

# Clase 6: Control de convertidores – Modo tensión

Gestión de Energía en CI

Matías Bulacio

Universidad de Buenos Aires

Facultad de Ingeniería

1er Cuatrimestre 2025



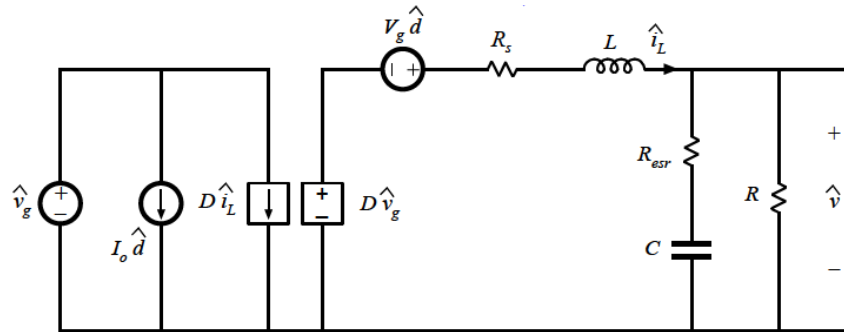
Entradas:  $v_g, i_{Load}, v_c$

Salidas:  $v_{out}, i_g$

Variables de estado:  $v, i$

# MODELO LÍNEAL DEL BUCK

Como se vio anteriormente, a partir del modelo de gran señal (no lineal), se puede obtener el modelo promediado de pequeña señal.



A partir del modelo de pequeña señal se pueden obtener todas las funciones de transferencias importantes del convertidor:

$$G_{vd}(s) = \frac{\hat{v}}{\hat{d}} \rightarrow \text{Estable}$$

Control a la salida

$$G_{vg}(s) = \frac{\hat{v}}{\hat{v}_g} \rightarrow \phi$$

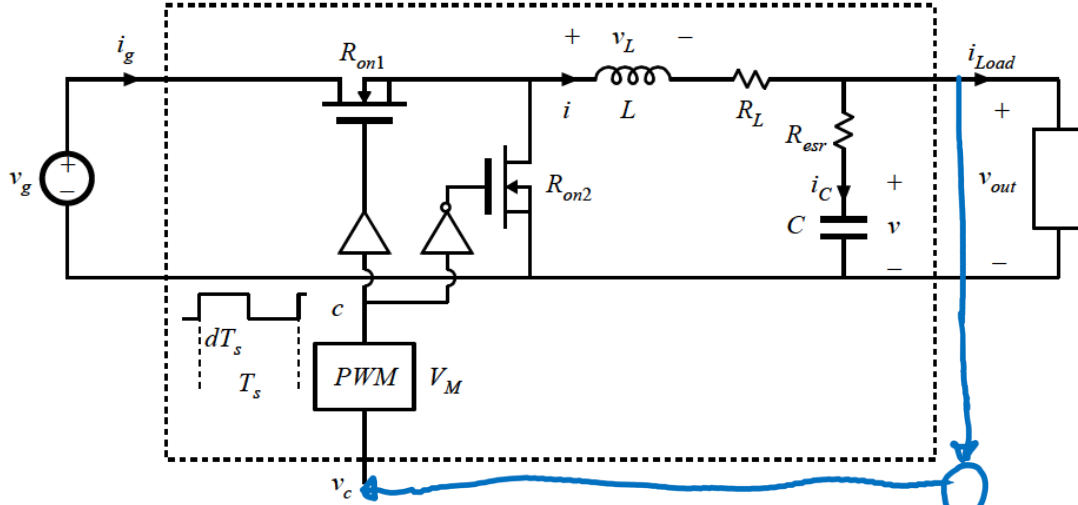
Tensión de línea a la salida

$$Z_{out}(s) = -\frac{\hat{v}}{\hat{i}_{load}} \rightarrow \phi$$

Impedancia de salida



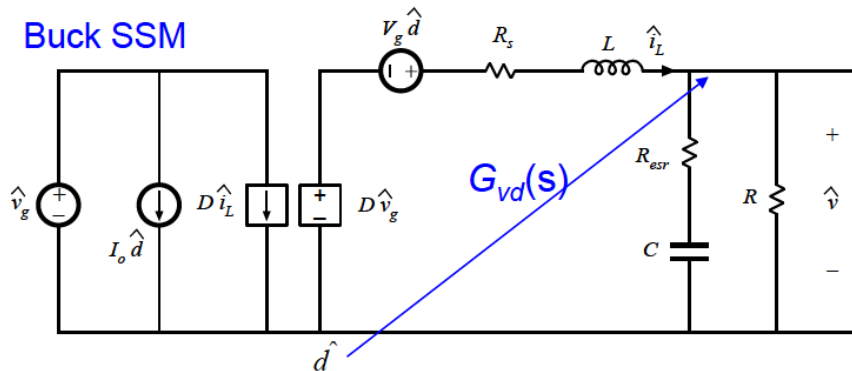
# EJEMPLO: BUCK SINCRÓNICO



- Frecuencia de conmutación:  $f_s = 2.2MHz$
- $V_{out} = 5.35V$
- $I_{out} = 0A - 1.5A$
- $V_g = 13.5V (Typ)/(12V - 24V)$
- $L = 4.7\mu H$
- $R_L = 20m\Omega$
- $R_{on1} = R_{on2} = 180m\Omega$
- $C = 22\mu F$
- $R_{esr} = 10m\Omega$
- Amplitud de la rampa PWM  $V_M = 1V$
- $V_c = 0.396V, D = 0.396$
- $V_{ref} = 0.8V$

$V_{ref} = 5.35V$

# TRANSFERENCIA CONTROL A LA SALIDA $G_{vd}$



$$G_{vd}(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{d}}$$

$$G_{vd}(s) = V_g \frac{1 + \frac{s}{w_{esr}}}{1 + \frac{1}{Q} \frac{s}{w_0} + \left(\frac{s}{w_0}\right)^2}$$

Par de polos complejos conjugados:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 15.66\text{kHz}$$

$$Q_{perdidas} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R_{esr} + R_s} = 2.2 \Rightarrow 6.85\text{dB} \quad Q_{carga} = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} > 7.7$$

$$Q = Q_{perdidas} || Q_{carga} = \frac{Q_{perdidas} Q_{carga}}{Q_{perdidas} + Q_{carga}} < 2.2 \Rightarrow 6.85\text{dB}$$

Ganancia a baja frecuencia:

$$G_{vd0} = 13.5\text{V} \Rightarrow 22.6\text{dBV}$$

Cero del ESR:

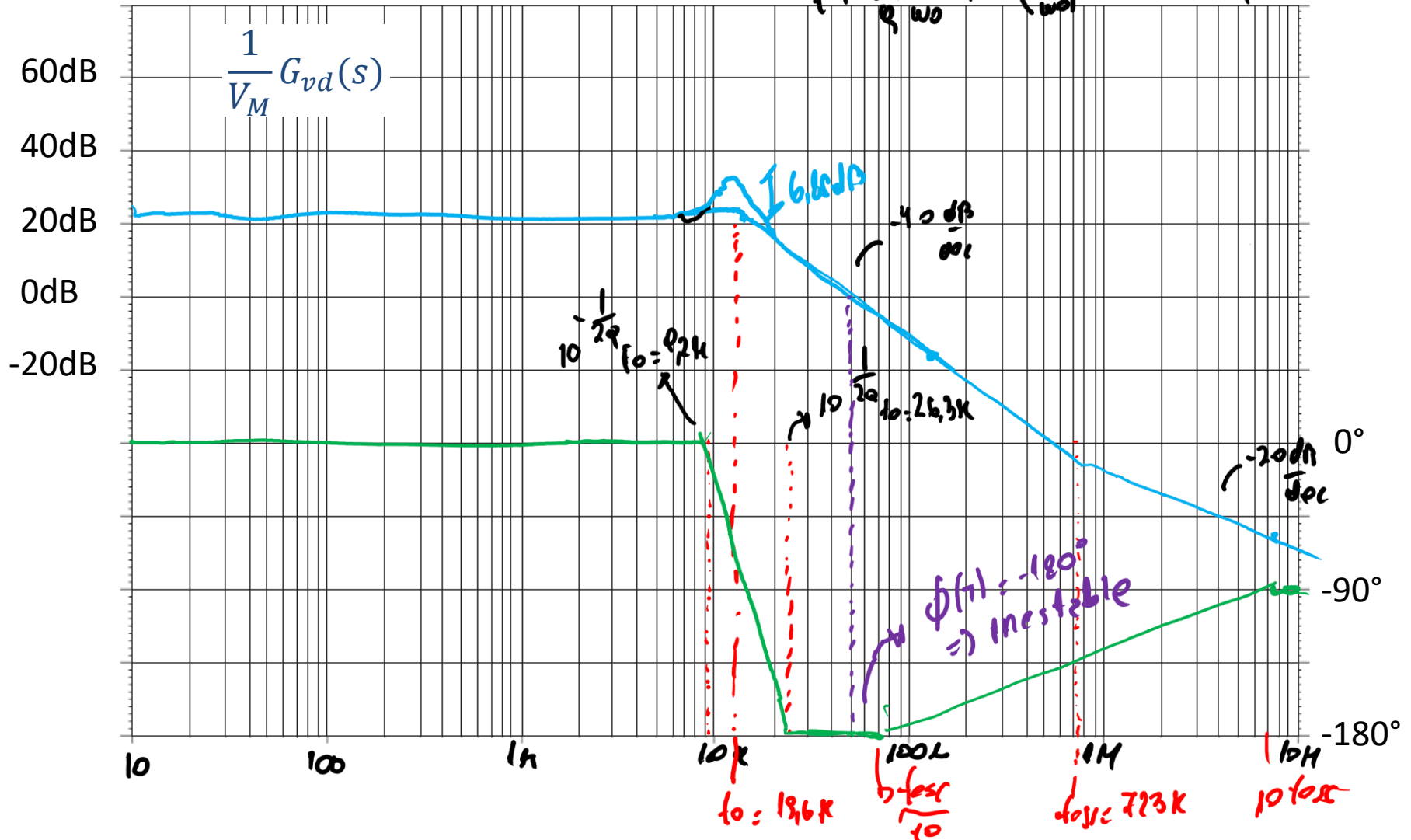
$$f_{esr} = \frac{1}{2\pi C R_{esr}} = 723.8\text{kHz}$$

