

**Normas de examen**

- El alumno debe dejar bien visible sobre la mesa una identificación válida (carné de la escuela, DNI...).
- No se pueden usar libros ni apuntes y, por tanto, una vez empezado el examen, no deben quedar a la vista.
- Se pueden usar calculadora y material de dibujo. No está permitido compartir las herramientas de cálculo.
- Los ejercicios han de realizarse en orden y se recogerán al finalizar el tiempo asignado a cada uno de ellos.
- No se admitirán soluciones hechas a lápiz. La tinta roja sólo podrá usarse para las gráficas.

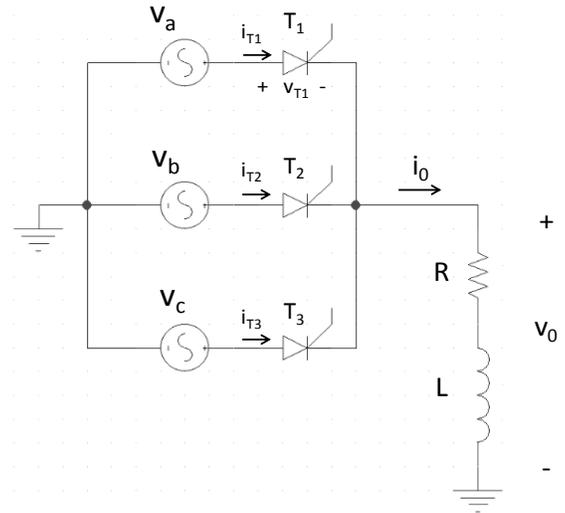
**Ejercicio 1**

(3 puntos, 40 minutos)

En el rectificador trifásico controlado de la figura la inductancia es lo suficientemente grande para considerar que la corriente  $i_0$  en régimen permanente es constante.

Se pide determinar de forma razonada y justificada, representando las formas de onda en la plantilla adjunta:

1. Forma de onda de la tensión  $v_0$  y su valor medio,  $\bar{V}_0$ .
2. Formas de onda de la corriente a través de cada tiristor ( $i_{T1}$ ,  $i_{T2}$  e  $i_{T3}$ ) y su valor medio.
3. La potencia media disipada en cada tiristor suponiendo que las corrientes son las obtenidas en el apartado anterior.
4. El rendimiento del rectificador  $\eta = V_0 I_0 / V_{0\text{ RMS}} I_{0\text{ RMS}}$ .
5. Forma de onda de la tensión ánodo-cátodo del tiristor  $T_1$ ,  $v_{T1}$ , y sus valores máximos en bloqueo directo e inverso.



**Nota:** Considere que los tiristores son ideales salvo en el apartado 3, en el que cada tiristor puede modelarse con  $V_T = 1,5\text{ V}$  y  $r_T = 1\ \Omega$ .

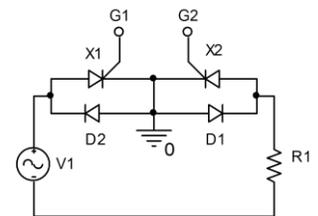
**Datos:**  $\alpha = 60^\circ$ ;  $f = 50\text{ Hz}$ ;  $R = 10\ \Omega$ ;  $v_a(t) = 325 \sin(\omega t)\text{ V}$

**Ejercicio 2**

(3 puntos, 40 minutos)

Para el convertidor con carga resistiva de la figura adjunta:

1. Dibuje los circuitos equivalentes para cada una de las fases por las que evoluciona el convertidor a lo largo de un ciclo.
2. Dibuje las formas de onda de  $u_{R1}$ ,  $i_{R1}$ ,  $u_{X2}$ ,  $i_{X2}$ ,  $u_{D2}$  e  $i_{D2}$  durante al menos 40 ms para un ángulo de disparo  $\alpha = 2\pi/3\text{ rad}$ . Indique en todas las gráficas los valores más significativos.
3. Deduzca la expresión que da la tensión eficaz de salida sobre la carga,  $U_L$ , en función del ángulo de disparo,  $U_L = f(\alpha)$ .
4. Calcule la corriente eficaz máxima que deben soportar los semiconductores para cualquier ángulo de disparo.



