

# Diseño de un Amplificador Operacional

2024

Alumno: Kelvin Thomas Yllahuamán Bonifas

# Especificaciones

## 1. Especificaciones generales

- a. Carga:  $C_L = 20 \text{ pF}$
- b.  $V_{DD} = 1,8 \text{ V}$
- c.  $I_{ref} = 100 \text{ uA}$
- d. Consumo de potencia: Lo más bajo posible.

## 2. Lazo abierto:

- a. Ganancia DC considerando carga de red  $\beta \geq 52 \text{ dB}$
- b. Producto Ganancia BW ( $\omega_0$ )  $\geq 60 \text{ MHz}$
- c. Margen de fase  $\geq 60^\circ$

## 3. Lazo cerrado

- a. Ganancia DC =  $20\text{dB} \pm 0,3\text{dB}$ . Usar  $R1 = 500\Omega$
- b. Tensión de modo común  $V_{cm} = 0,8 \text{ V}$
- c. Producto Ganancia BW ( $\omega_0$ )  $\geq 60 \text{ MHz}$
- d. Distorsión Armónica Total (THD)  $\leq -55 \text{ dB}$  @  $V_{out,pp} = 1,2 \text{ V}$
- e. Ruido Total Salida  $\leq 250 \mu\text{V}$

## Condiciones de simulación:

- f. Corner TT: temp=  $65^\circ\text{C}$   $V_{DD} = 1,8 \text{ V}$   $I_{ref} = 100 \text{ uA}$   $V_{cm} = 0,8 \text{ V}$
- g. Corner FF: temp=  $0^\circ\text{C}$   $V_{DD} = 1,98 \text{ V}$   $I_{ref} = 105 \text{ uA}$   $V_{cm} = 1,98 \text{ V}$
- h. Corner SS: temp=  $125^\circ\text{C}$   $V_{DD} = 1,62 \text{ V}$   $I_{ref} = 95 \text{ uA}$   $V_{cm} = 1,62 \text{ V}$

# Análisis Teórico

Incluir un breve análisis teórico (4 diapositivas máximo) del OpAmp.

El análisis debe incluir:

- Etapas del OpAmp y su ganancia.
- Ganancia total del OpAmp.
- Análisis de Polos y Ceros:
  - Características de la ubicación inicial de los polos y ceros.
  - Red de compensación y sus efectos.
- Pasos a seguir para llevar a cabo el diseño del OpAmp. De ser necesario, agregar los cálculos que hagan falta.

# Análisis Teórico

Datos:

$$f_o = 60 \text{ MHz}, C_L = 20 \text{ pF}$$

Cálculos

Por experiencia  $f_{p2} > 2,5 f_o$

Usamos  $f_{p2} = 4,2 f_o$

$$w_{p2} = g_m / C_L$$

$$g_m = 0.031667$$

Buscamos un  $g_m/I_d$  alto para tener  $V_{gs}$  bajo y  $V_{dsat}$  bajo para evitar distorsión armónica

Cálculos para segunda etapa

$$\text{Usamos } g_m/I_d = 17,4$$

$$0,031667 / 17,4 = I_d2$$

$$I_d2 = 1,819 \text{ mA}$$

Cálculos primera etapa

$$I_d1 = 1,2 \text{ mA}$$

$$g_m/I_d = 14, \text{ Id por c/rama} = 0,6 \text{ mA}$$

$$g_m1 = 0.0084$$

## Análisis Teórico

- Para los espejos de corriente se usó un W alto para bajar el vdsat y evitar distorsión armónica,
- Los L de los espejos como de M6 fueron determinados para tener un ro mayor y cumplir con la ganancia requerida.
- Para la compensación:

$$\omega_0 = gm_1/Cc$$

$$\omega_0 = 8,4 \text{ mS/Cc}$$

$$Cc = 22,2 \text{ pF aprox}$$

$$WP_2 = (r_o6 || r_o7) \times CL_1$$

$$\omega_p = 3.14 \times 10(7) \text{ rad/s}$$

$$WP_2 = (r_o2 || r_o3) \times C_{sg6}$$

$$WP_1 \approx 5.77 \times 10(9) \text{ rad/s}$$

# Análisis Teórico

- Ganancias:

Primera etapa:

$$Av_1 = gm_1 * (r_o1 // r_o3)$$

De la simulación:

$$Av_1 = 0,008126 * (2271//26120)$$

$$Av_1 = 16,99.$$

Segunda etapa:

$$Av_2 = gm_2 * (r_o6 // r_o7)$$

De la simulación:

$$Av_2 = 0,0315 * (1994//7849)$$

$$Av_2 = 50,0877$$

$$Av_{total} = Av_1 * Av_2 = 850,99 = \boxed{58,6 \text{ dB}}$$

# Esquemático

Esquemático del OpAmp con disposición de los transistores y sus nombres.

```
name=SIMULATION only_toplevel=false
value="

* Circuit Parameters

.param w_mirror_1 = 65
.param l_mirror_1 = 0.6
.param m_mirror_1 = 10

.param w_par = 41
.param l_par = 0.49
.param m_par = 48

.param w_mirror_2 = 40
.param l_mirror_2 = 1.4
.param m_mirror_2 = 8
.param cc = 13.25p

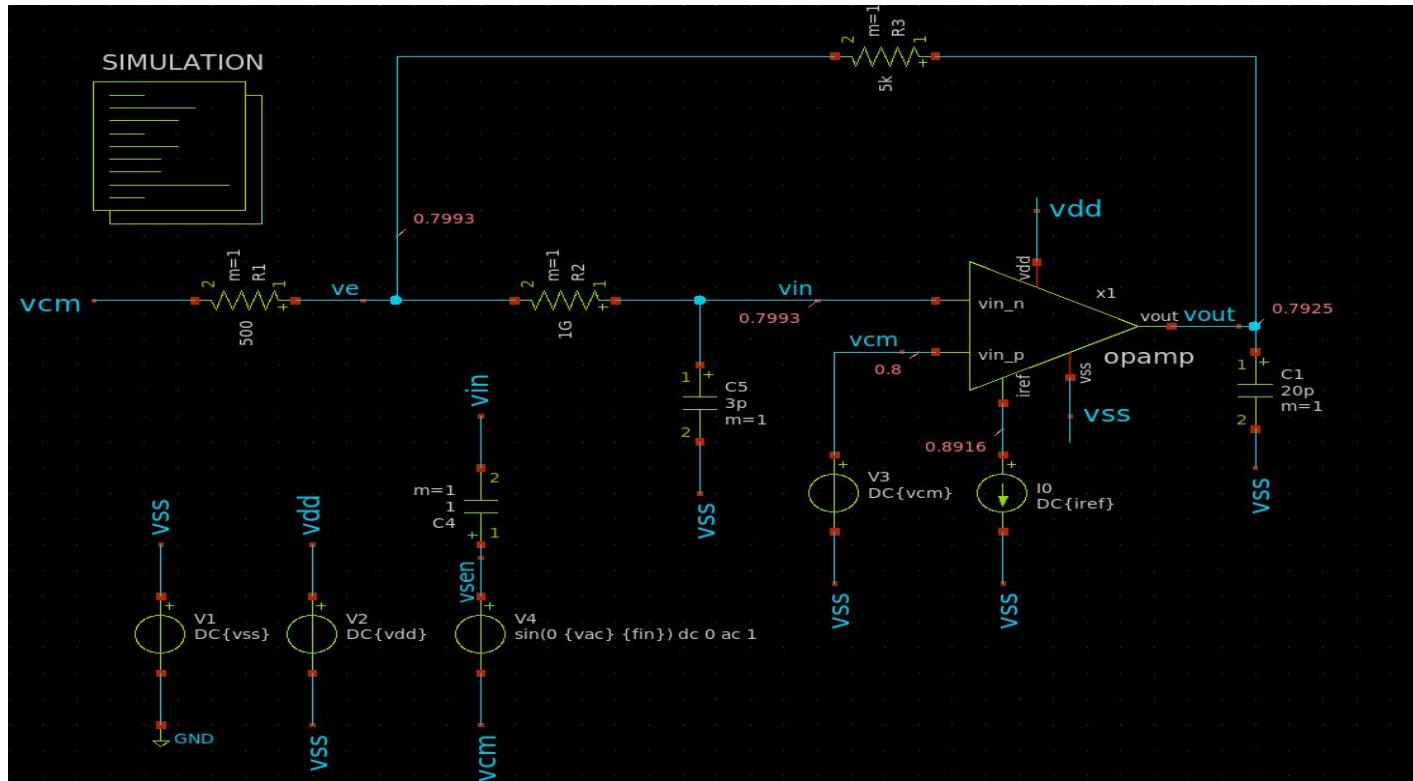
.param branch_2 = 20

.param iref = 100u
.param vdd = 1.8
.param vss = 0.0
.param vcm = 0.8
.param vac = 60m
.param fin = 9.765625e5
.options TEMP = 65

* Include Models
.lib ~/skywater/skywater-pdk/libraries/sky130_fd_pr_ngspice/latest/models/corners/sky130.lib TT
```

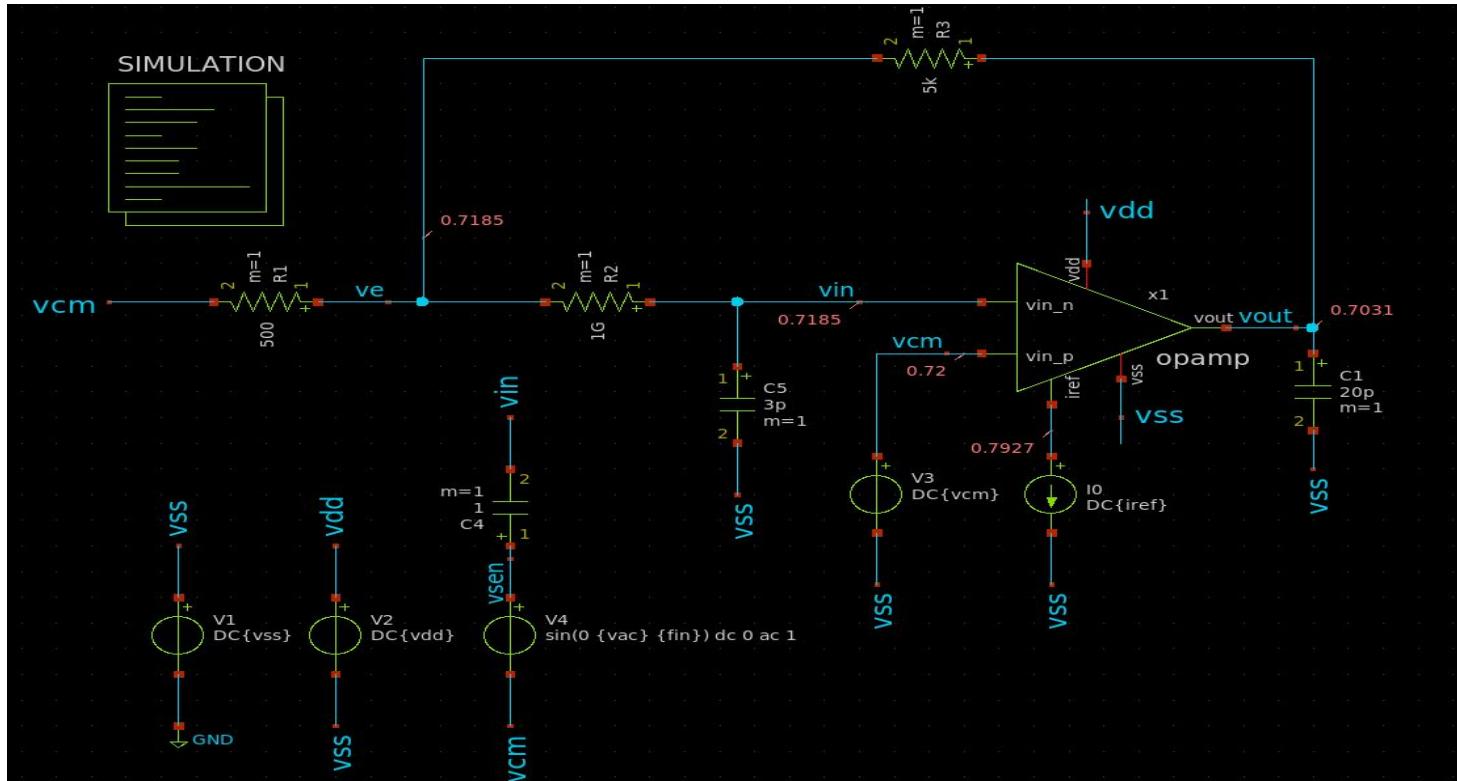
Variables del amplificador

## Simulación: Lazo Abierto + red $\beta$



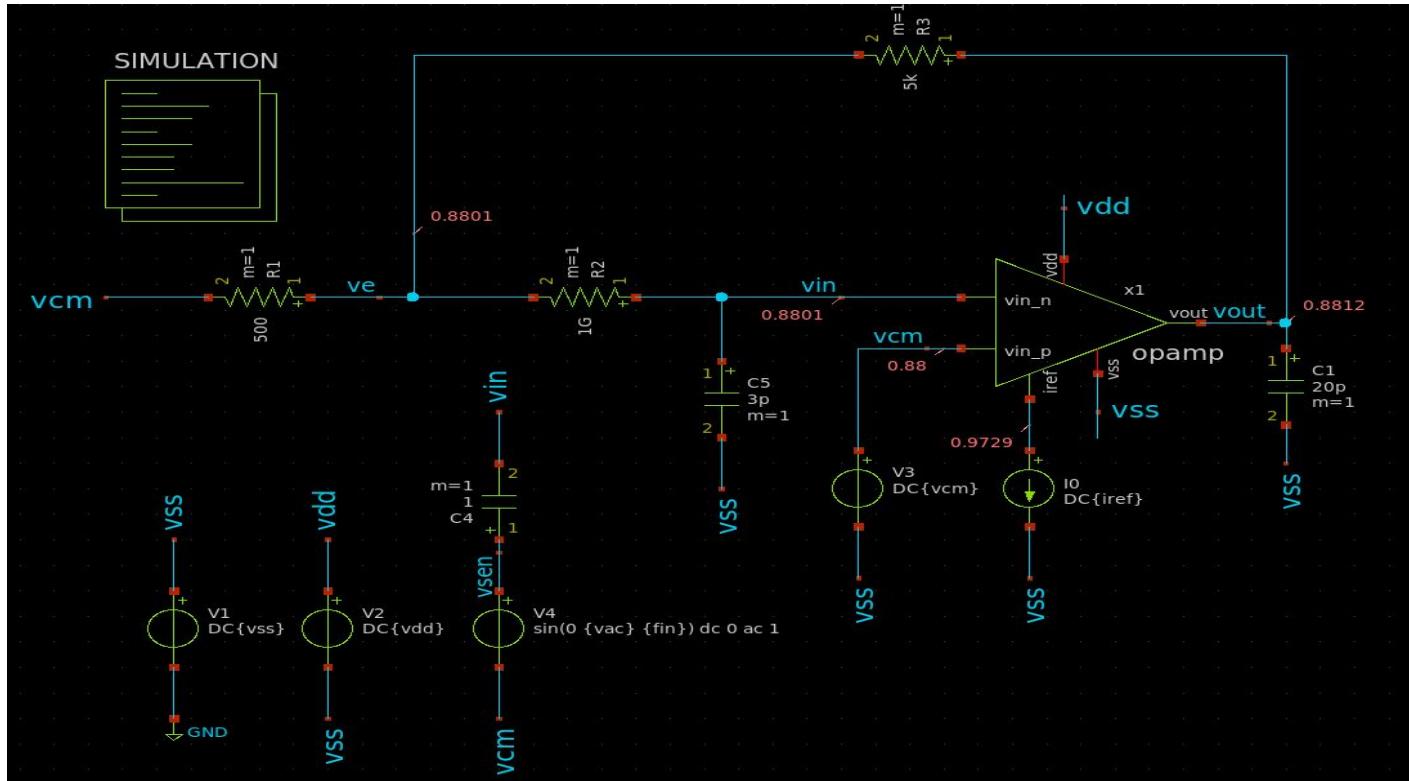
Esquemático del test bench a lazo abierto en corner TT.