$k = \frac{5.35}{1\text{A}}$

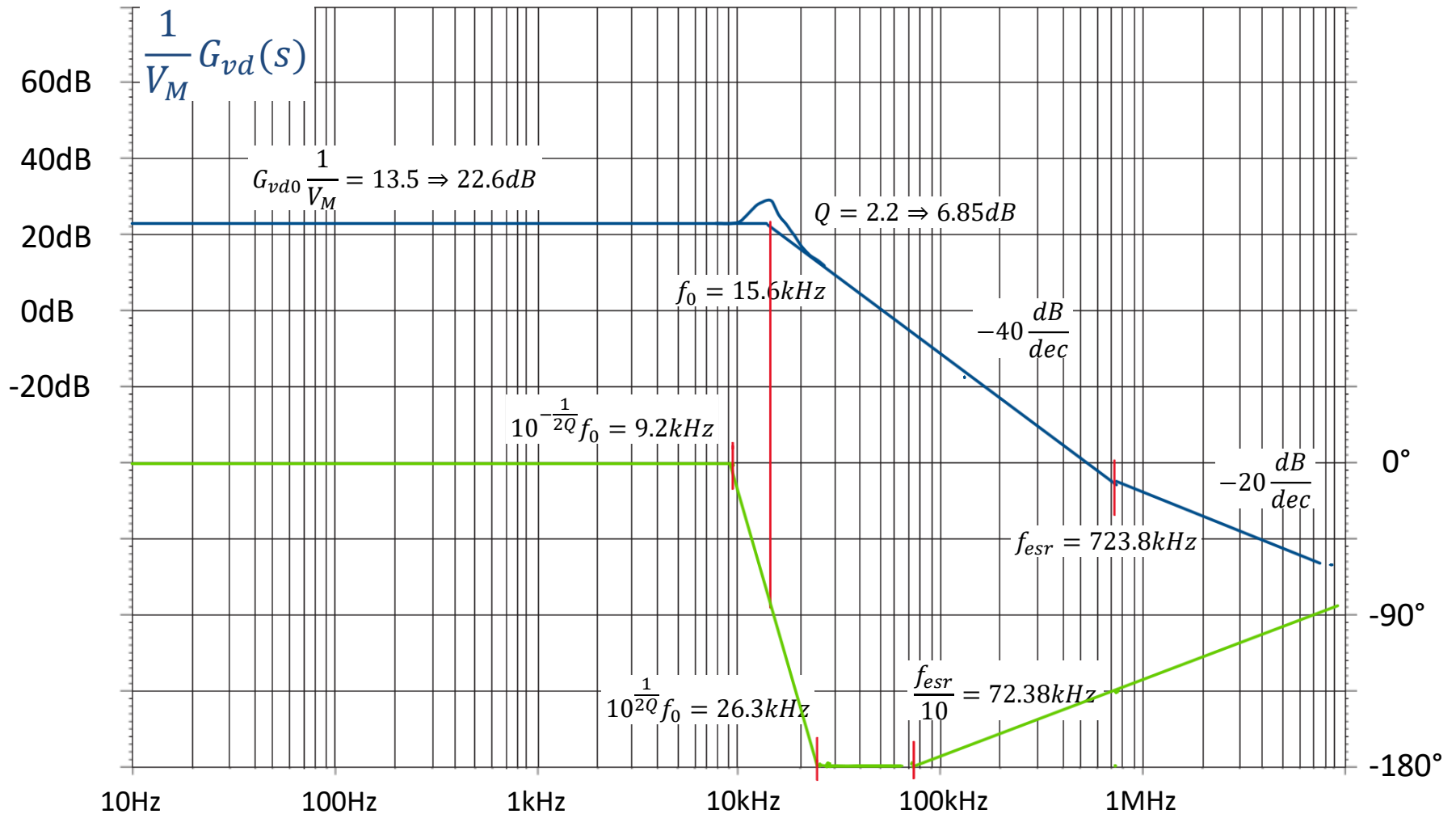
# BODE, MAGNITUD Y FASE, DE $G_{vd}$

$$G_{vd}(s) = V_g \frac{1 + \frac{s}{\omega_{gsr}}}{1 + \frac{1}{Q} \frac{s}{\omega_0} + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 \frac{1}{V_H}}$$

$f_0 = 19.66 \text{ K}$     $f_{gsr} = 773.8 \text{ K}$   
 $Q = 6.85 \text{ dB}$



# BODE, MAGNITUD Y FASE, DE $G_{vd}$



# BODE, MAGNITUD Y FASE, DE $G_{vd}$ MATLAB

```
close all;
```

```
% Parametros del conversor dc-dc Buck sincrónico
```

```
L = 4.7e-6; % inductancia
```

```
Rs = 20e-3+180e-3; % Resistencia serie RL + Ron
```

```
C = 22e-6; % Capacitancia del filtro de salida
```

```
Resr = 10e-3; % Resistencia equivalente serie del capacitor
```

```
Vg = 13.5; % Tensión de línea
```

```
R = 10e3; %4.28; % Resistencia de carga
```

```
VM = 1; % Amplitud de la rampa PWM
```

```
Vref = 0.8; % Tensión de referencia
```

```
VREG = 5.35; % Tensión de salida
```

```
H = Vref/VREG; % Ganancia del realimentador
```

```
%% Parámetros de la transferencia Gvd
```

```
wesr = 1/(C*Resr); % Cero de la esr
```

```
wo = 1/sqrt(C*L); % Frecuencia central del par de polos
```

```
Qload = R/sqrt(L/C);
```

```
Qloss = sqrt(L/C)/(Resr+Rs);
```

```
Q = Qload*Qloss/(Qload+Qloss); % Factor de Calidad Q
```

```
%% Transferencia control a la salida a lazo abierto
```

```
s = tf('s');
```

```
Gvd = (Vg/VM)*(1+s/wesr)/(1+(1/Q)*(s/wo)+(s/wo)^2);
```

```
% Bode de la magnitud y fase
```

```
fmin=10; % frecuencia mínima = 10 Hz
```

```
fmax=1e6; % frecuencia máxima = 10 MHz
```

```
% Configuración del Bode
```

```
BodeOptions = bodeoptions;
```

```
BodeOptions.FreqUnits = 'Hz'; % preferimos Hz, no rad/s
```

```
BodeOptions.Xlim = [fmin fmax]; % limites del eje de frecuencias
```

```
BodeOptions.Ylim = {[ -100,40];[ -180,0]}; % limites de los ejes de magnitud y fase
```

```
BodeOptions.Grid = 'on'; % incluir el grid
```

```
% Titulo del grafico
```

```
BodeOptions.Title.String = 'Synchronous Buck control-to-output responses';
```

```
%% Graficar magnitud y fase del Bode
```

```
Gvdfigure=figure(1);
```

```
bode(Gvd,BodeOptions,'b'); % genera las respuestas de magnitud y fase
```

```
% Las siguientes lineas son para mejorar como se ven los graficos
```

```
h = findobj(gcf,'type','line');
```

```
set(h,'LineWidth',2); % Linea mas ancha
```

```
Gvd_axis_handles=get(Gvdfigure,'Children');
```

```
axes(Gvd_axis_handles(1)); % grafico de magnitud, lineas del grid mas anchas
```

```
ax = gca;
```

```
%ax.LineWidth = 1;
```

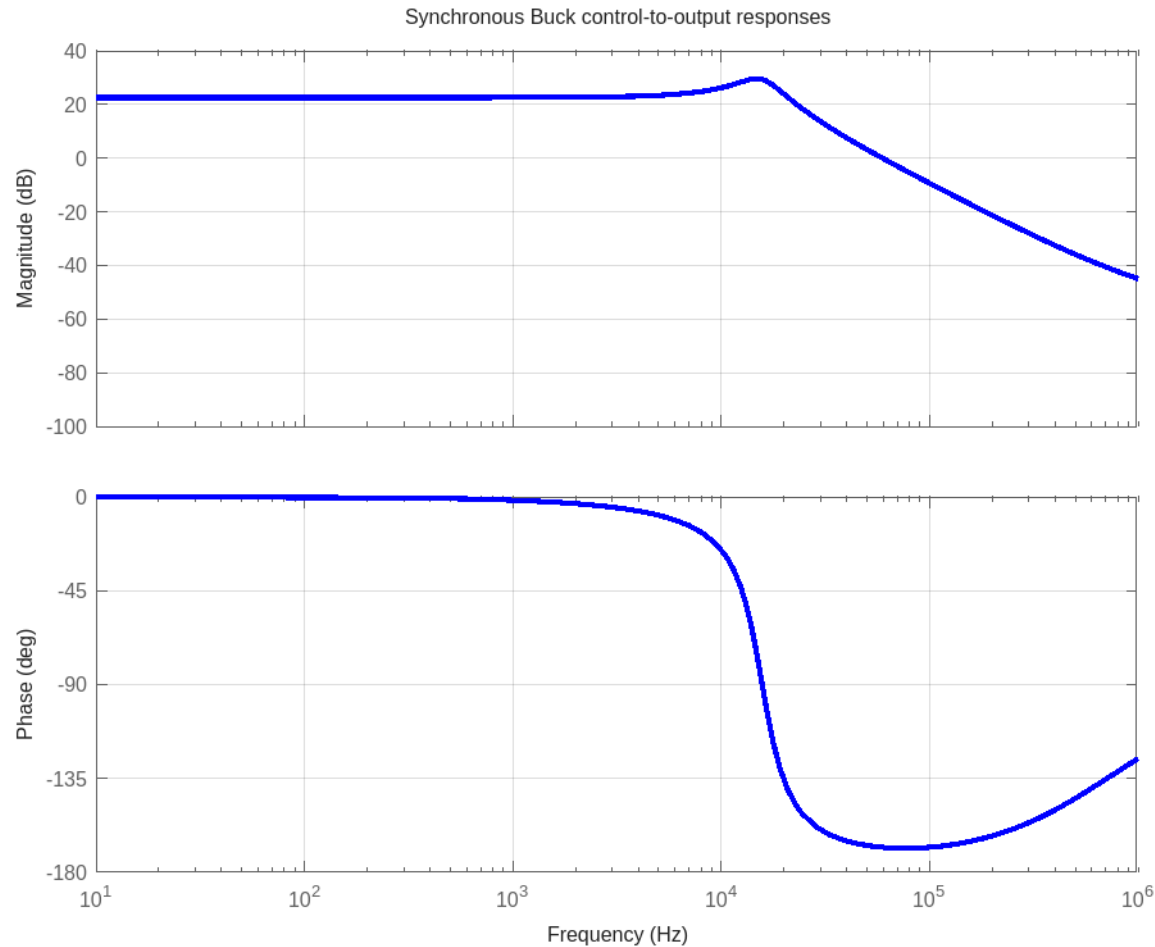
```
%ax.GridAlpha = 0.4;
```

```
axes(Gvd_axis_handles(1)); % grafico de fase, lineas del grid mas anchas
```

