

# Diseño del controlador CONVERTIDOR EN MEDIO PUENTE (MCC)

---

## ÍNDICE

---

### **0. Características del convertidor.**

### **1. Control en modo tensión.**

*1.1. Función de transferencia en lazo abierto*

*1.2. Características del lazo de control deseado. Diseño del controlador*

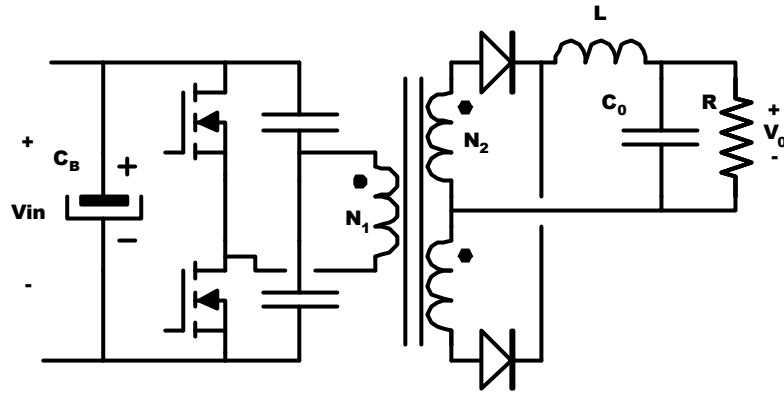
### **2. Control en modo corriente promediada.**

*2.1. Función de transferencia en lazo abierto del lazo de corriente.*

*2.2. Características del lazo de control deseado. Diseño del controlador*

*2.3. Lazo de tensión del control en modo corriente.*

## 0. Datos del diseño.



Si es un medio puente MP=1 si es un puente completo MP=0 MP := 1

$$V_{inmin} := 190 \cdot \sqrt{2}$$

$$V_{innom} := 230 \cdot \sqrt{2}$$

$$V_{inmax} := 265 \cdot \sqrt{2}$$

$$f_s := 10000$$

Frecuencia de conmutación de los transistores(Hz)

$$d_{max} := .45$$

Ciclo de trabajo máximo

$$V_0 := 48$$

$$I_{0max} := 3$$

$$Pot := V_0 I_{0max}$$

$$Pot = 144$$

$$Pot_{LMCD} := \frac{Pot}{10}$$

Límite entre el MCC y MCD

$$\Delta V_0 := .3 \cdot \frac{V_0}{100}$$

$$\Delta V_0 = 0.144$$

Rizado a la salida [V]

Caída en los diodos:

$$V_{AK} := 1.1$$

**Relación de transformación  $N_2/N_1=N_{21}$**

$$N_{21} := \frac{(V_0 + 2 \cdot V_{AK})}{2 \cdot d_{max} \cdot (V_{inmin} - 2 \cdot V_{AK})} \cdot (1 + MP) \quad N_{21} = 0.419$$

$$N_{12} := \frac{1}{N_{21}}$$

$$N_{12} = 2.389$$

## Filtro de salida

El cálculo de la bobina se realizará en función del límite entre el MCC y el MCD, el condensador se determinará en función del rizado.

$$d_{\min} := \frac{V_0}{N_{21} \cdot V_{\max}} \quad d_{\min} = 0.306$$

Al rectificar la señal el ciclo de trabajo se hace el doble y la frecuencia también.

$$I_{\text{limite\_media}} := \frac{P_{\text{otLMCD}}}{V_0} \quad I_{\text{limite\_media}} = 0.3 \quad I_{\text{limite}} := I_{\text{limite\_media}} \cdot 2$$

$$L := \frac{V_0 (1 - d_{\min} \cdot 2)}{I_{\text{limite}} \cdot 2 \cdot f_s} \quad L = 1.552 \times 10^{-3}$$

$$C_0 := \frac{I_{\text{limite}}}{2} \cdot \frac{1}{4 \cdot f_s} \cdot \frac{1}{\Delta V_0} \cdot \frac{1}{2} \quad C_0 = 2.604 \times 10^{-5}$$

$$f_{\text{resonancia}} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C_0}} \quad f_{\text{resonancia}} = 791.613$$

## Frecuencias a dibujar

```

ω := | wini ← 3·6.3
      wfin ← fs·2·6.28
      Ppdecada ← 100
      ndecadas ← log( wfin / wini )
      Puntos ← ndecadas·Ppdecada
      for i ∈ 0..Puntos - 1
          wi ← wini·10i / Puntos·ndecadas
      w

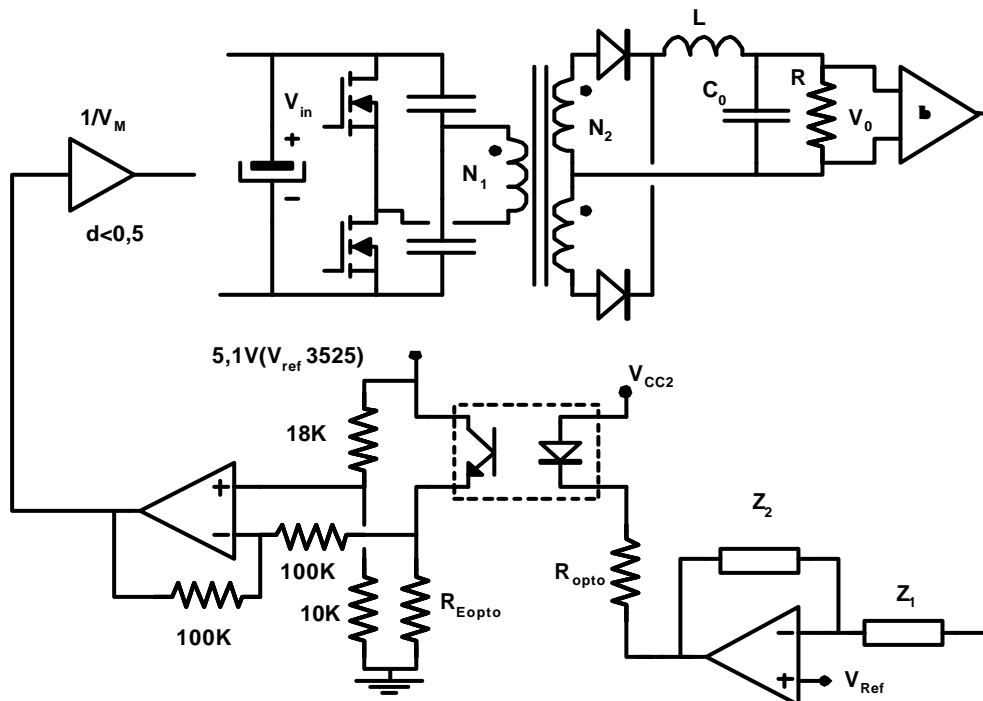
```

