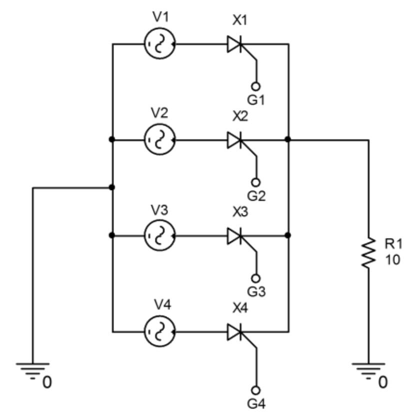
Normas de examen

- 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, 30 minutos)

Una carga resistiva se alimenta a través de un rectificador cuadrafásico controlado de ½ onda construido con SCR. Se pide:



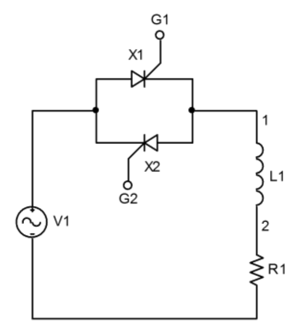
1. Dibujar, durante al menos 40 ms, las formas de onda de la tensión sobre la carga, $\boldsymbol{u_{R1}}$, y de la corriente a través de cada tiristor, $\boldsymbol{i_{X1}}$, $\boldsymbol{i_{X2}}$, $\boldsymbol{i_{X3}}$, e $\boldsymbol{i_{X4}}$, para un ángulo de disparo $\boldsymbol{\alpha} = \pi/2$. Indicar en todas las gráficas los valores más significativos.
2. Deducir las expresiones que dan los valores medios de la tensión sobre la carga, $\bar{U}_{R1}$, y de la corriente que la atraviesa, $\bar{I}_{R1}$, para ángulos de disparo $\boldsymbol{\alpha} \geq \pi/4$.
3. Deducir la expresión que da las pérdidas medias totales en los semiconductores para ángulos de disparo $\boldsymbol{\alpha} \geq \pi/4$.

Datos: $V_F = 2{,}2$ V; $U_{red} = 380$ V; f = 50 Hz
Nota: considerar ideales los semiconductores salvo en el apartado 3.

Ejercicio 2

(3 puntos, 30 minutos)

Para el circuito con carga inductiva-resistiva de la figura adjunta:

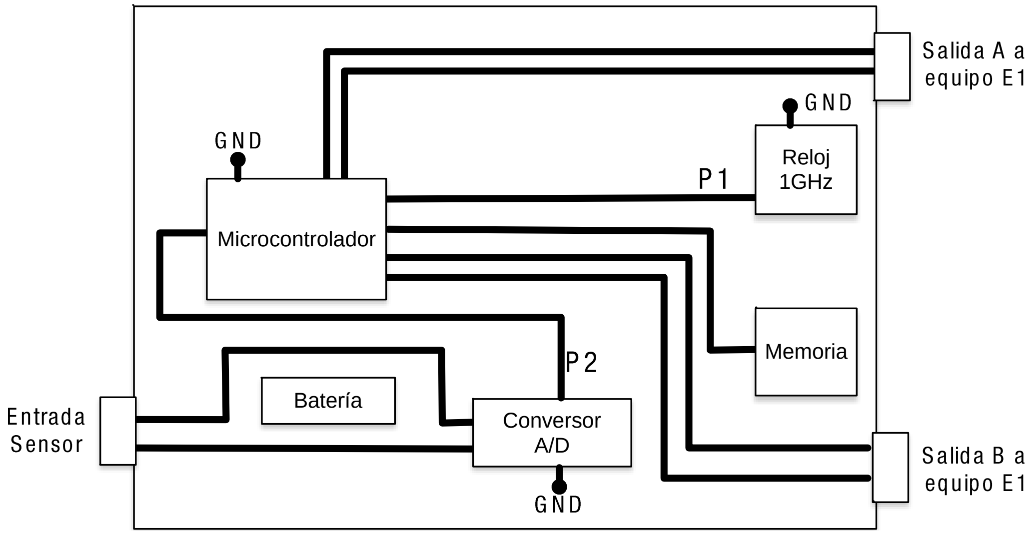


1. Determine el intervalo de valores admisibles del ángulo de disparo $\boldsymbol{\alpha}$.
2. Dibuje las formas de onda de $\boldsymbol{u_L}$ e $\boldsymbol{i_L}$ durante al menos 40 ms para un ángulo de disparo $\boldsymbol{\alpha} = \pi/3$ rad. Indique en todas las gráficas los valores más significativos.
3. Deduzca la expresión que da la tensión eficaz de salida sobre la carga, $\boldsymbol{U_L}$, en función del ángulo de disparo, $U_L = f(\alpha)$.
4. Calcule la corriente eficaz máxima que deben soportar los tiristores para cualquier ángulo de disparo.

Datos: $L_1 = 94$ mH; $R_1 = 51\ \Omega$; $U_{red} = 220$ V; f = 50 Hz

Ejercicio 3 (2 puntos, 20 minutos)

El circuito de la figura presenta una PCB para un microcontrolador no muy bien diseñada. Las pistas de alimentación no se muestran y el plano de masa está en la otra capa de la PCB, de manera que sólo se muestran las pistas de señal.

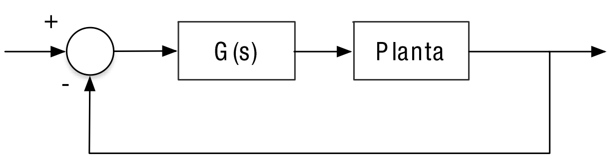


Se pide:

1. Identificar fuentes potenciales de emisiones electromagnéticas.
2. Dibujar el camino de retorno para las pistas P1 y P2.
3. Identificar tres posibles mejoras que se podrían realizar en el diseño del circuito de cara a mejorar su compatibilidad electromagnética.
4. Supongamos que tenemos dos cables que circulan en paralelo, uno de ellos apantallado. Comentar cómo se debe poner a tierra para minimizar los acoplamientos capacitivos e inductivos que se pudieran dar.
5. Describir qué son las corrientes de offset y polarización, y cómo puede corregirse.

Ejercicio 4 (2 puntos, 25 minutos)

Un determinado sistema (planta) presenta problemas de inestabilidad. Se ha diseñado un sistema de control para solucionar ese problema con la función de transferencia G(s).

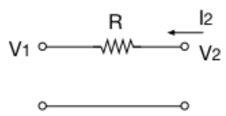
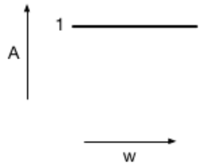
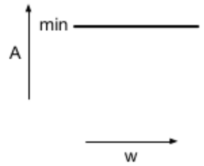


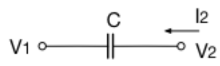
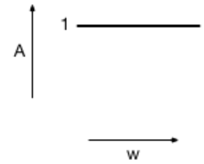
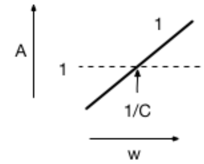
$$G(s) = -4 \cdot \frac{s^2}{1+3s}$$

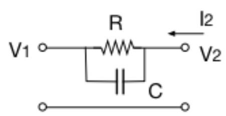
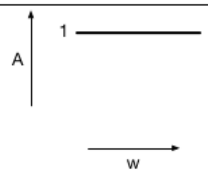
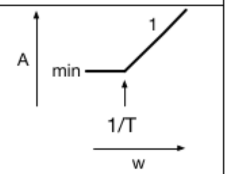
Se pide:

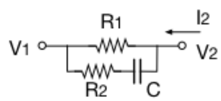
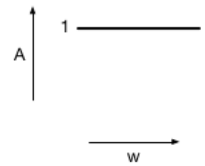
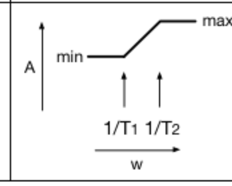
1. Implementar el sistema G(s) mediante un circuito electrónico con un amplificador operacional (en modo inversor o no inversor) y uno o varios cuadripolos de las tablas del Anexo 1.
2. Proponer valores numéricos razonables para los componentes (R, C) del circuito diseñado.

