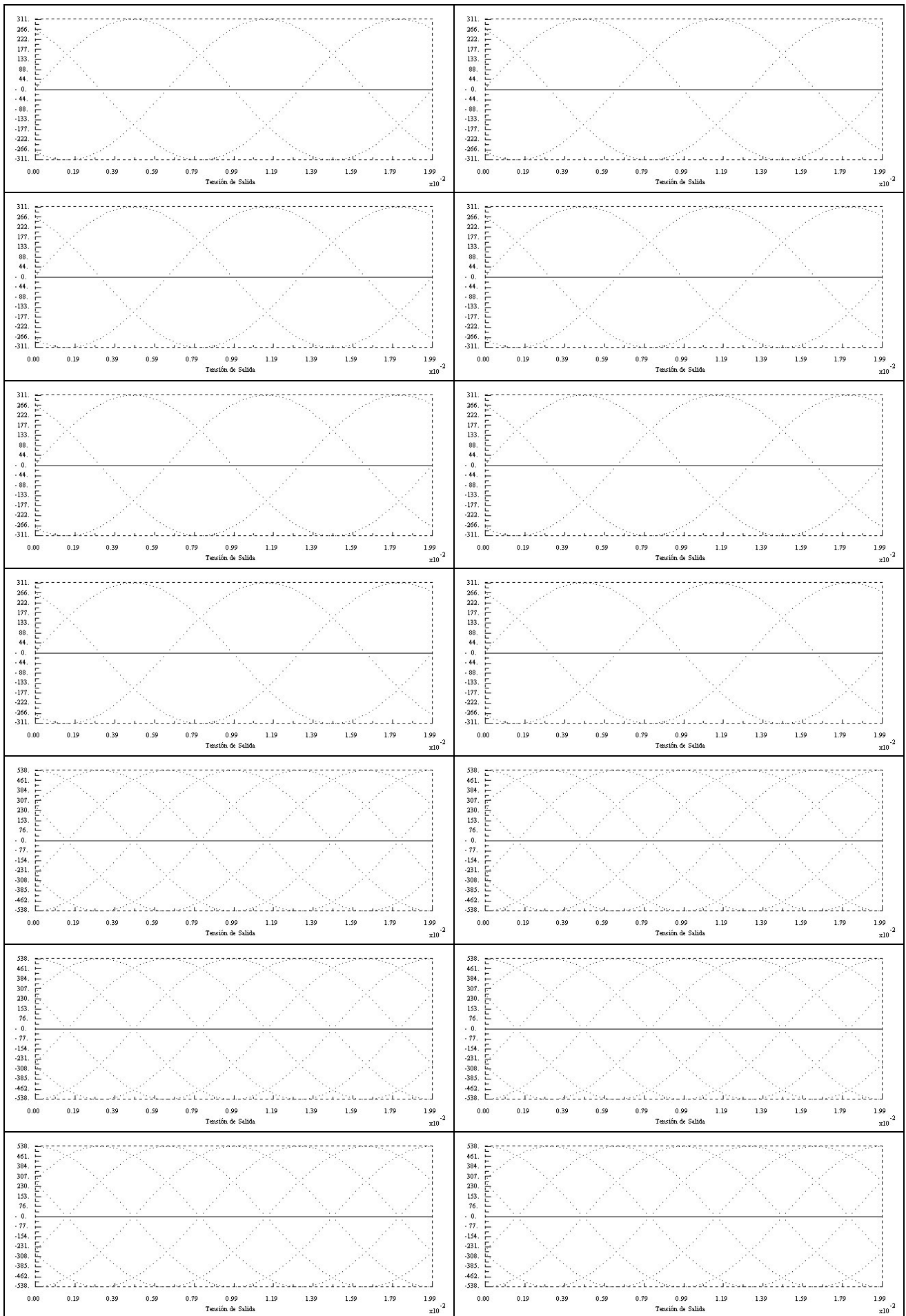
Rectificador trifásico en puente

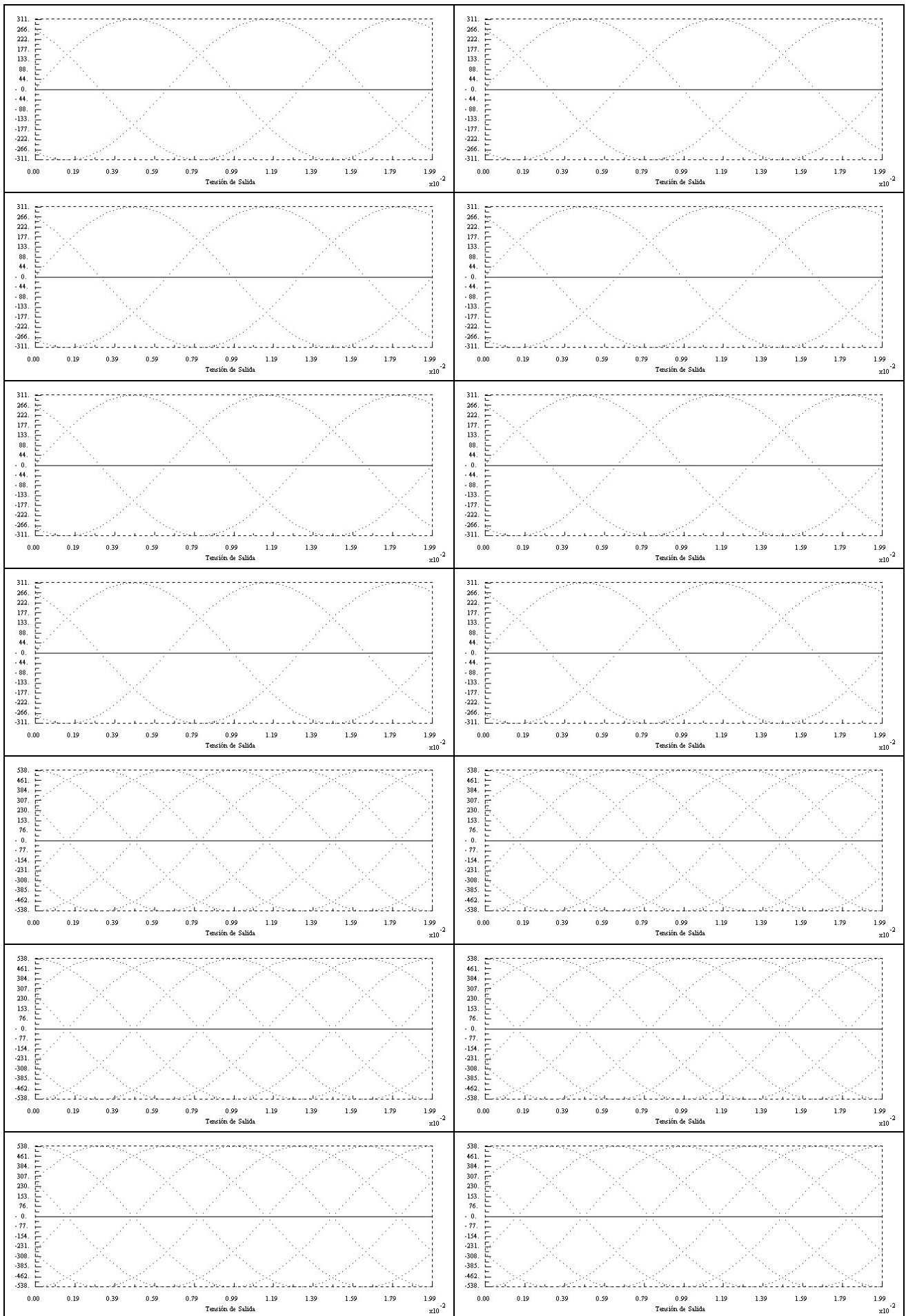
$\alpha: 0-179^\circ, I_{cc} > 0, T1$ a $T6$

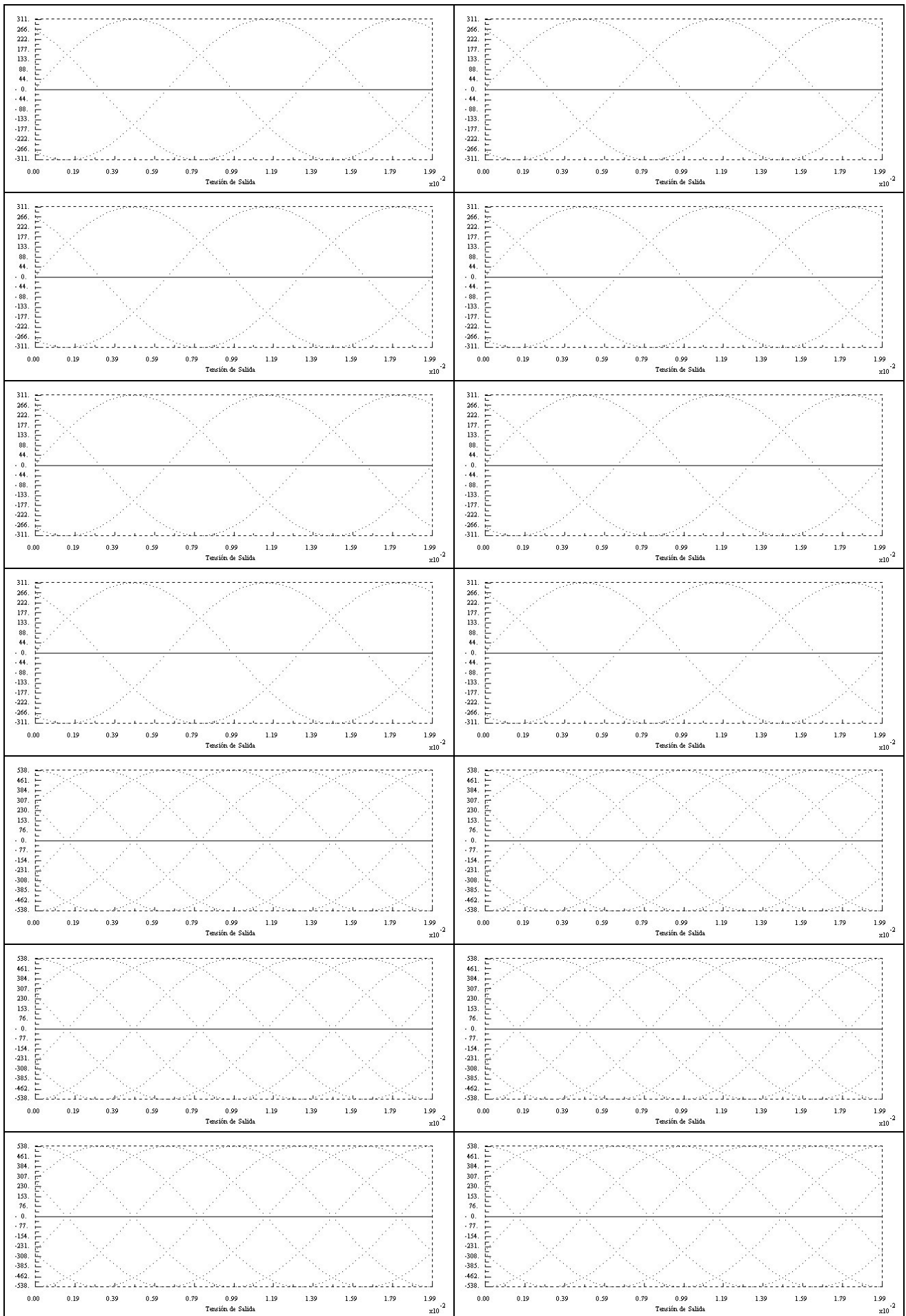
$\alpha: 180-359^\circ, I_{cc} < 0, T7$ a $T12$











ORGANIZACIÓN DEL CAPÍTULO DE RECTIFICADORES

CLASE 1 - Topologías fundamentales: Rectificadores no controlados

PARTE 1	PARTE 2	PARTE 3
Monofásico Bifásico simple	Trifásico simple	Hexafásico Bifásico en puente

Organización¹:

Tarea del grupo: aprender los contenidos de la documentación y saber explicar de forma somera el funcionamiento de uno cualquiera de los rectificadores.

Lectura individual del material: 5'

Reunión de expertos:

Discusión del material: 10'

Elaboración de un guión (esquema, gráfico, etc.) para explicar el material en 5' a los compañeros del grupo original: 5'

Reunión del grupo original:

Presentación de los esquemas: 20'

Explicación de uno de los cinco esquemas por parte de un miembro del grupo elegido aleatoriamente: 5'

Reflexión sobre el trabajo en grupo: 5' (Cada miembro del grupo debe mencionar una cosa que ha ido bien y una que ha ido mal en el trabajo realizado por el grupo.)

Roles: Para la reunión de expertos (roles estáticos durante la reunión):

Rol 1: Explica el contenido del material asignado tal y como él lo entiende

Rol 2: Pide aclaraciones, y contribuye con su propia opinión sobre el tema

Rol 3: Toma notas para preparar la síntesis, y **controla el tiempo**

Para la reunión del grupo (van rotando cada vez que se discute uno de los esquemas):

Rol 1: Explica su esquema usando el guión elaborado en la reunión de expertos

Rol 2: Pide aclaraciones

Rol 3: **Controla el tiempo**

CLASE 2: - Topologías fundamentales: Rectificadores en puente trifásico no controlado y rectificadores controlados

PARTE 1	PARTE 2	PARTE 3
Trifásico en puente no controlado	Trifásico simple	Bifásico en puente

Organización:

Objetivo: aprender los contenidos de la documentación.

Lectura individual del material: 5'

Reunión de expertos:

Discusión del material: 10'

Elaboración de un guión (esquema, gráfico, etc.) para explicar el material en 5' a los compañeros del grupo original: 5'

Reunión del grupo original:

Presentación de los esquemas: 20'

Tarea del grupo: Resolver el siguiente problema. Sea un rectificador trifásico simple controlado con ángulo de disparo 90 grados, dibujar las formas de onda de la tensión de salida y de la corriente en el tiristor 1, cuando la carga es resistiva y cuando es inductiva. Entregar la próxima clase.

Roles: Como en la Clase 1

CLASE 3: - Topologías fundamentales: Rectificadores controlados y semicontrolados

PARTE 1	PARTE 2	PARTE 3
Trifásico en puente controlado	Puente bifásico y trifásico simple	Puente trifásico

¹ J. Bará, M. Valero, Taller de Formación: Técnicas de Aprendizaje Cooperativo, Universidad Politécnica de Cataluña.

Organización:

Objetivo: aprender los contenidos de la documentación.

Lectura individual del material: 5'

Reunión de expertos:

Discusión del material: 10'

Elaboración de un guión (esquema, gráfico, etc.) para explicar el material en 5' a los compañeros del grupo original: 5'

Reunión del grupo original:

Presentación de los esquemas: 20'

Cuestión: ¿Cómo funciona tu grupo de Aprendizaje Cooperativo? Poner en un papel cada miembro del grupo un aspecto positivo y uno negativo sobre el funcionamiento de tu grupo (total 3 positivos/3 negativos). 1'.

Tarea del grupo: Resolver el siguiente problema. Sea un rectificador trifásico simple semicontrolado con ángulo de disparo 120 grados y carga inductiva.

Dibujar las formas de onda de la corriente en el tiristor 1 y en el diodo.

Entregar la próxima clase.

Roles: Como en la Clase 1

CLASE 4: Convertidores con matriz general de conversión. Convertidores con matriz de conversión ca/cc. Convertidores en puente. (Exposición del tema por el profesor).

CLASE 5

PARTE 1: PROBLEMA 1

PARTE 2: PROBLEMA 2

PARTE 3: Estudio de las siguientes fórmulas, correspondientes a la corrientes de un rectificador simple y en puente:

Rectificador simple: corriente de fase y corriente por el polo.

$$I_i = H_i \cdot I_{cc} = I_{cc} \cdot \left(\frac{1}{A} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} \right] \cos \left[n \left(\omega t - \frac{2i\pi}{A} - \alpha \right) \right] \right)$$

$$I_i(\text{med}) = \frac{I_{cc}}{A}$$

$$I_i(\text{eficaz}) = \left(\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/A} I_{cc}^2 dt \right)^{1/2} = \left(\frac{1}{2\pi} I_{cc}^2 \frac{2\pi}{A} \right)^{1/2} = \frac{I_{cc}}{\sqrt{A}}$$

Rectificador en puente: corriente de fase (Ii) y corriente por el polo (Ip).

$$I_{p,i} = H_i \cdot I_{cc} = I_{cc} \cdot \left(\frac{1}{A} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} \right] \cos \left[n \left(\omega t - \frac{2i\pi}{A} - \alpha \right) \right] \right)$$

$$I_i = H_i \cdot I_{cc} - H_i \cdot I_{cc} = I_{cc} \cdot \left\{ \frac{1}{A} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} \right] \cos \left[n \left(\omega t - \frac{2i\pi}{A} - \alpha \right) \right] - \frac{1}{A} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} \right] \cos \left[n \left(\omega t - \frac{2i\pi}{A} - \alpha - \pi \right) \right] \right\}$$

$$I_p(\text{med}) = \frac{I_{cc}}{A}$$

$$I_p(\text{eficaz}) = \left(\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/A} I_{cc}^2 dt \right)^{1/2} = \left(\frac{1}{2\pi} I_{cc}^2 \frac{2\pi}{A} \right)^{1/2} = \frac{I_{cc}}{\sqrt{A}}$$

$$I_i(\text{med}) = 0$$

$$I_i(\text{eficaz}) = \left(\frac{1}{2\pi} 2 \int_0^{2\pi/A} I_{cc}^2 dt \right)^{1/2} = \left(\frac{2}{2\pi} I_{cc}^2 \frac{2\pi}{A} \right)^{1/2} = I_{cc} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{A}}$$

Tarea del grupo: Resolver: Sea un rectificador en puente trifásico controlado, cuya carga es una fuente de corriente de 500 A. Calcular el valor eficaz de la corriente en cada rama del secundario del transformador.

CLASE 6

PARTE 1: PROBLEMA 3a

PARTE 2: PROBLEMA 3b

PARTE 3: Estudio de las páginas 25 y 26 de la presentación Power Point (rectificador monofásico y bifásico con carga RLE).

Tarea del grupo: dibujar la forma de onda de la tensión en el tiristor 1 (problema 3) cuando el ángulo de disparo es de 90 grados y la carga es inductiva.

AUTOANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DEL GRUPO.

Comentar las siguientes afirmaciones:

1. Todos los componentes del grupo asisten a clase y respetan la temporización.
2. Todos los componentes del grupo muestran respeto por los demás, y les prestan atención cuando hablan o exponen una opinión.
3. En cada sesión se discute y se acuerda el plan de trabajo a seguir, y hay un miembro que actúa como moderador y organizador.
4. En cada sesión se discuten conjuntamente las dificultades encontradas y el planteamiento de cada ejercicio o tema de estudio.
5. El trabajo que no puede acabarse en las sesiones de clase se realiza fuera de las mismas.
6. Cada miembro explica a los demás el resultado de su trabajo independiente.
7. Todos los miembros participan activamente y de buena gana en las actividades del grupo.

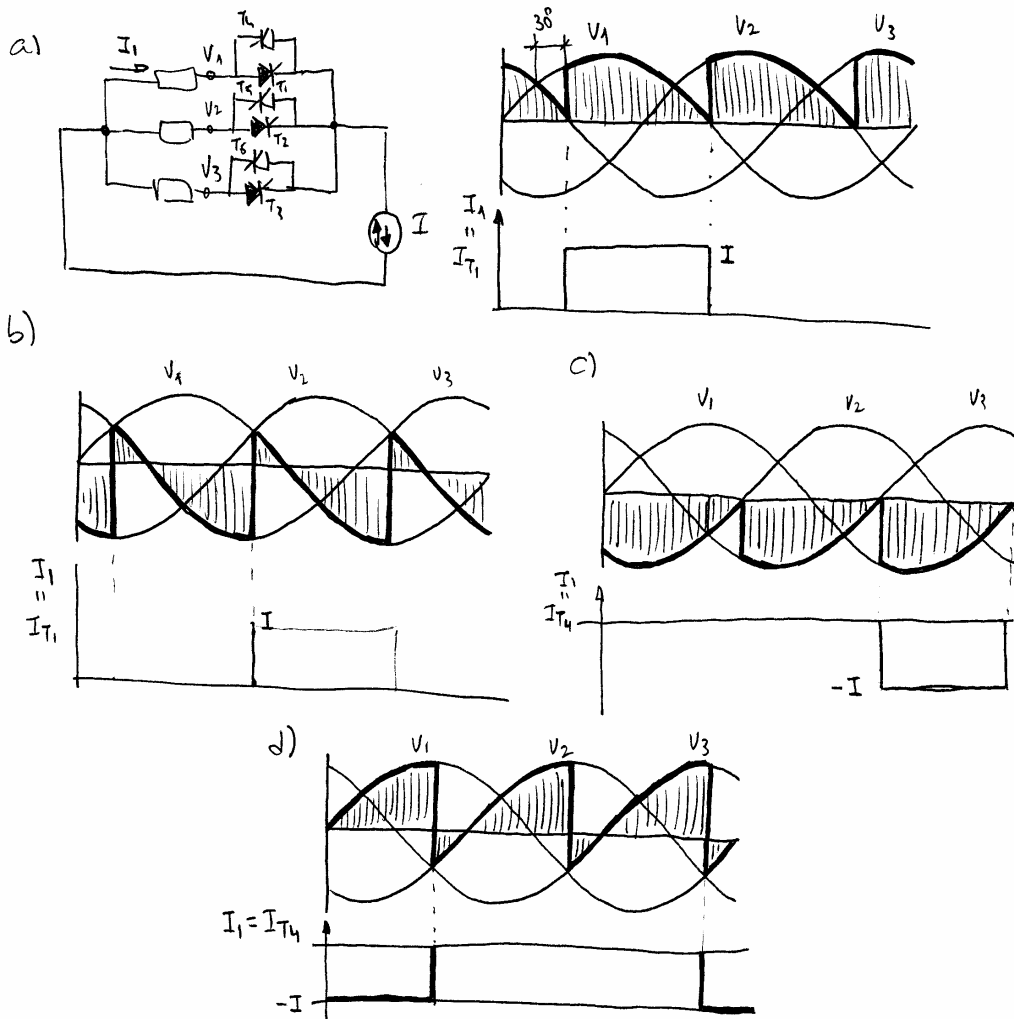
Contestar las siguientes cuestiones:

8. Mencionar tres aspectos positivos de la actividad cooperativa de vuestro grupo.
9. Mencionar dos aspectos mejorables de vuestra actividad cooperativa.
10. Valorar, en una escala 0-10, el funcionamiento del grupo (opiniones individuales anónimas):
11. Valorar, en una escala de 0-10, vuestra propia contribución al funcionamiento del grupo (opiniones individuales anónimas)
12. Enumerar tres acciones que vayáis a realizar para mejorar el funcionamiento del grupo.

CLASES 7 y 8: Rectificadores con carga L-R-E. Rectificadores de cuatro cuadrantes. (Exposición del tema por el profesor).

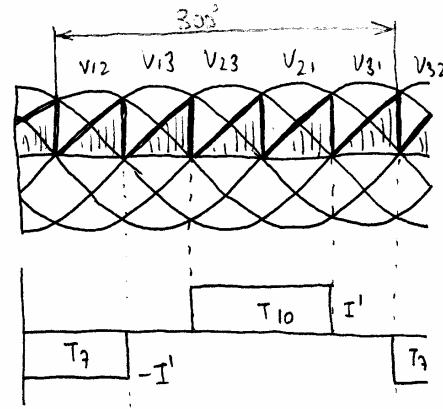
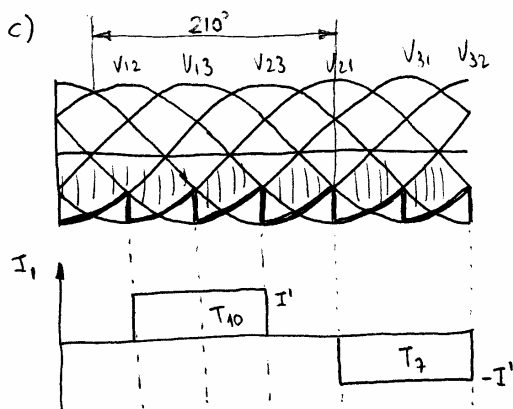
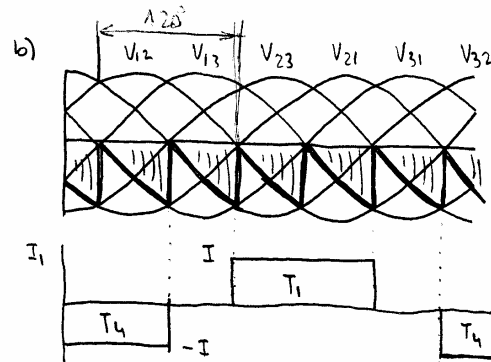
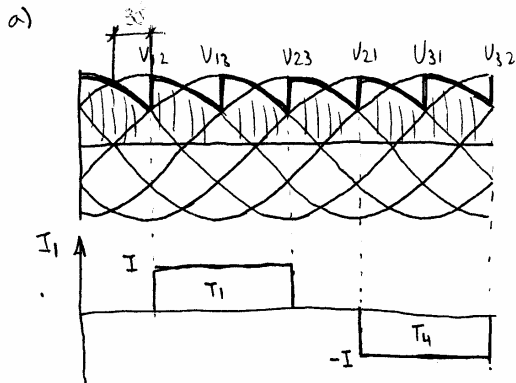
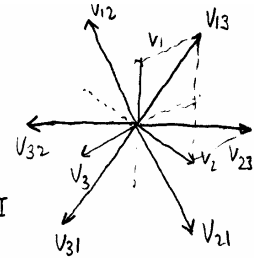
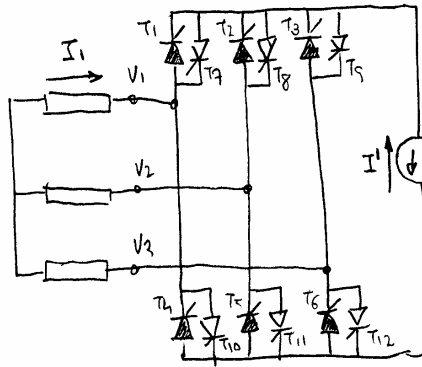
Tarea: Resolver los siguientes problemas.

