

# 1 OpAmp

## 1.1 Introducción

Se analizaron dos circuitos con Amplificadores operacionales. El primero es un circuito inversor, cuya salida es opuesta a la entrada y la amplifica o atenúa, de acuerdo a como se configure. El segundo es no inversor, igual que el primero, atenúa o amplifica la señal de entrada, pero no la invierte. El objetivo es evaluar las características lineales y no lineales de los amplificadores operacionales. También la respuesta en frecuencia y la respuesta a distintos valores de tensiones de entrada.

## 1.2 Circuito inversor

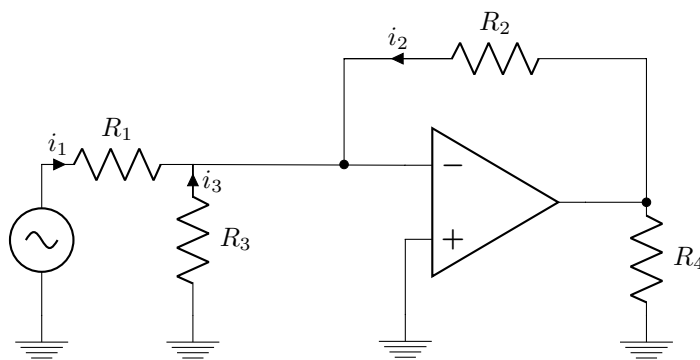


Figura 1: Esquema del circuito Inversor

Los valores de las resistencias utilizados fueron los indicados en la Tabla 1.

Caso	$R_1 = R_3$	$R_2$	$R_4$
1	$5K\Omega$	$50K\Omega$	$20K\Omega$
2	$5K\Omega$	$5K\Omega$	$20K\Omega$
3	$50K\Omega$	$5K\Omega$	$100K\Omega$

Table 1: Valores de resistencias.

algo desir  
alog

### 1.2.1 Caso $A_{vol}$ infinito

Como  $A_{vol}$  lo consideramos infinito,  $V_i = 0$  ( tierra virtual ). Por ende  $i_3 = 0$  e  $i_2 = -i_1$ , Ademas no circula corriente por la entrada del amplificador operacional.

$$V_{out} = -\frac{i_1}{R_2} \quad (1)$$

$$i_1 = \frac{V_{in}}{R_1} \quad (2)$$

Reemplazando 2 en 1 y operando algebraicamente se obtiene:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

### 1.2.2 Caso $A_{vol}$ finito

Como  $A_{vol}$  lo consideramos finito,  $V^+ \neq V^-$ . Se considera que no circula corriente por los terminales de entrada del amplificador operacional, debido a la alta impedancia que hay entre ellos.

$$V_{out} = -V_i \cdot A_{vol} \quad (4)$$

$$i_1 = \frac{V_{in} - V_i}{R_1} \quad (5)$$

$$i_2 = \frac{V_{out} - V_i}{R_2} \quad (6)$$

$$i_3 = \frac{-V_i}{R_3} \quad (7)$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (8)$$

Reemplazando 4,5,6,7 en 8, se obtiene:

$$\frac{V_{in}}{R_1} + \frac{V_{out}}{R_2} + \frac{V_{out}}{A_{vol}} \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = 0$$

Operando algebraicamente, se obtiene:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{A_{vol} \cdot R_2 \cdot R_3}{A_{vol} \cdot R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2} \quad (9)$$

*Observacion:*

$$\lim_{A_{vol} \rightarrow \infty} (9) = -\frac{R_2}{R_1}$$

La expresion se redujo a la ganancia del circuito, con el amplificador operacional ideal (3).

### 1.2.3 Caso $A_{vol}$ con polo dominante

$$A_{vol} = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{W_p}} \quad (10)$$

Reemplazando (10) en (9) se obtiene:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = - \frac{\frac{A_0}{1 + \frac{s}{W_p}} \cdot R_2 \cdot R_3}{\frac{A_0}{1 + \frac{s}{W_p}} \cdot R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2} \quad (11)$$

Llamando  $K = R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = - \frac{A_0 \cdot R_2 \cdot R_3}{A_0 \cdot R_1 \cdot R_3 + K} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\frac{s}{W_p} \cdot \left( \frac{A_0 \cdot R_1 \cdot R_3 + K}{K} \right)}{1}} \quad (12)$$

Despejando se obtiene la frecuencia de corte del circuito:

$$f_P = \left( \frac{A_0 \cdot R_1 \cdot R_3 + K}{K} \right) \cdot \frac{W_P}{2 \cdot \pi} \quad (13)$$

*Observacion:* la ecuacion (12) posee la misma forma que la funcion transferencia de un pasabajas.

El amplificador operacional utilizado fue el LM324 de ON Semiconductor, de la hoja de datos se obtuvieron las siguientes características del integrado:

$A_0$	$f_P$
$10 \cdot 10^4$	$12Hz$

Table 2: Características del LM324

Donde  $A_0$  es la ganancia del amplificador operacional a lazo abierto y  $f_P$  es la frecuencia de corte a lazo abierto. A partir de las tablas 1 y 2 y de ecuación 12, se calcularon las características de las tres configuraciones del circuito analizadas.

Caso	Ganancia ideal	Ganancia $A_{vol}$ finito	Frecuencia de corte
1	-10	-9,997	$54,7KHz$
2	-1	-0,999	$386KHz$
3	-0,1	-0,099	$960KHz$

Table 3: Ganancia y frecuencia de corte del circuito. La ganancias es en veces.

A continuación se graficarán los tres casos del circuito inversor, comparando la respuesta en frecuencia con  $A_{vol}$  infinito y  $A_{vol}$  con polo dominante.