# Simulación: Lazo Abierto + red $\beta$



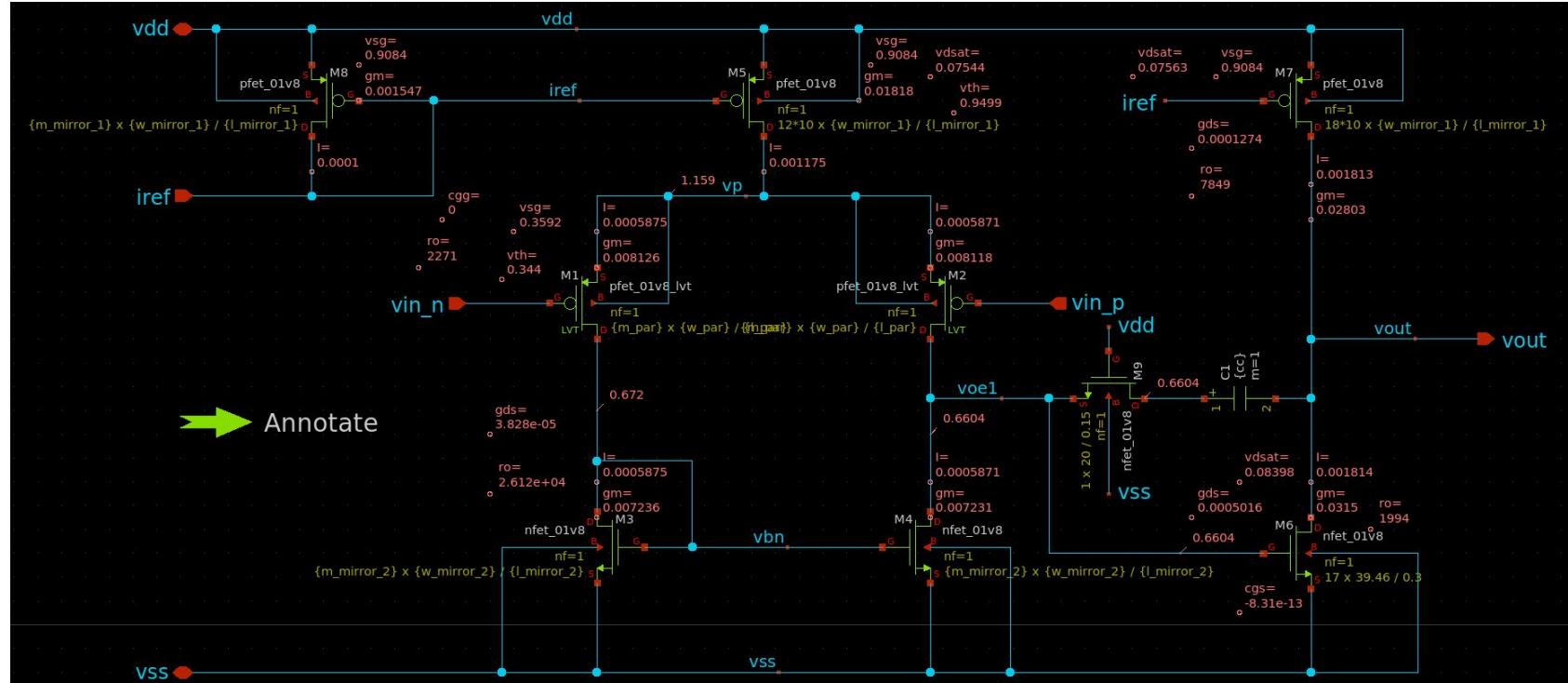
Esquemático del test bench a lazo abierto en corner SS.

# Simulación: Lazo Abierto + red $\beta$



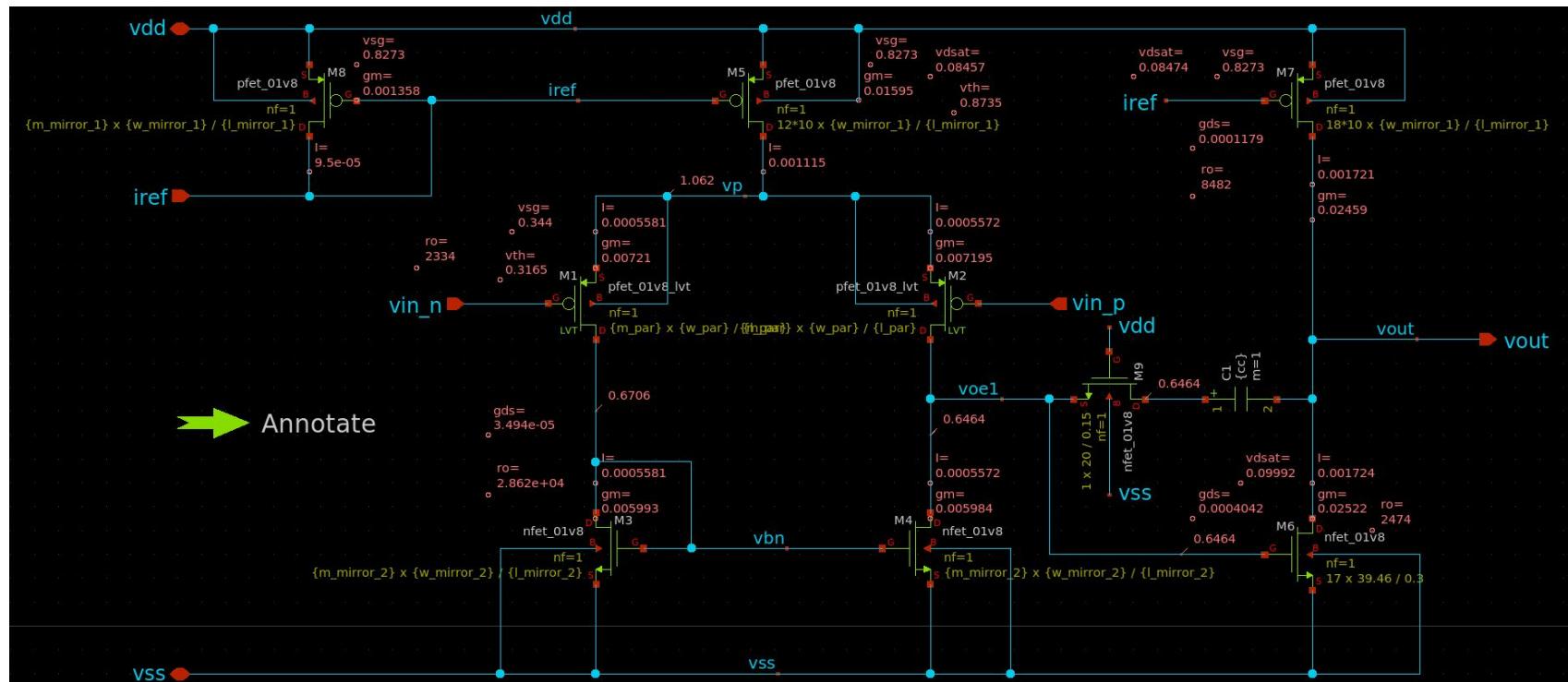
Esquemático del test bench a lazo abierto en corner FF.

# Simulación: Lazo Abierto + red $\beta$



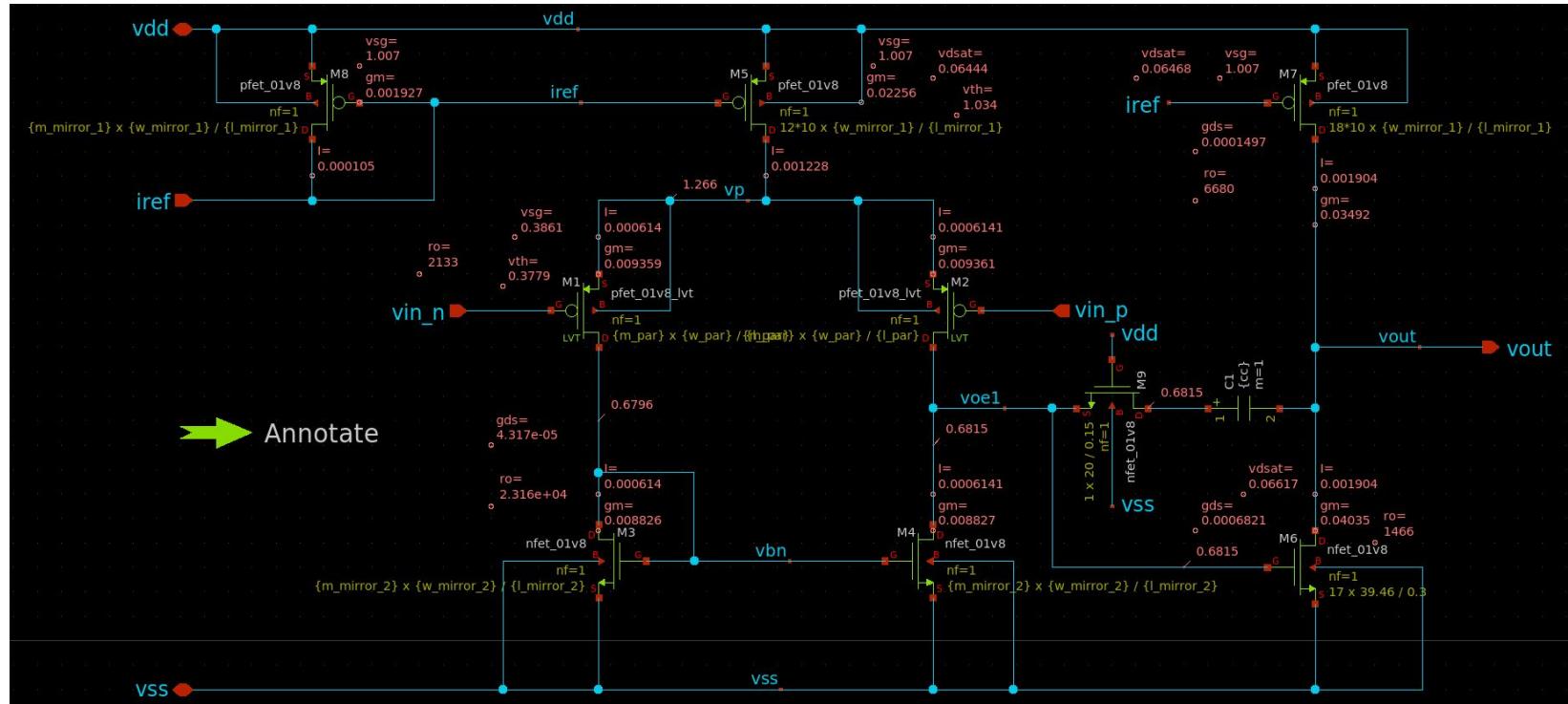
Esquemático del OpAmp en el corner TT.

## Simulación: Lazo Abierto + red $\beta$



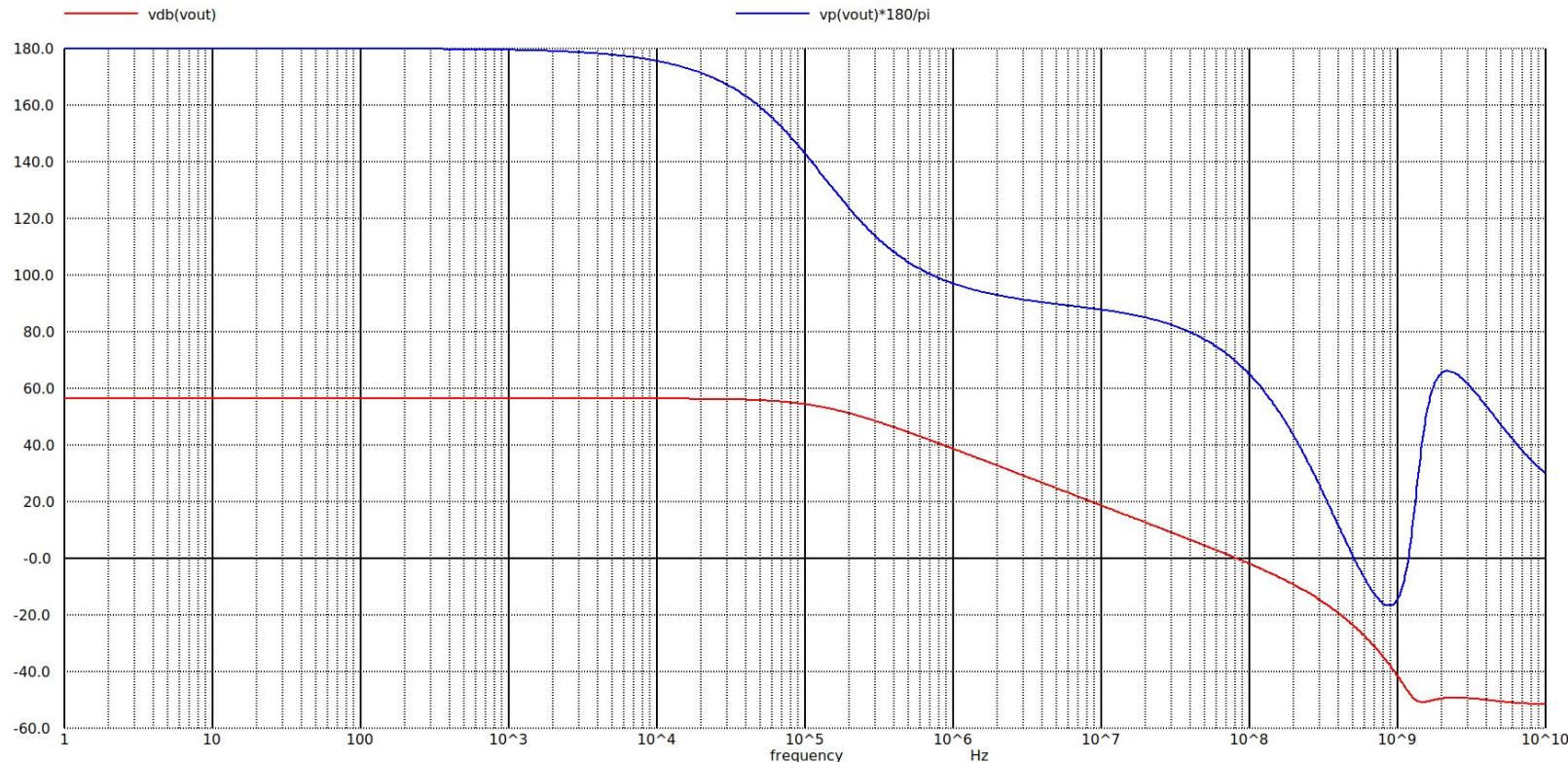
Esquemático del OpAmp en el corner SS.

