

Conversión CA-CC: Rectificadores

Electrónica de Potencia

Autores (orden alfabético): A. Barrado, C. Fernández, A. Lázaro,
E. Olías, M. Sanz, P. Zumel

uc3m | Universidad **Carlos III** de Madrid



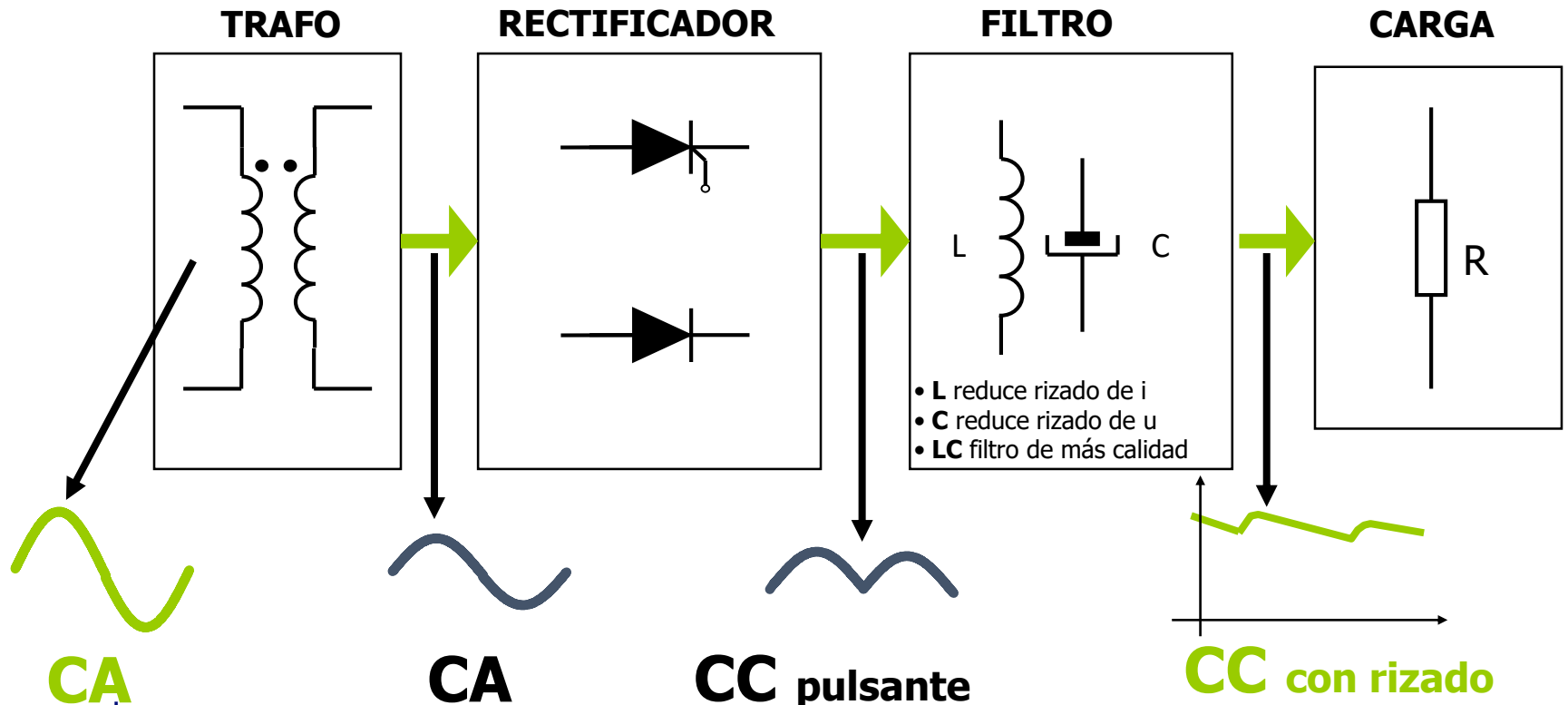
Índice tema

- Conversión CA-CC y clasificación rectificadores
- Rectificadores no controlados monofásicos:
 - El diodo
 - Circuitos básicos con diodos
 - Rectificador de media onda
 - Rectificador de onda completa: carga resistiva y carga altamente inductiva
- Rectificadores controlados monofásicos:
 - El tiristor
 - Rectificador de media onda y de onda completa con carga resistiva
 - Rectificador de onda completa: carga resistiva y carga altamente inductiva
 - Rectificador de onda completa con diodo de libre circulación
- Rectificadores trifásicos:
 - Rectificador de media onda
 - Rectificador de onda completa no controlado y controlado: carga resistiva y carga altamente inductiva
 - Concepto de inversor no autónomo
 - Rectificador de onda completa con diodo de libre circulación

Índice tema

- Conversión CA-CC y clasificación rectificadores
- Rectificadores no controlados monofásicos:
 - El diodo
 - Circuitos básicos con diodos
 - Rectificador de media onda
 - Rectificador de onda completa: carga resistiva y carga altamente inductiva
- Rectificadores controlados monofásicos:
 - El tiristor
 - Rectificador de media onda y de onda completa con carga resistiva
 - Rectificador de onda completa: carga resistiva y carga altamente inductiva
 - Rectificador de onda completa con diodo de libre circulación
- Rectificadores trifásicos:
 - Rectificador de media onda
 - Rectificador de onda completa no controlado y controlado: carga resistiva y carga altamente inductiva
 - Concepto de inversor no autónomo
 - Rectificador de onda completa con diodo de libre circulación

Conversión CA-CC



Clasificación de los rectificadores

- En función del dispositivo
 - No controlado
 - Controlados
- Dependiendo del aprovechamiento de la sinusoidal
 - Media onda
 - Doble onda u onda completa
- Según el número de fases
 - Monofásico
 - Trifásico

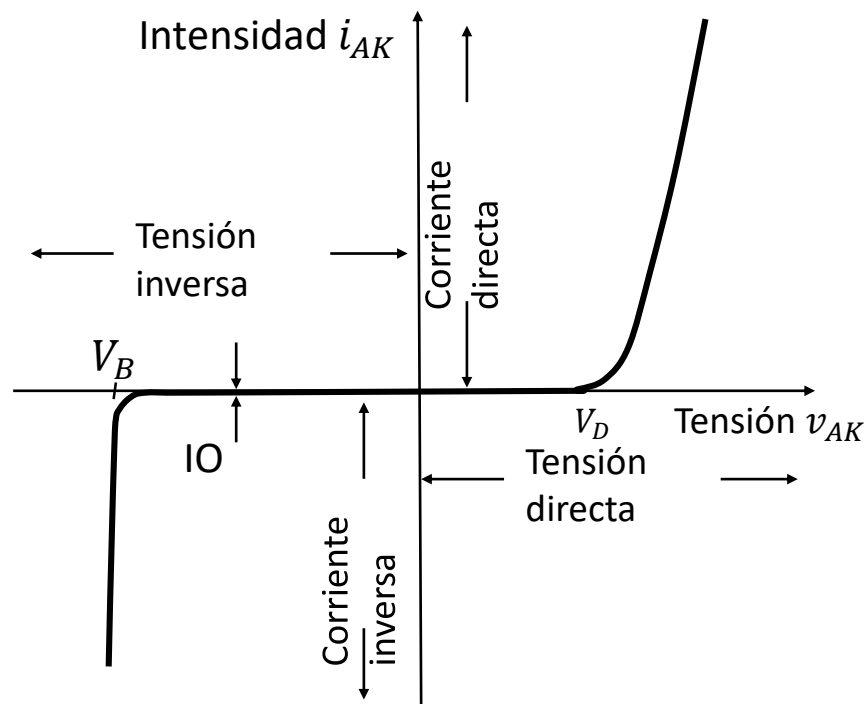
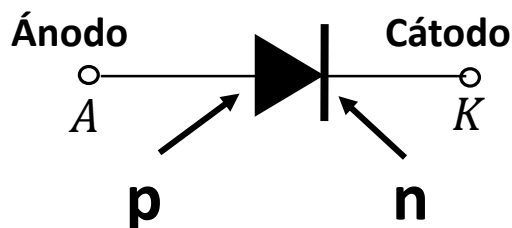
Índice tema

- Conversión CA-CC y clasificación rectificadores
- Rectificadores no controlados monofásicos:
 - El diodo
 - Circuitos básicos con diodos
 - Rectificador de media onda
 - Rectificador de onda completa: carga resistiva y carga altamente inductiva
- Rectificadores controlados monofásicos:
 - El tiristor
 - Rectificador de media onda y de onda completa con carga resistiva
 - Rectificador de onda completa: carga resistiva y carga altamente inductiva
 - Rectificador de onda completa con diodo de libre circulación
- Rectificadores trifásicos:
 - Rectificador de media onda
 - Rectificador de onda completa no controlado y controlado: carga resistiva y carga altamente inductiva
 - Concepto de inversor no autónomo
 - Rectificador de onda completa con diodo de libre circulación

Diodo: característica estática

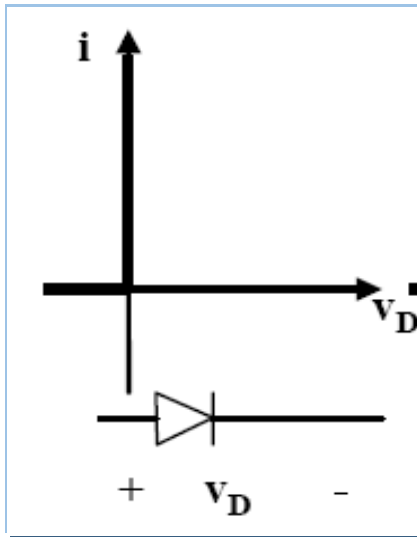
No Controlado

- $V_{max} < 4500V$
- $I_{max} < 3500A$
- $f_{max} < \text{tipo}$



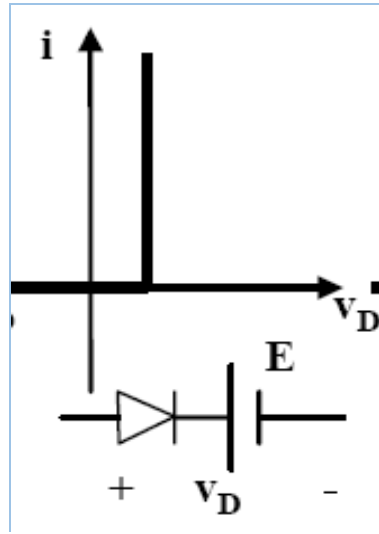
Diodo: modelo estático en conducción

Modelo ideal



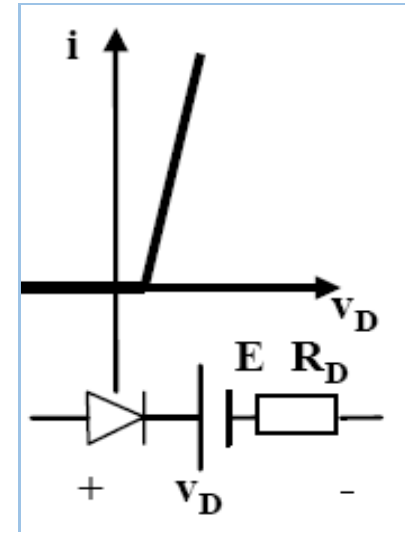
Cortocircuito

Primera aproximación



$$P_d = V_d \cdot I_{d,med}$$

Segunda aproximación,
modelo real



$$P_d = V_d \cdot I_{d,med} + r_d \cdot I_{d,ef}^2$$

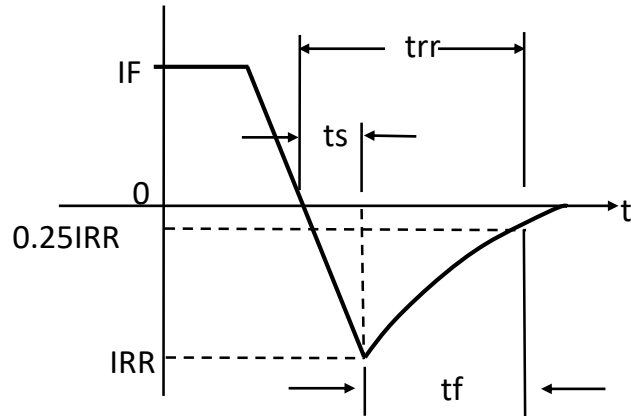
Diodo: parámetros estado bloqueo

- VRWM** **Tensión inversa de trabajo máxima.** Es la tensión que puede ser soportada por el diodo de forma continuada sin peligro de calentamientos
- VRRM** **Tensión inversa de pico repetitivo.** Es la tensión que puede ser soportada en picos de 1 ms repetidos cada 10 ms por tiempo indefinido
- VRSM** **Tensión inversa de pico no repetitivo.** Es la tensión que puede ser soportada por una sola vez cada 10 minutos o más, con duración de pico de 10 ms
- VR** **Tensión de ruptura.** Si es alcanzada, aunque sea por una sola vez con duración de 10 ms o menos, el diodo puede destruirse o al menos degradar sus características eléctricas
- IR** **Intensidad de fugas.** Intensidad que circula por el dispositivo de potencia cuando está bloqueado

Diodo: parámetros estado conducción

- IF (AV)** **Corriente directa media nominal.** Es el valor medio de la máxima intensidad de impulsos sinusoidales de 180° que el diodo puede soportar con la cápsula mantenida a determinada temperatura.
- IFRM** **Corriente directa de pico repetitivo.** Puede ser soportada cada 20 ms por tiempo indefinido, con duración del pico de 1 ms a determinada temperatura de la cápsula
- IFSM** **Corriente directa de pico no repetitivo.** Es el máximo pico de intensidad aplicable por una vez cada 10 minutos o más, con duración de pico de 10 ms

Diodo: característica dinámica



Ejemplo de conmutación con recuperación suave

$$S < 1$$

trr
Qrr
S

Tiempo de recuperación inversa

Carga eléctrica almacenada o desplazada.

Factor de suavizado. Es la relación entre los tiempos de caída y almacenamiento

$$S = \frac{t_f}{t_s}$$

Influencia del t_{rr} en la conmutación

Si el tiempo que tarda el diodo en conmutar no es despreciable :

- Se limita la **frecuencia de funcionamiento** → no se puede conmutar hasta después de la recuperación
- Existe una **disipación de potencia** durante el tiempo de recuperación inversa → convivencia V e I

Ejemplo: Schottky 40CPQ045

Major Ratings and Characteristics

Characteristics	Values	Units
$I_{F(AV)}$ Rectangular waveform	40	A
V_{RRM}	35/ 45	V
I_{FSM} @ tp = 5 μ s sine	3500	A
V_F @ 20 Apk, $T_J = 125^\circ\text{C}$ (per leg)	0.43	V
T_J	-55 to 150	$^\circ\text{C}$

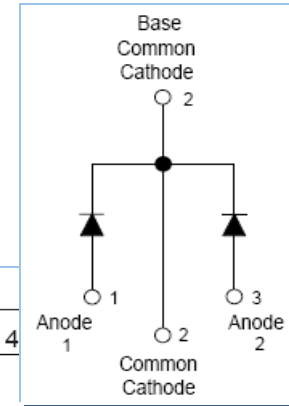
Description/ Features

The 40CPQ... center tap Schottky rectifier has been optimized for very low forward voltage drop, with moderate leakage. The proprietary barrier technology allows for reliable operation up to 150°C junction temperature. Typical applications are in switching power supplies, converters, free-wheeling diodes, and reverse battery protection.

- 150°C T_J operation
- Center tap TO-247 package
- High purity, high temperature enhanced mechanical strength
- Very low forward voltage drop
- High frequency operation
- Guard ring for enhanced rugged reliability

Voltage Ratings

Part number	40
V_R Max. DC Reverse Voltage (V)	
V_{RWM} Max. Working Peak Reverse Voltage (V)	



TO-247AC

40	40CPQ045
	45

Absolute Maximum Ratings

Parameters	40CPQ...	Units	Conditions
$I_{F(AV)}$ Max. Average Forward Current * See Fig. 5	40	A	50% duty cycle @ $T_C = 120^\circ\text{C}$, rectangular waveform
I_{FSM} Max. Peak One Cycle Non-Repetitive Surge Current (Per Leg) * See Fig. 7	3500	A	5 μ s Sine or 3 μ s Rect. pulse 10ms Sine or 6ms Rect. pulse
	430		
E_{AS} Non-Repetitive Avalanche Energy (Per Leg)	27	mJ	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_{AS} = 4$ Amps, $L = 3.4$ mH
I_{AR} Repetitive Avalanche Current (Per Leg)	4	A	Current decaying linearly to zero in 1 μ sec Frequency limited by T_J max. $V_A = 1.5 \times V_R$ typical

Electrical Specifications

Parameters	40CPQ...	Units	Conditions
V_{FM} Max. Forward Voltage Drop (Per Leg) * See Fig. 1 (1)	0.49	V	@ 20A
	0.59	V	@ 40A
	0.43	V	@ 20A
	0.56	V	@ 40A
I_{RM} Max. Reverse Leakage Current (Per Leg) * See Fig. 2 (1)	4	mA	$T_J = 25^\circ\text{C}$
	150	mA	$T_J = 125^\circ\text{C}$
C_T Max. Junction Capacitance (Per Leg)	1850	pF	$V_R = 5V_{DC}$ (test signal range 100Khz to 1Mhz) 25°C
L_S Typical Series Inductance (Per Leg)	7.5	nH	Measured lead to lead 5mm from package body
dv/dt Max. Voltage Rate of Change	10000	V/ μ s	(Rated V_R)

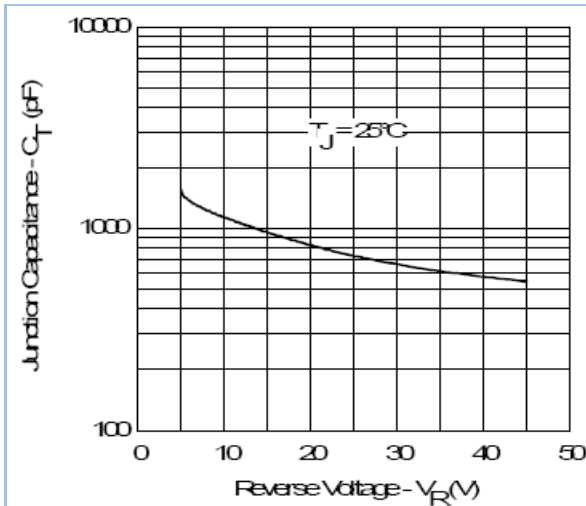
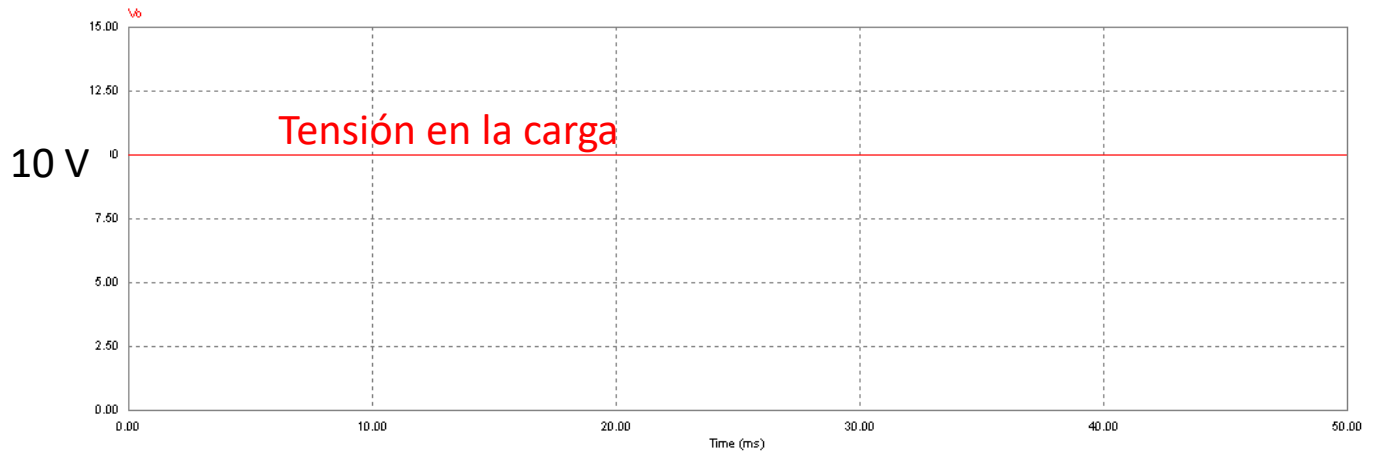
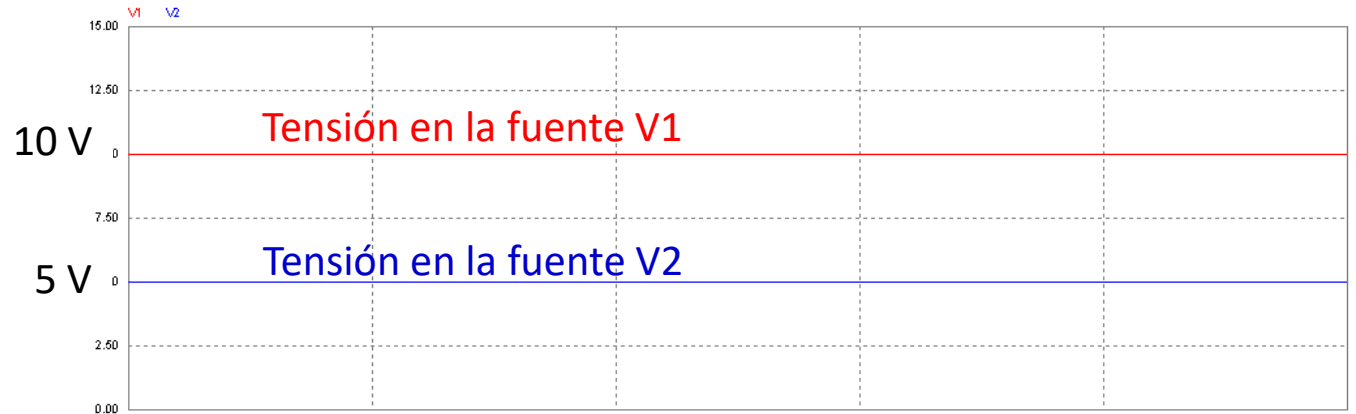
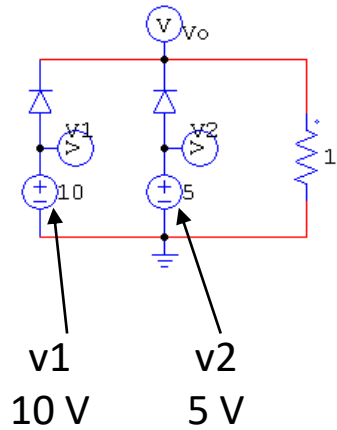


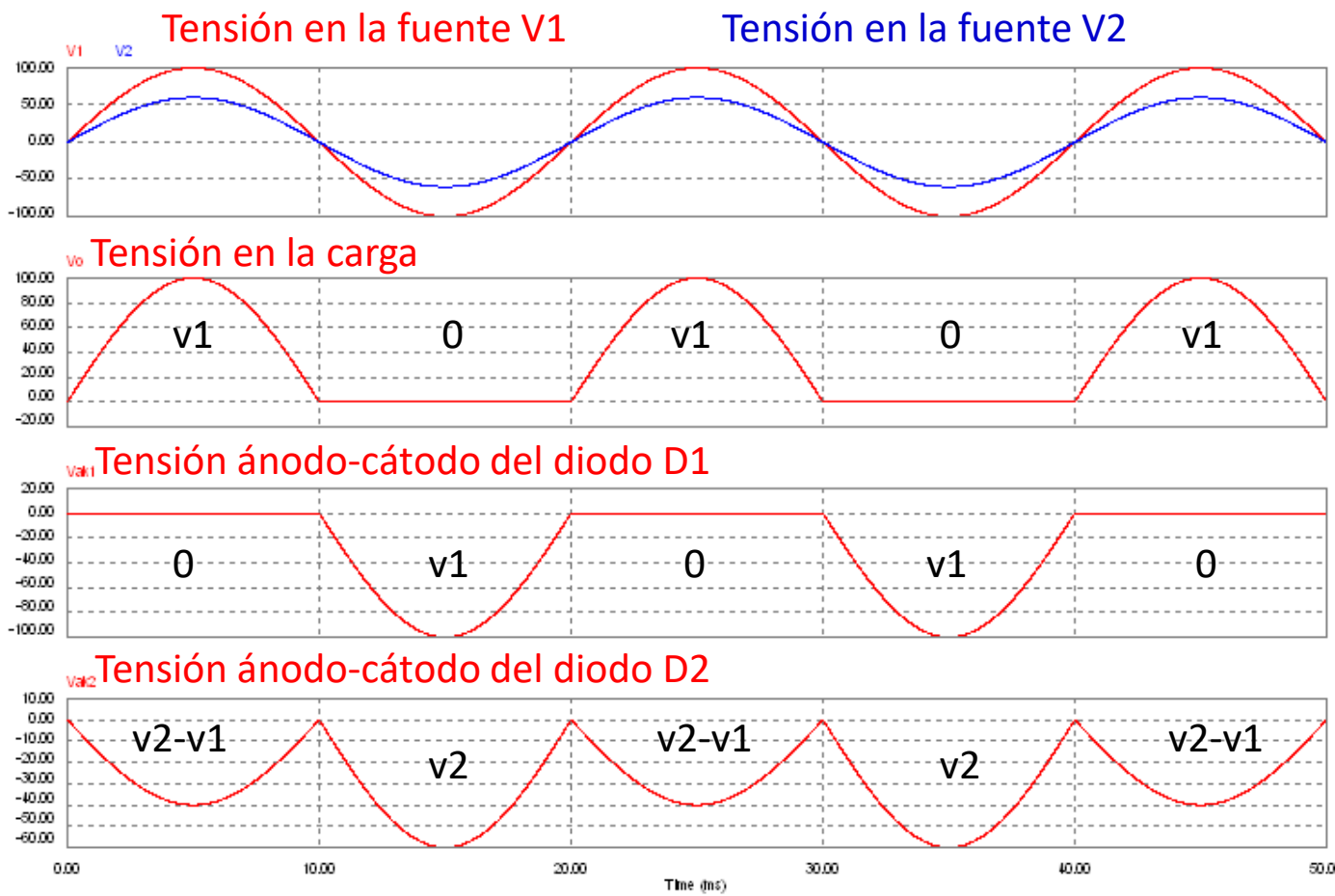
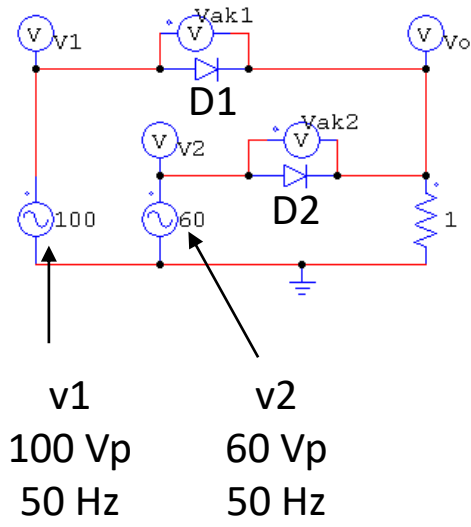
Fig. 3- Typical Junction Capacitance Vs. Reverse Voltage (Per Leg)

Configuración 1: diodos en cátodo común (I)

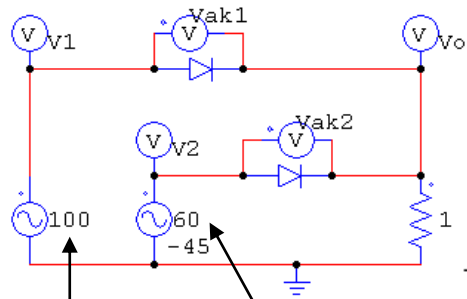


Diodos en cátodo común → conduce el de mayor tensión de ánodo

Configuración 1: diodos en cátodo común (II)

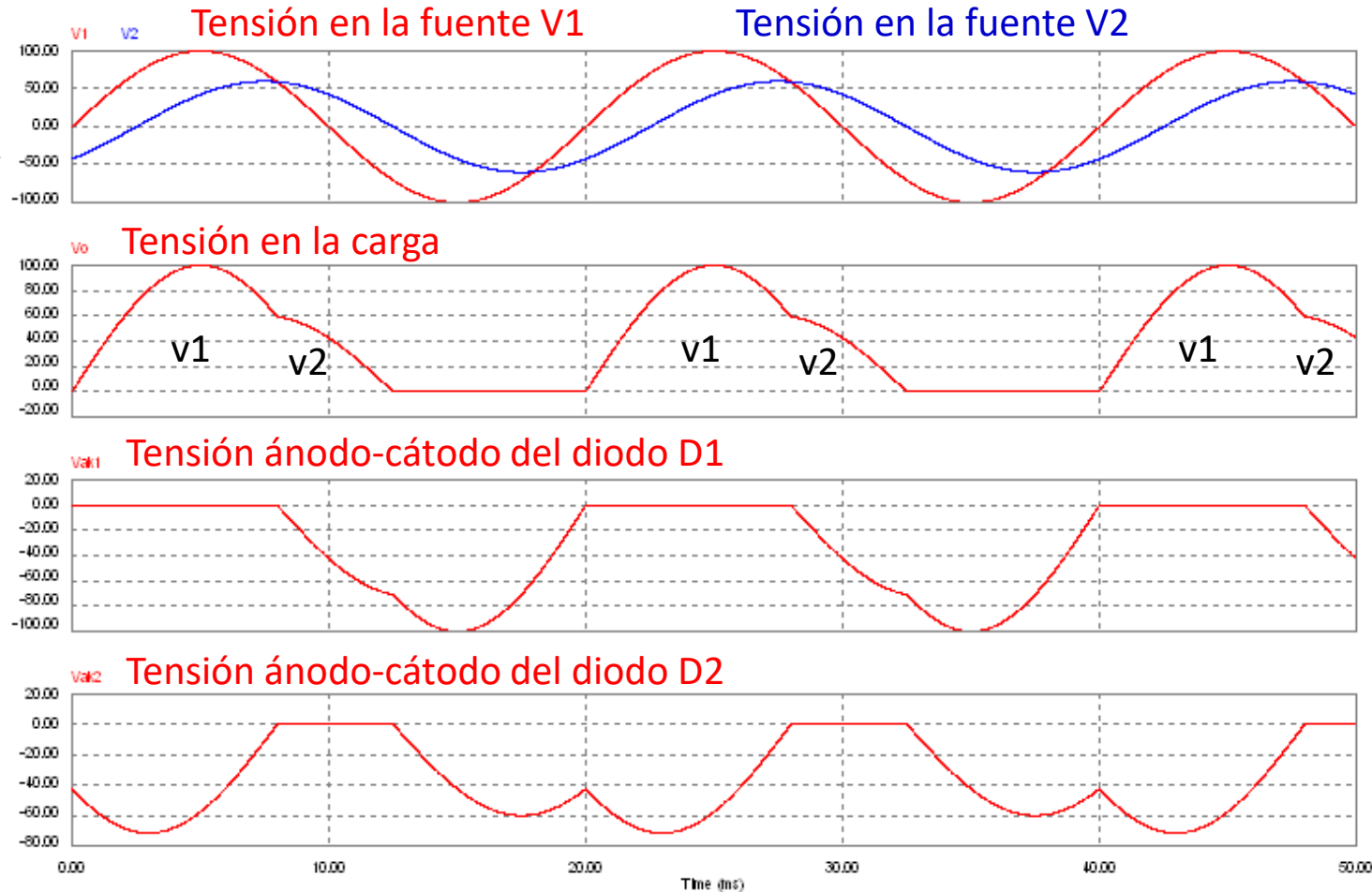


Configuración 1: diodos en cátodo común (III)