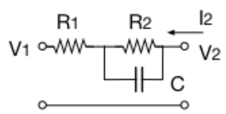
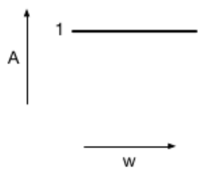
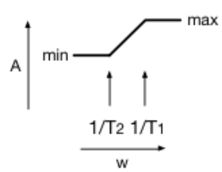
Anexo 1: Tablas de cuadripolos pasivos

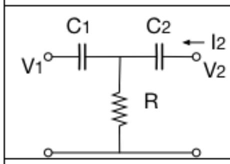
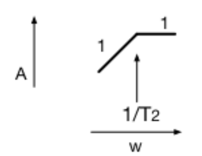
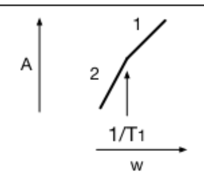
Cuadripolo 1	A	Y
	1	$-\frac{1}{R}$
$min = \frac{1}{R}$		

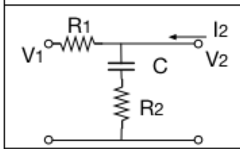
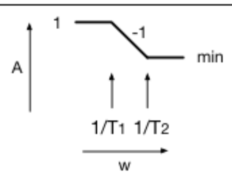
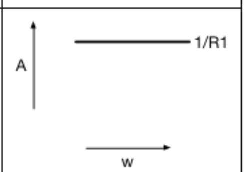
Cuadripolo 2	A	Y
	1	$-sC$
		

Cuadripolo 5	A	Y
	1	$-\frac{1+s\cdot T}{R}$
$T = RC$ $min = \frac{1}{R}$		

Cuadripolo 7	A	Y
	1	$-\frac{1+s\cdot T_1}{R1(1+s\cdot T_2)}$
$T1 = (R1+R2)C$ $T2 = R2C$ $max = \frac{1}{R1}+\frac{1}{R2}$ $min = \frac{1}{R1}$		

Cuadripolo 9	A	Y
	1	$\frac{-(1+s\cdot T_2)}{(R1+R2)(1+s\cdot T_1)}$
$T1 = \frac{R1R2C}{R1+R2}$ $T2 = R2C$ $min = \frac{1}{R1+R2}$ $max = \frac{1}{R1}$		

Cuadripolo 12	A	Y
	$\frac{s\cdot T_2}{1+s\cdot T_2}$	$\frac{-s^2RC_1C_2}{1+s\cdot T_1}$
$T_1 = R(C_1+C_2)$ $T_2 = RC_1$		

Cuadripolo 15	A	Y
	$\frac{1+s\cdot T_2}{1+s\cdot T_1}$	$-\frac{1}{R1}$
$T1 = (R1+R2)C$ $T2 = R2C$ $min = \frac{R2}{R1+R2}$		

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

Ejercicio 1 (3 puntos, 30 minutos)

1. FF.OO $\boldsymbol{u_{R1}}$, $\boldsymbol{i_{X1}}$, $\boldsymbol{i_{X2}}$, $\boldsymbol{i_{X3}}$, e $\boldsymbol{i_{X4}}$ para $\boldsymbol{\alpha} = \pi/2$. Indicar en todas las gráficas los valores más significativos.

