



FACULTAD DE INGENIERIA

Universidad de Buenos Aires

CIRCUITOS ELECTRÓNICOS II - 66.10

Trabajo práctico N° 1B

Análisis de estabilidad y compensación de una fuente lineal

Alumnos:

IRUSTA Pablo Padrón N° 80171

pabirus@gmail.com

LUNA Diego Padrón N° 75451

diegorluna@gmail.com

NIERO Adrián Padrón N° 80533

adrianniero@gmail.com

ROMERO Daniel Padrón N° 69456

danielosrom@gmail.com

Docentes:

Ing. BERTUCCIO José Alberto

Ing. ACQUATICCI Fabián

Ing. MARCHI Edgardo

Ing. BULACIO Matías

Ing. D'ANGIOLO Federico

Ing. GAMEZ Pablo

06 de Mayo de 2019

Índice

| | |
|---|-----------|
| Índice | I |
| 1. Objetivos | 1 |
| 1.1. Resumen de objetivos | 1 |
| 1.2. Desarrollo | 1 |
| 2. Análisis cualitativo | 5 |
| 2.1. Criterio de compensación | 5 |
| 2.2. Método general de compensación | 5 |
| 2.3. Método de compensación en el circuito analizado | 6 |
| 2.3.1. Red número 1 | 6 |
| 3. Redes de compensación | 8 |
| 3.1. Red de compensación Ccomp/Rcomp | 9 |
| 3.1.1. Variación de la ganancia de lazo con Ccomp en modo tensión | 10 |
| 4. Observaciones y conclusiones | 11 |
| 4.1. Observaciones y conclusiones | 11 |
| 5. Bibliografía | 13 |
| Apéndices | 15 |
| A. Análisis teórico de subcircuitos | 15 |
| B. Hojas de datos | 15 |
| B.1. TL431 | 15 |
| B.2. TL082 | 15 |
| B.3. BC548 | 15 |
| B.4. BC558 | 15 |
| B.5. BD137 | 16 |
| B.6. MJE15032 | 16 |
| B.7. MJE2955 | 16 |
| B.8. Metal film resistor | 16 |
| B.9. Carbon film resistor | 17 |
| B.10. Ceramic capacitor | 17 |
| B.11. Electrolytic Aluminum capacitor | 17 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 1.1. Circuito utilizado para la obtención de la ganancia de lazo en función de la frecuencia. | 2 |
| 1.2. Circuito utilizado para la obtención de la respuesta en frecuencia. | 3 |
| 1.3. Circuito utilizado para la obtención de la respuesta dinámica. | 4 |
| 3.1. Ganancia de lazo en función de la frecuencia parametrizada por C_{comp} | 10 |

Índice de cuadros

| | |
|--|---|
| 2.1. Redes de compensación del circuito. | 6 |
|--|---|

1. Objetivos

1.1. Resumen de objetivos

El trabajo práctico consiste en el análisis de la compensación de la misma fuente de alimentación lineal realimentada que en el anterior trabajo práctico (**TP1A**). El análisis es por simulación con **SPICE** (**LTSPICE** específicamente en nuestro caso), de donde se pretende validar los valores de las redes de compensación.

1.2. Desarrollo

Se hace un análisis cualitativo de la compensación de la fuente, para luego pasar a la validación de las redes de compensación. La validación se realiza variando el valor de los componentes a un valor por debajo y uno por encima del valor elegido en el diseño, y comparando como varía el comportamiento de la fuente de tres maneras distintas. En primer lugar se observa como varía la ganancia de lazo con la frecuencia, esta simulación se realiza utilizando el circuito mostrado en la figura [1.1], haciendo un barrido en frecuencia y simulando en forma paramétrica con los valores a comparar, observando los márgenes de fase y de ganancia, lo cual nos da una idea de la estabilidad lograda en cada caso. En segundo lugar se observa la respuesta en frecuencia a lazo cerrado, esta simulación se realiza utilizando el circuito mostrado en la figura [1.2], igual que antes se realiza un barrido en frecuencia y simulando en forma paramétrica con los valores a comparar, observando el ancho de banda obtenido y otras características de la respuesta, como ser picos que indiquen posibles inestabilidades y como varía la fase. Por último se analiza la respuesta temporal de la fuente de alimentación al cargar y descargar bruscamente la misma, esta simulación se realiza utilizando el circuito mostrado en la figura [1.3], esta simulación nos permite observar posibles oscilaciones y sobrepicos que se produzcan a la salida de la fuente, viendo el efecto que tiene la variación de los valores de las redes de compensación, la simulación se repite para cada valor que se ensaya. Cada una de las simulaciones mencionadas anteriormente se realiza en los dos modos posibles de funcionamiento de la fuente, con el lazo de tensión activo y con el lazo de corriente activo, a su vez se simulan dos casos distintos para cada modo, alterando los valores de los resistores de configuración y el valor de la carga, viendo como varía la salida en cada caso.