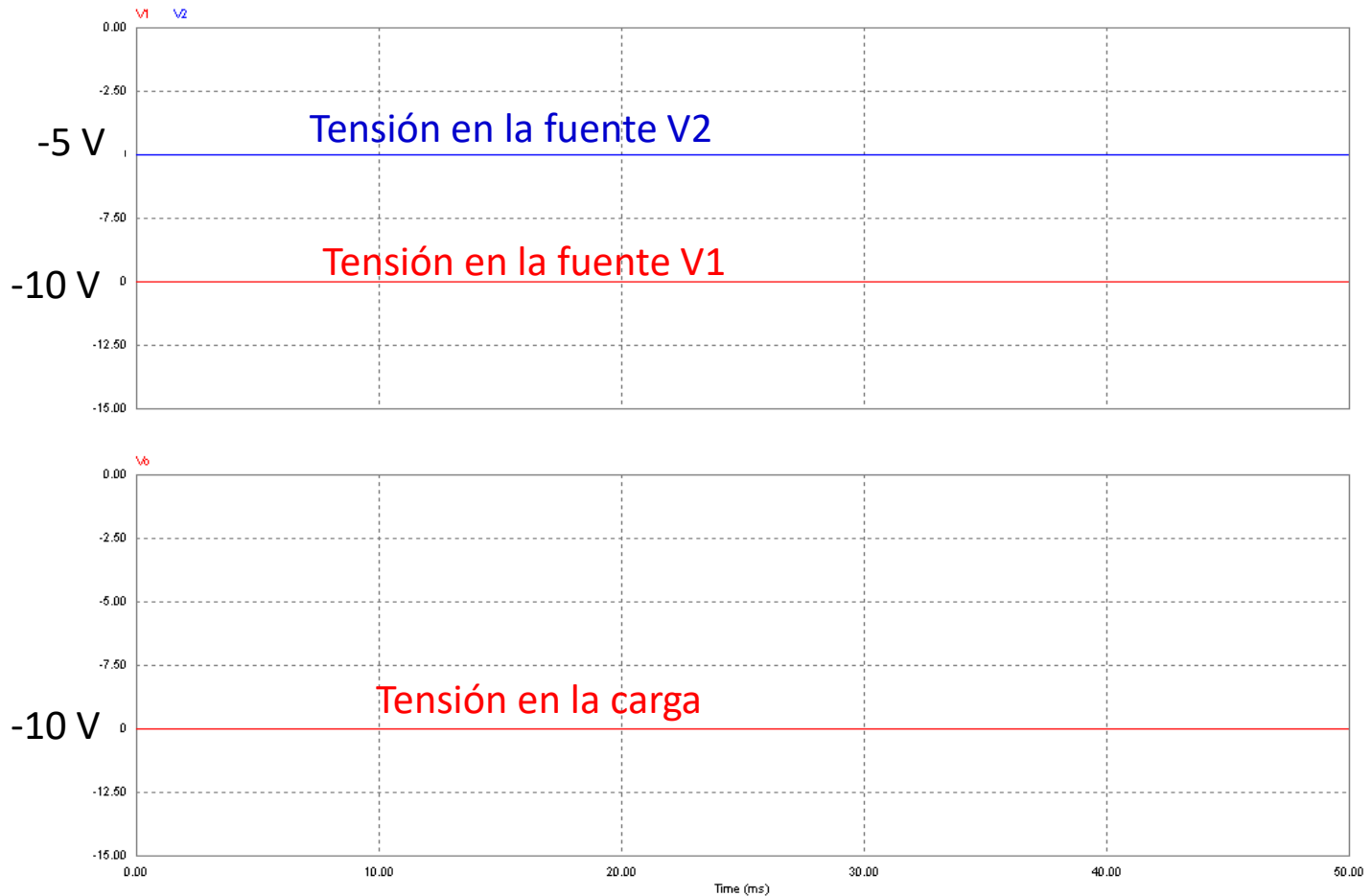
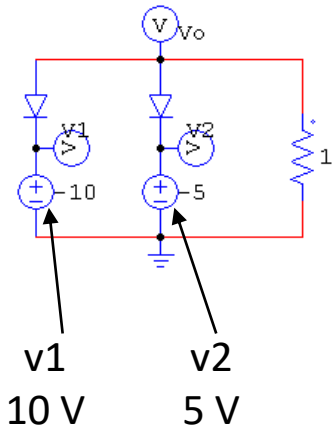


v_1
100 V_p
50 Hz

v_2
60 V_p
50 Hz
desfasada 45°

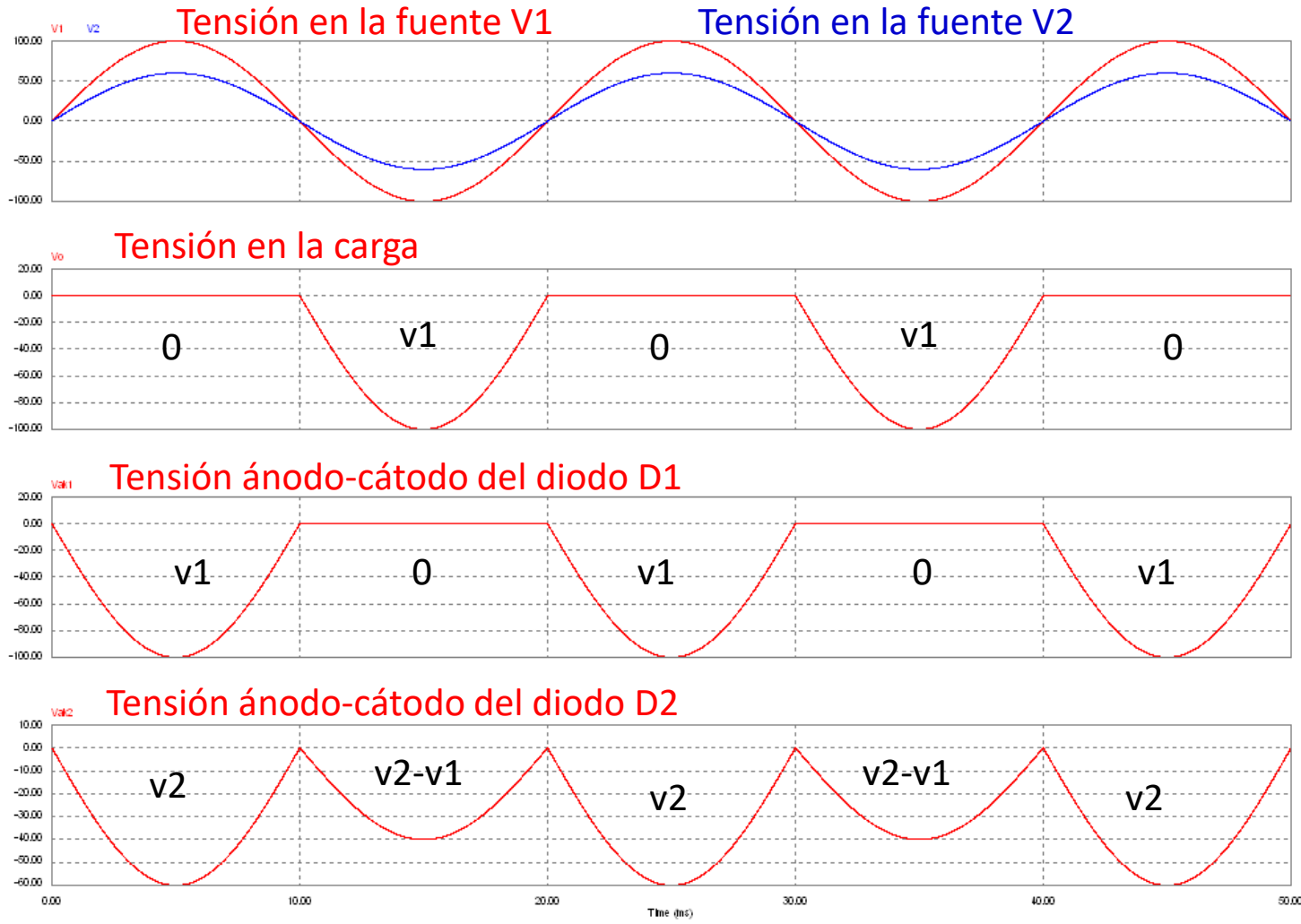
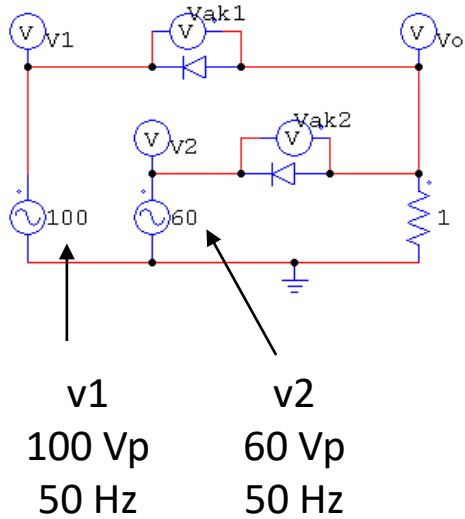


Configuración 2: diodos en ánodo común (I)

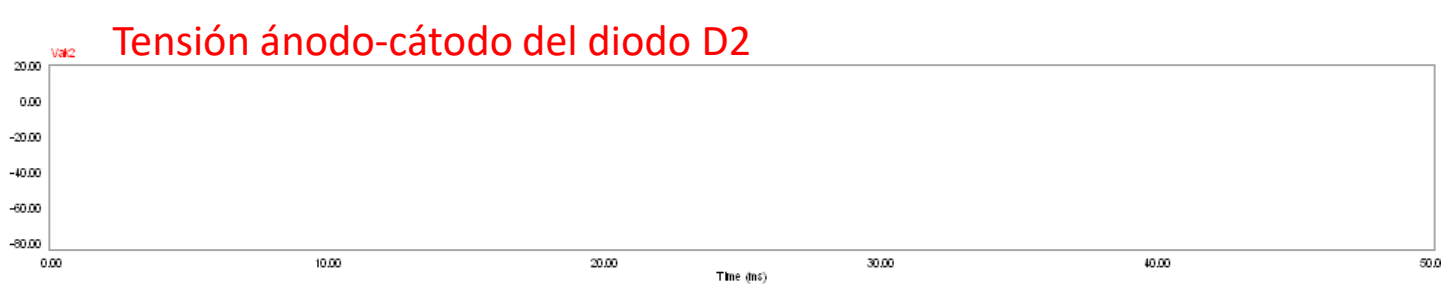
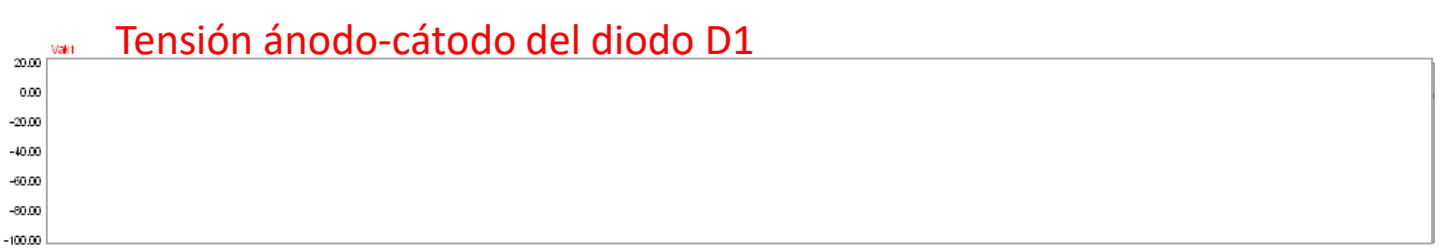
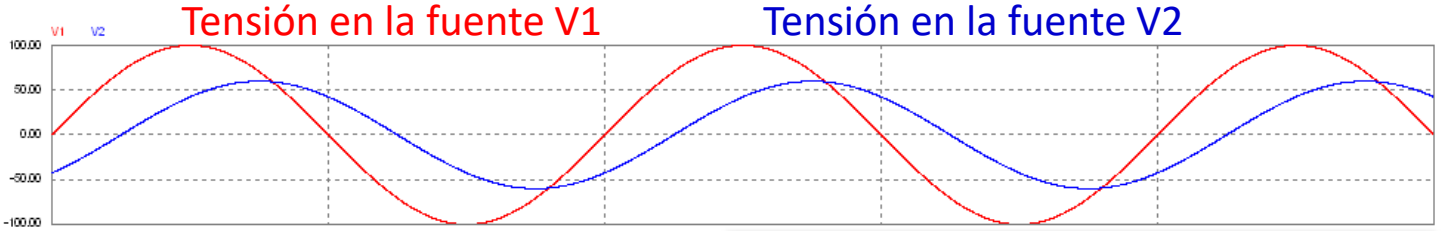
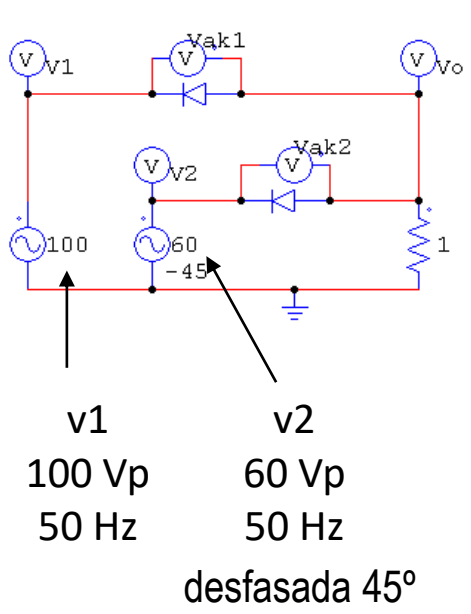


Diodos en ánodo común → conduce el de menor tensión de cátodo

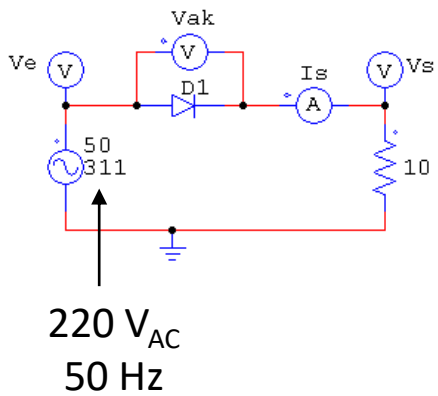
Configuración 2: diodos en ánodo común (II)



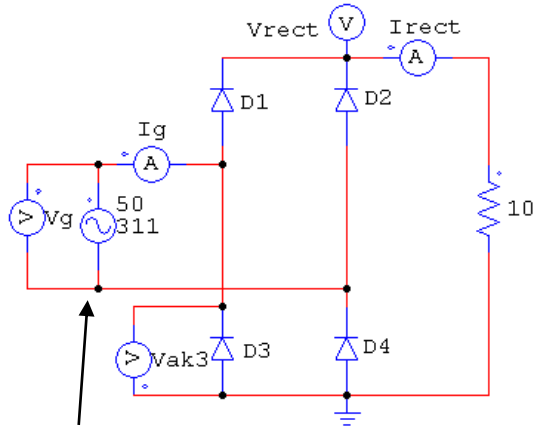
Configuración 2: diodos en ánodo común (III)



Rectificador media onda carga R

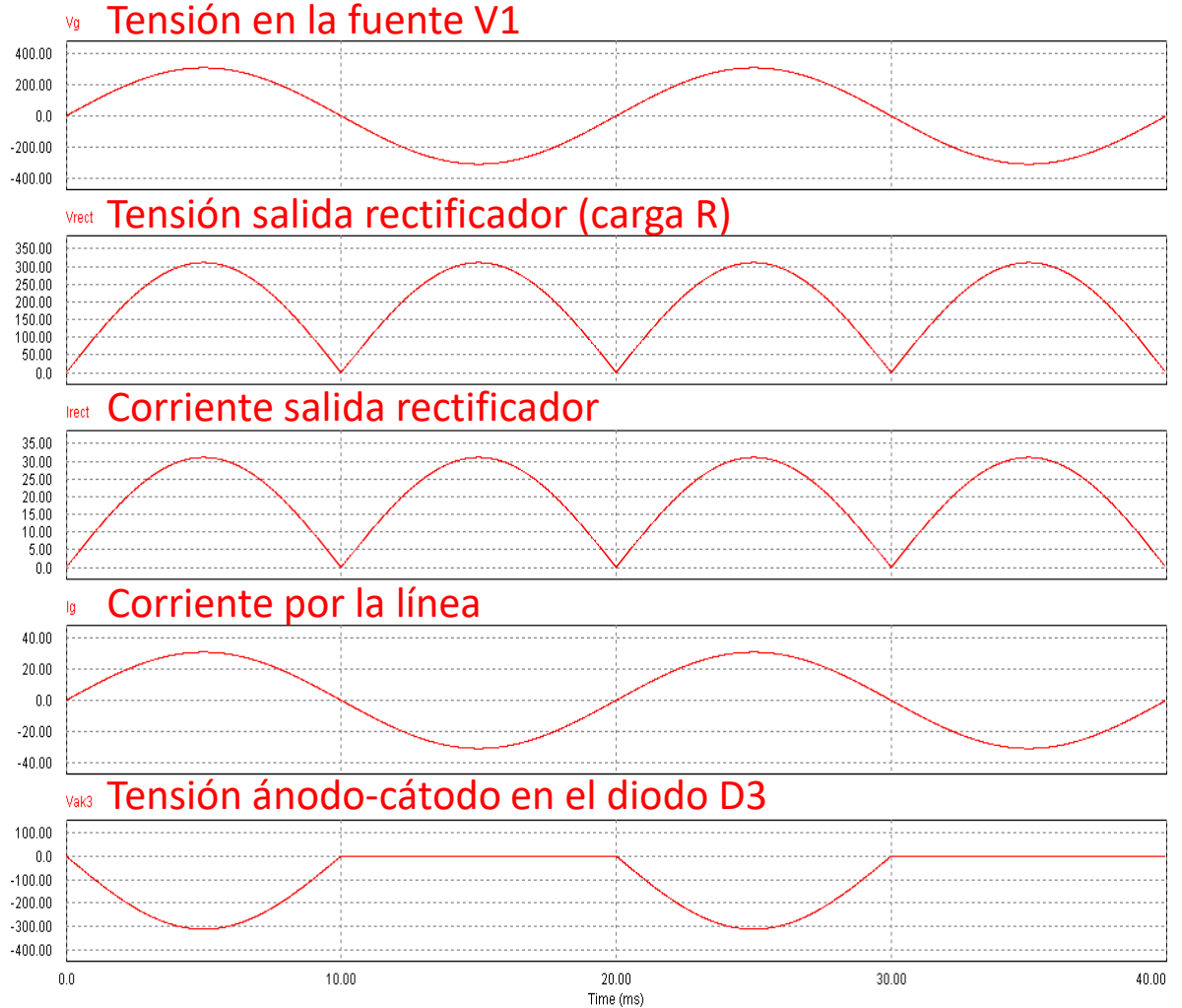


Rectificador onda completa carga R



220 V_{AC}
50 Hz

D1, D2: Diodos cátodo común
D3, D4: Diodos ánodo común



Comparación rectificadores (I)

Rectificador media onda carga R



Rectificador onda completa carga R



- Rectificador de media onda:

- ✗ Corriente por la línea con valor de continua
 - Problemas con los transformadores que estén conectados a esa red
 - Dimensionamiento de la red
- ✗ Armónicos de menor frecuencia
- ✗ Mal factor de rizado

- Rectificador de onda completa:

- ✓ Factor de potencia igual a 1
- ✗ Cuatro diodos
- ✗ Mal factor de rizado

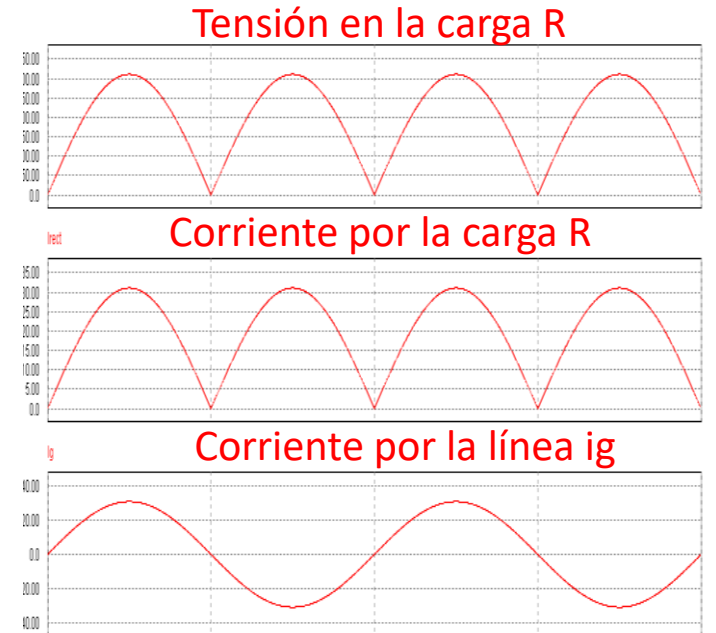
Se precisa mejorar el factor de rizado → filtro con condensador

Comparación rectificadores (II)

Rectificador media onda carga R



Rectificador onda completa carga R



Trabajo personal propuesto

- Cálculo del valor medio de tensión entregada a la carga si la red es de 220 VAC (valor eficaz) y 50 Hz (red europea)
- Cálculo de la potencia consumida por una carga resistiva de 1Ω
- Factor de rizado de la tensión en la carga
- Factor de potencia en la fuente sinusoidal

Rectificador media onda con carga RE

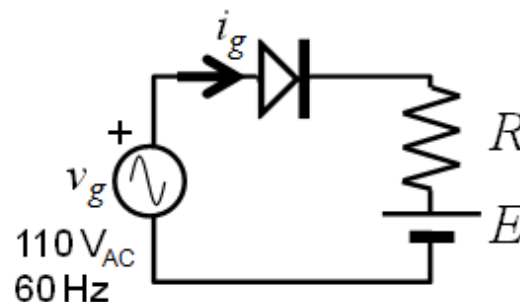
Trabajo personal propuesto

Rectificador de media onda con carga RE

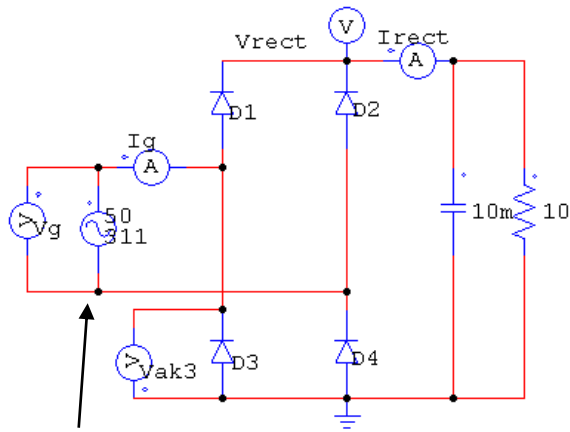
Para el rectificador de media onda de la figura 1, en el que el valor de la tensión del generador es igual a $110 V_{AC}$, 60 Hz, responda a las siguientes preguntas:

Considerando que el rectificador es un diodo:

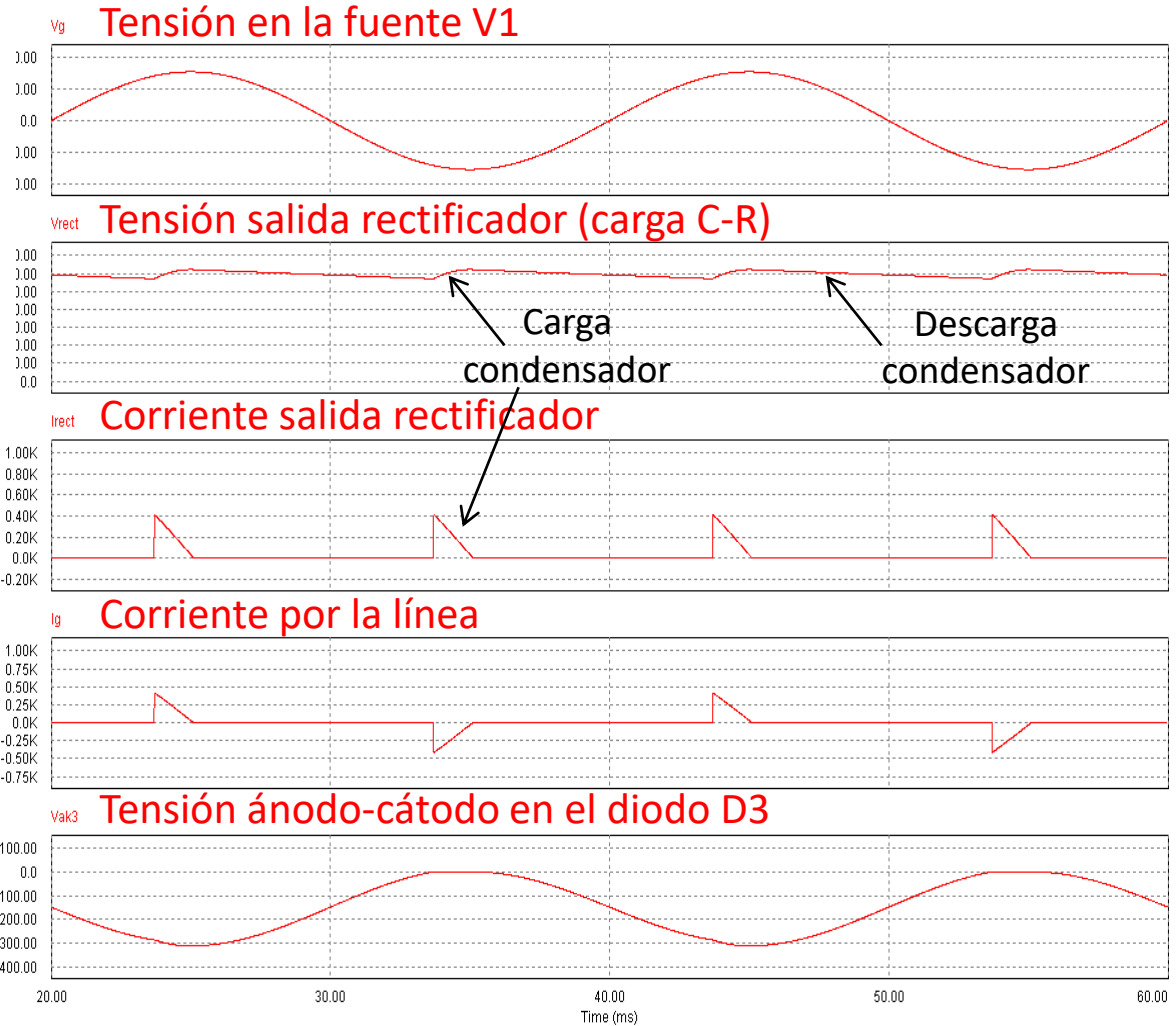
1. Represente la tensión en la resistencia para dos ciclos de red si $E=0$. Calcule la resistencia para que la potencia que disipe será menor que 10 W.
2. Represente la tensión en la resistencia para dos ciclos de red si $E=110 V$. Plantee la ecuación para calcular la potencia disipada por la resistencia, pero no la resuelva.