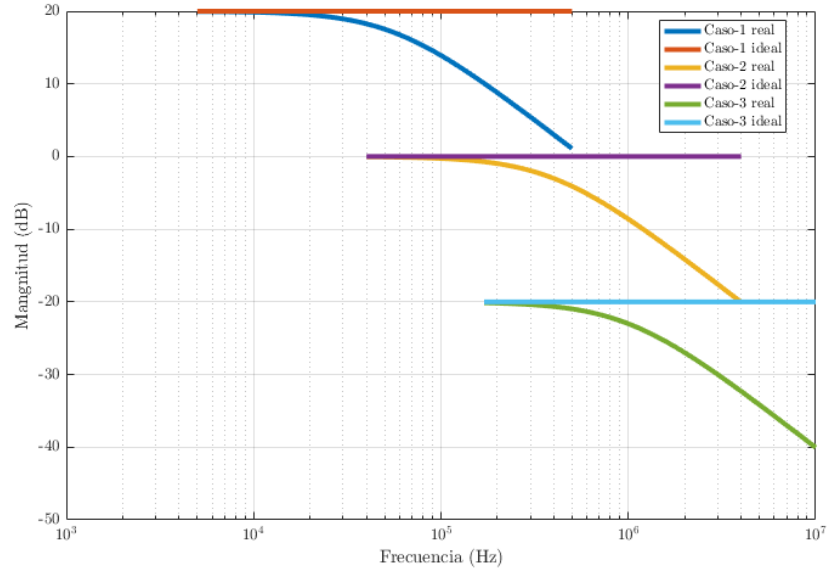


Figura 2: Comparación del modulo de la respuesta en frecuencia de los tres casos

El error relativo de considerar  $A_{vol}$  como infinito, se calculo  $Error(w) = \frac{|GananciaA_{vol}(w) - GananciaA_{vol}infinito|}{|GananciaA_{vol}(w)|}$ , de esta manera se obtuvieron los siguientes graficos:

poner graficos de fase?

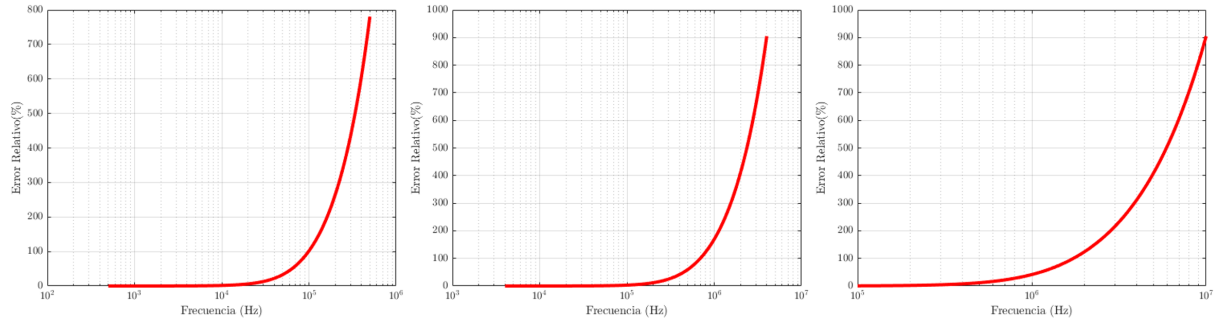


Figura 3: Error relativo porcentual, de izquierda a derecha Caso 1, Caso 2 y Caso 3

Como se observa en los tres graficos de la figura 3, el error una decada antes del polo dominante es menor que el 1 % , por ende utilizando el Amplificador Operacional a una frecuencia menor que una decada antes de la frecuencia de corte, se lo puede considerar como ideal.

#### 1.2.4 Alinealidades del Amplificador Operacional

En esta seccion se analizaran las alinealidades del Amplificador operacional

- Saturacion, los amplificadores operacionales poseen alimentacion (  $+ - V_{cc}$  ) externa para asi poder aplicar. Por ende la salida del amplificador no puede superar a la alimentacion. Si la señal de entrada fuera tal que aplicada superara la alimentacion, el amplificador operacional entrega a la salida  $+o - V_{cc}$ . No todos los amplificadores operacionales saturan en  $+ - V_{cc}$ , generalmnete lo hacen por devajo de dichas tensiones y no necesariamente saturan a la misma tension, por ejemplo un Amplificador operacional es alimnetado con  $\pm 10$  v, y la saturacion se da a los -8 v y a los 9v.
- Slew Rate, es la tasa de cambio de la tension en funcion del tiempo. Los amplificadores Operacionales poseen un slew rate maximo, a partir del cual no pueden seguir la señal de entrada y la salida se distorciona. Para señales senoidales, la relacion entre la frecuencia de entrada, la ganancia y el slew rate es  $SlewRate_{max} = G \cdot A \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$ , donde  $G$  es la ganancia del circuito,  $A$  es la amplitud de la señal de entrada y  $f$  es la frecuencia de la señal.
- Crossover Distortion, los amplificadores operacionales clase b y AB (ejemplo el LM324), poseen la característica que la salida se encuentra en 0 v, cuando la tension de entrada del operacional se encuentra entre -0,7 v y 0,7v.

#### 1.2.5 Dc sweep

El dc sweep consiste en variar la tensión de entrada (corriente continua) del circuito y observar la salida. En este caso se varió la entrada entre  $\pm V_{cc}(\pm 15v)$ . Dicho procedimiento se realizó de la siguiente manera, en la entrada se inyectó una rampa cuya tensión variaba entre  $\pm V_{cc}$  y de periodo 60 segundos, y la salida se midió con el osciloscopio. Luego se exportaron los datos del osciloscopio en formato CSV y se supepuso la informacion en el siguiente grafico.