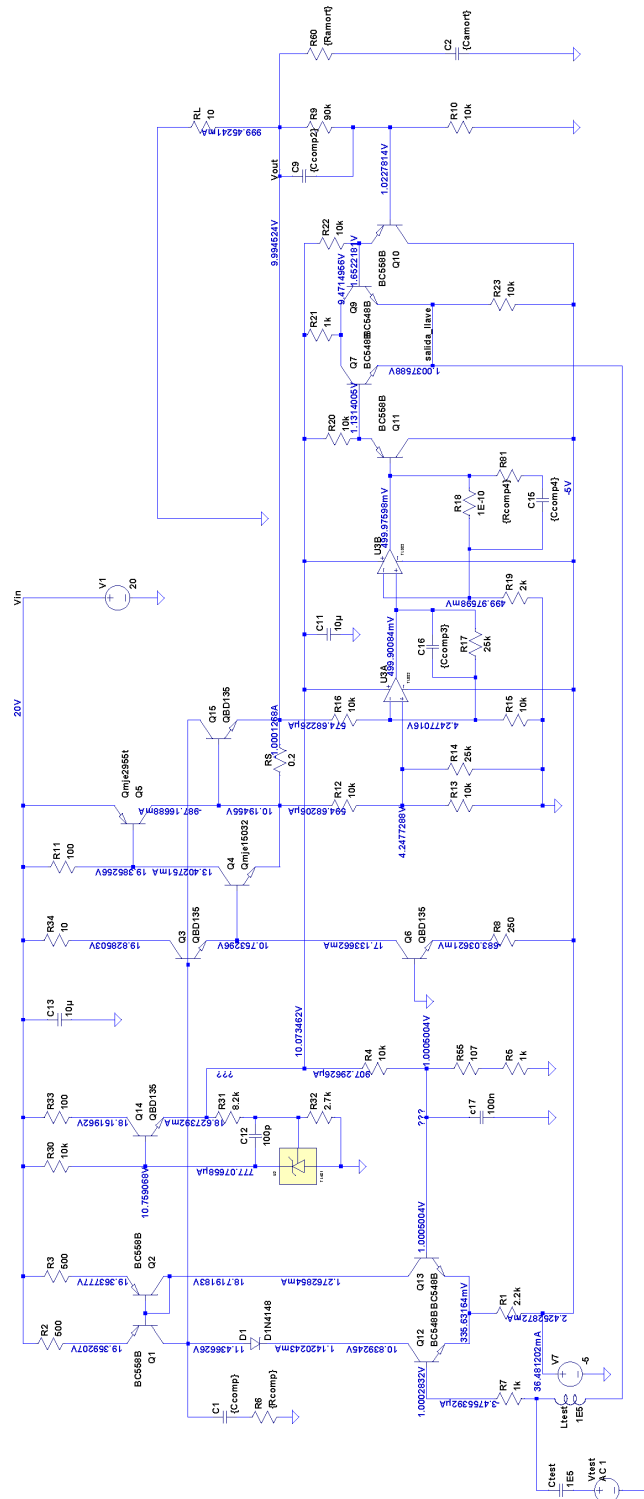


Figura 1.1: Circuito utilizado para la obtención de la ganancia de lazo en función de la frecuencia.