Rectificador onda completa carga RC (1)



220 V_{AC}
 50 Hz

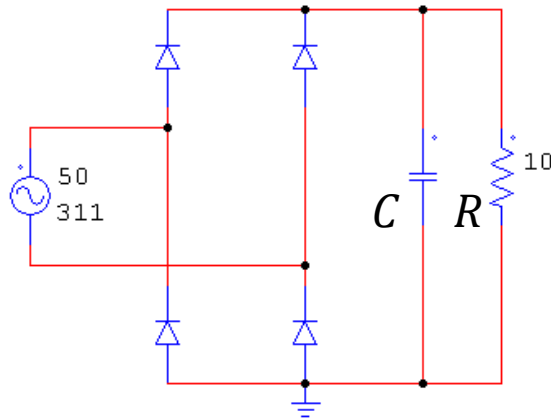


Rectificador onda completa carga RC (2)

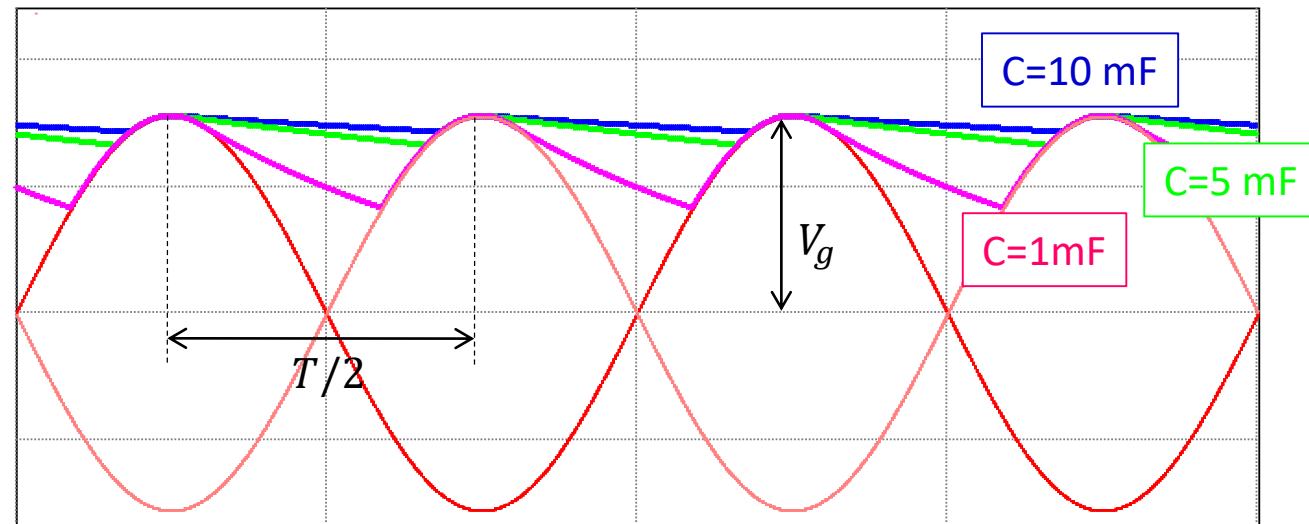
- El condensador se carga siguiendo la sinusoidal de entrada
- La descarga del condensador es exponencial y su expresión aproximada (despreciando el tiempo de carga) es:

$$u(t) = V_g \cdot e^{-\frac{(t-\frac{T}{2})}{RC}}$$

- Para una misma R, el rizado de tensión es menor cuanto mayor es el condensador del filtro

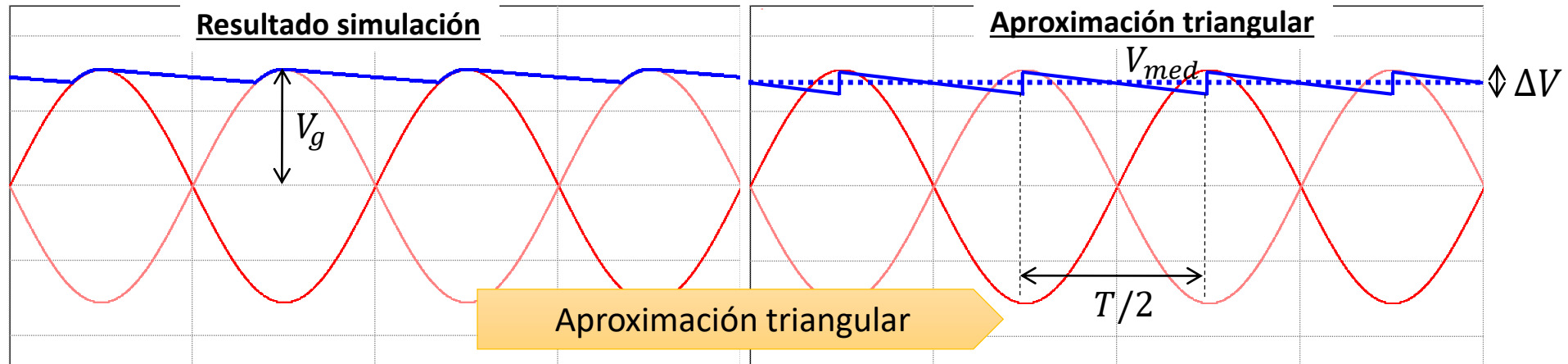


Tensión en la carga para distintos valores del condensador



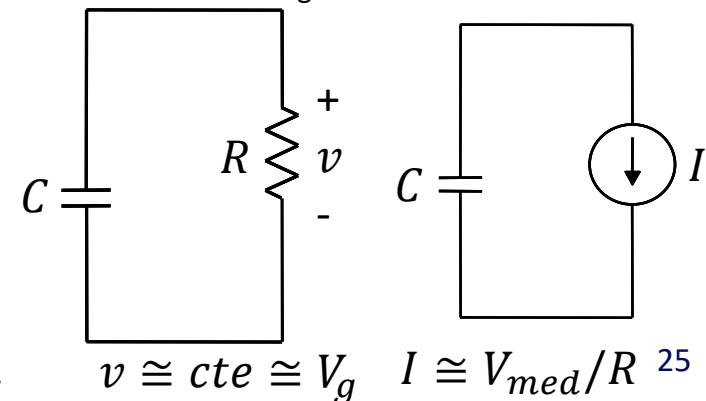
Rectificador onda completa carga RC (3)

Cálculo del rizado de tensión en la carga



- Se desprecia el tiempo de carga del condensador \rightarrow descarga $\Delta t = T/2$
- Se supone que la descarga es lineal \rightarrow descarga por fuente de corriente $I \cong V_{med}/R$
- Si el rizado es suficientemente pequeño $I \cong V_g/R$
- Cálculo del rizado de tensión en la carga $\Delta V = \frac{I \cdot \Delta t}{C}$

Circuito a analizar durante la
descarga del condensador



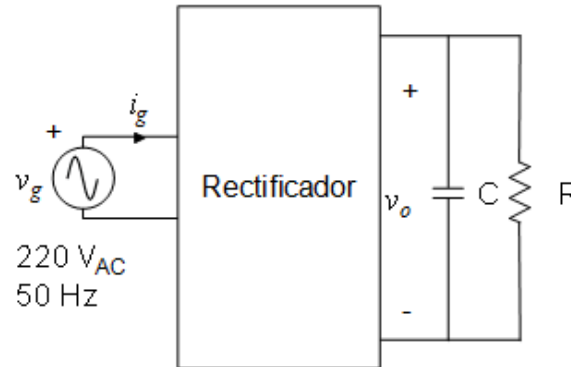
Comparación media onda y doble onda

Trabajo personal propuesto

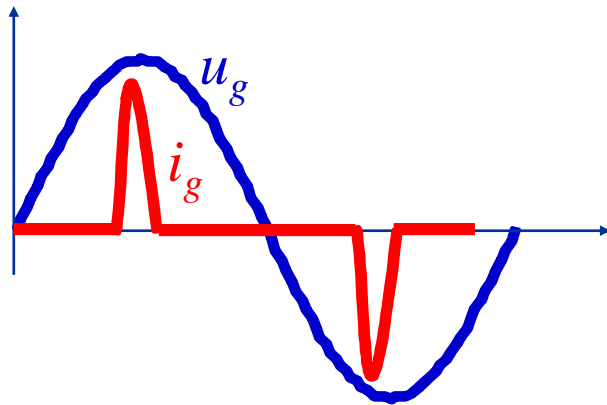
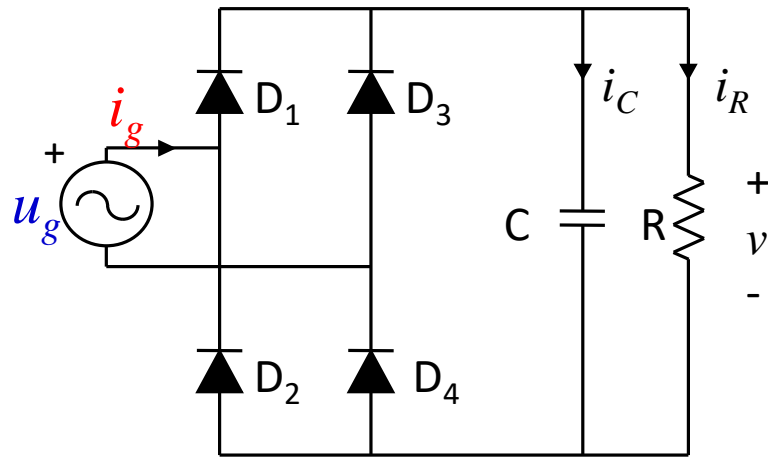
Rectificador con carga RC, comparación media onda y onda completa

La figura 5 muestra el esquema genérico de un rectificador alimentando una carga R-C a partir de una fuente de tensión sinusoidal. Se pide:

1. Dibujar un rectificador de onda completa alimentando una carga R-C a partir de la fuente de tensión sinusoidal. Representar la corriente por la línea i_g y la tensión en la carga v_o .
2. Calcular el rizado de tensión considerando una capacidad C igual a 47 μF y una resistencia de carga R de 20 Ω .
3. Despreciando el rizado de tensión en la carga, calcular la potencia consumida por la misma.
4. Dibujar un rectificador de media onda alimentando una carga R-C a partir de la fuente de tensión sinusoidal. Representar la corriente por la línea i_g y la tensión en la carga v_o .
5. Calcular el rizado de tensión por la carga para el rectificador de media onda considerando los valores de R y C especificados. Determine qué valor de condensador sería necesario para mantener el mismo valor de rizado de tensión del rectificador de onda completa.



Características básicas rectificador con filtro C



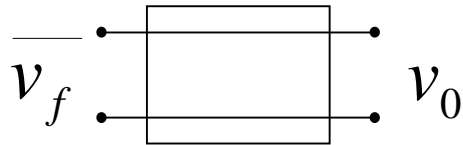
- ✓ Reducido tamaño
- ✓ Económico
- ✓ Robusto
- ✗ Corrientes de pico muy elevadas en los diodos
- ✗ Mal factor de potencia. Los armónicos de la corriente de entrada no cumplen con la normativa EN 61000-3-2
- ✗ Condensador de gran tamaño para reducir el rizado de tensión si la corriente de carga es elevada

Se precisa suavizar la corriente y mejorar el factor de potencia → filtro LC

Filtro LC para la tensión de salida

Características que debería tener el filtro ideal

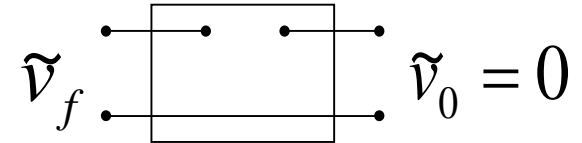
1. Paso de la componente continua



Debe pasar íntegra a la salida el valor medio de la señal de entrada

$$\overline{v_f} = v_0$$

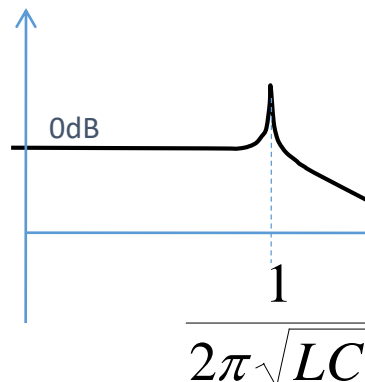
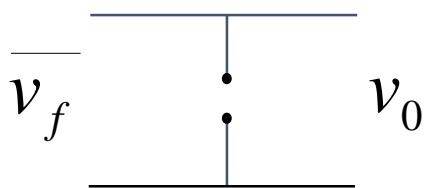
2. Atenuación del resto de armónicos



Los armónicos no deben pasar a la carga, o pasar lo suficientemente atenuados

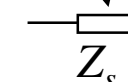
Características del filtro LC

Baja frecuencia: $\overline{v_f} = v_0$



Alta frecuencia: doble efecto

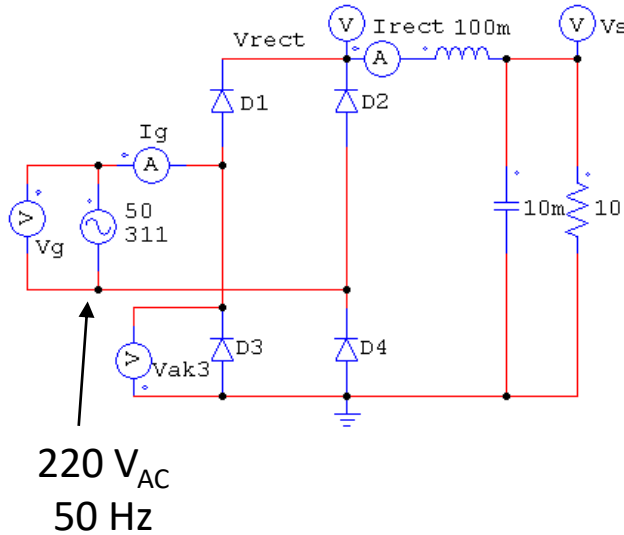
Crece con f



Decrece con f

$$v_0 = v_f \frac{Z_p}{Z_s + Z_p}$$

Rectificador onda completa carga LCR



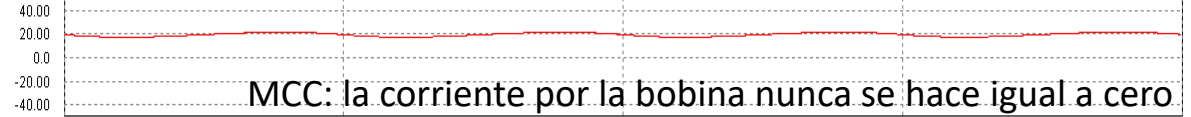
V_g Tensión en la fuente V1



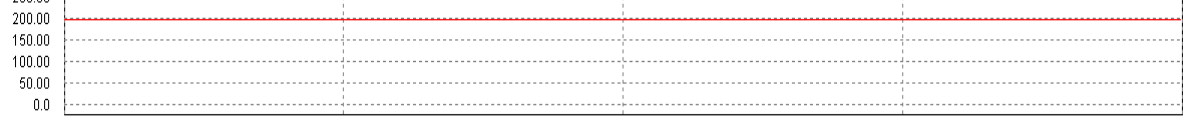
V_{rect} Tensión salida rectificador (carga L-C-R)



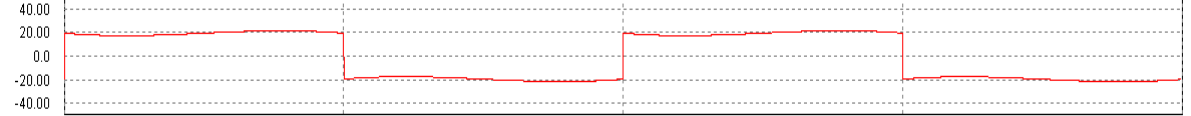
I_{rect} Corriente salida rectificador



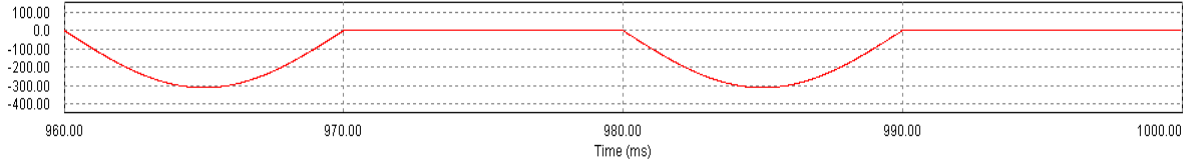
V_s Tensión carga resistiva



I_g Corriente por la línea

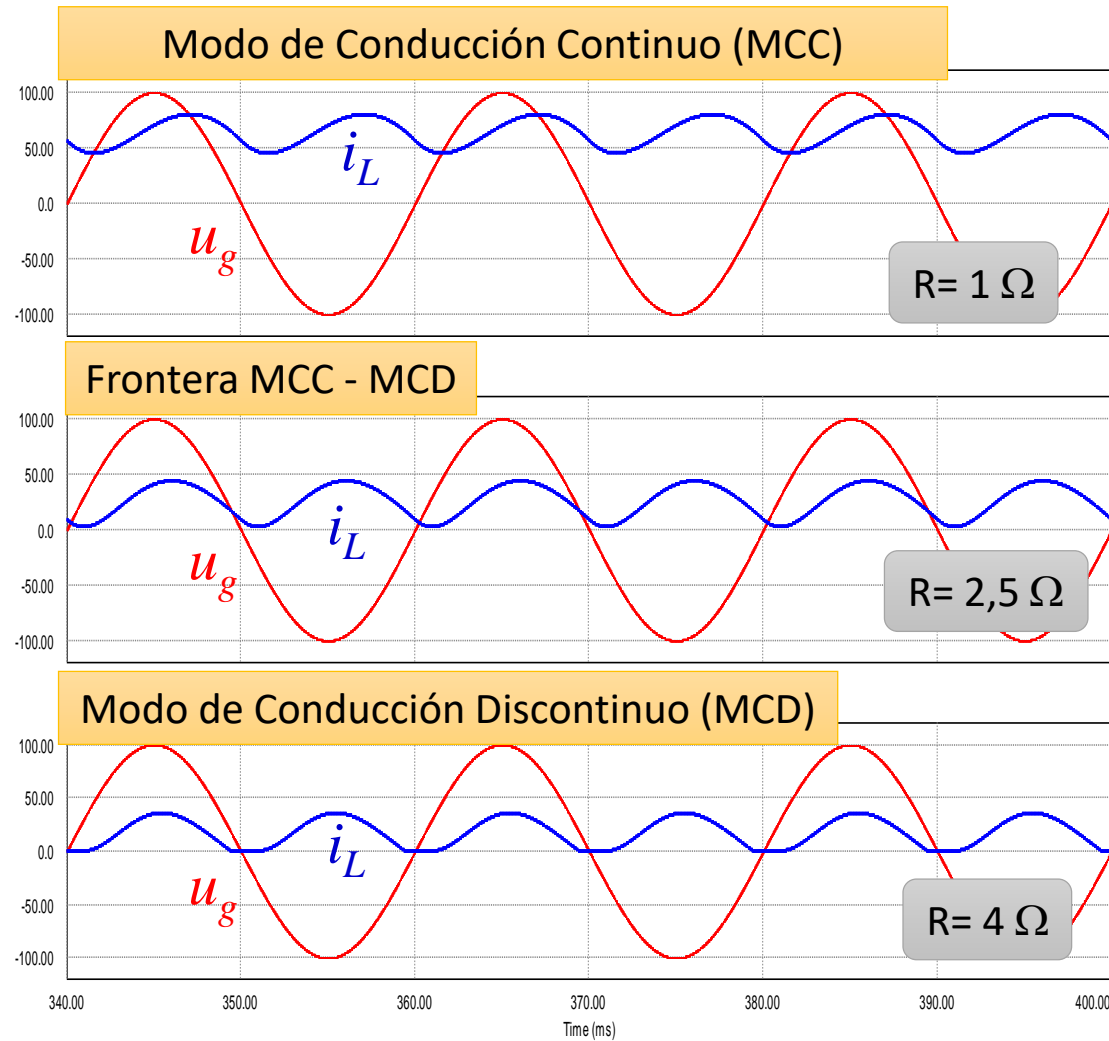
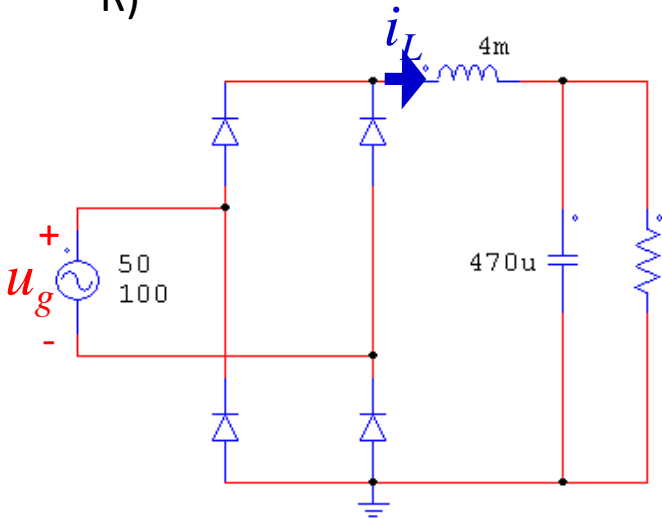


V_{ak3} Tensión ánodo-cátodo en el diodo D3



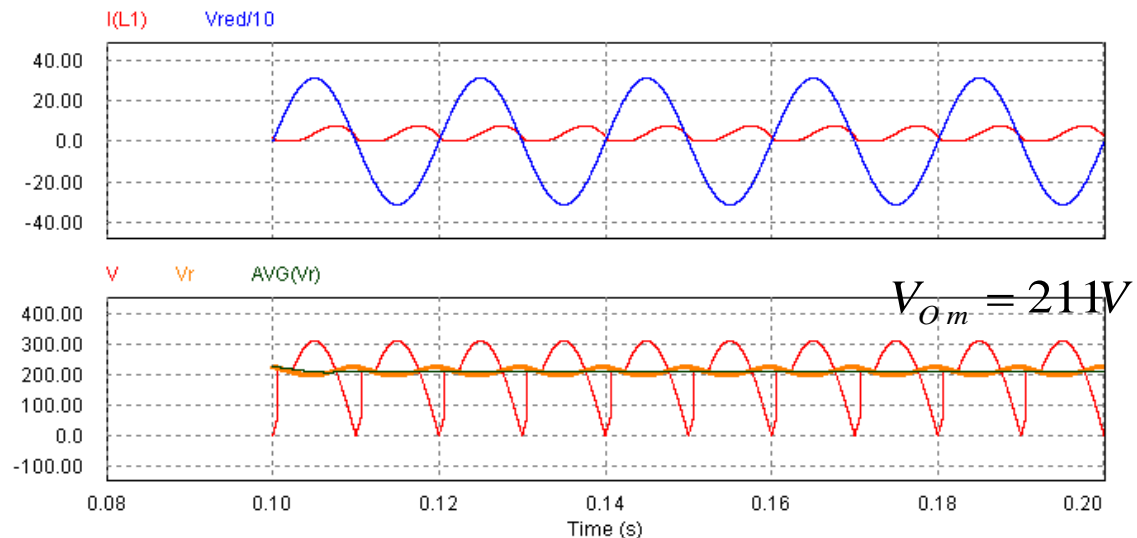
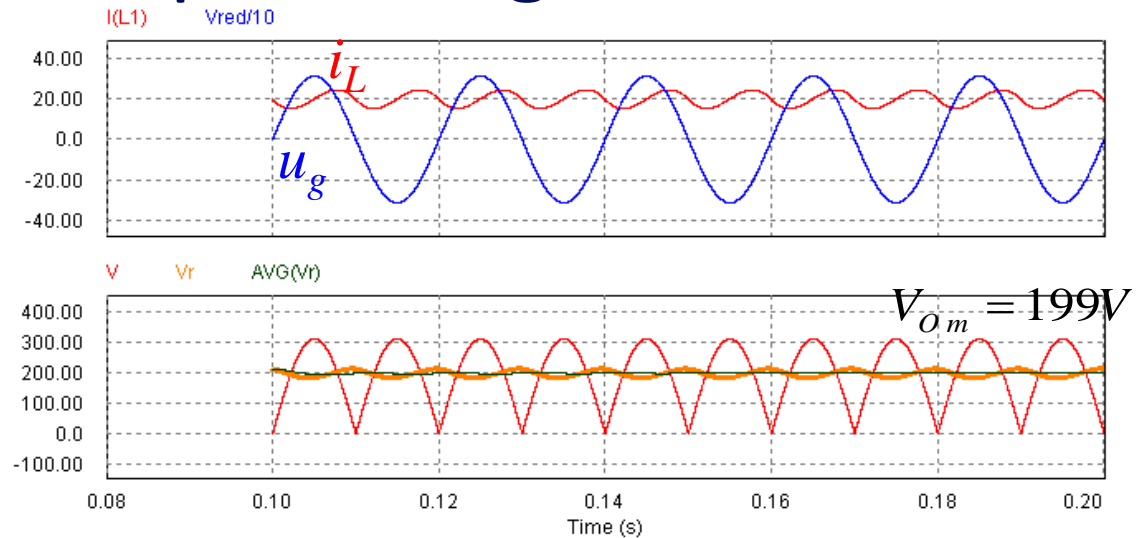
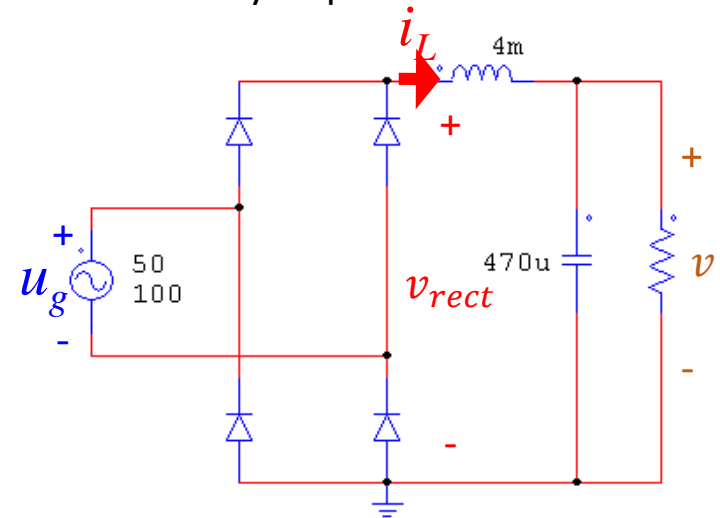
Rectificador onda completa carga LCR: MCC

- El modo de conducción continuo (MCC) se consigue cuando la corriente por la inductancia no se anula nunca
- Para un filtro LC dado, el modo de conducción depende de la carga resistiva: se pasa al modo de conducción discontinuo (MCD) al reducir la carga (mayor R)



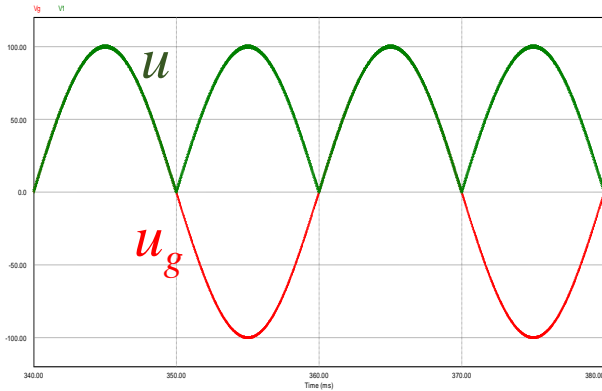
Rectificador onda completa carga LCR: MCD

- Al aumentar R (bajar la carga), el rectificador entra en modo de conducción continuo (MCD):
 - Aparecen tramos en los que $i_L = 0 \rightarrow$ dejan de conducir los diodos
 - La tensión a la salida del rectificador ya no es la sinusoidal rectificada
 - La tensión media de salida es mayor que la de MCC



Análisis rectificador con carga LCR en MCC (I)

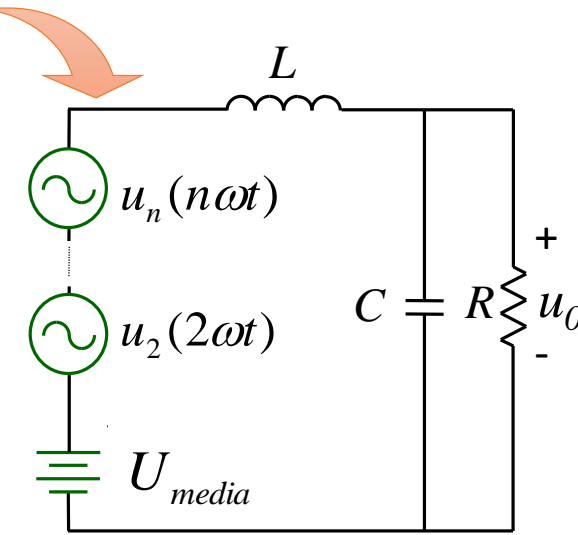
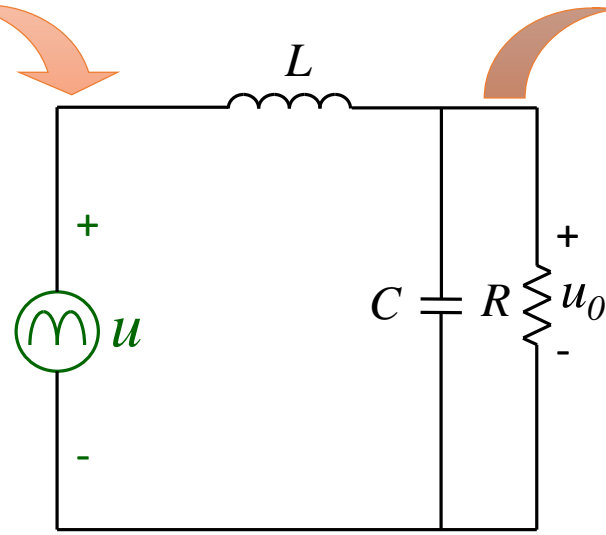
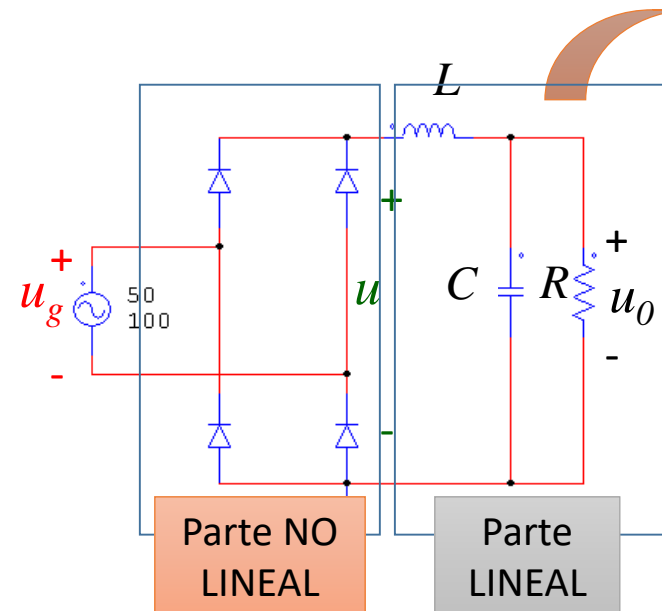
En MCC, como i_L nunca se interrumpe, la tensión que proporciona el rectificador tiene siempre la misma forma: sinusoidal rectificada de doble onda



Serie de Fourier conocida:

$$u(\omega t) = \underbrace{\frac{2V_p}{\pi}}_{U_{media}} + \underbrace{\sum_n \frac{-4}{\pi} \cdot \frac{V_p}{-1+n^2} \cdot \cos(n\omega t)}_{u_n(n\omega t)}$$

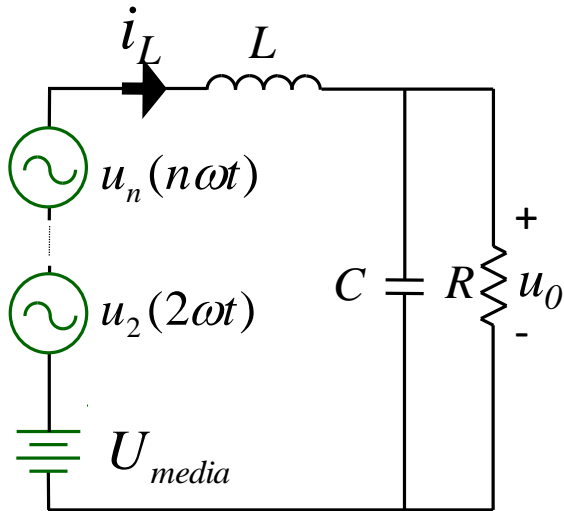
n par
 $n = 2, 4, 6, 8, \dots$
 $n = (2 \cdot k)$, donde:
 $k = 1, 2, 3, 4, \dots$



Análisis rectificador con carga LCR en MCC (II)

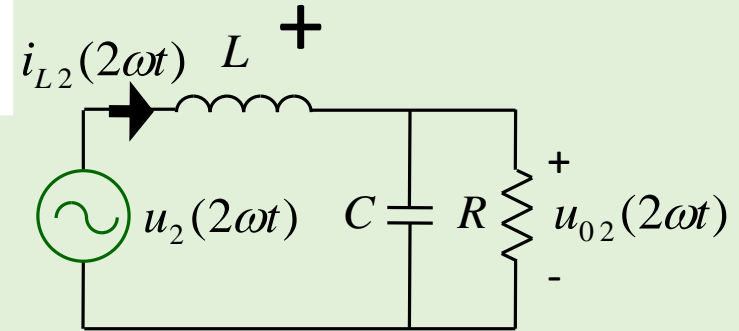
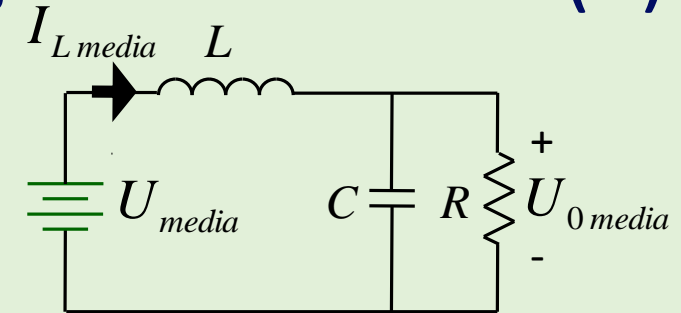
Régimen sinusoidal permanente

Aplicación de superposición: resolución de cada circuito de forma independiente y suma de los resultados