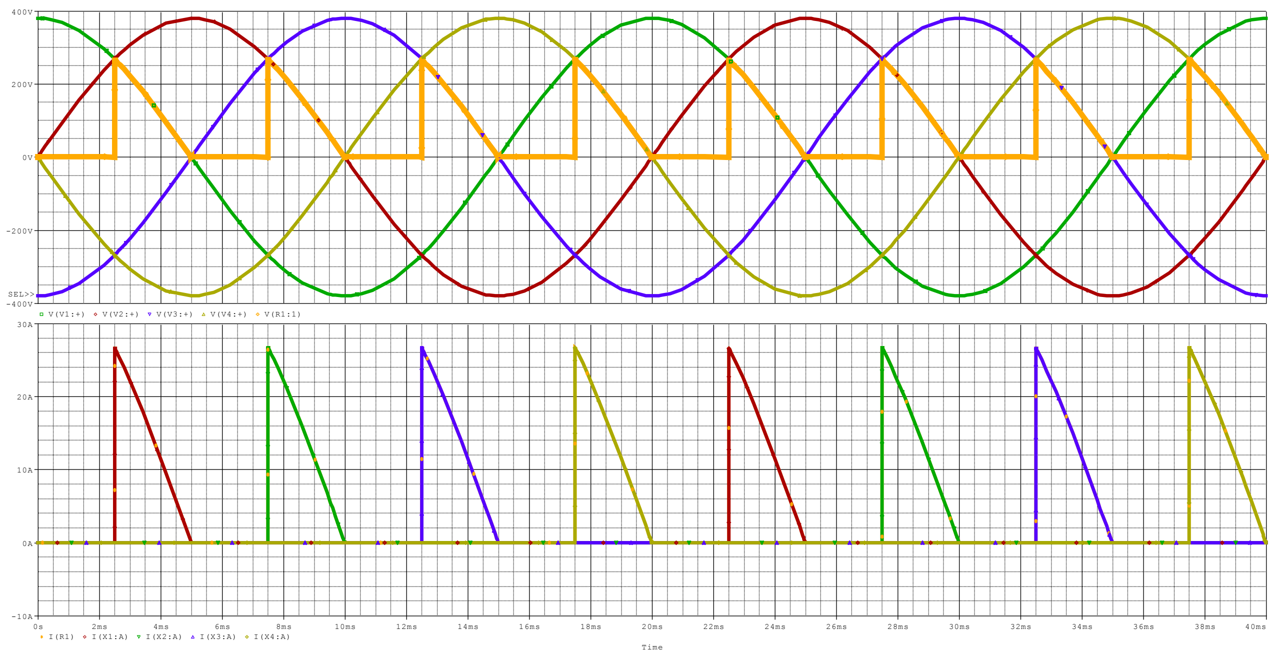
$$\widehat{U}_F = \sqrt{2}U_F = \sqrt{2}\frac{U_L}{\sqrt{2}} = U_L = 380 \text{ V}$$

$$u_{cruce^+} = \widehat{U}_F \cos\left(-\frac{\pi}{4}\right) = \widehat{U}_F \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = 380\ \frac{\sqrt{2}}{2}\text{V} = 268{,}7 \text{ V}$$

$$u_{cruce^-} = -u_{cruce^+} = -268{,}7 \text{ V}$$

$$u_{R1}(\alpha^+) = \widehat{U}_F \cos\left(-\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2}\right) = 380\ \frac{\sqrt{2}}{2}\text{V} = 268{,}7 \text{ V}$$

$$i_{R1}(\alpha^+) = \frac{u_{R1}(\alpha^+)}{R_1} = \frac{268{,}7 \text{ V}}{10\ \Omega} = 26{,}87 \text{ A}$$



2. $\overline{U}_{R1}$ e $\overline{I}_{R1}$ para $\boldsymbol{\alpha} \geq \pi/4$.