1. Sea un rectificador trifásico simple bidireccional en corriente. La carga es inductiva pura. Dibujar las formas de onda de la tensión de salida y la corriente por la fase 1 del transformador cuando el ángulo de disparo es: 30° , 120° , 210° y 300° . Nota: se pueden utilizar las plantillas gráficas de tres y seis fases.
2. Sea un rectificador en puente trifásico bidireccional en corriente. La carga es inductiva pura. Dibujar las formas de onda de la tensión de salida y la corriente por el devanado 1 del transformador cuando el ángulo de disparo es: 30° , 120° , 210° y 300° . Nota: se pueden utilizar las plantillas gráficas de tres y seis fases.



do 1 del transformador.

- a) $\alpha = 30^\circ$
- b) $\alpha = 120^\circ$
- c) $\alpha = 210^\circ$
- d) $\alpha = 300^\circ$



Tarea: Para el rectificador trifásico simple y el rectificador en puente trifásico, bidireccionales en corriente, dibujar la forma de onda de la corriente en la fase 1 del transformador cuando la carga es resistiva y el ángulo de disparo es 240 grados..

PROBLEMA 1

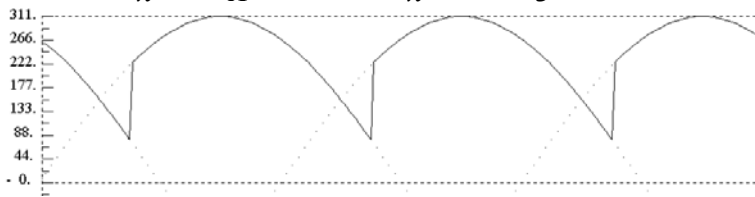
ENUNCIADO

Sea un rectificador trifásico simple con tensión fase-neutro 220V eficaces.

- a) Cuando la carga es inductiva y el ángulo de disparo es 15°, calcular:
 a1) El valor medio de la tensión de salida.
 a2) La amplitud de los dos primeros armónicos.
 b) Cuando la carga es resistiva y el ángulo de disparo es 45°, calcular el valor medio de la tensión de salida.

SOLUCIÓN

$$a1) V_{cc} = \frac{AV}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{A} \cos \alpha = \frac{3 \cdot 220\sqrt{2}}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} \cos 15 = 248V$$

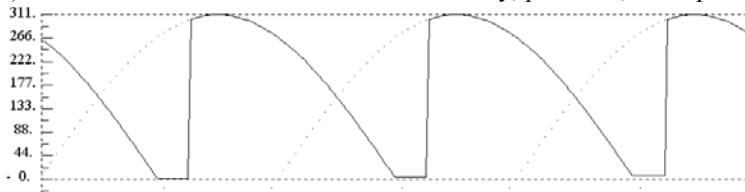


$$a2) |V_{cc}(arm.p)| = V_{cc}(\alpha = 0) \frac{2}{(pA)^2 - 1} \sqrt{\cos^2 \alpha + (pA)^2 \operatorname{sen}^2 \alpha}$$

$$|V_{cc}(p = 1; 150Hz)| = \left(\frac{3 \cdot 220\sqrt{2}}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} \right) \frac{2}{3^2 - 1} \sqrt{\cos^2 15 + 3^2 \operatorname{sen}^2 15} = 79,7V$$

$$|V_{cc}(p = 2; 300Hz)| = \left(\frac{3 \cdot 220\sqrt{2}}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} \right) \frac{2}{6^2 - 1} \sqrt{\cos^2 15 + 6^2 \operatorname{sen}^2 15} = 26,89V$$

- b) En este caso la conducción es discontinua y, por tanto, no se pueden emplear las fórmulas anteriores.



$$V_{cc} = \frac{1}{T} 3 \int_{75}^{180} V \operatorname{sen} x dx = \frac{1}{2\pi} 3 \int_{75}^{180} 220\sqrt{2} \operatorname{sen} x dx = 187V$$

PROBLEMA 2

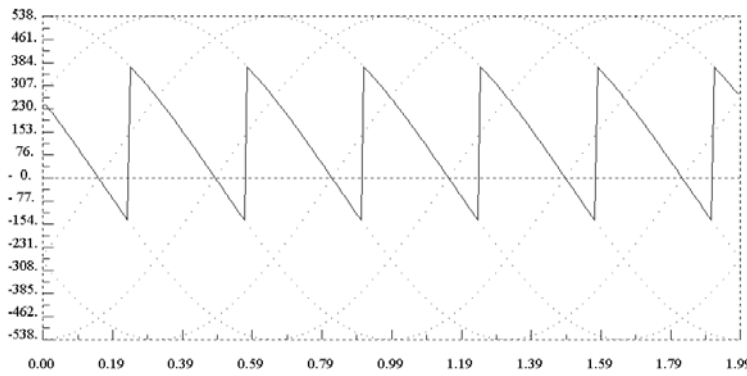
ENUNCIADO

Sea un rectificador en puente trifásico, alimentado desde una línea de 380V eficaces entre fases.

- a) Cuando la carga es inductiva y el ángulo de disparo es 75° , calcular:
 - a1) El valor medio de la tensión de salida.
 - a2) La amplitud de los dos primeros armónicos ($p=2$ y $p=4$).
- b) Cuando la carga es resistiva y el ángulo de disparo es 90° , calcular el valor medio de la tensión de salida.

SOLUCIÓN

$$a1) V_{cc} = 2 \frac{AV}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{A} \cos \alpha = 2 \frac{3 \cdot 220 \sqrt{2}}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} \cos 75 = 133,2V$$



$$a2) |V_{cc}(arm.p)| = \frac{1}{2} V_{cc}(\alpha = 0) (1 + \cos pA\pi) \frac{2}{(pA)^2 - 1} \sqrt{\cos^2 \alpha + (pA)^2 \operatorname{sen}^2 \alpha}$$

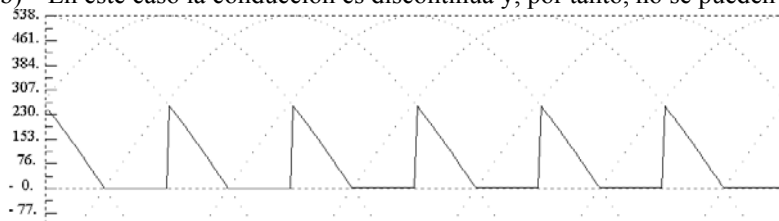
$$|V_{cc}(p = 1; 150Hz)| = \frac{1}{2} V_{cc}(\alpha = 0) (1 + \cos 3\pi) \frac{2}{(pA)^2 - 1} \sqrt{} = 0$$

$$|V_{cc}(p = 2; 300Hz)| = \frac{1}{2} 2 \frac{3 \cdot 220 \sqrt{2}}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} (1 + \cos 6\pi) \frac{2}{6^2 - 1} \sqrt{\cos^2 75 + 6^2 \operatorname{sen}^2 75} = 170,6V_{pico}$$

$$|V_{cc}(p = 3; 450Hz)| = \frac{1}{2} V_{cc}(\alpha = 0) (1 + \cos 9\pi) \frac{2}{(pA)^2 - 1} \sqrt{} = 0$$

$$|V_{cc}(p = 4; 600Hz)| = \frac{1}{2} 2 \frac{3 \cdot 220 \sqrt{2}}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} (1 + \cos 12\pi) \frac{2}{12^2 - 1} \sqrt{\cos^2 75 + 12^2 \operatorname{sen}^2 75} = 83,4V_{pico}$$

- b) En este caso la conducción es discontinua y, por tanto, no se pueden emplear las fórmulas anteriores.



$$V_{cc} = \frac{1}{T} 6 \int_{150}^{180} V \operatorname{sen} x dx = \frac{1}{2\pi} 6 \int_{150}^{180} 380 \sqrt{2} \operatorname{sen} x dx = 68,75V$$

PROBLEMA 3

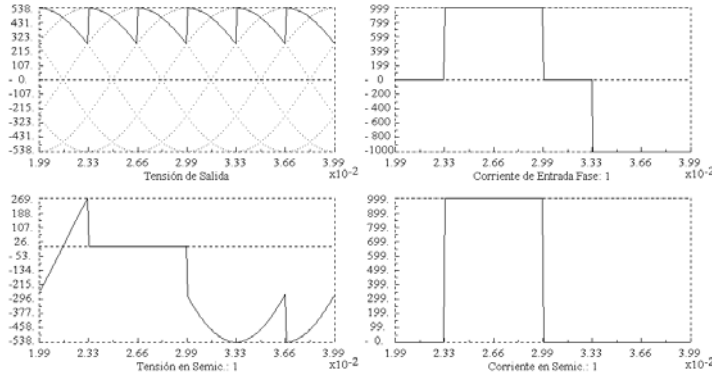
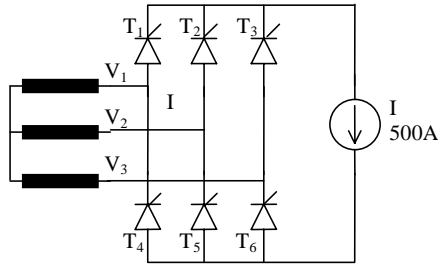
ENUNCIADO

Sea un rectificador en puente trifásico. La tensión de entrada es de 380V eficaces entre fases. Calcular el valor medio y eficaz de la corriente en cada tiristor, el valor eficaz de la corriente en cada fase del transformador y la máxima tensión en cada tiristor para un ángulo de disparo de 30°, cuando:

- La corriente de salida es constante $I = 500 \text{ A}$.
- La carga es resistiva $R = 1 \Omega$.

SOLUCIÓN

a)



Nota: el valor máximo de la corriente es 500 A, no 1000 A.

Tiristor

$$I_m = \frac{500}{3} = 166,7 \text{ A}$$

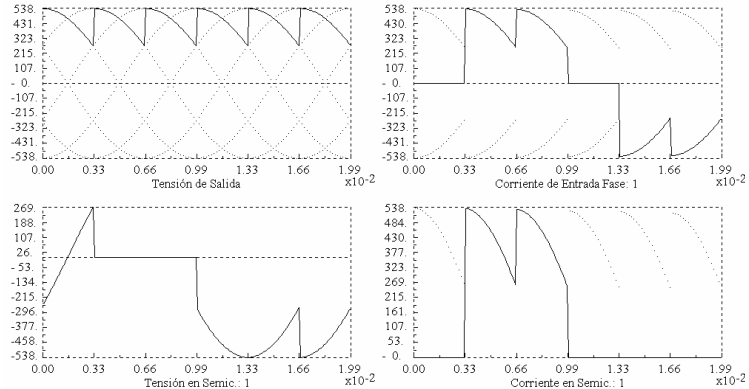
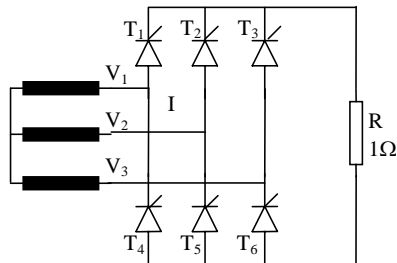
$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_r^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} I^2 \frac{T}{3}} = \frac{I}{\sqrt{3}} = \frac{500}{\sqrt{3}} = 288,7 \text{ A}$$

$$V_{m\acute{a}x} = 380\sqrt{2} = 537,4 \text{ V}$$

Transformador

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} 2I^2 \frac{T}{3}} = I \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 500 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 408,2 \text{ A}$$

b)



Tiristor

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i_T(t) dt = \frac{1}{2\pi} 2 \int_{90}^{150} \frac{380\sqrt{2}}{1} \text{sen} x dx = 148,1A$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_T^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} 2 \int_{90}^{150} \left(\frac{380\sqrt{2}}{1}\right)^2 \text{sen}^2 x dx} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\frac{380\sqrt{2}}{1}\right)^2 \int_{90}^{150} \frac{1 - \cos 2x}{2} dx} = 260,8A$$

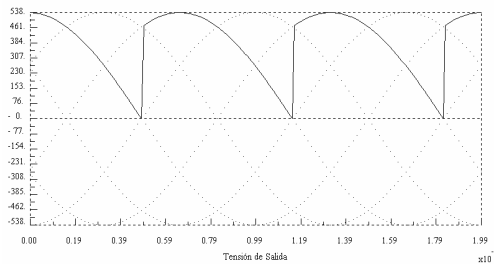
$$V_{m\acute{a}x} = 380\sqrt{2} = 537,4V$$

Transformador

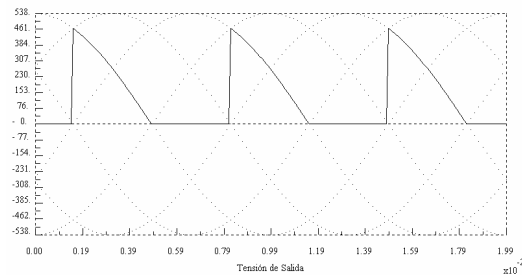
$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_1^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} 4 \int_{90}^{150} \left(\frac{380\sqrt{2}}{1}\right)^2 \text{sen}^2 x dx} = 368,9A$$

CAPITULO 2: CONVERTIDORES CA/CC

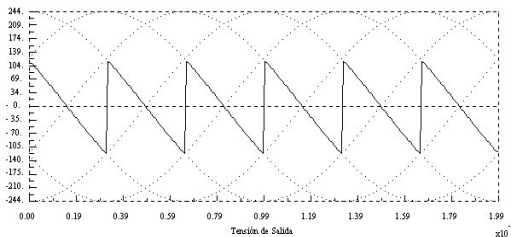
2. Indicar a qué tipo de rectificador y a qué ángulo de disparo corresponden las siguientes gráficas de la tensión de salida de un rectificador.



a) Puente trifásico semicontrolado, $\alpha=60^\circ$

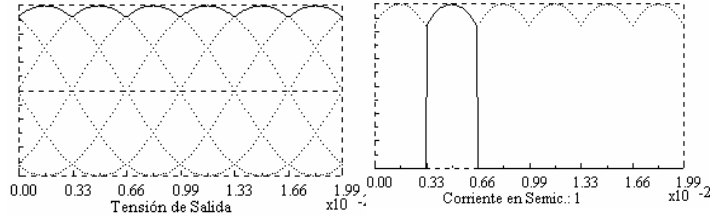
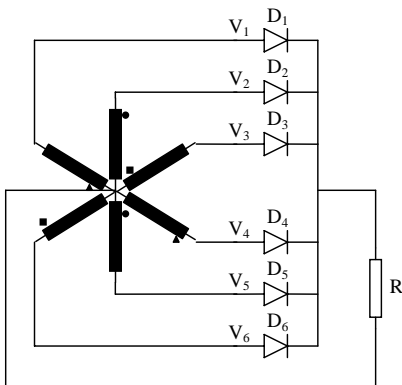


b) Puente trifásico semicontrolado, $\alpha=120^\circ$



c) Puente trifásico, $\alpha=90^\circ$

11. Un rectificador hexafásico simple no controlado se alimenta con una tensión fase-neutro de 100 V eficaces. La carga es una resistencia de 1Ω : a) Determinar la corriente media por cada diodo, b) Determinar la tensión de pico en cada diodo, c) Determinar la corriente eficaz en cada devanado del secundario del transformador.



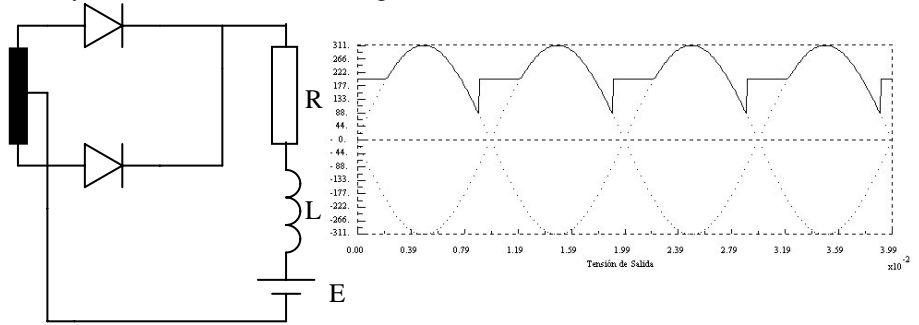
$$a) \quad I_{Dmed} = \frac{1}{T} \int_{60}^{120} I_P \sen x dx = \frac{1}{2\pi} 100\sqrt{2} (-\cos 120 + \cos 60) = 22,4A$$

$$b) \quad V_{D \text{ máx}} = 2V_P = 2 \cdot 100\sqrt{2} = 282V$$

$$c) \quad I_{Def} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{60}^{120} (I_P \sen x)^2 dx} = \sqrt{\frac{(I_P)^2}{2\pi} \int_{60}^{120} \frac{1 - \cos 2x}{2} dx} = 55,0A$$

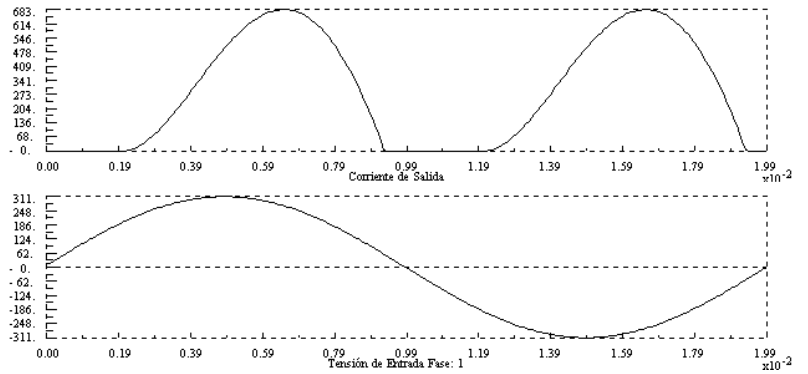
12. Para el rectificador con carga RLE y la tensión de salida de la figura, indicar la afirmación correcta:

- a) $L \neq 0, R \neq 0$ y $E=200V$
- b) $L=0, R \neq 0$ y $E=200V$
- c) $L \neq 0, R \neq 0$ y $E=0V$
- d) $L \neq 0, R=0$ y $E=0V$



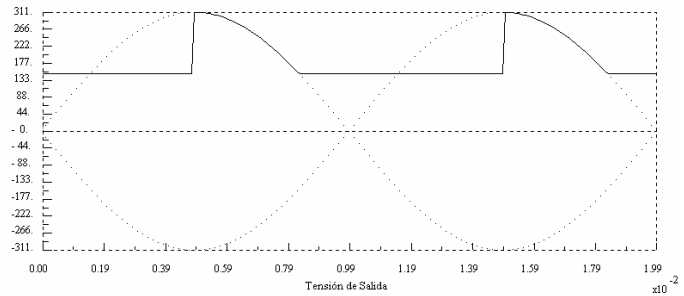
13. La gráfica de la figura corresponde a un rectificador bifásico simple no controlado y carga R-L-E. La figura superior es la corriente de salida y la figura inferior es la tensión de entrada de la fase 1. Indicar cuál es el valor de la carga.

- a) $L \neq 0, R \neq 0$ y $E = 200 V$
- b) $L = 0, R \neq 0$ y $E = 200V$
- c) $L \neq 0, R \neq 0$ y $E = 0V$
- d) $L = 0, R \neq 0$ y $E=0V$



14. La gráfica de la figura corresponde a la tensión de salida de un rectificador con carga R-L-E. Indicar cuál es el valor de la carga.

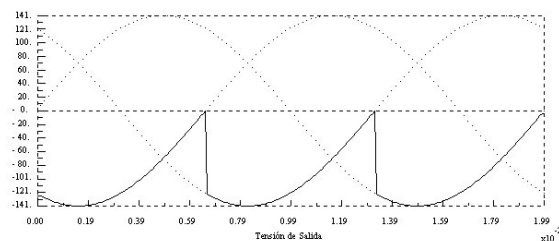
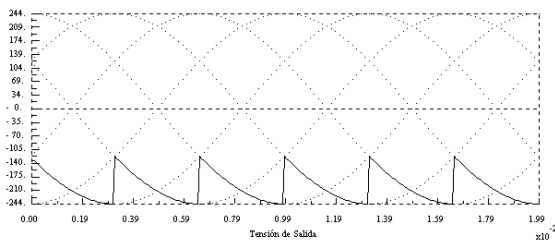
- a) $L \neq 0, E = 150 V$ y $\alpha = 90^\circ$
- b) $L = 0, E = 150V$ y $\alpha = 90^\circ$
- c) $L \neq 0, E = 0V$ y $\alpha = 150^\circ$
- d) $L = 0, E = 0V$ y $\alpha = 150^\circ$



15. Las gráficas siguientes corresponden a dos rectificadores reversibles en corriente, indicar el ángulo de disparo de cada uno:

a) Puente trifásico, $\alpha=150^\circ$

b) Trifásico simple, $\alpha=210^\circ$



CAPÍTULO 3: CONVERTIDORES CC/CA (INVERSORES)

Los convertidores CC/CA se encargan de transformar energía eléctrica de corriente continua a corriente alterna. La entrada al convertidor puede ser la salida de un convertidor CA/CC, baterías electroquímicas, paneles fotovoltaicos o cualquier otro tipo de fuente de corriente continua.

1. INTRODUCCIÓN

Antes de comenzar un estudio analítico de este tipo de convertidores se va a hacer una introducción que presente las topologías fundamentales empleadas, los métodos de control de la tensión alterna de salida y algunas de las aplicaciones más importantes.

1.1. TOPOLOGÍAS

Las topologías fundamentales de inversores son la topología semipiente, puente completo monofásico y puente trifásico.

a) TOPOLOGÍA SEMIPUENTE

La topología semipiente tiene una rama formada por dos polos de potencia. Cada uno de estos polos está formado por un interruptor controlado (IGBT, tiristor, ...) y un diodo en antiparalelo. La topología necesita que haya un neutro en corriente continua, ya que la carga se coloca entre el neutro de continua y el punto medio de los polos de potencia (ver Fig. 1).

En las topologías siguientes, cada polo se representará por un interruptor, pero en la topología semipiente se ha querido prestar atención al funcionamiento interno de cada polo, esto es por lo que se ha representado como un IGBT con un diodo en antiparalelo. Por tanto, el polo superior está formado por el IGBT T_1 y el diodo D_1 , mientras que el polo inferior está formado por T_2 y D_2 .

La tensión de salida sólo puede tomar dos valores, $+V_{dc}/2$ ó $-V_{dc}/2$, según conduzca el polo superior o el polo inferior. Por ello, la tensión de salida tiene forma de onda cuadrada, como se puede ver en la Fig. 1.

Si se supone que la carga es inductiva y provoca que la corriente sea aproximadamente senoidal, la corriente estará retrasada respecto de la tensión (Fig. 1). Durante el intervalo en que la tensión y la corriente son positivas, el semiconductor que conduce la corriente es T_1 . Cuando el sistema de control corta la corriente por T_1 y activa al IGBT T_2 , entra en conducción el diodo D_2 , debido a que la corriente es todavía positiva por la carga, por lo que no puede circular por T_2 . Por tanto, en el segundo intervalo, con tensión negativa y corriente positiva, conduce el diodo D_2 . De forma análoga, en los dos intervalos siguientes conducen, consecutivamente, T_2 y D_1 .

En las topologías siguientes no entraremos en tanto detalle, y no se diferenciará si en un polo conduce el IGBT o el diodo, pero hay que tener en cuenta que la activación del polo determina el signo de la tensión, mientras que el sentido de la corriente determina cuál es el semiconductor del polo que conduce.

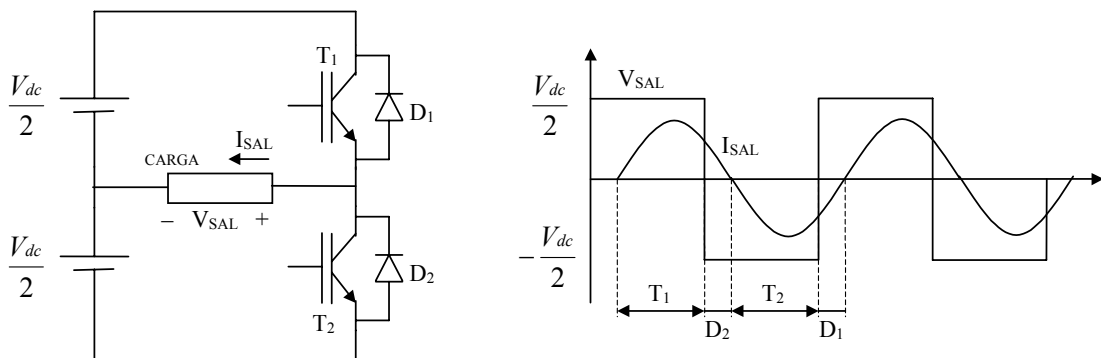


Fig. 1: Topología semipiente.

b) TOPOLOGÍA EN PUENTE MONOFÁSICO

La topología en puente monofásico tiene dos ramas con dos polos cada una, como se observa en la Fig. 2. La carga se conecta entre el punto medio de las dos ramas. La tensión continua de entrada no precisa de punto medio.