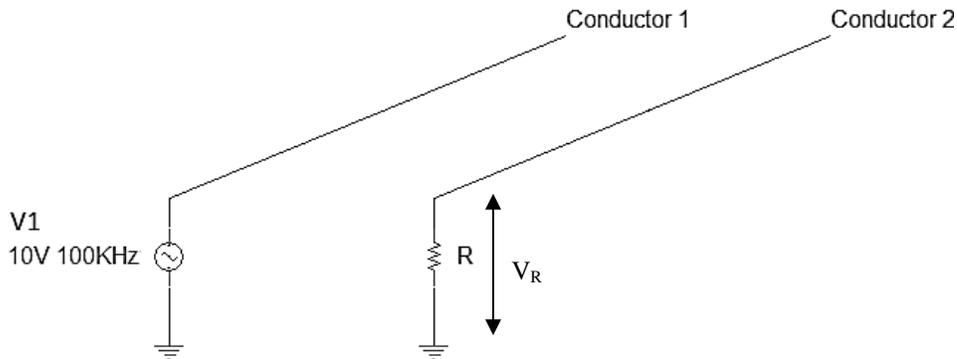
**Datos:**  $R_1 = 8,8\ \Omega$ ;  $U_{\text{red}} = 220\text{ V}$ ;  $f = 50\text{ Hz}$

**Ejercicio 3**

(2 puntos, 20 minutos)

Dada la figura adjunta, responda a las siguientes cuestiones:

1. ¿Cuál es el tipo de interferencia o acoplamiento presente?
2. ¿A qué valor máximo (independiente de la frecuencia) podemos aproximar la señal de ruido (dada por el voltaje  $V_R$ ) en el conductor 2?
3. ¿Qué soluciones podrían reducir el acoplamiento presente?



**Datos:** Capacitancias parásitas

$C_{1T} = 150$  pF (conductor 1-tierra)

$C_{2T} = 150$  pF (conductor 2-tierra)

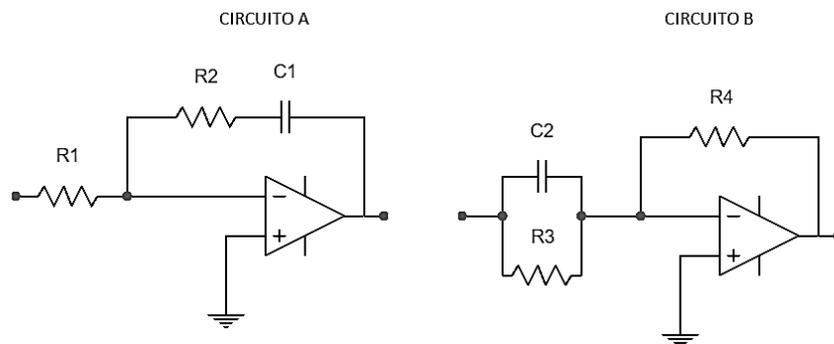
$C_{12} = 50$  pF (conductor 1-conductor 2)