Puntos := rows(ω)      i := 0..Puntos - 1

## 1. Control en Modo tensión.

### Características seleccionadas

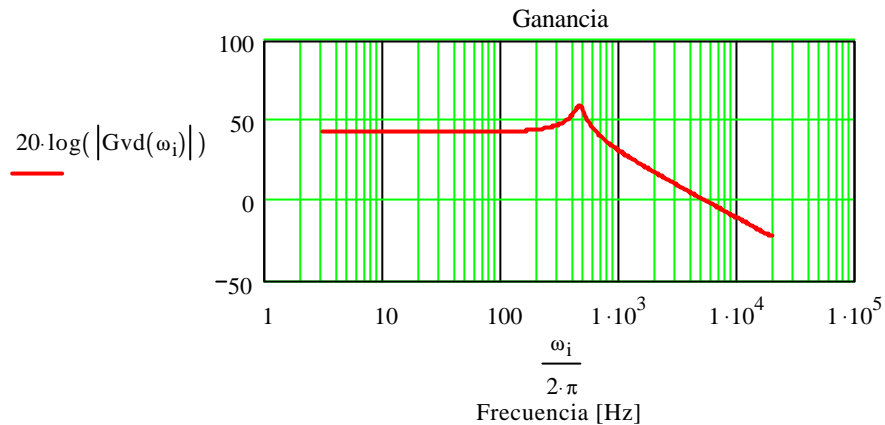
$N_{12} := 2.3$	Relación del transformación N1/N2	
$L := 1200 \cdot 10^{-6}$	Inductancia del filtro de salida	
$C := 100 \cdot 10^{-6}$	Condensador del filtro de salida	
$V_o := 48$	Tensión a la salida del convertidor	
$V_{ref} := 5.1$	Tensión de referencia	
$\beta := \frac{V_{ref}}{V_o}$	$\beta = 0.106$	
$V_M := 2$	excursión de la señal triangular	
$V_C := 310$	Tensión en el condensador de entrada	
$P := 100$	Potencia con la que trabaja el convertidor	
$R := \frac{V_o^2}{P}$	Resistencia de carga	
$d(V_C) := \frac{d_{max} \cdot V_{inmin}}{V_C}$	$D := d(V_C)$	$D = 0.39$
$F_s := 10000$	Frecuencia de conmutación	



## 1.1. Función de transferencia sin controlador

Tensión a la salida en función del ciclo de trabajo.

$$G_{vd}(\omega) := VC \cdot \frac{2}{N12 \cdot (MP + 1)} \cdot \left[ \frac{1}{C \cdot L \cdot (\omega \cdot j)^2 + \omega \cdot j \cdot \frac{L}{R} + 1} \right]$$



## Función de transferencia del conjunto Optoacoplador - Amplificador inversor.

$$K := 0.07$$

Corriente en el emisor del opto en función de la corriente en el diodo.

$$C_{ce} := 1 \cdot 10^{-9}$$

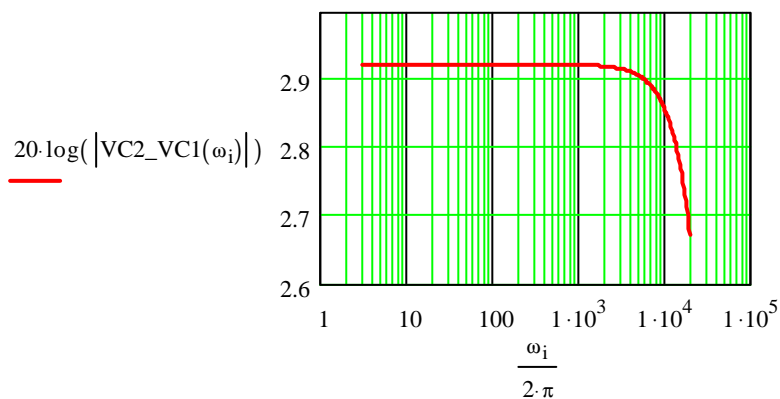
Capacidad Colector-Emisor del transistor del opto.

$$R_{opto} := 100$$

$$R_{Eopto} := 2000$$

El resto de los valores está calculado de manera que puedan obtenerse todos las tensiones necesarias en regimen permanente.

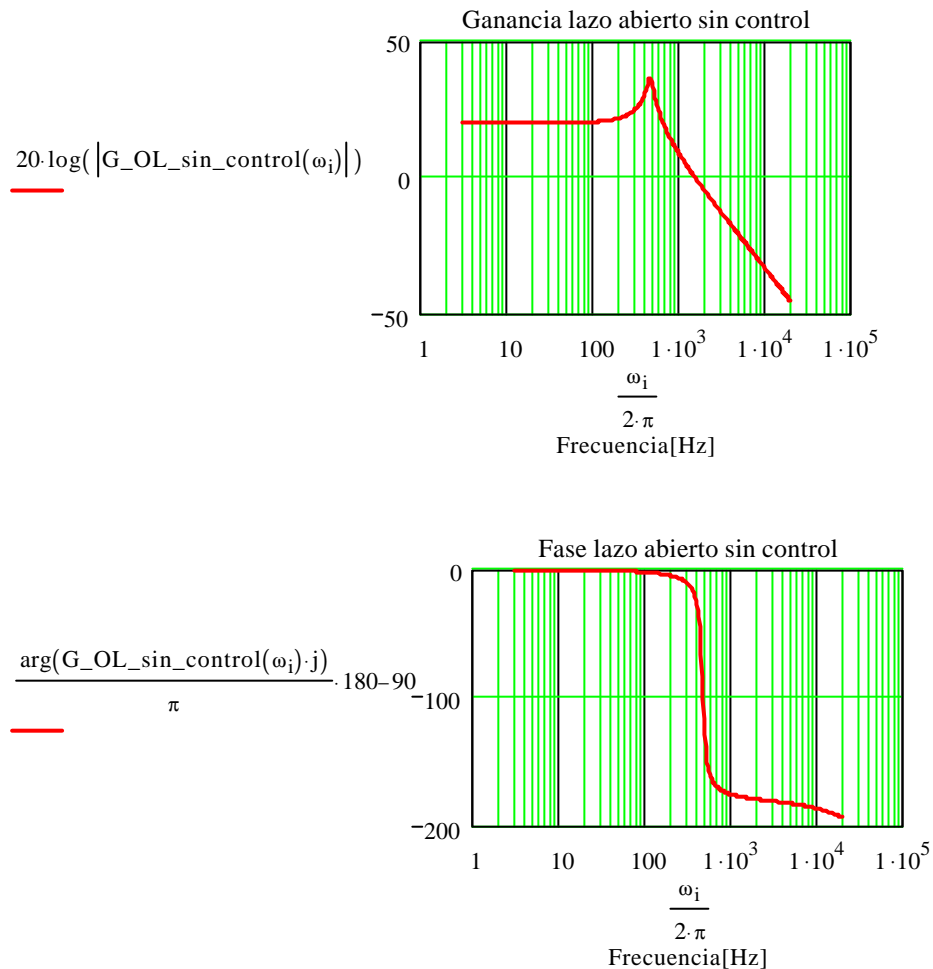
$$VC2\_VC1(\omega) := K \cdot \frac{R_{Eopto}}{(R_{Eopto} \cdot C_{ce} \cdot \omega \cdot j) + 1} \cdot \frac{1}{R_{opto}}$$