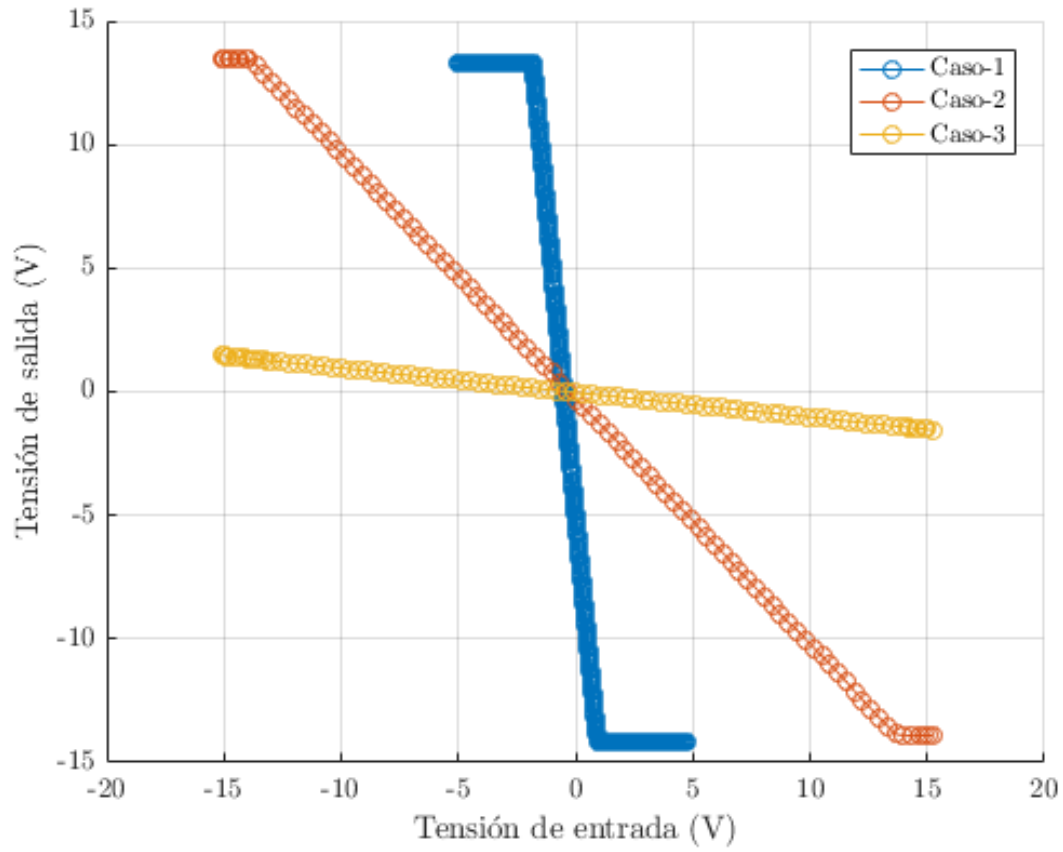


Figura 4: Dc Sweep Medido

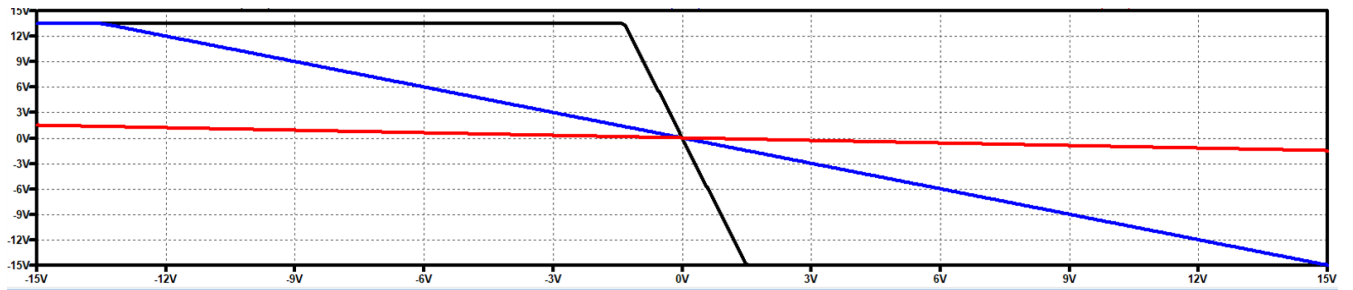


Figura 5: Dc Sweep Simulado, el grafico negro corresponde al Caso 1, el azul al Caso 2 y el rojo al Caso 3

La figura 4, es la superposición de los dc sweep medidos de los tres casos. En ella se manifiesta

fenómeno de la saturación del amplificador operacional, en dos de los tres casos analizados. Dependiendo de la ganancia del circuito (pendiente de la recta), la saturación se da a distintas tensiones de entrada, a mayor ganancia (Caso 1) satura a menor tensión que el circuito de menor ganancia (Caso 2). Como se alimentó con  $\pm V_{cc}$  el circuito 3 no se logró llegar a la saturación. Para lograrlo se tendría que haber realizado el dc sweep con tensiones del orden de 150 V. Tanto en la figura 4 como en la figura 5, se observa que la saturación se da a tensiones en módulo menores que VCC. Sin embargo la medición y la simulación no coinciden, esto se puede deber a que el modelo utilizado no se ajusta al amplificador operacional que se usó en el circuito.

### 1.2.6 Respuesta en frecuencia

La ecuación 12 es la función transferencia del circuito, como la parte real del polo es negativa el sistema es bipo-estable y para hallar la respuesta en frecuencia basta con reemplazar  $s=i\omega$ . El sistema corresponde a un circuito pasa bajos de primer orden, por ende se esperaría que las frecuencias una década menor que la frecuencia de corte no se vean atenuadas y frecuencias una década superiores a la frecuencias de corte, se vean atenuadas. En cuanto a la fase debería variar entre  $180^\circ$ , una década antes de la frecuencia de corte, y  $90^\circ$  grados una década después de la frecuencia de corte, pasando por los  $135^\circ$  en la frecuencia de corte.

En la medición de la respuesta en frecuencias se tuvieron que tener en cuenta las alinealidades ya mencionadas. Para que el crossover distortion no afecte las mediciones, a la señal de excitación se la monto sobre una tensión continua, tal que la señal de entrada no cruce por cero. Esto provocó que la amplitud de la señal tenga que ser menor que la esperada para que no se sature la salida. Otro factor importante a tener en cuenta es el slew rate. En base a esto la tensión de entrada quedo limitada de la siguiente manera.