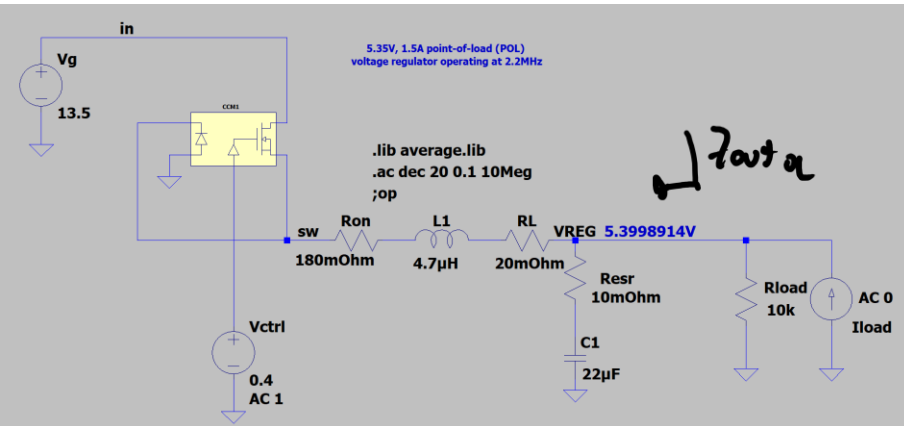
```
ax = gca;
```



# BODE, MAGNITUD Y FASE, DE $G_{vd}$ MATLAB

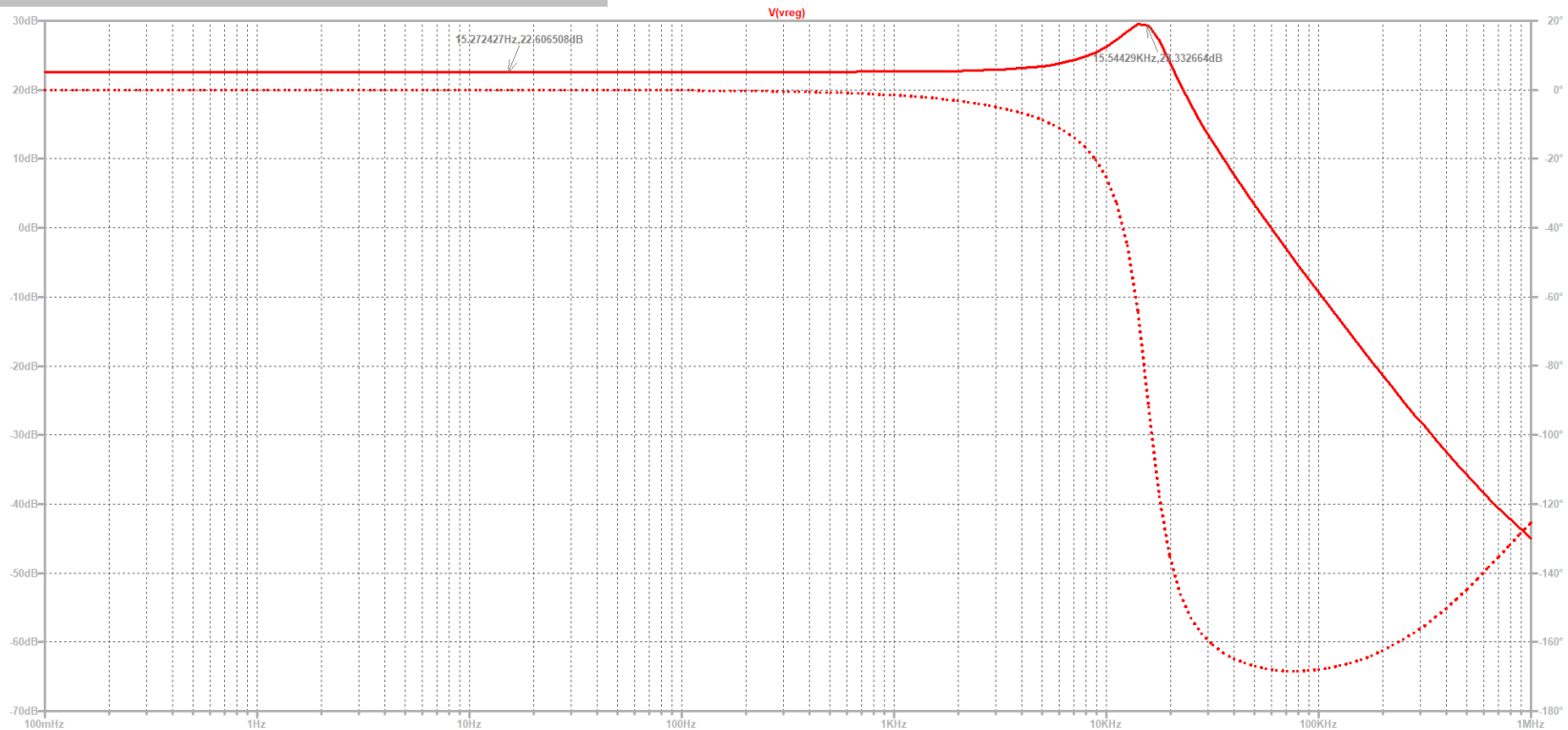


# BODE, MAGNITUD Y FASE, DE $G_{vd}$ LTSPICE

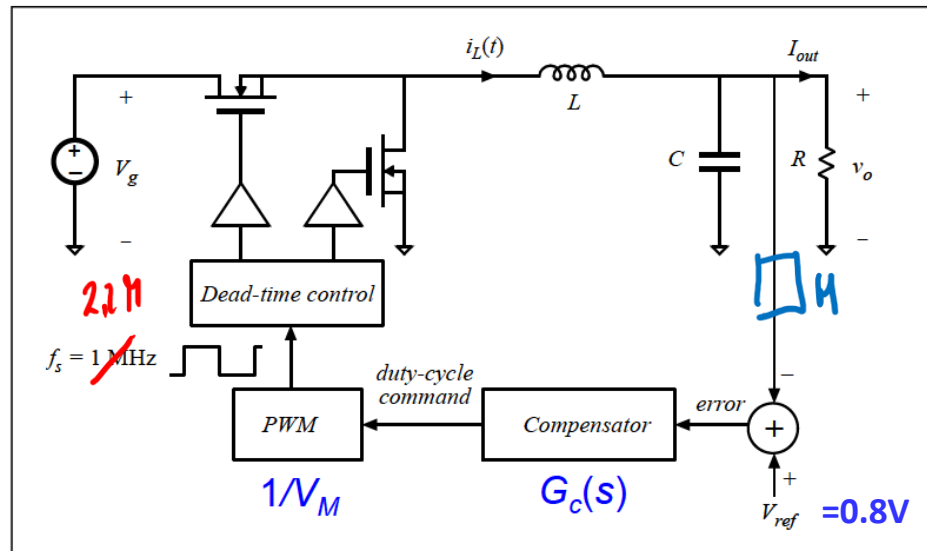


$z_{outol}$

$$z_{outcc} = \frac{z_{outol}}{1 + T}$$

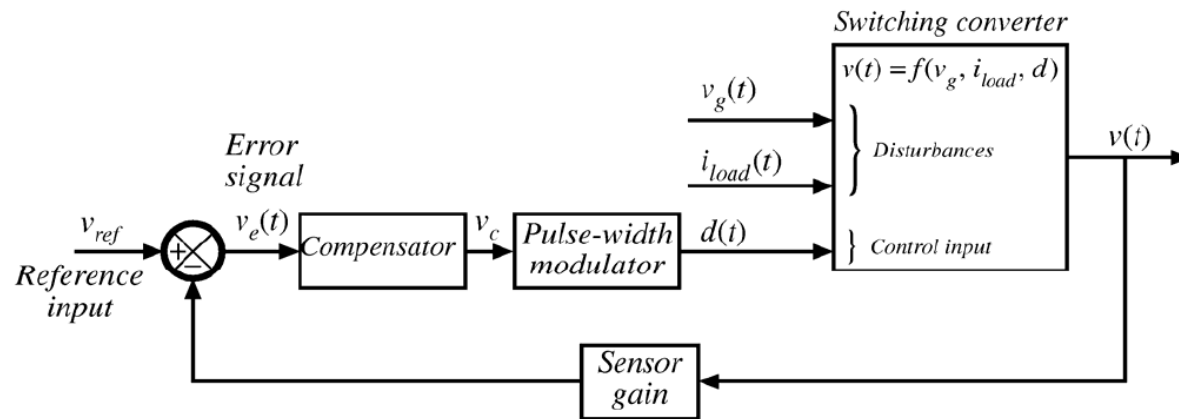


# CONTROL A LAZO CERRADO (MODO Tensión)



Point-of-Load (POL) Synchronous Buck Voltage Regulator

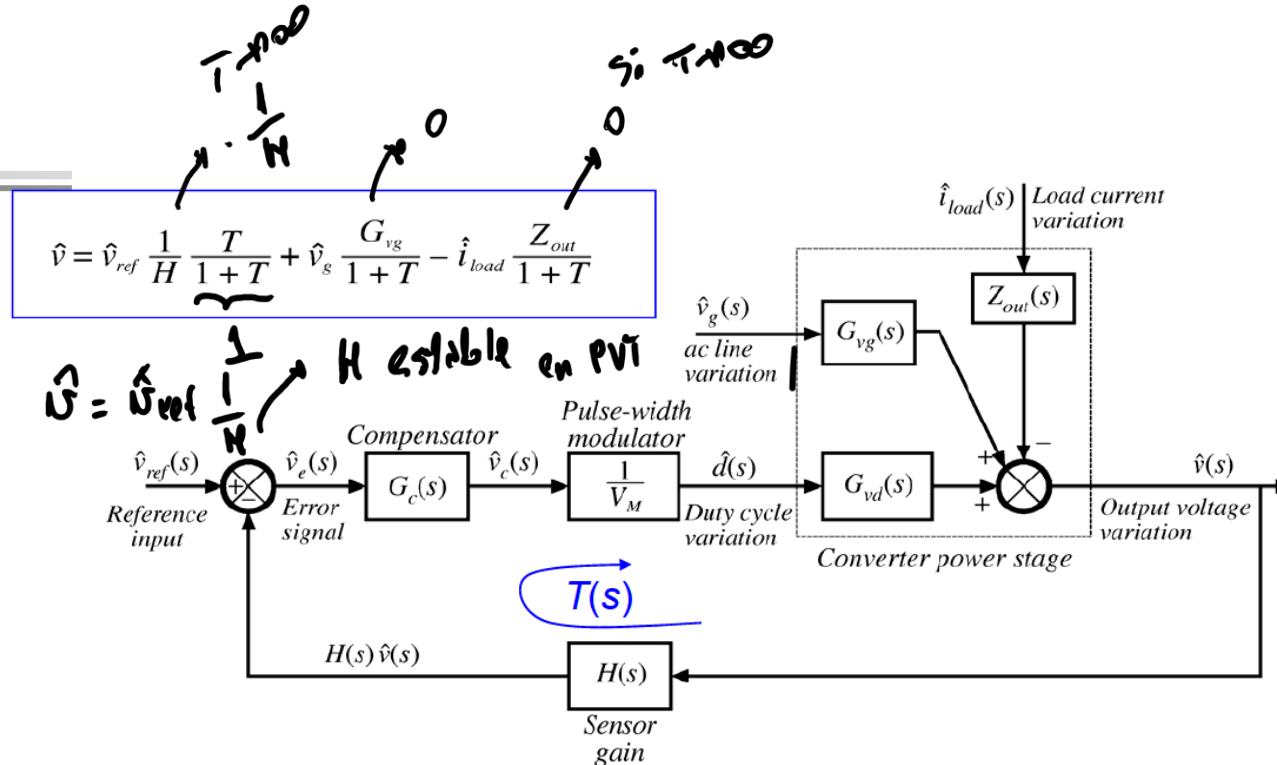
# DIAGRAMA EN BLOQUES DE UNA FUENTE CONMUTADA A LAZO CERRADO



**Objetivos del control:** Regulación precisa de la tensión de salida

- Ante perturbaciones estáticas y/o dinámicas
  - En la tensión de línea  $v_g$ .
  - En la Corriente de carga  $i_{load}$
- Ante variaciones del proceso y temperatura.