Control Medio Puente

La función de transferencia en lazo abierto sin control "G\_OL\_sin\_control( $\omega$ )" incluirán el efecto de la red de realimentación, la señal triangular y la etapa de aislamiento.

$$G_{OL\_sin\_control}(\omega) := G_{vd}(\omega) \cdot \frac{\beta}{VM} \cdot VC2\_VC1(\omega)$$



## 1.2. Características del lazo de control deseado. Diseño del controlador.

MargenF := 45    margen de fase deseado en grados

fo := 1500    Frecuencia al paso por 0dB     $\omega_o := 2 \cdot \pi \cdot f_o$

La fase a la frecuencia fo en la función es de:

$$\frac{\arg(G_{OL\_sin\_control}(\omega_o) \cdot j)}{\pi} \cdot 180 - 90 = -178.171$$

Será necesario un ángulo de compensación  $\theta$

$$\theta := \text{MargenF} - 180 - \left( \frac{\arg(G_{OL\_sin\_control}(\omega_0) \cdot j)}{\pi} \cdot 180 - 90 \right) \quad \theta = 43.171$$

Casi con total seguridad será necesario compensar en ganancia a baja frecuencia, esta compensación puede modificar el margen de fase, por lo que se hará con anterioridad.

## Compensación a baja frecuencia (PI)

$$f_{resonancia} = 791.613$$

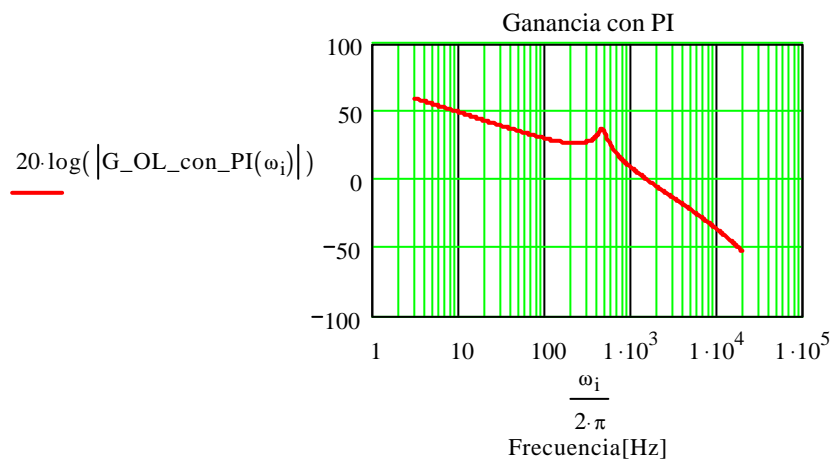
$$f_l := \frac{f_0}{5} \quad f_l = 300 \quad f_{p1} := F_s$$

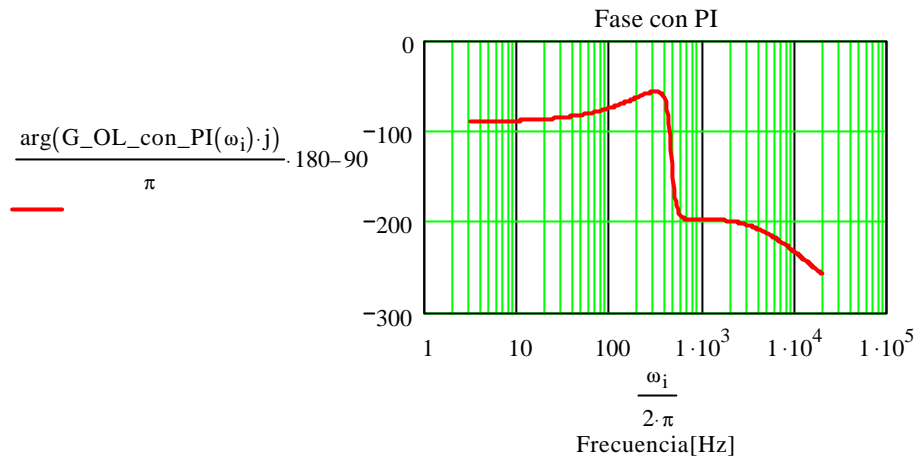
La función de transferencia del PI sin tener en cuenta la ganancia ( $K_{pi}$ ) será  $G_{pi}(\omega)$

$$G_{pi}(\omega) := \left( 1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot f_l}{\omega \cdot j} \right) \left( 1 + \frac{\omega \cdot j}{2 \cdot \pi \cdot f_{p1}} \right)^{-1} \quad \text{La ganancia deberá mantener la frecuencia de paso por 0}$$

$$G_{OL\_sin\_control}(\omega) := G_{vd}(\omega) \cdot \frac{\beta}{VM} \cdot VC2\_VC1(\omega)$$

$$G_{OL\_con\_PI}(\omega) := G_{OL\_sin\_control}(\omega) \cdot G_{pi}(\omega)$$





## Compensación de FASE

Para el margen de fase deseado se necesitará una compensación de fase igual a  $\theta$

$$\theta := \text{MargenF} - 180 - \left( \frac{\arg(G_{OL\_con\_PI}(\omega_o) \cdot j)}{\pi} \cdot 180 - 90 \right) \quad \theta = 63.011$$

$$fz := f_o \cdot \frac{1 - \sin\left(\frac{\theta \cdot \pi}{180}\right)}{1 + \sin\left(\frac{\theta \cdot \pi}{180}\right)} \quad fz = 359.961$$