# Simulación: Lazo Abierto + red $\beta$



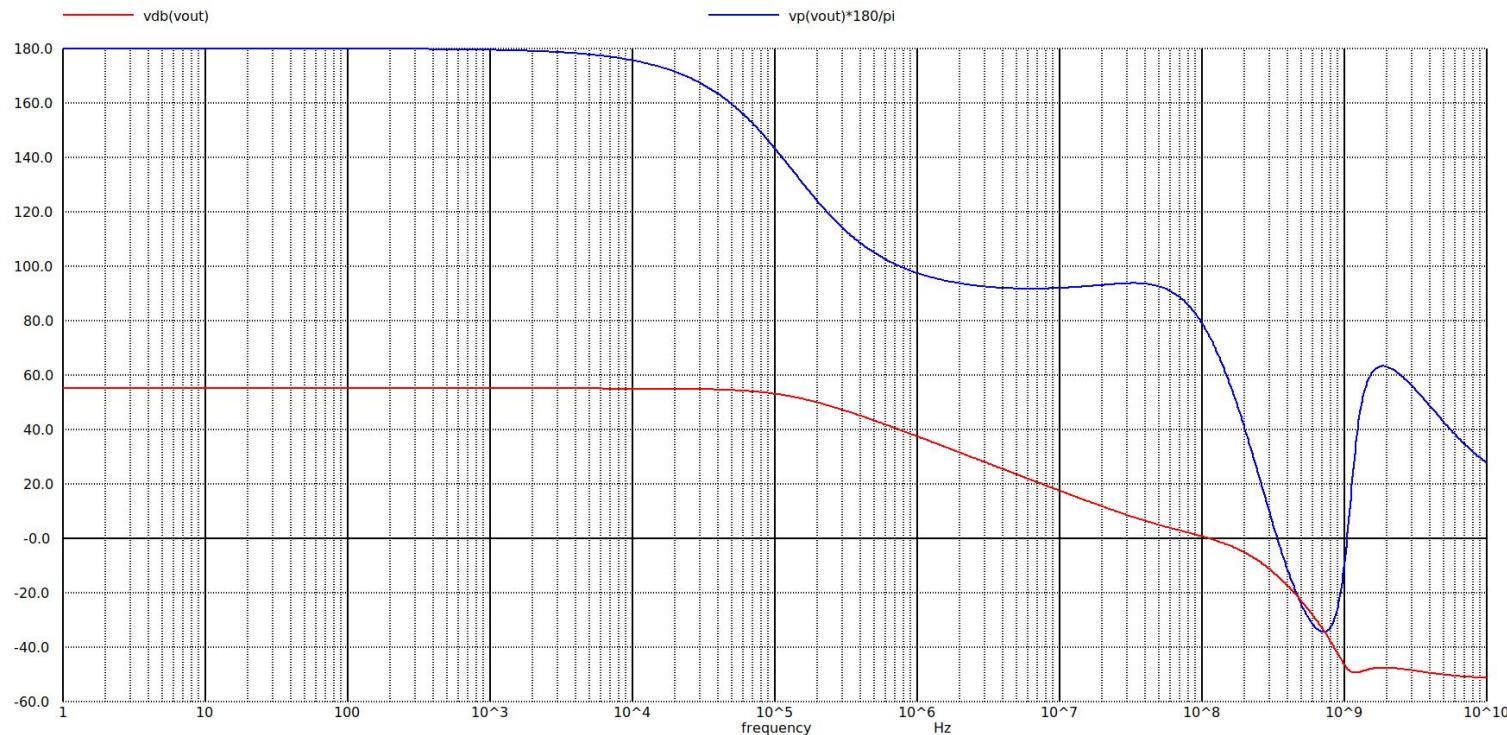
Esquemático del OpAmp en el corner FF.

# Simulación: Lazo Abierto + red $\beta$



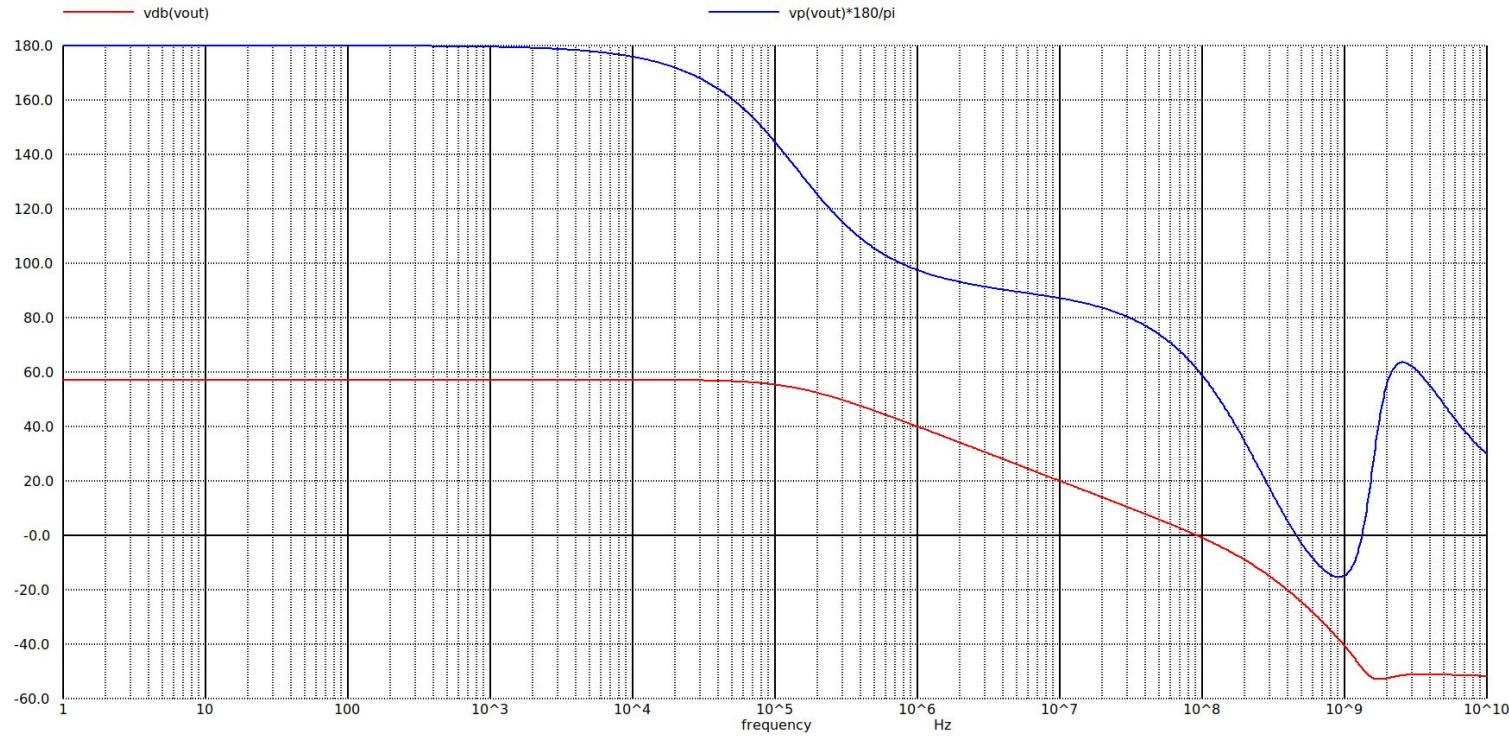
Respuesta AC. Diagrama de Bode en corner TT.

# Simulación: Lazo Abierto + red $\beta$



Respuesta AC. Diagrama de Bode en corner SS.

# Simulación: Lazo Abierto + red $\beta$



Respuesta AC. Diagrama de Bode en corner FF.

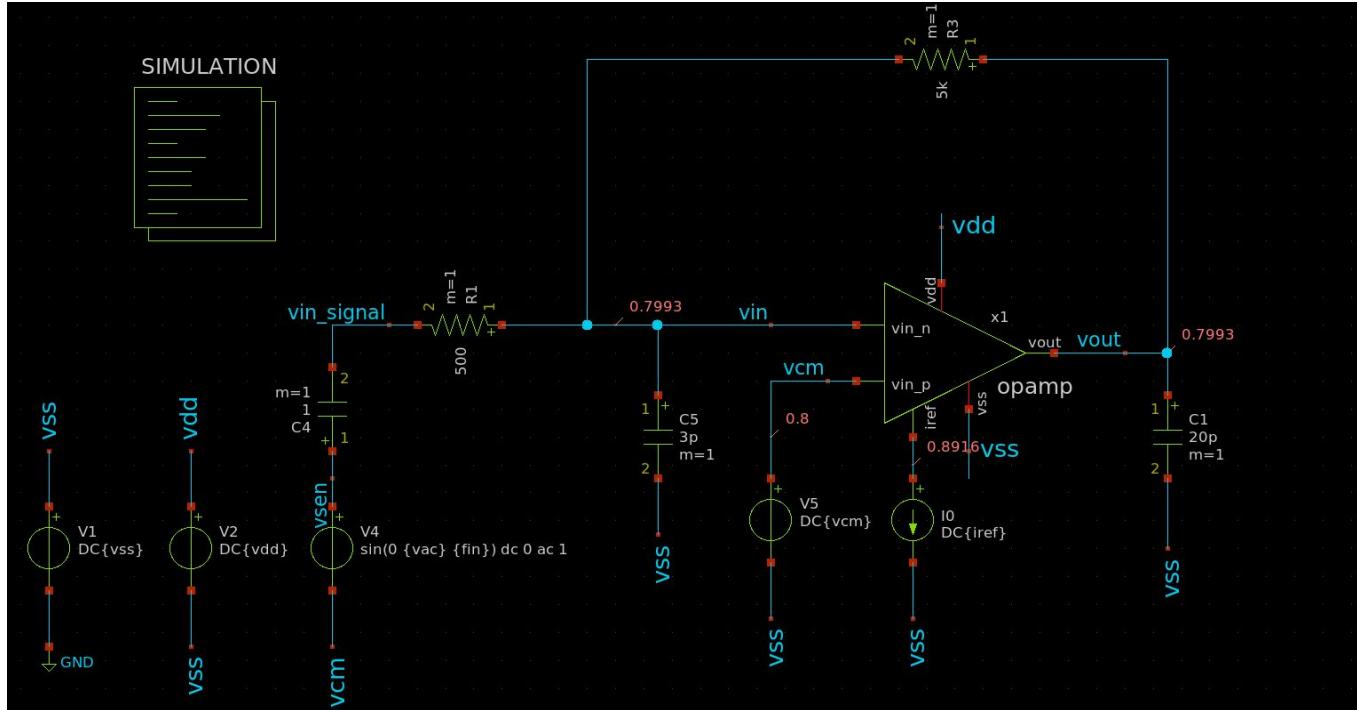
# Simulación: Lazo Abierto + red $\beta$

Resumen

| Corner | DC Gain [dB] | Ph Margin [°] | Gain Margin [dB] | Gain*BW [MHz] |
|--------|--------------|---------------|------------------|---------------|
| TT     | 56,41921     | 69,18826      | -23,88322        | 82,54951      |
| SS     | 55,0888      | 73,93327      | -13,67293        | 113,167       |
| FF     | 57,20591     | 61,05215      | -22,7307         | 92,0197       |

# Simulación: Lazo Cerrado

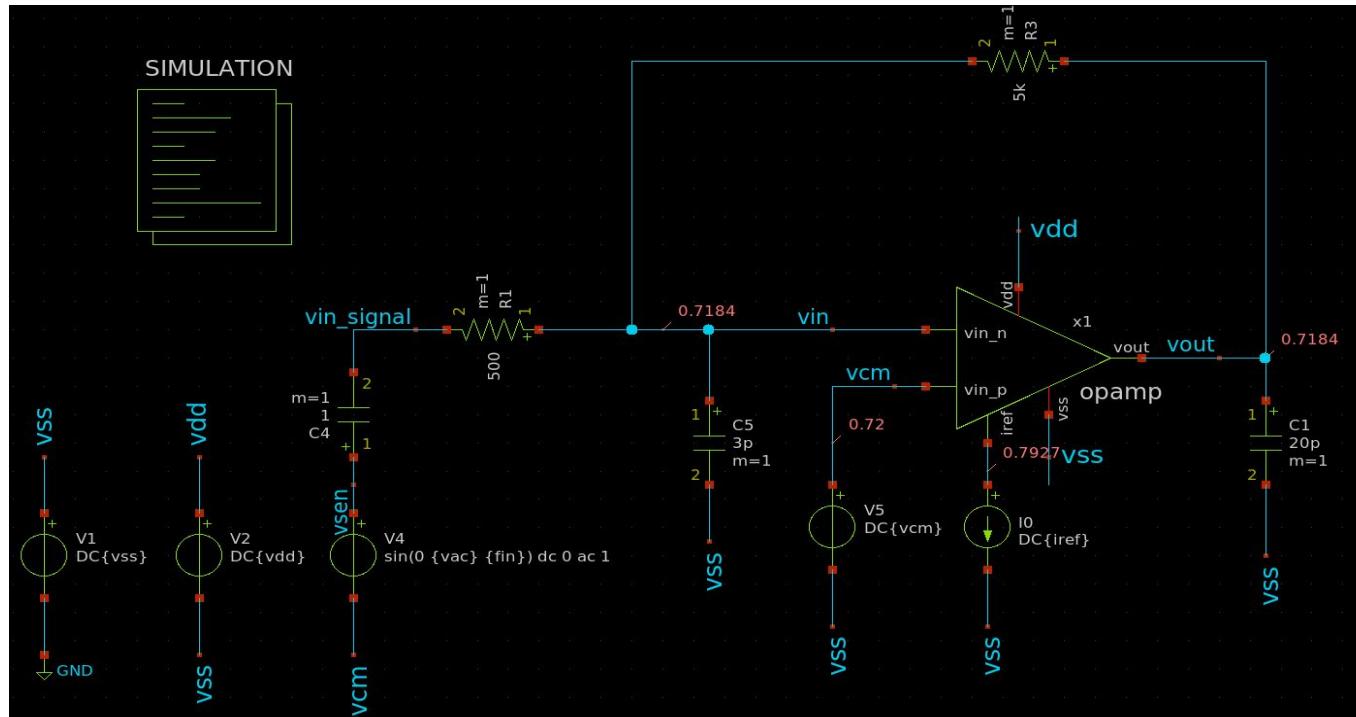
Esquemático del test bench a lazo cerrado.