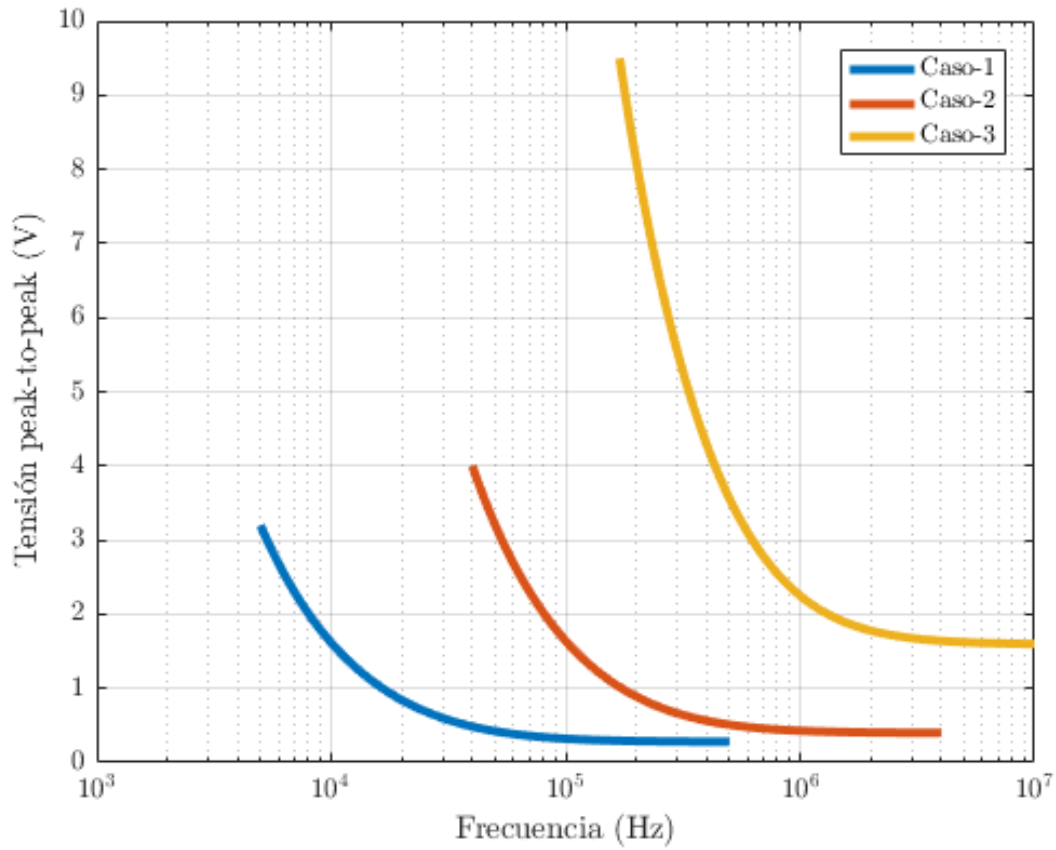
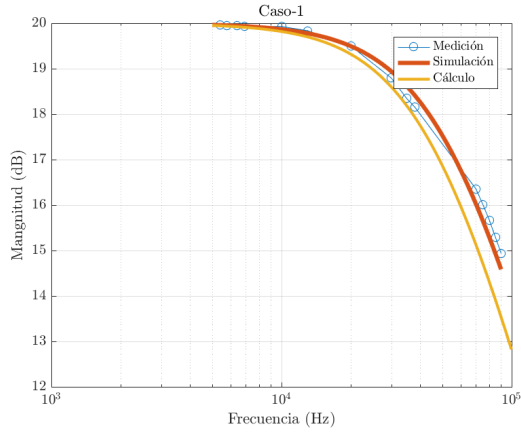


Figura 6: Tension de entrada,slew rate

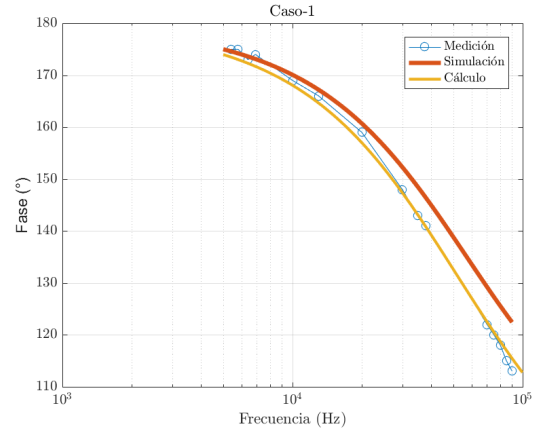
El grafico 6, muestra la máxima tensión de entrada en cada caso, sin embargo únicamente tiene en cuenta el slew rate, entonces de acuerdo al offset de la señal se limitara la amplitud para que no haya saturación.

Teniendo en cuenta los factores mencionados se midió la respuesta en frecuencia del circuito.





(a) Magnitud



(b) Fase

Figura 7: Caso 1 - superposición respuesta en frecuencia medida, simulada, calculada

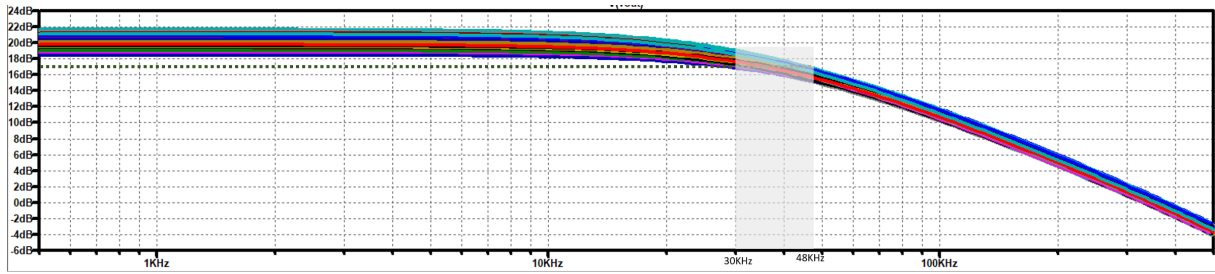
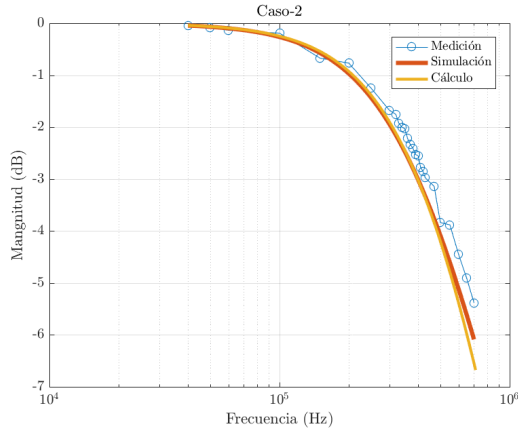
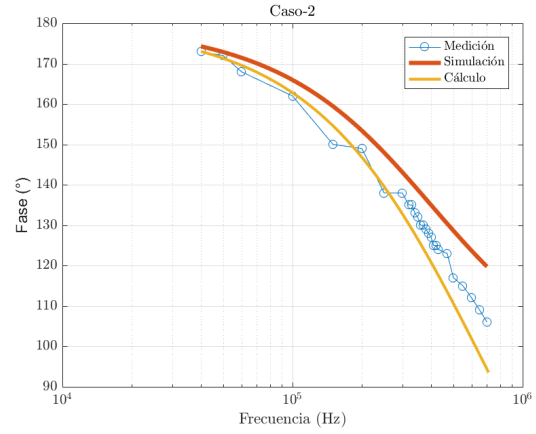


Figura 8: Montecarlo Caso-1

De la figura 7a, obtuvimos la frecuencia de corte del circuito, a la cual la caída de la ganancia es de 3dB. Dicha frecuencia de corte es  $47KHz$ , la cual es distinta a la calculada teóricamente en la tabla 3. Sin embargo, se puede aceptar dicha frecuencia de corte, debido a que los componentes tienen tolerancias, tal como se observa en el Montecarlo (grafico 8) la frecuencia de corte pertenece al intervalo marcado en el grafico.