**Ejercicio 4**

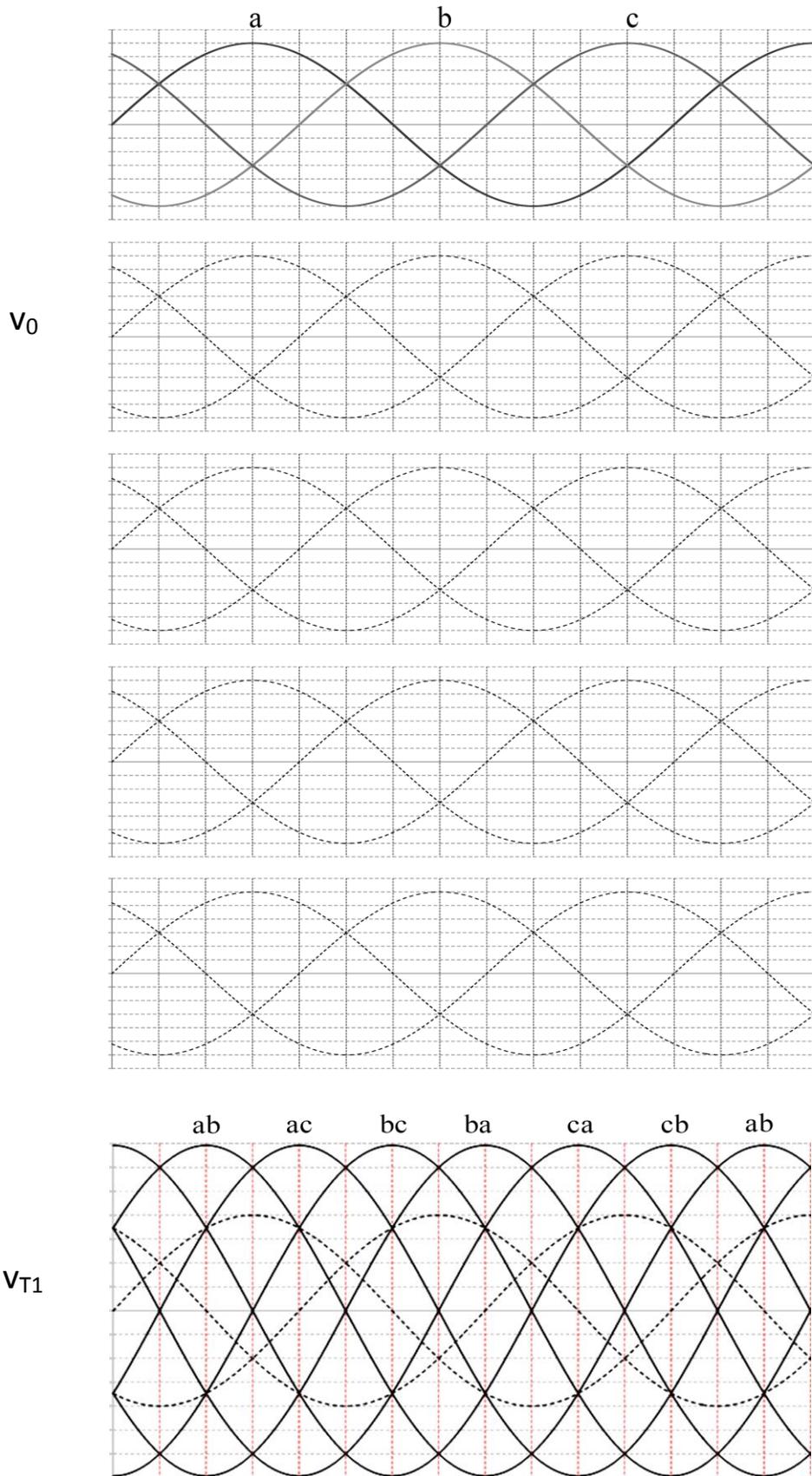
(2 puntos, 25 minutos)

Dados los circuitos A y B de la figura adjunta, se pide:

1. ¿Qué tipo de regulador (PD, PI, PID) implementa cada circuito? Obtenga de forma razonada las funciones de transferencia de cada circuito regulador.
2. Indique el valor de los parámetros  $k$ ,  $T_v$  (regulador PD) y  $T_n$  (regulador PI) en función de los componentes de los circuitos A y B para cada regulador.
3. ¿Cómo podría implementar un regulador PID a partir de los circuitos A y B? Obtenga de forma razonada la función de transferencia del regulador PID e identifique los parámetros  $k$ ,  $T_v$  y  $T_n$  del mismo.