Esquemático del testbench en lazo cerrado en corner TT.

## Simulación: Lazo Cerrado

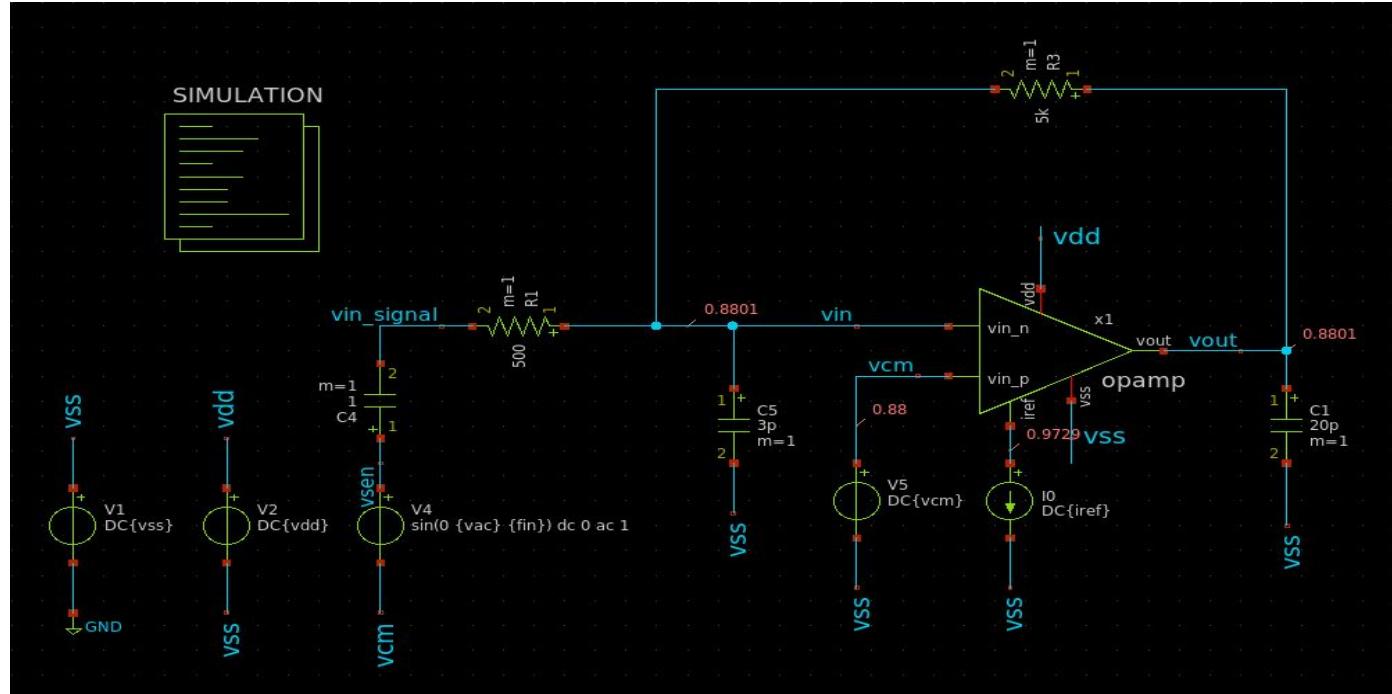
Esquemático del test bench a lazo cerrado.



Esquemático del testbench en lazo cerrado en corner SS.

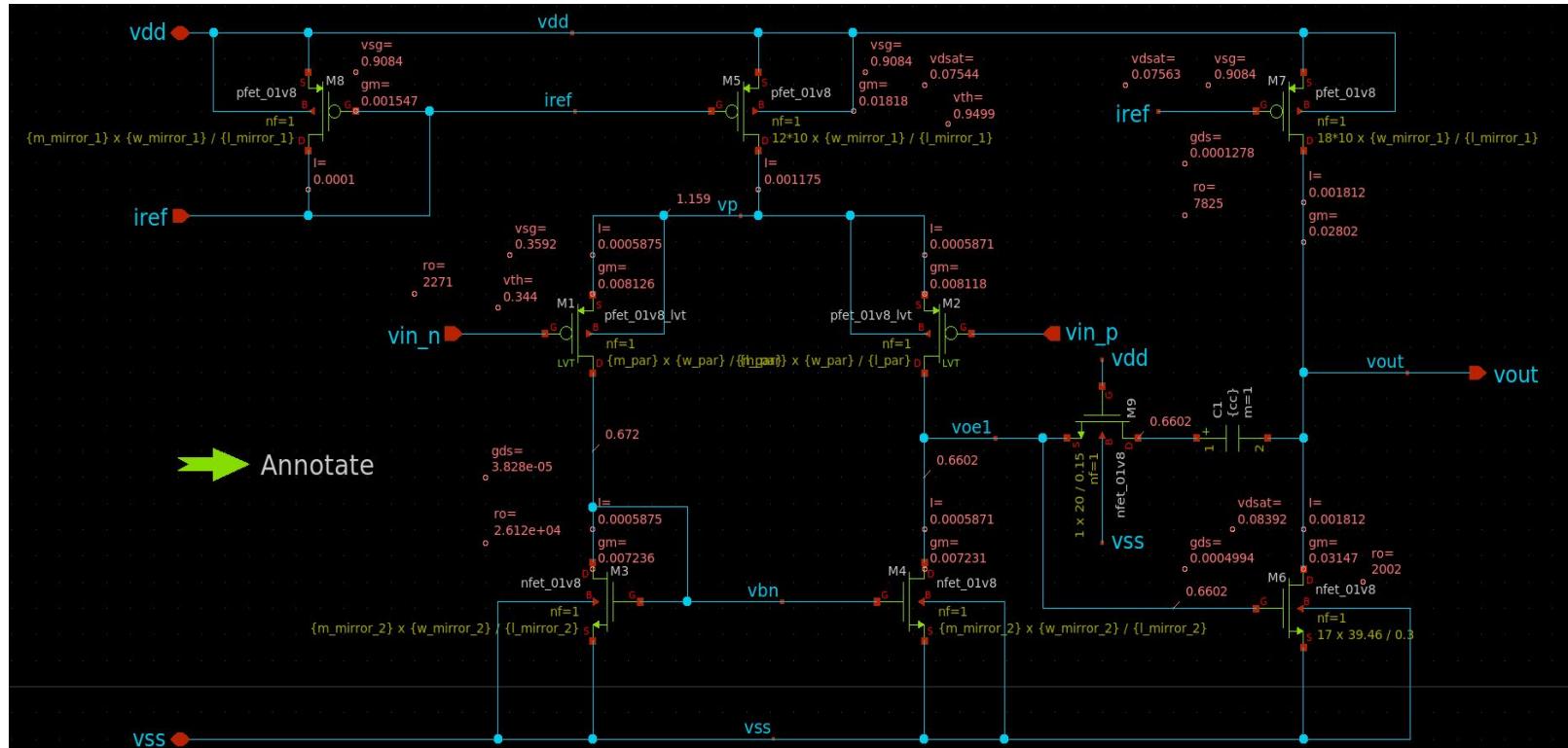
# Simulación: Lazo Cerrado

Esquemático del test bench a lazo cerrado.



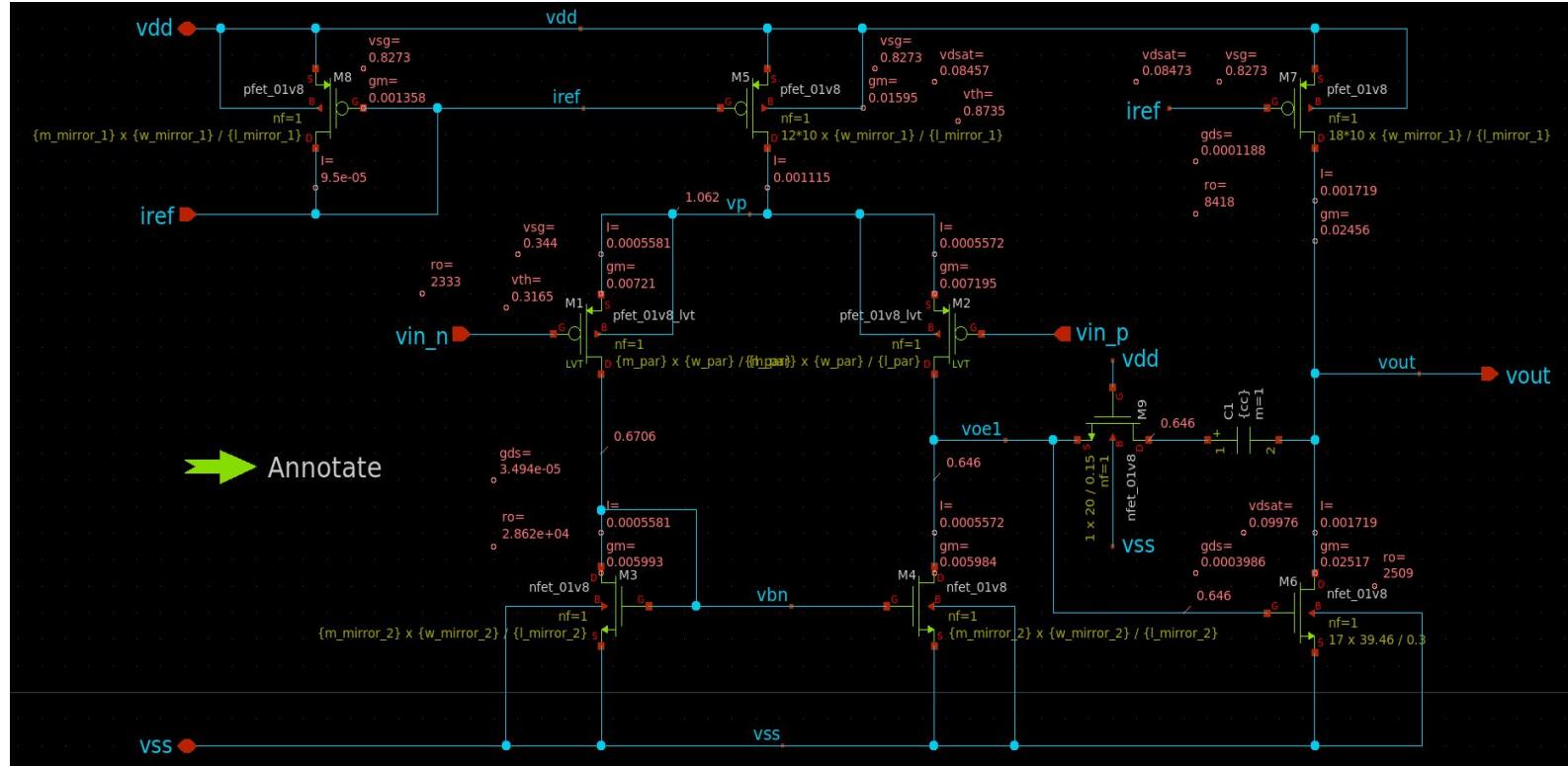
Esquemático del testbench en lazo cerrado en corner FF.

# Simulación: Lazo Cerrado



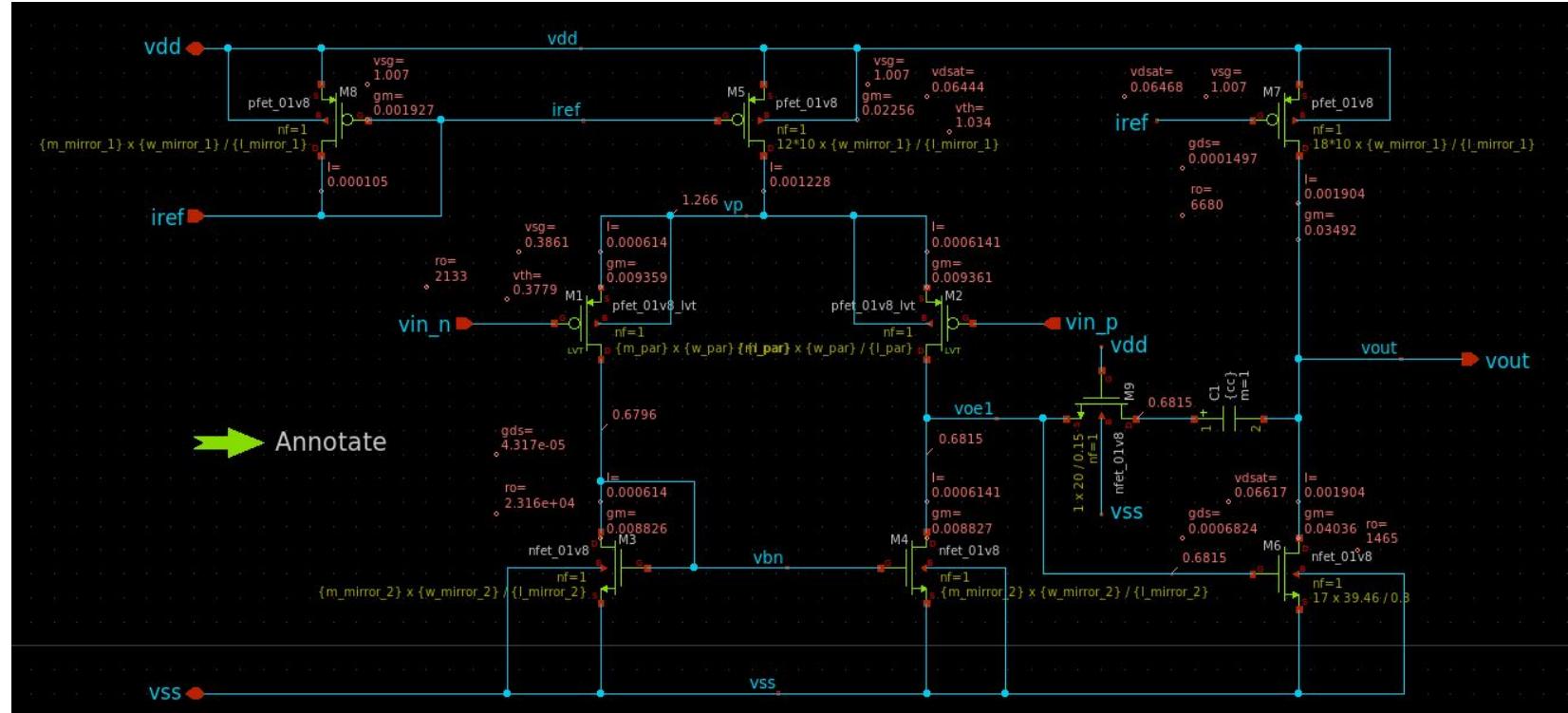
Esquemático del testbench en lazo cerrado en corner TT.