(a) Magnitud



(b) Fase

Figura 9: Caso 2 - superposición respuesta en frecuencia medida, simulada, calculada

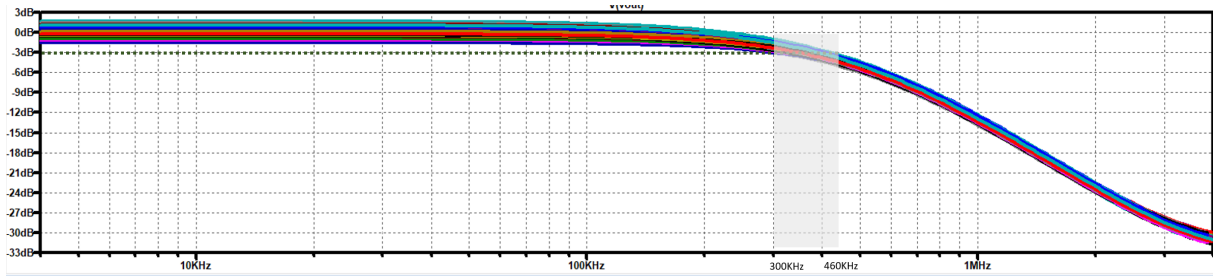


Figura 10: Montecarlo Caso-2

De la figura 9a, obtuvimos la frecuencia de corte del circuito, a la cual la caída de la ganancia es de 3dB. Dicha frecuencia de corte es  $430KHz$ , la cual es distinta a la calculada teóricamente en la tabla 3. Sin embargo, se puede aceptar dicha frecuencia de corte, debido a que los componentes tienen tolerancias, tal como se observa en el Montecarlo (gráfico 10) la frecuencia de corte pertenece al intervalo marcado en el gráfico.

desir alguna  
reflexion  
mas al re-  
specto

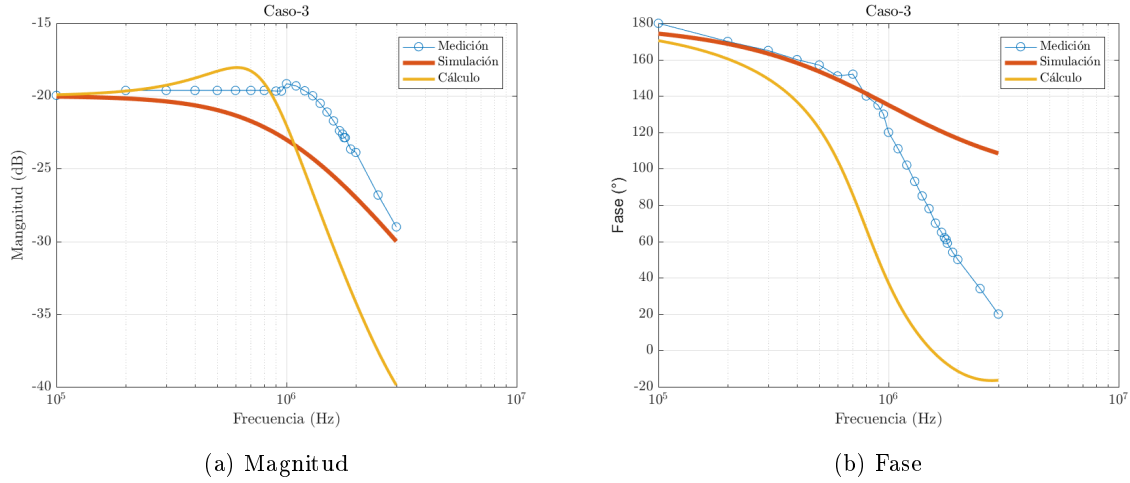


Figura 11: Caso 3 - superposición respuesta en frecuencia medida, simulada, calculada

En la figura 11a, se observa un sobrepico, cercano a la frecuencia de corte, en la medición y la simulación, sin embargo éste no se observa en los cálculos. Suponemos que este fenómeno se debe a la baja ganancia del circuito, lo que amplía su ancho de banda haciendo que el polo dominante del  $A_{vol}$  se acerque a un polo secundario, provocando el sobrepico. La diferencia que se observa entre lo simulado y lo medido, se debió a que se tuvo que cambiar de modelo en Ltspice, puesto que el que se utilizó en los otros casos, posee un único polo del  $A_{vol}$ . También se puede ver el fenómeno de los dos polos, en la fase. Tal como se observa en el gráfico 11b, la fase medida y simulada varían entre  $180^\circ$  y  $0^\circ$ , lo que implica la existencia de dos polos.

### 1.2.7 Impedancia de entrada

Reemplazando las ecuaciones 6, 7 en 8 y despejando  $V_i$  de la ecuación 5 y reemplazando, obtengo la siguiente expresión de la impedancia de entrada del circuito, con  $A_{vol}$  finito.

$$Z_{in} = \frac{R_2 R_3 + R_1 (R_3 (A_{vol} + 1) + R_2)}{R_3 (A_{vol} + 1) + R_2} \quad (14)$$

La impedancia ideal del circuito es

$$\lim_{A_{vol} \rightarrow \infty} (14) = R_1$$

Para la medición de la impedancia de entrada del circuito, se colocó una resistencia de  $100K\Omega$  en serie a la entrada, se midió la tensión antes y después de ella. De esta manera haciendo la resta de las tensiones y conociendo la resistencia, se obtuvo la corriente. Luego dividiendo la tensión después de la

que onda la fase, decir o hacer algo

resistencia por la corriente se halló la impedancia.

También se tuvieron las mismas precauciones que en la medición de la respuesta en frecuencia, sobre las alinealidades.