   Para $\boldsymbol{\alpha} \geq \pi/4$ la corriente pasa por cero en $\boldsymbol{\theta} = \pi/2$, apagando el SCR activo antes del disparo del siguiente tiristor:

$$\overline{U}_{R1} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} u_{R1}(\theta)\, d\theta = \frac{n_F}{2\pi}\int_{-\frac{\pi}{n_F}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}} \widehat{U}_F \cos(\theta)\, d\theta = \frac{n_F \widehat{U}_F}{2\pi}[\sin\theta]_{-\frac{\pi}{n_F}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}} = \frac{2\widehat{U}_F}{\pi}\left[1 - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{4}\right)\right]$$

$$\overline{I}_{R1} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_{R1}(\theta)\, d\theta = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \frac{u_{R1}(\theta)}{R_1}\, d\theta = \frac{1}{R_1}\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} u_{R1}(\theta)\, d\theta = \frac{\overline{U}_{R1}}{R_1} = \frac{2\widehat{U}_F}{\pi R_1}\left[1 - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{4}\right)\right]$$

3. Pérdidas medias totales en los semiconductores para ángulos de disparo $\boldsymbol{\alpha} \geq \pi/4$:

   Primero calculamos las pérdidas por SCR:

$$\overline{P}_{Xn} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} p_{Xn}(\theta)\, d\theta = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} u_{Xn}(\theta)\cdot i_{Xn}(\theta)\, d\theta = \frac{1}{2\pi}\int_{-\frac{\pi}{n_F}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}} V_F \frac{u_{R1}(\theta)}{R_1}\, d\theta = \frac{V_F}{R_1}\frac{1}{2\pi}\int_{-\frac{\pi}{n_F}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}} u_{R1}(\theta)\, d\theta$$

$$\overline{P}_{Xn} = \frac{V_F \overline{U}_{R1}}{R_1 n_F} = \frac{V_F \overline{I}_{R1}}{n_F}$$

   Luego para el total de tiristores:

$$\overline{P}_d = n_F \overline{P}_{Xn} = V_F \overline{I}_{R1} = \frac{2V_F \widehat{U}_F}{\pi R_1}\left[1 - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{4}\right)\right]$$

Ejercicio 2 (3 puntos, 30 minutos)

1. Intervalo de valores admisibles del ángulo de disparo $\boldsymbol{\alpha}$:

   El disparo se deberá producir después del apagado del otro tiristor, con un retardo $\boldsymbol{\psi}$ con respecto del paso por cero de la tensión, y antes del siguiente paso por cero de la tensión. Si suponemos que se alcanza el régimen permanente, $\boldsymbol{\psi} \approx \boldsymbol{\varphi}$:

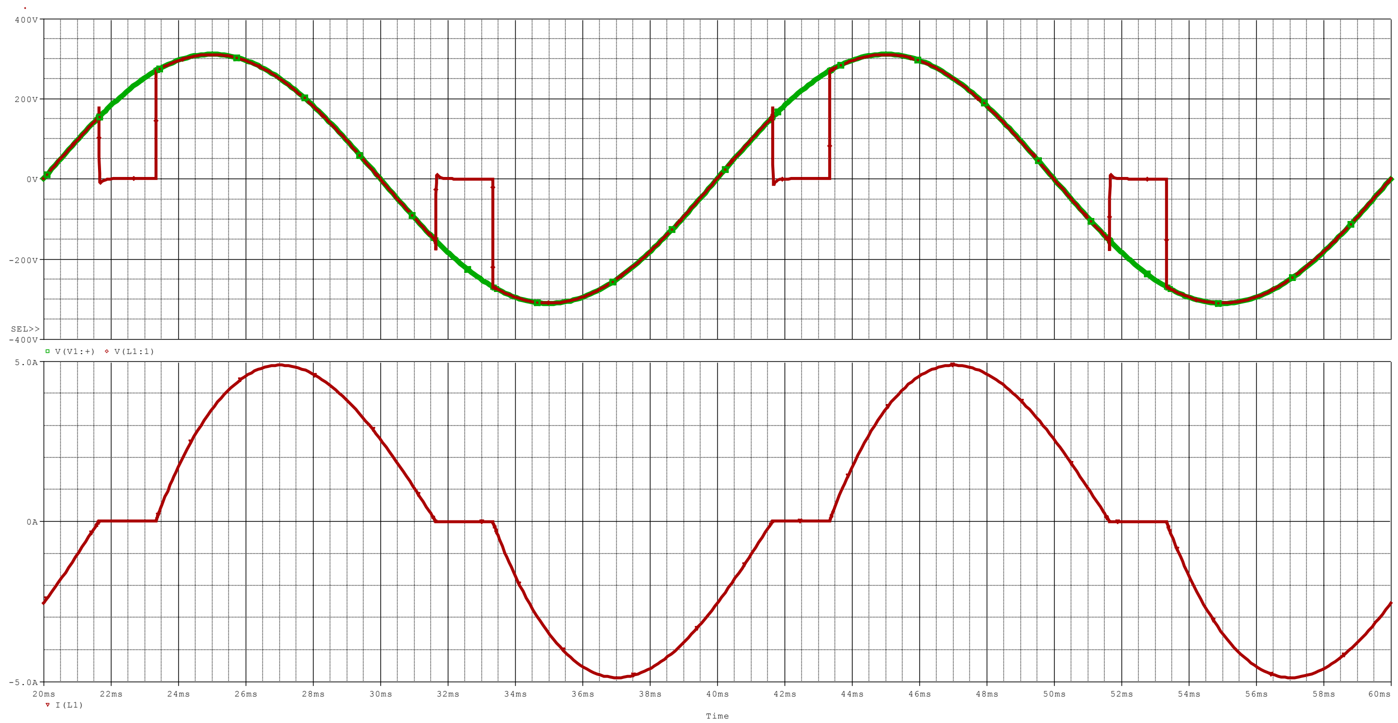
   $$\tau = \frac{L_1}{R_1} = \frac{0{,}094\ \mathrm{H}}{51\ \Omega} = 1{,}843\ \mathrm{ms}$$