# OBJETIVOS DE DISEÑO DEL LAZO DE CONTROL



- Para lograr los objetivos de diseño del lazo de control, hacer  $T$  tan alto como sea posible en el mayor rango de frecuencias, es decir hacer la frecuencia de cruce por cero tan alta como sea posible.
- Existe un compromiso entre la estabilidad y la calidad de la respuesta a lazo cerrado.

# PRINCIPIOS BÁSICOS DEL DISEÑO DEL CONTROLADOR

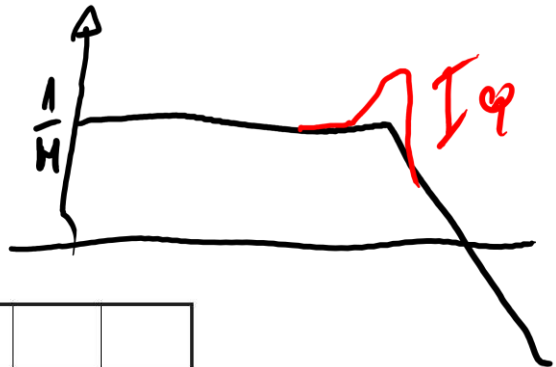
Diseñar el controlador  $G_c(s)$  para modificar la ganancia de lazo  $T(s)$  de manera tal que:

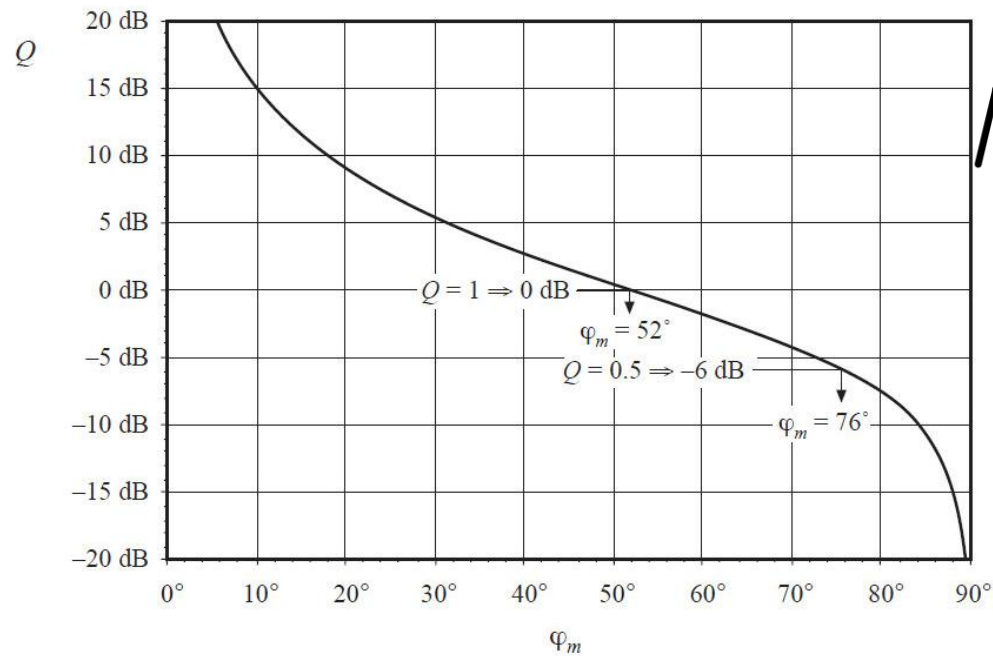
- Hacer la ganancia de lazo a bajas frecuencias  $T_0$  muy grande:
  - Para minimizar el error en estado estacionario.
- Hacer la frecuencia de cruce por cero  $f_c$  tan alta como sea posible:
  - Para maximizar el ancho de banda a lazo cerrado.
- Mantener suficiente margen de fase:
  - Margen de fase  $> 0$  para tener estabilidad.
  - Mayor margen de fase se requiere para:
    - Respuesta a lazo cerrado bien comportada (sin muchas oscilaciones)
    - Mantener la estabilidad y el buen comportamiento de la respuesta a lazo cerrado en todas las condiciones de operación y tolerancias (variaciones PVT).

# RELACIÓN ENTRE MARGEN DE FASE Y Q A LAZO CERRADO

$$h_{cl} = \frac{1}{H} \frac{T}{1+T} \frac{1}{H}$$

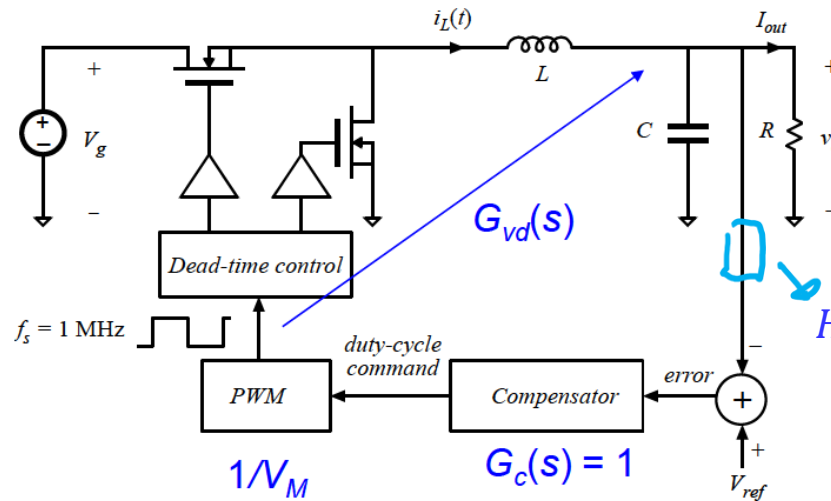
↘ Q





$$\varphi_m = \tan^{-1} \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + 4Q^4}}{2Q^4}} \quad Q = \frac{\sqrt{\cos \varphi_m}}{\sin \varphi_m}$$

# DISEÑO DEL CONTROLADOR: LAZO SIN COMPENSAR



$$V = 5,35V \quad T = 100 \mu s$$

$$G_{cl} = \frac{V}{V_{ref}} = \frac{1}{M} \frac{T}{1+T} \approx \frac{1}{4}$$

$$M=1 \Rightarrow V_{ref} = V = 5,35V$$

$$H_{sense} = \frac{V_{ref}}{V_o} = 0.149$$

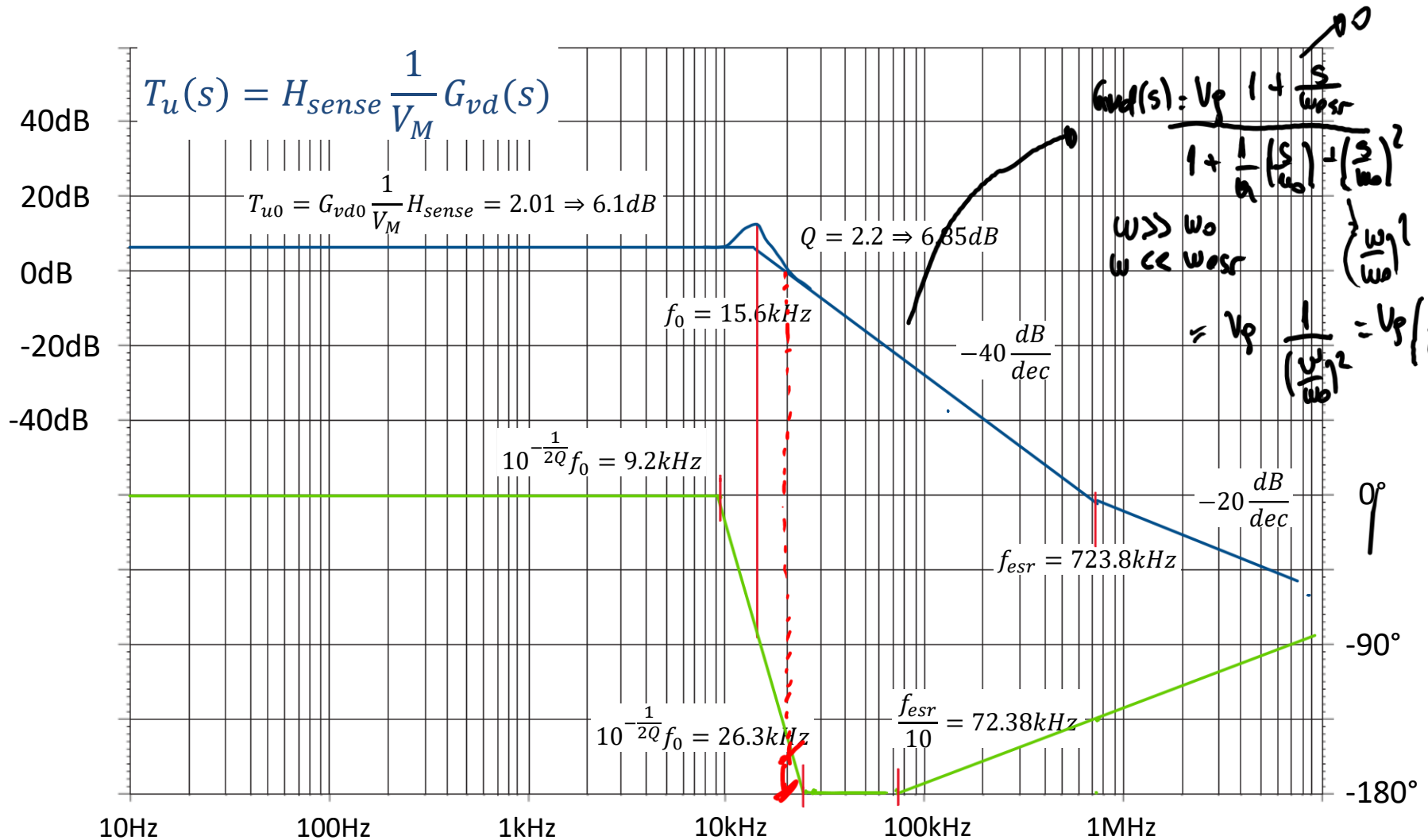
*Handwritten notes: 2,9V (pointing to V\_ref), 5,35V (pointing to V\_o)*

$$T_u(s) = H_{sense} \frac{1}{V_M} G_{vd}(s)$$

Graficar módulo y fase de  $T_u(s)$  para analizar cómo diseñar  $G_c(s)$



# BODE, MAGNITUD Y FASE, DE $T_u$



# DISEÑO DEL COMPENSADOR DE ADELANTO

$$G_c(s) = G_{c0} \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right)}$$

$\omega_z \gg \omega_p$   
 $\omega_{cc} \omega_p$

## 1. Se elige:

$$f_c = 60 \text{ kHz}$$

$$\varphi_m = 60^\circ$$

## 2. Calcular ubicación del cero y el polo:

$$f_z = f_c \sqrt{\frac{1 - \sin(\varphi_m)}{1 + \sin(\varphi_m)}} = 16.08 \text{ kHz}$$