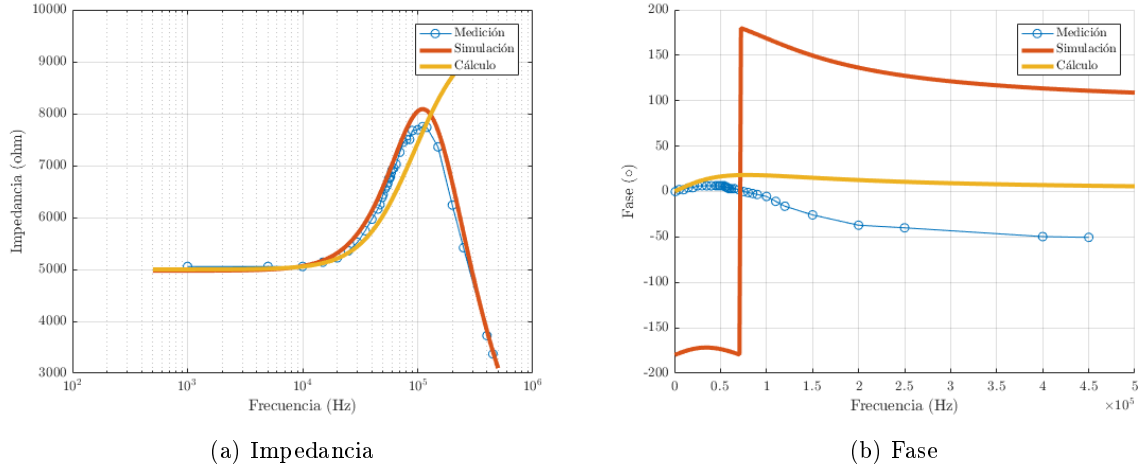
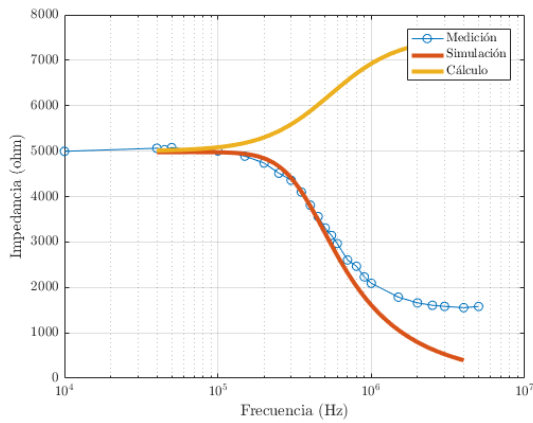
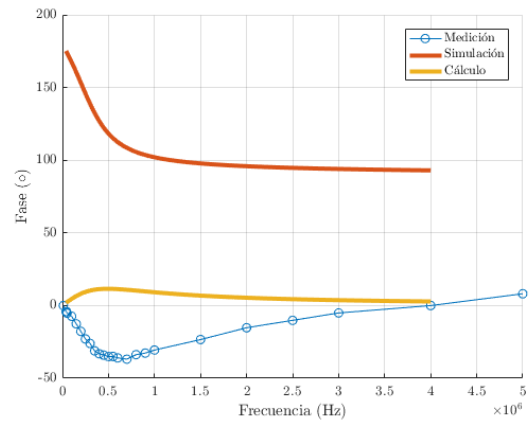


Figura 12: Caso 1 - superposición Impedancia de entrada medida, simulada, calculada

Como se observa en el grafico 12a, lo calculado tiene un comportamiento distinto al simulado y medido, esto se debe a que la ecuación de impedancia de entrada no tiene en consideración las dos puntas del osciloscopio utilizadas para medir la caída de tensión en la resistencia. Debido a esto, en la simulación se agregaron la puntas del osciloscopio, modeladas como el paralelo de un capacitor de  $100\mu f$  y una resistencia de  $1M\Omega$ , ya que se midió con las puntas en por uno. En cuanto a la fase, se observa en el grafico 12b, que se produce un salto de fase en el simulado, dicho salto en realidad no ocurre, debido a que es de  $360^\circ$ .



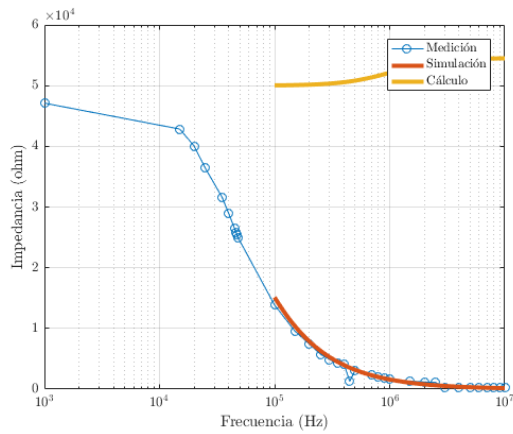
(a) Impedancia



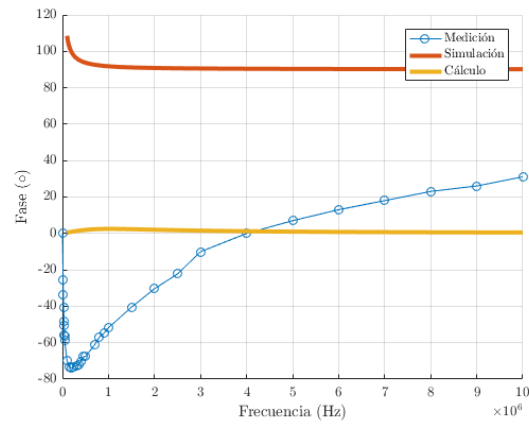
(b) Fase

Figura 13: Caso 2 - superposición Impedancia de entrada medida, simulada, calculada

Tal como el caso anterior, se observa diferencia entre los calculado y lo simulada, medido. Esto se debe también a las puntas. Sin embargo en este caso no se observa sobre pico, esto se debe a que las frecuencias en este caso son mayores y los efectos de las puntas se manifiesta antes.



(a) Impedancia



(b) Fase

Figura 14: Caso 3- superposición Impedancia de entrada medida, simulada, calculada

Tambien, en este caso las puntas alteraron significativamente las mediciones, tal como se observa en el grafico 14a, la impedancia de entrada desciende en vez de aumentar.

### 1.2.8 Observaciones del circuito

Si la  $R_3$  valiese cero,  $V^+$  y  $V^-$ , valen lo mismo independientemente de la frecuencia y de la tensión de entrada. De acuerdo a la ecuación  $V_{out} = A_{vol}(V^+ - V^-)$ , la salida del OpAmp sería cero. Esto mismo se puede ver haciendo el límite tendiendo a cero de  $R_3$  de la ecuación 12, la salida del es cero independientemente de la entrada.