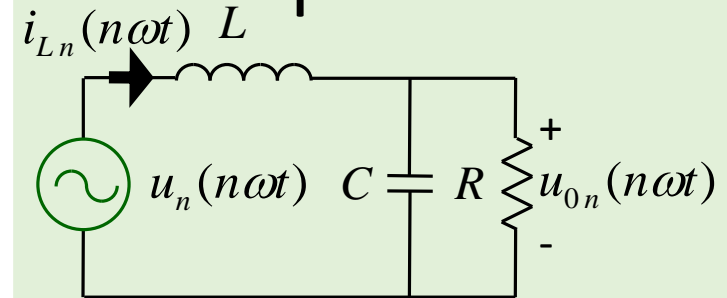


$$U_{0ef}^2 = U_{0m}^2 + U_{02}^2 + U_{04}^2 + \dots$$

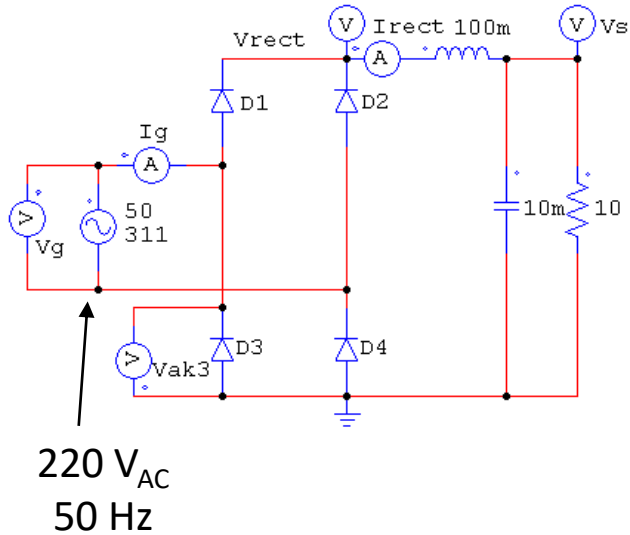
$$I_{Lef}^2 = I_{Lm}^2 + I_{L2}^2 + I_{L4}^2 + \dots$$



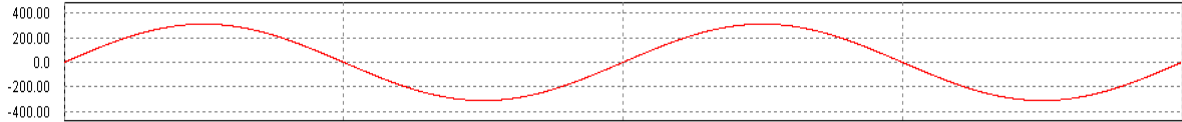
+
⋮
+



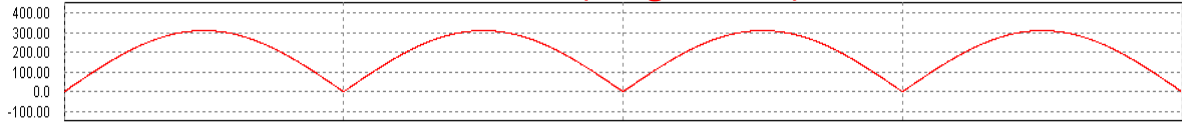
Análisis rectificador con carga LCR en MCC (3)



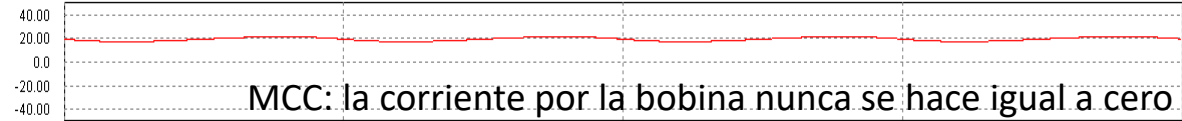
V_g Tensión en la fuente V1



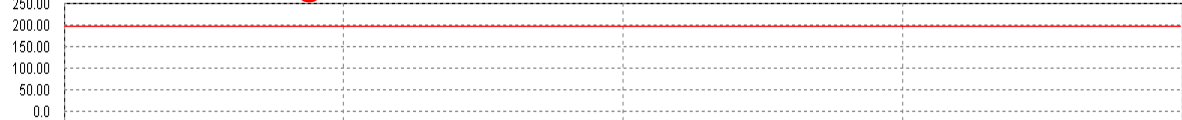
V_{rect} Tensión salida rectificador (carga L-C-R)



I_{rect} Corriente salida rectificador



V_s Tensión carga resistiva



...Si el filtro está bien diseñado, se puede considerar como buena aproximación:

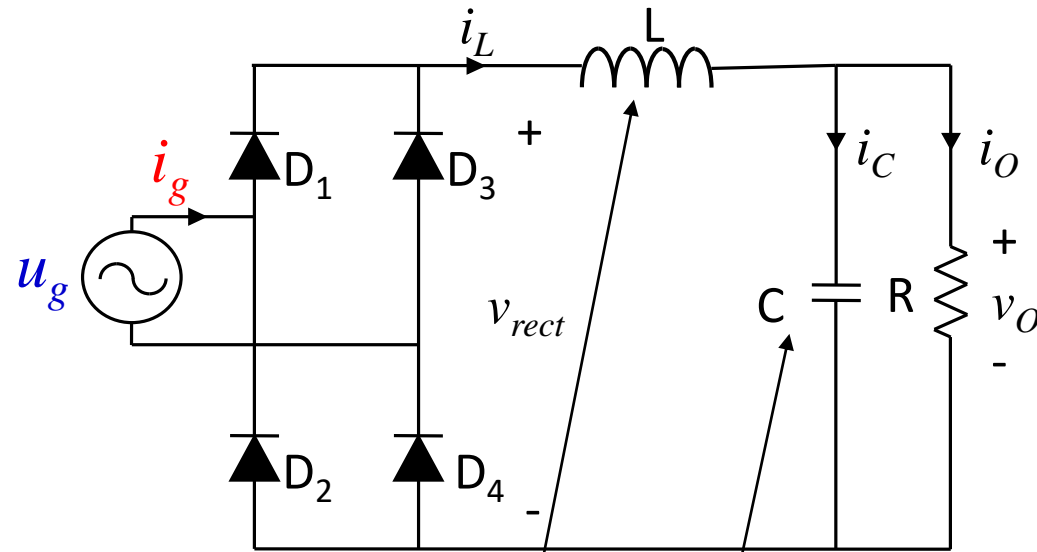
$$V_{Oef}^2 = V_{Om}^2 + \underbrace{V_{O2}^2}_0 + \underbrace{V_{O4}^2}_0 + \dots$$

$$I_{Lef}^2 = I_{Lm}^2 + \underbrace{I_{L2}^2}_0 + \underbrace{I_{L4}^2}_0 + \dots$$

El condensador mantiene la tensión prácticamente constante

La bobina suaviza la forma de onda de la corriente

Rectificador con filtro LC



- ✓ Reducir las corrientes de pico en los diodos
- ✓ Ayuda a reducir el rizado de tensión en el condensador
- ✓ Condensador de menor capacidad y corriente eficaz
- ✗ Peso y tamaño de la inductancia

Suaviza la forma de onda de corriente

$$v_L = L \frac{di_L}{dt}$$

Mantiene la tensión constante

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt}$$

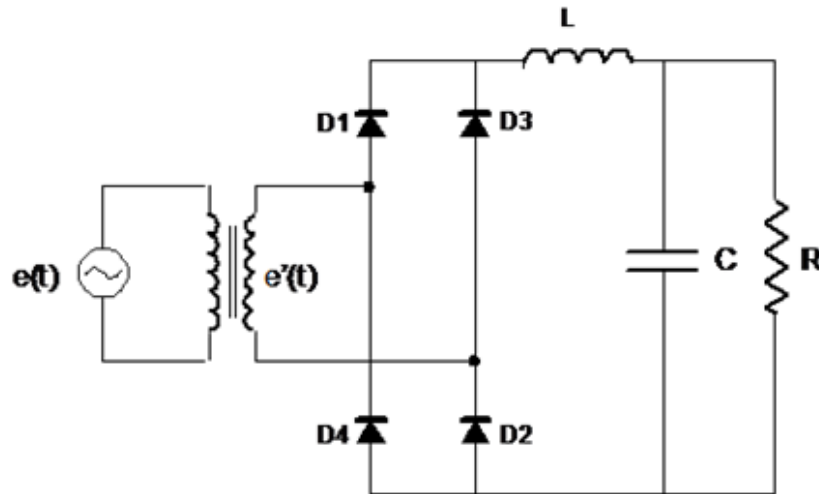
La potencia entregada a la carga solo depende del valor de la tensión de red → habría que buscar una forma de poder controlar la potencia entregada a la carga

Cálculo de tensiones y corrientes

Trabajo personal propuesto

Rectificador de onda completa con carga LCR en MCC

El circuito de la figura es un rectificador monofásico no controlado de onda completa que alimenta una carga puramente resistiva filtrando la tensión de salida con un filtro LC.

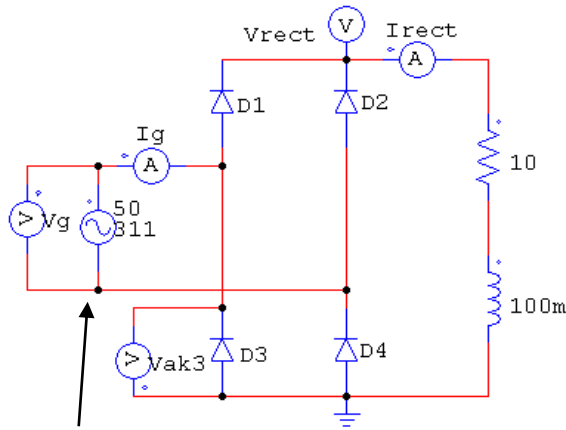


Datos rectificador
$E'=40\text{Vrms}$
$f=50\text{ Hz}$
$R=5\Omega$
$L=\infty$

Se pide:

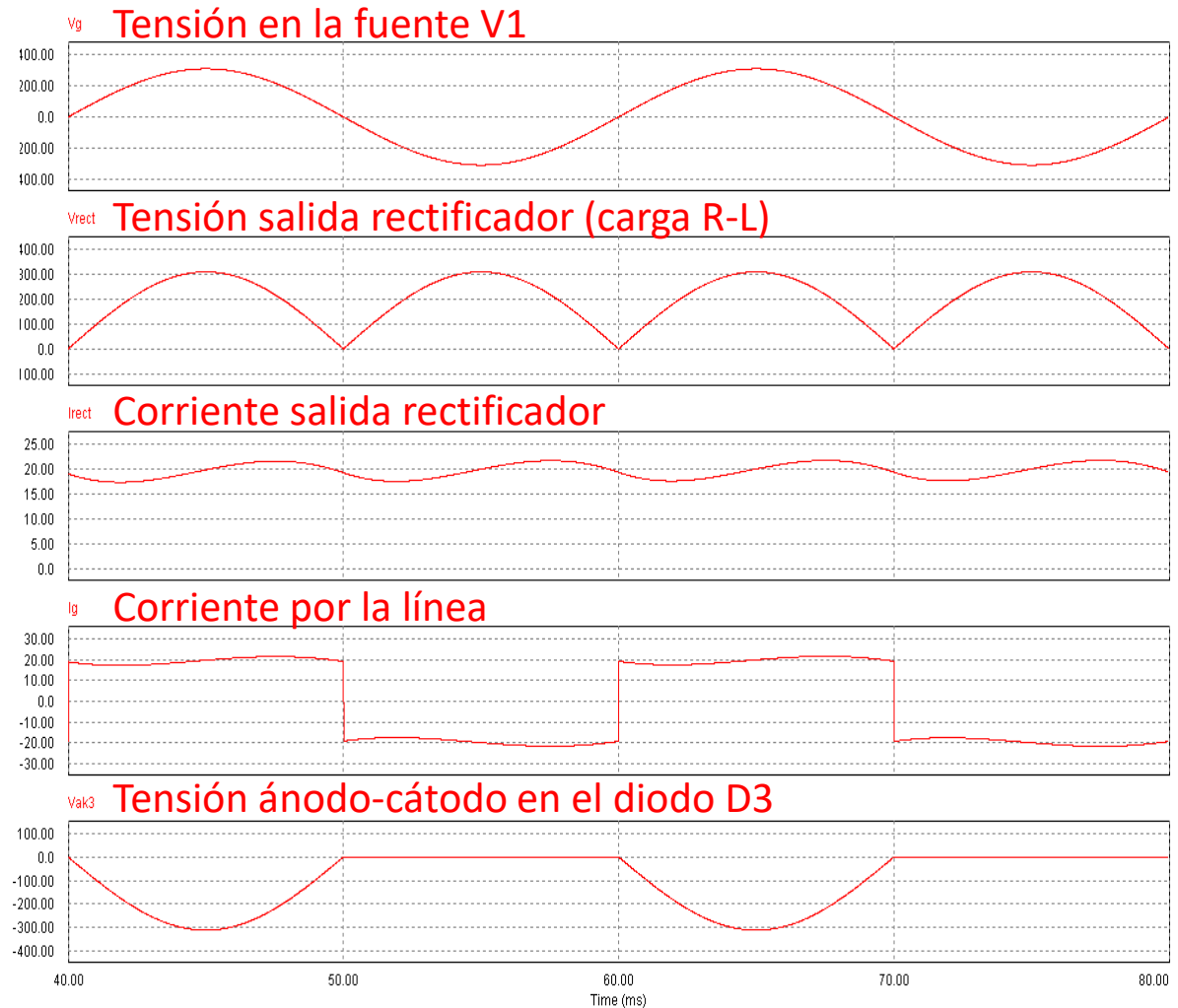
- 1) Dibujar forma de onda de:
 - Tensión y corriente en la carga.
 - Corriente en la red (secundario del transformador).
 - Corriente en los diodos.
- 2) Calcular, por separado, la potencia entregada por la red y la potencia absorbida por la carga. ¿Se verifica el balance de potencia?
- 3) Calcular el factor de potencia visto por la red de CA.
- 4) Dimensionar los diodos.

Rectificador onda completa carga RL (100 mH)

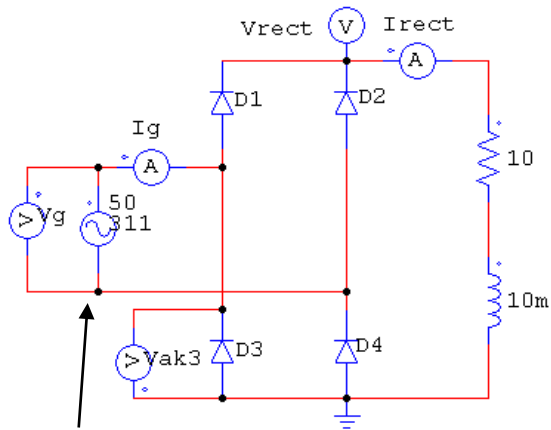


220 V_{AC}
50 Hz

El mismo análisis
puede aplicarse a todas
las cargas inductivas,
como la RL



Rectificador onda completa carga RL (10 mH)



220 V_{AC}
50 Hz



Comprobación modo de conducción

- Cálculo (valor pico) primer armónico corriente bobina I_1
- Cálculo valor medio corriente bobina I_{med}
- Comparación primer armónico y valor medio:

Modo conducción continuo

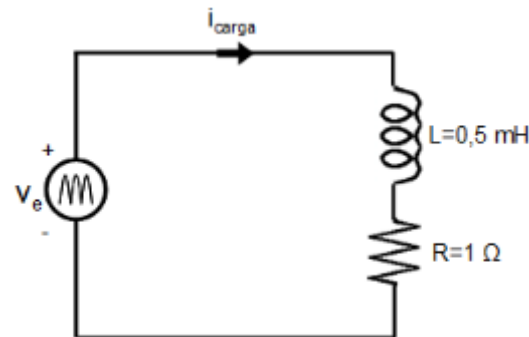
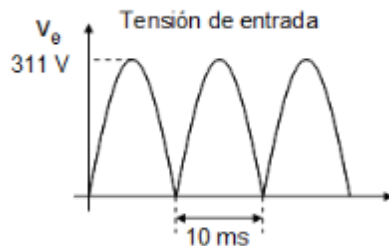
$I_{med} > I_1$ La corriente por la bobina no se anula

Rectificador de onda completa con carga RL en MCC

Trabajo personal propuesto

Para el circuito de la siguiente figura, considerando que la fuente de tensión proporciona una tensión como la representada:

1. Determine si el circuito funciona en modo de conducción continuo o discontinuo. Para ello considere únicamente el primer armónico de la corriente por la carga.
2. Despreciando todos los armónicos de corriente de mayor orden que el primero, calcule la potencia activa consumida por la bobina y la calculada por la resistencia.

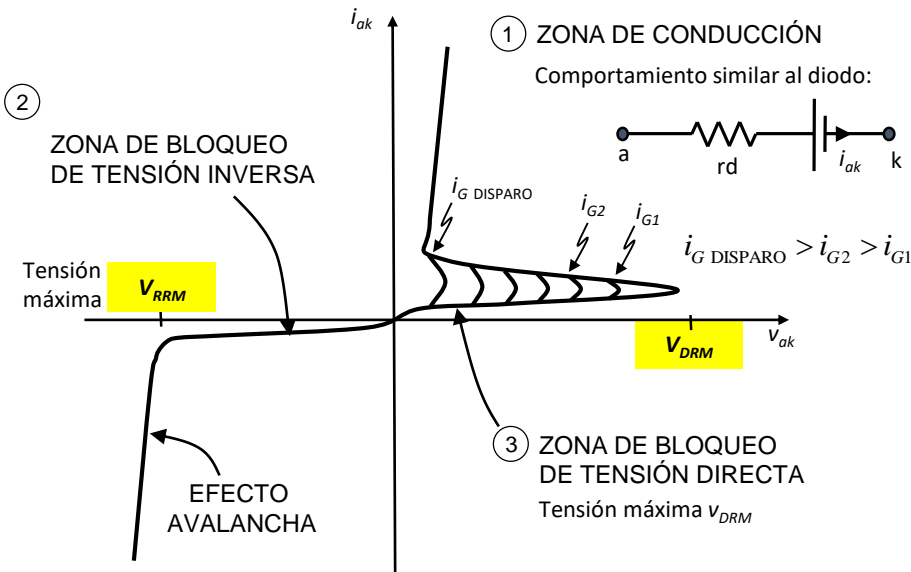
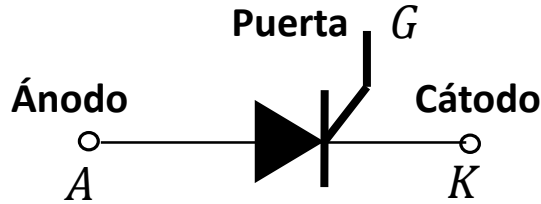


Índice tema

- Conversión CA-CC y clasificación rectificadores
- Rectificadores no controlados monofásicos:
 - El diodo
 - Circuitos básicos con diodos
 - Rectificador de media onda
 - Rectificador de onda completa: carga resistiva y carga altamente inductiva
- Rectificadores controlados monofásicos:
 - El tiristor
 - Rectificador de media onda y de onda completa con carga resistiva
 - Rectificador de onda completa: carga resistiva y carga altamente inductiva
 - Rectificador de onda completa con diodo de libre circulación
- Rectificadores trifásicos:
 - Rectificador de media onda
 - Rectificador de onda completa no controlado y controlado: carga resistiva y carga altamente inductiva
 - Concepto de inversor no autónomo
 - Rectificador de onda completa con diodo de libre circulación

Característica estática tiristor

Semicontrolado
(control encendido)



IMPLICACIONES CARACTERÍSTICA ESTÁTICA

1. REQUISITOS DE DISPARO

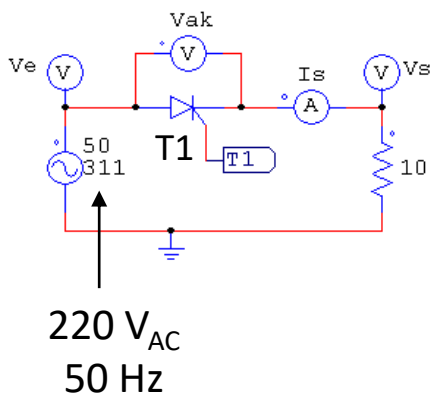
$$\begin{cases} v_{ak} > 0 & \text{(Previamente polarizado en directa)} \\ i_G > i_{G \text{ DISPARO}} \\ I_{ak} > I_H & \text{CORRIENTE DE ENCLAVAMIENTO} \end{cases}$$

2. REQUISITOS DE APAGADO

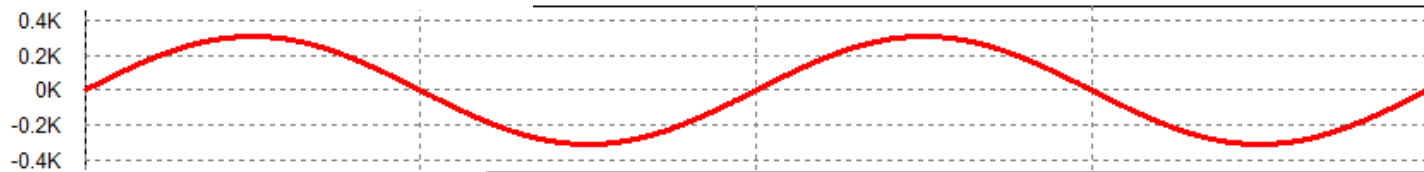
$$\begin{cases} i_{ak} < 0 & \text{CORRIENTE DE MANTENIMIENTO} \end{cases}$$

Type number	Voltage Code	V_{DRM}/V_{RRM} , max. repetitive peak and off-state voltage V	V_{RSM} , maximum non-repetitive peak voltage V	I_{DRM}/I_{RRM} max. @ $T_J = T_J \text{ max}$ mA
ST230S	04	400	500	30
	08	800	900	
	12	1200	1300	
	16	1600	1700	

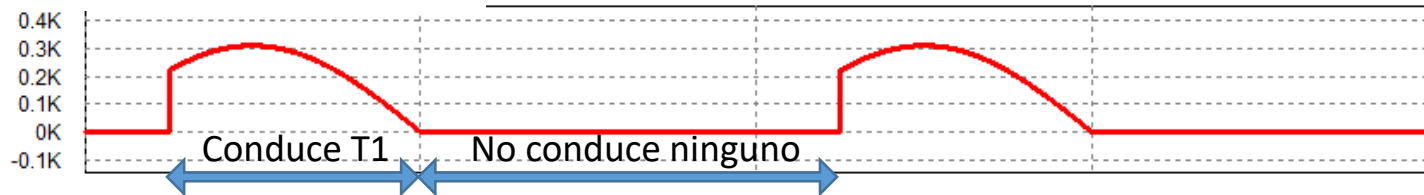
Rectificador media onda carga R (I)



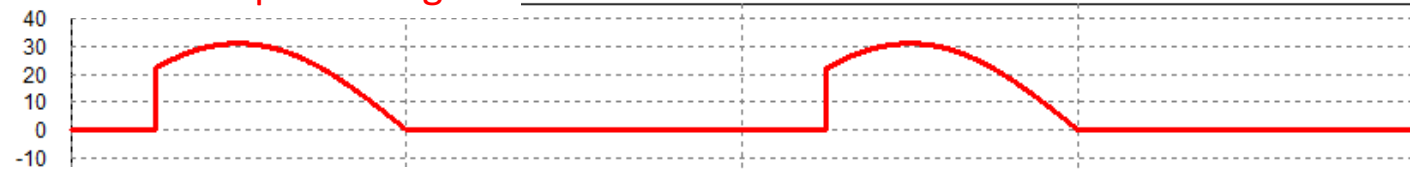
Tensión en la fuente V1



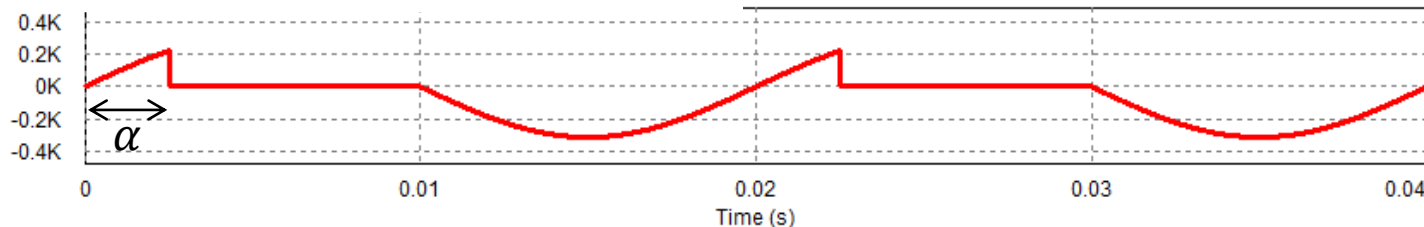
Tensión en la carga R



Corriente por la carga R



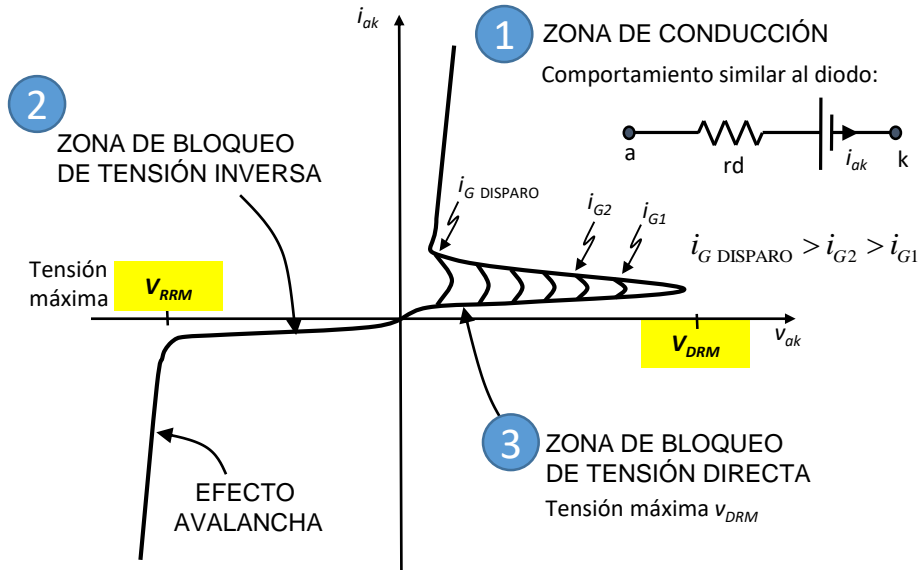
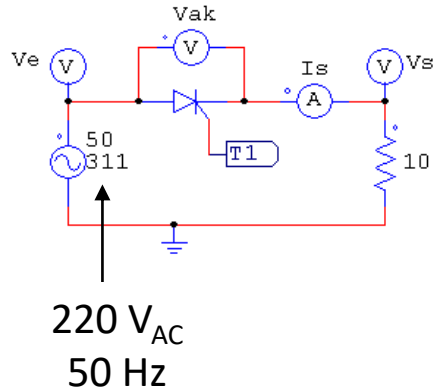
Tensión ánodo-cátodo en el tiristor



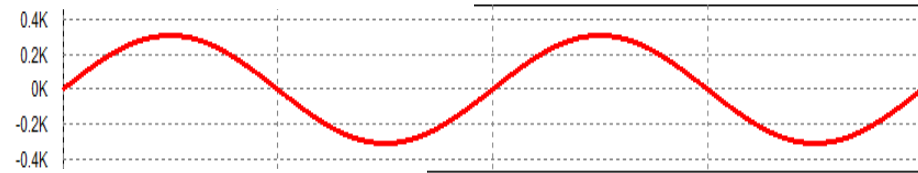
La tensión eficaz entregada a la carga depende del ángulo de disparo α del tiristor

$$V_{ef} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_g \sin(\theta) d\theta = \frac{V_g}{2\pi} (1 + \cos(\alpha))$$

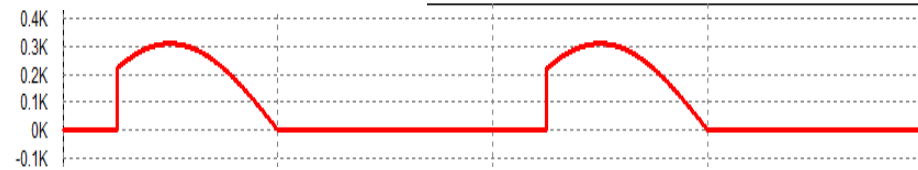
Rectificador media onda carga R (II)



Tensión en la fuente V1



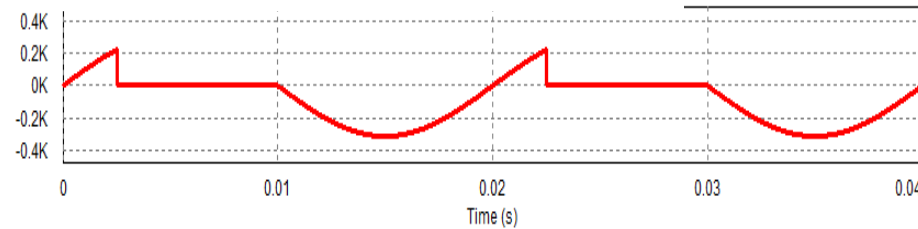
Tensión en la carga R



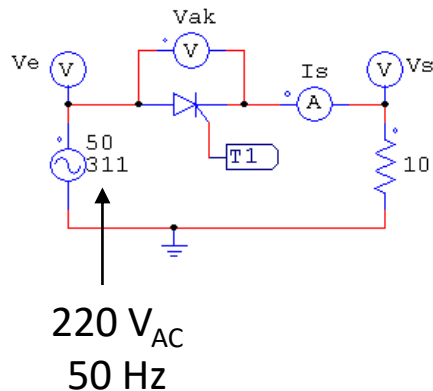
Corriente por la carga R = corriente ánodo-cátodo



Tensión ánodo-cátodo en el tiristor

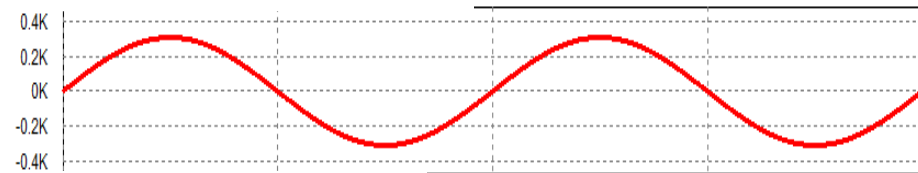


Rectificador media onda carga R (III)

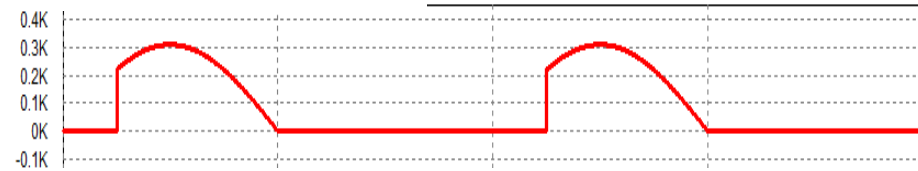


- El ángulo de disparo α del tiristor es el ángulo que se retrasa su conducción desde que está polarizado en directa ($v_{AK} > 0$), es decir, desde el instante en que empezaría a conducir si fuera un diodo
- En este caso el ángulo de conducción podría variar entre 0 y π