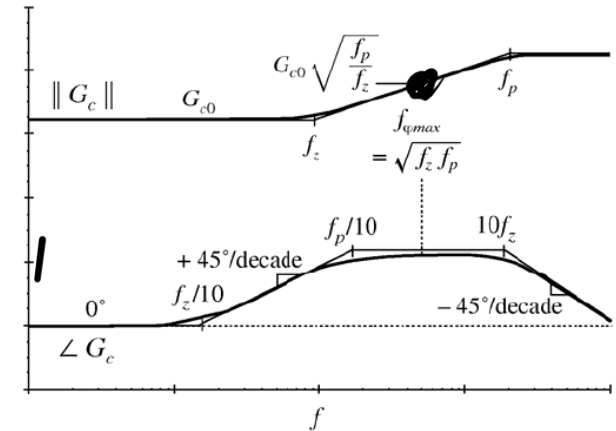
$$f_p = f_c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m}} = 223.92 \text{ kHz}$$

## 3. Calcular $G_{c0}$ para tener la frecuencia de cruce por cero elegida:

$$\underbrace{T_{u0} \left(\frac{f_0}{f_c}\right)^2}_{\text{Magnitud de } T_u \text{ a } f_c} \underbrace{G_{c0} \sqrt{\frac{f_p}{f_z}}}_{\text{Magnitud de } G_c \text{ a } f_c} = 1 \Rightarrow G_{c0} = \frac{1}{T_{u0}} \left(\frac{f_c}{f_0}\right)^2 \sqrt{\frac{f_z}{f_p}} = 1.97 \Rightarrow 5.89 \text{ dB}$$

Magnitud  
de  $T_u$  a  $f_c$

Magnitud  
de  $G_c$  a  $f_c$



$$\tau_c = \frac{1}{\omega_{cc}} \approx \frac{1}{\omega_p}$$

# COMPENSADOR DE ADELANTO

$$G_c(s) = G_{c0} \frac{\left(1 + \frac{s}{w_z}\right)}{\left(1 + \frac{s}{w_{p1}}\right) \left(1 + \frac{s}{w_{p2}}\right)}$$

$$G_{c0} = 1.97 \Rightarrow 5.89dB$$

$$f_z = 16.08kHz$$

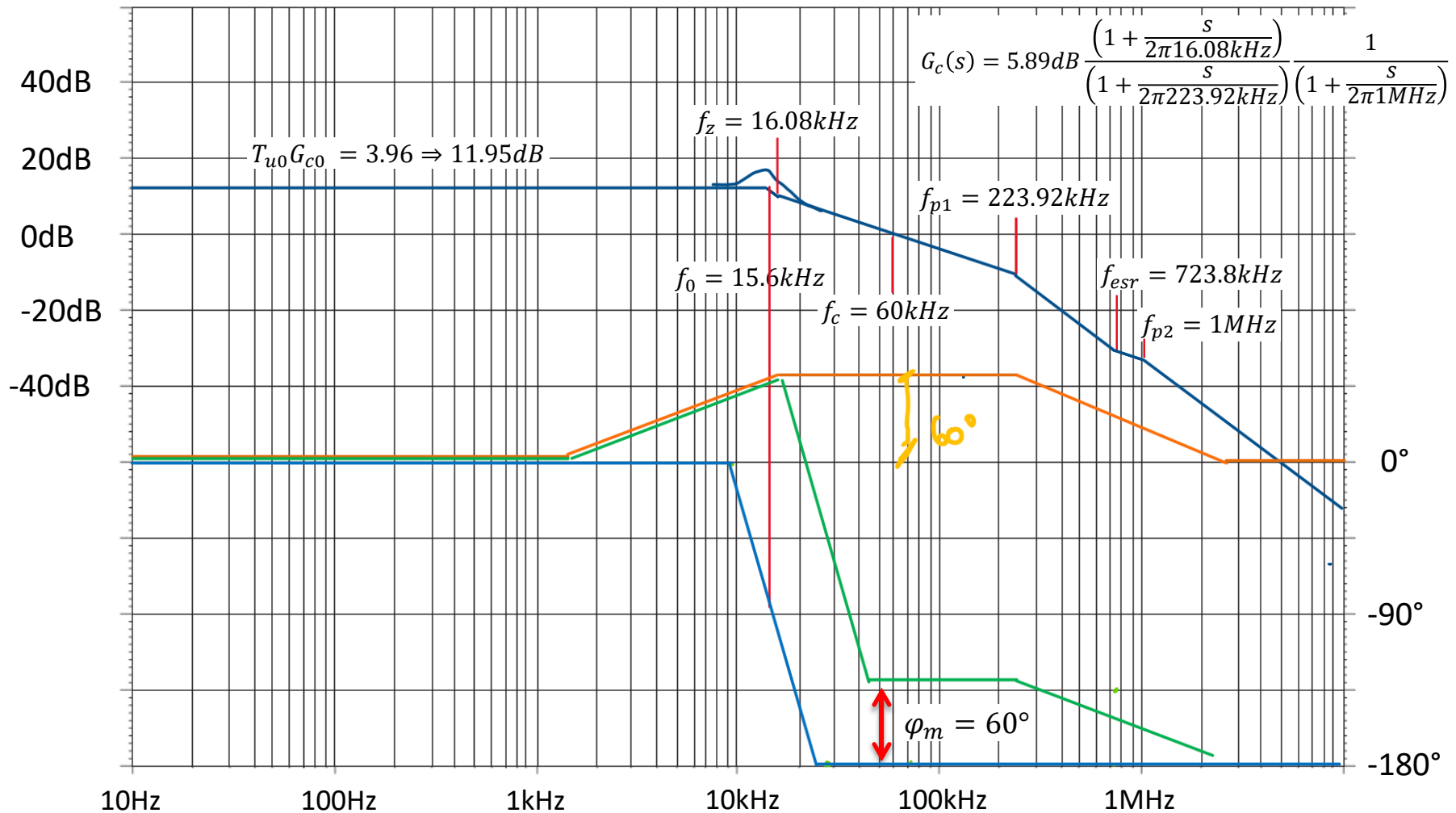
$$f_{p1} = 223.92kHz$$

$$f_c = 60kHz$$

Ganancia a alta frecuencia del compensador de adelanto:  $G_{c0} \frac{f_{p1}}{f_z} = 27.43(28.76dB)$

Se agrega un polo de alta frecuencia para tener roll-off:  $f_{p2} = 1MHz$

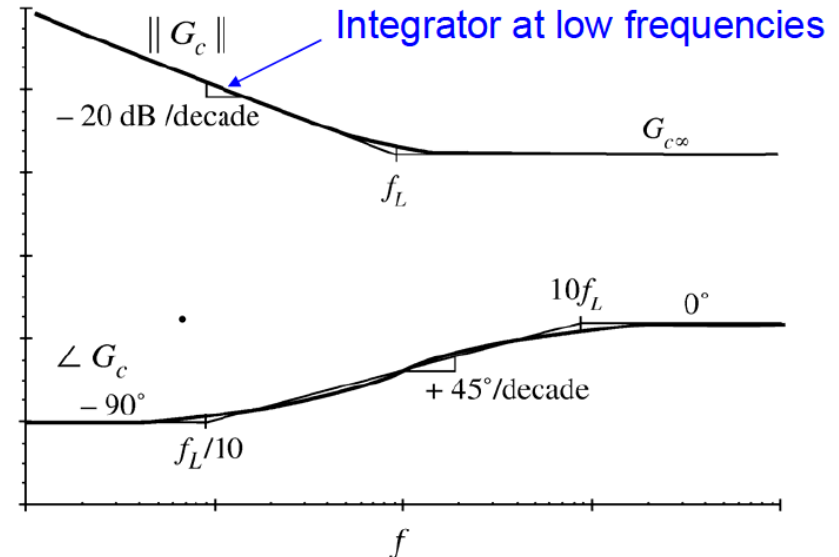
# BODE, MAGNITUD Y FASE, DE LA GANANCIA DE LAZO CON EL COMPENSADOR DE ADELANTO



# AGREGADO DEL COMPENSADOR PROPORCIONAL INTEGRAL

$$G_c(s) = G_{c\infty} \left( 1 + \frac{w_L}{s} \right) \approx \frac{G_{c\infty}}{s} (s + w_L)$$

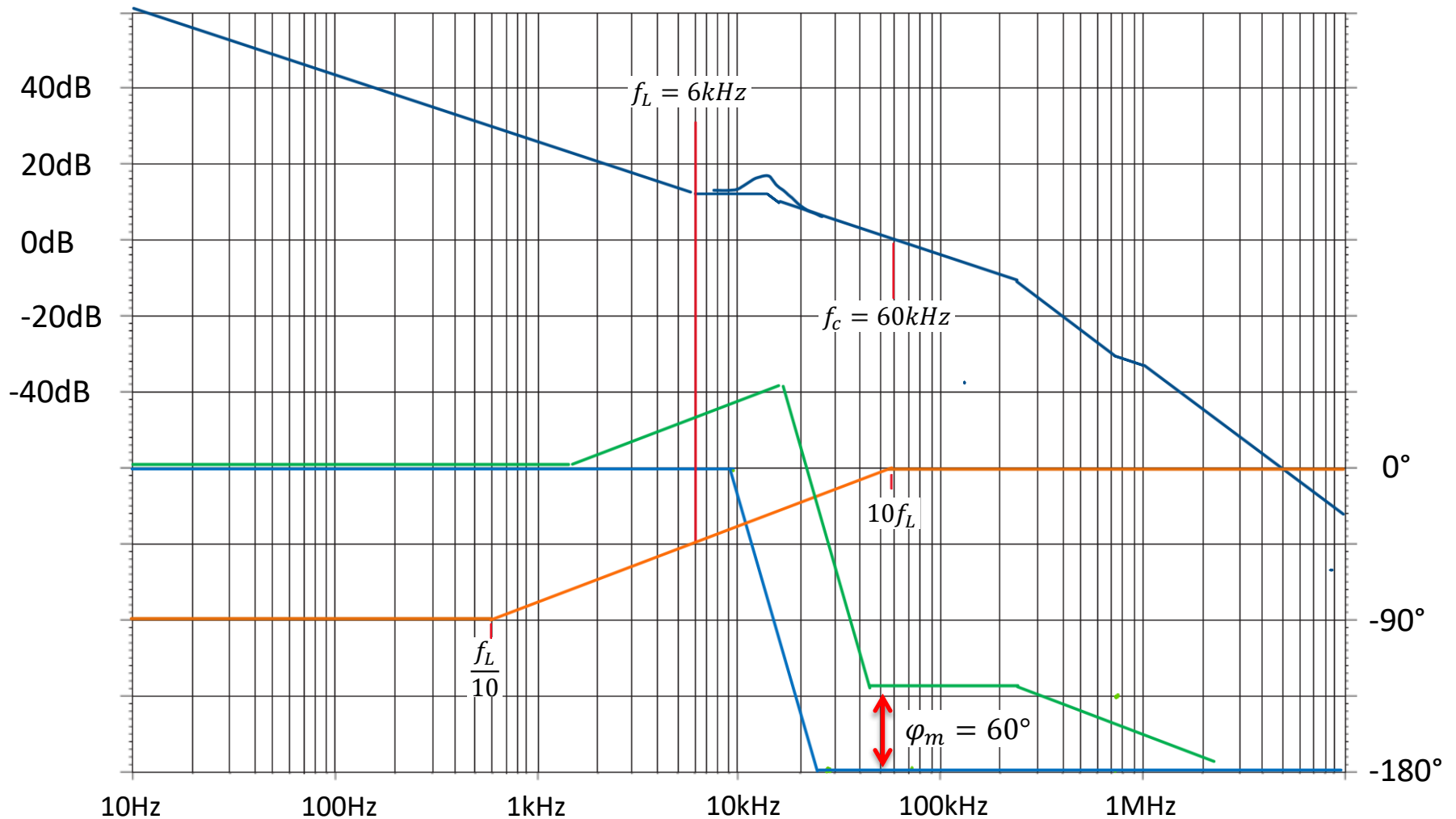
Mejora la ganancia de lazo (y por ende la regulación) a bajas frecuencias.