# Simulación: Lazo Cerrado



Esquemático del testbench en lazo cerrado en corner SS.

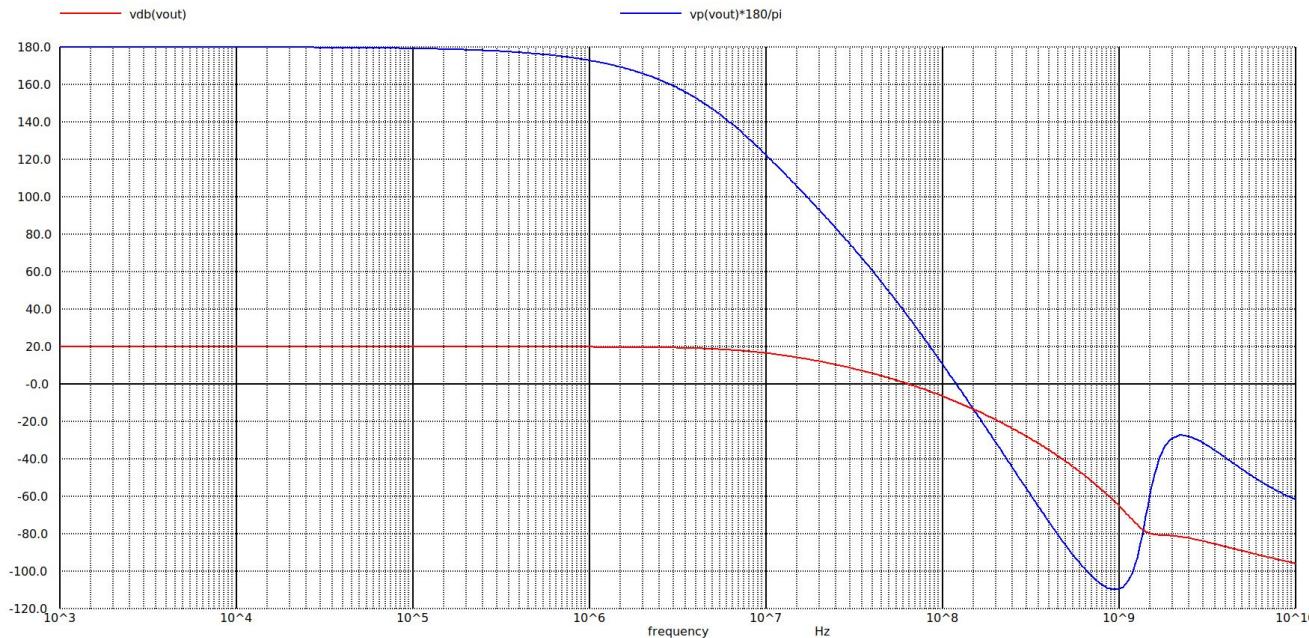
## Simulación: Lazo Cerrado



Esquemático del testbench en lazo cerrado en corner FF.

# Simulación: Lazo Cerrado

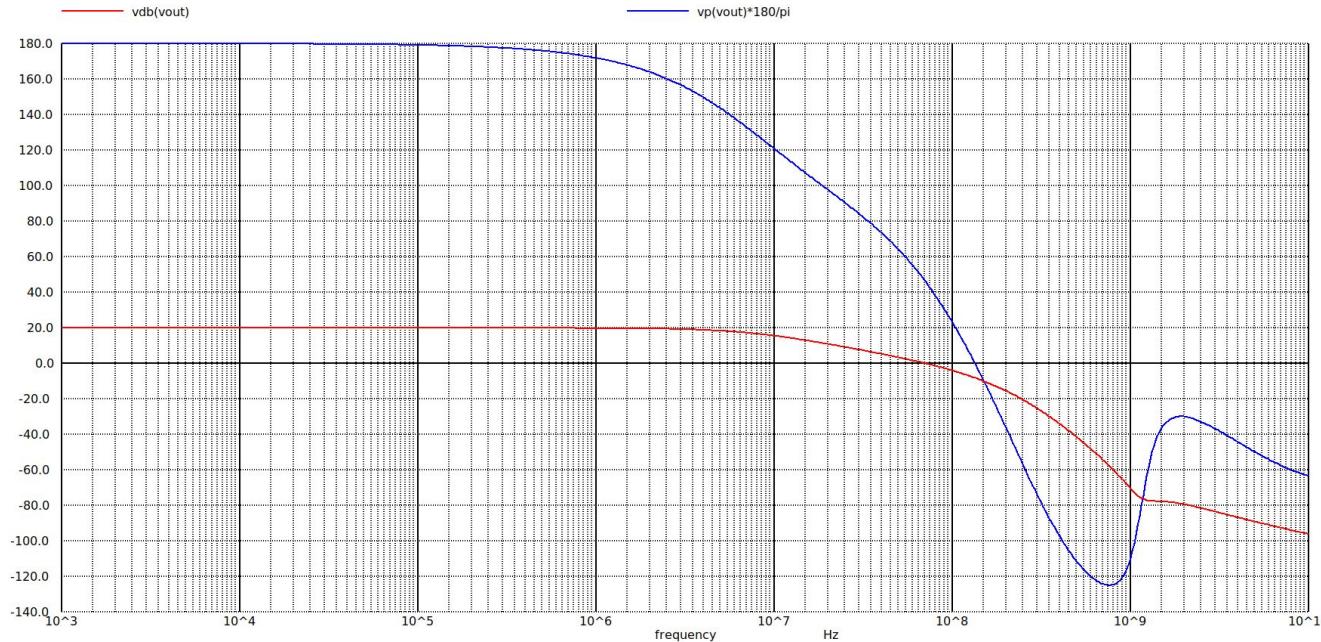
Respuesta AC. Incluir Bode en cada corner. De ser posible indicar GBW y ganancia.



Respuesta en AC en corner TT.

# Simulación: Lazo Cerrado

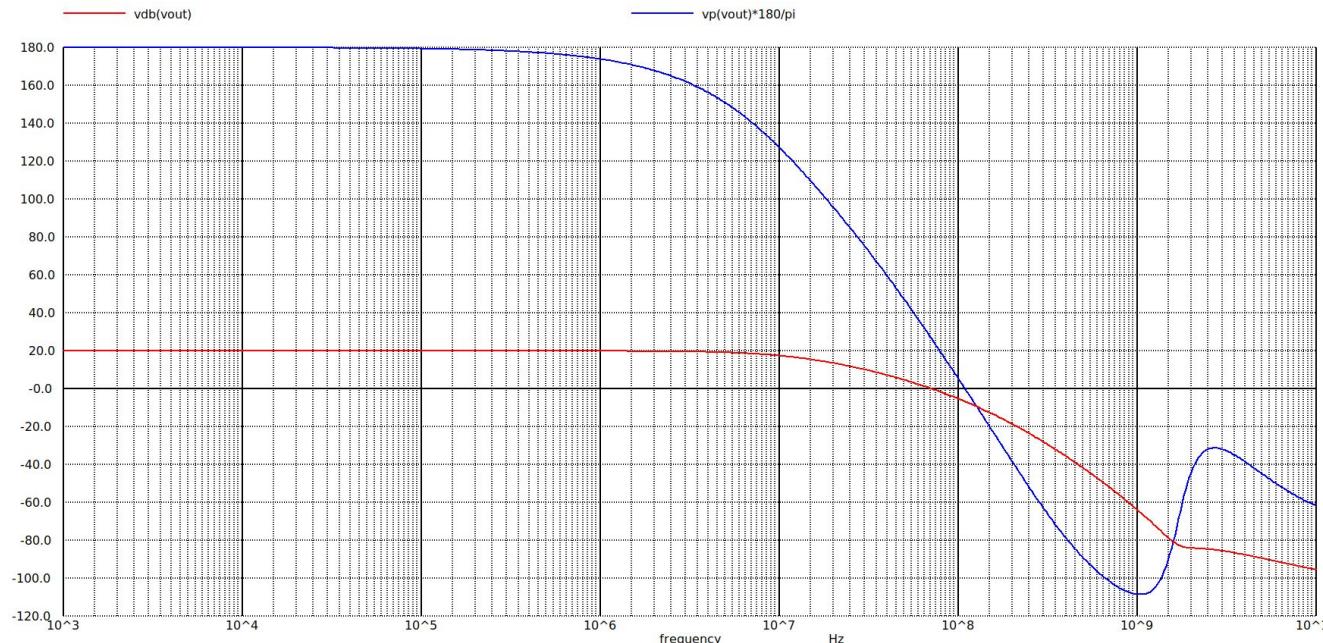
Respuesta AC. Incluir Bode en cada corner. De ser posible indicar GBW y ganancia.



Respuesta en AC en corner SS.

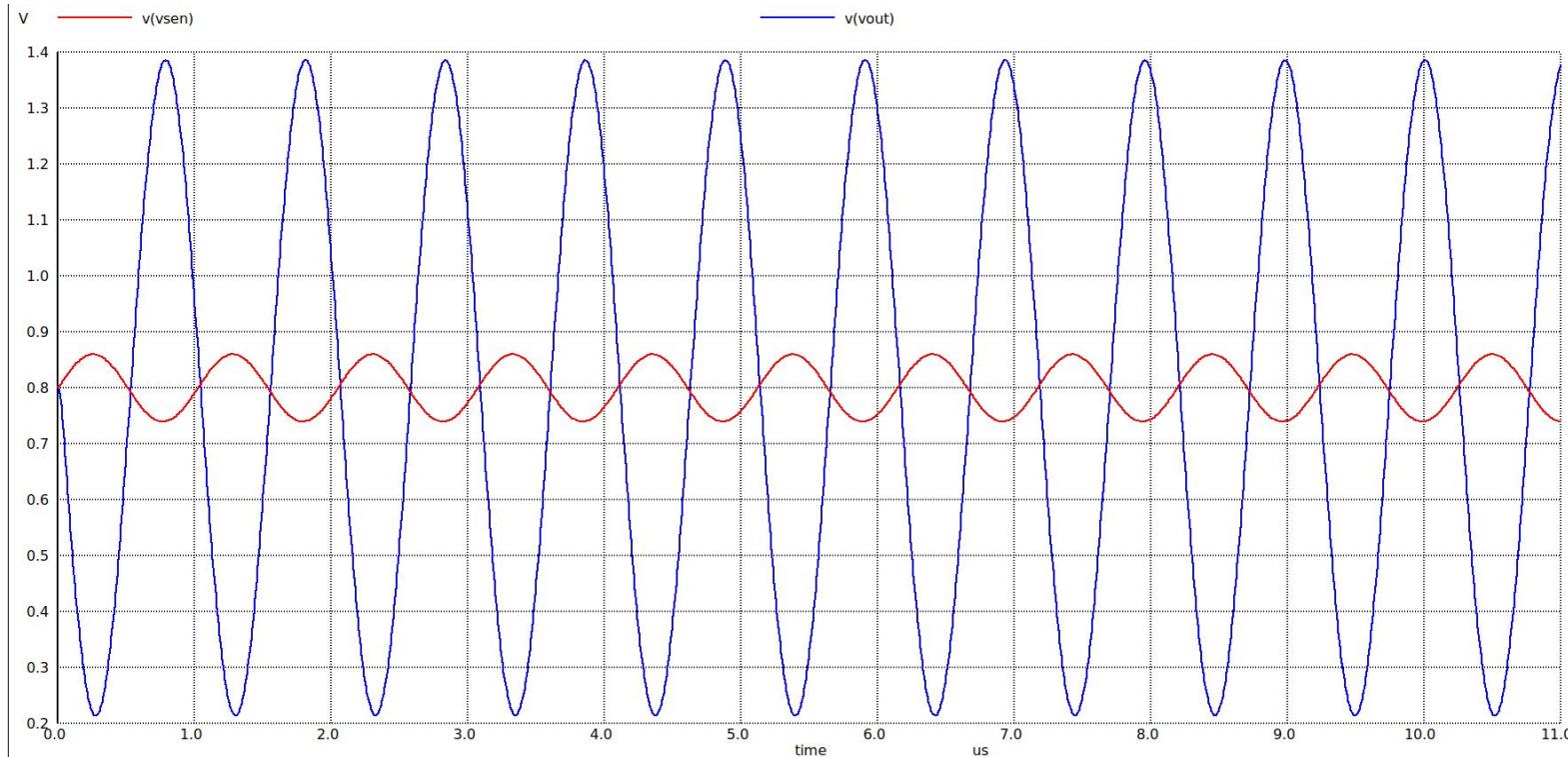
# Simulación: Lazo Cerrado

Respuesta AC. Incluir Bode en cada corner. De ser posible indicar GBW y ganancia.