La tensión en la carga puede tomar tres valores, $+V_{dc}$, 0 y $-V_{dc}$. El primer caso se consigue cuando conducen los polos I_1 e I_4 . El segundo caso cuando conducen o bien I_1 e I_3 , o bien I_2 e I_4 . Y el tercer caso cuando conducen los polos I_2 e I_3 .

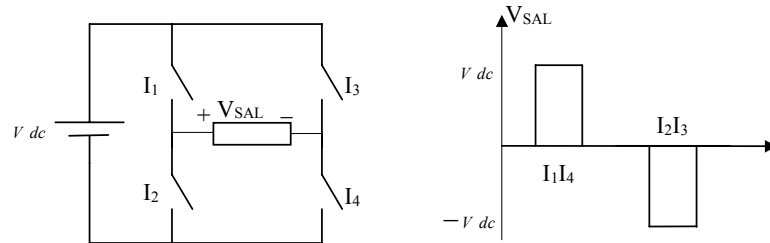


Fig. 2: Topología en puente monofásico.

c) TOPOLOGÍA EN PUENTE TRIFÁSICO

La topología en puente trifásico presenta tres ramas, con dos polos cada una (Fig. 3). La salida es una tensión alterna trifásica. La carga se puede conectar entre fase y neutro, o entre dos fases. Cuando la salida se toma respecto del neutro de corriente continua, las tensiones de salida son u_1 , u_2 y u_3 . Cada una de ellas se comporta como un inversor semipunto. Para formar un sistema trifásico, las tres tensiones deben estar desfasadas 120° .

Si la carga se conecta entre dos fases, las tensiones de salida son compuestas (fase-fase), y se denominan u_{12} , u_{23} , y u_{31} . En este caso, cada una de estas tensiones es como la tensión que se obtiene en un puente monofásico.

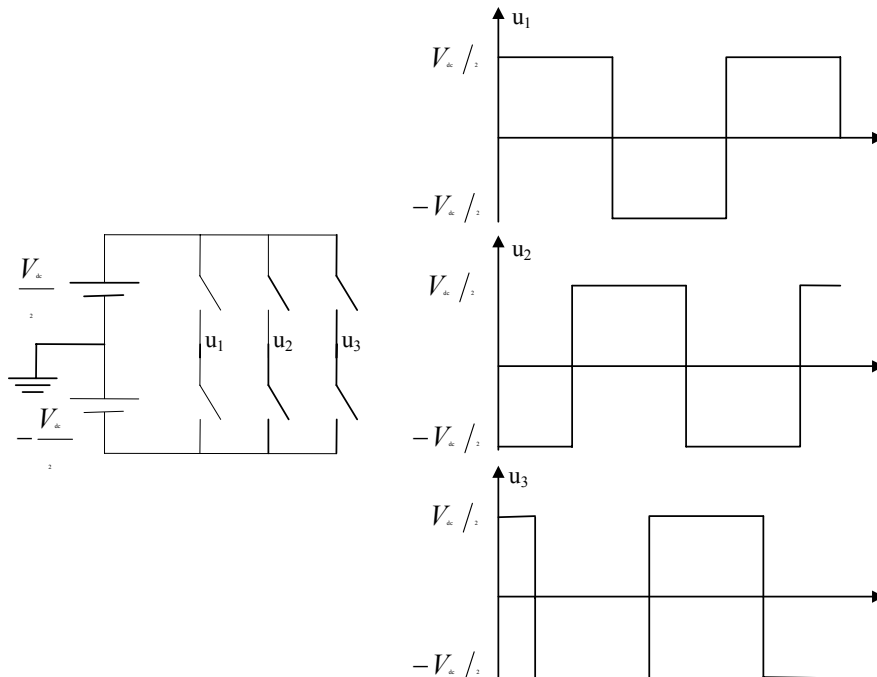


Fig. 3: Topología en puente trifásico.

1.2. CONTROL DE LA TENSIÓN DE SALIDA

En el apartado anterior se han presentado las topologías fundamentales de inversores. El objetivo de un inversor es generar tensión en corriente alterna, donde la frecuencia y la tensión de salida están controladas. Hay dos formas principales de control: control mediante pulso único por semiciclo y control mediante modulación de pulsos.

a) PULSO ÚNICO POR SEMIPERODO

En este caso, el inversor genera un único pulso en cada semiperiodo de la tensión de salida. Un pulso positivo en un semiperiodo y un pulso negativo en el otro semiperiodo.

▪ TOPOLOGÍA SEMIPUENTE

La tensión de salida es una onda cuadrada, de tensión igual a la de la semibatería de entrada (ver Fig. 1). La frecuencia debe ser la misma que desea obtener en la tensión alterna de salida (p.e. 50 Hz).

Si la tensión continua de entrada es constante, no hay posibilidad de controlar el valor de la tensión alterna de salida.

▪ TOPOLOGÍA EN PUENTE MONOFÁSICO

La tensión alterna de salida es una onda cuadrada de anchura controlable, lo que permite modificar la tensión alterna de salida. Mediante el control sobre los polos de potencia se puede modificar la anchura de los pulsos de salida. En la Fig. 4a, los pulsos son más estrechos que en la Fig. 4b, por lo que la primera tendrá una tensión de salida menor.

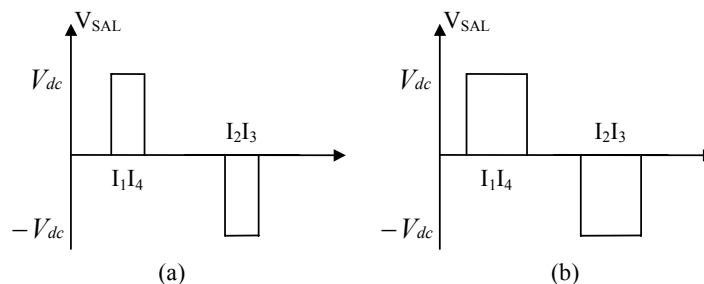


Fig. 4: Tensión de salida en un inversor en puente monofásico controlado mediante pulso único por semiciclo.

b) MODULACIÓN DE PULSOS

En este caso, el inversor genera un elevado número de pulsos en cada semiperiodo de la tensión alterna de salida. Las componentes armónicas de la tensión de salida van a incluir un primer armónico, denominado armónico fundamental, de baja frecuencia y armónicos de alta frecuencia. El armónico fundamental tiene la frecuencia que se desea obtener en la salida (p.e. 50 Hz), mientras que los armónicos de alta frecuencia son de frecuencias aproximadamente múltiplos de la frecuencia de los pulsos (p.e. 5 kHz).

▪ TOPOLOGÍA SEMIPUENTE

En este caso, la tensión de salida presenta un elevado número de pulsos en cada semiperiodo (Fig. 5). La tensión de los pulsos está determinada por la tensión de la semibatería.

Se ha representado sobre los pulsos, la forma de onda del armónico fundamental, que es positivo cuando los pulsos son más anchos en su parte positiva. El segundo semiperiodo del armónico fundamental es negativo ya que los pulsos son más anchos en su parte negativa.

Este tipo de control permite regular la tensión y la frecuencia del armónico fundamental de la salida. La frecuencia de ésta es la misma que la frecuencia de repetición del tren de pulsos. La amplitud del fundamental depende la anchura de los pulsos, en los semiperiodos positivo y negativo del armónico fundamental. Cuando los pulsos son más anchos, tanto en el semiperiodo positivo como en el negativo, la

tensión del armónico fundamental es mayor, como ocurre en la Fig. 5a, mientras que cuando son más estrechos, la tensión del fundamental es menor (Fig. 5b).

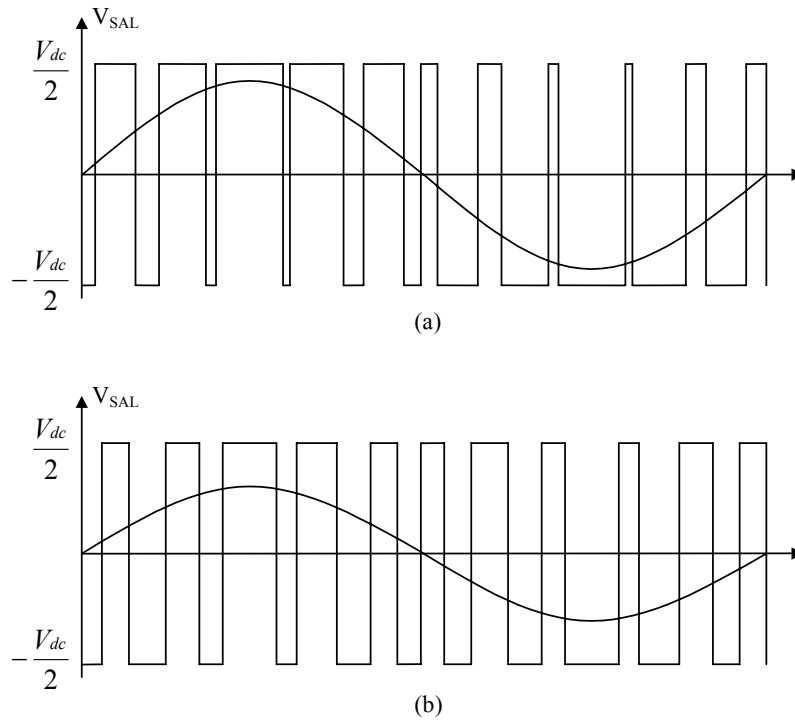


Fig. 5: Tensión de salida en un inversor semipunte controlado mediante modulación de pulsos.

▪ TOPOLOGÍA EN PUENTE MONOFASICO

La tensión de salida presenta un elevado número de pulsos en cada semiperiodo (Fig. 6), cuya tensión está determinada por la tensión de entrada.

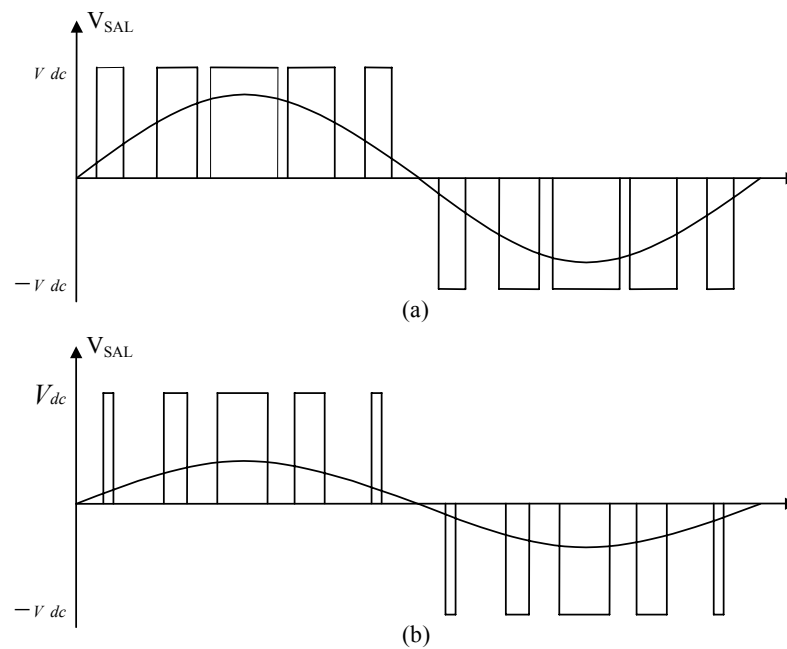


Fig. 6: Tensión de salida en un inversor en puente monofásico controlado mediante modulación de pulsos.

Se ha representado sobre los pulsos, la forma de onda del armónico fundamental, que es positivo cuando los pulsos son positivos y negativo cuando los pulsos también lo son.

Este tipo de control permite regular la tensión y la frecuencia del armónico fundamental de la salida. La frecuencia de ésta es la misma que la frecuencia de repetición del tren de pulsos. La amplitud del fundamental depende la anchura de los pulsos. Cuando los pulsos son más anchos, tanto en el semiperiodo positivo como en el negativo, la tensión del armónico fundamental es mayor, como ocurre en la Fig. 6a, mientras que cuando son más estrechos, la tensión del fundamental es menor (Fig. 6b).

1.3. ALGUNAS APLICACIONES

Las aplicaciones de los inversores son muy variadas, estando presentes en multitud de campos de la industria y la vida cotidiana. Se van a presentar, a modo de ejemplo, dos aplicaciones importantes: los sistemas de alimentación ininterrumpida y el control de velocidad de motores de corriente alterna.

a) SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN ININTERRUMPIDA (SAI)

Los sistemas de alimentación ininterrumpida, conocidos como SAI en español o UPS en inglés, son equipos que tienen dos finalidades fundamentales:

- mantienen el suministro de energía en corriente alterna cuando hay un fallo en la red de suministro y
- proporcionan alimentación de calidad a cargas críticas.

Hay cargas que no permiten fallos de suministro, como por ejemplo una estación de control de vuelo, las incubadoras de niños prematuros en un hospital, los ordenadores de un centro comercial, ..., por lo que necesitan de la presencia de un sistema de alimentación ininterrumpida.

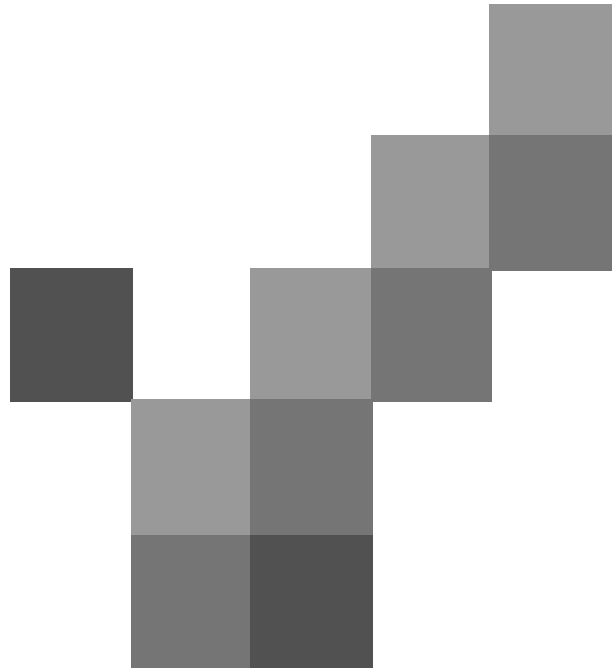
Los SAI tienen tres elementos fundamentales: rectificador, baterías e inversor. El rectificador toma energía en corriente alterna y carga las baterías electroquímicas. La batería suministra energía cuando se produce un fallo en el suministro eléctrico. El inversor genera la corriente alterna que consume la carga crítica.

b) CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

La velocidad de los motores de corriente alterna (motores de inducción, síncronos o de imanes permanentes) es función de la frecuencia de la tensión de alimentación. Los controladores electrónicos de velocidad de motores utilizan inversores para generar la corriente alterna que alimenta al motor. Estos inversores permiten modificar la frecuencia de salida para poder controlar la velocidad del motor.

Los sistemas de control de velocidad de motores de CA están presentes en multitud de aplicaciones: bombas, ventiladores, transportadores, bobinadoras, vehículos eléctricos, robots, ...

Los controladores actuales permiten regular de forma muy precisa la velocidad y/o la posición del motor, permitiendo el control para velocidades altas y muy bajas, incluso cero. Permiten también la inversión del sentido de giro del motor.



CAPÍTULO 3

CONVERTIDORES CC/CA

(INVERSORES)


TEXTO:

S. Lorenzo, J.M. Ruiz, A. Martín. Simulación, Control Digital y Diseño de *Convertidores Electrónicos de Potencia mediante PC*. Depto. *Tecnología Electrónica*. Universidad de Valladolid.
pág. 381 a 403



Índice

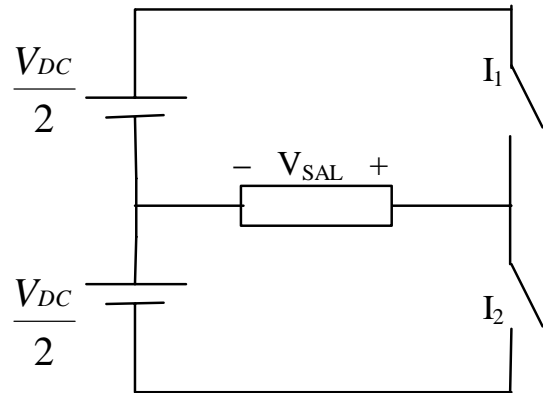
- Introducción: topologías, control y aplicaciones
- Convertidores de pulso único por semiciclo
- Convertidores de pulso múltiple por semiciclo
- Filtro de salida. Aplicaciones



Convertidores de pulso único por semiciclo

- Inversor monofásico semipuente
- Inversor monofásico en puente
- Inversor trifásico

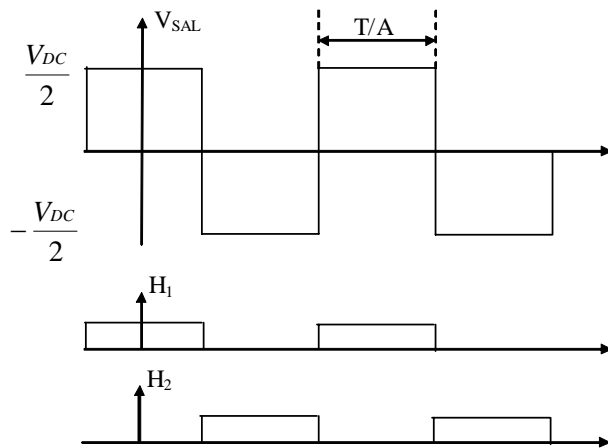
Inversor monofásico semipuente



$$H_1 = \frac{1}{A} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} \cos(n\omega t)$$

$$H_2 = 1 - H_1 = \left(1 - \frac{1}{A}\right) - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} \cos(n\omega t)$$

$$V_{SAL} = (H_1 - H_2) \frac{V_{DC}}{2} = (2H_1 - 1) \frac{V_{DC}}{2} = \frac{V_{DC}}{2} \left(\frac{2}{A} - 1\right) + \frac{2V_{DC}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} \cos(n\omega t)$$

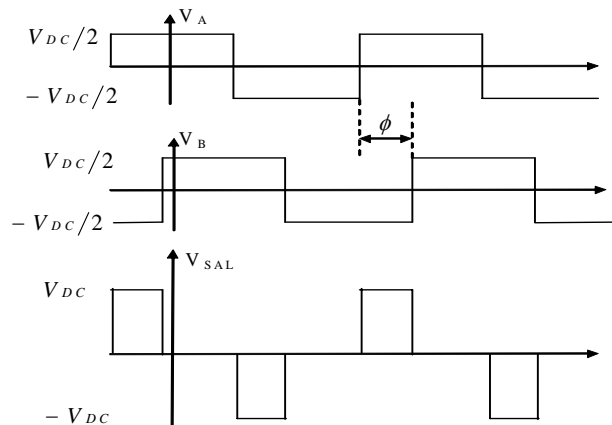
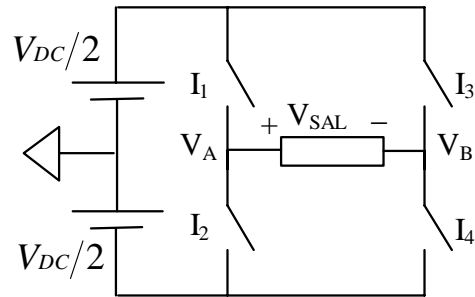


$$V_{SAL} = \frac{2V_{DC}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{2}\right)}{n} \cos(n\omega t)$$

$$V_{SAL, FUN} = \frac{2V_{DC}}{\pi}$$

$$V_{SAL, ARM} = \frac{2V_{DC}}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{2}\right)}{n} \cos(n\omega t)$$

Inversor monofásico en puente



$$H_1 = \frac{1}{A} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} \cos n(\omega t) \quad H_2 = 1 - H_1 \quad H_3 = \frac{1}{A} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} \cos n(\omega t + \phi) \quad H_4 = 1 - H_3$$

$$V_{SAL} = V_A - V_B = (2H_1 - 1) \frac{V_{DC}}{2} - (2H_3 - 1) \frac{V_{DC}}{2} = (H_1 - H_3) V_{DC} =$$

$$= \frac{2V_{DC}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} [\cos(n\omega t) - \cos n(\omega t + \phi)]$$

$$\cos A - \cos B = -2 \left(\text{sen} \frac{A+B}{2} \right) \left(\text{sen} \frac{A-B}{2} \right)$$

$$V_{SAL} = \frac{4V_{DC}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} \text{sen} \frac{n\phi}{2} \text{sen} \left[n \left(\omega t + \frac{\phi}{2} \right) \right]$$

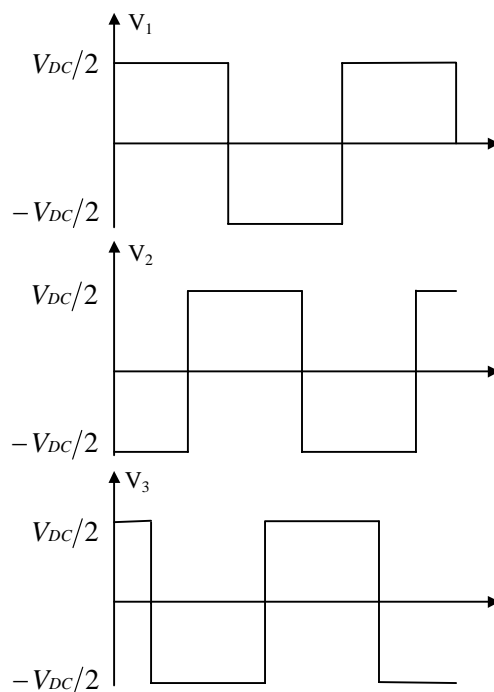
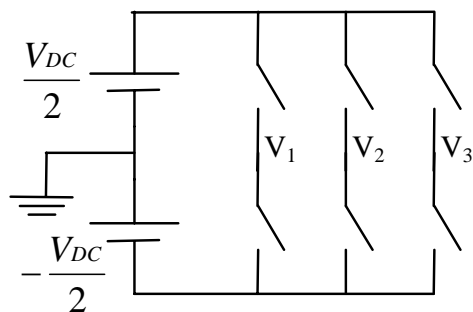
$$V_{SAL, FUN} = \frac{4V_{DC}}{\pi} \text{sen} \frac{\pi}{A} \text{sen} \frac{\phi}{2} \text{sen} \left(\omega t + \frac{\phi}{2} \right) = \frac{4V_{DC}}{\pi} \text{sen} \frac{\phi}{2} \text{sen} \left(\omega t + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$V_{SAL, FUN} \rightarrow \begin{cases} \phi = 0 \Rightarrow V_{SAL, FUN} = 0 \\ \phi = \pi \Rightarrow V_{SAL, FUN} = \frac{4V_{DC}}{\pi} \end{cases}$$

$$V_{SAL, ARM} = \frac{4V_{DC}}{\pi} \sum_{n=2, \text{impares}}^{\infty} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{2}\right)}{n} \text{sen} \frac{n\phi}{2} \text{sen} \left[n \left(\omega t + \frac{\phi}{2} \right) \right]$$

Capítulo 3: Convertidores CC/CA
(Inversores)

Inversor trifásico



$$V_1 = \frac{2V_{DC}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} \cos(n\omega t)$$

$$V_2 = \frac{2V_{DC}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} \cos n\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$V_3 = \frac{2V_{DC}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A}\right)}{n} \cos n\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)$$

Tensiones de fase: V_1, V_2, V_3
 Tensiones de línea: V_{12}, V_{23}, V_{31}

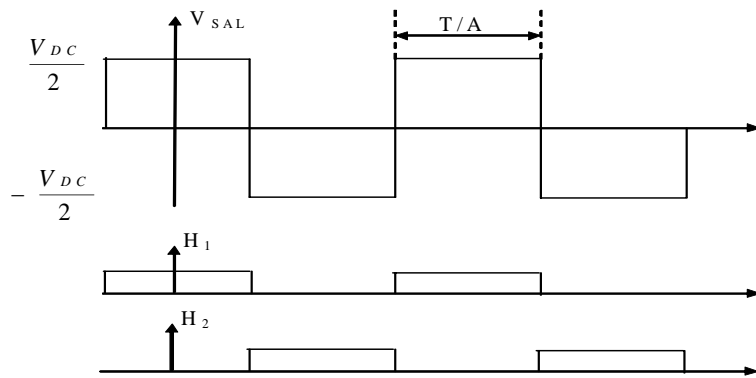


Convertidores de pulso múltiple por semiciclo

- Control PWM senoidal
- Inversor monofásico semipuente
- Inversor monofásico en puente
- Inversor trifásico