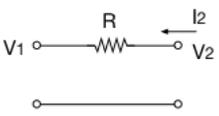
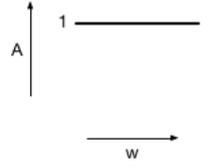
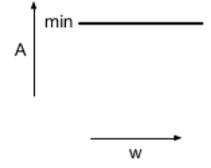
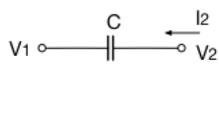
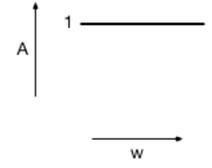
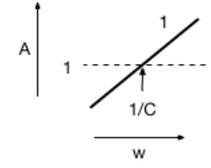
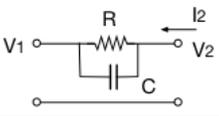
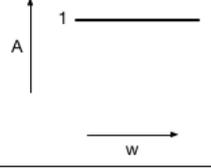
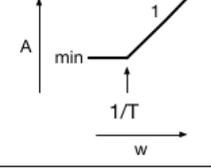
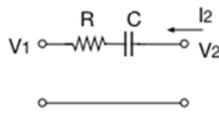
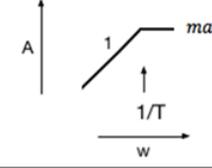
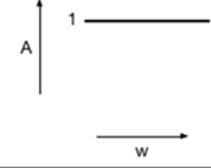
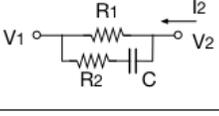
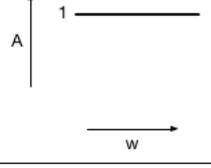
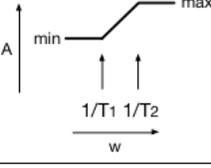
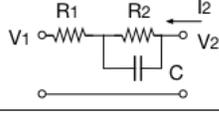
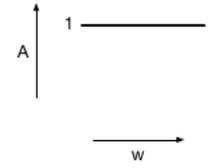
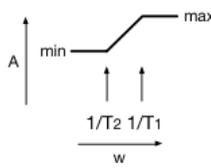
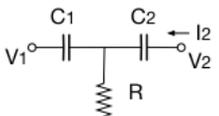
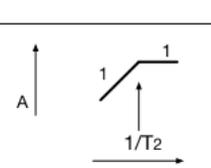
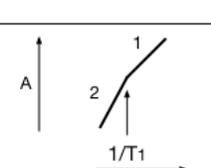
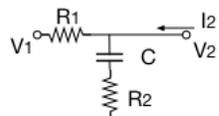
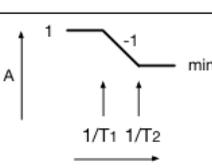
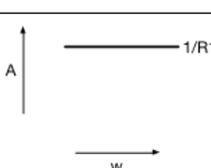


Nombre y apellidos:





Anexo 1: Tablas de cuadripolos pasivos

<p><b>Cuadripolo 1</b></p> 	<p>A</p> <p>1</p>	<p>Y</p> <p><math>-\frac{1}{R}</math></p>
<p><math>min = \frac{1}{R}</math></p> 		
<p><b>Cuadripolo 2</b></p> 	<p>A</p> <p>1</p>	<p>Y</p> <p><math>-sC</math></p>
		
<p><b>Cuadripolo 5</b></p> 	<p>A</p> <p>1</p>	<p>Y</p> <p><math>-\frac{1+s \cdot T}{R}</math></p>
<p><math>T = RC</math></p> <p><math>min = \frac{1}{R}</math></p> 		
<p><b>Cuadripolo 6</b></p> 	<p>Y</p> <p><math>-\frac{sC}{1+s \cdot T}</math></p>	<p>A</p> <p>1</p>
<p><math>T = RC</math></p> <p><math>max = \frac{1}{R}</math></p> 		
<p><b>Cuadripolo 7</b></p> 	<p>A</p> <p>1</p>	<p>Y</p> <p><math>-\frac{1+s \cdot T_1}{R1(1+s \cdot T_2)}</math></p>
<p><math>T1 = (R1 + R2)C</math></p> <p><math>T2 = R2C</math></p> <p><math>max = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}</math></p> <p><math>min = \frac{1}{R1}</math></p> 		
<p><b>Cuadripolo 9</b></p> 	<p>A</p> <p>1</p>	<p>Y</p> <p><math>\frac{-(1+s \cdot T_2)}{(R1 + R2)(1+s \cdot T_1)}</math></p>
<p><math>T1 = \frac{R1R2C}{R1 + R2}</math></p> <p><math>T2 = R2C</math></p> <p><math>min = \frac{1}{R1 + R2}</math></p> <p><math>max = \frac{1}{R1}</math></p> 		
<p><b>Cuadripolo 12</b></p> 	<p>A</p> <p><math>\frac{s \cdot T_2}{1+s \cdot T_2}</math></p>	<p>Y</p> <p><math>-\frac{s^2 RC_1 C_2}{1+s \cdot T_1}</math></p>
<p><math>T1 = R(C1 + C2)</math></p> <p><math>T2 = RC1</math></p> 		
<p><b>Cuadripolo 15</b></p> 	<p>A</p> <p><math>\frac{1+s \cdot T_2}{1+s \cdot T_1}</math></p>	<p>Y</p> <p><math>-\frac{1}{R1}</math></p>
<p><math>T1 = (R1 + R2)C</math></p> <p><math>T2 = R2C</math></p> <p><math>min = \frac{R2}{R1 + R2}</math></p> 		

A= Ganancia de tensión en circuito abierto; Y= Admitancia de transferencia en cortocircuito