   $$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{\omega L_1}{R_1} = \frac{2\pi \times 0{,}094\ \mathrm{H}}{51\ \Omega} = 0{,}525\ \mathrm{rad} = 30{,}072°$$

   $$0{,}525\ \mathrm{rad} < \alpha < \pi\ \mathrm{rad}$$

2. FF.OO. de $\boldsymbol{u_L}$ e $\boldsymbol{i_L}$ durante al menos 40 ms para un ángulo de disparo $\boldsymbol{\alpha} = \pi/3$ rad:

   $$\widehat{U}_F = \sqrt{2}U_F = 311\ \mathrm{V};\ u_L(\psi^- \cong \varphi^-) = \widehat{U}_F \operatorname{sen}\varphi = 155{,}904\ \mathrm{V};\ u_L(\alpha^+) = \widehat{U}_F \operatorname{sen}\alpha = 269{,}444\ \mathrm{V}$$



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

   $$U_L{}^2(\alpha) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} u_L{}^2(\theta)\,d\theta = \frac{1}{\pi}\int_\alpha^{\pi+\psi}\left(\widehat{U}_F \operatorname{sen}\theta\right)^2 d\theta = \frac{\widehat{U}_F{}^2}{\pi}\int_\alpha^{\pi+\psi}(\operatorname{sen}\theta)^2\,d\theta = \frac{\widehat{U}_F{}^2}{2\pi}\int_\alpha^{\pi+\psi} 1 - \cos 2\theta\,d\theta$$

   $$U_L{}^2(\alpha) = \frac{\widehat{U}_F{}^2}{2\pi}\left[\theta - \frac{\operatorname{sen}2\theta}{2}\right]_\alpha^{\pi+\psi} = \frac{\widehat{U}_F{}^2}{2\pi}\left(\pi + \psi - \alpha - \frac{\operatorname{sen}2(\pi+\psi) - \operatorname{sen}2\alpha}{2}\right) = \frac{\widehat{U}_F{}^2}{2\pi}\left(\pi + \psi - \alpha - \frac{\operatorname{sen}2\psi - \operatorname{sen}2\alpha}{2}\right)$$

   $$\mathrm{U_L}(\alpha) = \frac{\widehat{\mathrm{U}}_\mathrm{F}}{\sqrt{2}}\sqrt{1 + \frac{\psi - \alpha}{\pi} - \frac{\operatorname{sen}2(\psi) - \operatorname{sen}2\alpha}{2\pi}} \cong \frac{\widehat{\mathrm{U}}_\mathrm{F}}{\sqrt{2}}\sqrt{1 + \frac{\varphi - \alpha}{\pi} - \frac{\operatorname{sen}2(\varphi) - \operatorname{sen}2\alpha}{2\pi}}$$