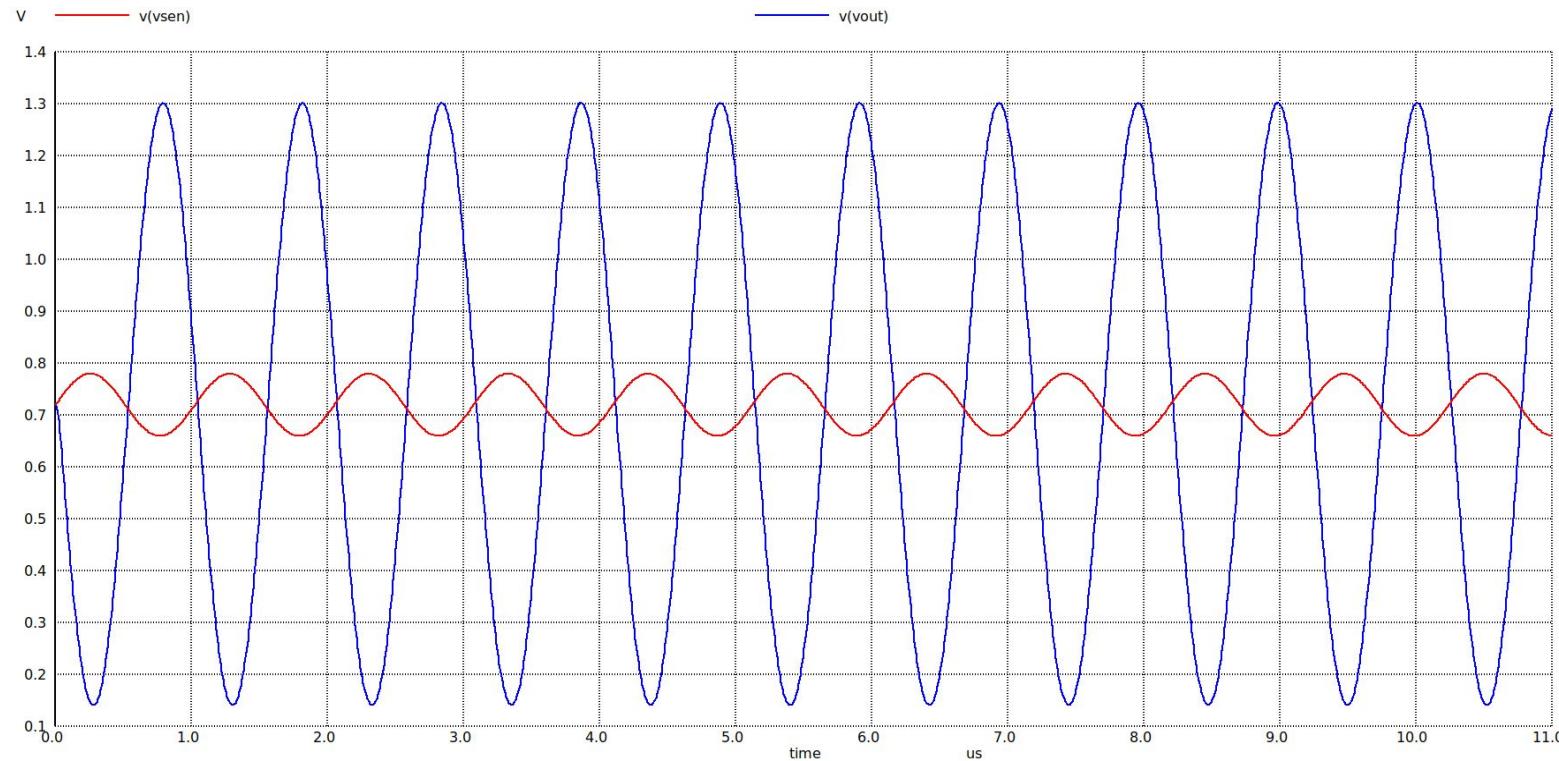
Respuesta en AC en corner SS

# Simulación: Lazo Cerrado



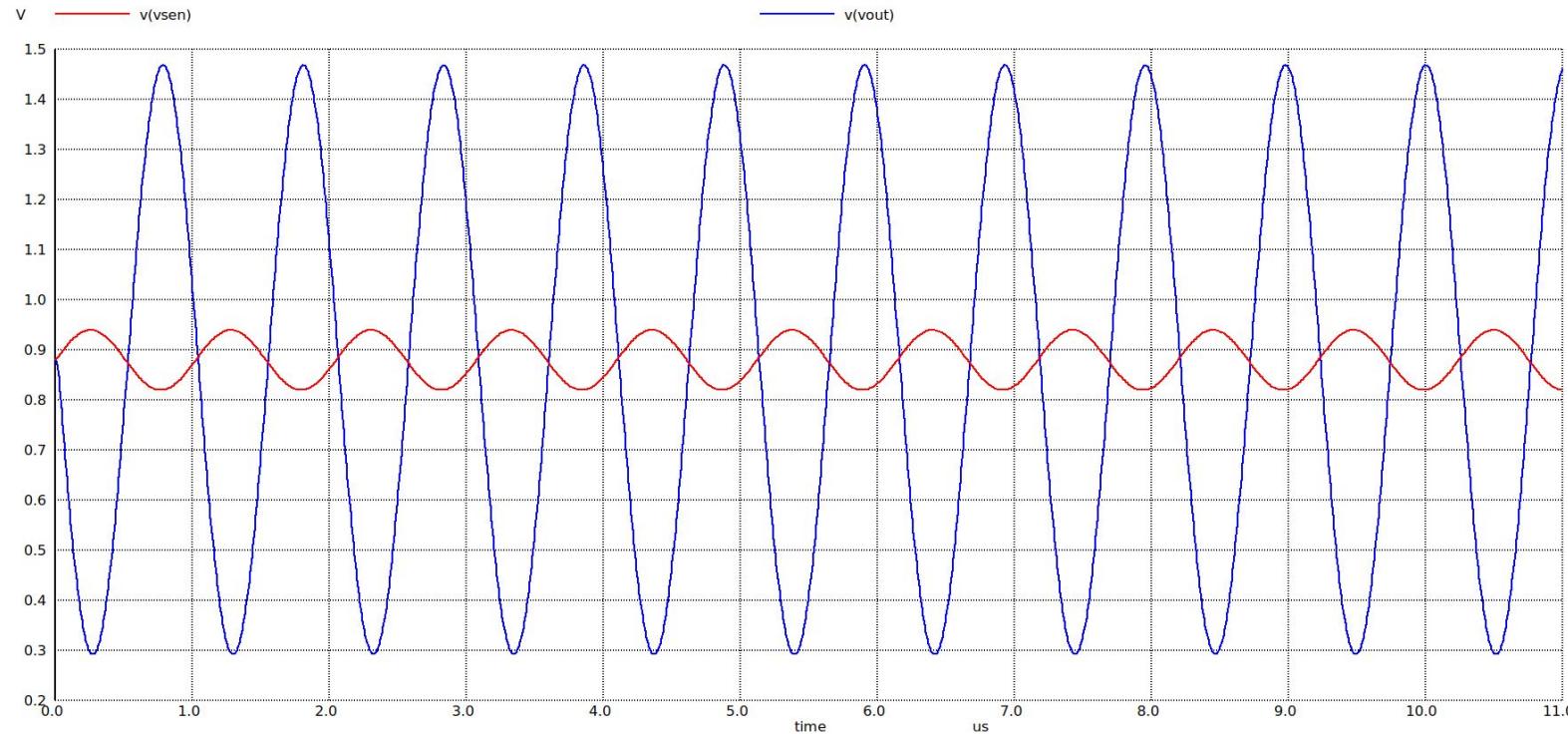
Respuesta transitoria en corner TT.

# Simulación: Lazo Cerrado



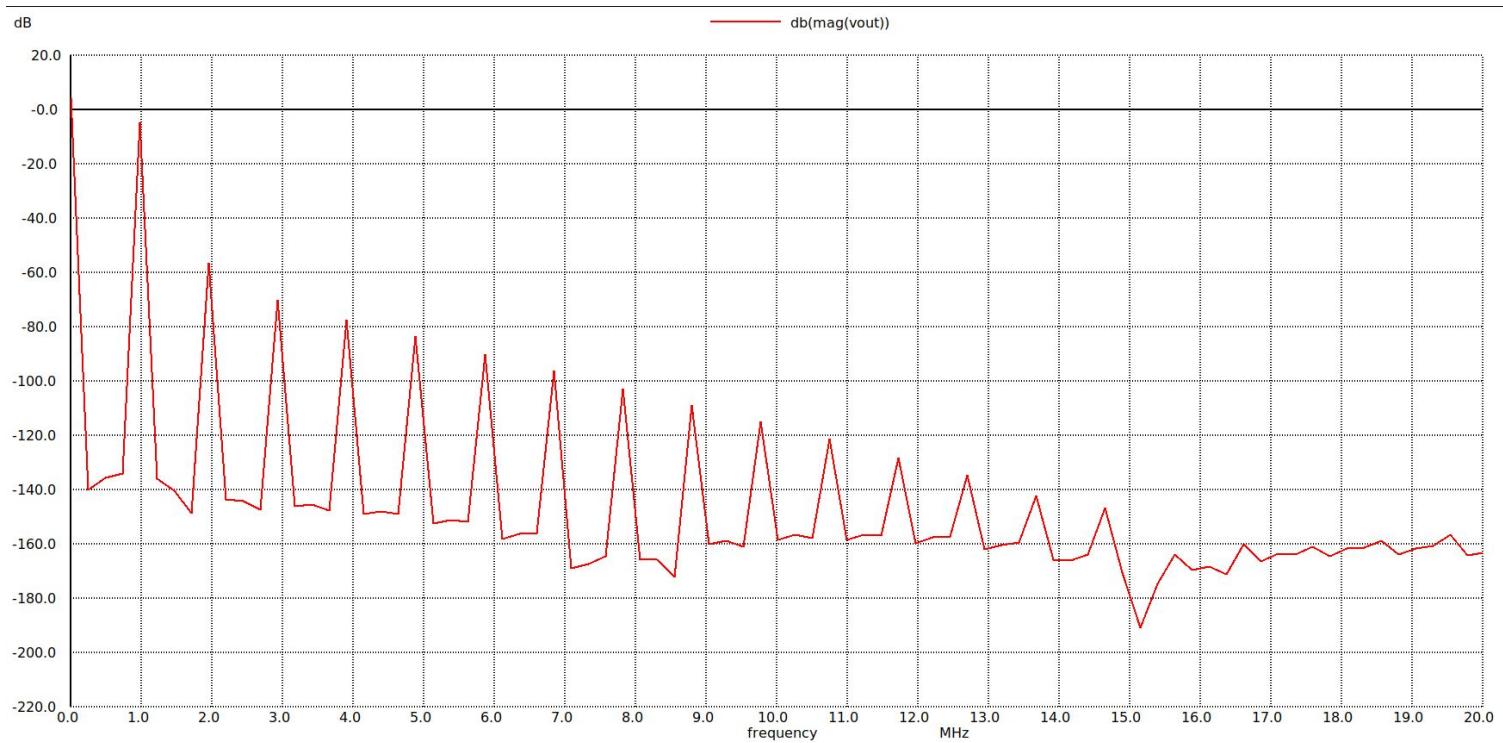
Respuesta transitoria en corner SS.

# Simulación: Lazo Cerrado



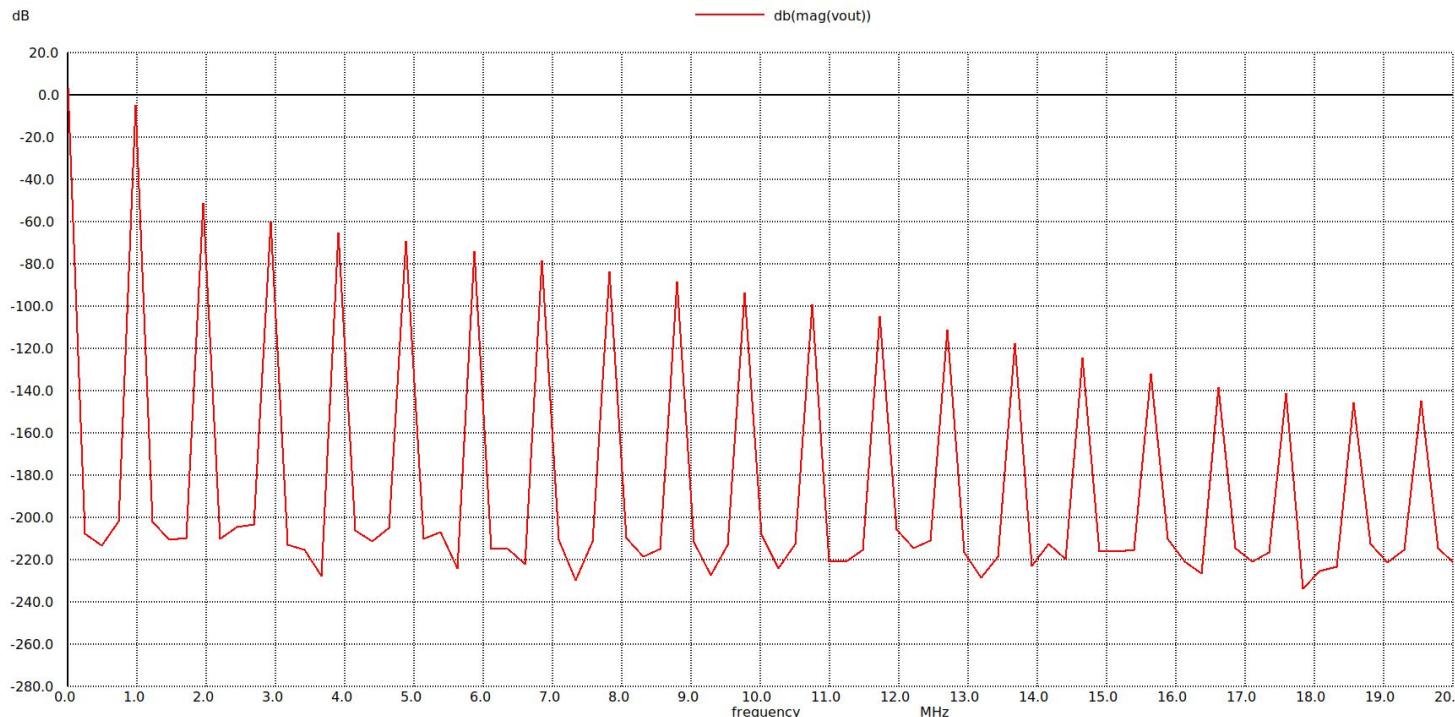
Respuesta transitoria en corner FF

# Simulación: Lazo Cerrado



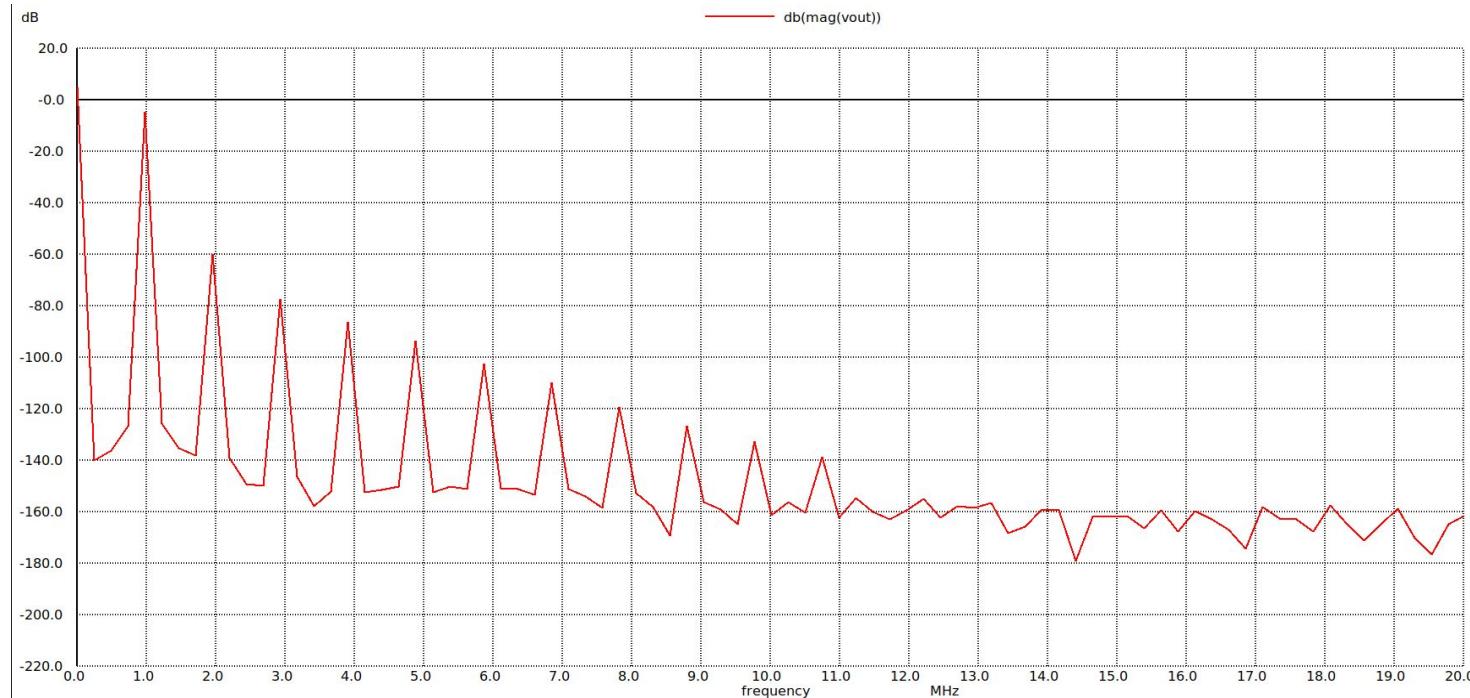
Gráfica de rango dinámico en TT.