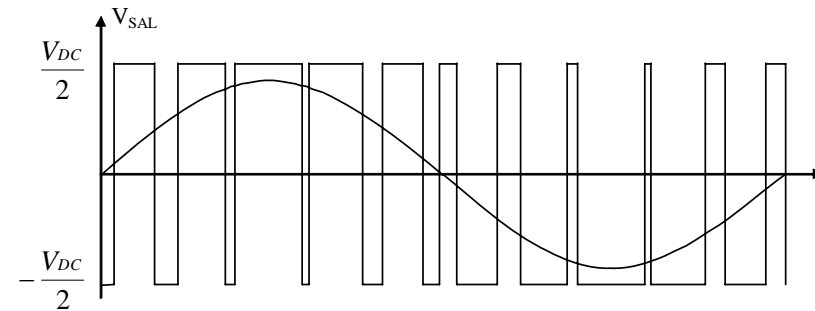
Control PWM senoidal

- Pulso único por semiciclo

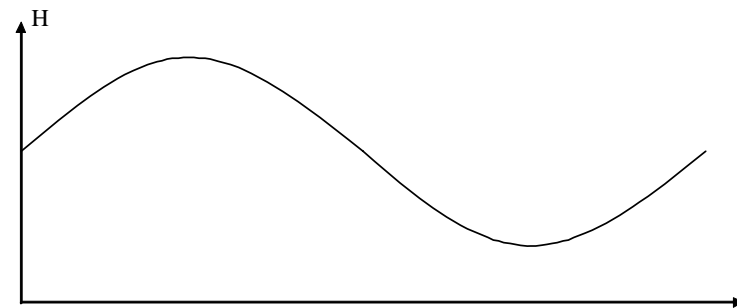


- Anchura de pulso: constante

- Pulso múltiple por semiciclo

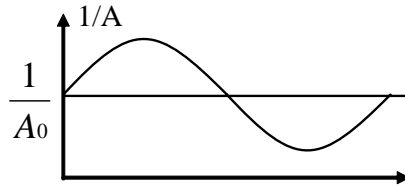


- Anchura de pulso: senoidal



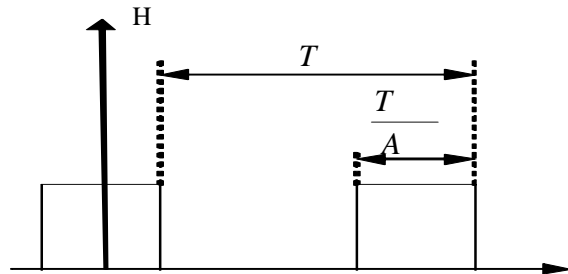
Control PWM senoidal

Anchura de pulso: senoidal $\frac{1}{A} = \frac{1}{A_0} [1 + x \cos(\omega st)], 0 < x < 1$



$$H_1 = \frac{1}{A_0} [1 + x \cos(\omega st)] + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}\left(n\pi \frac{1}{A_0} [1 + x \cos(\omega st)]\right)}{n} \cos(n\omega t)$$

$$H_2 = 1 - H_1$$



x = índice de modulación

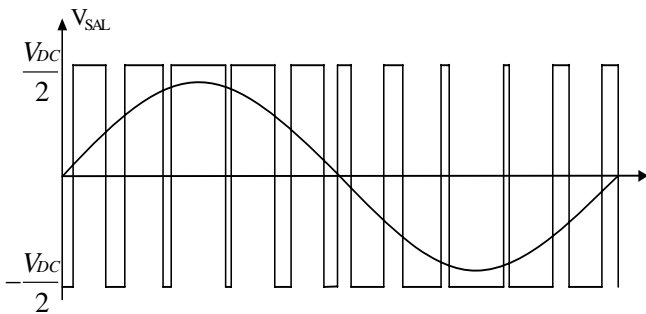
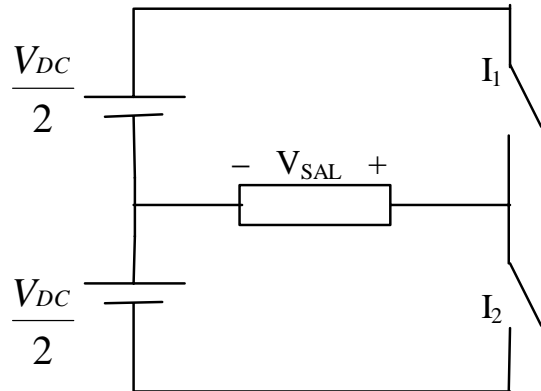
ω_s = frecuencia moduladora

ω = frecuencia portadora

Si $A_0 = 2$ y $0 \leq x \leq 1$:

- Si $x=1$, $1/A=[0 \div 1]$
- Si $x=0$, $1/A=0,5$

Inversor monofásico semipuente



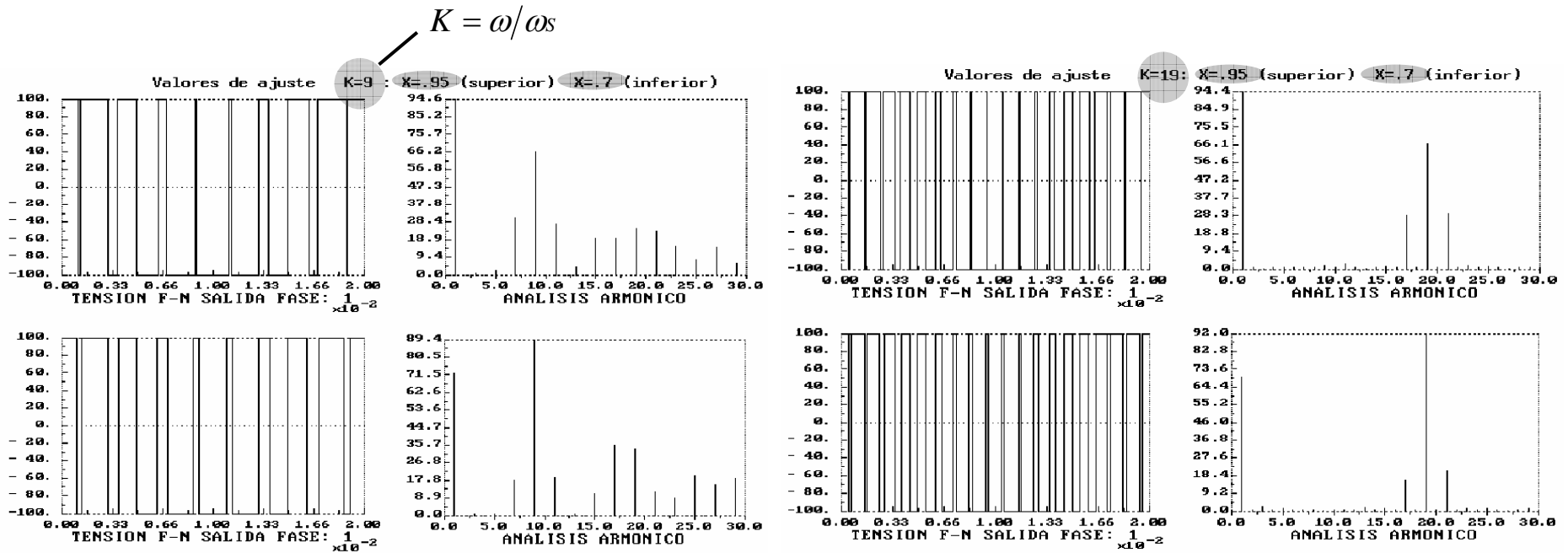
$$V_{SAL} = (H_1 - H_2) \frac{V_{DC}}{2} = (2H_1 - 1) \frac{V_{DC}}{2} = \frac{V_{DC}}{2} \left(\frac{2}{A_0} - 1 \right) + \frac{V_{DC}}{A_0} x \cos(\omega st) + \frac{2V_{DC}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen} \left(n\pi \frac{1}{A_0} [1 + x \cos(\omega st)] \right)}{n} \cos(n\omega t)$$

$$V_{SAL} = \frac{V_{DC}}{2} x \cos(\omega st) + \frac{2V_{DC}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen} \left(n\pi \frac{1}{2} [1 + x \cos(\omega st)] \right)}{n} \cos(n\omega t)$$

$$V_{SAL, FUN} = \frac{V_{DC}}{2} x \cos(\omega st)$$

$$V_{SAL, ARM} = \frac{2V_{DC}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen} \left(n\pi \frac{1}{2} [1 + x \cos(\omega st)] \right)}{n} \cos(n\omega t)$$

Inversor monofásico semipuente

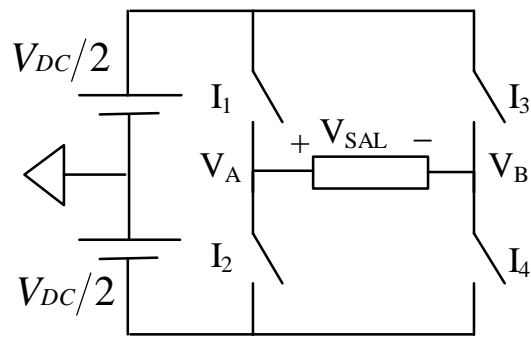


$$V_{SAL, FUN} = \frac{V_{DC}}{2} x \cos \omega st = 100 \cdot 0,95 \cdot \cos \omega st = 95 \cdot \cos \omega st$$

$$V_{SAL, FUN} = 100 \cdot 0,7 \cdot \cos \omega st = 70 \cdot \cos \omega st$$

El aumento de ω_s ...
no afecta al valor del armónico fundamental
incrementa la frecuencia de los armónicos

Inversor monofásico en puente

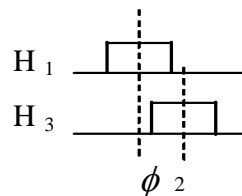
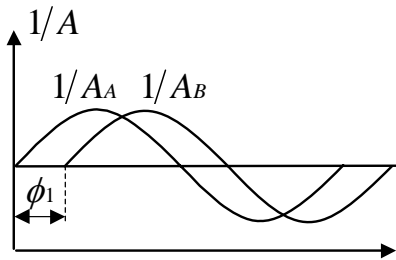


$$H_1 = \frac{1}{A_0} [1 + x \cos(\omega st)] + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A_0} [1 + x \cos(\omega st)]\right)}{n} \cos n(\omega t)$$

$$H_2 = 1 - H_1$$

$$H_3 = \frac{1}{A_0} [1 + x \cos(\omega st + \phi_1)] + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A_0} [1 + x \cos(\omega st + \phi_1)]\right)}{n} \cos n(\omega t + \phi_2)$$

$$H_4 = 1 - H_3$$



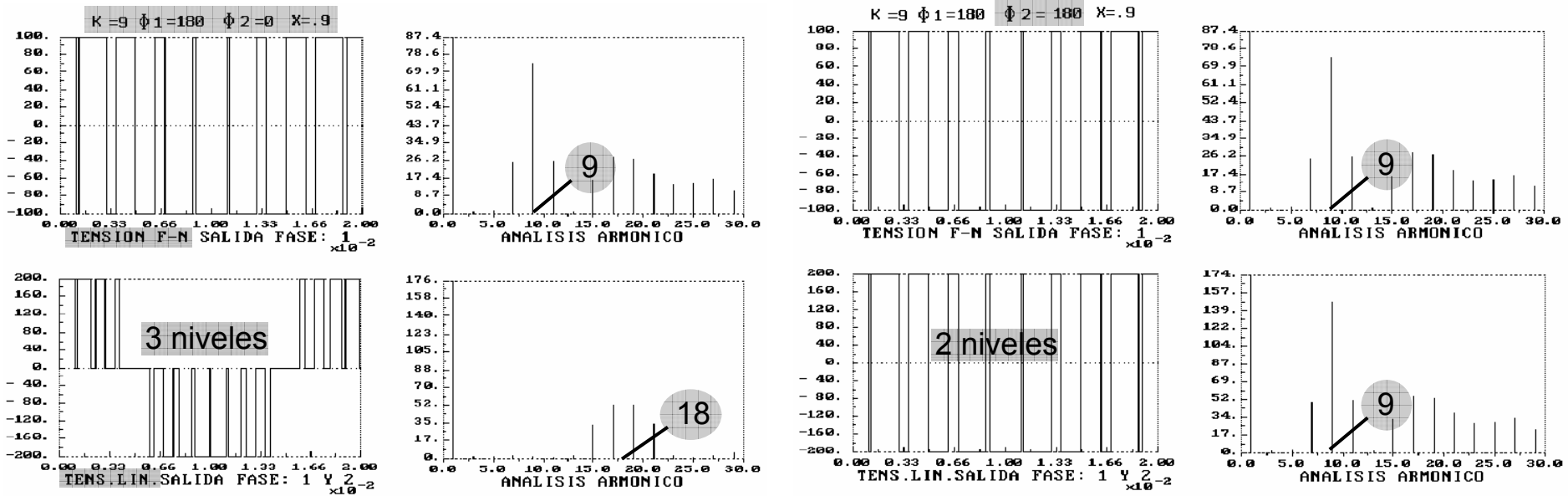
$$V_{SAL} = V_A - V_B = (H_1 - H_3)V_{DC} = \frac{V_{DC}}{A_0} x [\cos(\omega st) - \cos(\omega st + \phi_1)] +$$

$$+ \frac{2V_{DC}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A_0} [1 + x \cos(\omega st)]\right)}{n} \cos(n\omega t) - \frac{\text{sen}\left(\frac{n\pi}{A_0} [1 + x \cos(\omega st + \phi_1)]\right)}{n} \cos n(\omega t + \phi_2)$$

$$V_{SAL, FUN} = \frac{V_{DC}}{A_0} x [\cos(\omega st) - \cos(\omega st + \phi_1)]$$

$$\text{Si } \phi_1 = \pi, V_{SAL, FUN, MAXIMO} = \frac{V_{DC}}{A_0} 2x \cos(\omega st) = V_{DC} x \cos(\omega st)$$

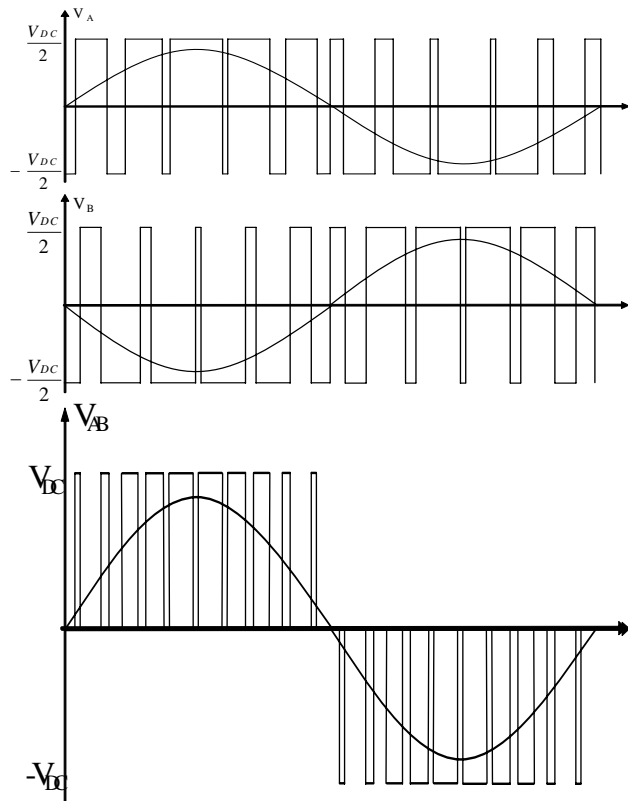
Inversor monofásico en puente



$$V_{SAL, FUN} = V_{DCX} \cos \omega st = 200 \cdot 0,9 \cdot \cos \omega st = 180 \cdot \cos \omega st$$

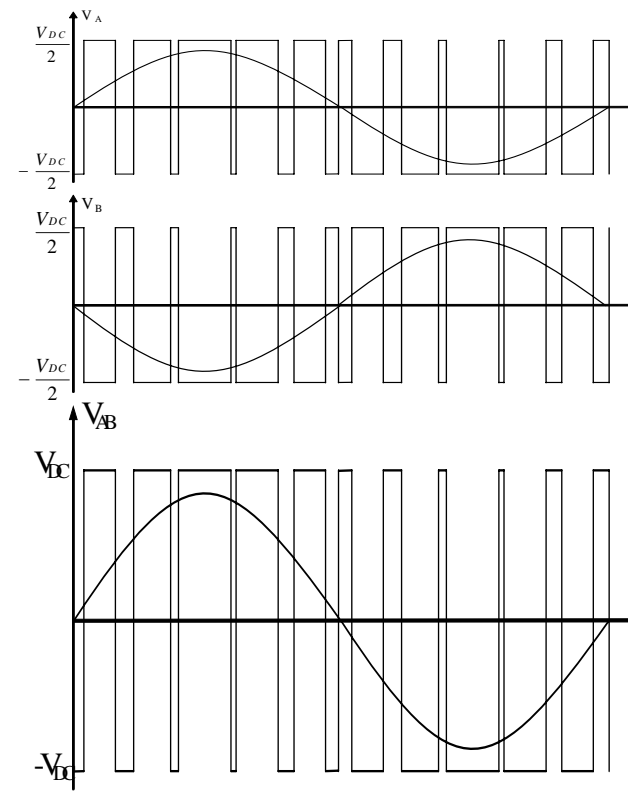
Inversor monofásico en puente

$$\Phi_1 = \pi, \Phi_2 = 0$$



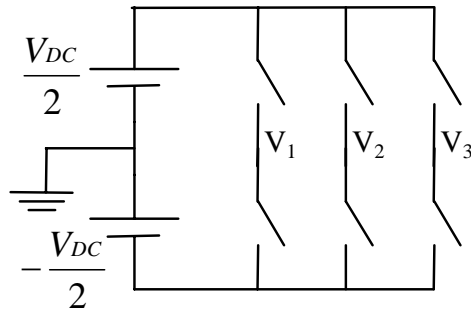
Tres Niveles

$$\Phi_1 = \pi, \Phi_2 = \pi$$



Dos Niveles

Inversor trifásico



$$H_1 = \frac{1}{A_1} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen} \frac{n\pi}{A_1}}{n} \cos(n\omega t) \quad \frac{1}{A_1} = \frac{1}{2} [1 + x \cos(\omega t)]$$

$$H_3 = \frac{1}{A_3} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen} \frac{n\pi}{A_3}}{n} \cos(n\omega t) \quad \frac{1}{A_3} = \frac{1}{2} \left[1 + x \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

$$H_5 = \frac{1}{A_5} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen} \frac{n\pi}{A_5}}{n} \cos(n\omega t) \quad \frac{1}{A_5} = \frac{1}{2} \left[1 + x \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \right]$$

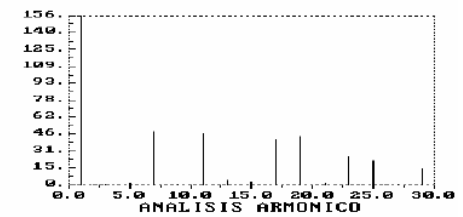
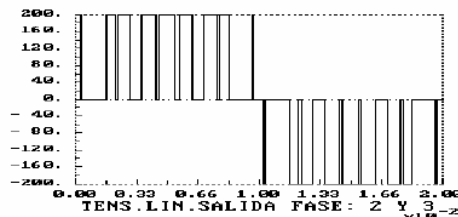
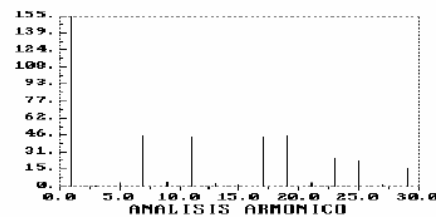
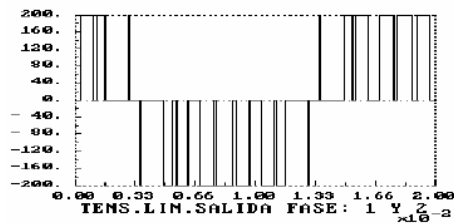
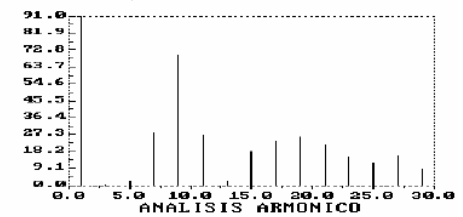
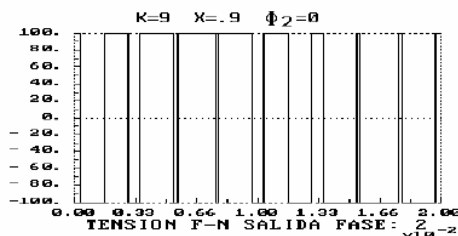
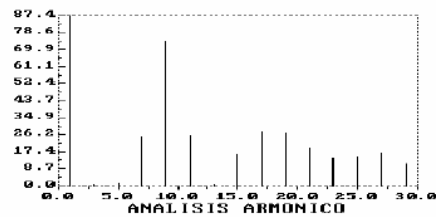
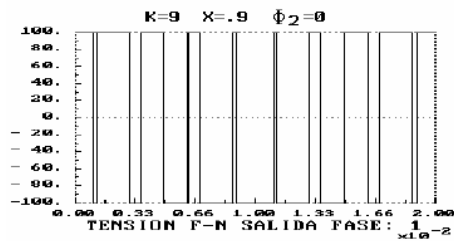
$$V_1 = (H_1 - H_2) \frac{V_{DC}}{2}; V_2 = (H_3 - H_4) \frac{V_{DC}}{2}; V_3 = (H_5 - H_6) \frac{V_{DC}}{2}$$

$$V_{12} = (H_1 - H_3) V_{DC}; V_{23} = (H_3 - H_5) V_{DC}; V_{31} = (H_5 - H_1) V_{DC}$$

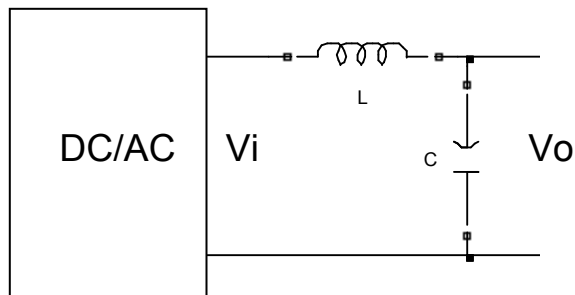
Tensiones de fase: V_1, V_2, V_3

Tensiones de línea: V_{12}, V_{23}, V_{31}

Inversor trifásico



Filtro de salida

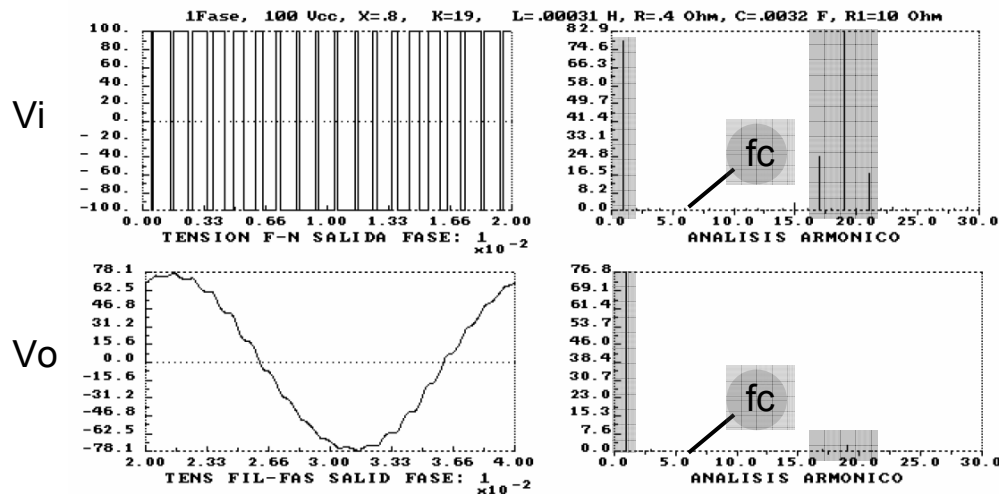


$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{-\omega^2 LC + 1} = \frac{1}{1 - (2\pi f)^2 LC}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}$$

$$f \ll f_c \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} \approx 1$$

$$f \gg f_c \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} \rightarrow 0$$



ORGANIZACIÓN DEL CAPÍTULO 3

CLASE 1 - Introducción: topologías, métodos de control de la tensión de salida y algunas aplicaciones

PARTE 1	PARTE 2	PARTE 3
Semipunte: • Topología • Control por pulso único • Control por modulación de pulsos	Puente monofásico • Topología • Control por pulso único • Control por modulación de pulsos	Topología puente trifásico Aplicaciones

Organización:

Lectura individual del material

Reunión de expertos

Reunión del grupo original

Tarea: para un inversor en puente trifásico con unas tensiones fase-neutro como las de la Fig. 3, dibujar las tensiones fase-fase. Indicar cuál es el semiconductor (IGBT o diodo) que conduce en cada intervalo temporal de la tensión U_{23} .

Roles: prestar atención al rol de **control del tiempo**.