Ejercicio 1

(3 puntos, 30 minutos)

$$1. \quad V_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_0 \, dwt = 3 \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/2}^{7\pi/6} 325 \sin wt \, dwt$$

$$\boxed{V_0 = \frac{3 \cdot 325}{2\pi} \left[ -\cos wt \right]_{\pi/2}^{7\pi/6} = \frac{3 \cdot 325}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 134,4 \text{ V}}$$

2. CADA TIRISTOR CONDUCE  $120^\circ$  (VER GRÁFICAS)

$$I_0 = \frac{V_0}{R} = 13,44 \text{ A}$$

EL VALOR MEDIO DE LA CORRIENTE A TRAVÉS DE CADA TIRISTOR ES IGUAL A:

$$\boxed{I_T = \frac{1}{3} I_0 = 4,48 \text{ A}}$$

$$3. \quad P_T = V_T \cdot I_T + r_T \cdot I_{T,RMS}^2$$

$$I_{T,RMS}^2 = \frac{I_0^2}{3} = \frac{13,44^2}{3} = 60,2 \text{ A}^2$$

$$\boxed{P_T = 1,5 \cdot 4,48 + 1 \cdot 60,2 \approx 66,9 \text{ W}}$$

4. COMO  $I_0 = I_{0,RMS}$ :

$$\eta = \frac{V_0}{V_{0,RMS}}$$

$$V_{0,RMS}^2 = 3 \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/2}^{7\pi/6} 325^2 \sin^2 wt \, dwt$$

$$= \frac{3 \cdot 325^2}{2\pi} \int_{\pi/2}^{7\pi/6} \left( \frac{1 - \cos 2wt}{2} \right) dwt$$

$$= \frac{3 \cdot 325^2}{4\pi} \left[ wt - \frac{\sin 2wt}{2} \right]_{\pi/2}^{7\pi/6} \approx 41889 \text{ V}^2$$

$$\Rightarrow \boxed{V_{0,RMS} \approx 204,7 \text{ V}} \Rightarrow \boxed{\eta \approx \frac{134,4}{204,7} = 65,7 \%}$$

5. CUANDO EL TIRISTOR T1 ESTÁ CONDUciendo:

$$V_{T1} = 0$$

CUANDO EL TIRISTOR T1 ESTÁ BLOQUEADO:

$$V_{T1} = V_a - V_b = V_{ab} \quad \text{CUANDO CONDUCE T2}$$

$$V_{T1} = V_a - V_c = V_{ac} \quad \text{CUANDO CONDUCE T3}$$

OBSERVANDO LA GRÁFICA DE  $V_{T1}$ :

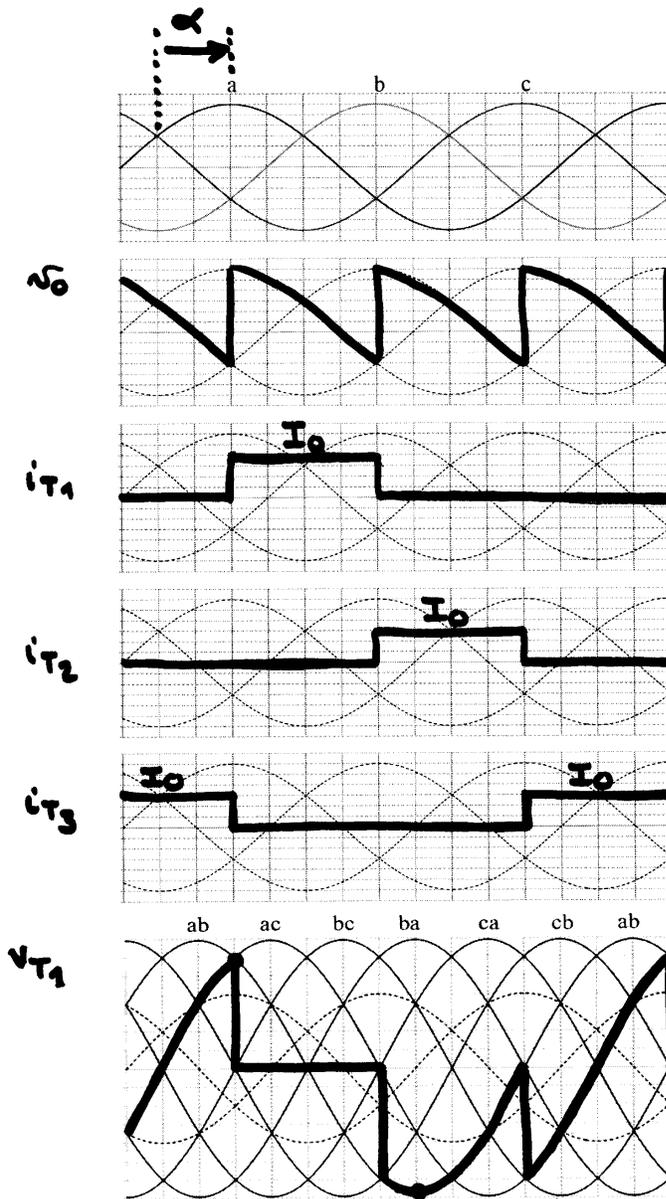
LA MÁXIMA TENSión POSITIVA (BLOQUEO DIRECTO) SE ALCANZA EN LA INTERSECCIÓN DE LAS TENSIONES DE LÍNEA:

$$V_{T1} = \sqrt{3} \cdot 325 \cdot \sin 60^\circ \approx 487,5 \text{ V}$$

LA MÁXIMA TENSión NEGATIVA (BLOQUEO INVERSO) SE ALCANZA EN EL PICO DE LA TENSión DE LÍNEA:

$$V_{T1} = -\sqrt{3} \cdot 325 \approx -562,9 \text{ V}$$

Nombre:

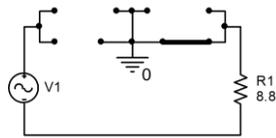


**Ejercicio 2**

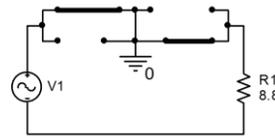
(3 puntos, 30 minutos)

1. Los circuitos equivalentes son:

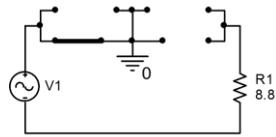
$$0 \leq \theta < \alpha$$



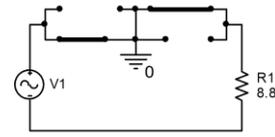
$$\alpha \leq \theta < \pi$$



$$\pi \leq \theta < \pi + \alpha$$

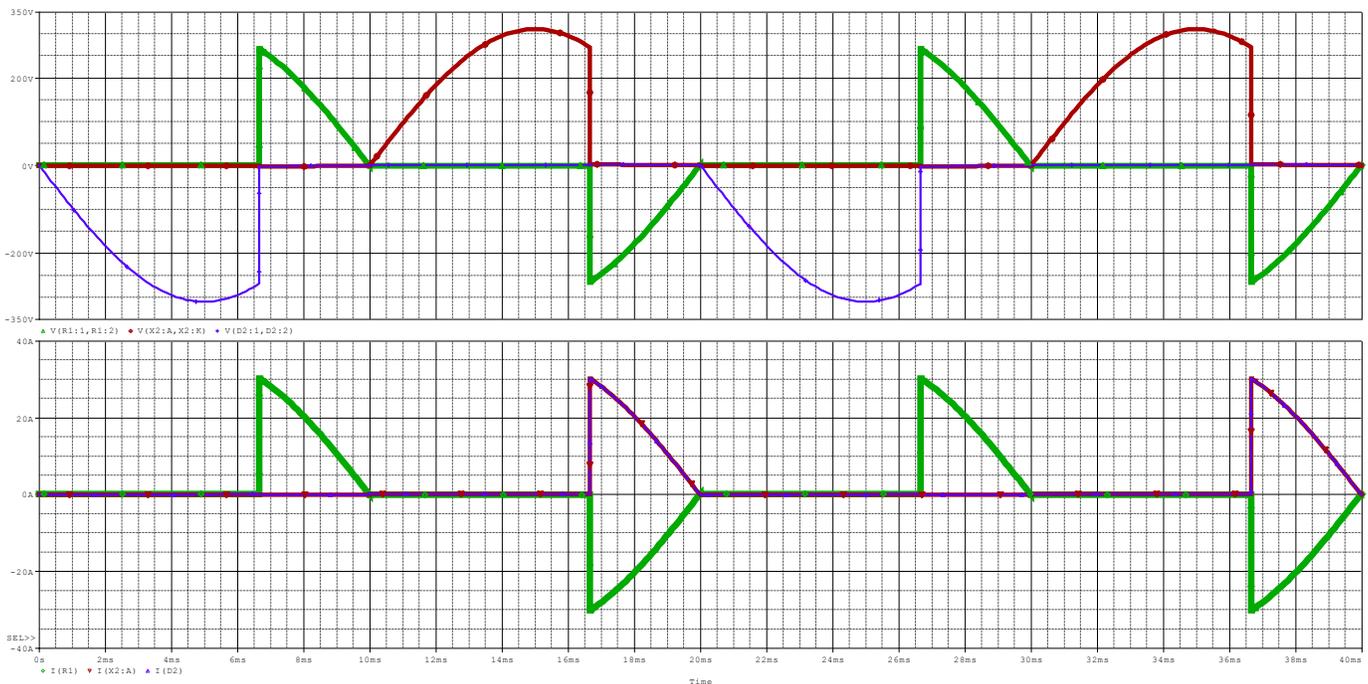


$$\pi + \alpha \leq \theta < 2\pi$$



2. FF.OO. de  $u_{R1}$ ,  $i_{R1}$ ,  $u_{X2}$ ,  $i_{X2}$ ,  $u_{D2}$  e  $i_{D2}$  durante al menos 40 ms para un ángulo de disparo  $\alpha = 2\pi/3$  rad:

$$\hat{U}_F = \sqrt{2}U_F = 311 \text{ V}; u_{R1}(\alpha^+) = \hat{U}_F \sin \alpha = 269,444 \text{ V}; i_{R1}(\alpha^+) = \hat{U}_F/R_1 \sin \alpha = 30,619 \text{ A}$$



3. Tensión eficaz de salida sobre la carga,  $U_L = f(\alpha)$ :

$$U_L^2(\alpha) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_L^2(\theta) d\theta = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_L^2(\theta) d\theta = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\hat{U}_F \sin \theta)^2 