# Simulación: Lazo Cerrado



Gráfica de rango dinámico en SS.

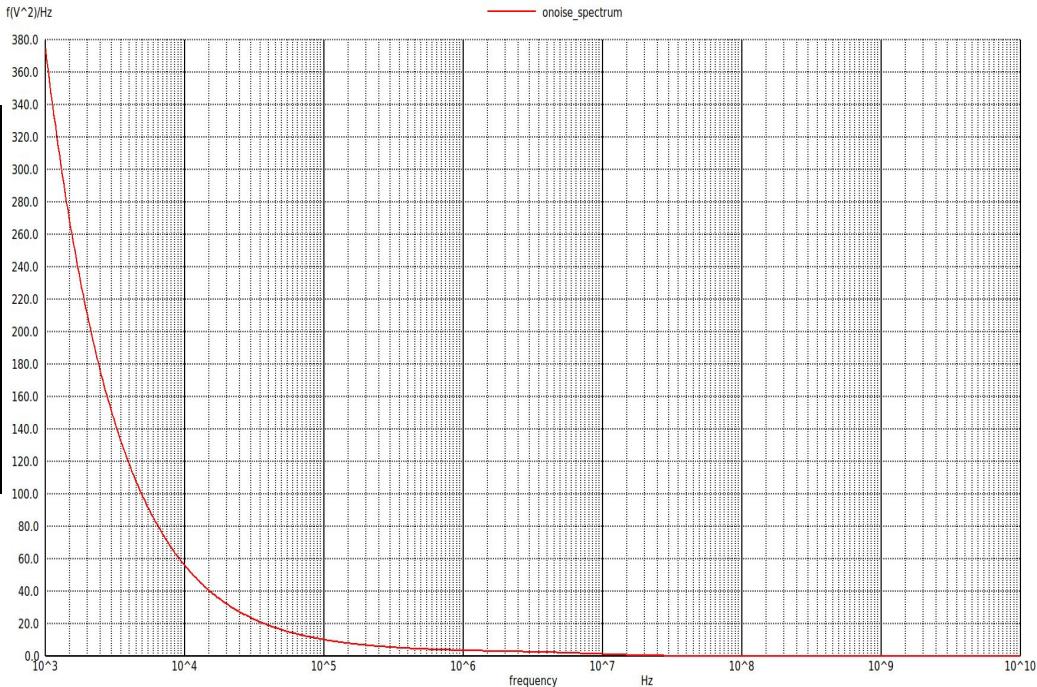
# Simulación: Lazo Cerrado



Gráfica de rango dinámico en FF

# Simulación: Lazo Cerrado

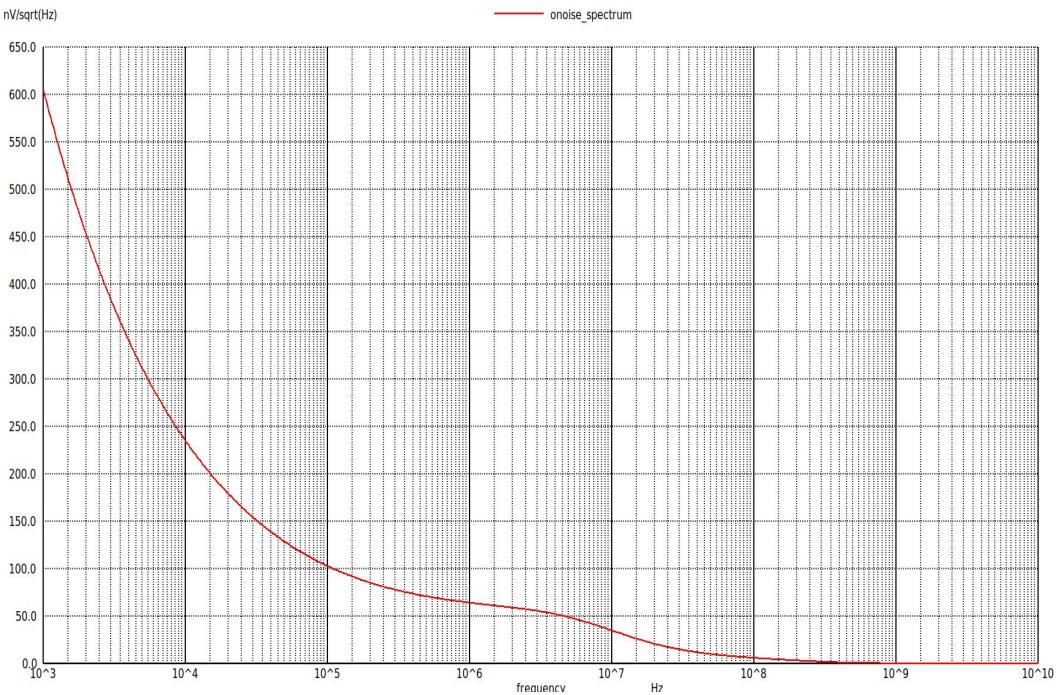
```
No. of Data Rows : 1
inoise_total = -nan
onoise_total = -nan
onoise_total.m.x1.xm1.msky130_fd_pr__pfet_01v8_lvt.id = 1.483930e-05
onoise_total.m.x1.xm1.msky130_fd_pr__pfet_01v8_lvt.id = 5.401408e-05
onoise_total.m.x1.xm2.msky130_fd_pr__pfet_01v8_lvt.id = 1.480153e-05
onoise_total.m.x1.xm2.msky130_fd_pr__pfet_01v8_lvt.id = 5.101020e-05
onoise_total.m.x1.xm3.msky130_fd_pr__nfet_01v8_idoverf = 5.824462e-05
onoise_total.m.x1.xm3.msky130_fd_pr__nfet_01v8.id = 8.473907e-05
onoise_total.m.x1.xm4.msky130_fd_pr__nfet_01v8.idoverf = 6.221236e-05
onoise_total.m.x1.xm4.msky130_fd_pr__nfet_01v8.id = 9.173570e-05
onoise_total.m.x1.xm5.msky130_fd_pr__pfet_01v8.idoverf = 6.109802e-07
onoise_total.m.x1.xm5.msky130_fd_pr__pfet_01v8.id = 1.135166e-05
onoise_total.m.x1.xm6.msky130_fd_pr__nfet_01v8.idoverf = 9.635234e-06
onoise_total.m.x1.xm6.msky130_fd_pr__nfet_01v8.id = 2.008738e-05
onoise_total.m.x1.xm7.msky130_fd_pr__pfet_01v8.idoverf = 4.016283e-07
onoise_total.m.x1.xm7.msky130_fd_pr__pfet_01v8.id = 1.172822e-05
vprint: no such command available in ngs spice
onoise_total.m.x1.xm8.msky130_fd_pr__pfet_01v8.id = 2.668679e-06
ASCII raw file "tpfinal_noise.raw"
Reset re-loads circuit ** sch_path: /home/designer/icdesign/sch//tp_final_newbra
nch/tb_opamp_closeloop.sch
```



Reporte de ruido en corner TT.

# Simulación: Lazo Cerrado

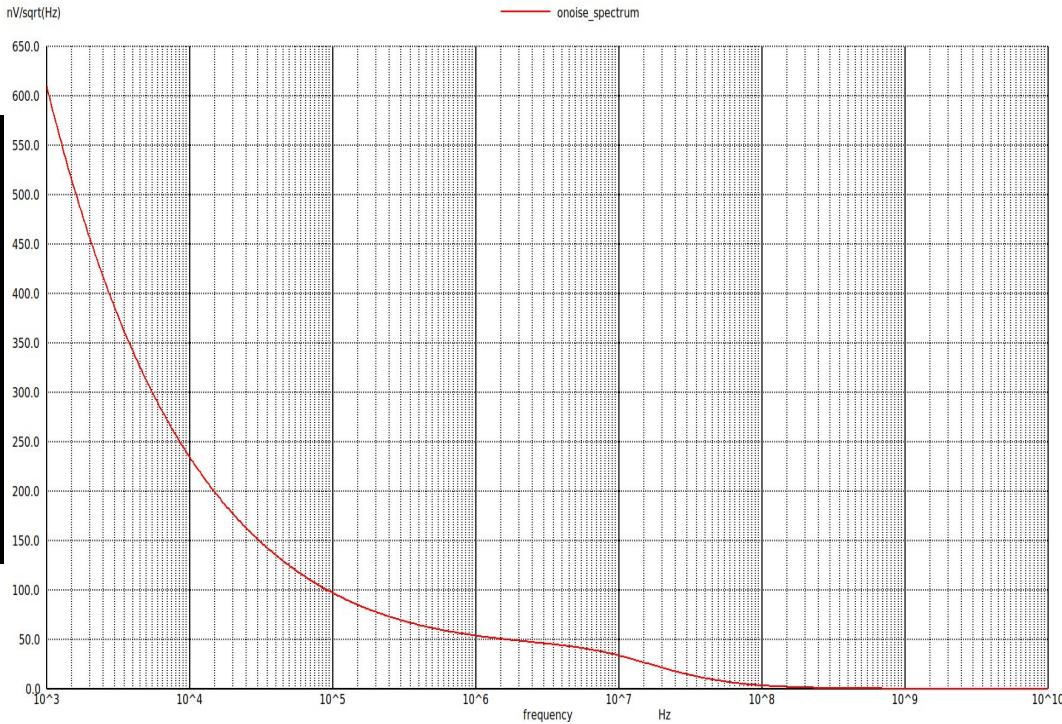
```
No. of Data Rows : 1
onoise_total = -nan
onoise_total = -nan
onoise_total.m.x1.xm1.msky130_fd_pr__pfet_01v8_lvt.loverf = 1.484285e-05
onoise_total.m.x1.xm1.msky130_fd_pr__pfet_01v8_lvt.id = 6.299054e-05
onoise_total.m.x1.xm2.msky130_fd_pr__pfet_01v8_lvt.loverf = 1.483107e-05
onoise_total.m.x1.xm2.msky130_fd_pr__pfet_01v8_lvt.id = 5.733078e-05
onoise_total.m.x1.xm3.msky130_fd_pr__nfet_01v8_loverf = 5.596791e-05
onoise_total.m.x1.xm3.msky130_fd_pr__nfet_01v8.id = 9.084432e-05
onoise_total.m.x1.xm4.msky130_fd_pr__nfet_01v8_loverf = 6.044136e-05
onoise_total.m.x1.xm4.msky130_fd_pr__nfet_01v8.id = 1.015636e-04
onoise_total.m.x1.xm5.msky130_fd_pr__pfet_01v8_loverf = 7.312639e-07
onoise_total.m.x1.xm5.msky130_fd_pr__pfet_01v8.id = 1.773603e-05
onoise_total.m.x1.xm6.msky130_fd_pr__nfet_01v8_loverf = 1.042833e-05
onoise_total.m.x1.xm6.msky130_fd_pr__nfet_01v8.id = 2.334164e-05
onoise_total.m.x1.xm7.msky130_fd_pr__pfet_01v8_loverf = 4.791681e-07
onoise_total.m.x1.xm7.msky130_fd_pr__pfet_01v8.id = 1.452371e-05
vprint: no such command available in ngspice
onoise_total.m.x1.xm8.msky130_fd_pr__pfet_01v8.id = 2.556990e-06
ASCII raw file "tpfinal_noise.raw"
Reset re-loads circuit ** sch_path: /home/designer/icdesign/sch//tp_final_newbranch/tb_opamp_closeloop.sch
```



Reporte de ruido en corner SS.