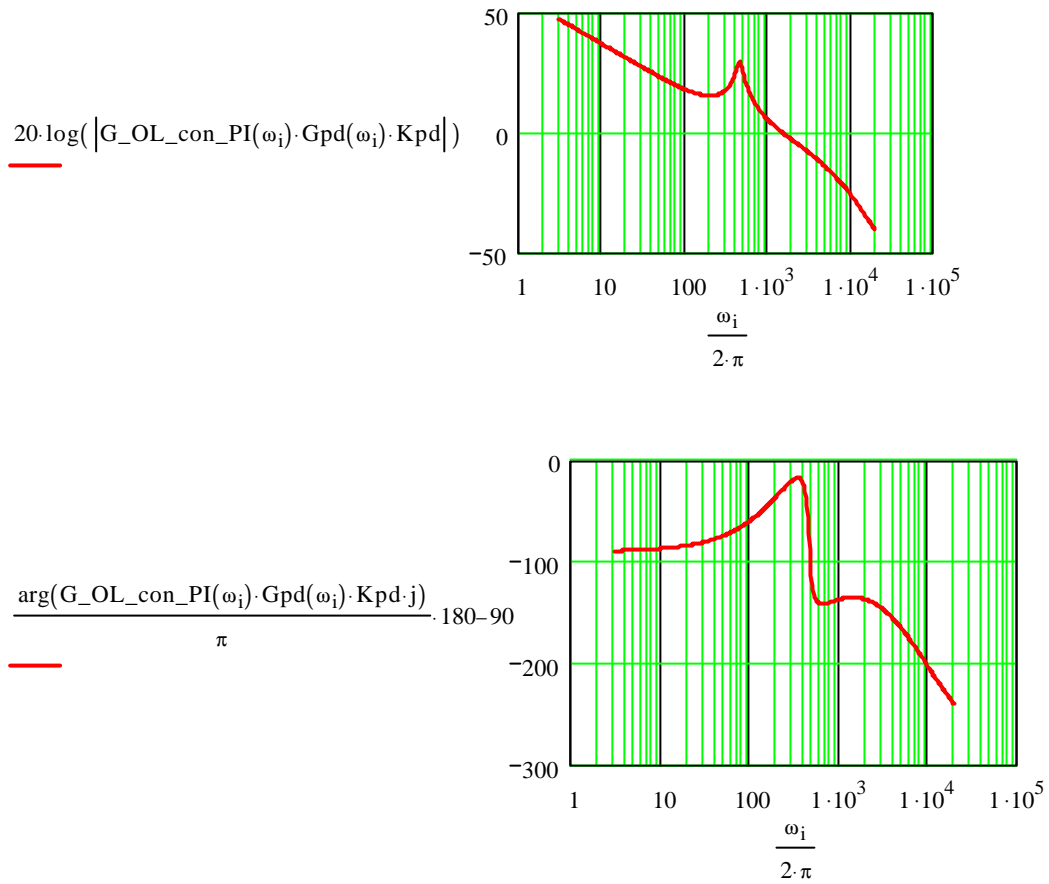
$$fp := f_o \cdot \sqrt{\left( \frac{1 - \sin\left(\frac{\theta \cdot \pi}{180}\right)}{1 + \sin\left(\frac{\theta \cdot \pi}{180}\right)} \right)^{-1}} \quad fp = 6.251 \times 10^3$$

La ganancia de esta fase tendrá que ser tal que mantenga la frecuencia de paso por 0 ( $f_o$ ), la ganancia será denominada  $K_{pd}$  y la respuesta en frecuencia  $G_{pd}(\omega)$

$$G_{pd}(\omega) := \frac{1 + \frac{\omega \cdot j}{2 \cdot \pi \cdot fz}}{1 + \frac{\omega \cdot j}{2 \cdot \pi \cdot fp}} \quad 20 \cdot \log(|G_{pd}(f_o \cdot 2 \cdot \pi)|) = 12.397$$

$$K_{pd} := \text{root}(20 \cdot \log(|G_{OL\_con\_PI}(\omega_o) \cdot G_{pd}(\omega_o) \cdot a|), a, .01, 10000) \quad K_{pd} = 0.23$$

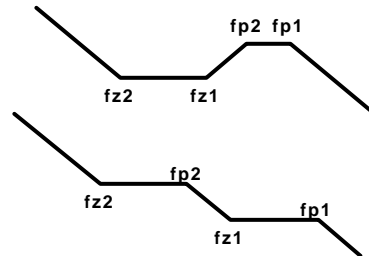
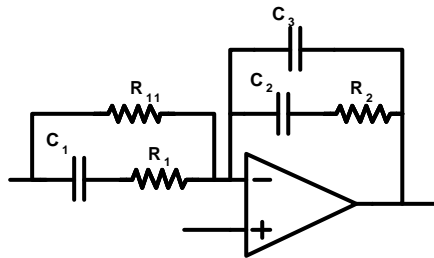




$$G_{OL\_con\_PID}(\omega) := G_{OL\_con\_PI}(\omega) \cdot G_{pd}(\omega) \cdot K_{pd}$$

$$\text{MargenFase} := 180 + \left( \frac{\arg(G_{OL\_con\_PID}(\omega) \cdot j)}{\pi} \cdot 180 - 90 \right) \quad \text{MargenFase} = 45$$

## Diseño del controlador PID



$$fz1 = \frac{1}{2\pi \cdot C_1 (R_1 + R_{11})}$$

$$fz2 = \frac{1}{2\pi \cdot C_2 R_2}$$

$$fp1 = \frac{1}{2\pi \cdot C_1 R_1}$$

$$fp2 = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 (C_3 \parallel C_2)}$$

Se introducen como valores iniciales:  $C2 := 10 \cdot 10^{-9}$

$$\begin{aligned} fz &= 359.961 & fl &= 300 & fp &= 6.251 \times 10^3 & fp1 &= 1 \times 10^4 \\ fz2 &:= \min(fz, fl) & fz1 &:= \max(fz, fl) & fp2 &:= fp \\ fz1 &= 359.961 & fz2 &= 300 & fp2 &= 6.251 \times 10^3 & fp1 &= 1 \times 10^4 \end{aligned}$$

$$R2 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C2 \cdot fz2} \quad R2 = 5.305 \times 10^4 \quad C2 = 1 \times 10^{-8}$$

$$C3 := \text{root} \left( \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R2 \cdot \frac{C2 \cdot C3}{C2 + C3}} - fp2, C3, 10^{-20}, .10^{-4} \right) \quad C3 = 5.041 \times 10^{-10}$$

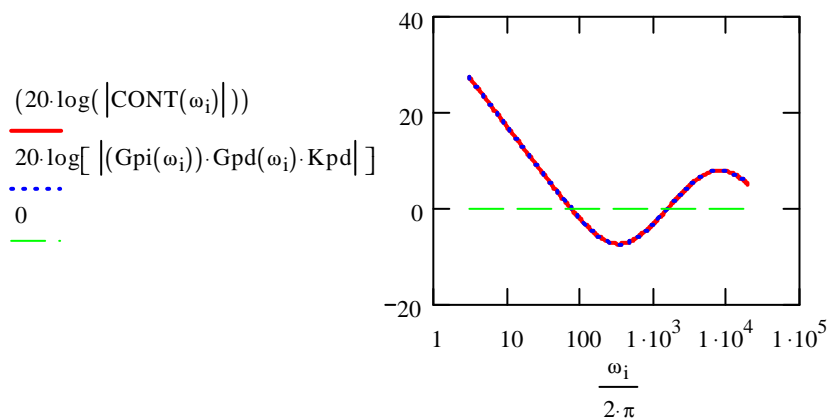
$$R11 := \frac{1}{(C2 + C3) \cdot Kpd \cdot 2 \cdot \pi \cdot fl} \quad R11 = 2.2 \times 10^5$$