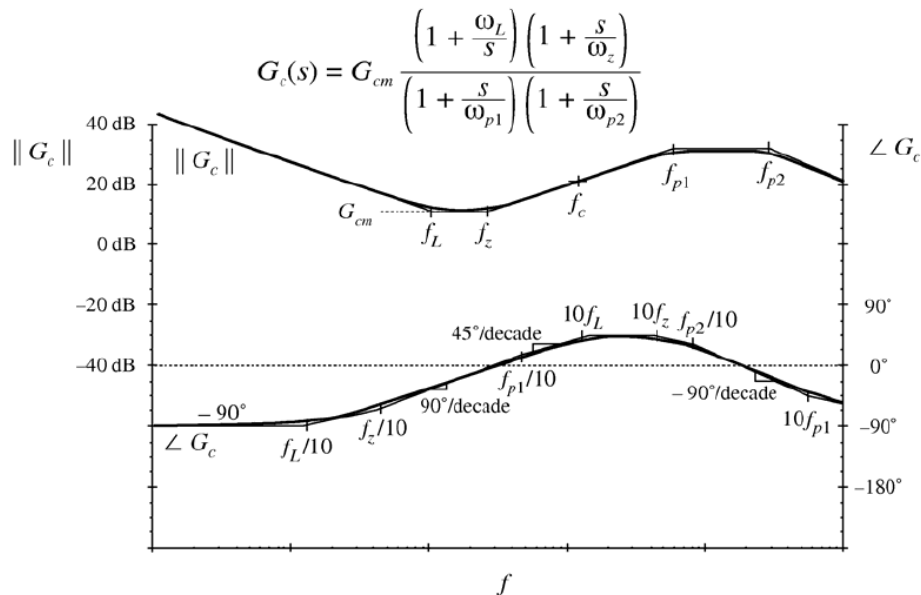
Elegir  $f_L < \frac{f_c}{10}$  de manera que el margen de fase aproximadamente se mantenga:  $f_L = 6 \text{ kHz}$

Para mantener la frecuencia de cruce por cero:  $G_{c\infty} = G_{c0} = G_{cm} = 1.97 \Rightarrow 5.89 \text{ dB}$