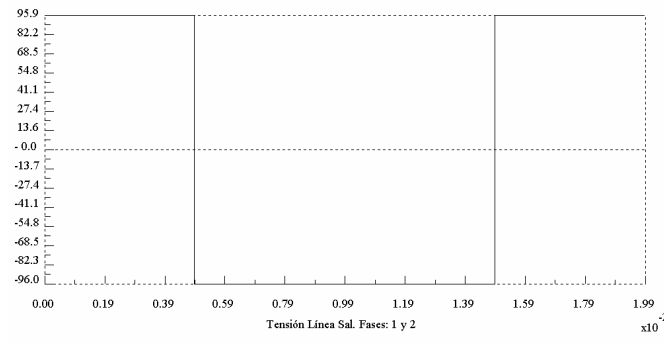
CLASE 2 - Convertidores de pulso único por semiciclo: explicación del profesor

CLASE 3 – Convertidores de pulso múltiple: explicación del profesor

CLASE 4 – Problemas

PARTE 1	PARTE 2	PARTE 3
Problema 1	Problema 2	Problema 3

Tarea: La gráfica de la figura es la tensión de salida de un inversor monofásico en puente con pulso único por semiciclo. Calcular el valor de pico del armónico de 250 Hz de la tensión de salida.



CLASE 5 – Problemas

PARTE 1	PARTE 2	PARTE 3
Problema 4	Problema 8	Problema 9

Tarea: En los problemas 8 y 9, ¿la solución propuesta es la única existente, o hay más posibles soluciones? Razonar la respuesta.

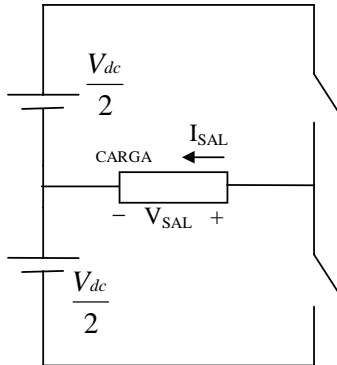
CLASE 6 – Filtro de salida: explicación del profesor

CLASE 7 – Aplicaciones: explicación del profesor

PROBLEMAS RESUELTOS DE INVERSORES

1. Un inversor monofásico semipunte y con pulso único por semiciclo, tiene una tensión de 24 V en cada semibatería. Calcular la tensión del armónico fundamental.

SOLUCIÓN:



$$V_{SAL} = \frac{V_{DC}}{2} [H_1 - H_2]$$

$$H_1 = \frac{1}{A} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen } \frac{n\pi}{A}}{n} \cos n\omega t$$

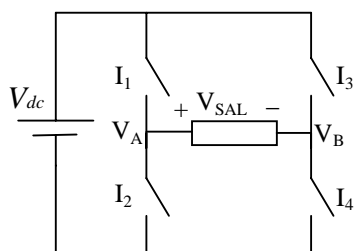
$$H_2 = 1 - H_1$$

$$V_{SAL} = \frac{V_{DC}}{2} (2H_1 - 1) = \frac{V_{DC}}{2} \left(\frac{2}{A} - 1 \right) + V_{DC} \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen } \frac{n\pi}{A}}{n} \cos n\omega t$$

$$V_{SAL, FUND} = \frac{2V_{DC}}{\pi} \text{sen } \frac{\pi}{2} = \frac{2V_{DC}}{\pi} = \frac{2 \cdot 48}{\pi} = 30,6V_{pico}$$

2. Un inversor monofásico en puente y pulso único por semiciclo tiene una tensión en cada semibatería de 100 V. El ángulo de control (desfase entre los dos semipuentes) es de 180°. Calcular el valor de pico del armónico fundamental de la tensión de salida.

SOLUCIÓN:



$$V_A = \frac{V_{DC}}{2} (2H_1 - 1); V_B = \frac{V_{DC}}{2} (2H_3 - 1)$$

$$V_{SAL} = V_{DC} (H_1 - H_3)$$

$$H_1 = \frac{1}{A} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen } \frac{n\pi}{A}}{n} \cos n\omega t$$

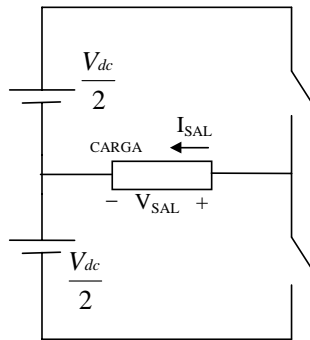
$$H_3 = \frac{1}{A} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen } \frac{n\pi}{A}}{n} \cos n(\omega t + \pi)$$

$$V_{SAL} = V_{DC} \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen } \frac{n\pi}{A}}{n} \text{sen} \left(n \frac{\phi}{2} \right) (\cos n\omega t)$$

$$V_{SAL, FUND} = \frac{4V_{DC}}{\pi} = \frac{4 \cdot 200}{\pi} = 255V_{pico}$$

3. Un inversor monofásico semipunte con modulación senoidal e índice de modulación $x = 0,65$, tiene una tensión de 24 V en cada semibatería. Calcular la tensión del armónico fundamental.

SOLUCIÓN:



$$V_{SAL} = \frac{V_{DC}}{2} (2H_1 - 1)$$

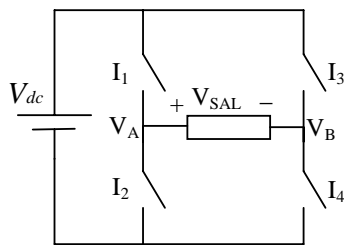
$$H_1 = \frac{1}{A_0} (1 + x \cos \omega st) + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen} \frac{n\pi}{A_0} (1 + x \cos \omega st)}{n} \cos n \omega t$$

$$V_{SAL} = \frac{V_{DC}}{2} \left(\frac{2}{A_0} - 1 \right) + \frac{V_{DC}}{2} x \cos \omega st + V_{DC} \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen} \frac{n\pi}{A_0} (1 + x \cos \omega st)}{n} \cos n \omega t$$

$$V_{SAL, FUND} = \frac{V_{DC}}{2} x \cos \omega st = \cos \omega st = 15,6 \cos \omega st$$

4. Un inversor monofásico en puente con modulación senoidal tiene una tensión en cada semibatería de 100 V. El desfase entre moduladoras (desfase entre los dos semipuentes) es de 180°. El índice de modulación es 0,85. Calcular el valor de pico del armónico fundamental de la tensión de salida.

SOLUCIÓN:



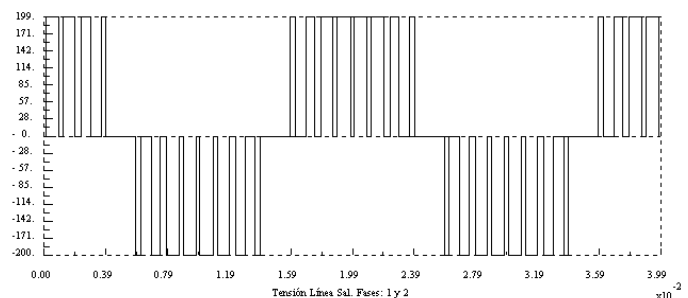
$$V_{SAL} = V_{DC} (H_1 - H_3)$$

$$H_1 = \frac{1}{A_0} (1 + x \cos \omega st) + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen} \frac{n\pi}{A_0} (1 + x \cos \omega st)}{n} \cos n \omega t$$

$$H_3 = \frac{1}{A_0} [1 + x \cos(\omega st + \pi)] + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen} \frac{n\pi}{A_0} [1 + x \cos(\omega st + \pi)]}{n} \cos n(\omega t - \pi)$$

$$V_{SAL, FUND} = \frac{V_{DC}}{2} x [\cos \omega st - \cos(\omega st + \pi)] = 2 \frac{V_{DC}}{2} x \cos \omega st = 200 \cdot 0,85 \cos \omega st = 170 \cos \omega st$$

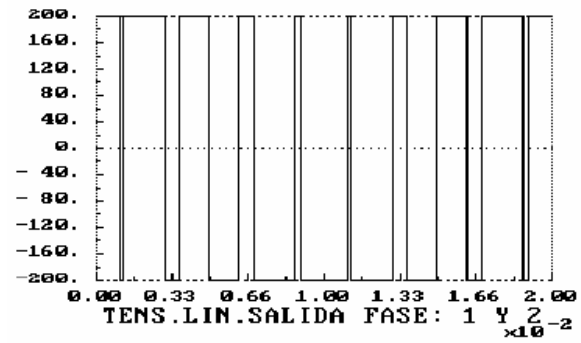
8. Sea un inversor en puente monofásico. La tensión de salida (entre fases) aparece en la figura. Indicar el valor de los ángulos de desfase de moduladoras y portadoras, ϕ_1 y ϕ_2 .



SOLUCIÓN:

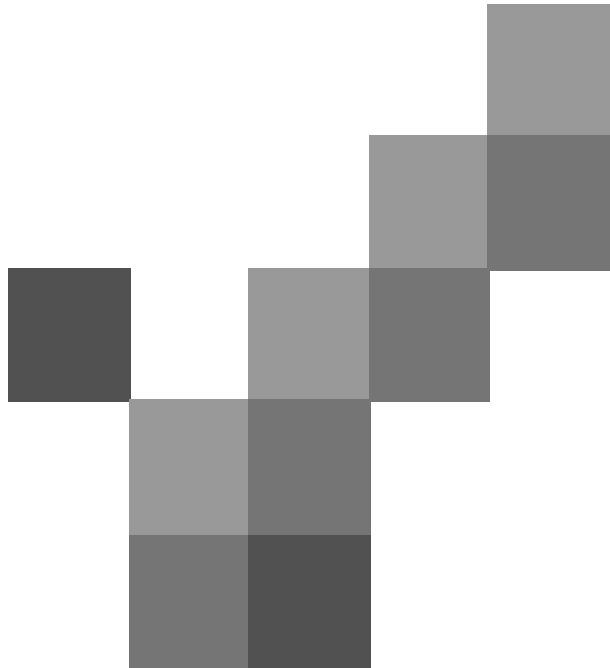
$$\phi_1 = 180^\circ \text{ y } \phi_2 = 0^\circ$$

9. Sea un inversor en puente monofásico. La tensión de salida (entre fases) aparece en la figura. Indicar el valor de los ángulos de desfase de moduladoras y portadoras, ϕ_1 y ϕ_2 .



SOLUCIÓN:

$$\phi_1 = 180^\circ \text{ y } \phi_2 = 180^\circ$$



CAPÍTULO 4 EL TIRISTOR

TEXTO:

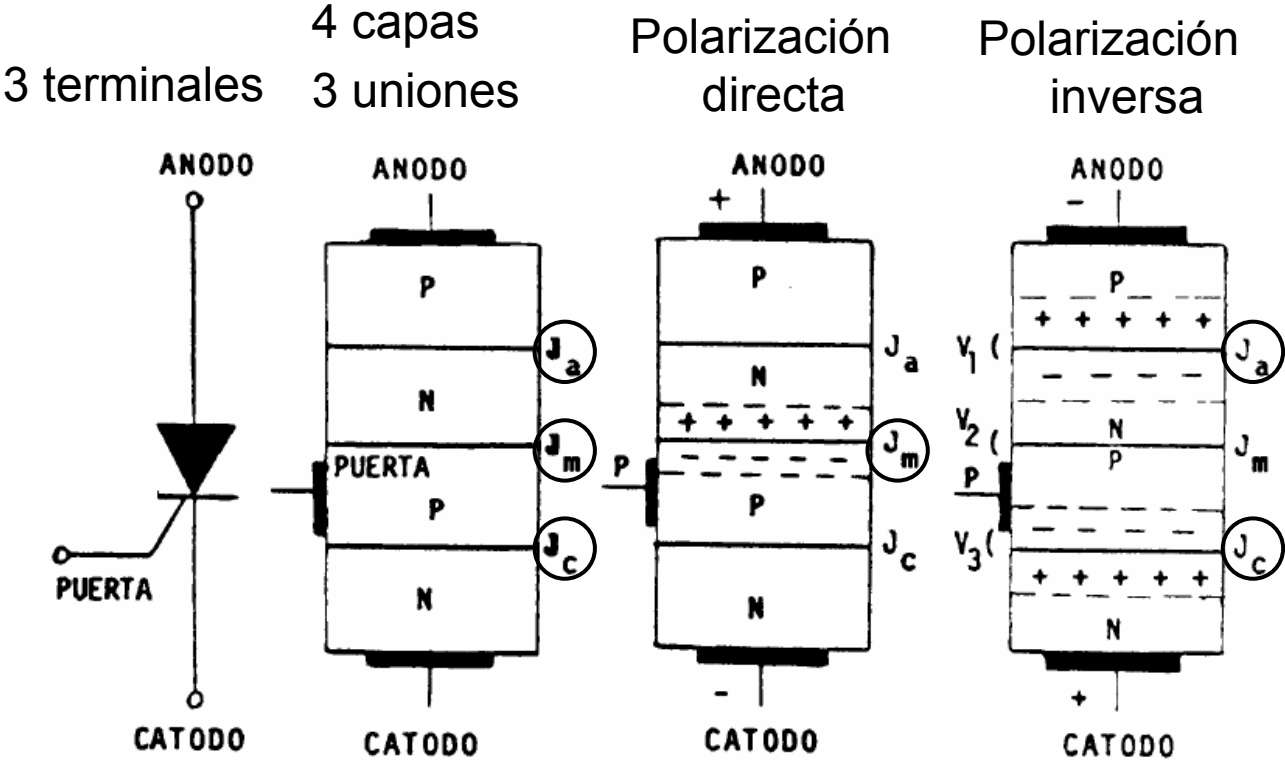
S. Lorenzo, J.M. Ruiz, A. Martín. Simulación, Control Digital y Diseño de *Convertidores Electrónicos de Potencia mediante PC*. Depto. Tecnología Electrónica. Universidad de Valladolid
pág. 34 a 47



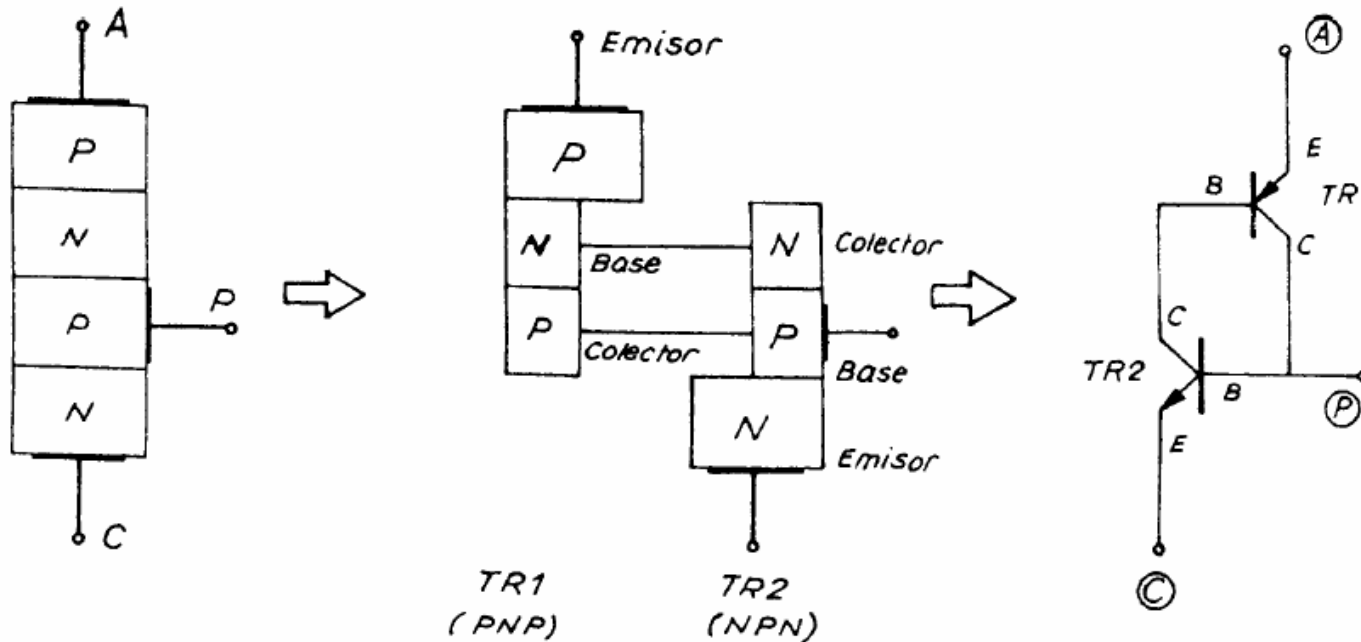
Índice

- Estructura
- Características estáticas
- Características de puerta
- Pérdidas de potencia.

Estructura



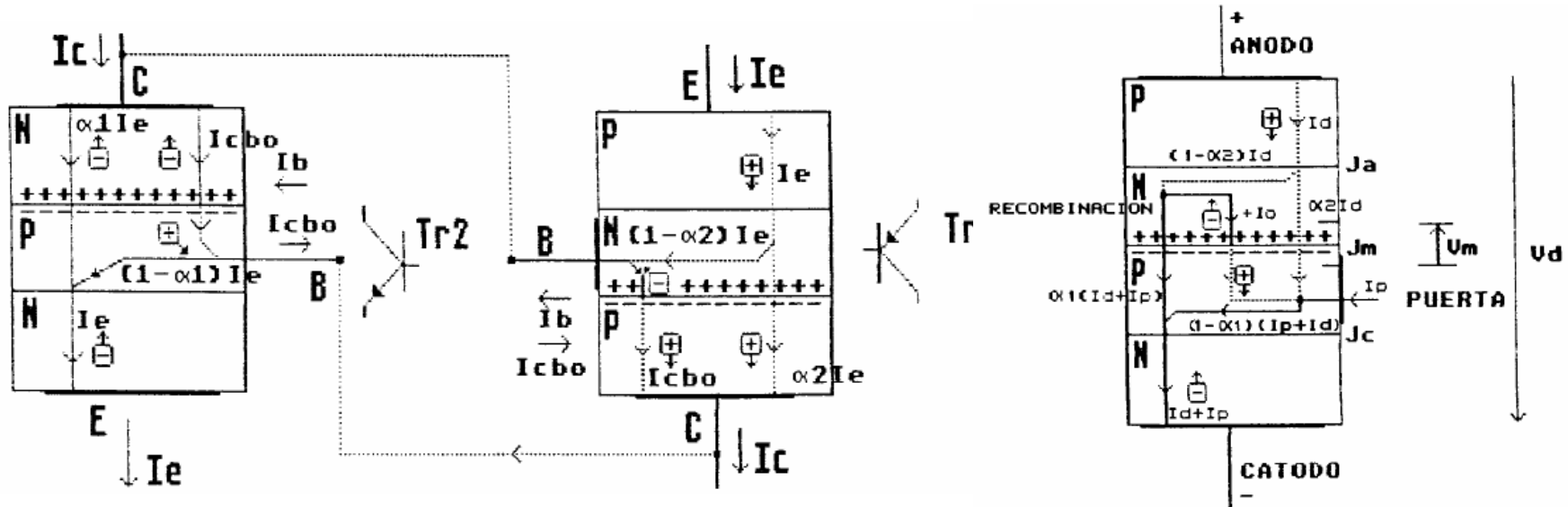
Características estáticas



Corriente de puerta cero: Polarización directa: J_m bloquea tensión \rightarrow no hay corriente
 Polarización inversa: J_a y J_c bloquean tensión \rightarrow no hay corriente

Encendido del tiristor: $I_{B2} = I_P \rightarrow I_{C2} = I_{B1} \rightarrow I_{E1}, I_{C1}, I_{B2} = I_{C1} + I_P \rightarrow$ se puede eliminar I_P

Características estáticas



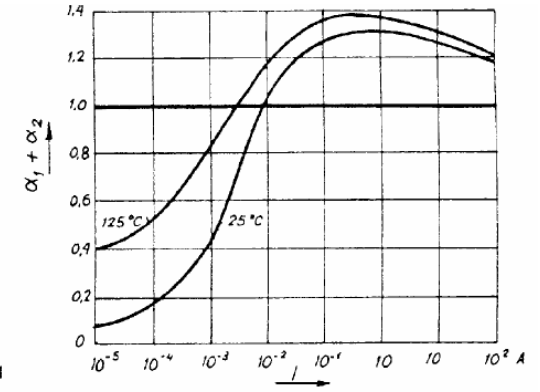
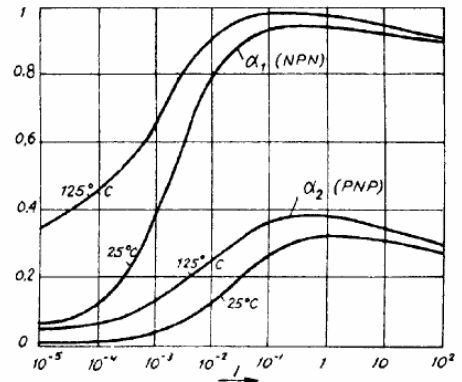
$$I_d = I_o + \alpha_2 I_d + \alpha_1 (I_d + I_p)$$

$$I_o = [1 - (\alpha_1 + \alpha_2)] I_d - \alpha_1 I_p$$

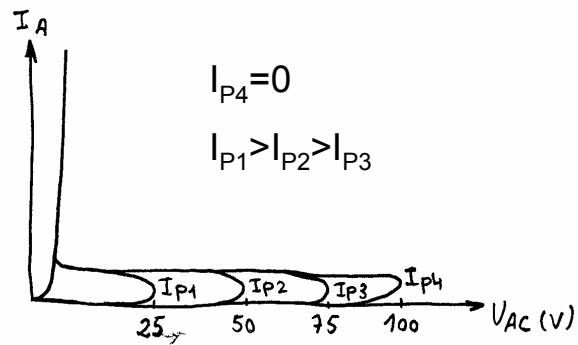
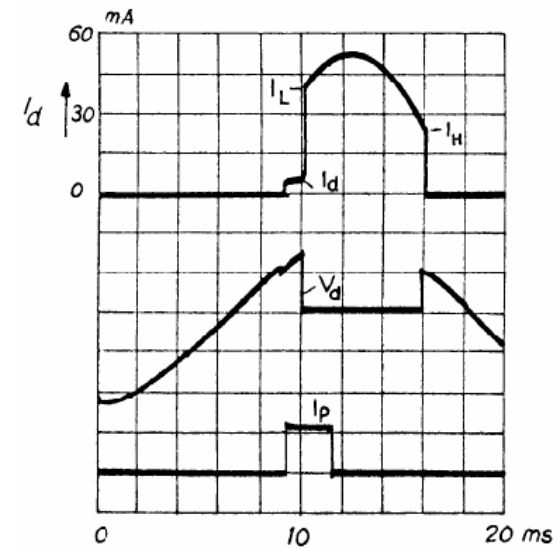
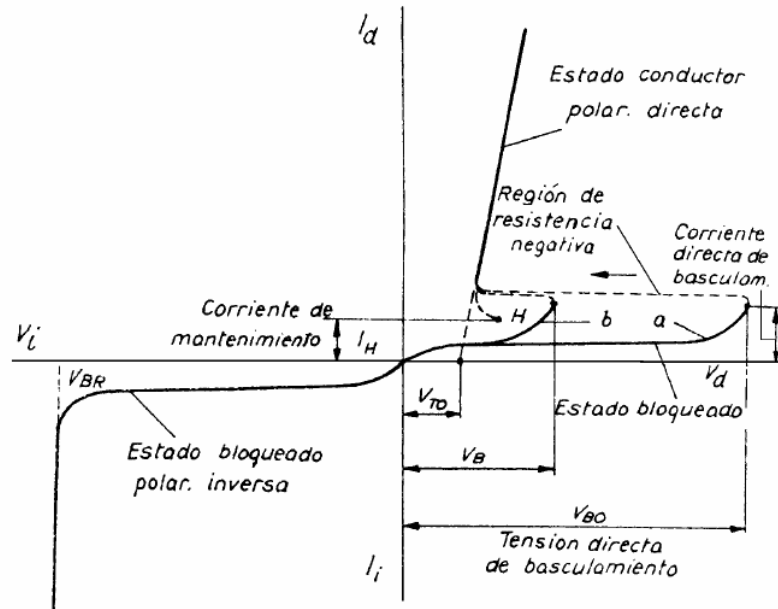
$$I_d = \frac{I_o + \alpha_1 I_p}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

Si $I_p=0$, $(\alpha_1 + \alpha_2) < 1 \rightarrow I_d \approx I_o$, tiristor bloqueado

Si I_p es suficiente, $(\alpha_1 + \alpha_2) = 1 \rightarrow I_d \approx \infty$, tiristor conduce