$$R1 := \frac{fz1 \cdot R11}{fp1 - fz1} \quad R1 = 8.213 \times 10^3$$

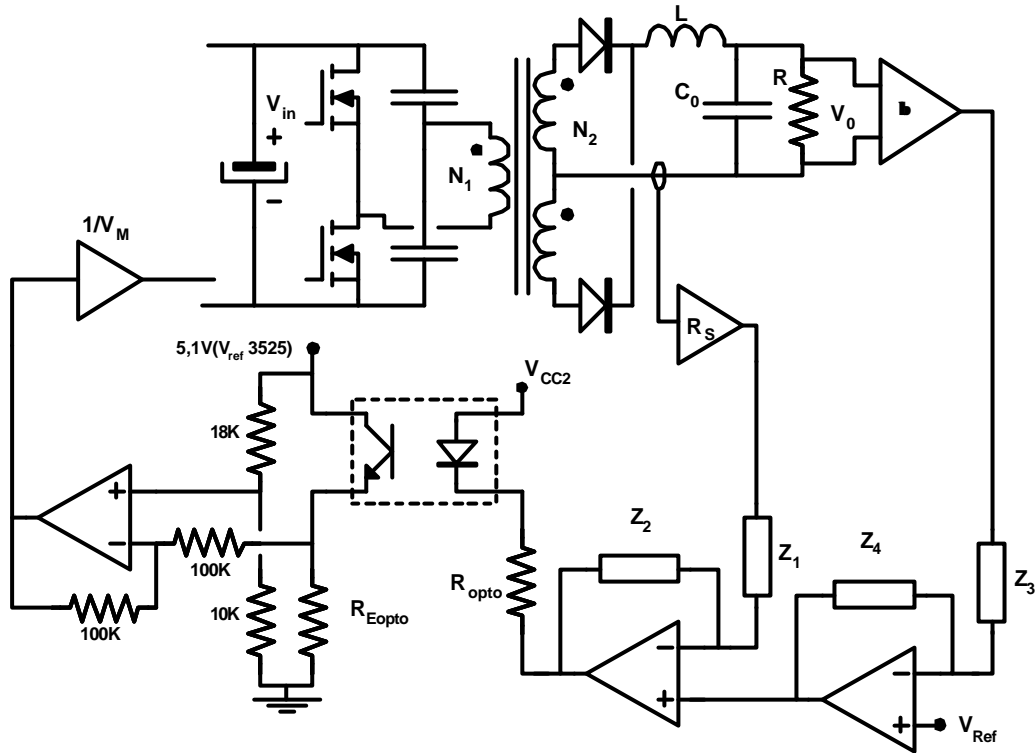
$$C1 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot fp1 \cdot R1} \quad C1 = 1.938 \times 10^{-9}$$

$$\text{CONT}(\omega) := \frac{[(R1 + R11) \cdot C1 \cdot (\omega \cdot j) + 1] \cdot (R2 \cdot C2 \cdot \omega \cdot j + 1)}{\left( 1 + C2 \cdot \frac{C3}{C2 + C3} \cdot R2 \cdot \omega \cdot j \right) \cdot (R1 \cdot C1 \cdot \omega \cdot j + 1) \cdot \omega \cdot j} \cdot \frac{1}{(C2 + C3) \cdot R11}$$

## Comprobamos el resultado del controlador



## 2. Control en Modo Corriente Promediada.



$R_S := 1$  Sensor de corriente utilizado

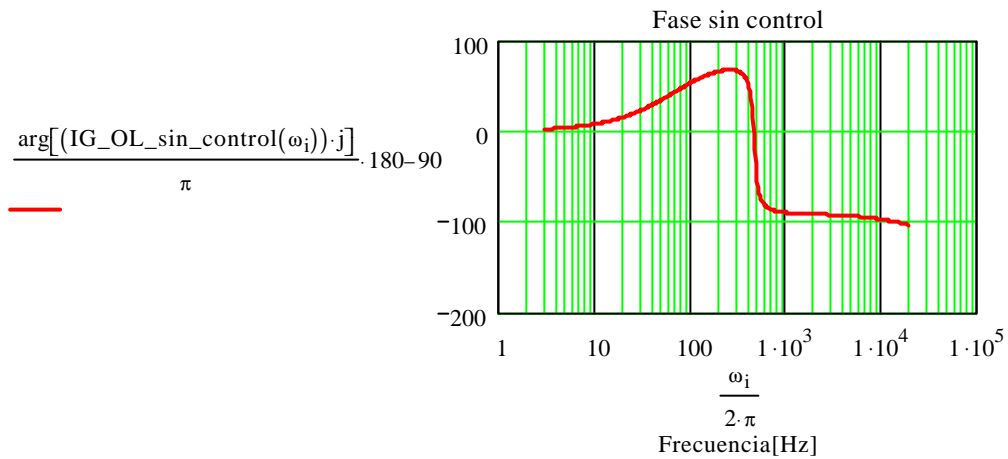
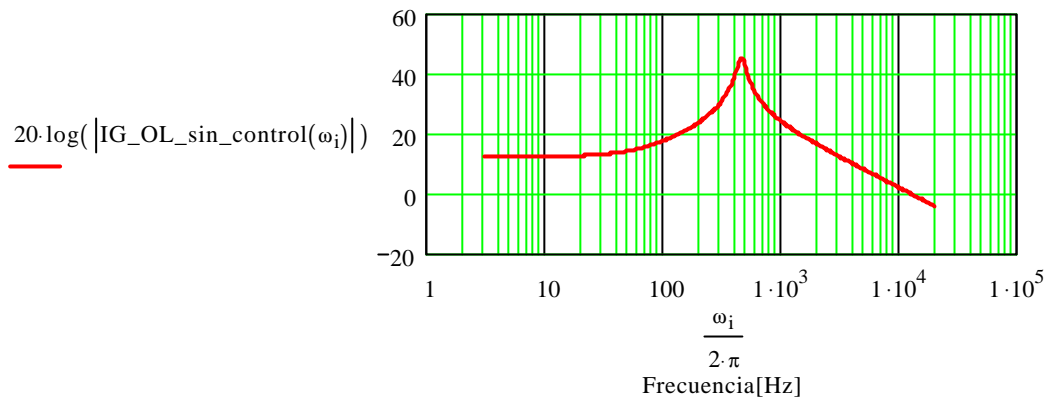
### 2.1. Función de transferencia sin controlador del lazo de corriente.

La función  $IL_d(\omega)$  representa la corriente en la bobina de filtro en función del ciclo de trabajo.

$$IL_d(\omega) := \frac{VC_2}{(MP + 1) \cdot N12} \cdot \frac{(R \cdot C \cdot \omega \cdot j + 1)}{R \cdot L \cdot C \cdot (\omega \cdot j)^2 + L \cdot \omega \cdot j + R}$$

$$VC2\_VC1(\omega) := K \cdot \frac{REopto}{(REopto \cdot Cce \cdot \omega \cdot j) + 1} \cdot \frac{1}{Ropto}$$

$$IG\_OL\_sin\_control(\omega) := VC2\_VC1(\omega) \cdot IL_d(\omega) \cdot \frac{RS}{VM}$$



## 1.2. Características de lazo de control deseado. Diseño del controlador.

$$f_{oI} := \frac{F_s}{2} \quad \omega_{oI} := f_{oI} \cdot 2 \cdot \pi \quad f_{oI} = 5 \times 10^3$$

$$\text{MargenF} := 70$$

$$\text{Fresonancia} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad \text{Fresonancia} = 459.441$$