d\theta = \frac{\hat{U}_F^2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sin \theta)^2 d\theta = \frac{\hat{U}_F^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} 1 - \cos 2\theta d\theta$$

$$U_L^2(\alpha) = \frac{\hat{U}_F^2}{2\pi} \left[ \theta - \frac{\sin 2\theta}{2} \right]_{\alpha}^{\pi} = \frac{\hat{U}_F^2}{2\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)$$

$$U_L(\alpha) = \frac{\hat{U}_F}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

4. El peor caso es para  $\alpha = 0$ , ángulo para el que la tensión eficaz sobre la carga es máxima y cada semiconductor conduce un semiciclo completo:

$$\text{máx}\{I_{sem}^2\} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_{sem}^2(\theta) d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i_{R1}^2(\theta) d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \left( \frac{u_L(\theta)}{R_1} \right)^2 d\theta = \frac{1}{2R_1^2} \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_L^2(\theta) d\theta = \frac{1}{2R_1^2} U_F^2$$

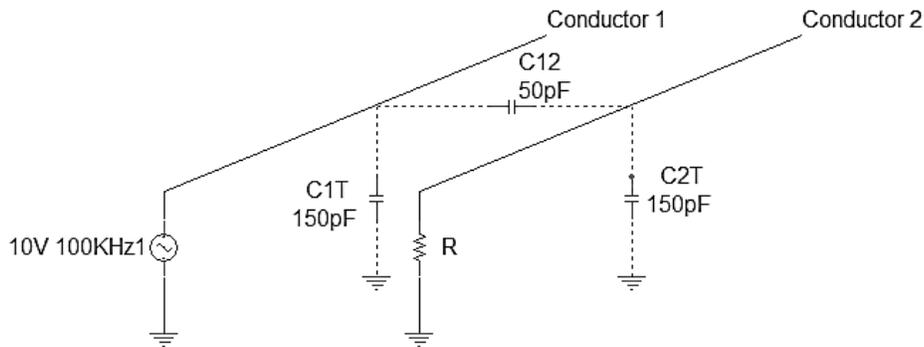
$$\text{máx}\{I_{sem}\} = \frac{U_F}{R_1\sqrt{2}} = \frac{220 \text{ V}}{8,8 \Omega \times \sqrt{2}} = 17,678 \text{ A}$$

**Ejercicio 3**

1. ¿Cuál es el tipo de interferencia o acoplamiento presente? (0,5 puntos)

Acoplamiento capacitivo.