4. Corriente eficaz máxima por los tiristores:
   El peor caso es para $\alpha = \psi$: la onda completa de la red aparece sobre la carga y cada tiristor conduce una semionda completa.

   $$\mathrm{I}_{L\,máx} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\mathrm{i_L}^2(\theta)\,d\theta} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_\psi^{\pi+\psi}\mathrm{i_L}^2(\theta)\,d\theta} = \frac{U_F}{Z_L} = \frac{220\ \mathrm{V}}{\sqrt{51\ \Omega^2 + (100\pi\ \mathrm{rad/s} \times 0{,}094\ \mathrm{H})^2}} = \frac{220\ \mathrm{V}}{58{,}933\ \Omega} = 3{,}733\ \mathrm{A}$$

   $$\mathrm{I}_{\mathrm{Xn\,máx}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\mathrm{i_{Xn}}^2(\theta)\,d\theta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_\psi^{\pi+\psi}\mathrm{i_L}^2(\theta)\,d\theta} = \sqrt{\frac{1}{2}\mathrm{I_{L\,máx}}^2} = \frac{\mathrm{I_{L\,máx}}}{\sqrt{2}} = 2{,}64\ \mathrm{A}$$

Ejercicio 4 (2 puntos, 25 minutos)

1. La función de transferencia es:

$$G(s) = K \cdot \left(1 + t_d s + \frac{1}{t_i s}\right) = \frac{(1 + t_d s)(1 + t_i s) - t_d s}{t_i s} = \frac{(1 + t_d s)(1 + t_i s)}{t_i s}$$

, dado que $t_d \ll t_i$.

Para implementar dicha función podemos utilizar una configuración inversora y los cuadripolos 5 (Y1) y 13 (Y2), quedando de la forma:

$$G(s) = -\frac{Y_1}{Y_2} = -\frac{-\frac{1 + sT_1}{R_1}}{-\frac{-C2s}{1 + sT_3}} = -\frac{(1 + sT_1)(1 + sT_3)}{C2R_1 s}$$

Con $T_1 = R_1 C_1$ y $T_3 = R_2 C_2$

$$G(s) = -\frac{(1 + sT_1)(1 + sT_3)}{C_2 R_1 s} = -\frac{(1 + sR_1C_1)(1 + R_2C_2)}{C_2 R_1 s} = -\frac{R_2}{R_1}\frac{(1 + sR_1C_1)(1 + R_2C2)}{C_2 R_2 s}$$

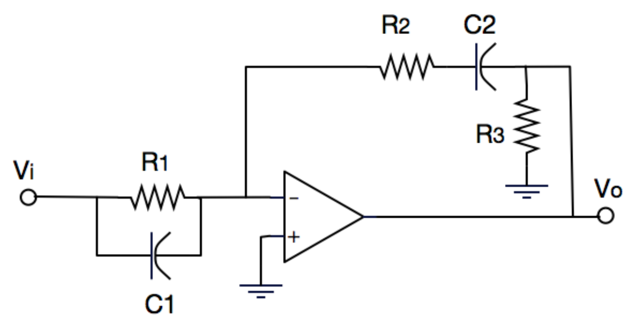
Y por tanto:

$$K = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$T_d = R_1 C_1$$

$$T_i = R_2 C_2$$

El circuito quedaría de la siguiente forma:



Se podría hacer utilizando 2 o 3 AAOO tal y como vimos en clase, de manera que tendríamos más componentes pasivos que nos facilitarían el ajuste de los parámetros, pero en contrapartida, se encarecería el diseño al tener más componentes.