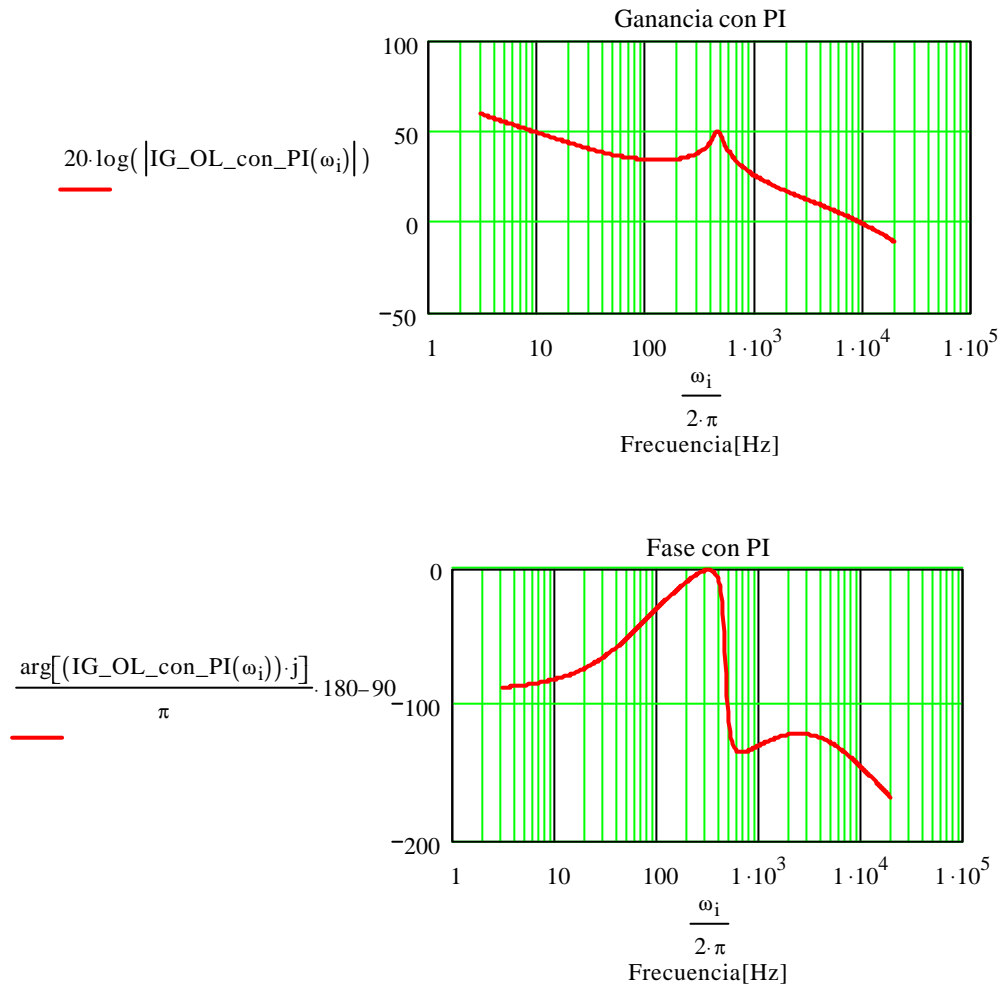
## Compensación de ganancia PI

$$f_l := \text{Fresonancia} \cdot 1.5 \quad f_l = 689.161 \quad f_{p1x} := F_s$$

La función de transferencia del PI sin tener en cuenta la ganancia ( $K_{pi}$ ) será  $G_{pi}(\omega)$

$$G_{pi}(\omega) := \left( 1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot f_l}{\omega \cdot j} \right) \left( 1 + \frac{\omega \cdot j}{2 \cdot \pi \cdot f_{p1x}} \right)^{-1}$$

$$IG_{OL\_con\_PI}(\omega) := (IG_{OL\_sin\_control}(\omega)) \cdot G_{pi}(\omega)$$



## Compensación de FASE

$$\theta := \text{MargenF} - 180 - \left( \frac{\arg(IG_{OL\_con\_PI}(\omega_{ol}) \cdot j)}{\pi} \cdot 180 - 90 \right) \quad \theta = 18.001$$

Si la compensación de fase  $\theta$  es inferior a 60 puede implementarse sin problemas en una sola etapa. Este controlador tiene un polo y un cero que estarán a diferentes frecuencias ( $f_p$  y  $f_z$ )

$$f_z := f_{oI} \cdot \sqrt{\frac{1 - \sin\left(\frac{\theta \cdot \pi}{180}\right)}{1 + \sin\left(\frac{\theta \cdot \pi}{180}\right)}} \quad f_z = 3.633 \times 10^3$$

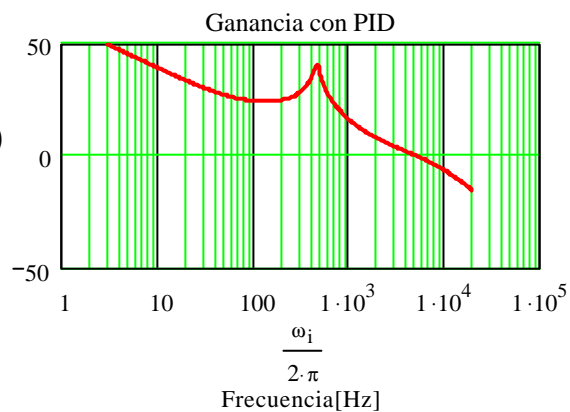
$$f_p := f_{oI} \cdot \sqrt{\left(\frac{1 - \sin\left(\frac{\theta \cdot \pi}{180}\right)}{1 + \sin\left(\frac{\theta \cdot \pi}{180}\right)}\right)^{-1}} \quad f_p = 6.882 \times 10^3$$

La ganancia de esta fase tendrá que ser tal que mantenga la frecuencia de paso por 0 ( $f_o$ ), la ganancia será denominada  $K_{pd}$  y la respuesta en frecuencia  $G_{pd}(\omega)$

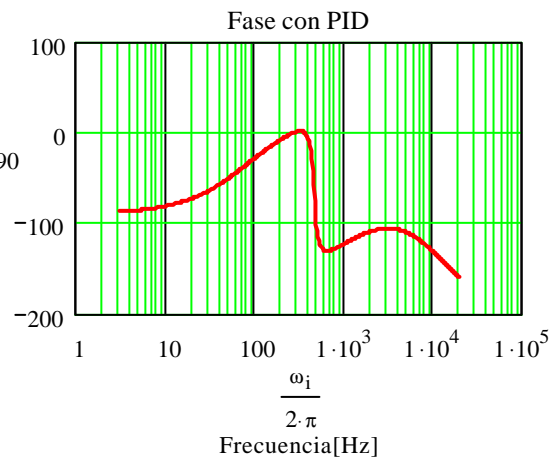
$$G_{pd}(\omega) := \frac{1 + \frac{\omega \cdot j}{2 \cdot \pi \cdot f_z}}{1 + \frac{\omega \cdot j}{2 \cdot \pi \cdot f_p}} \quad 20 \cdot \log(|G_{pd}(f_{oI} \cdot 2 \cdot \pi)|) = 2.775$$

$$K_{pd} := \text{root}(20 \cdot \log(|IG_{OL\_con\_PI}(\omega_{oI}) \cdot G_{pd}(\omega_{oI}) \cdot a|), a, .001, 10000) \quad K_{pd} = 0.319$$

$$20 \cdot \log(|IG_{OL\_con\_PI}(\omega_i) \cdot G_{pd}(\omega_i) \cdot K_{pd}|)$$



$$\frac{\arg(IG_{OL\_con\_PI}(\omega_i) \cdot G_{pd}(\omega_i) \cdot K_{pd} \cdot j)}{\pi} \cdot 180 - 90$$