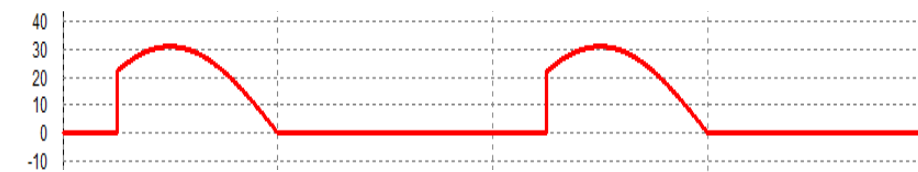
Tensión en la fuente V1



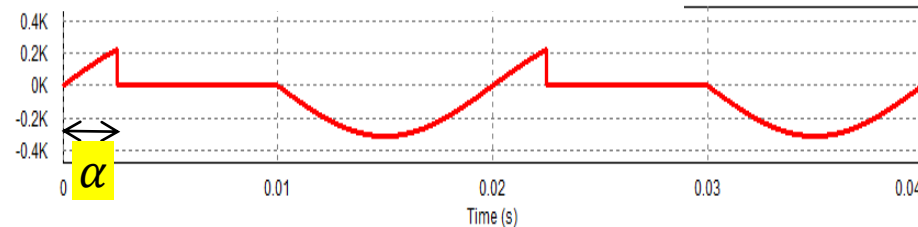
Tensión en la carga R



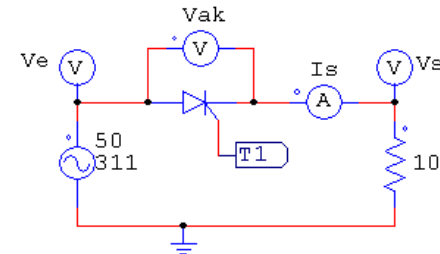
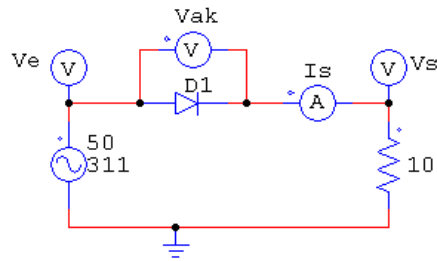
Corriente por la carga R = corriente ánodo-cátodo



Tensión ánodo-cátodo en el tiristor



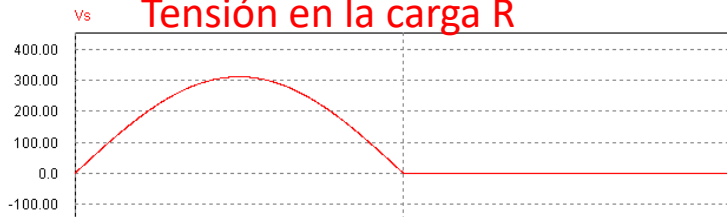
Comparación rectificador no controlado y controlado



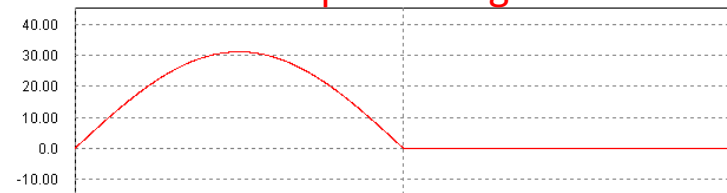
Tensión en la fuente V1



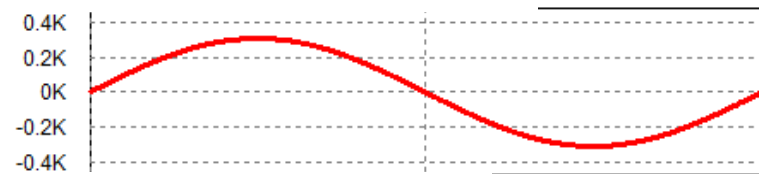
Tensión en la carga R



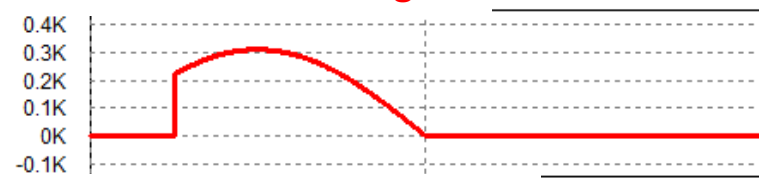
Corriente por la carga R



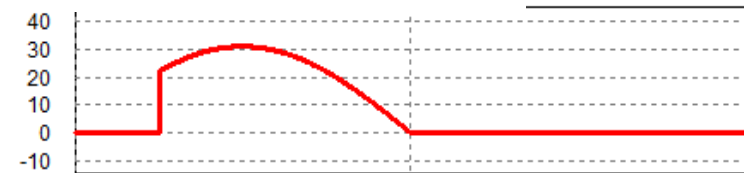
Tensión en la fuente V1



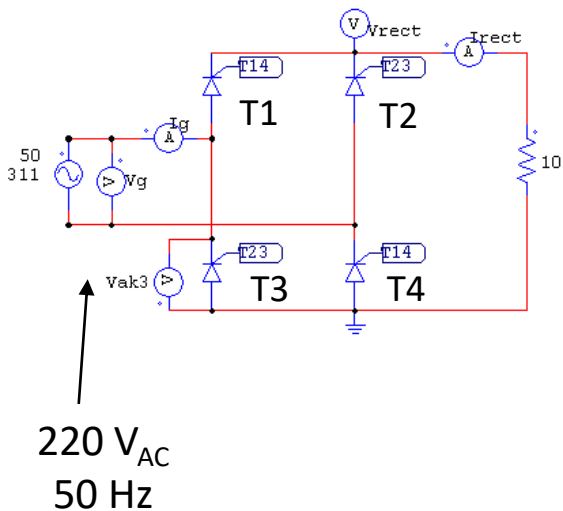
Tensión en la carga R



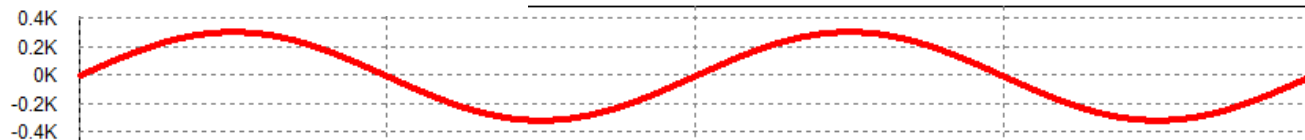
Corriente por la carga R



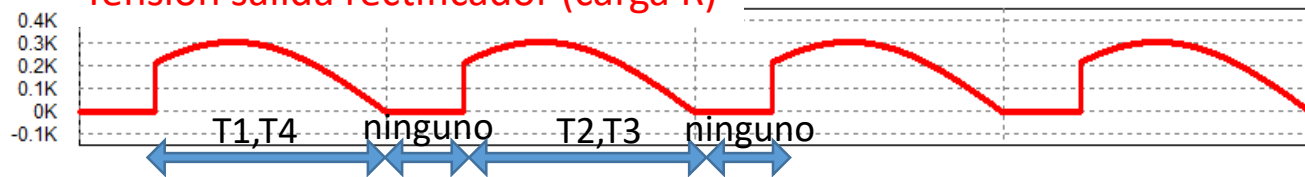
Rectificador onda completa carga R



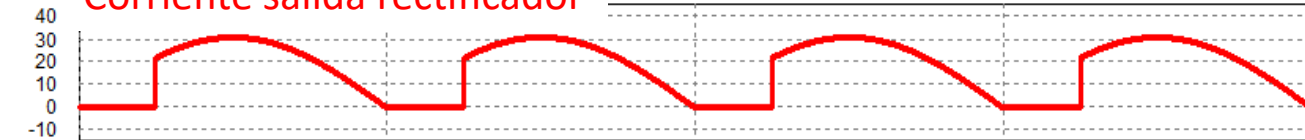
Tensión en la fuente V1



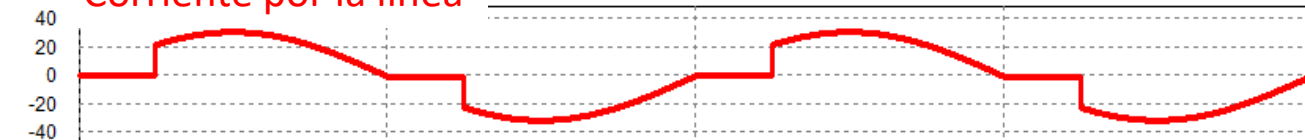
Tensión salida rectificador (carga R)



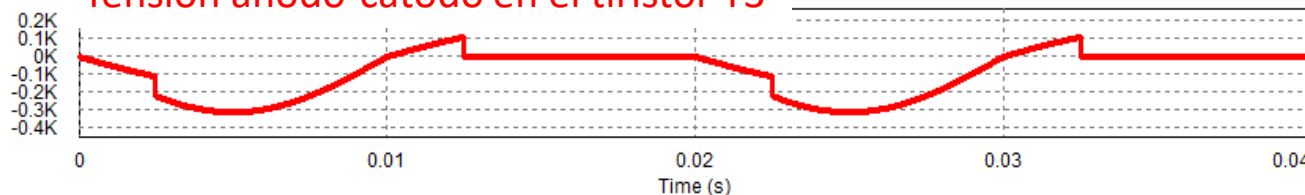
Corriente salida rectificador



Corriente por la línea

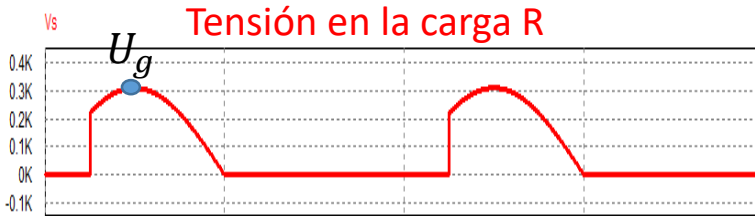


Tensión ánodo-cátodo en el tiristor T3

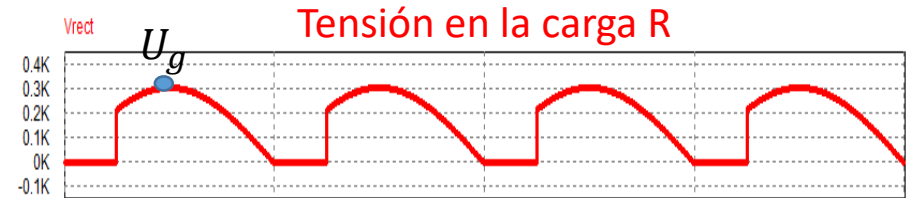


Cálculo valor medio y potencia

Rectificador media onda carga R

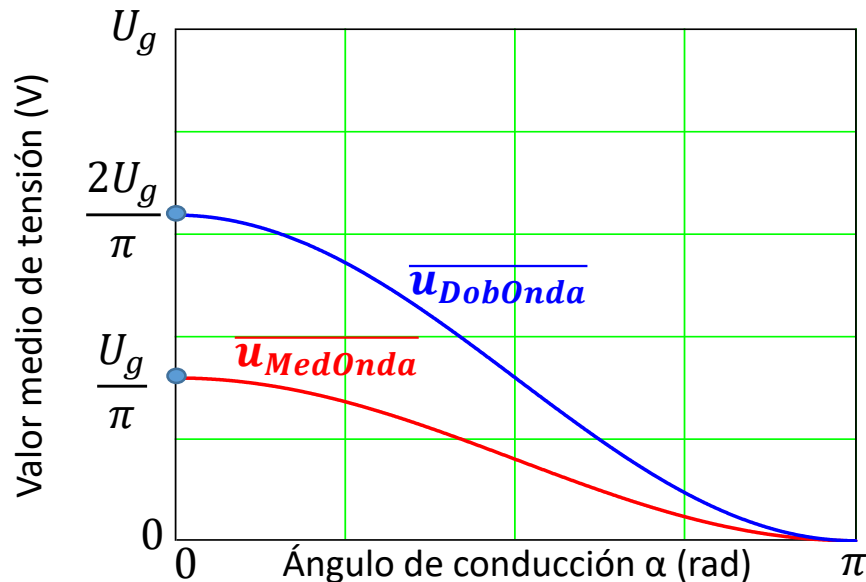


Rectificador onda completa carga R



$$\overline{u_{MedOnda}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{\alpha}^{\pi} U_g \cdot \sin(\vartheta) d\vartheta = \frac{U_g}{2\pi} \cdot (1 + \cos(\alpha))$$

$$\overline{u_{DobOnda}} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\alpha}^{\pi} U_g \cdot \sin(\vartheta) d\vartheta = \frac{U_g}{\pi} \cdot (1 + \cos(\alpha))$$

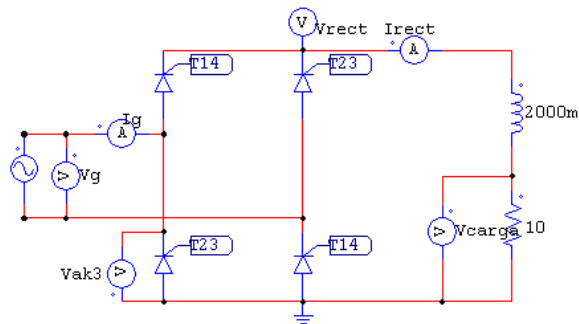


Rectificador onda completa carga LR (I)

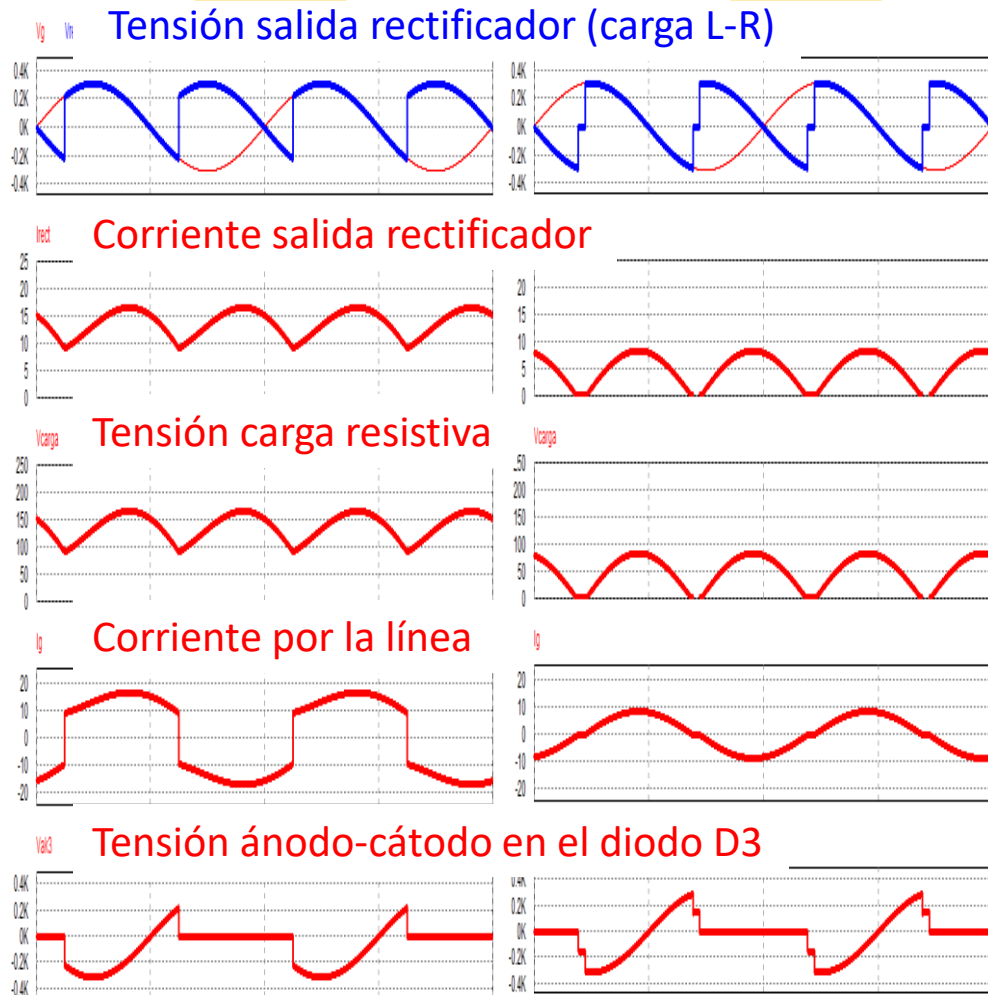
$L=100\text{ mH}$

$\alpha=45^\circ$

$\alpha=80^\circ$



- Modo de conducción continuo:
 - La corriente por la bobina siempre es mayor que cero
- Modo de conducción discontinuo
 - La corriente por la bobina es igual a cero en algún instante
 - La tensión a la salida del rectificador no tiene la misma forma que en modo de conducción continuo



Modo de conducción continuo

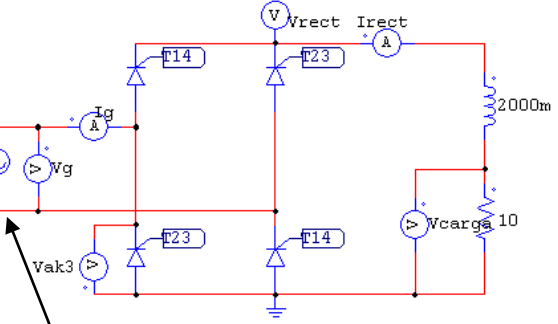
Modo de conducción discontinuo

Rectificador onda completa carga LR (II)

$\alpha=45^\circ$

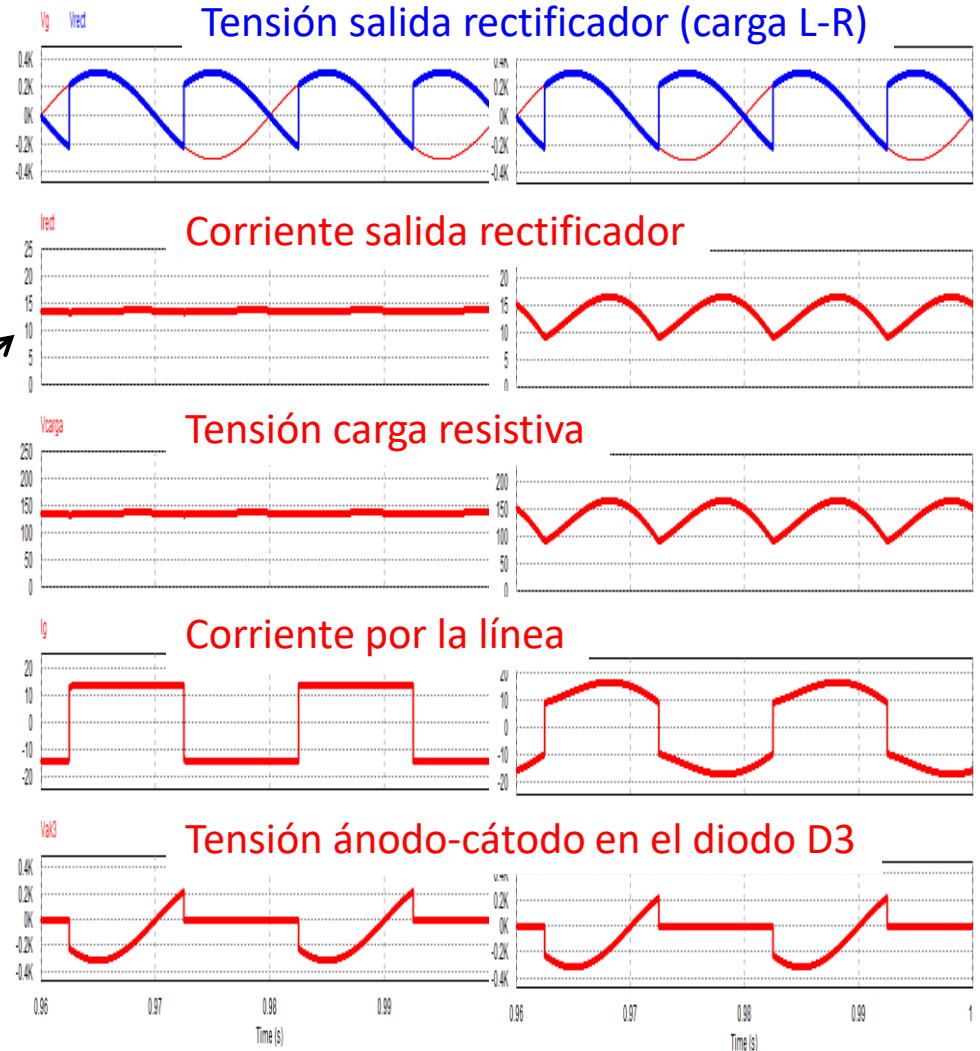
$L=2000 \text{ mH}$

$L=100 \text{ mH}$

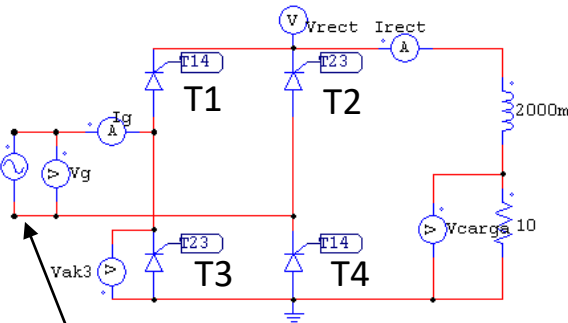


220 V_{AC}
50 Hz

Mayor rizado de corriente cuanto menor es la inductancia



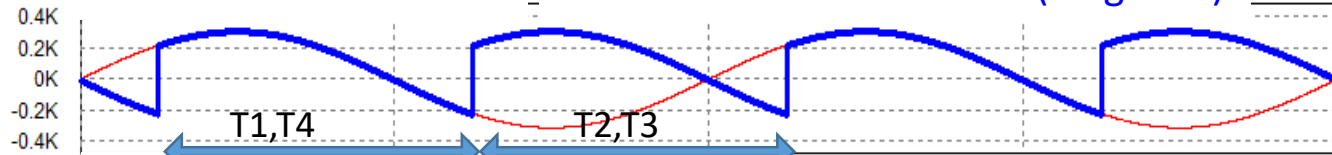
Rectificador carga altamente inductiva (I)



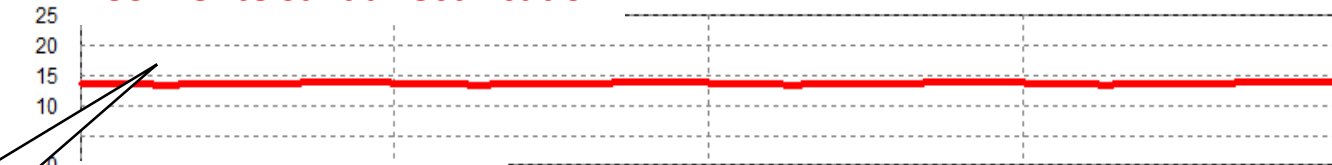
220 V_{AC}
50 Hz

Carga con una inductancia muy grande (**carga altamente inductiva**)
Se considera una inductancia tan elevada que se puede despreciar el rizado de corriente por la misma

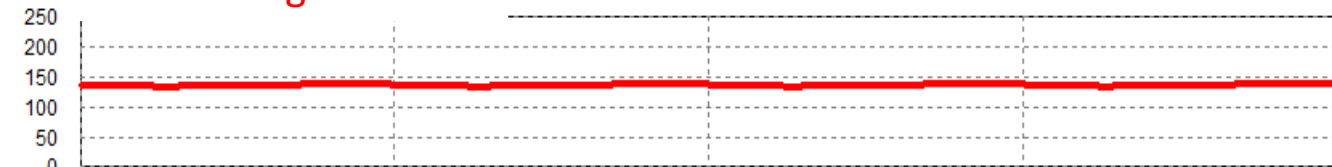
Tensión en la fuente V1 Tensión salida rectificador (carga L-R)



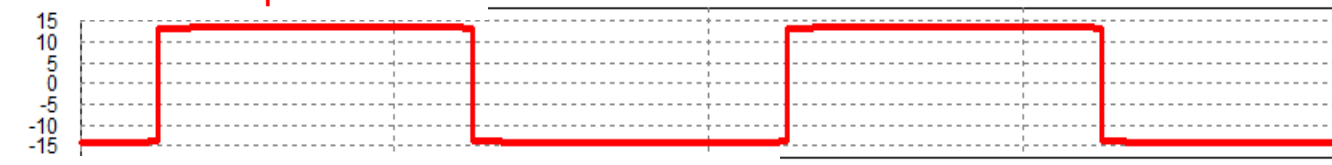
Corriente salida rectificador



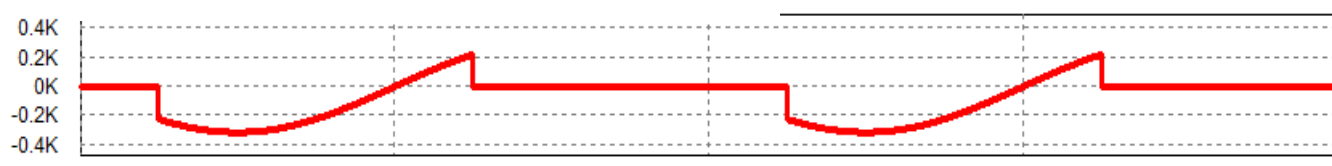
Tensión carga resistiva



Corriente por la línea

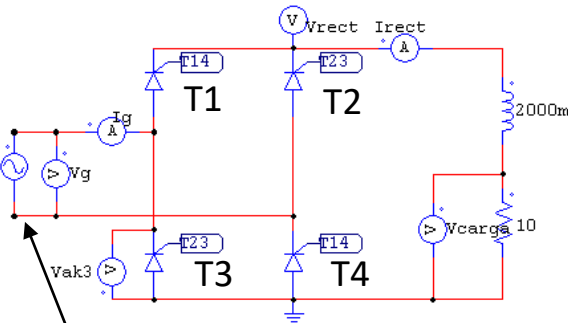


Tensión ánodo-cátodo en el diodo D3



0.96 0.97 0.98 0.99 1
Time (s)

Rectificador carga altamente inductiva (II)

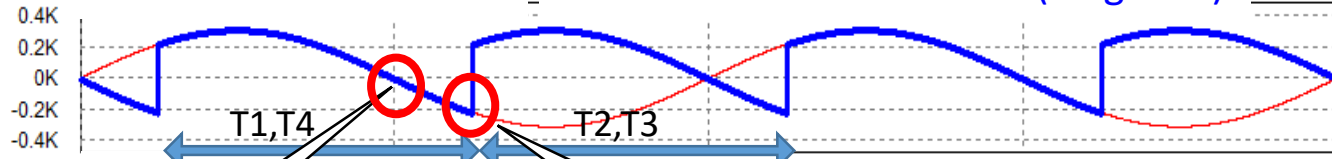


220 V_{AC}
50 Hz

T1 y T4 siguen conduciendo porque la corriente a la salida del rectificador no se ha anulado y todavía no se han disparado T2 y T3

T2 y T3 se pueden disparar porque están bloqueando tensión directa

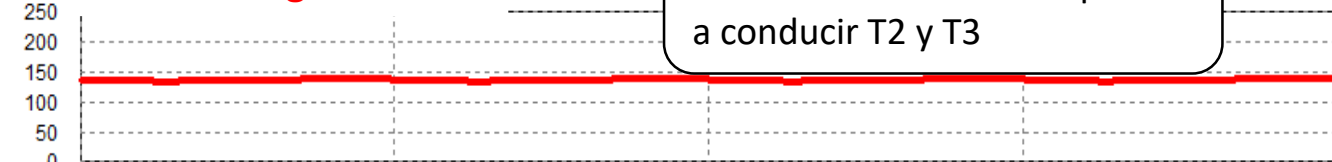
Tensión en la fuente V1 Tensión salida rectificador (carga L-R)



Corriente salida rectificador

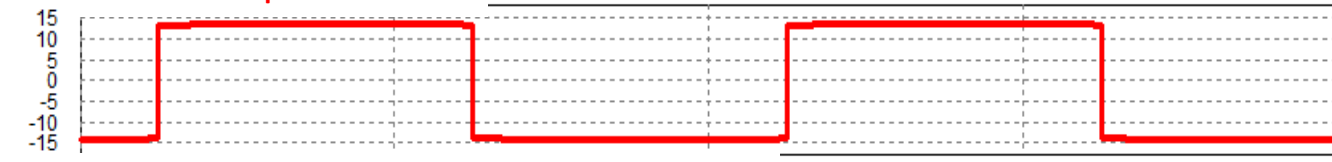


Tensión carga resistiva

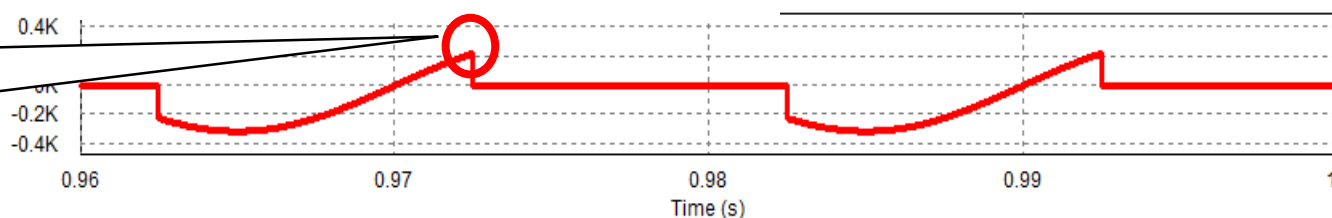


T1 y T4 se apagan por fuente inversa de tensión al empezar a conducir T2 y T3

Corriente por la línea



Tensión ánodo-cátodo en el diodo D3



Rectificador carga altamente inductiva (IV)

$\alpha=0^\circ$

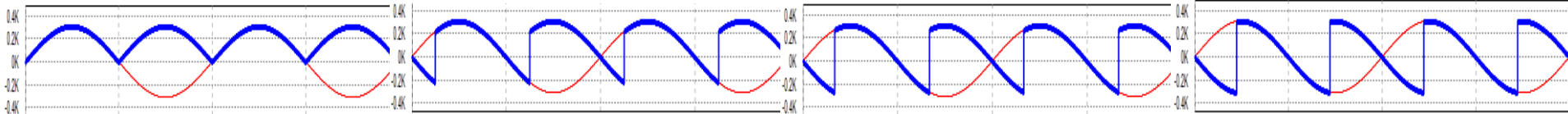
$\alpha=45^\circ$

$\alpha=60^\circ$

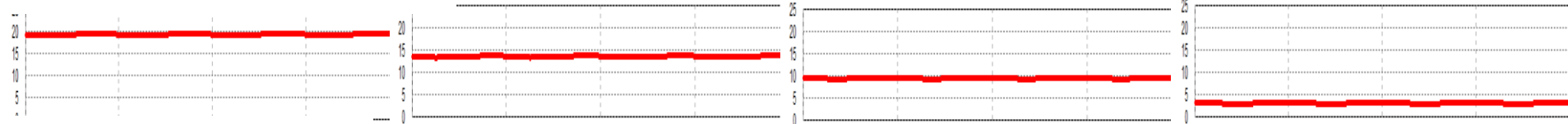
$\alpha=80^\circ$

Tensión en la fuente V1

Tensión salida rectificador (carga L-R)