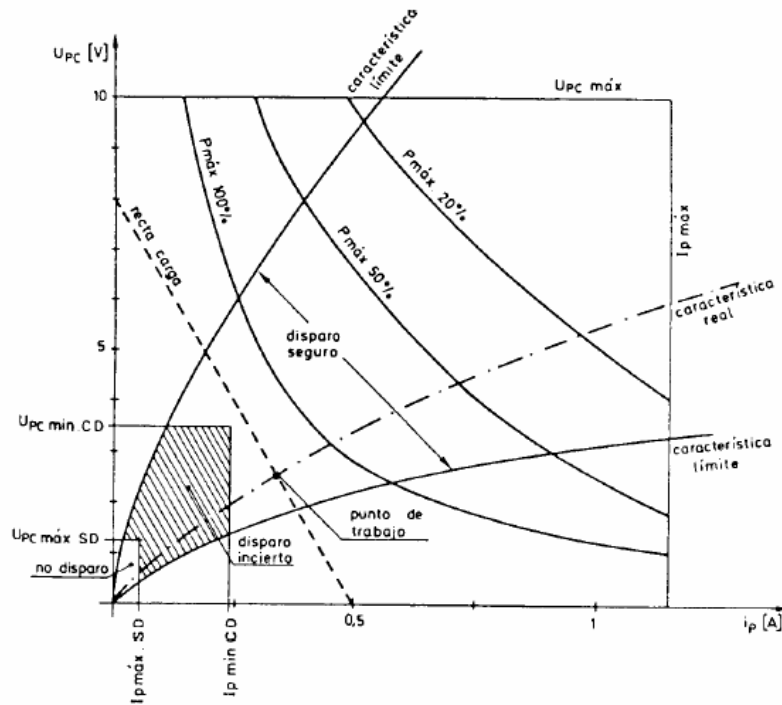


Características estáticas

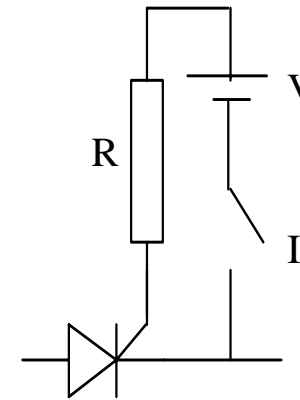


I_L corriente de cebado
 I_H corriente de mantenimiento

Características de puerta

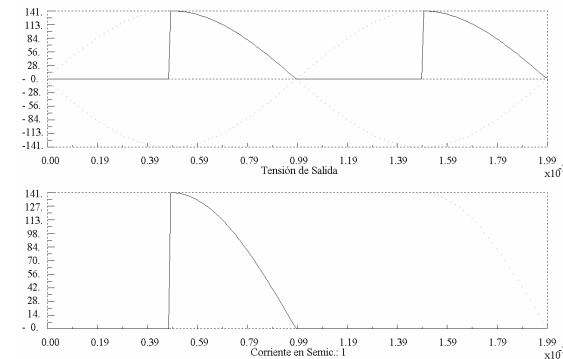
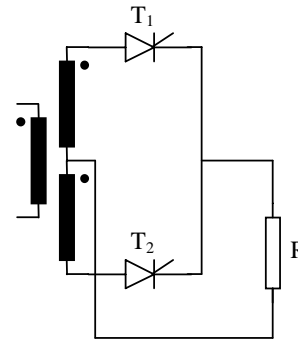
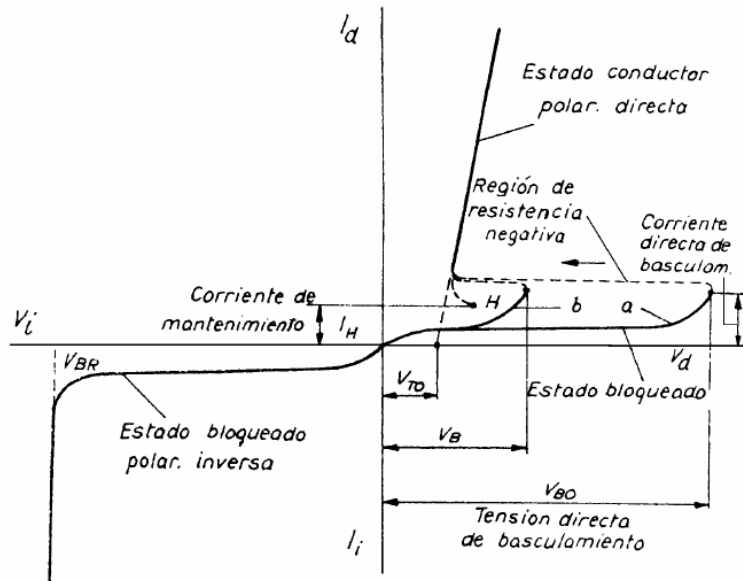


Punto de trabajo: Recta de carga



- Gran dispersión: temperatura, fabricación
- Valores límite: $I_{p\text{máx}}$, $U_{pc\text{máx}}$, $P_{\text{máx}}$
- Zonas de disparo: seguro, incierto, no disparo

Pérdidas de potencia



$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i_D(t) v_D(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_D(t) [r_{iD}(t) + V_{TO}] dt =$$

$$= \frac{1}{T} \left[\int_0^T r_{iD}^2(t) dt + \int_0^T i_D(t) V_{TO} dt \right] = r_{ID, eficaz}^2 + I_{D, medio} V_{TO}$$

$$I_{T1med} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} I_{pi} \cos enx dx = \frac{I_{pico}}{2\pi} = \frac{100\sqrt{2}}{2\pi} = 24,4A$$

$$I_{T1eficaz} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} (I_{pi} \cos enx)^2 dx} = \frac{I_{pico}}{2\sqrt{2}} = \frac{100\sqrt{2}}{2\sqrt{2}} = 50A$$

$$P_{T1} = V_{TO} I_{T1med} + r_{dI} I_{T1eficaz}^2 = 144W$$

PROBLEMAS DE TIRISTORES

Organización:

Tarea del grupo: que cada componente del grupo pueda explicar cualquiera de los problemas.

Lectura individual del material: 5'

Reunión de expertos:

Discusión del material: 10'

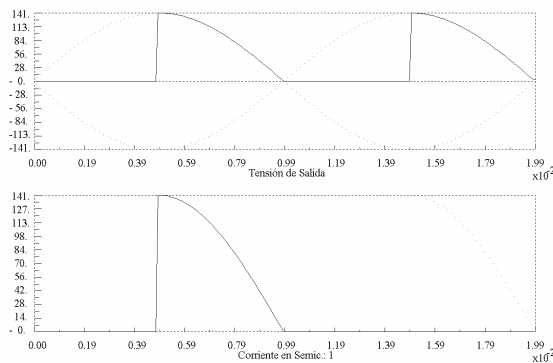
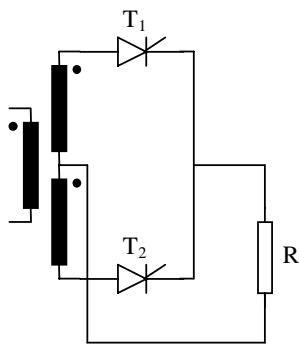
Reunión del grupo original:

Explicación de los problemas: 20'

Explicación de uno de los tres problemas por parte de un miembro del grupo elegido aleatoriamente: 10'

1. Un rectificador bifásico simple controlado está alimentado por una tensión simple (fase-neutro) de 100 V eficaces. El rectificador alimenta una resistencia de 1Ω . La tensión umbral del tiristor es de 2 V y su resistencia dinámica de $40 \text{ m}\Omega$. Calcular la potencia que disipa cada tiristor cuando el ángulo de disparo es 90° .

SOLUCIÓN:

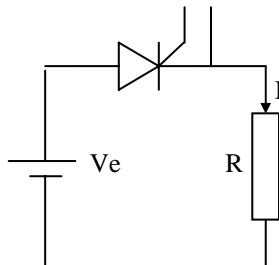


$$I_{T1med} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} I_{pi} \cos \alpha \sin x dx = \frac{I_{pico}}{2\pi} = \frac{100\sqrt{2}}{2\pi} = 24,4 \text{ A}$$

$$I_{T1eficaz} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} (I_{pi} \cos \alpha \sin x)^2 dx} = \sqrt{\frac{I_{pico}^2}{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} \frac{1 - \cos 2x}{2} dx} = \frac{I_{pico}}{2\sqrt{2}} = \frac{100\sqrt{2}}{2\sqrt{2}} = 50 \text{ A}$$

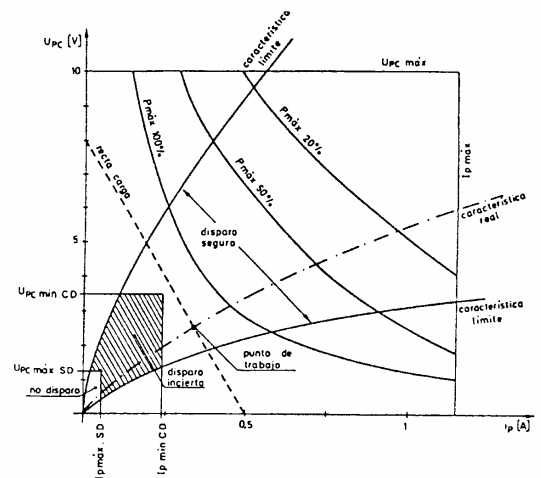
$$P_{T1} = V_u I_{T1med} + r_d I_{T1eficaz}^2 = 148,8 \text{ W}$$

2. En el circuito de la figura, la corriente de puerta I_p es de $0,5 \text{ A}$, $R = 1000 \Omega$, $I_{enclavamiento} = 120 \text{ mA}$. Calcular la corriente por el tiristor cuando se deja de aplicar la corriente de puerta y:
 - a) $V_e = 100 \text{ V}$
 - b) $V_e = 200 \text{ V}$



SOLUCIÓN:

Según la gráfica de las características de puerta, una corriente de puerta de $0,5 \text{ A}$ es suficiente para disparar el tiristor.

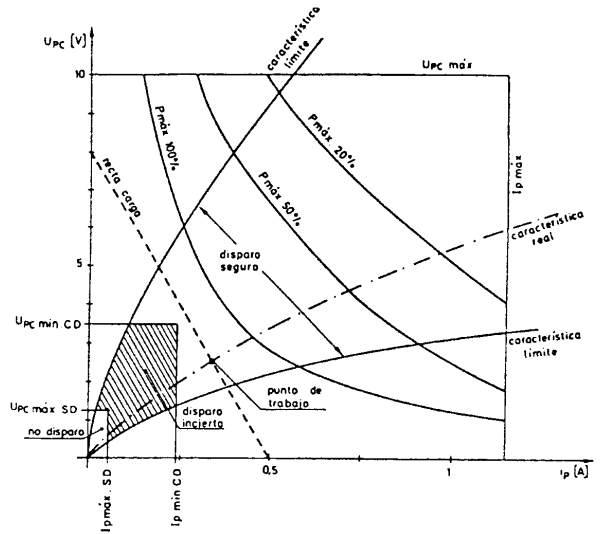
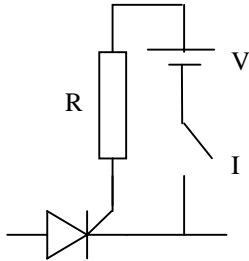


a) $I = V_e/R = 100 \text{ mA}$. Al ser menor que la corriente de enclavamiento, el tiristor no conduce.

b) $I = V_e/R = 200 \text{ mA}$. Al ser mayor que la corriente de enclavamiento, el tiristor sí conduce.

3. Un tiristor presenta unas características de puerta como las de la figura. Se dispara mediante el cierre del interruptor I. Indicar cuál es la forma correcta de disparar el tiristor.

- a) $V = 5\text{ V}$, $R = 10\ \Omega$, duración del pulso = 50 %
- b) $V = 10\text{ V}$, $R = 10\ \Omega$, duración del pulso = 50 %
- c) $V = 10\text{ V}$, $R = 10\ \Omega$, duración del pulso = 100 %
- d) $V = 5\text{ V}$, $R = 20\ \Omega$, duración del pulso = 100 %



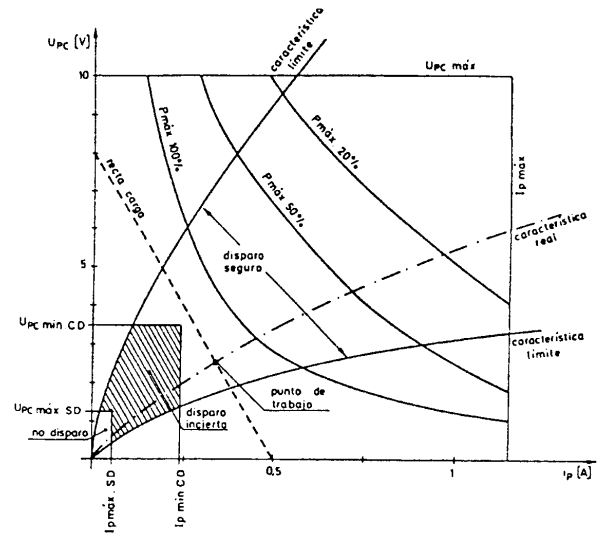
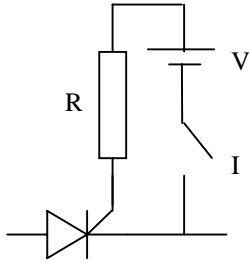
SOLUCIÓN:

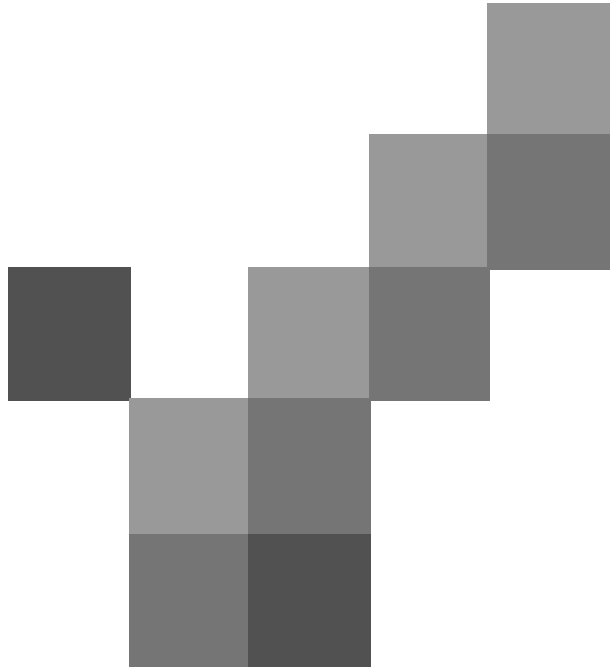
<p style="text-align: center;">Recta de Carga de la Puerta</p>	<p style="text-align: center;">Recta de Carga de la Puerta</p>
a) Incorrecta	b) Correcta
<p style="text-align: center;">Recta de Carga de la Puerta</p>	<p style="text-align: center;">Recta de Carga de la Puerta</p>
c) Incorrecta	d) Incorrecta

Tarea para la clase siguiente:

Un tiristor presenta unas características de puerta como las de la figura. Se dispara mediante el cierre del interruptor I. Indicar cuál es la forma correcta de disparar el tiristor.

- a) $V = 10\text{ V}$, $R = 10\ \Omega$, duración del pulso = 100 %
- b) $V = 5\text{ V}$, $R = 20\ \Omega$, duración del pulso = 100 %
- c) $V = 10\text{ V}$, $R = 20\ \Omega$, duración del pulso = 100 %
- d) $V = 10\text{ V}$, $R = 5\ \Omega$, duración del pulso = 50 %





CAPÍTULO 5

EL IGBT

TEXTO:

N. Mohan, T.M. Undeland. *Power Electronics*. Editorial John Willey and Sons. 1995
(Referencia Biblioteca, A-6574)
pág. 626 a 632



Índice

- Introducción.
- Estructura básica.
- Características V-I.
- Operación física del componente.
- Conmutación del IGBT.
- Pérdidas de potencia.



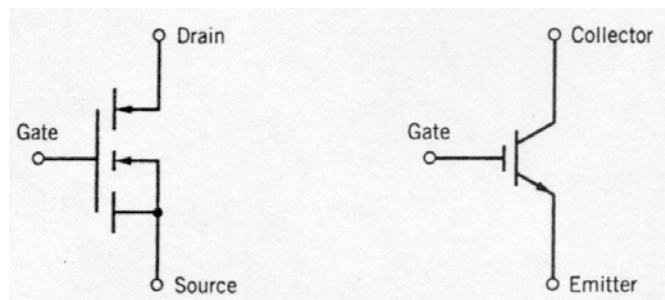
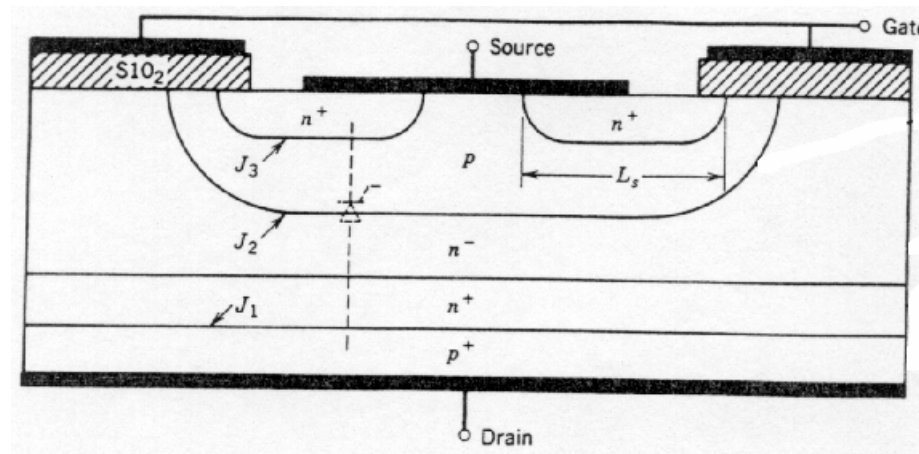
Introducción

- Transistores bipolares
 - menores pérdidas en conducción
 - mayores pérdidas en conmutación
- MOSFET
 - mayores pérdidas en conducción
 - menores pérdidas en conmutación
- IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)
 - características intermedias
 - semiconductor más empleado en inversores
 - características

Estructura básica

- Tres terminales
- Tres uniones
- Tiristor parásito
- n^+ no es esencial para el funcionamiento
- Símbolos:

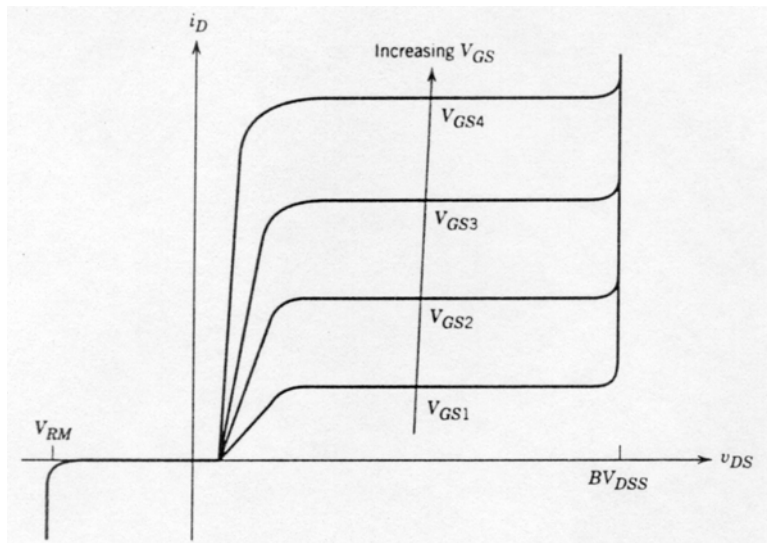
- D, G, S
- C, G, E



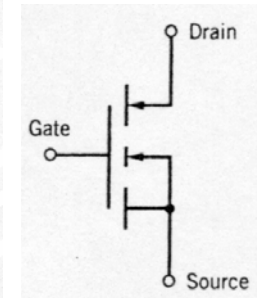
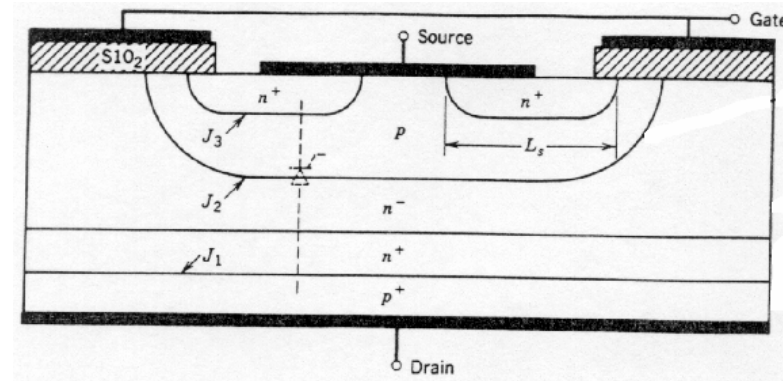
Características V-I

■ Curvas V-I de salida

- Control por tensión V_{GS}
- J_2 bloquea tensión directa
- J_1 bloquea la tensión inversa

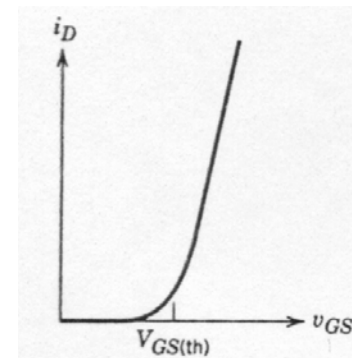


Curvas V-I de salida de un IGBT



■ Curva de transferencia

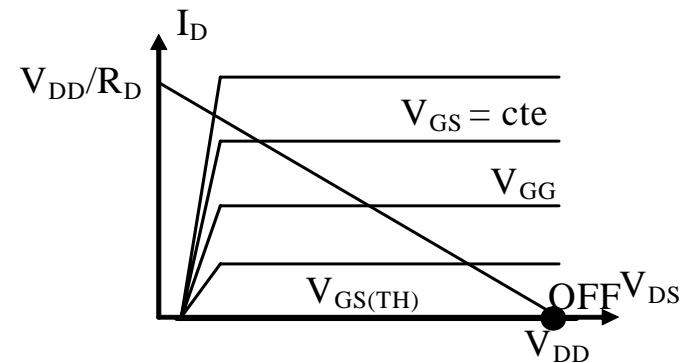
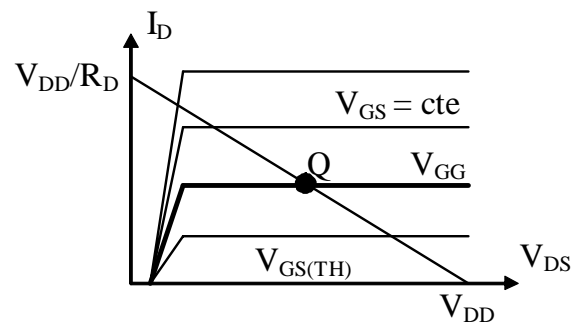
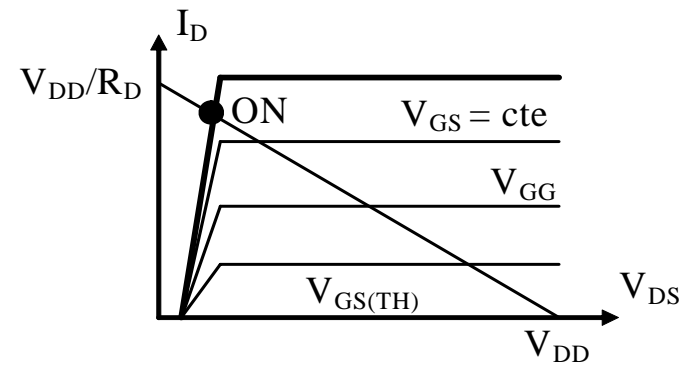
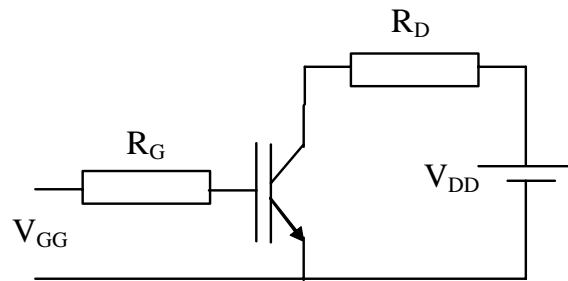
- Si $V_{GS} < V_{GS(TH)}$, no conduce



Curva de transferencia de un IGBT

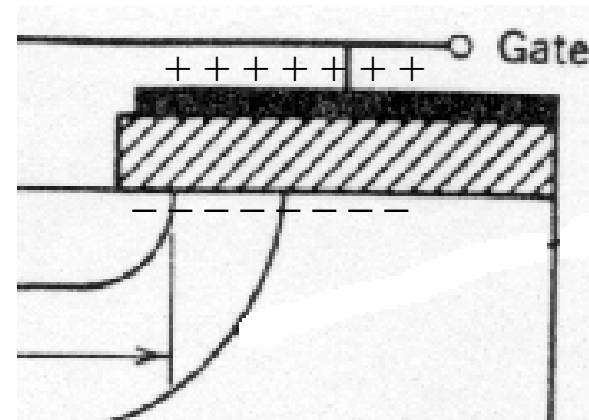
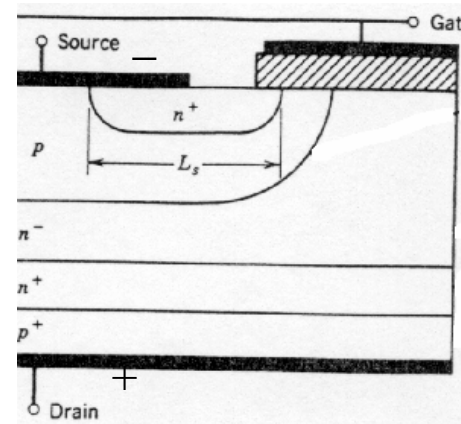
Características V-I