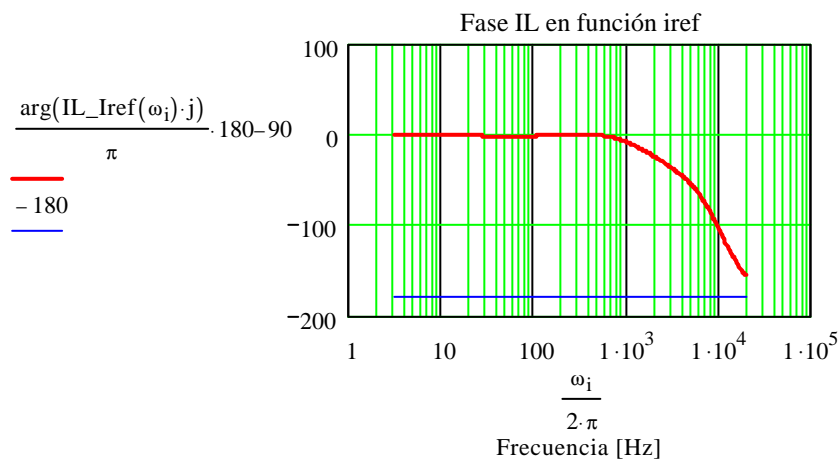
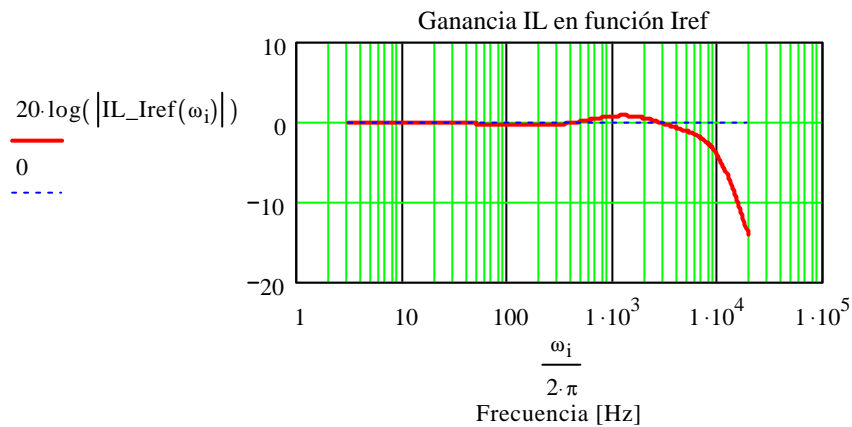


$$IG\_OL\_con\_PID(\omega) := IG\_OL\_con\_PI(\omega) \cdot Gpd(\omega) \cdot Kpd$$

$$\text{MargenFase} := 180 + \left( \frac{\arg(IG\_OL\_con\_PID(\omega_i) \cdot j)}{\pi} \cdot 180 - 90 \right) \quad \text{MargenFase} = 70$$

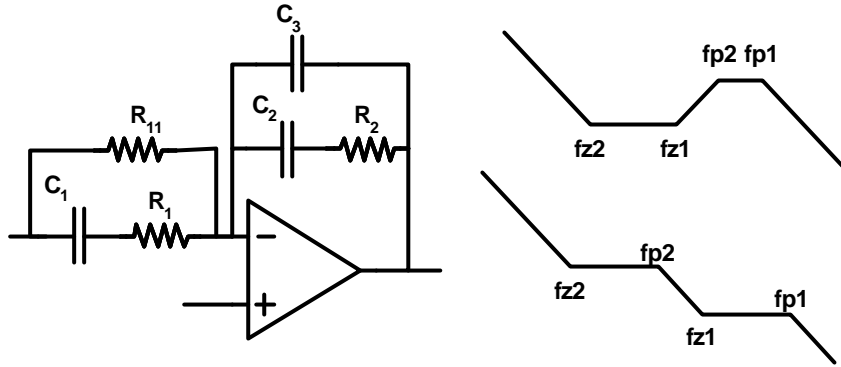
La función de transferencia que relacionará la corriente en la bobina con la señal de referencia de corriente Iref sera IL\_Iref(ω):

$$IL\_Iref(\omega) := \frac{\frac{IG\_OL\_con\_PID(\omega)}{RS}}{1 + IG\_OL\_con\_PID(\omega)}$$



## Diseño del controlador PID

Calculo de los parámetros resistencias y condensadores del filtro (controlador)



$$fz1 = \frac{1}{2\pi \cdot C_1 (R_1 + R_{11})} \quad fz2 = \frac{1}{2\pi \cdot C_2 R_2} \quad fp1 = \frac{1}{2\pi \cdot C_1 R_1} \quad fp2 = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 (C_3 \parallel C_2)}$$

Se introducen como valores iniciales:

$$C2 := 10 \cdot 10^{-9}$$

$$fz = 3.633 \times 10^3 \quad fl = 689.161 \quad fp = 6.882 \times 10^3$$

$$fz2 := \min(fz, fl) \quad fz1 := \max(fz, fl) \quad fp2 := \min(fp, fp1x) \quad fp1 := \max(fp, fp1x)$$

$$fz2 = 689.161 \quad fz1 = 3.633 \times 10^3 \quad fp2 = 6.882 \times 10^3 \quad fp1 = 1 \times 10^4$$

$$R2 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C2 \cdot fz2}$$

$$R2 = 2.309 \times 10^4$$

$$C2 = 1 \times 10^{-8}$$

$$C3 := \text{root} \left( \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R2 \cdot \frac{C2 \cdot C3}{C2 + C3}} - fp2, C3, 10^{-20}, 10^{-4} \right)$$