Corriente salida rectificador



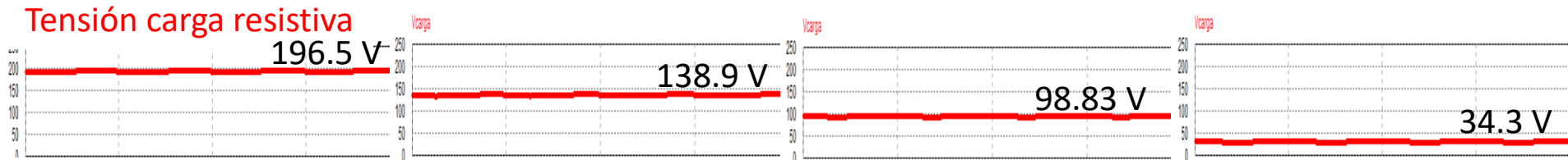
Tensión carga resistiva

196.5 V

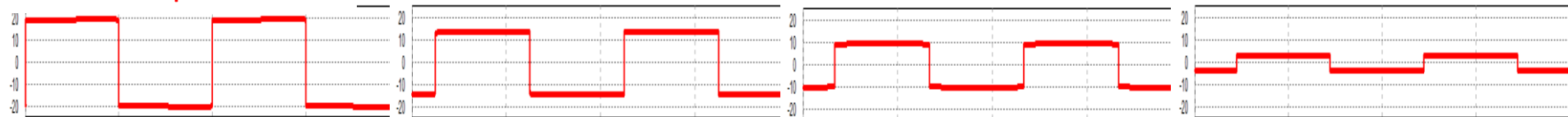
138.9 V

98.83 V

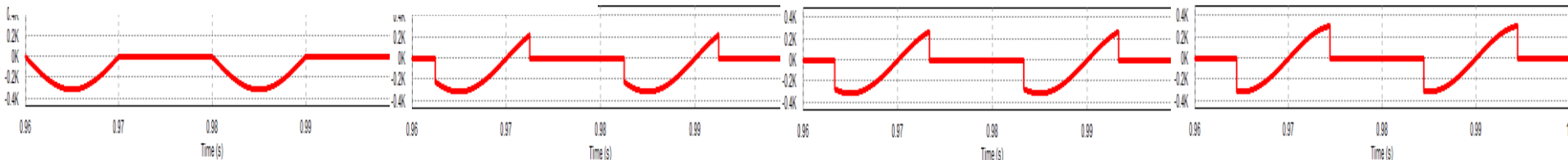
34.3 V



Corriente por la línea



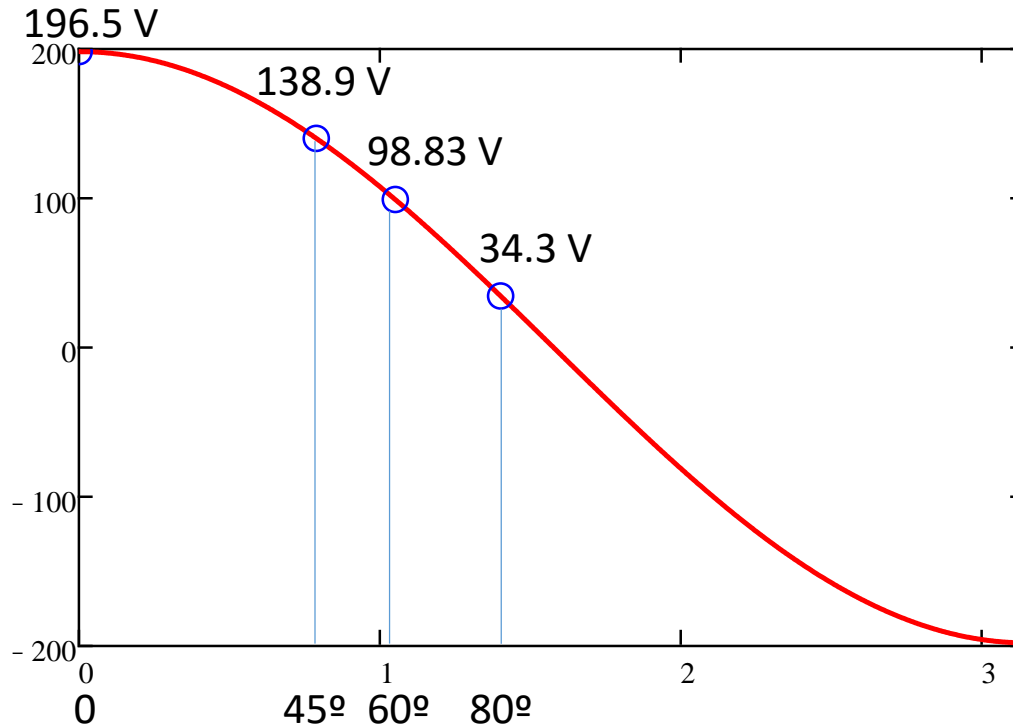
Tensión ánodo-cátodo en el diodo D3



Rectificador carga altamente inductiva (V)

- La tensión medida aplicada a la carga disminuye con el ángulo de disparo

$$\overline{u_o} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} U_g \cdot \sin(\vartheta) d\vartheta = \frac{2U_g}{\pi} \cdot \cos(\alpha)$$



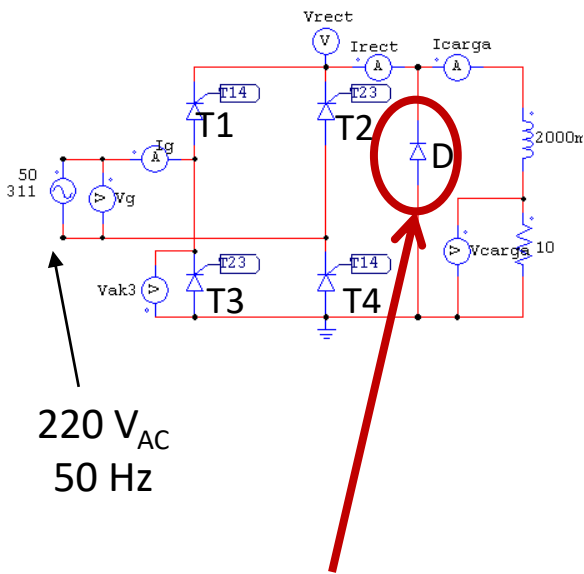
Rectificador carga altamente inductiva (III)

- Si la inductancia del filtro es suficientemente grande:
 - Mismas formas de onda y mismo análisis para carga RLE, LCR y LR
 - Puede despreciarse el rizado de corriente por la bobina y por tanto la tensión que aparece en la resistencia es continua

Trabajo personal propuesto

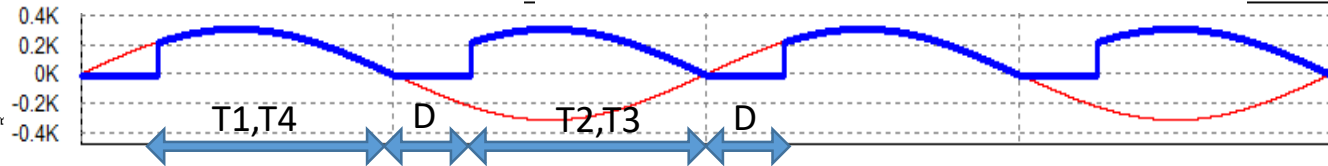
- Calcular el factor de potencia visto por el generador en función del ángulo de disparo
- Calcular la distorsión armónica de la corriente de entrada
- Calcular la potencia entregada por la fuente en función del ángulo de disparo:
 - Considerando el consumo de la carga.
 - A partir de las formas de onda de tensión y corriente en el generador.
- Analizar si es posible que la carga entregue potencia a la red, y en qué ángulos de disparo de los tiristores

Rectificador onda completa carga LR con DLC

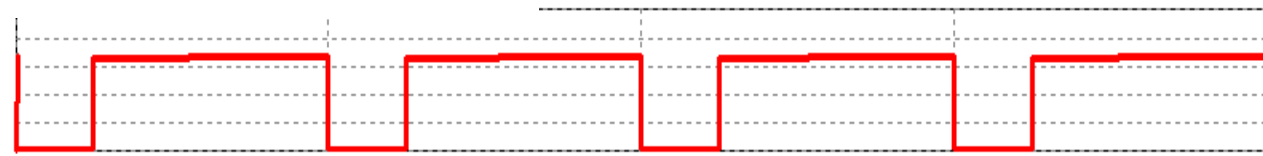


Diodo de libre circulación

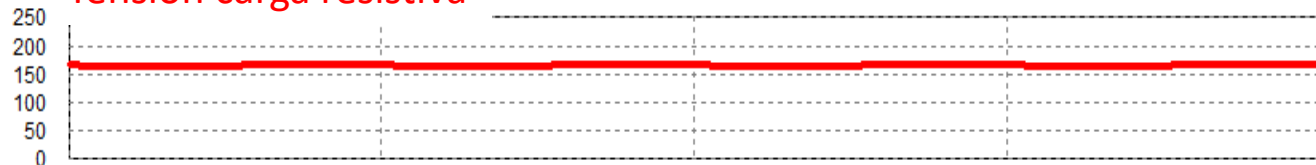
Tensión en la fuente V1 Tensión salida rectificador (carga L-R)



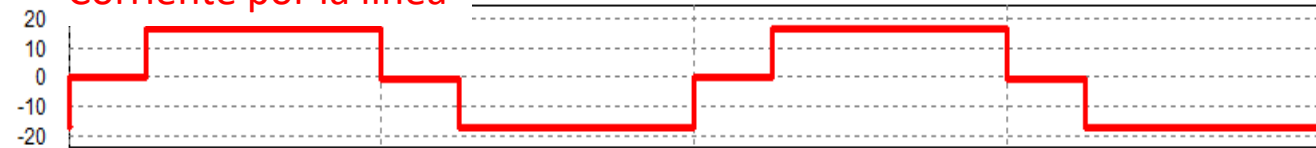
Corriente salida rectificador



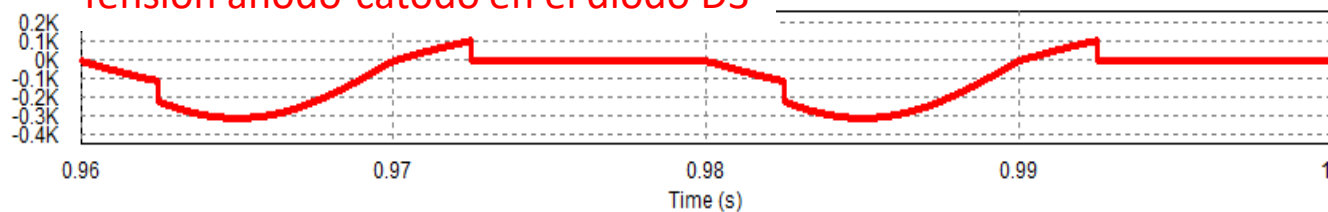
Tensión carga resistiva



Corriente por la línea

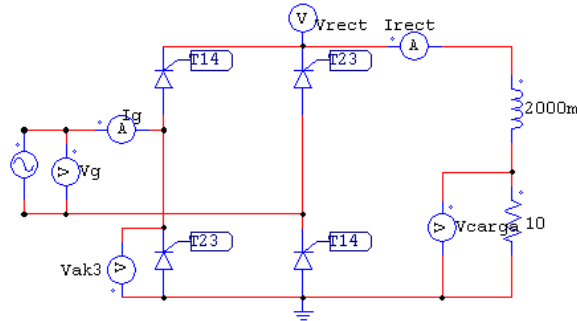


Tensión ánodo-cátodo en el diodo D3

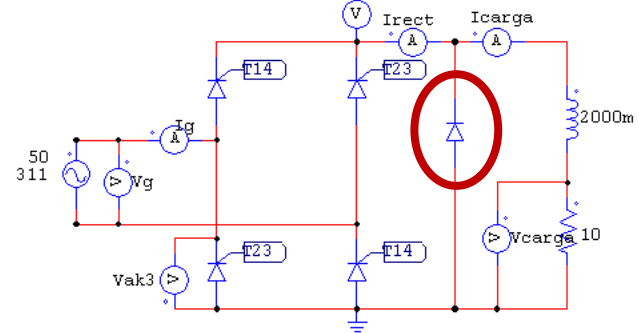


Rectificador onda completa carga LR con DLC

Sin diodo libre circulación

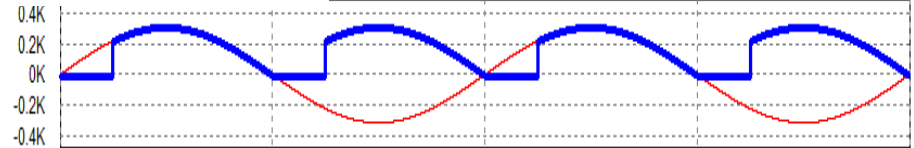
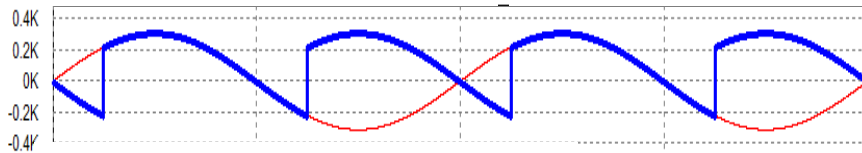


Con diodo libre circulación

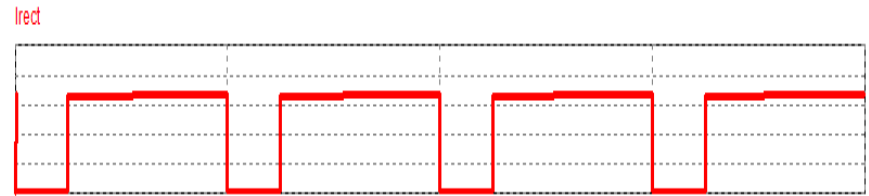
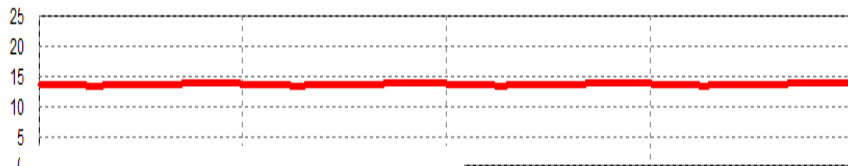


$\alpha=45^\circ$

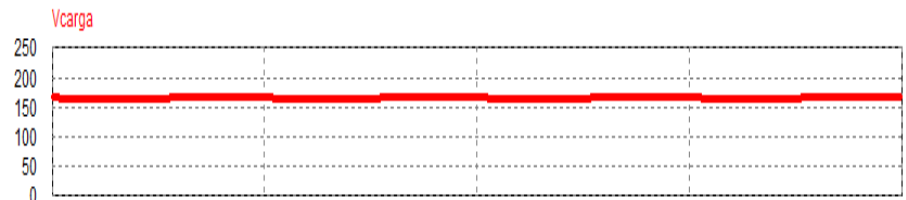
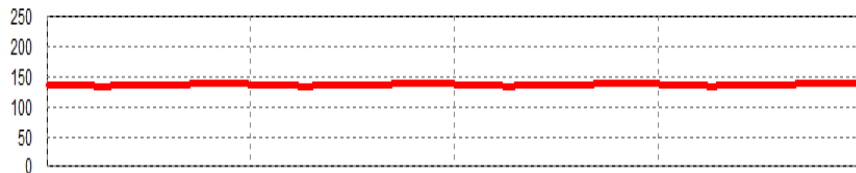
Tensión en la fuente V1 Tensión salida rectificador (carga L-R)



Corriente salida rectificador



Tensión carga resistiva

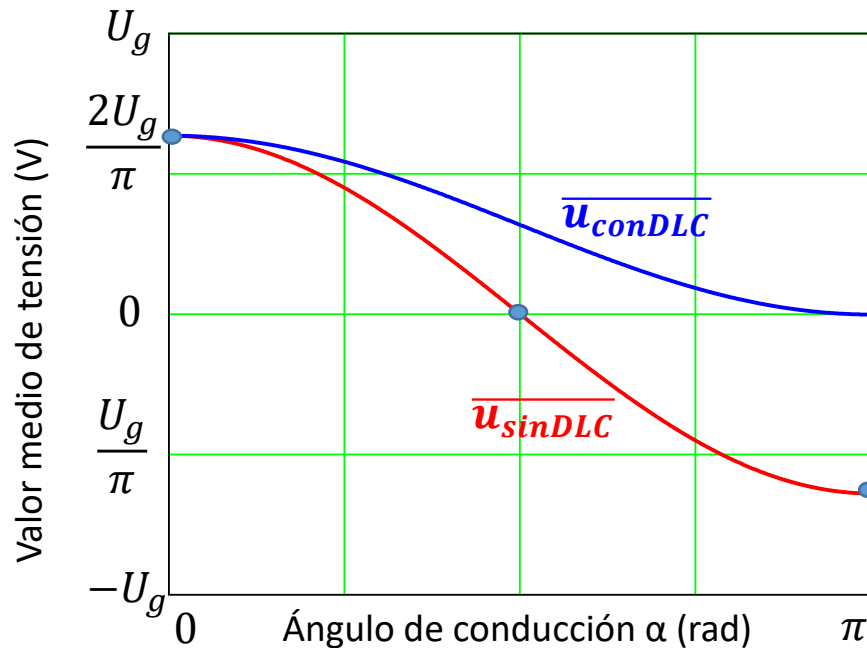


Rectificador onda completa carga LR con DLC

Sin diodo libre circulación

Con diodo libre circulación

$$\overline{u_{sinDLC}} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} U_g \cdot \sin(\vartheta) d\vartheta = \frac{2U_g}{\pi} \cdot \cos(\alpha) \quad \overline{u_{conDLC}} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\alpha}^{\pi} U_g \cdot \sin(\vartheta) d\vartheta = \frac{U_g}{\pi} \cdot (1 + \cos(\alpha))$$



Comparación con y sin diodo libre circulación

Trabajo personal propuesto

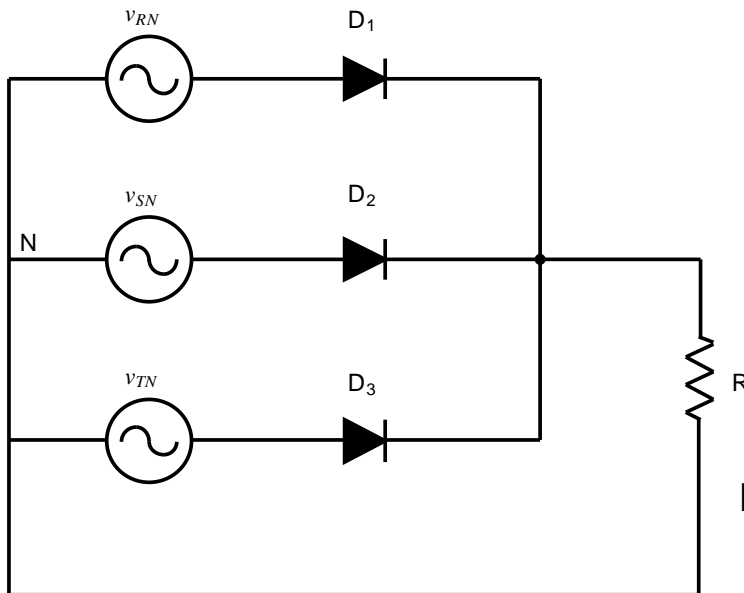
- Representar la tensión media aplicada a la carga en función del ángulo de disparo en el caso de un rectificador de onda completa con carga altamente inductiva, con y sin diodo de libre circulación.
- Para un mismo ángulo de disparo, ¿qué configuración proporciona mayor tensión media?
- Calcular el factor de rizado de la tensión a la salida del rectificador considerando las dos configuraciones mencionadas.

Índice tema

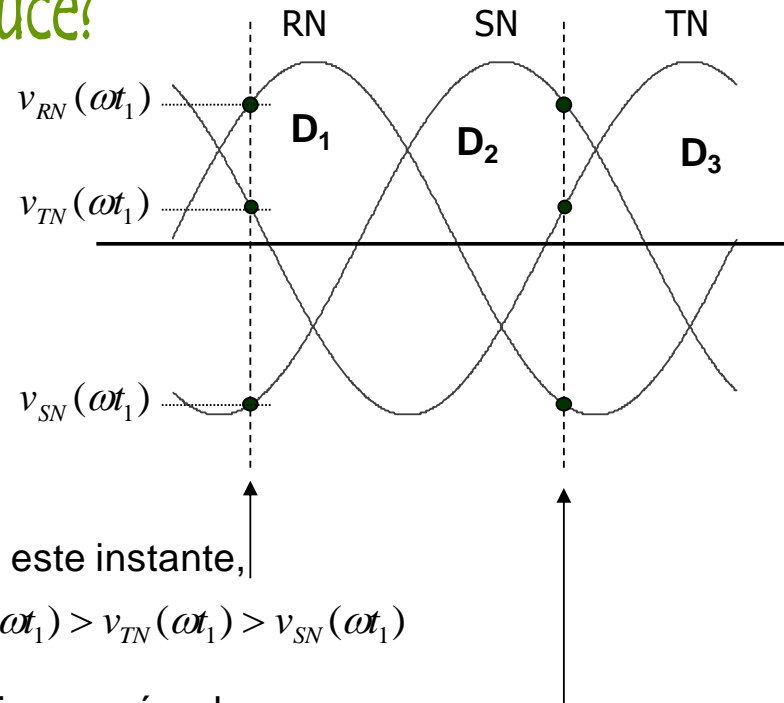
- Conversión CA-CC y clasificación rectificadores
- Rectificadores no controlados monofásicos:
 - El diodo
 - Circuitos básicos con diodos
 - Rectificador de media onda
 - Rectificador de onda completa: carga resistiva y carga altamente inductiva
- Rectificadores controlados monofásicos:
 - El tiristor
 - Rectificador de media onda y de onda completa con carga resistiva
 - Rectificador de onda completa: carga resistiva y carga altamente inductiva
 - Rectificador de onda completa con diodo de libre circulación
- Rectificadores trifásicos:
 - Rectificador de media onda
 - Rectificador de onda completa no controlado y controlado: carga resistiva y carga altamente inductiva
 - Concepto de inversor no autónomo
 - Rectificador de onda completa con diodo de libre circulación

Rectificador no controlado de media onda (I)

¿Qué diodo conduce?



Por tanto el diodo que tiene su ánodo a mayor tensión es D_1 y será este quien conduzca

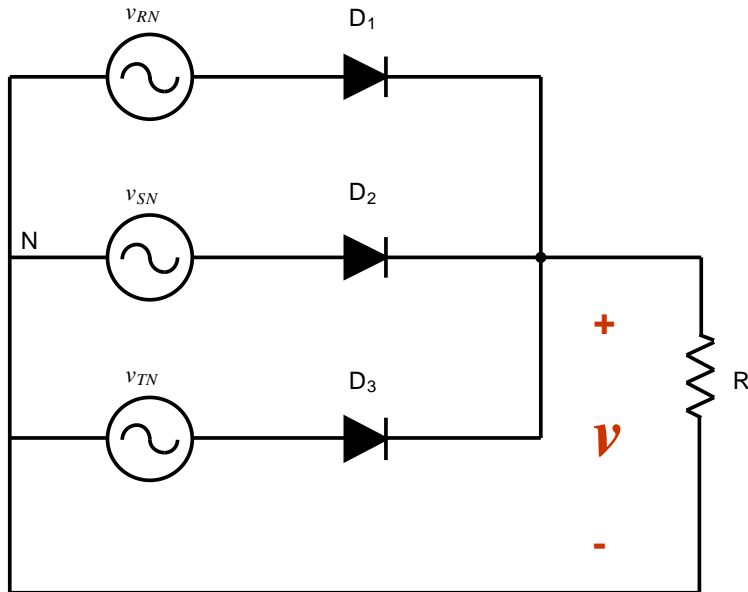


Para este instante,
 $v_{RN}(\omega t_1) > v_{TN}(\omega t_1) > v_{SN}(\omega t_1)$

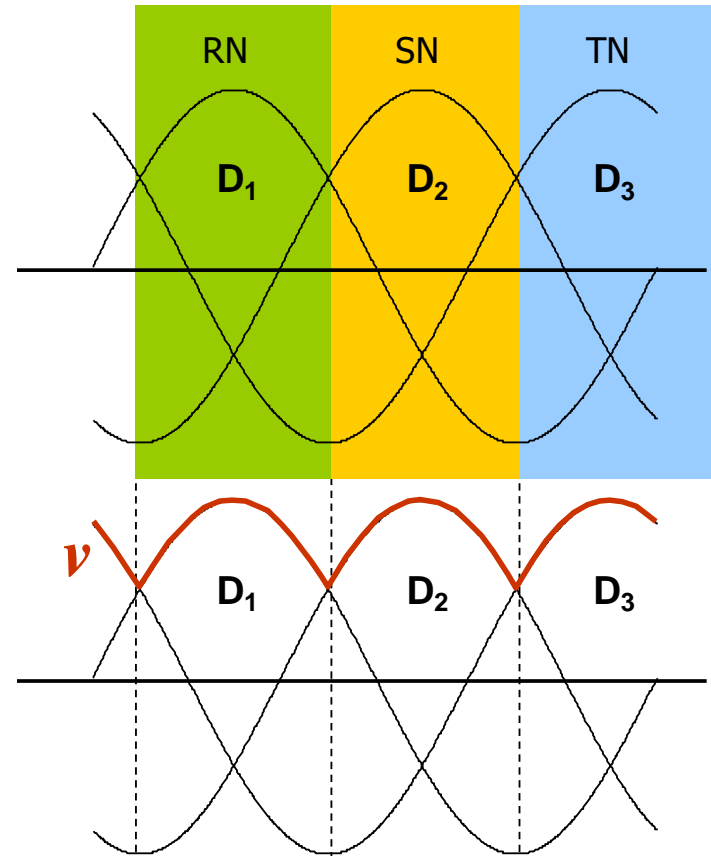
$v_{SN}(\omega t_1) > v_{TN}(\omega t_1) > v_{RN}(\omega t_1)$

D_2 tiene su ánodo a mayor tensión. Conduce D_2

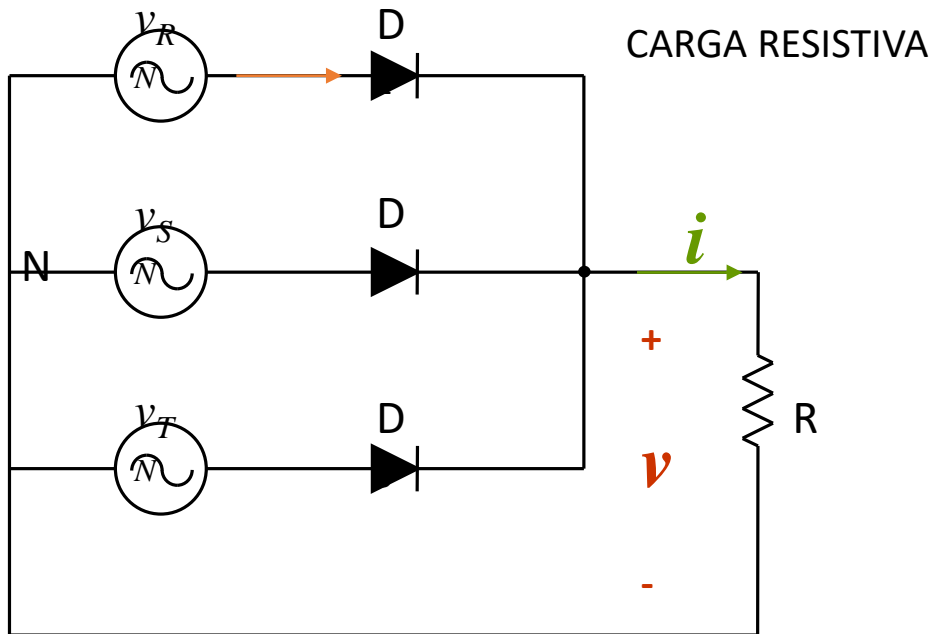
Rectificador no controlado de media onda (II)



Cada diodo aplica a la carga la tensión de su fase por tanto la tensión en la carga, v , se va conformando según la mayor de las tres tensiones de fase



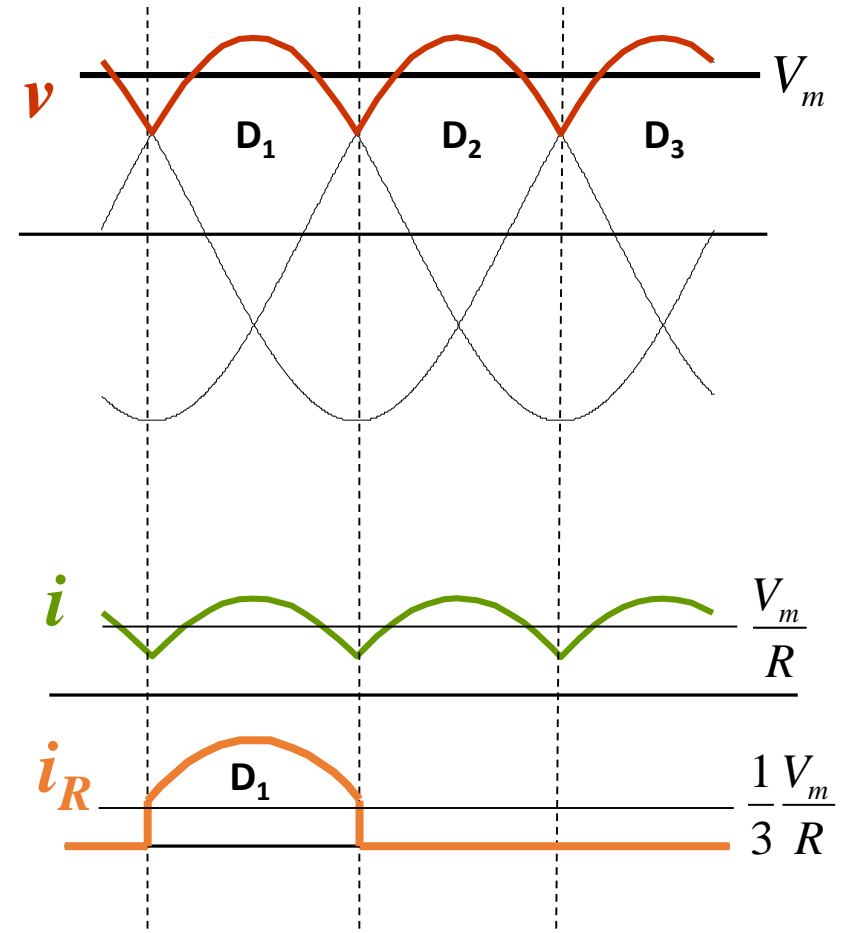
Rectificador no controlado de media onda (III)



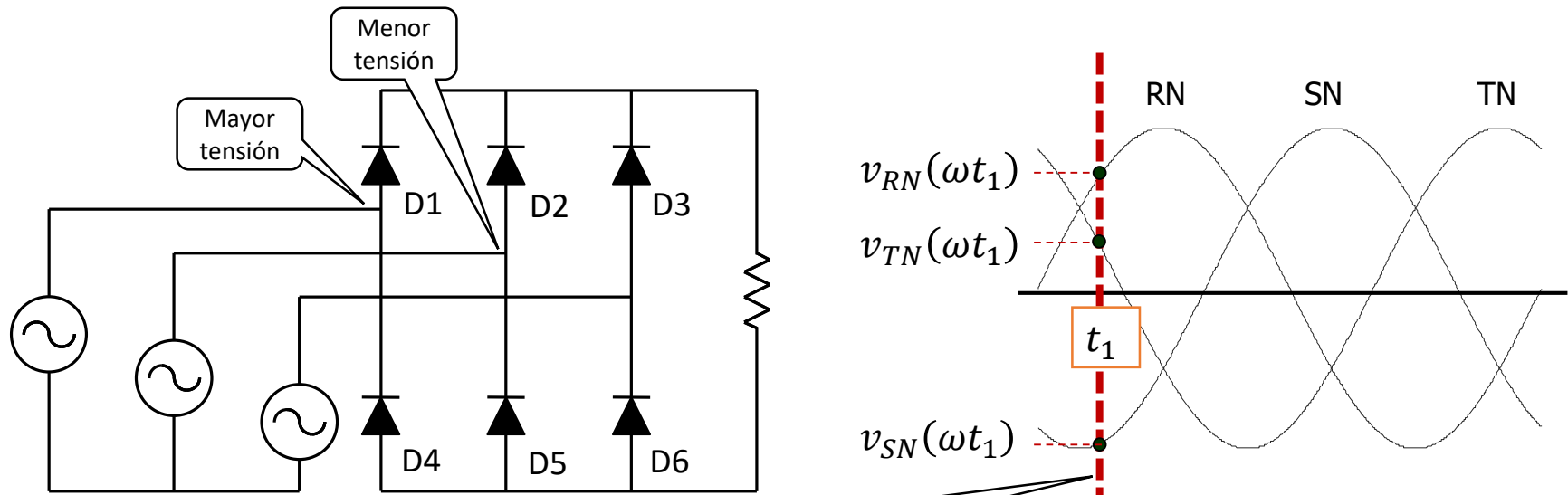
Cada diodo conduce la corriente de carga en su intervalo de conducción

$$I_m = \frac{V_m}{R} \quad I_{Rm} = \frac{V_m}{3R}$$

Este rectificador inyecta continua en la red



Rectificador no controlado onda completa (I)