La función de la  $R_4$  de cargar al circuito, sin embargo no puede tener cualquier valor. Como la salida del circuito tiene una tensión  $V_o$  independiente de la carga, si se conecta una resistencia de valor pequeño la corriente debería aumentar para así mantener la salida. En principio esa resistencia podría ser tan pequeña como se desee, entonces la corriente debería aumentar para mantener la tensión. Sin embargo los OpAmp reales tienen una máxima corriente de salida  $i_{max}$ , entonces se debe cumplir  $R_4 > \frac{V_o}{i_{max}}$ .

## 1.3 Circuito no inversor

poner imagen del circuito

### 1.3.1 Caso $A_{vol}$ infinito

Considerando que a través de  $V^+$  y  $V^-$ , no circula corriente. Debido a  $A_{vol}$  infinito,  $V^+ = V^-$ .

$$V^+ = V^- \quad (15)$$

$$\frac{V^+}{R_4} = \frac{V_{in}}{R_3 + R_4} \quad (16)$$

$$\frac{V^-}{R_1} = \frac{V_{out}}{R_1 + R_2} \quad (17)$$

Reemplazando 16, 17 en 15 y operando, se obtiene la ganancia del circuito ideal

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_4(R_1 + R_2)}{R_1(R_3 + R_4)} \quad (18)$$

### 1.3.2 Caso $A_{vol}$ finito

Consideramos que la impedancia de entrada del OpAmp es muy alta, por ende no circula corriente entre  $V^+$  y  $V^-$ .

$$V_{out} = A_{vol}(V^+ - V^-) \quad (19)$$

Reemplazando 16, 17 en 19 y operando, se obtiene la ganancia del circuito con  $A_{vol}$  finito.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_{vol}R_4(R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2 + A_{vol}R_1)(R_3 + R_4)} \quad (20)$$

*Observacion:*

$$\lim_{A_{vol} \rightarrow \infty} (20) = \frac{R_4(R_1 + R_2)}{R_1(R_3 + R_4)}$$

La expresi3n se redujo a la ganancia del circuito con el amplificador operacional ideal ( 18 ).

### 1.3.3 Caso $A_{vol}$ con polo dominante

$$A_{vol} = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{W_p}} \quad (21)$$

Reemplazando 21 en 20 y operando, se obtiene la ganancia del circuito en funcion de la frecuencia

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_{vol}R_4(R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2 + A_{vol}R_1)(R_3 + R_4)} \frac{1}{1 + \frac{s}{\frac{W_p(R_1(A_0) + R_2)}{R_1 + R_2}}} \quad (22)$$

Despejando se obtiene la frecuencia de corte del circuito:

$$f_P = \frac{W_p(R_1(A_0 + 1) + R_2)}{(R_1 + R_2)2\pi} \quad (23)$$

A partir de las ecuaciones 22y23, la tabla 2 y de los valores de los componentes, se calcul3 siguiente tabla.

Caso	Ganancia ideal	Ganancia $A_{vol}$ finito	Frecuencia de corte
1	8.8	8.799	109KHz
2	1.6	1,599	600KHz
3	0.733	0.733	1100KHz

Table 4: Ganancia y frecuencia de corte del circuito.La ganancias es en veces.

Acontinuacion se graficaran los tres casos del circuito inversor, comparando la respuesta en frecuencia con  $A_{vol}$  infinito y  $A_{vol}$  con polo dominante.

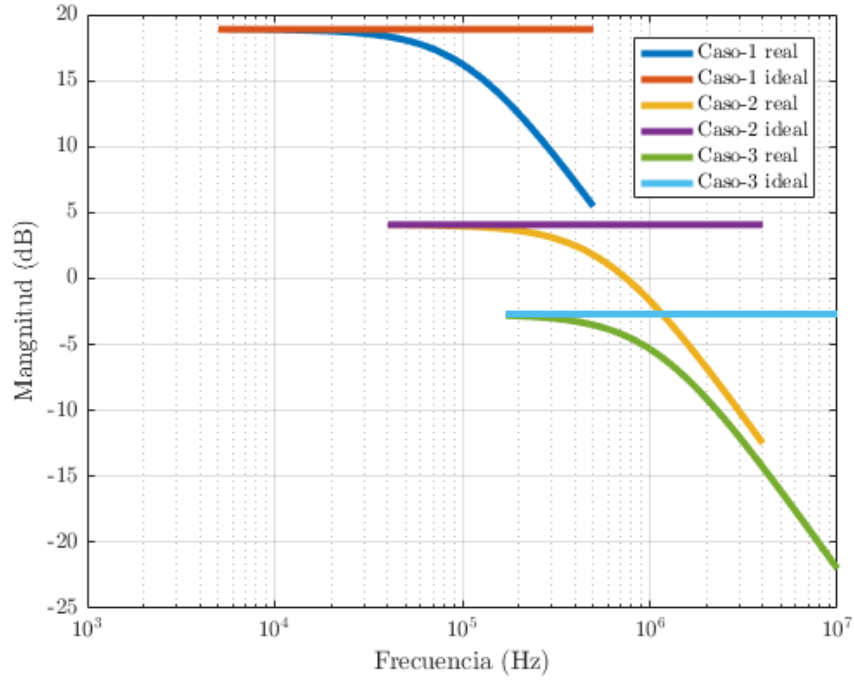


Figura 15: Comparación del modulo de la respuesta en frecuencia de los tres casos

El error relativo de considerar  $A_{vol}$  como infinito, se calculo  $Error(w) = \frac{|Ganancia_{A_{vol}(w)} - Ganancia_{A_{vol} infinito}|}{|Ganancia_{A_{vol}(w)}|}$ , de esta manera se obtuvieron los siguientes graficos:

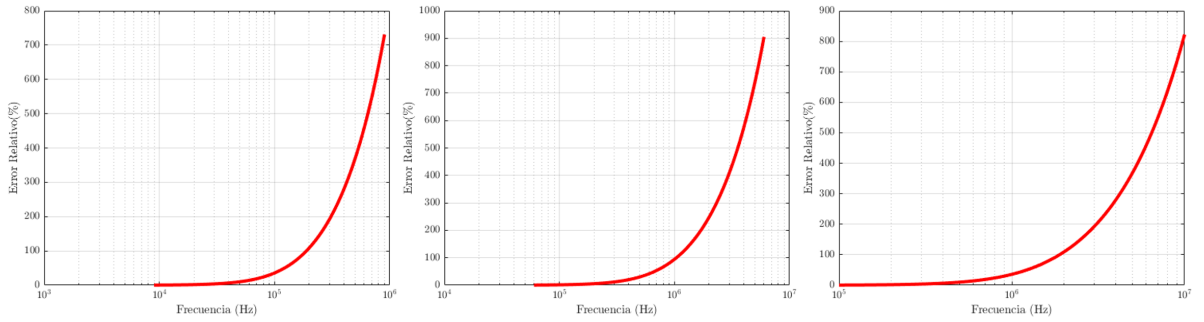


Figura 16: Error relativo porcentual, de izquierda a derecha Caso 1, Caso 2 y Caso 3

Tal como ocurrio en el circuito inversor, se puede usar la aproximacion del OpAmp como ideal cometi-  
tiendo un erro menor que el 1%, a frecuencias una decada por devajo de la frecuencia de corte.