# Simulación: Lazo Cerrado

```
No. of Data Rows : 1
inoise_total = 1.505279e-01
onoise_total = 1.956650e-04
onoise_total.m.x1.xn1.msky130_fd_pr_.pfet_01v8.lvt.lowerf = 1.479748e-05
onoise_total.m.x1.xn1.msky130_fd_pr_.pfet_01v8.lvt.id = 4.709399e-05
onoise_total.m.x1.xn2.msky130_fd_pr_.pfet_01v8.lvt.lowerf = 1.472809e-05
onoise_total.m.x1.xn2.msky130_fd_pr_.pfet_01v8.lvt.id = 4.469533e-05
onoise_total.m.x1.xn3.msky130_fd_pr_.nfet_01v8.lowerf = 5.948627e-05
onoise_total.m.x1.xn3.msky130_fd_pr_.nfet_01v8.id = 7.760239e-05
onoise_total.m.x1.xn4.msky130_fd_pr_.nfet_01v8.lowerf = 6.309069e-05
onoise_total.m.x1.xn4.msky130_fd_pr_.nfet_01v8.id = 8.314107e-05
onoise_total.m.x1.xn5.msky130_fd_pr_.pfet_01v8.lowerf = 5.539534e-07
onoise_total.m.x1.xn5.msky130_fd_pr_.pfet_01v8.id = 9.888852e-06
onoise_total.m.x1.xn6.msky130_fd_pr_.nfet_01v8.lowerf = 9.084828e-06
onoise_total.m.x1.xn6.msky130_fd_pr_.nfet_01v8.id = 1.721717e-05
onoise_total.m.x1.xn7.msky130_fd_pr_.pfet_01v8.lowerf = 3.409591e-07
onoise_total.m.x1.xn7.msky130_fd_pr_.pfet_01v8.id = 1.011657e-05
vprint: no such command available in ngspace
onoise_total.m.x1.xn8.msky130_fd_pr_.pfet_01v8.id = 3.038657e-06
ASCII raw file "tpfinal_noise.raw"
Reset re-loads circuit ** sch_path: /home/designer/icdesign/sch//tp_final_newbranch/tb_opamp_closeloop.sch
Circuit: ** sch_path: /home/designer/icdesign/sch//tp_final_newbranch/tb_opamp_closeloop.sch
```



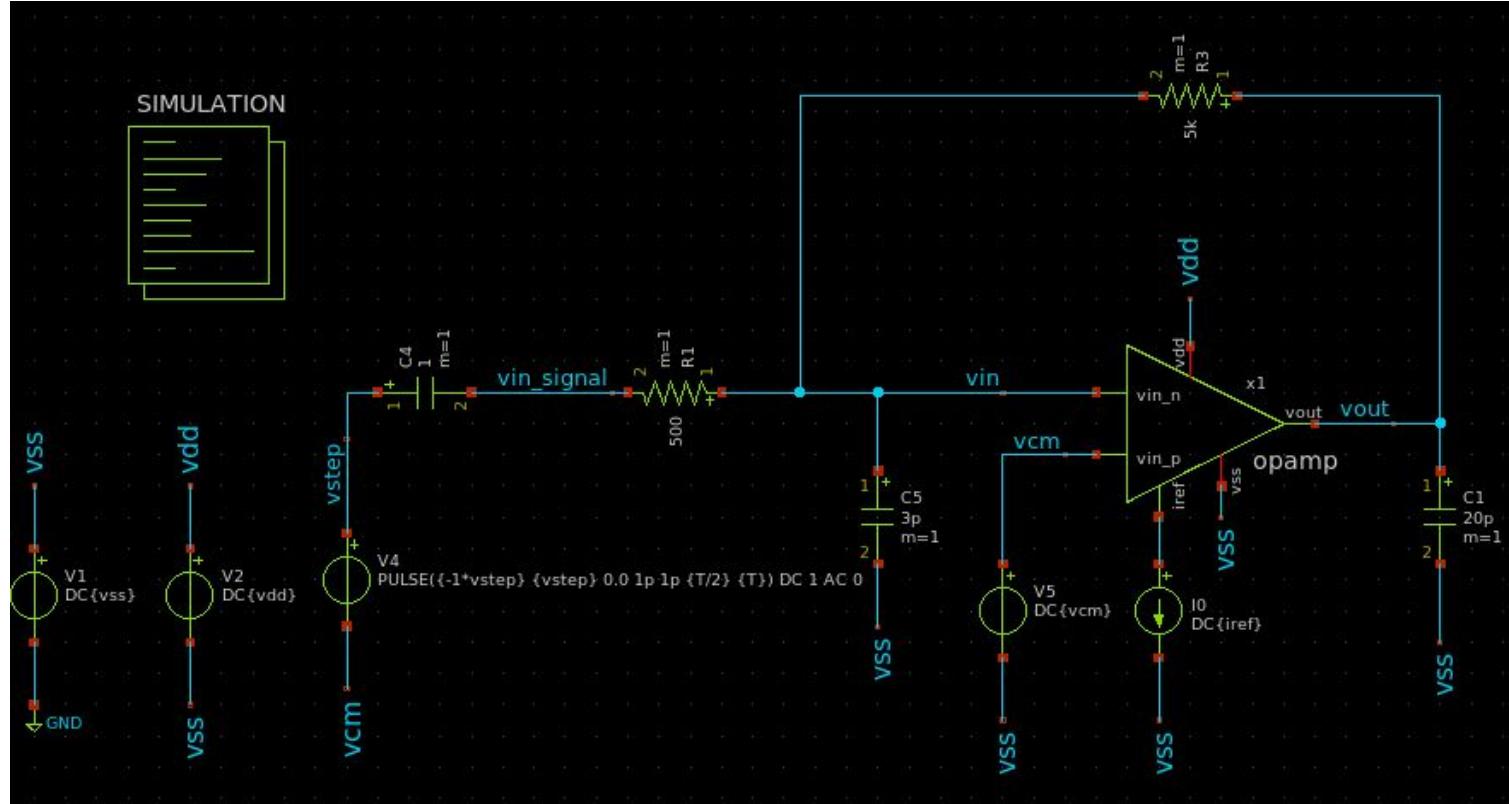
Reporte de ruido en corner FF

# Simulación: Lazo Cerrado

## Resumen

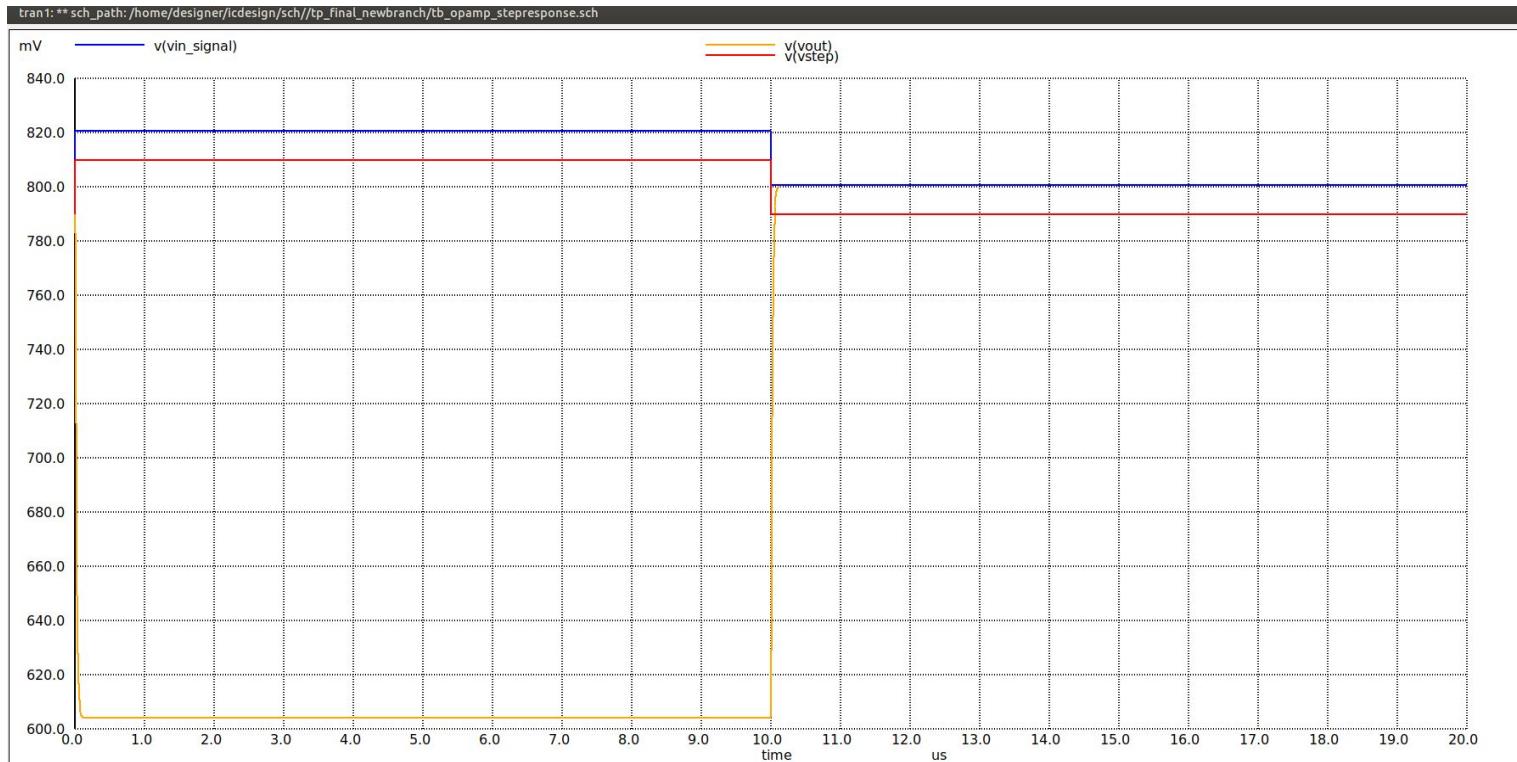
| Corner | DC Gain [dB] | Gain*BW [MHz] | THD [dB] | Noise [ $\mu$ V] | Vcm [V] |
|--------|--------------|---------------|----------|------------------|---------|
| TT     | 19,85385     | 64,56061      | -65,4065 | 207,2042         | 0,8     |
| SS     | 19,82986     | 70,5207       | -55,3097 | 219,9595         | 0,72    |
| FF     | 19,8668      | 70,96012      | -72,8595 | 195,6765         | 0,88    |

# Simulación: Respuesta al Escalón



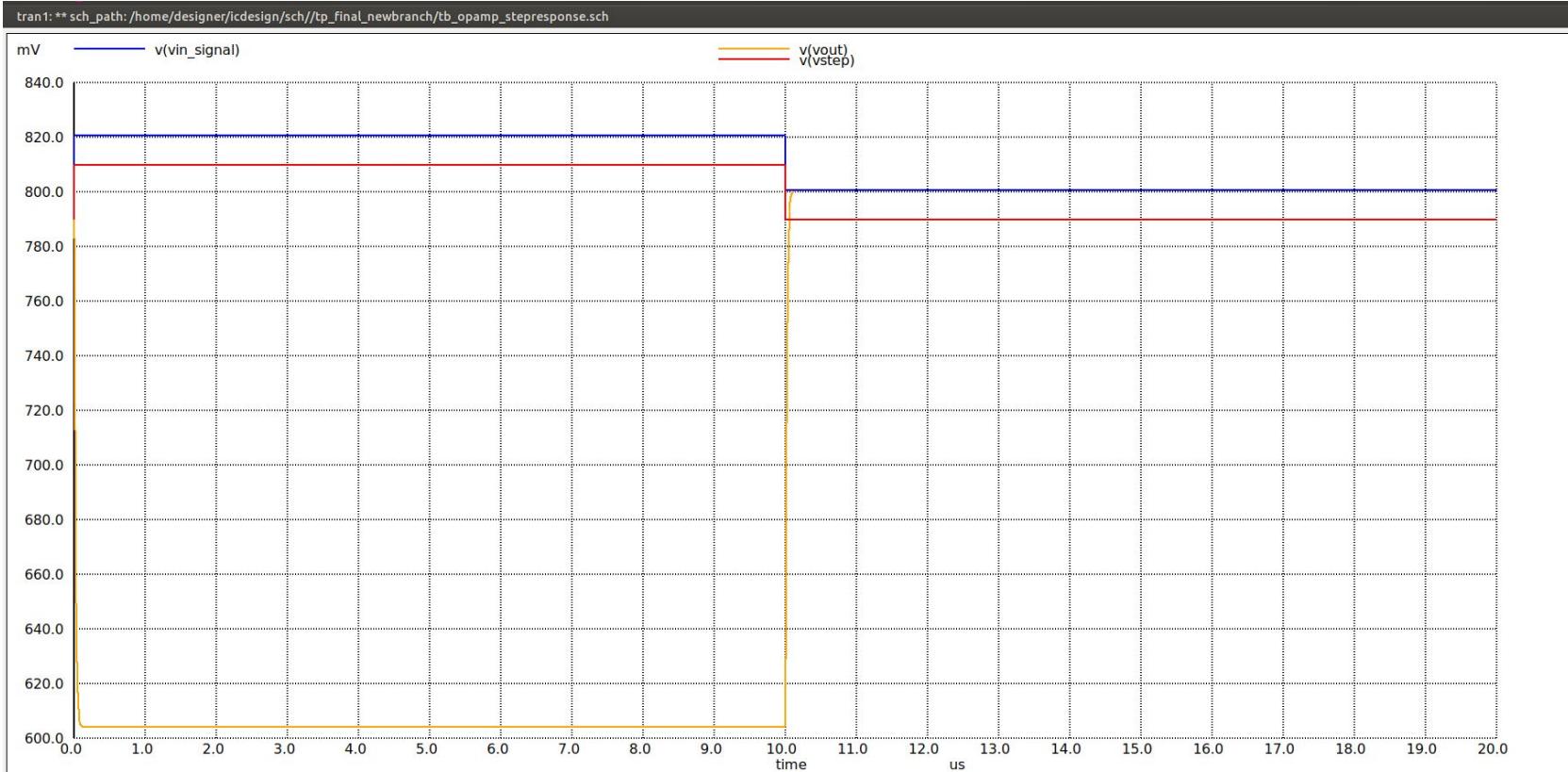
Esquemático del testbench para respuesta al escalón.

# Simulación: Respuesta al Escalón



Escalón para 10 mV en corner TT.

# Simulación: Respuesta al Escalón



Escalón para 60 mV en corner TT.

# Consumo de Corriente y Potencia

| Corner | Iref [uA] | Etapa 1 [uA] | Etapa 2 [uA] | I total [uA] | VDD [V] | Power Total [mW] |
|--------|-----------|--------------|--------------|--------------|---------|------------------|
| TT     | 100       | 1175         | 1812         | 3087         | 1,8     | 5,556            |
| SS     | 95        | 1115         | 1719         | 2929         | 1,72    | 5,03788          |
| FF     | 105       | 1228         | 1904         | 3237         | 1,98    | 6,409            |

# Layout

En caso de haber hecho layout y haberlo terminando. Agregar una captura de pantalla del mismo, donde se observe correctamente la disposición de los transistores y su conexión.

Si el layout está hecho en bloques, se puede colocar una captura de la disposición de los bloques y luego captura de los elementos internos de los bloques.

**No es necesario hacer el Layout para rendir el curso ni para presentar el informe.**

# Conclusiones

**Ganancia y Ancho de Banda:** La compensación Miller puede ayudar a mejorar la estabilidad de la ganancia y el ancho de banda del amplificador, asegurando que la respuesta en frecuencia sea adecuada para tus requerimientos de diseño.

**Selección de Componentes:** Es crucial elegir adecuadamente los valores de resistencias, capacitancias y transistores para optimizar la ganancia y minimizar el ruido, asegurando al mismo tiempo la estabilidad del circuito en diferentes condiciones de carga y frecuencia.

**Estabilidad y Margen de Fase:** La compensación Miller también puede afectar el margen de fase del amplificador. Es importante realizar análisis de estabilidad para garantizar que el circuito no entre en oscilación y tenga suficiente margen para variaciones en los componentes y condiciones operativas.

**Simulación y Verificación:** Antes de la implementación física, realizar simulaciones detalladas del circuito puede ayudar a identificar posibles problemas y optimizar el diseño. Asegúrate de verificar que los resultados simulados cumplan con tus especificaciones de rendimiento.