Para el instante t_1 se cumple:

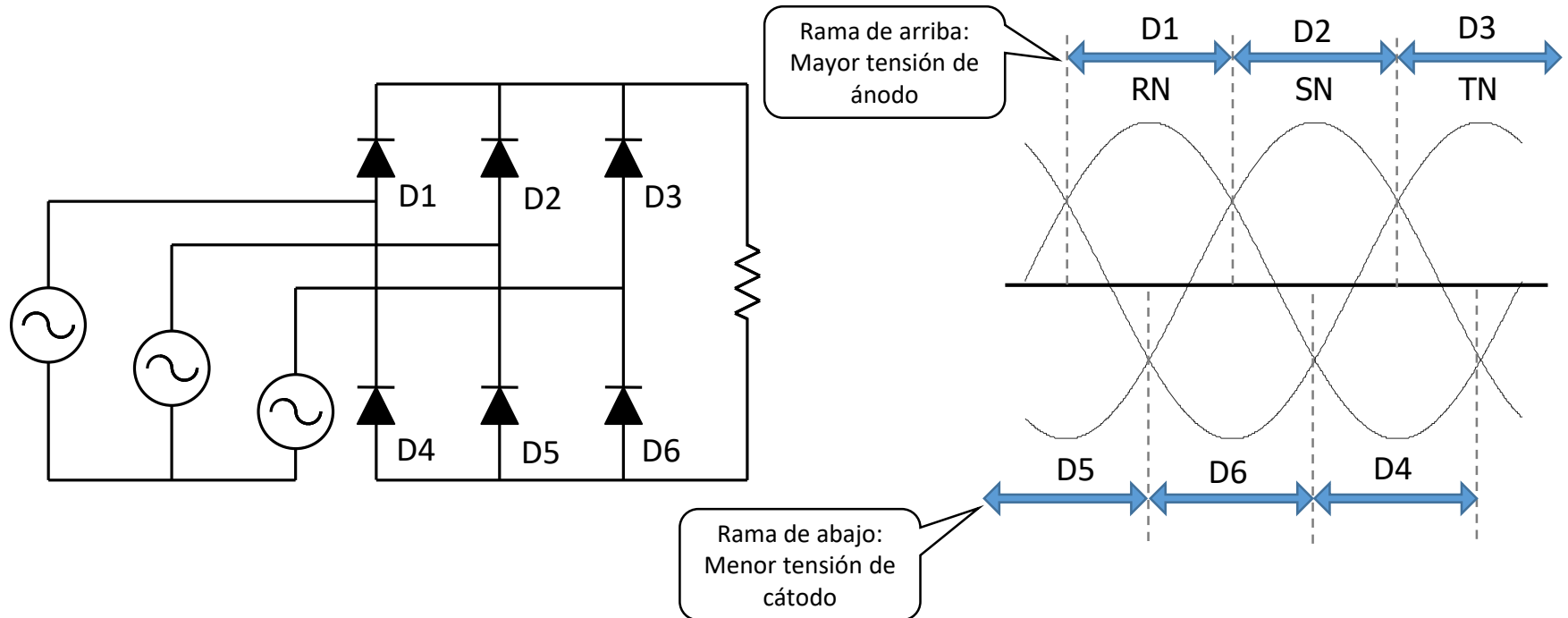
$$v_{RN}(\omega t_1) > v_{TN}(\omega t_1) > v_{SN}(\omega t_1)$$

Los diodos que conducen son:

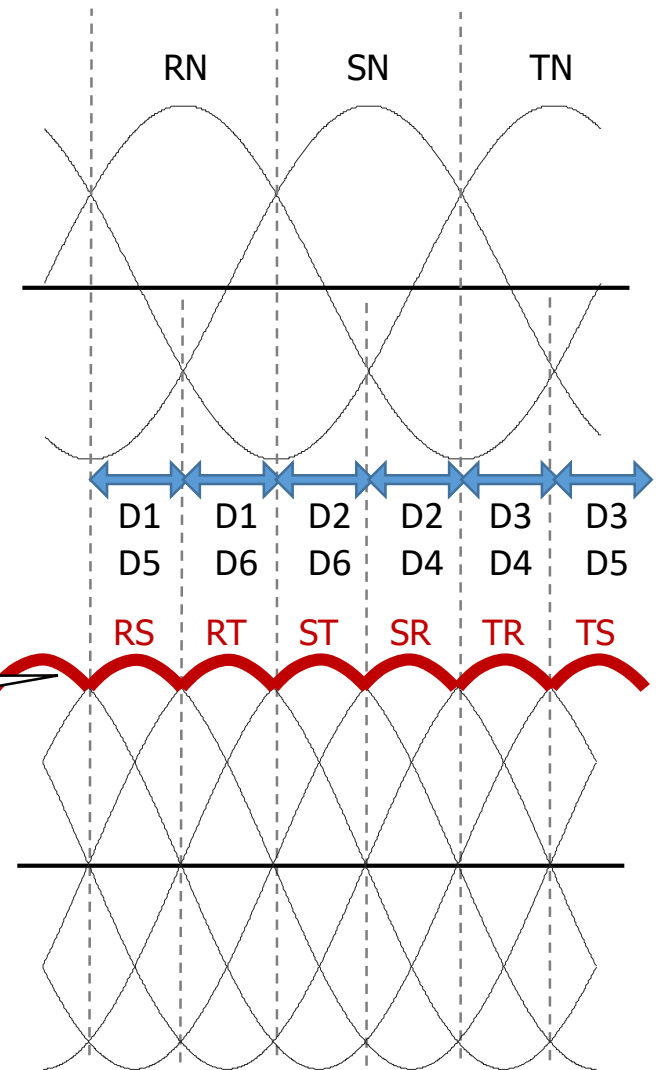
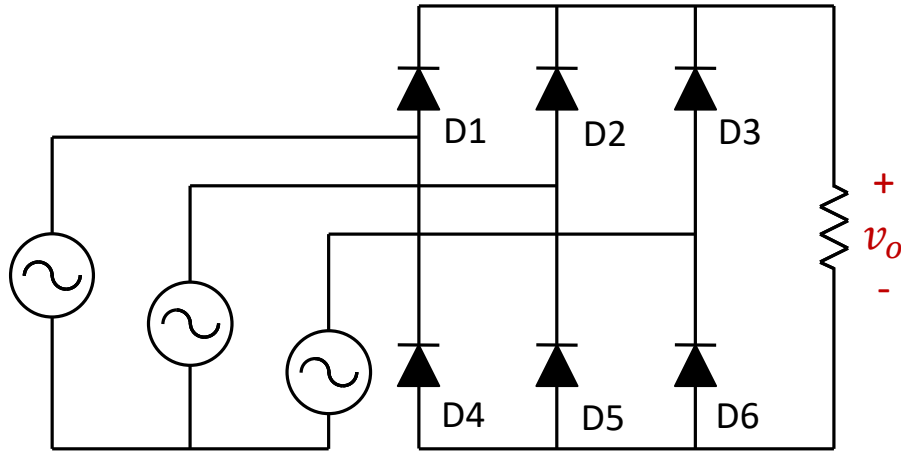
- En la rama de arriba (cátodo común), el diodo que soporta la mayor tensión de ánodo es D1
- En la rama de abajo (ánodo común), el diodo que soporta la menor tensión de cátodo es D5

Conducen
D1 y D5

Rectificador no controlado onda completa (II)

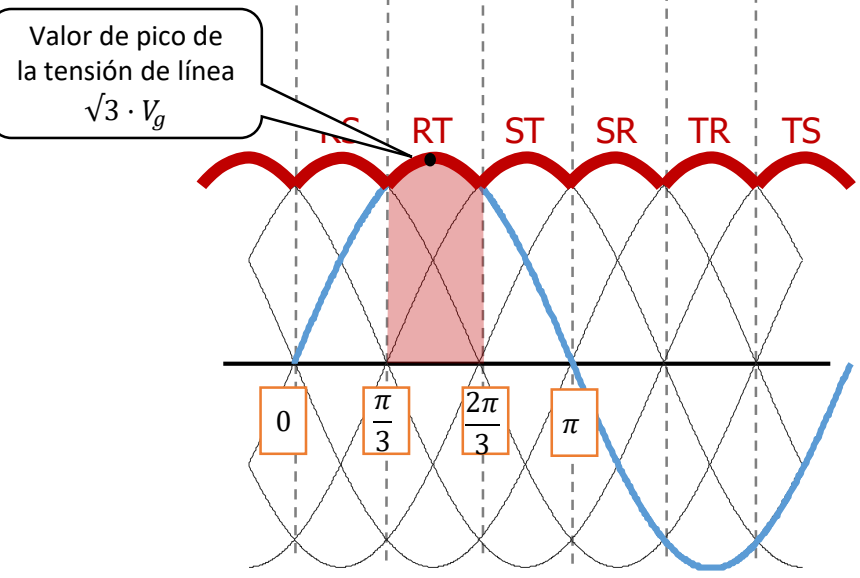
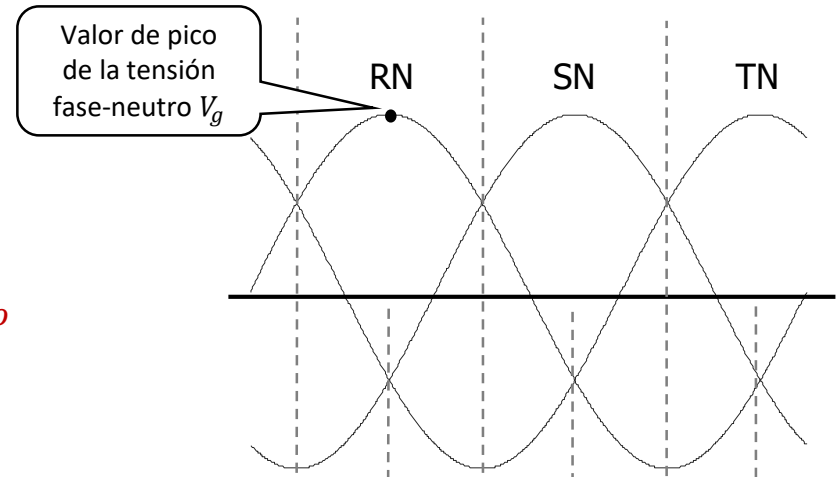
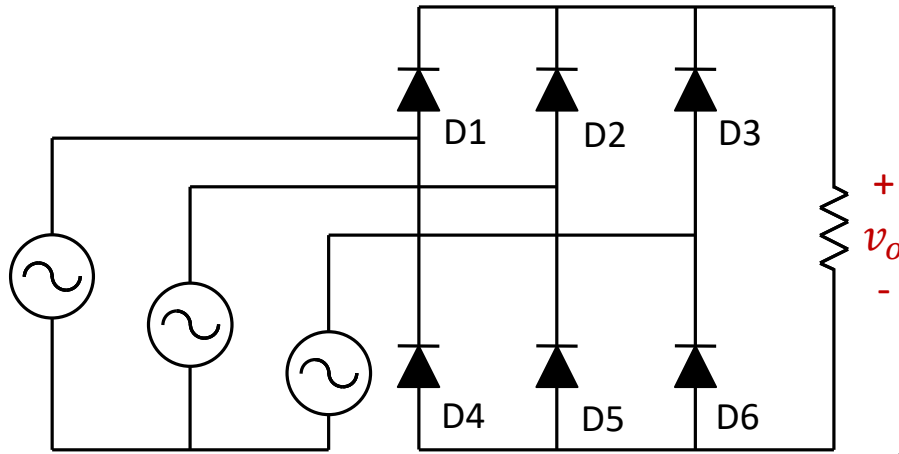


Rectificador no controlado onda completa carga R (I)



La carga ve las tensiones de línea

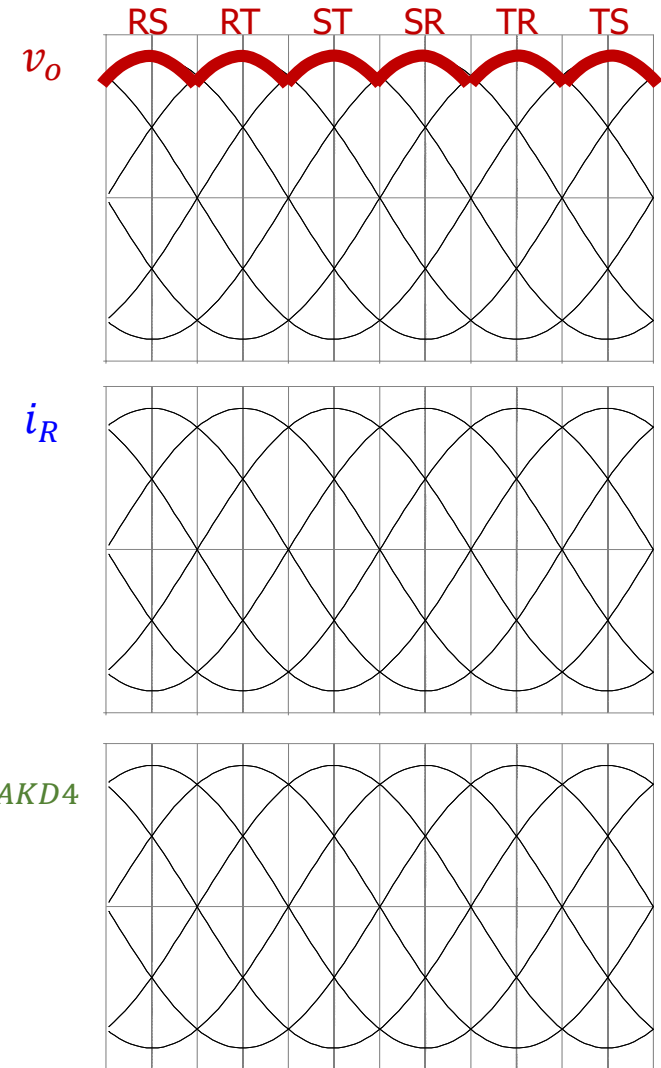
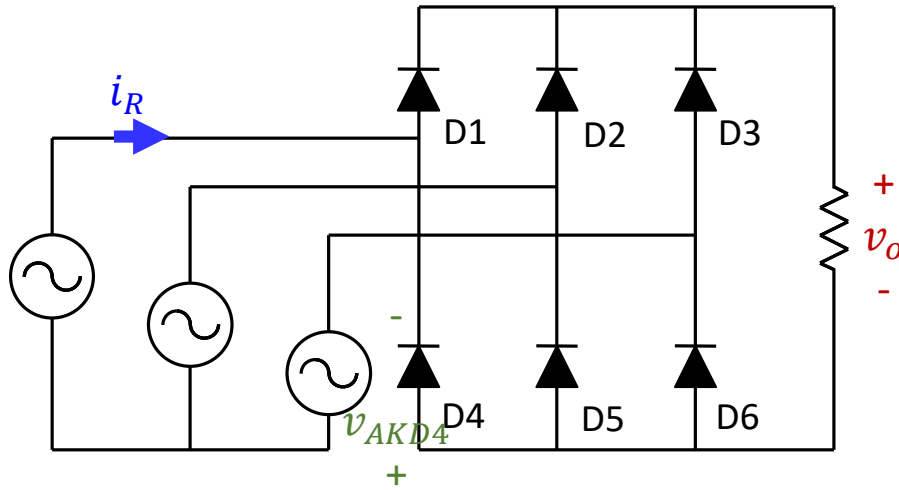
Rectificador no controlado onda completa carga R (II)



Valor medio de la tensión en la carga:

$$\begin{aligned} \overline{v_o} &= \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} v_{línea}(\vartheta) d\vartheta = \\ &= \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{3} \cdot V_g \cdot \text{sen}(\vartheta) d\vartheta = \frac{3\sqrt{3} \cdot V_g}{\pi} \end{aligned}$$

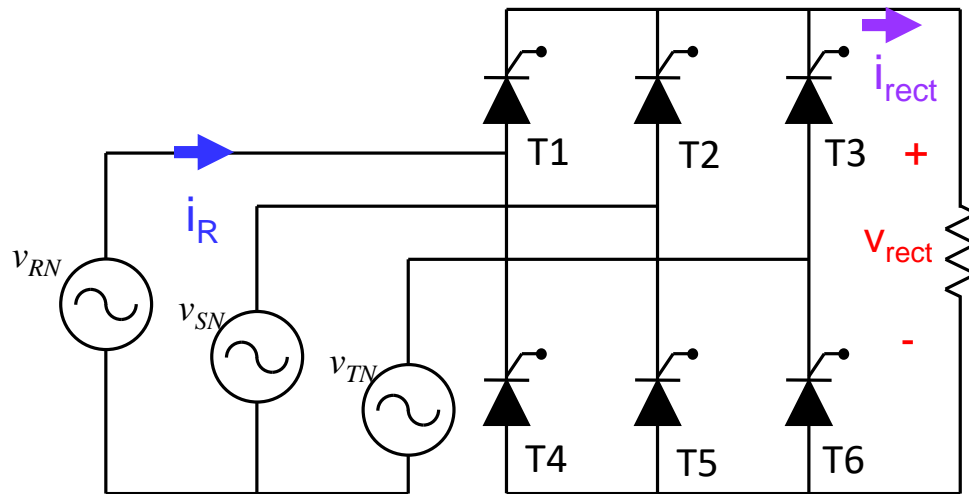
Rectificador no controlado onda completa carga R (III)



Trabajo personal propuesto

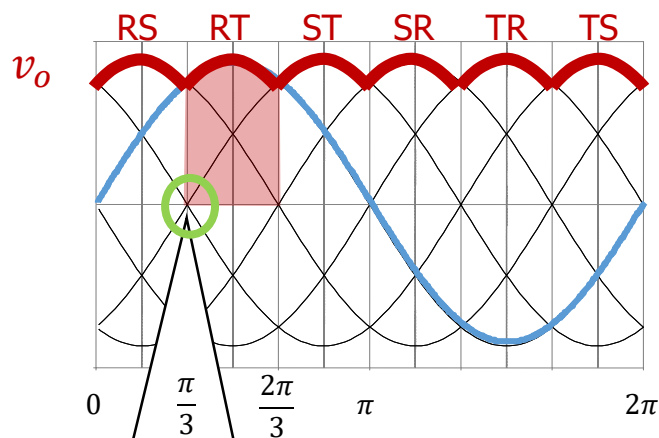
- Representar las formas de onda indicadas
- Calcular el rizado de tensión en la carga
- Calcular el valor eficaz de la tensión en la carga
- Calcular la potencia consumida por la resistencia
- Calcular el valor medio de la corriente por la línea (\bar{i}_R)

Rect. controlado onda completa carga R (I)

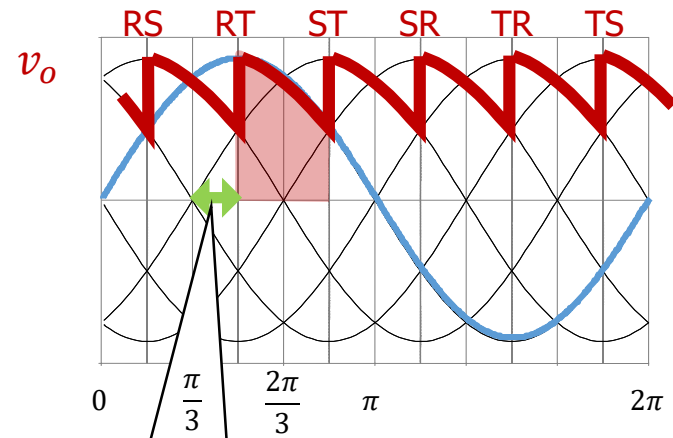


Carga resistiva

El ángulo de disparo $\alpha = 0^\circ$ de un tiristor se corresponde con el instante en el que ese tiristor se polariza en directa ($v_{AK} > 0$) y por tanto es susceptible de conducir



El ángulo de disparo $\alpha = 0^\circ$ se corresponde con una fase $\omega t = \pi/3$

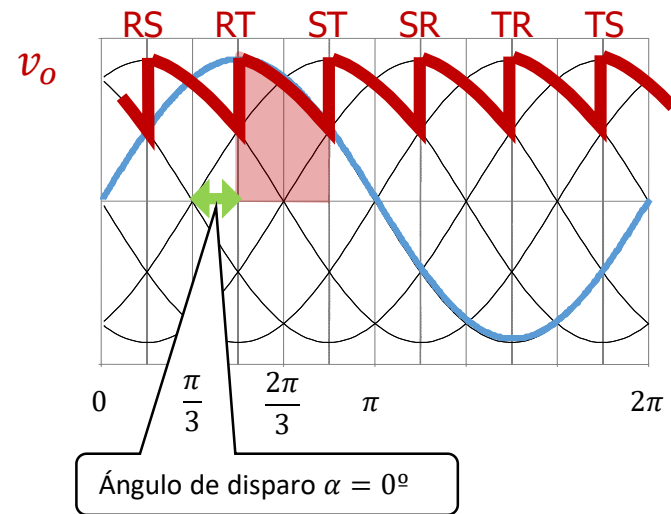
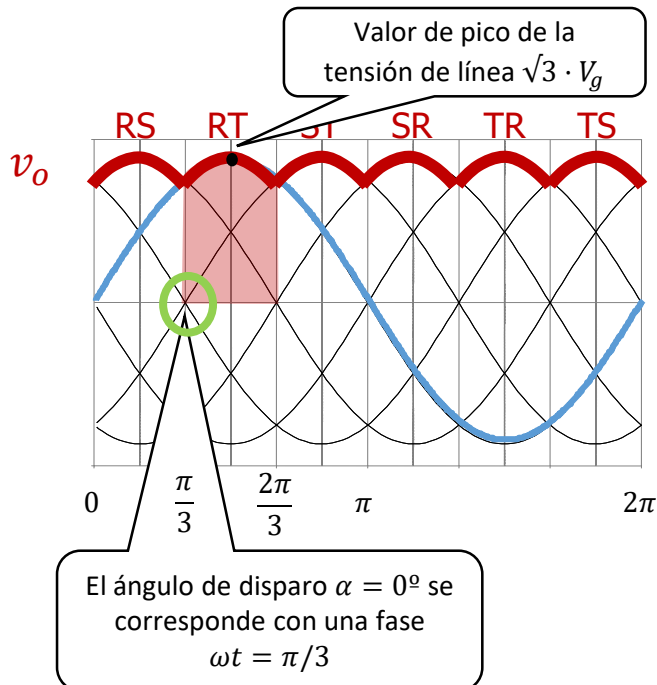


Ángulo de disparo α

Rect. controlado onda completa carga R (II)

Valor medio de la tensión en la carga como una función del ángulo de disparo (válida para formas de onda como las representadas en la figura):

$$\bar{v}_o = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3+\alpha}^{2\pi/3+\alpha} v_{línea}(\vartheta) d\vartheta = \frac{3\sqrt{3} \cdot V_g}{\pi} \cdot \cos(\alpha)$$

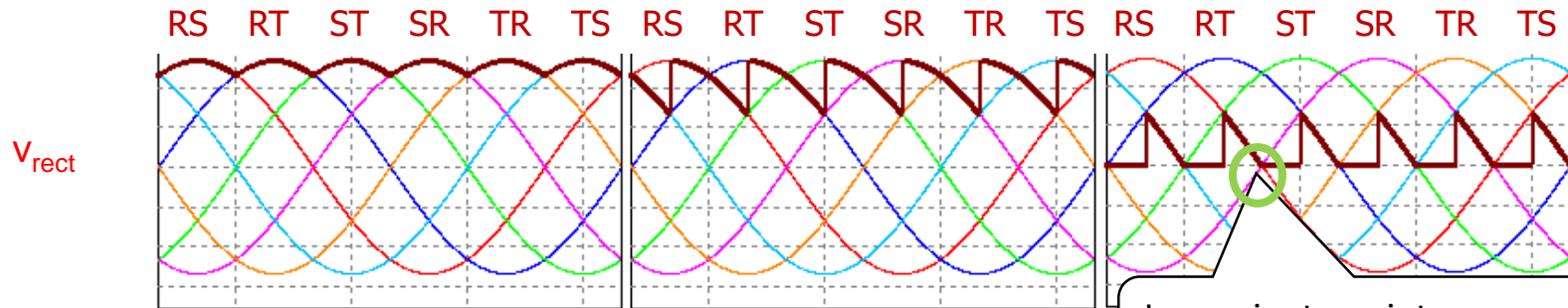


Rect. controlado onda completa carga R (III)

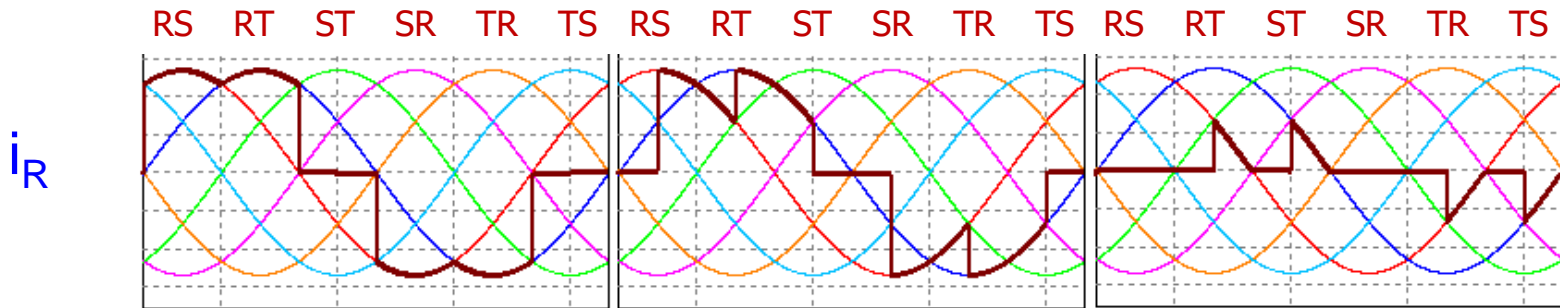
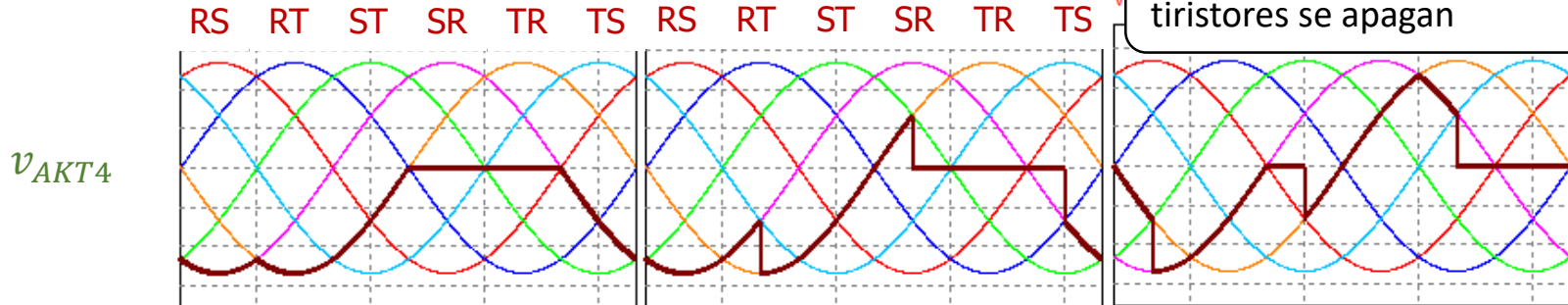
$\alpha = 0^\circ$

$\alpha = 30^\circ$

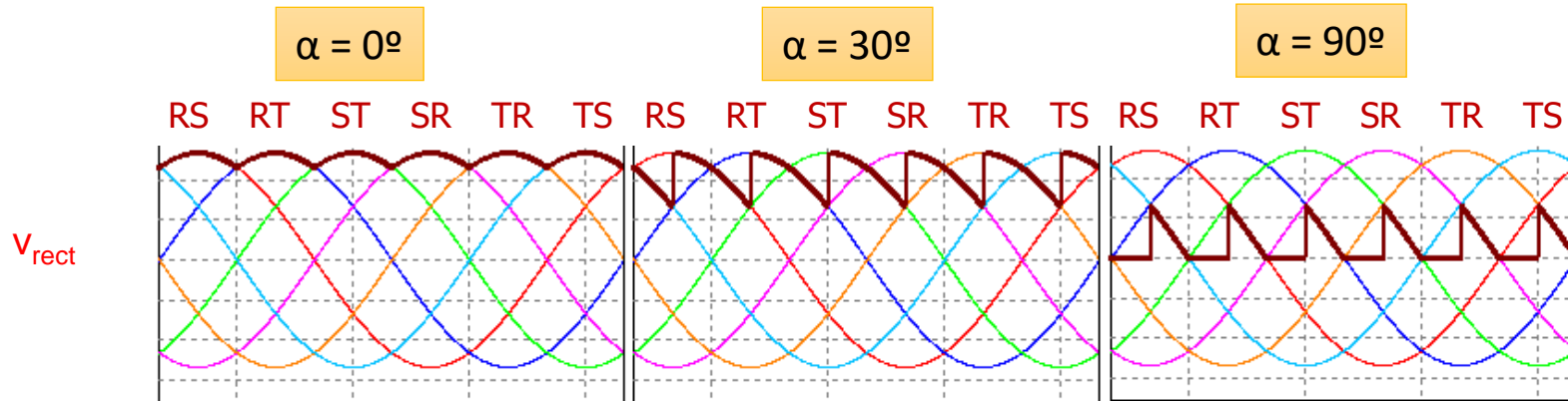
$\alpha = 90^\circ$



La corriente se interrumpe y los tiristores se apagan



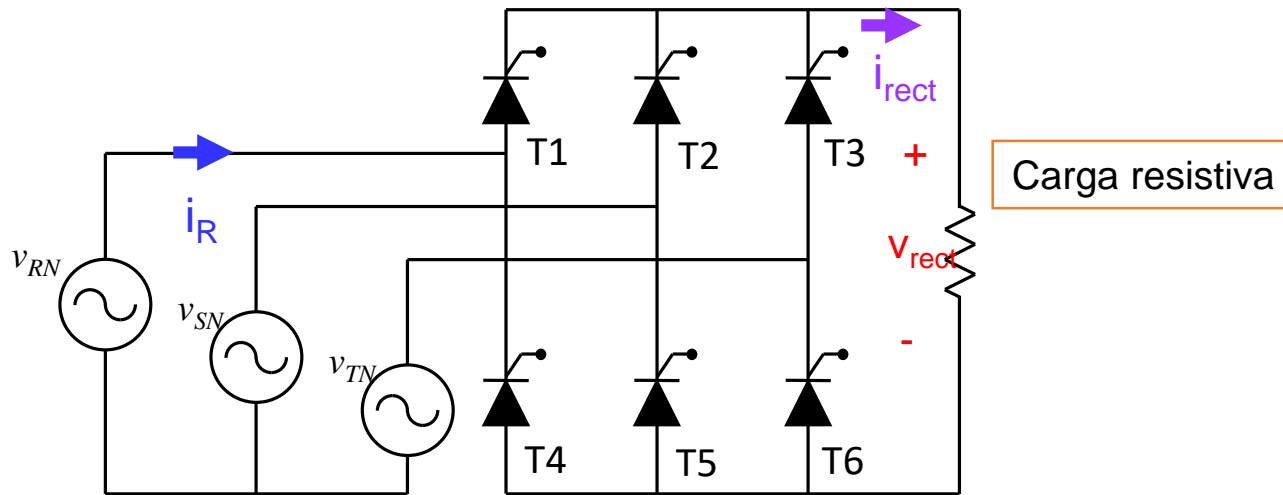
Rect. controlado onda completa carga R (IV)