# BODE, MAGNITUD Y FASE, DE LA GANANCIA DE LAZO CON EL COMPENSADOR PROPORCIONAL INTEGRAL



# COMPENSADOR PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO



$$G_{c0} = 1.97 \Rightarrow 5.89dB$$

$$f_L = 6kHz$$

$$f_z = 16.08kHz$$

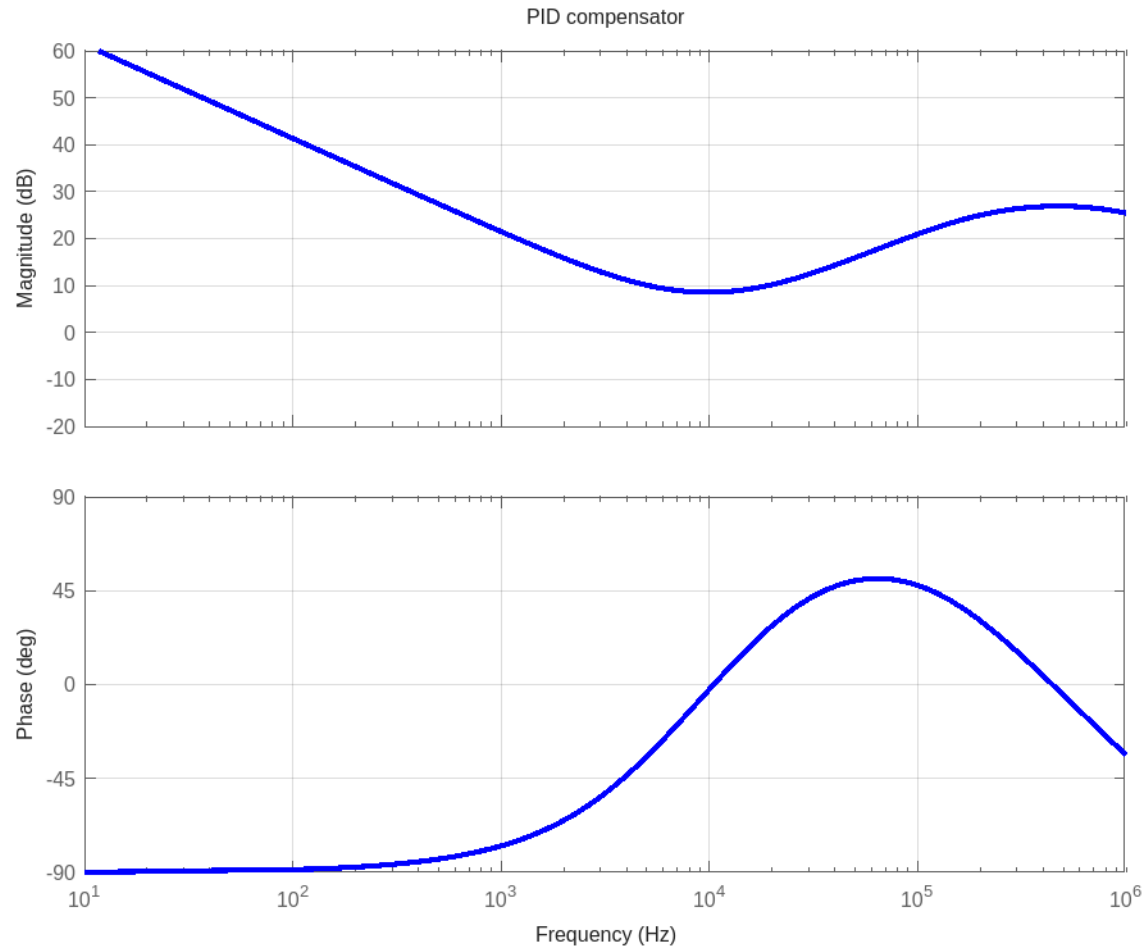
$$f_{p1} = 223.92kHz$$

$$f_{p2} = 1MHz$$

Frecuencia de cruce por cero:  $f_c = 60kHz$

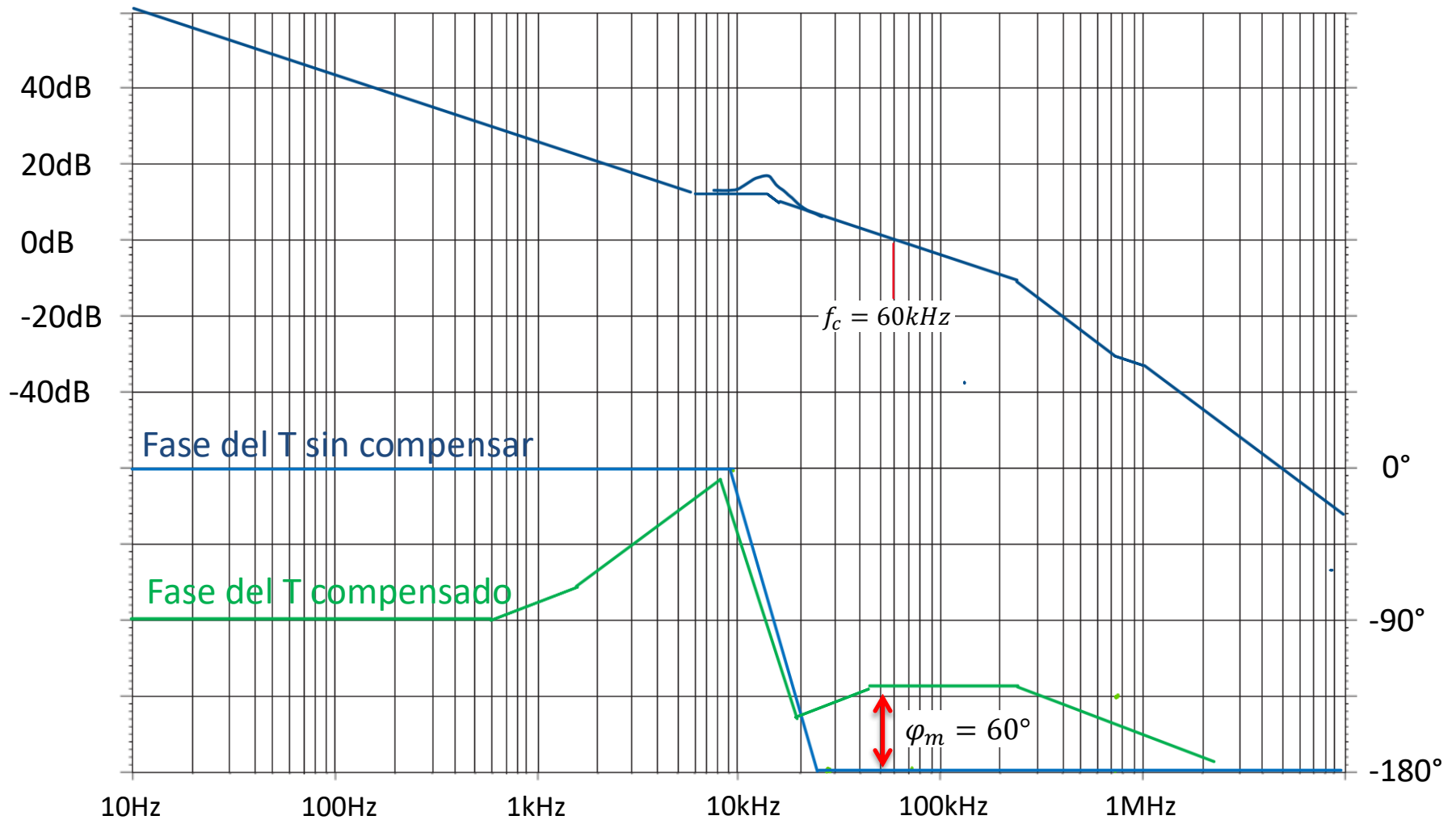
Margen de fase:  $\varphi_m = 60^\circ$

# COMPENSADOR PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO MATLAB

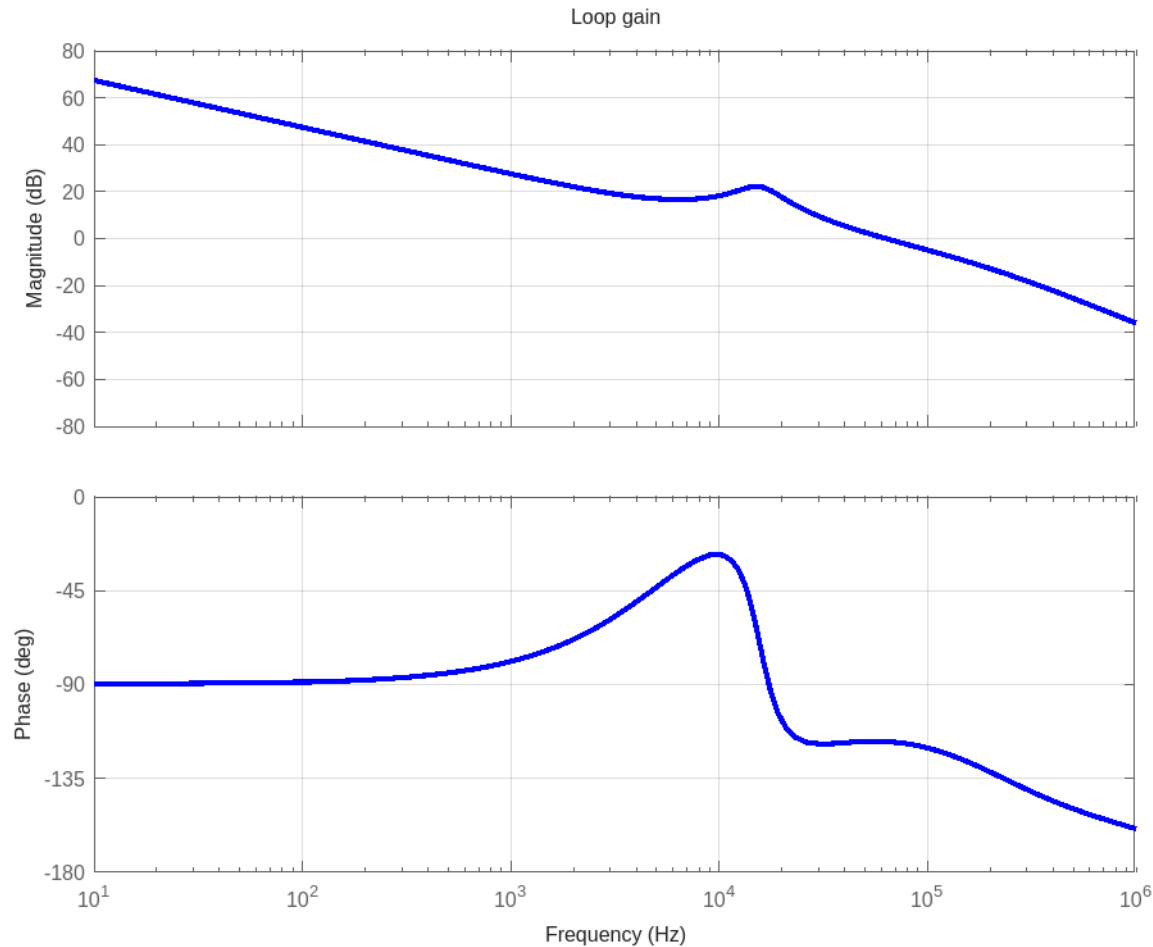




# BODE, MAGNITUD Y FASE, DE LA GANANCIA DE LAZO



# BODE, MAGNITUD Y FASE, DE LA GANANCIA DE LAZO MATLAB



# BODE, MAGNITUD Y FASE, DE LA GANANCIA DE LAZO MATLAB

%% Calcula la frecuencia de cruce por cero y el margen de fase y de ganancia

```
[Gm,Pm,Wgm,Wpm] = margin(T);
```

```
fprintf('Cross-over frequency is %6.1f Hz\n',Wpm/2/pi);
```

```
fprintf('Phase margin is %4.1f degrees\n',Pm);
```

```
fprintf('Loop-gain phase crosses -180 degrees at %6.1f Hz\n',Wgm/2/pi);
```

```
fprintf('Gain margin is %4.1f\n',Gm);
```

Command Window

New to MATLAB? See resources for [Getting Started](#).

Cross-over frequency is 63377.9 Hz

Phase margin is 62.7 degrees

Loop-gain phase crosses -180 degrees at Inf Hz

Gain margin is Inf

# BODE, MAGNITUD Y FASE, DE LA GANANCIA DE LAZO CERRADO

## MATLAB

%% Transferencia a lazo cerrado de la referencia a la salida

```
Gvr = minreal((1/H)*(T/(1+T)));
```

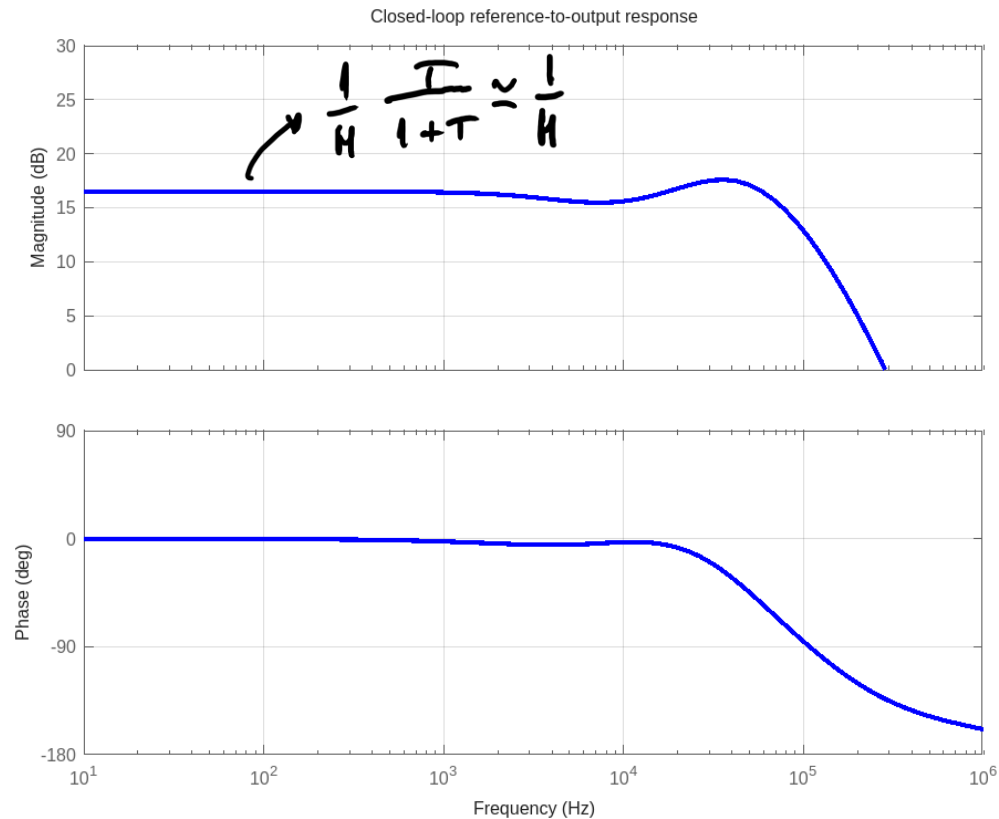
```
BodeOptions.Ylim = {[0,30];[-180,90]}; % Limites de los ejes de magnitud y fase
```

```
BodeOptions.Title.String = 'Closed-loop reference-to-output response';
```

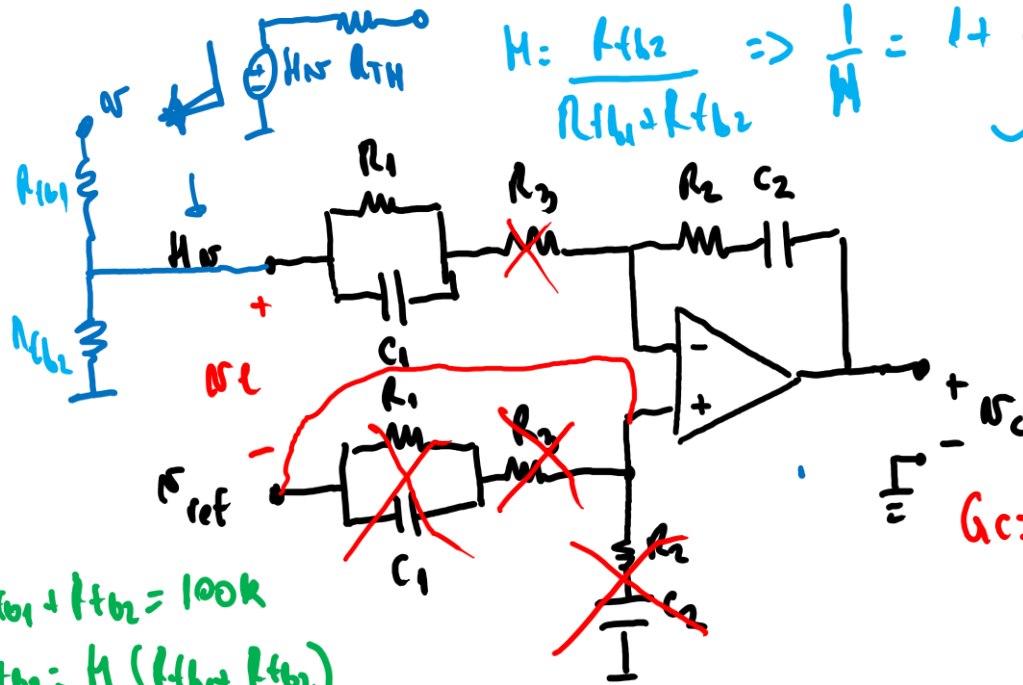
% Grafica Bode de Gc

```
Gvrfigure=figure(4);
```

```
bode(Gvr,BodeOptions,'b'); % genera respuesta de magnitud y fase
```