### 1.3.4 Alinealidades del Amplificador Operacional

Se tuvieron en consideracion las mismas alinealidades detalladas en el Circuito no inversor

ver que  
hacer, si  
volarlo o  
no

### 1.3.5 Dc sweep

La medición del dc sweep se realizó de la misma manera que el circuito inversor, mediante el osciloscopio y el generador de funciones. También se alimentó al OpAmp con  $\pm 15V$  y la tensión de entrada varió en ese mismo rango.

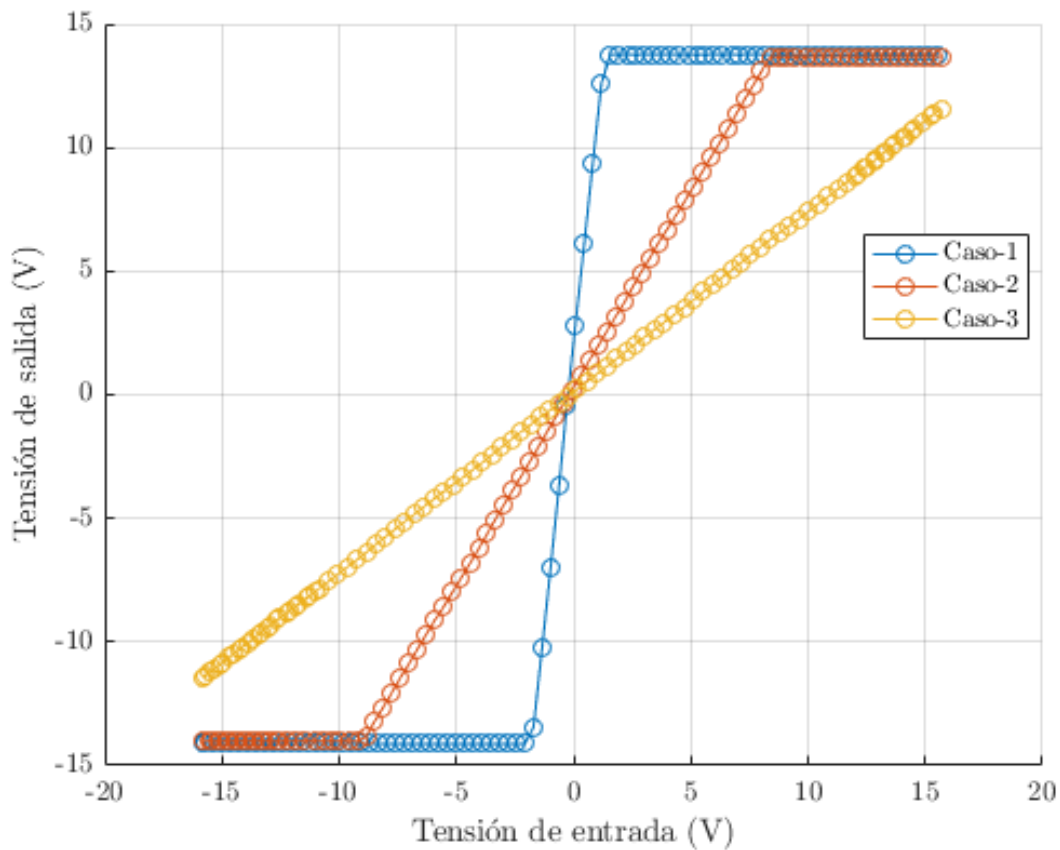


Figura 17: Dc Sweep Medido

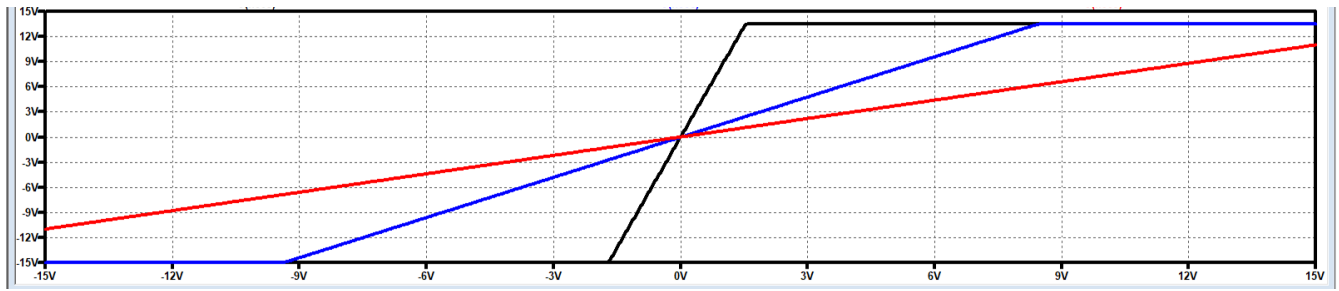


Figura 18: Dc Sweep Simulado, el grafico negro corresponde al Caso 1, el azul al Caso 2 y el rojo al Caso 3

Tal como se observa en ambas figuras, se observa la saturación del OpAmp, en los Casos 1 y 2. Esto se debe a su alta ganancias en comparación a la tensión de entrada. Para poder haber observado la saturación del caso 3, la tensión de entrada debería haber sido de  $\pm 25v$ . También se puede observar que la saturación no se da a la misma tensión en las tensiones de salidas positivas y las negativas.

algo mas

### 1.3.6 Respuesta en frecuencia

### 1.3.7 Impedancia de entrada

### 1.3.8 Observaciones del circuito

En el caso que  $R_3$  valga cero, la ganancia del circuito se altera de la siguiente manera  $\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{(R_1 + R_2)}{R_1}$ , en contraposición al caso del circuito inversor, la salida del OpAmp no es cero, y depende de la tensión de entrada y la frecuencia. También la ganancia del circuito depende de las resistencias  $R_4$ .

## 1.4 Conclusión