Trabajo personal propuesto

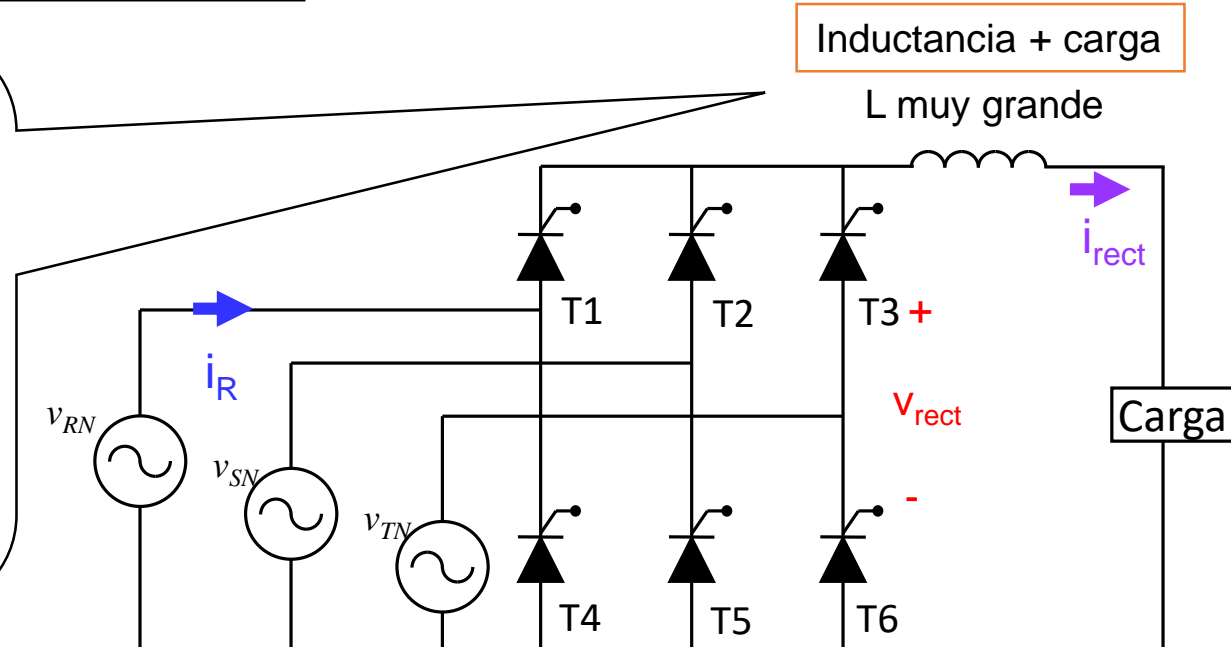
- Indicar qué tiristores están conduciendo en cada caso
- Calcular la tensión media aplicada a la carga para los siguientes ángulos de disparo
 - $0^\circ < \alpha < 60^\circ$
 - $60^\circ < \alpha < 120^\circ$
 - $120^\circ < \alpha$
- Representar en un gráfica del valor de la tensión media aplicada a la carga en función de α

Rectificador trifásico con distintas cargas (I)



Si la inductancia del filtro es suficientemente grande:

- Puede despreciarse el rizado de corriente por la bobina y por tanto la tensión que aparece en la resistencia es continua
- Mismas formas de onda y mismo análisis para carga RLE, LCR y LR

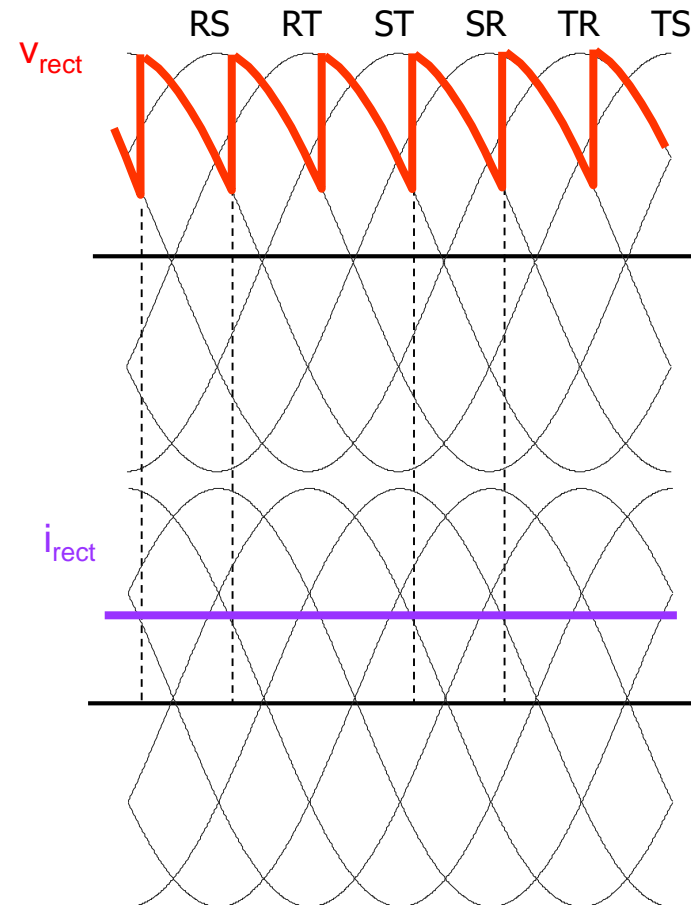
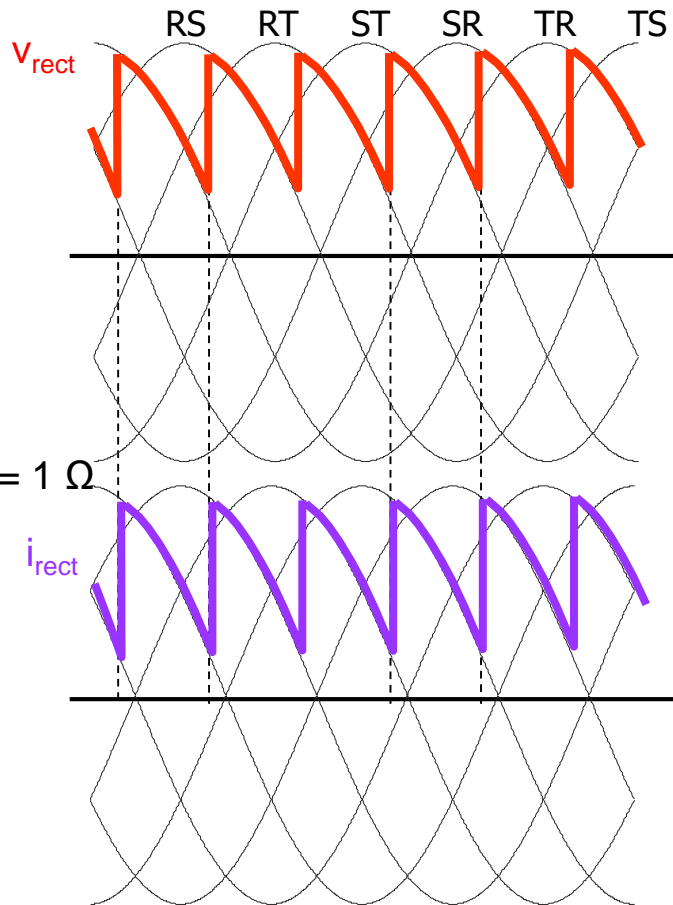


Rectificador trifásico con distintas cargas (II)

Carga resistiva

$\alpha = 45^\circ$

Inductancia + carga

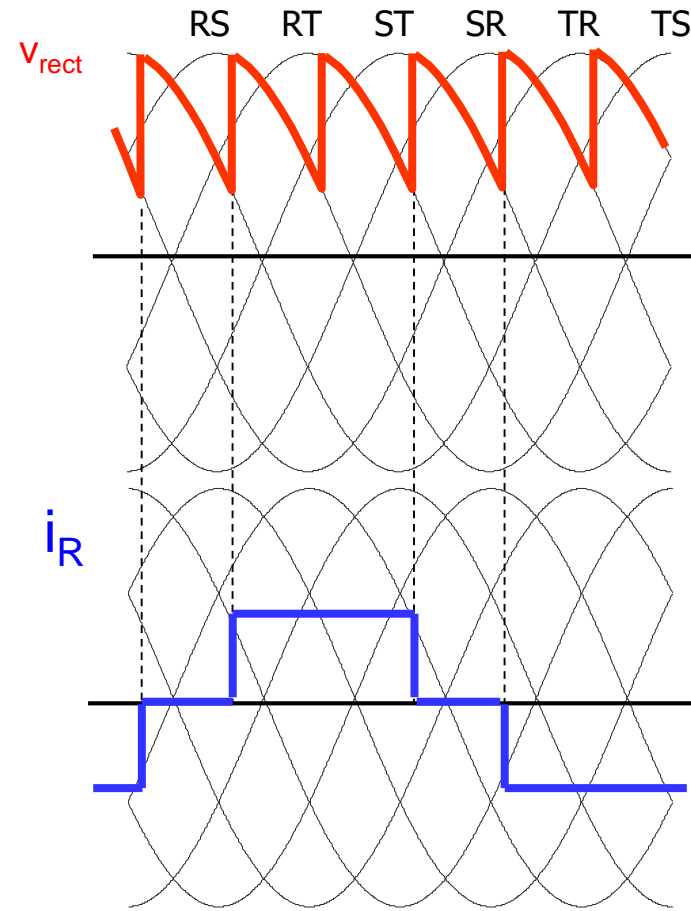
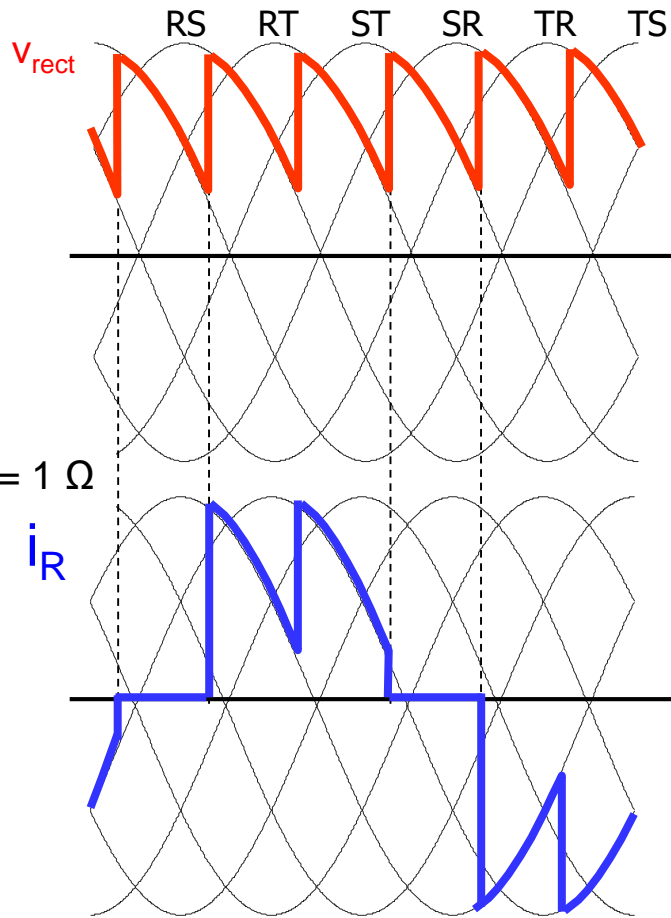


Rectificador trifásico con distintas cargas (III)

Carga resistiva

$\alpha = 45^\circ$

Inductancia + carga

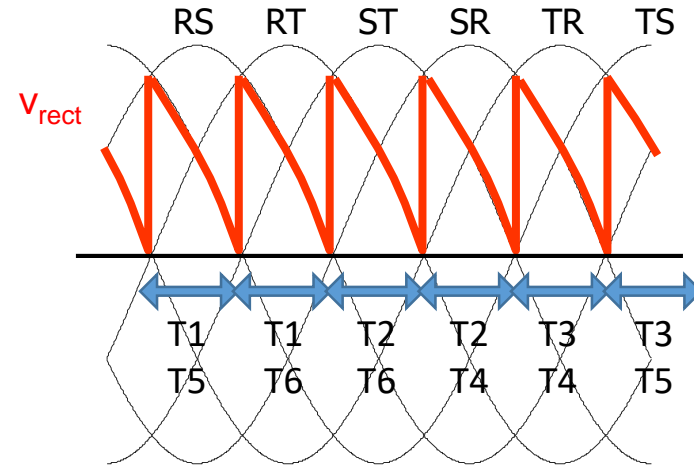
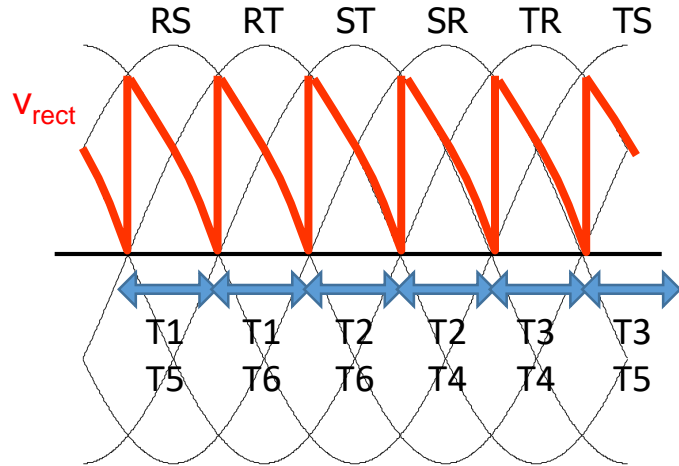


Rectificador trifásico con distintas cargas (IV)

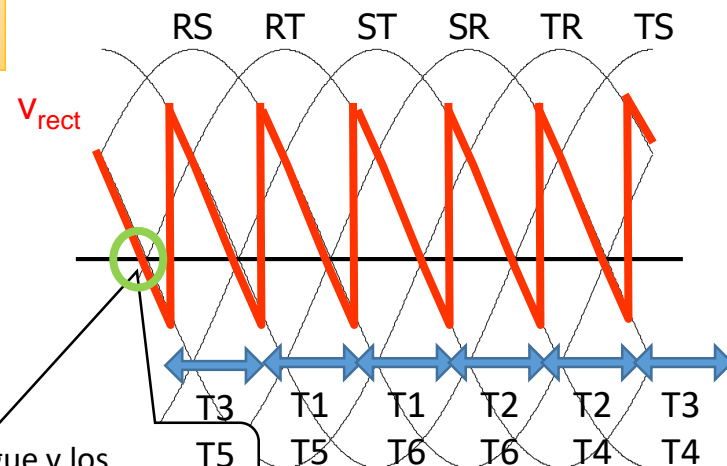
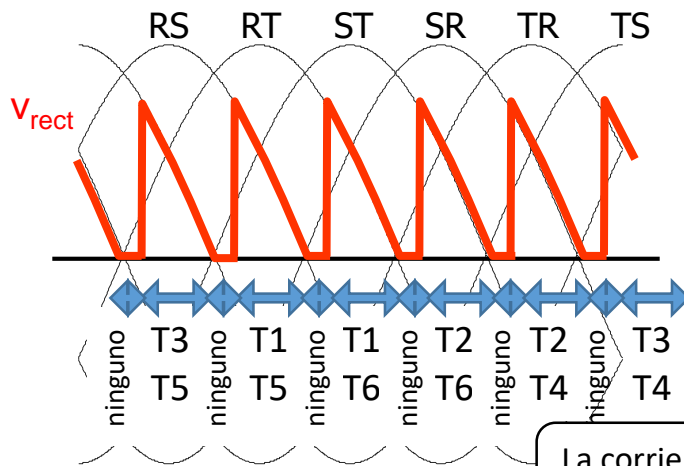
Carga resistiva

$\alpha = 60^\circ$

Inductancia + carga



$\alpha = 75^\circ$



La corriente no se extingue y los tiristores pueden seguir conduciendo

Rectificador trifásico carga altamente inductiva (I)

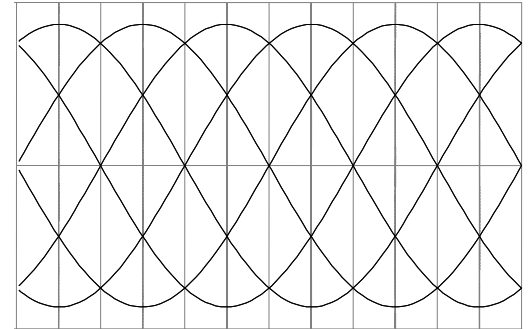
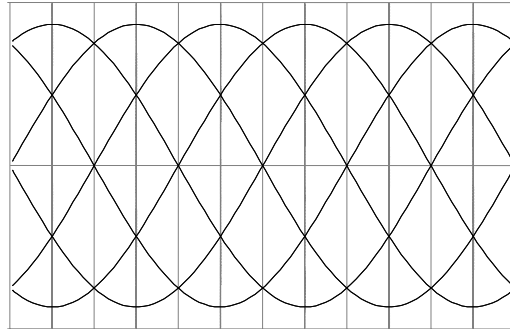
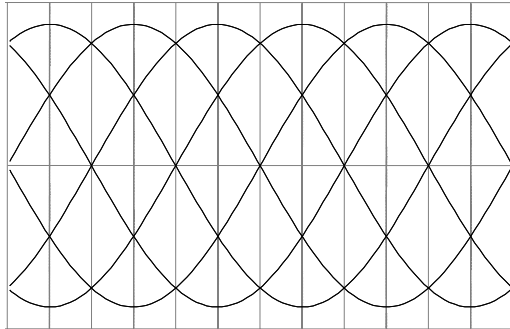
Trabajo personal propuesto

$\alpha = 0^\circ$

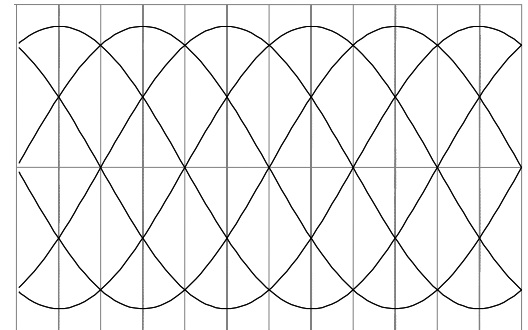
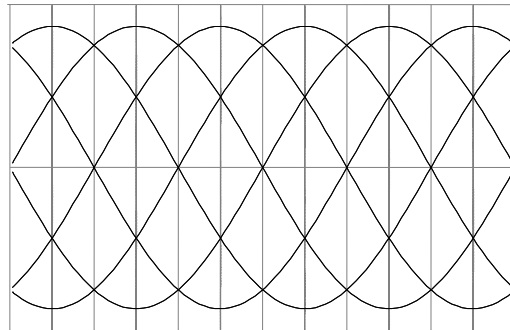
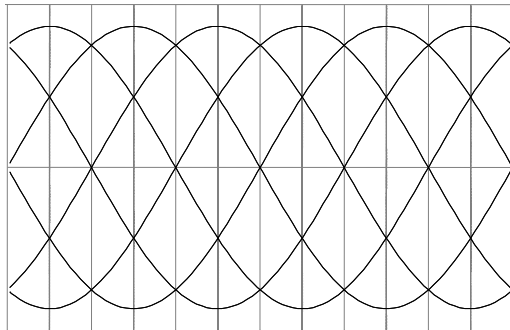
$\alpha = 30^\circ$

$\alpha = 90^\circ$

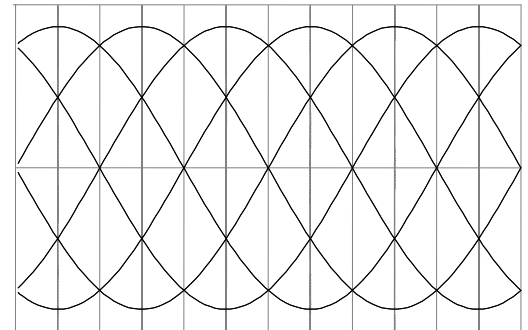
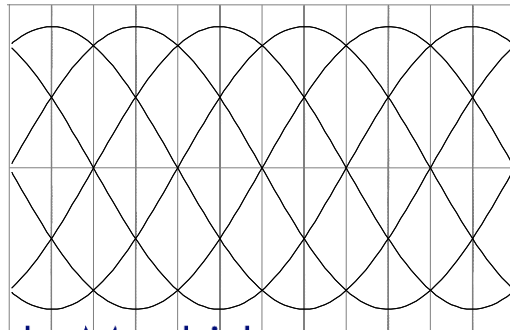
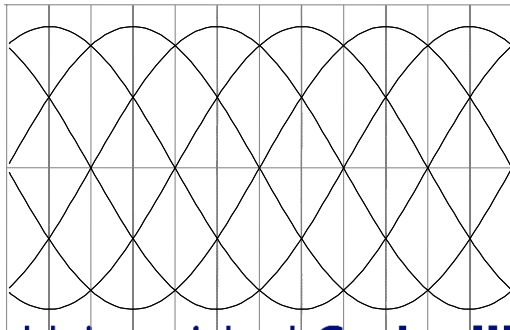
V_{rect}



V_{AKT4}



i_R



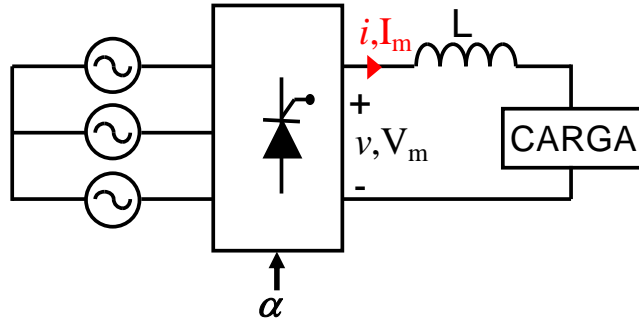
Rectificador trifásico carga altamente inductiva (II)

Trabajo personal propuesto

Suponiendo que una carga con una inductancia tan elevada que puede despreciarse el rizado de corriente por la misma:

- Calcular el valor medio de la tensión a la salida del rectificador
- ¿Cuál es el valor máximo del ángulo de disparo y de qué depende?
- Calcular el factor de potencia visto por el generador en función del ángulo de disparo
- Calcular la distorsión armónica de la corriente de entrada
- Calcular la potencia entregada por la fuente en función del ángulo de disparo:
 - Considerando el consumo de la carga.
 - A partir de las formas de onda de tensión y corriente en el generador.
- Analizar si es posible que la carga entregue potencia a la red, y en qué ángulos de disparo de los tiristores

Concepto de inversor no autónomo

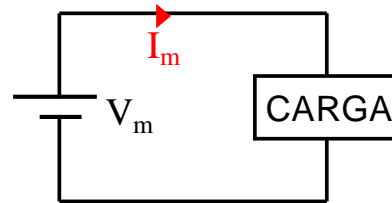


✓ i es SIEMPRE POSITIVA (lo imponen los tiristores)

✓ Debido a L, i prácticamente continua de valor I_m

Considerando criterio generador para la salida del rectificador

✓ Ya que $i = I_m \rightarrow$ sólo produce potencia el valor medio de la tensión aplicada a la carga $\bar{v} = V_m$



$$P_{RED} = P_{RECTIF} = V_m \cdot I_m$$

Si V_m puede ser también negativa \rightarrow el rectificador podrá operar en dos cuadrantes

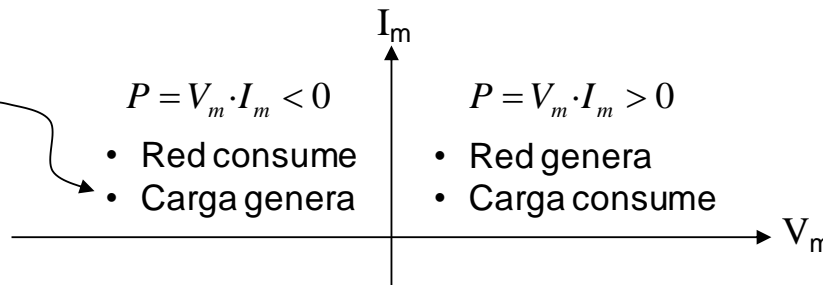
Para operar en este cuadrante en régimen permanente es necesario que la carga sea capaz de generar potencia.

$$P = V_m \cdot I_m < 0$$

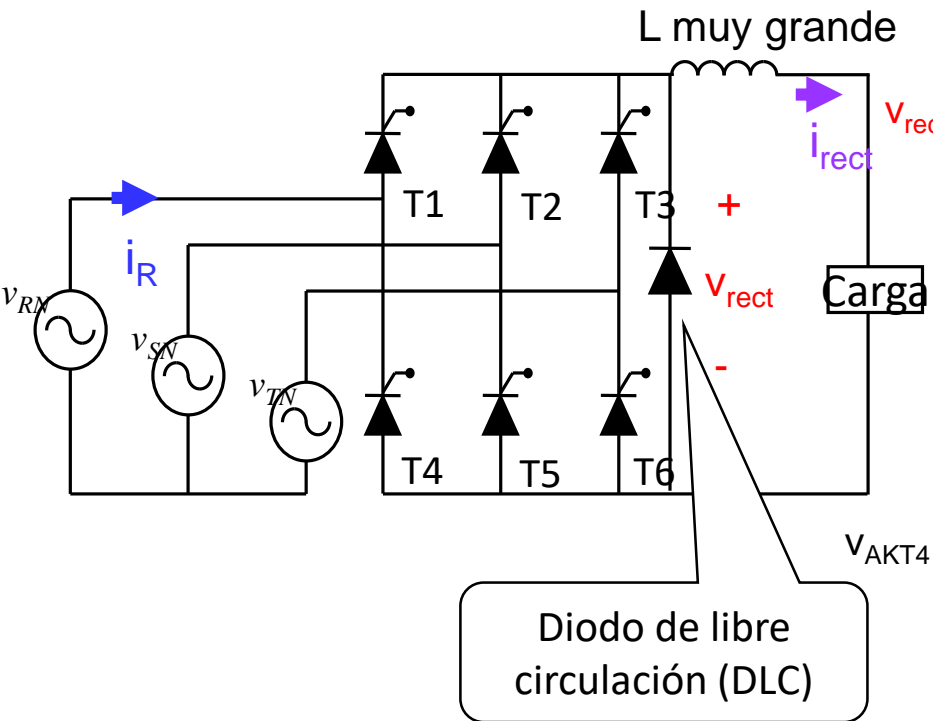
- Red consume
- Carga genera

$$P = V_m \cdot I_m > 0$$

- Red genera
- Carga consume

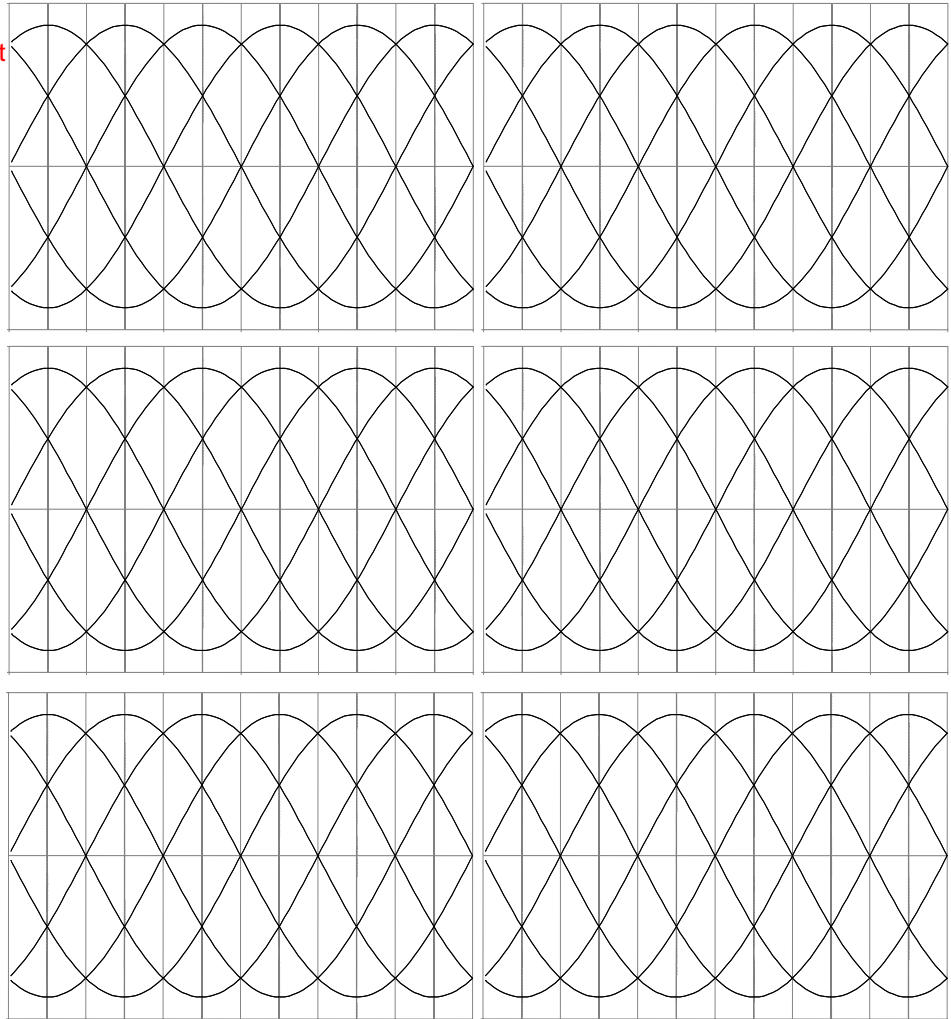


Rectificador trifásico carga altamente inductiva con DLC



$\alpha = 30^\circ$

$\alpha = 90^\circ$



Trabajo personal propuesto

- Representar las formas de onda que se indican suponiendo despreciable el rizado de corriente por la bobina

Rect.trif. controlado: análisis carga inductiva DLC

Trabajo personal propuesto

Sobre el circuito anterior y suponiendo despreciable el rizado en la bobina:

- Calcular el valor medio de la tensión a la salida del rectificador
- Calcular el factor de potencia visto por el generador en función del ángulo de disparo
- Calcular la distorsión armónica de la corriente de entrada
- Calcular la potencia entregada por la fuente en función del ángulo de disparo:
 - Considerando el consumo de la carga.
 - A partir de las formas de onda de tensión y corriente en el generador.
- Analizar si es posible que la carga entregue potencia a la red, y en qué ángulos de disparo de los tiristores