$$C3 = 1.113 \times 10^{-9}$$

$$R11 := \frac{1}{(C2 + C3) \cdot Kpd \cdot 2 \cdot \pi \cdot fz2}$$

$$R11 = 6.506 \times 10^4$$

$$R1 := \frac{fz1 \cdot R11}{fp1 - fz1}$$

$$R1 = 3.711 \times 10^4$$

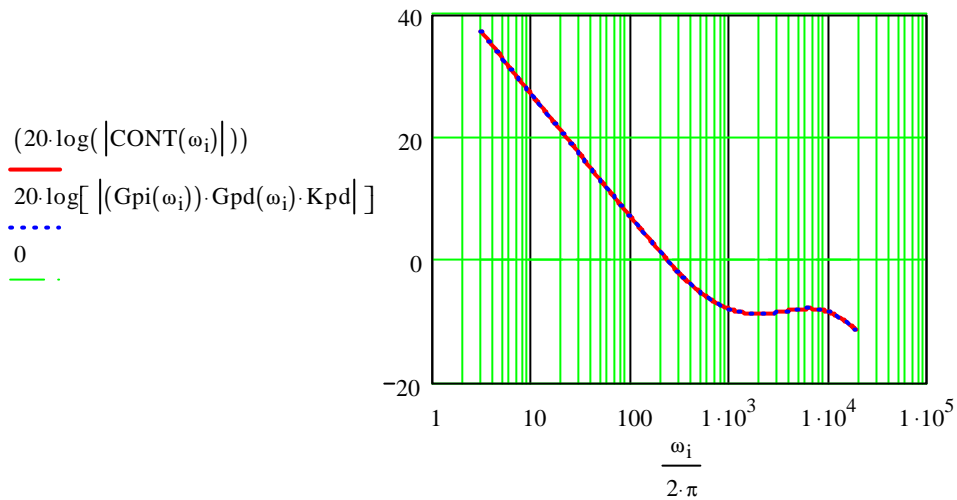
$$C1 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot fp1 \cdot R1}$$

$$C1 = 4.288 \times 10^{-10}$$



$$\text{CONT}(\omega) := \frac{[(R1 + R11) \cdot C1 \cdot (\omega \cdot j) + 1] \cdot (R2 \cdot C2 \cdot \omega \cdot j + 1)}{\left(1 + C2 \cdot \frac{C3}{C2 + C3} \cdot R2 \cdot \omega \cdot j\right) \cdot (R1 \cdot C1 \cdot \omega \cdot j + 1) \cdot \omega \cdot j} \cdot \frac{1}{(C2 + C3) \cdot R11}$$

*Comprobamos el resultado del controlador*



### 2.3. Lazo de tensión del control en modo corriente.

$$\omega_o V := \frac{\omega_o I}{3} \quad f_o V := \frac{\omega_o V}{2 \cdot \pi} \quad f_o V = 1.667 \times 10^3 \quad \text{Fresonancia} = 459.441$$

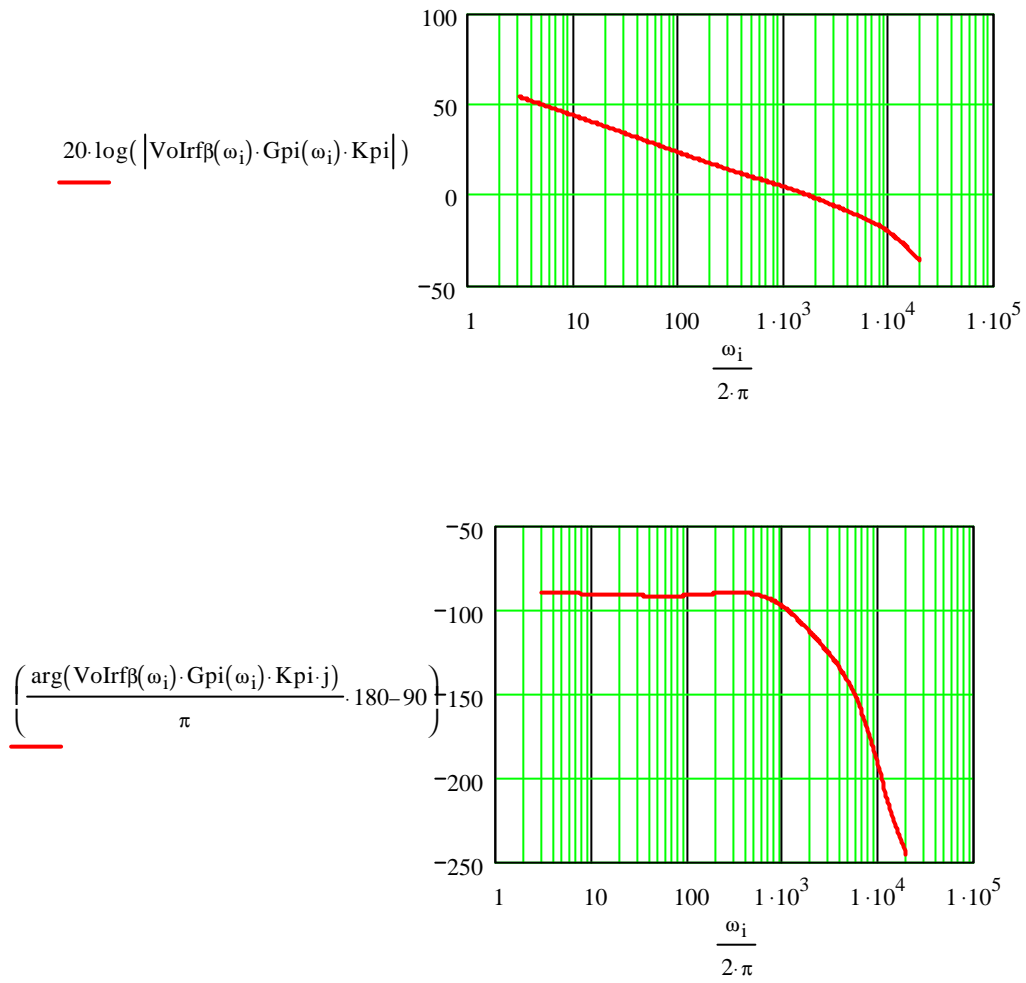
En la mayor parte de los casos será suficiente con utilizar un PI

$$\text{Volrf}\beta(\omega) := \frac{1}{1} \cdot \frac{R}{R \cdot C \cdot \omega \cdot j + 1} \cdot \beta \cdot \text{IL\_Iref}(\omega)$$

$$f_{\text{cero}} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \cdot 1 \quad G_{pi}(\omega) := \left(1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{cero}}}{\omega \cdot j}\right)$$

$$K_{pi} := \text{root}(20 \cdot \log(|\text{Volrf}\beta(\omega_o V) \cdot G_{pi}(\omega_o V) \cdot a|), a, .01, 100)$$

$$K_{pi} = 9.151$$



$$\left( \frac{\arg(\text{VoIrf}\beta(\omega_o V) \cdot \text{Gpi}(\omega_o V) \cdot \text{Kpi} \cdot j)}{\pi} \cdot 180 - 90 \right) + 180 = 70.28$$

$$C_{pi} := 10^{-8} \quad R2_{pi} := \frac{1}{C_{pi} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{cero}} \quad R1_{pi} := \frac{R2_{pi}}{K_{pi}}$$

$$R1_{pi} = 2.518 \times 10^4$$

$$R2_{pi} = 2.304 \times 10^5$$