# DISEÑO DEL COMPENSADOR PID CON OP AMP



①  $Rfb1 + kfb2 = 100k$   
 $kfb2 = H (kfb1 + kfb2)$

⑤  $G_{c0} = \frac{R_2}{R_1} = 1.97$

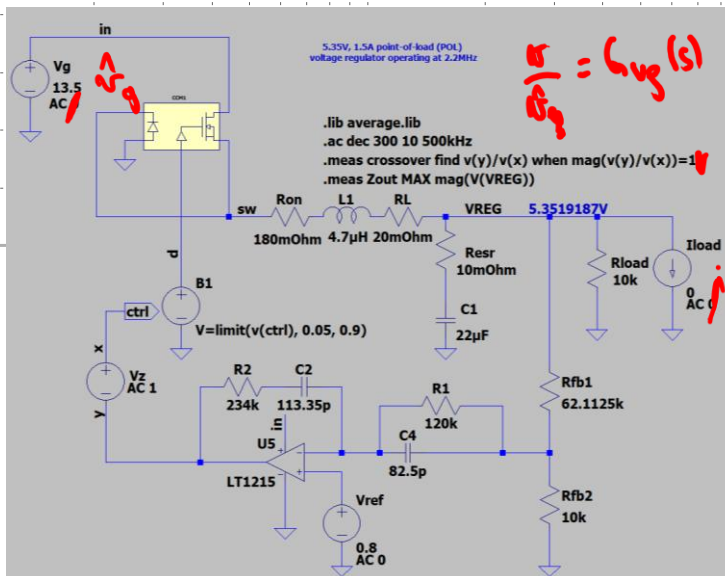
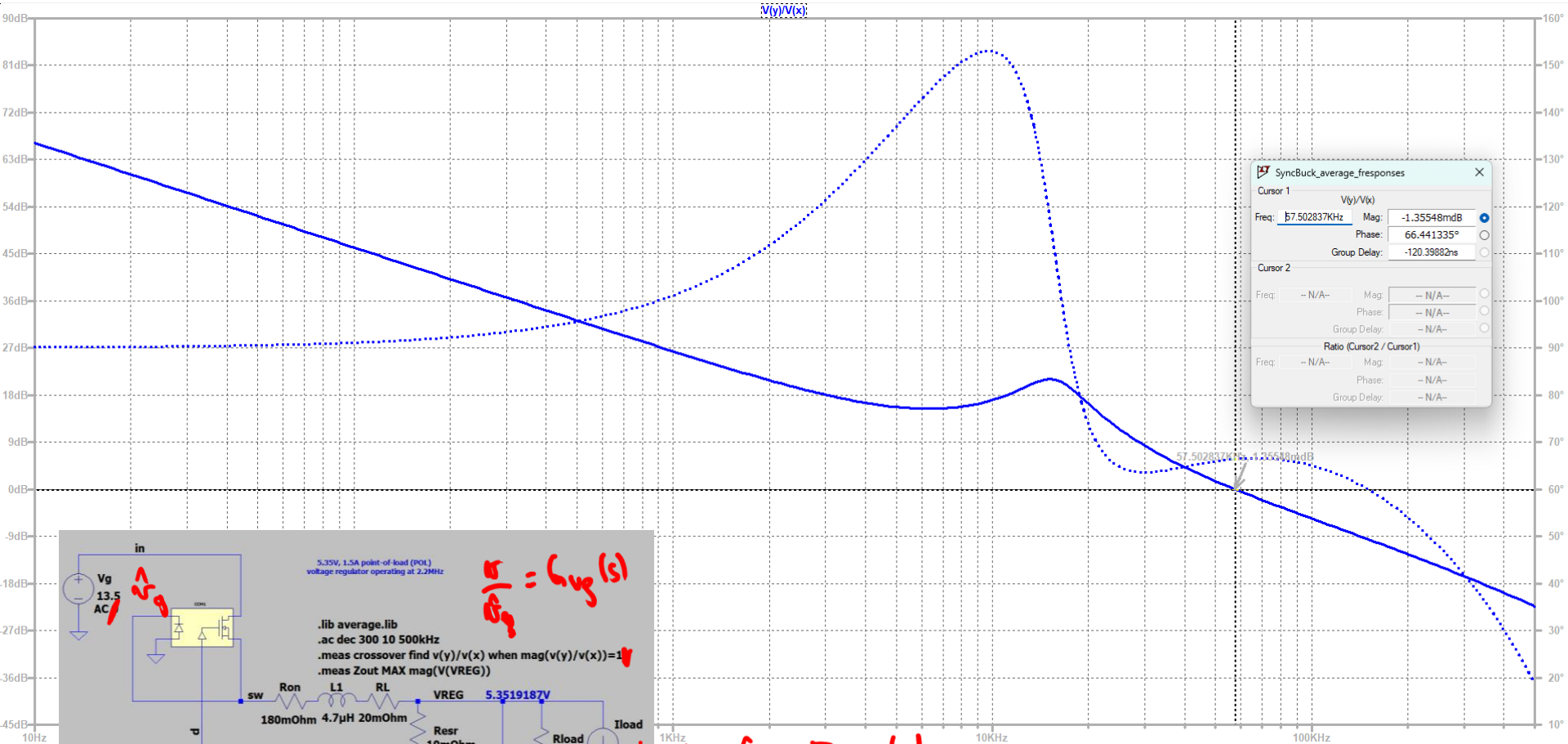
⑥  $f_L = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} = 6kHz$

②  $R_3 = R_{TH} = Rfb1 || Rfb2$

④  $f_z = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = 16.08kHz$

③  $f_p = \frac{1}{2\pi R_3 C_1} = 223.92kHz$

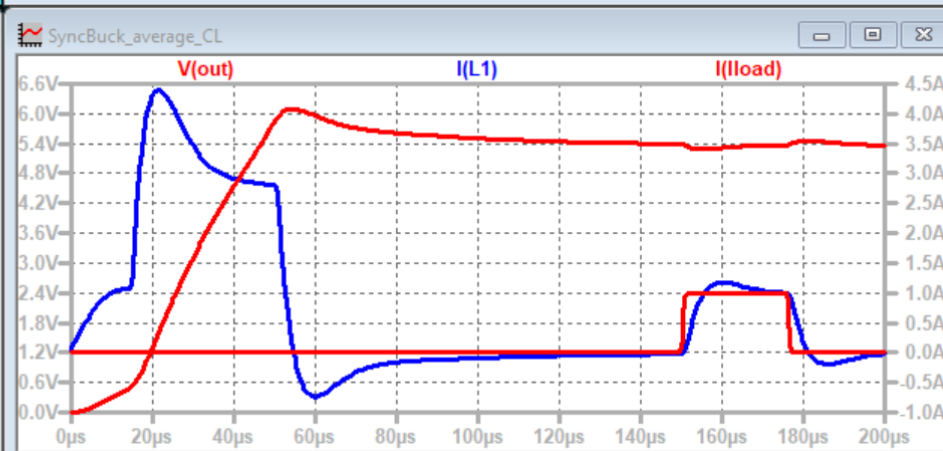
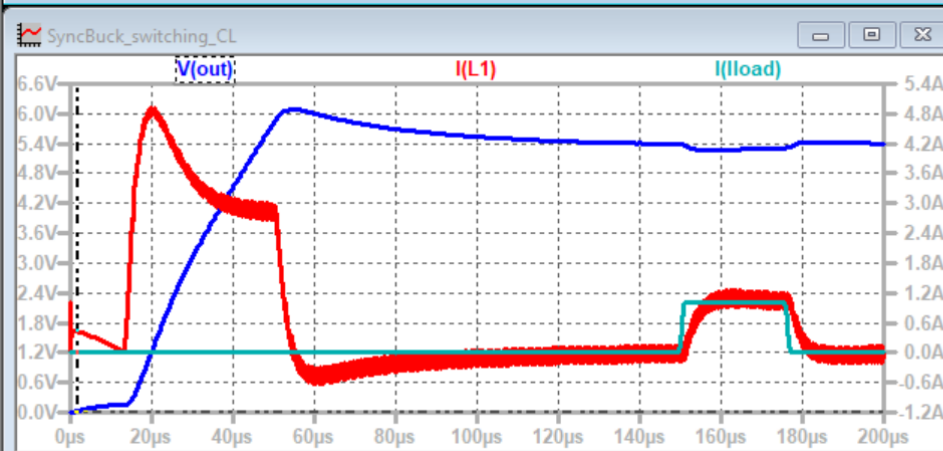
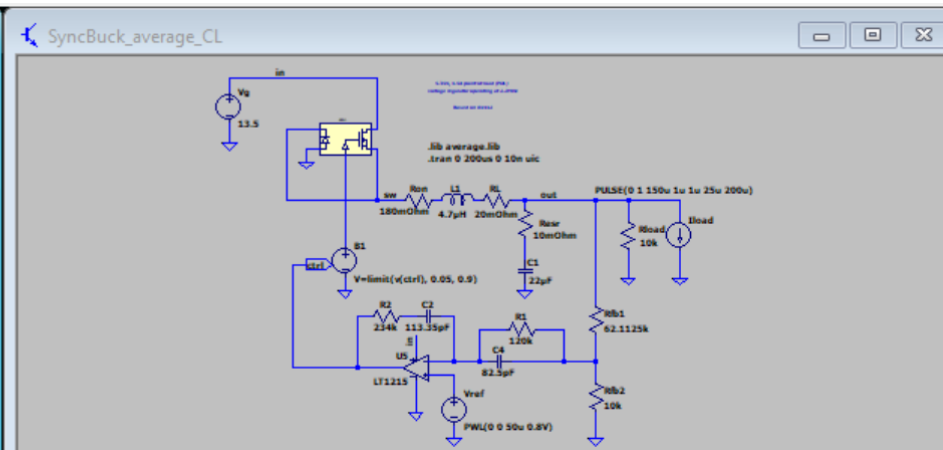
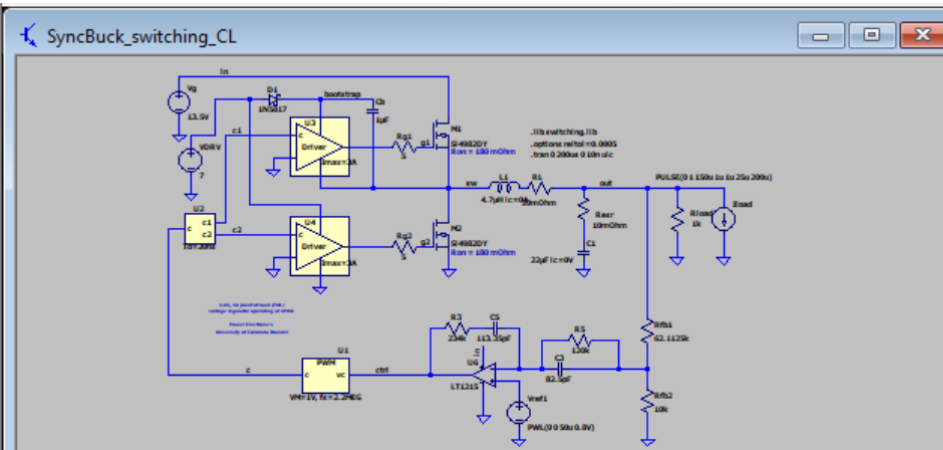
# GANANCIA DE LAZO COMPENSADA: MODELO AVERAGE EN LTSPICE



$$\frac{\hat{v}}{\hat{i}_{load}} = Z_{out}(s)$$

$$\frac{\hat{v}}{\hat{x}} = T = \frac{1}{V_n} \text{ H and } \Rightarrow \text{estab.}$$

# BUCK SINCRÓNICO A LAZO CERRADO: MODELO SWITCHING VS AVERAGE EN LTSPICE



# TP6: DISEÑO DEL BUCK SINCRÓNICO A LAZO CERRADO

1. Generar los scripts correspondientes para la caracterización del lazo y el diseño del compensador.
2. Graficar la impedancia de salida a lazo abierto y a lazo cerrado.
3. Diseñar el circuito compensador PID.
4. Implementar en Ltspice el modelo average y switching del convertidor a lazo abierto y a lazo cerrado.
5. Simular y medir la impedancia de salida máxima a lazo cerrado (comparar con lo obtenido en el script implementado).
6. Simular regulación de carga dinámica para un cambio en la carga de 0A->1A->0A y de 100mA->200mA->100mA a 1A/100us y a 1A/1us. Sacar conclusiones.