- Punto de trabajo

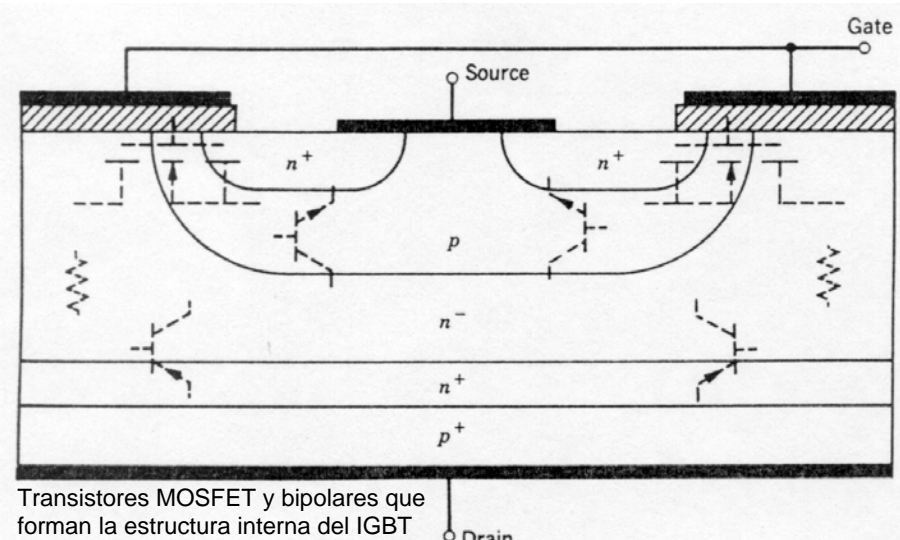
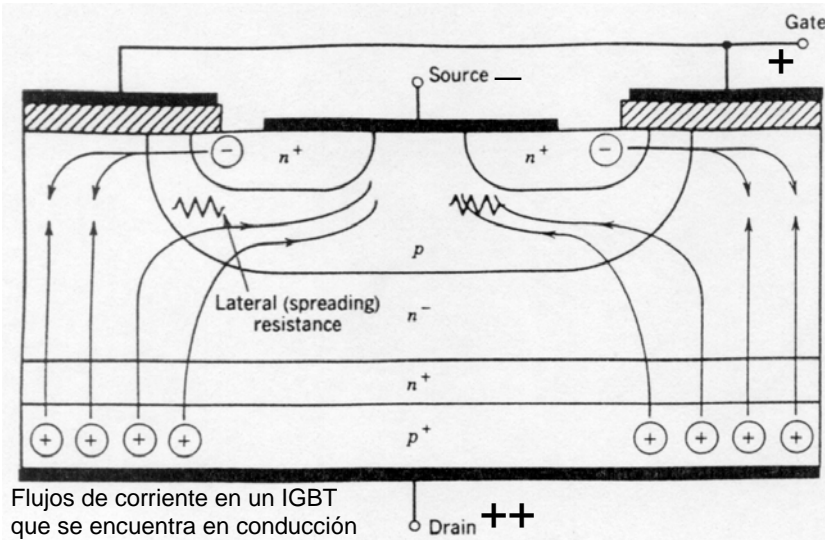


Operación física del componente

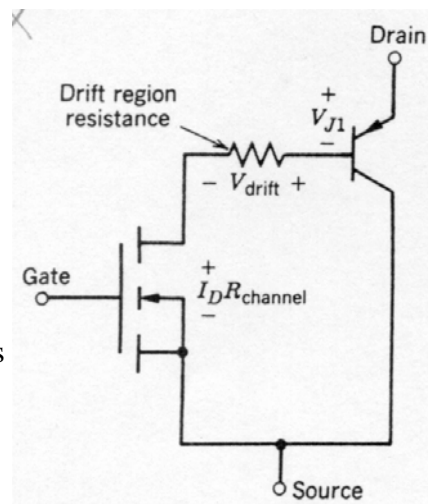
- BLOQUEO
 - Si $V_{GS} < V_{GS(TH)}$, no conduce
- CONDUCCIÓN
 - Si $V_{GS} > V_{GS(TH)}$, capa de inversión



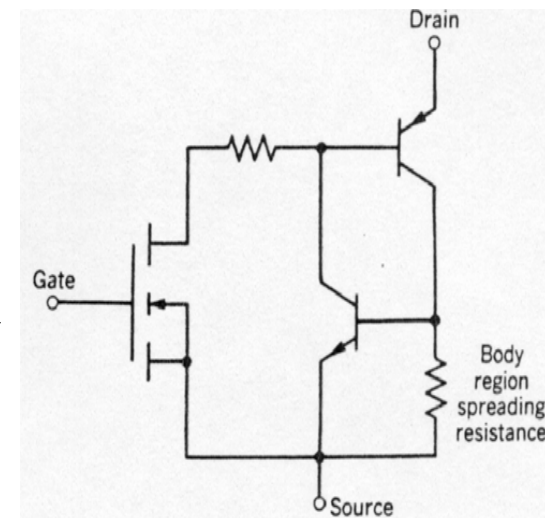
Operación física del componente



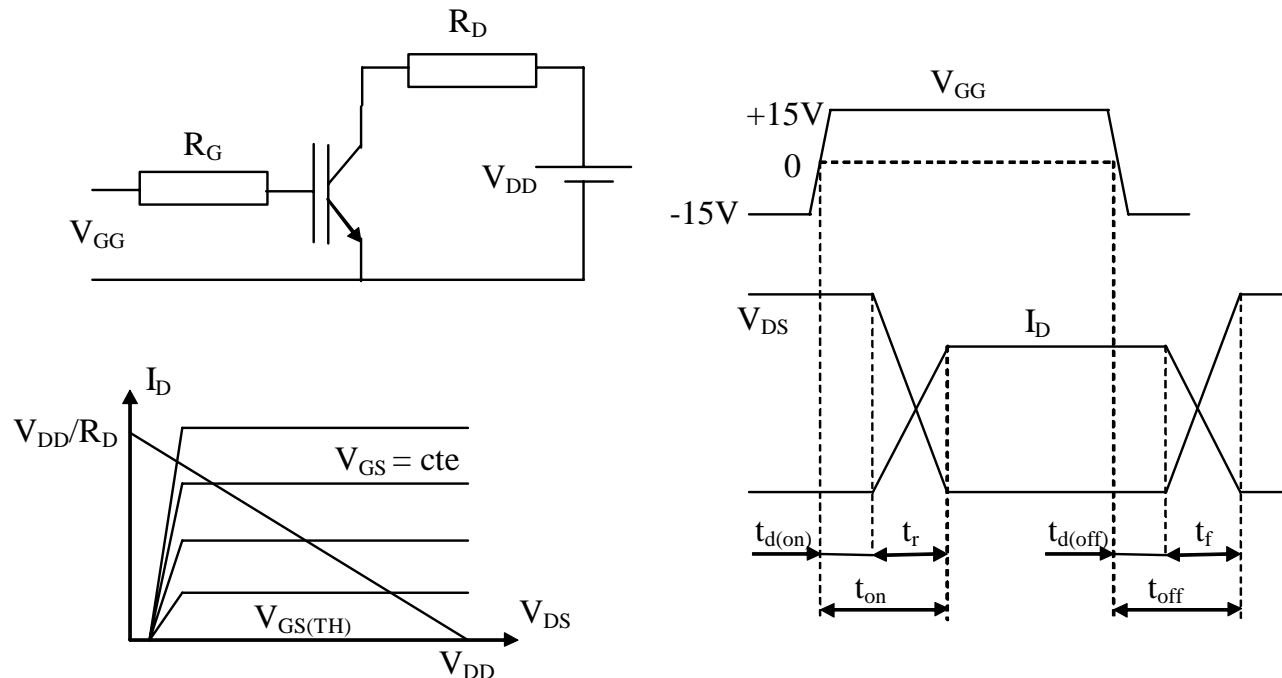
Circuito equivalente de un IGBT, válido para condiciones normales de funcionamiento



Circuito equivalente más completo de un IGBT; muestra los transistores que forman el tiristor parásito



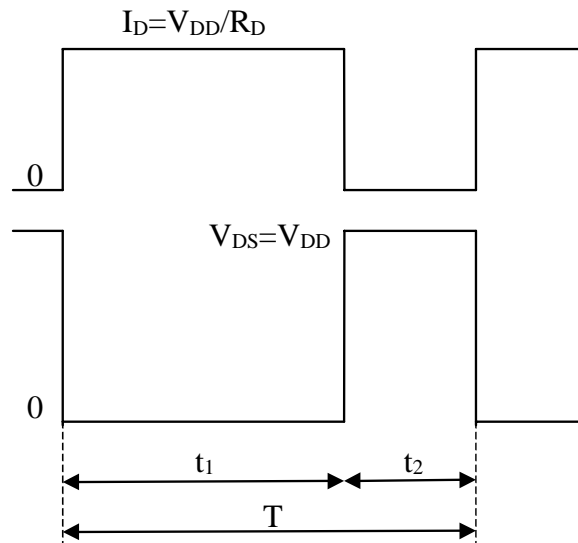
Conmutación del IGBT



$t_{d(on)}$ (tiempo de retardo en el encendido): V_{GS} pasa de $-15V$ a $V_{GS(TH)}$, se carga el condensador de puerta
 t_r (tiempo de subida): incremento de la corriente del IGBT hasta el valor en conducción
 $t_{d(off)}$ (tiempo de retardo en el apagado): V_{GS} pasa de $+15V$ al valor en que I_D comienza a reducirse, se descarga el condensador de puerta
 t_f (tiempo de caída): disminución hasta cero de la corriente del IGBT

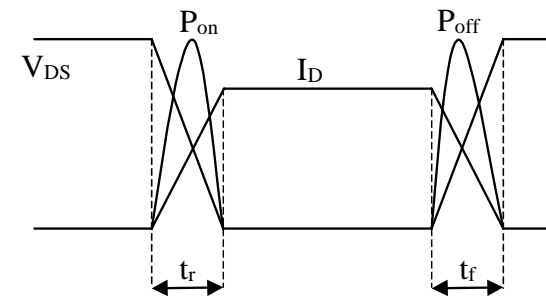
Pérdidas de potencia

- Pérdidas de potencia por conducción



$$P_{conducción} = I_D V_{DS} \frac{t_1}{t_1 + t_2} = I_D V_{DS} \frac{t_1}{T}$$

- Pérdidas de potencia por conmutación



$$E_{on} = \int_0^{t_r} P_{on}(t) dt = \int_0^{t_r} V_{DS} I_D dt = \int_0^{t_r} \left(V_{DD} - \frac{V_{DD}}{t_r} t \right) \left(\frac{V_{DD}}{R} \frac{t}{t_r} \right) dt = \frac{V_{DD}^2 t_r}{6R}$$

$$E_{off} = \int_0^{t_f} P_{off}(t) dt = \frac{V_{DD}^2 t_f}{6R}$$

$$P_{conmutación} = (E_{on} + E_{off}) f$$

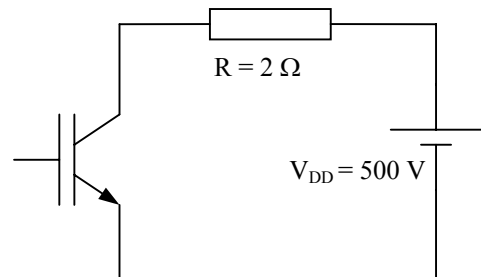
CLASE DE PROBLEMAS DE IGBT

Repartir los tres problemas entre los grupos base existentes, un problema para cada grupo base. Resolverlo y exponer la solución.

Objetivos:

- Resolver correctamente el problema
- Exponer de forma clara la solución adoptada

1. El IGBT SKM400GA102D de la marca SEMIKRON se emplea en el circuito de la figura. Calcular la potencia que disipa cuando conmuta a una frecuencia de 10 kHz. Datos: $V_{DS(SAT)} = 2.5 \text{ V}$, $t_r = 700 \text{ ns}$, $t_f = 500 \text{ ns}$, ciclo de servicio = 0.5



2. Calcular el punto de trabajo del IGBT de la figura anterior cuando $V_{GS} = 15 \text{ V}$, empleando sus gráficas $I_C - V_{CE}$.

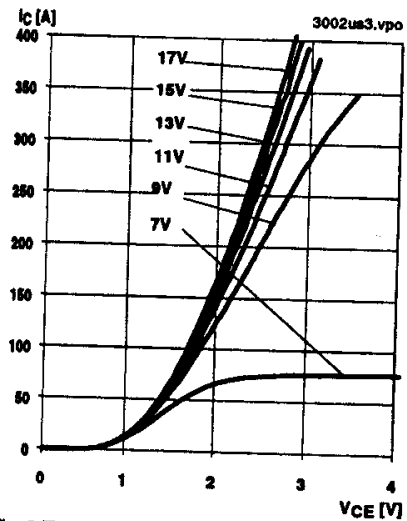
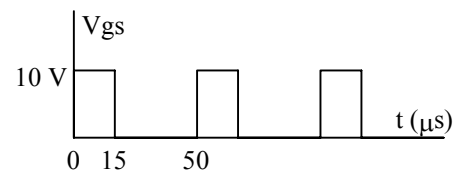
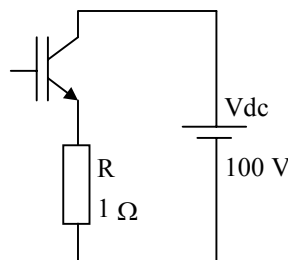
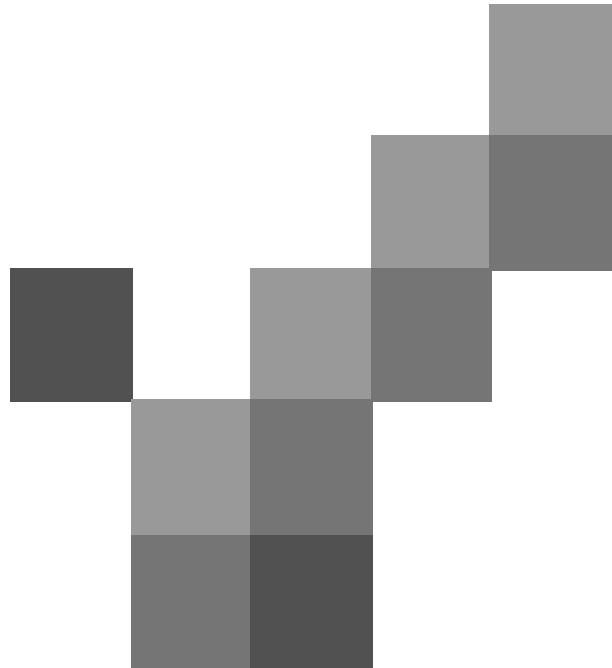


Fig. 9 Typ. output characteristic, $t_p = 80 \mu\text{s}$; $25 \text{ }^\circ\text{C}$

3. Un IGBT se monta en un circuito con una fuente de tensión continua y una resistencia. Tiene aplicada una tensión de puerta periódica, como se indica en la figura. Calcular la potencia disipada (tanto por conmutación como por conducción) en el IGBT.

Datos del IGBT: $V_{ds(on)} = 1 \text{ V}$, $t_d(on) = 50 \text{ ns}$, $t_r = 40 \text{ ns}$, $t_d(off) = 300 \text{ ns}$, $t_f = 35 \text{ ns}$.





CAPÍTULO 6

RÉGIMEN TÉRMICO

TEXTO:

J.A. Gualda, S. Martínez, P.M. Martínez. *Electrónica Industrial: Técnicas de Potencia*. Editorial Marcombo. 1992.
pág. 179 a 183

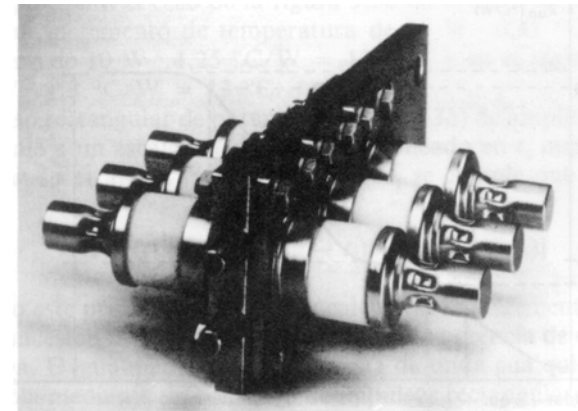
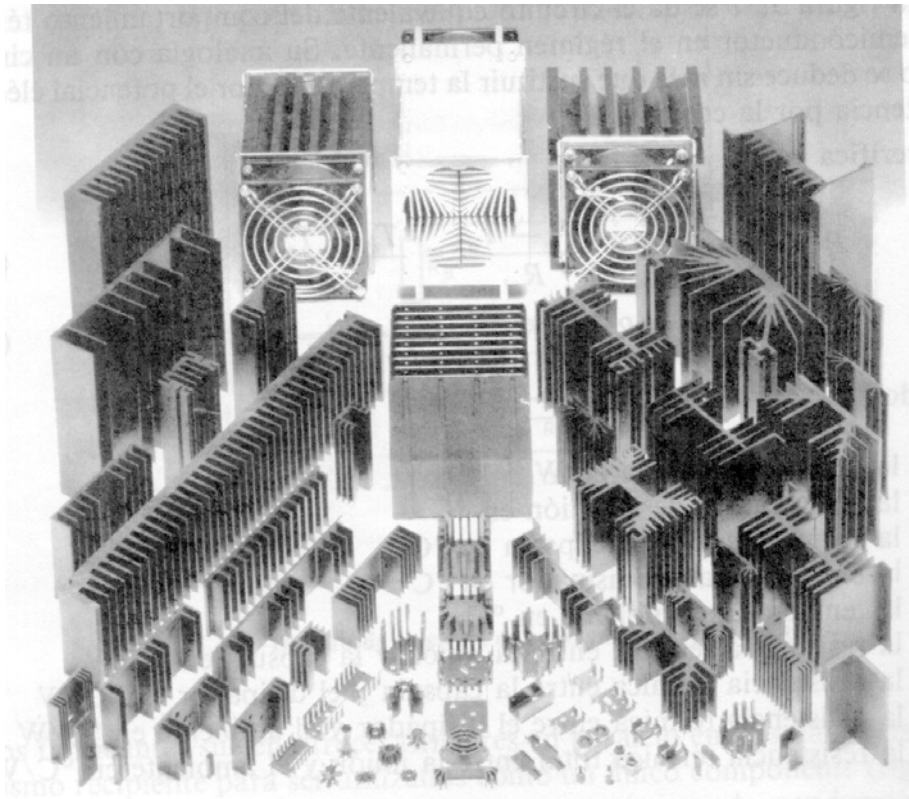


Índice

- Introducción
- Régimen térmico permanente
- Régimen térmico transitorio

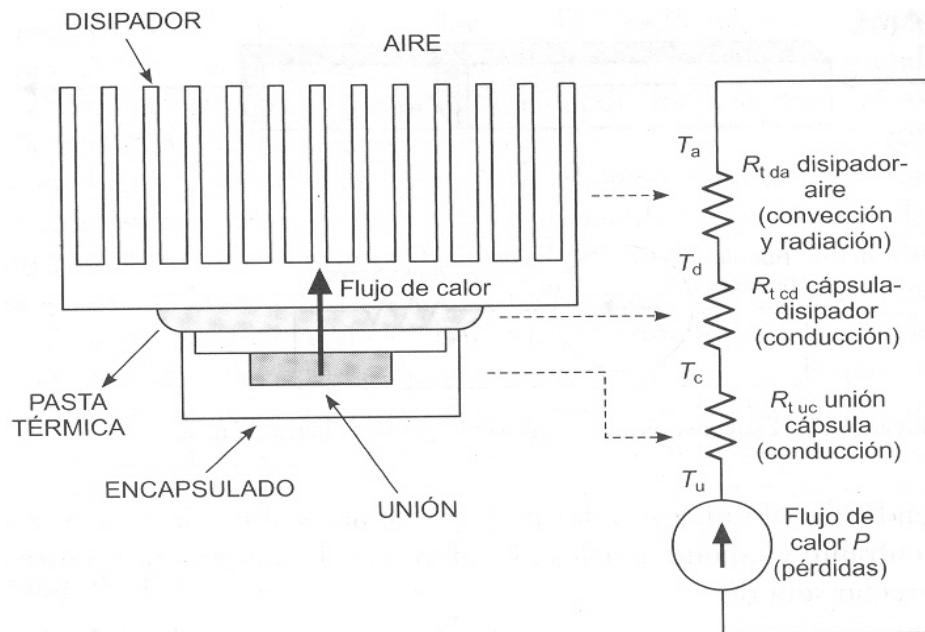
Introducción

- Modelos de radiadores
- Radiador refrigerado por agua



Régimen térmico permanente

■ Circuito térmico equivalente



$$P = \frac{T_u - T_c}{R_{uc}} = \frac{T_c - T_d}{R_{cd}} = \frac{T_d - T_a}{R_{da}} = \frac{T_u - T_a}{R_{ua}}$$

$$R_{ua} = R_{uc} + R_{cd} + R_{da}$$

P = potencia disipada

T_u = temperatura de la unión

T_c = temperatura de la cápsula

T_d = temperatura del disipador

T_a = temperatura ambiente

R_{uc} = resistencia térmica unión cápsula

R_{cd} = resistencia térmica cápsula disipador

R_{da} = resistencia térmica disipador ambiente

R_{ua} = resistencia térmica unión ambiente

$$T_d = 70, T_a = 40, R_{uc} = 0,10^\circ\text{C} / \text{W}$$

$$R_{cd} = 0,05^\circ\text{C} / \text{W}, R_{da} = 0,15^\circ\text{C} / \text{W}$$

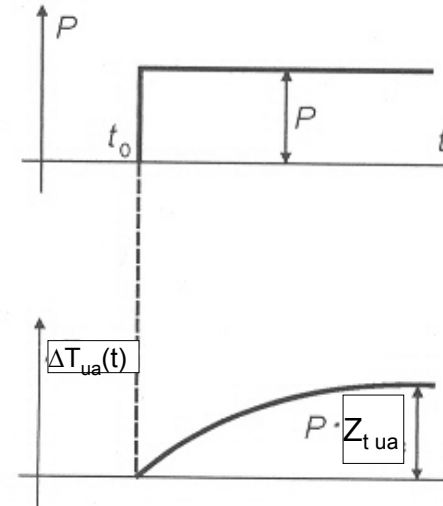
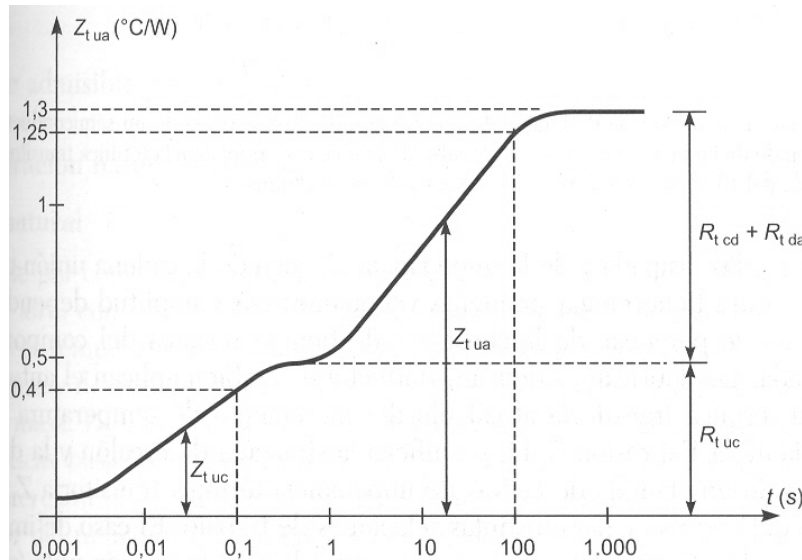
$$P = \frac{T_d - T_a}{R_{da}} = \frac{70 - 40}{0,15} = 200\text{W}$$

$$R_{ua} = 0,10 + 0,05 + 0,15 = 0,30^\circ\text{C} / \text{W}$$

$$T_u = T_a + PR_{ua} = 40 + 200 \cdot 0,30 = 100^\circ\text{C}$$

Régimen térmico transitorio

- Energía de la unión: calentamiento + transmisión



$$\Delta T_u(t) = P \cdot Z_{ua}(t - t_0)$$

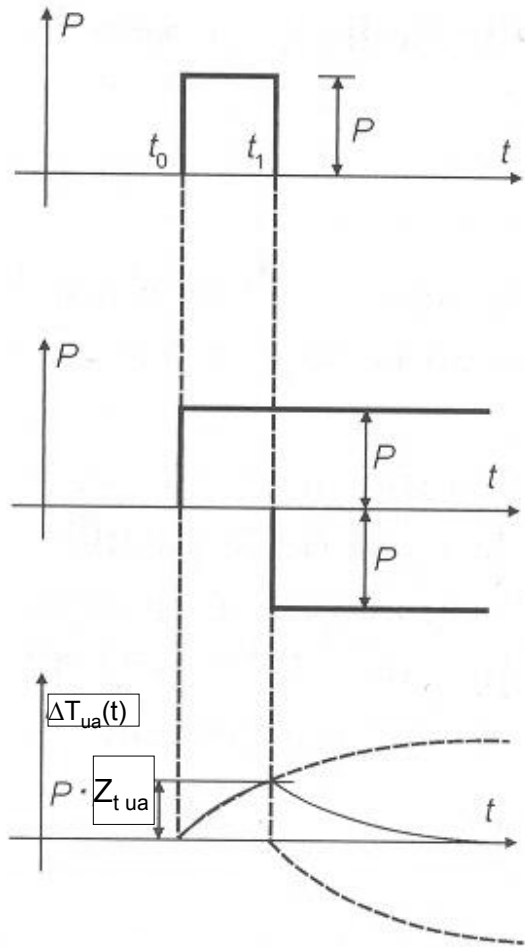
$$T_u(t) = T_a + \Delta T_u(t)$$

$\Delta T_u(t)$ = incremento de temperatura de la unión en el instante t

P = escalón de potencia aplicado en el instante t_0

$Z_{ua}(t-t_0)$ = impedancia térmica transitoria entre la unión y el ambiente para el tiempo t- t_0

Régimen térmico transitorio



$$\Delta T_u(t) = P[Z_{ua}(t - t_0) - Z_{ua}(t - t_1)]$$

$$T_u(t) = T_a + \Delta T_u(t)$$

PROBLEMAS DE REGIMEN TERMICO

Organización:

Objetivo: que cada componente del grupo entienda los tres problemas que aparecen resueltos.