2. ¿A qué valor máximo (independiente de la frecuencia) podemos aproximar la señal de ruido (dada por el voltaje  $V_R$ ) en el conductor 2? (0,75 puntos)



$$V_R \cong \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2T}} V_1$$

$$V_R = \frac{50 \text{ pF}}{200 \text{ pF}} \times 10 \text{ V} = 2,5 \text{ V}$$

3. ¿Qué soluciones podrían reducir el acoplamiento presente? (0,75 puntos)

- Separar los conductores para disminuir la capacitancia parásita  $C_{12}$ .
- Apantallar el cable conductor 2 con el blindaje puesto a masa.

**Ejercicio 4**

(2 puntos, 25 minutos)

1. ¿Qué tipo de regulador (PD, PI, PID) implementa cada circuito? Obtenga de forma razonada las funciones de transferencia de cada circuito regulador (1 punto).

Ambos circuitos tienen una configuración inversora, por lo que la función de transferencia será del tipo:

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{Y_1}{Y_2}$$

De las tablas de cuadripolos podemos obtener los coeficientes  $Y_1$  e  $Y_2$  para cada circuito.

Para el CIRCUITO A:

$$Y_1 = -\frac{1}{R_1}$$

$$Y_2 = -\frac{sC_1}{1 + sC_1R_2}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{Y_1}{Y_2} = -\frac{R_2 (1 + sC_1R_2)}{R_1 sC_1R_2}$$

Es un regulador PI, ya que la función de transferencia es del tipo:

$$\frac{V_o}{V_i} = k \frac{1 + T_n s}{T_n s}$$

Para el CIRCUITO B:

$$Y_1 = -\frac{1 + sR_3C_2}{R_3}$$

$$Y_2 = -\frac{1}{R_4}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{Y_1}{Y_2} = -\frac{R_4}{R_3}(1 + sR_3C_2)$$

Es un regulador PD, ya que la función de transferencia es del tipo:

$$\frac{V_o}{V_i} = k(1 + T_v s)$$

2. Indique el valor de los parámetros K,  $T_v$  (regulador PD) y  $T_n$  (regulador PI) en función de los componentes de los circuitos A y B para cada regulador (1 punto).

Para CIRCUITO A:

$$k_n = \frac{R_2}{R_1}$$

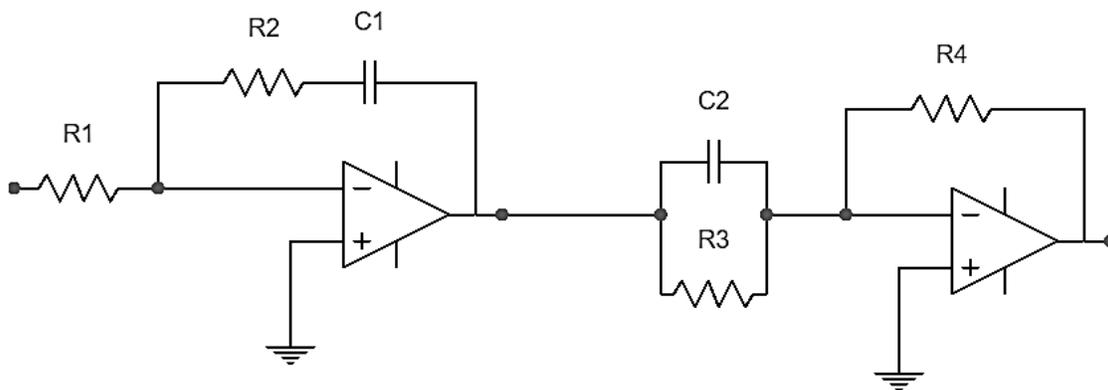
$$T_n = C_1 R_2$$

Para CIRCUITO B

$$k_v = \frac{R_4}{R_3}$$

$$T_v = R_3 C_2$$

3. ¿Cómo podría implementar un regulador PID a partir de los circuitos A y B? Obtenga de forma razonada la función de transferencia del regulador PID e identifique los parámetros K,  $T_v$  y  $T_n$  del mismo (1 punto).



Conectando en cascada ambos circuitos tenemos la función de transferencia del PID cuando  $T_v \ll T_n$ :

$$\frac{V_o}{V_i} = k(1 + T_v s) \left( \frac{1 + T_n s}{T_n s} \right)$$

$$k = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3}$$

$$T_n = C_1 R_2$$

$$T_v = R_3 C_2$$