Lectura individual del material: 3'

Reunión de expertos:

Discusión del material: 10'

Reunión del grupo original:

Explicación de los problemas: 20'

Tarea: resolver el problema 4: 10'

Roles: Para la reunión de expertos (roles estáticos durante la reunión):

Rol 1: Explica el contenido del material asignado tal y como él lo entiende

Rol 2: Pide aclaraciones, y contribuye con su propia opinión sobre el tema

Rol 3: Controla el tiempo

Para la reunión del grupo (van rotando cada vez que se discute uno de los esquemas):

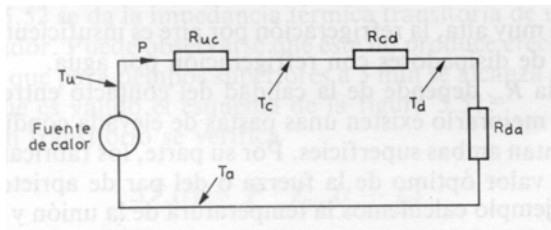
Rol 1: Explica su problema

Rol 2: Pide aclaraciones

Rol 3: Controla el tiempo

1. Un diodo tiene una temperatura en la unión de 125 °C cuando disipa una potencia de 200 W. La temperatura ambiente es de 40 °C. Las resistencias térmicas unión-caja y caja-radiador son 0,10 y 0,05 °C/W respectivamente. Calcular la resistencia térmica del radiador que debe montarse.

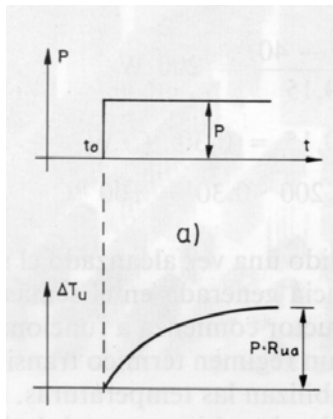
SOLUCIÓN:



$$R_{da} = \frac{T_u - T_a}{P} - R_{uc} - R_{cd} = \frac{125 - 40}{200} - 0,10 - 0,05 = 0,275^\circ\text{C/W}$$

2. Un tiristor montado sobre un radiador presenta la impedancia térmica transitoria de la figura. La potencia que disipa el tiristor es de 450 W. Si la temperatura ambiente es de 25 °C, calcular la temperatura en la unión cuando han transcurrido 200 segundos.

SOLUCIÓN:



$$\Delta T_u(t) = P \cdot Z_{ua}(t - t_0) = P \cdot Z_{ua}(200s) = 450 \cdot 0,12 = 54^\circ\text{C}$$

$$T_u = T_a + \Delta T_u(200s) = 25 + 54 = 79^\circ\text{C}$$

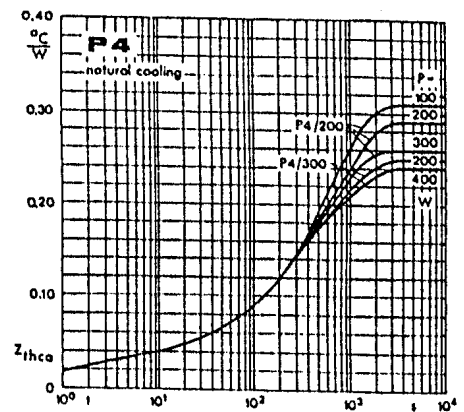


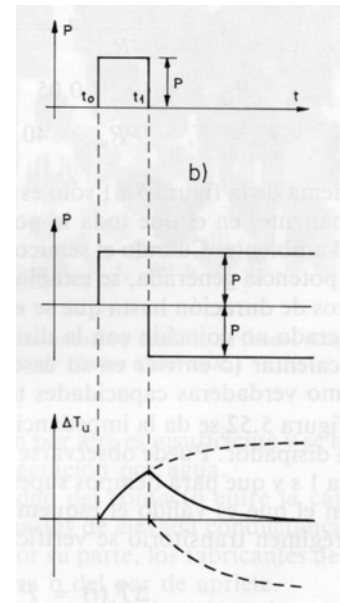
Fig. 9 Transient thermal impedance vs. time

3. Un tiristor montado sobre un radiador presenta la impedancia térmica transitoria de la figura. Desde $t = 0$ hasta $t = 160$ s el tiristor disipa 1000 W. A partir de ese momento pasa a disipar 0 W. Si la temperatura ambiente es de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, calcular la temperatura en la unión cuando han transcurrido 200 segundos.

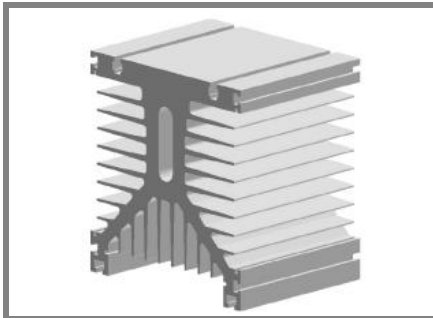
SOLUCIÓN:

$$\Delta T_u(t) = P \cdot Z_{ua}(t - t_0) - P \cdot Z_{ua}(t - t_1) = P \cdot Z_{ua}(200s) - P \cdot Z_{ua}(40s) = 1000 \cdot 0,12 - 1000 \cdot 0,06 = 60^{\circ}\text{C}$$

$$T_u = T_a + \Delta T_u(200s) = 40 + 60 = 100^{\circ}\text{C}$$



4. Un tiristor montado sobre un radiador presenta la impedancia térmica transitoria de la figura. En el arranque de un motor, la potencia que disipa el tiristor es de 900 W durante los primeros 130 segundos y 450 W a partir de ese instante. Si la temperatura ambiente es de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, calcular la temperatura en la unión cuando han transcurrido 200 segundos.



Heatsink

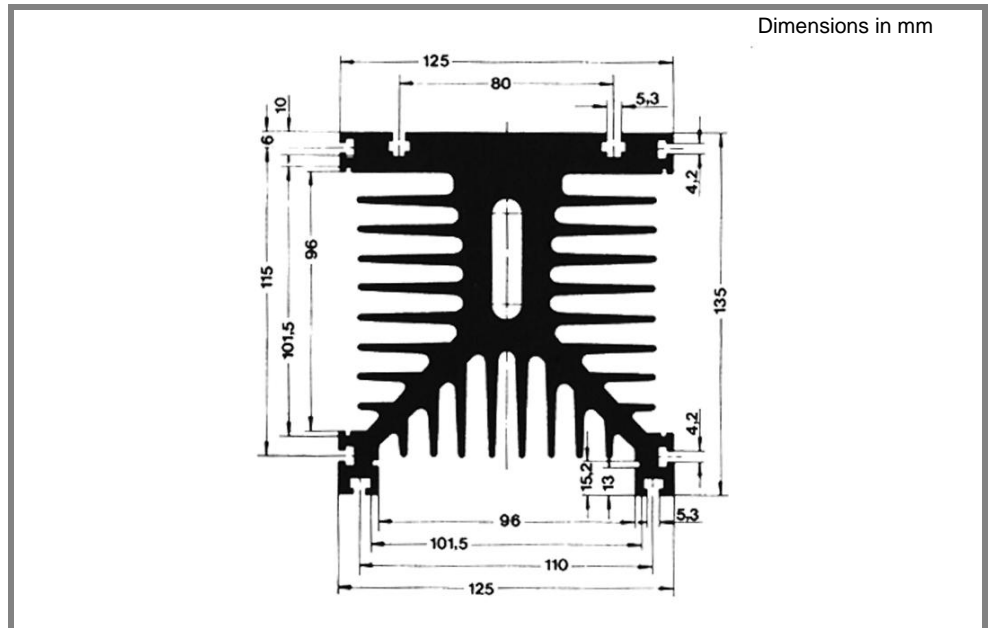
Standard lengths	n	b / d Ø mm	R _{thha} natural cooling K/W	R _{thha} with Fan SKF 3-230-01 K/W	w kg
P 3/120	1	20	0,55 (100W)	0,167	2,1
	3		0,43 (150W)	0,147	
	6		0,33 (200W)	0,108	
P 3/180	2	20	0,39 (150W)	0,132	3,1
	3		0,36 (180W)	0,12	
	6		0,33 (200W)	0,108	
P 3/300	1	34		0,144	5,3
	3			0,118	
	6			0,0847	

For isolated power modules

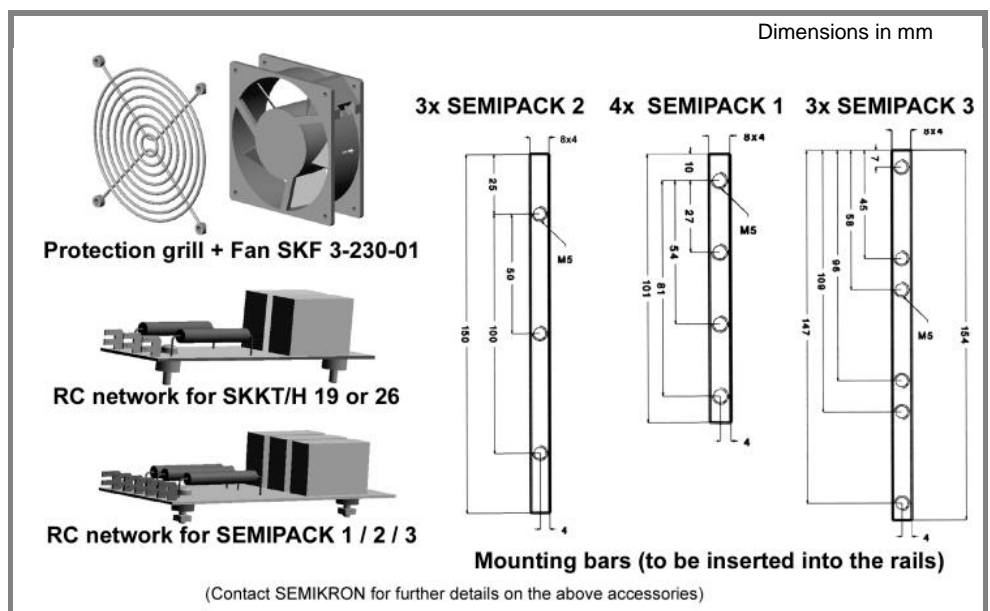
P 3

Features

- Intended for isolated power modules, SEMIPACK (1 to 4) and SEMITRANS 2 range
- Integrated rails allow for easy mounting of the modules
- Available in various lengths
- Best fitted fan : SKF 3-230-01
- Mounting bar rails available (see sketches)

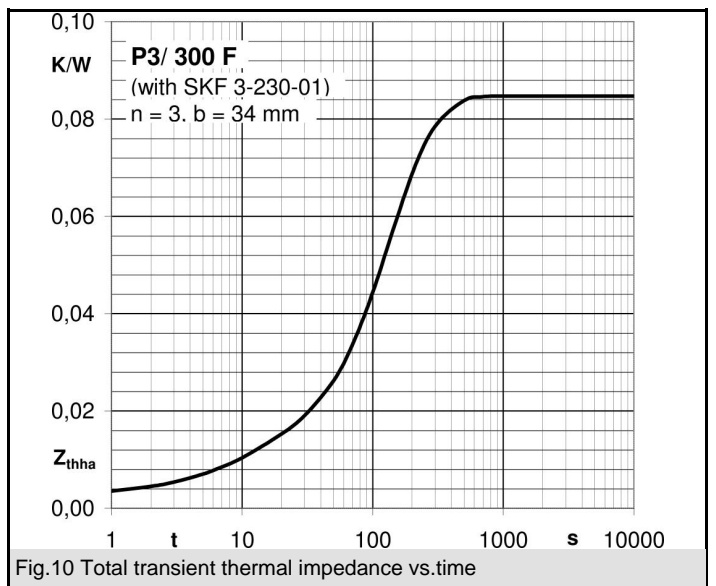
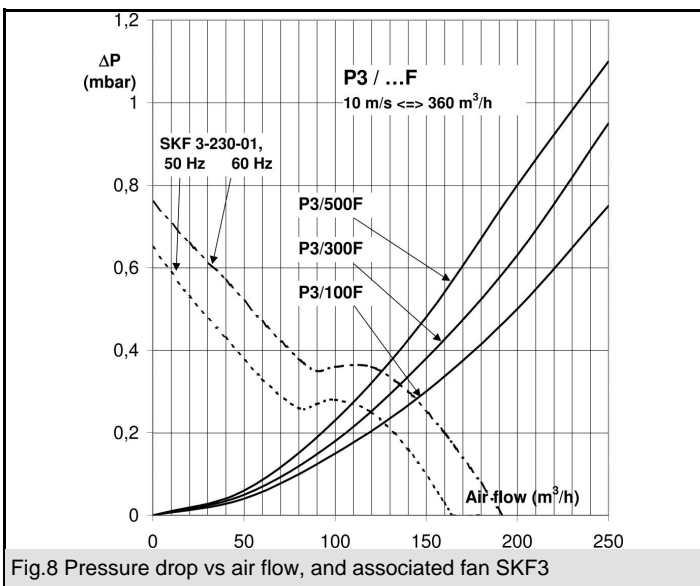
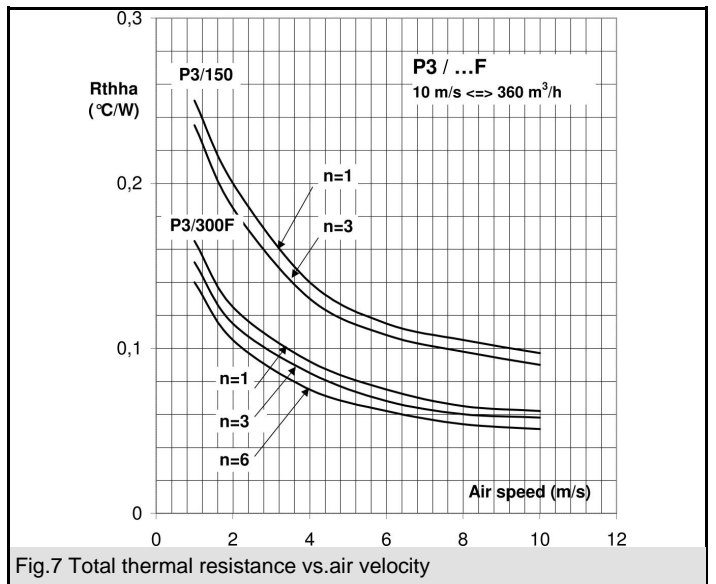
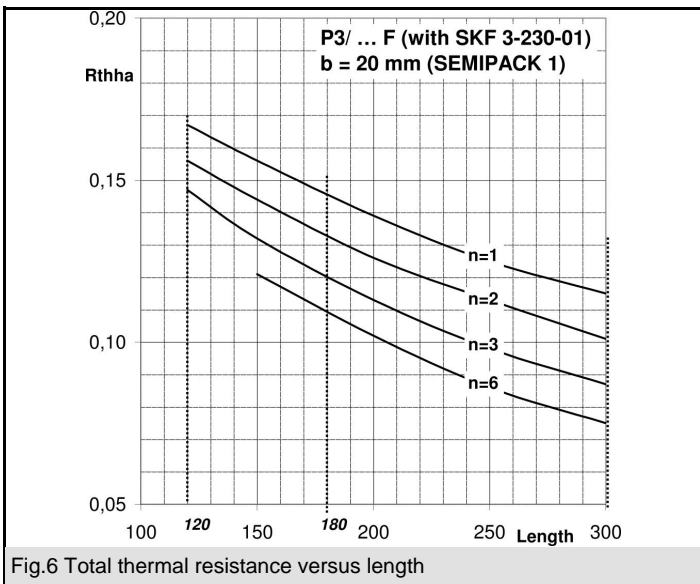
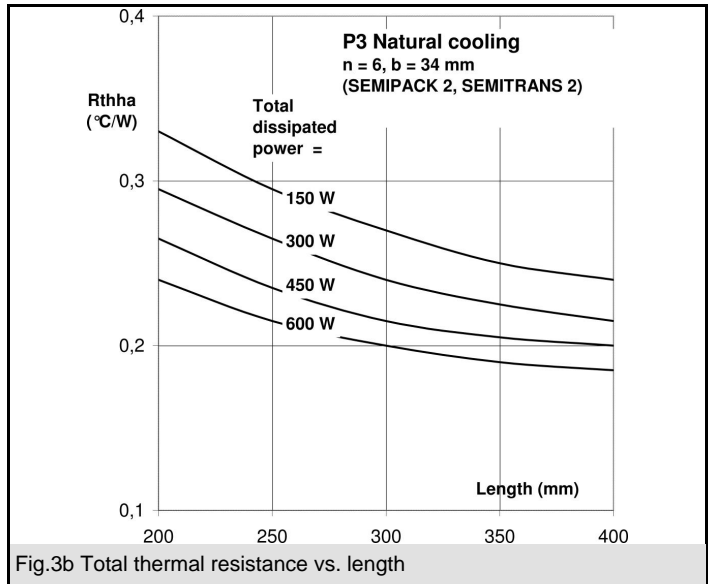
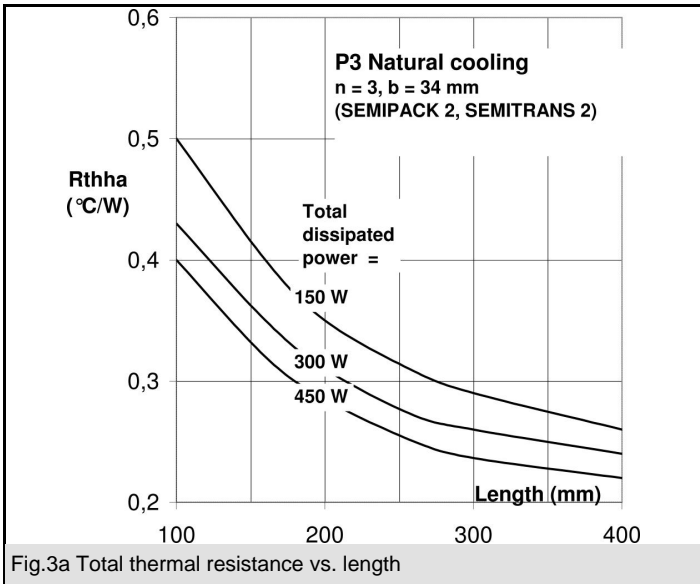


P3 general profile dimensions (w = 17,6 kg/m)

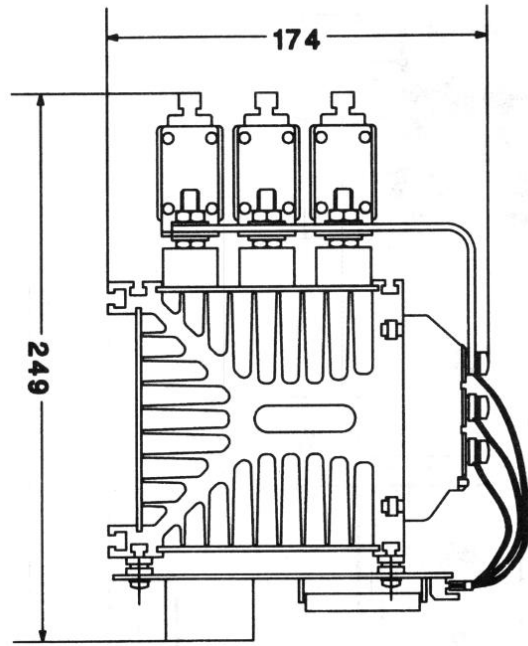
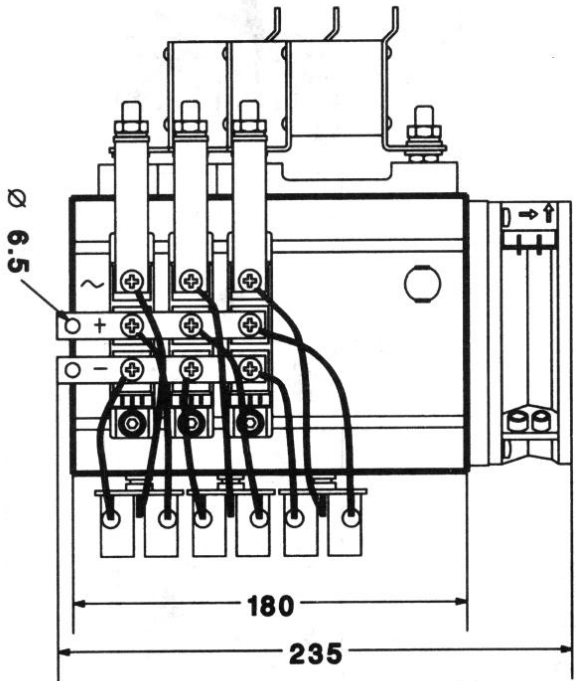


(Contact SEMIKRON for further details on the above accessories)

P 3 standard accessories



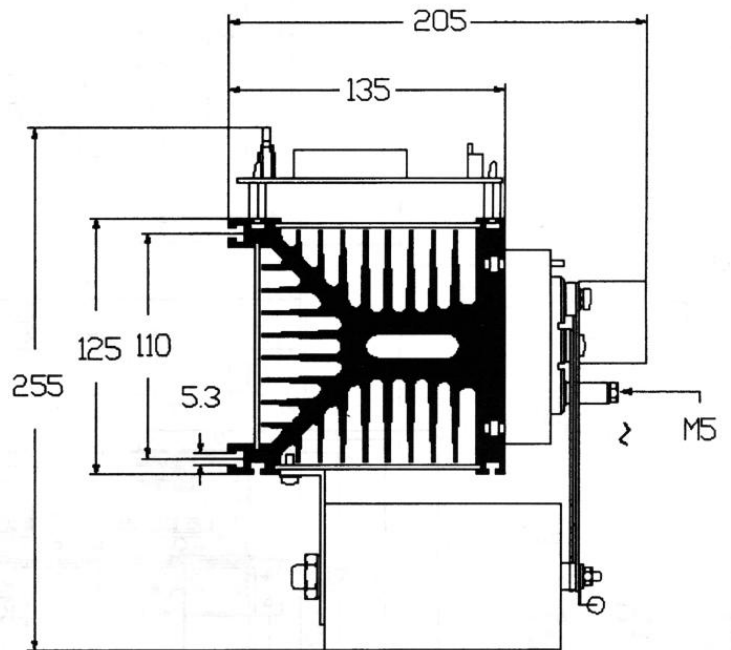
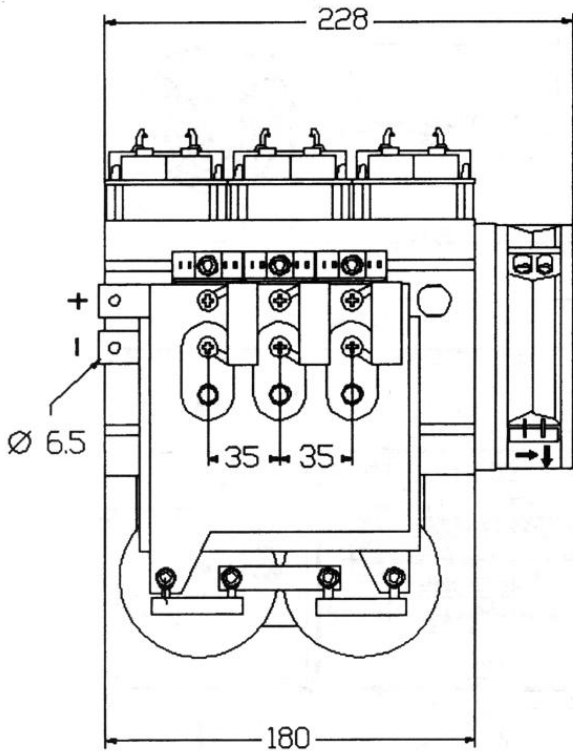
P3/180 F



This figure shows all available options

1. Application example using heatsink P 3/180 and SEMIPACK modules to give a three phase bridge

P3/180



2. Application example using SEMITRANS modules to give a B6CI configuration