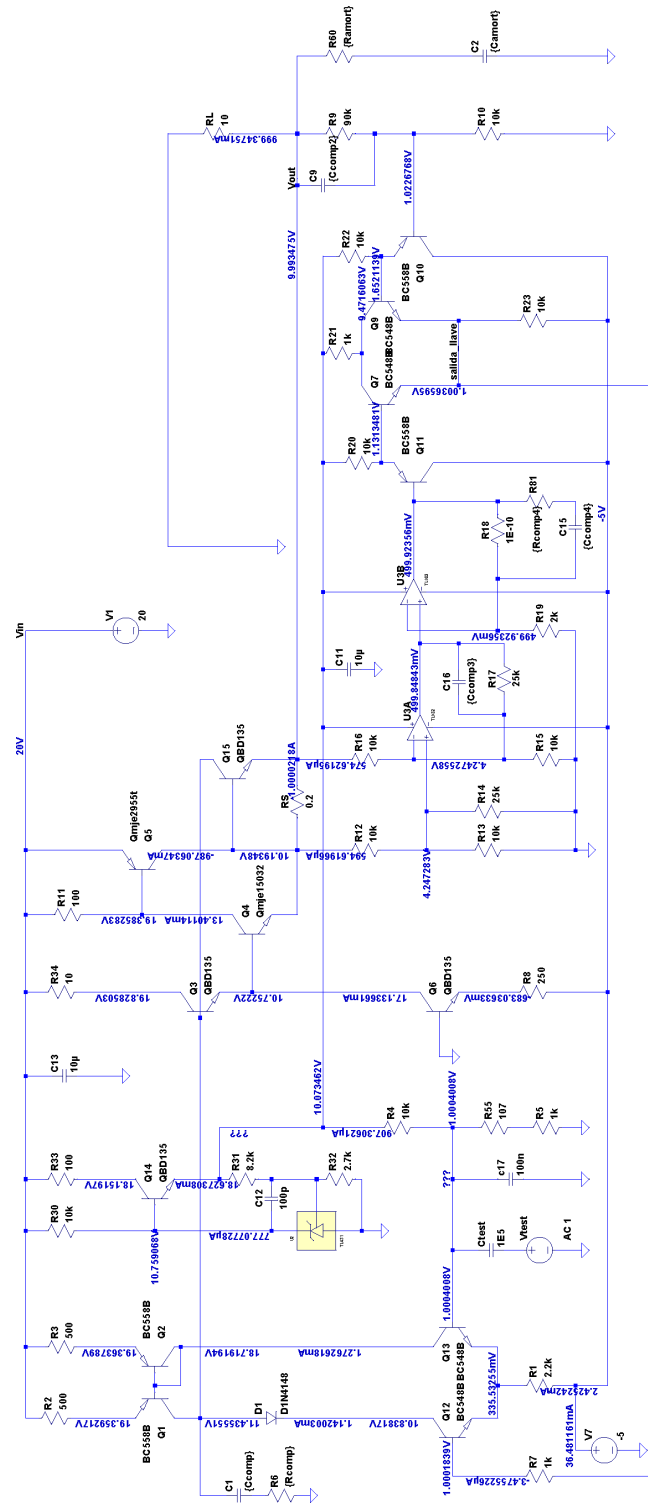


Figura 1.2: Circuito utilizado para la obtención de la respuesta en frecuencia.

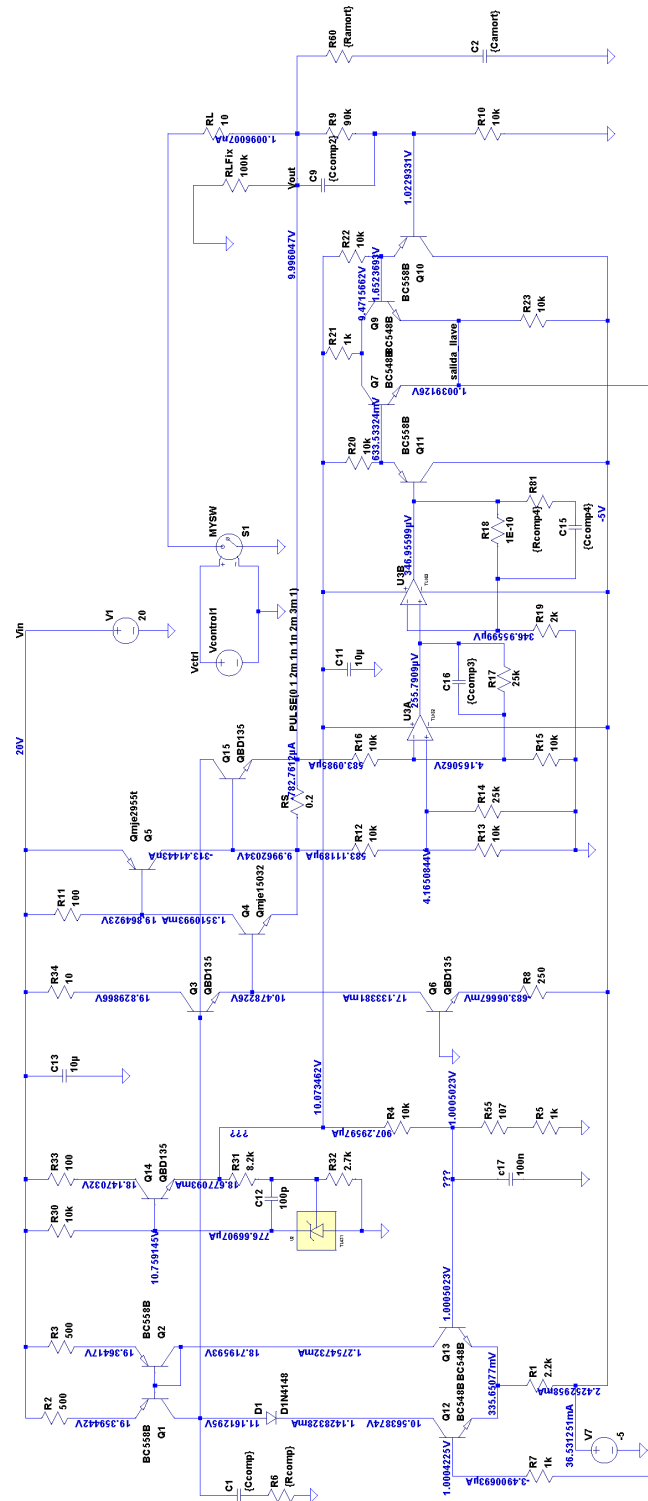


Figura 1.3: Circuito utilizado para la obtención de la respuesta dinámica.

2. Análisis cualitativo

2.1. Criterio de compensación

La compensación de un circuito realimentado negativamente, como lo es la fuente de alimentación analizada, consiste básicamente en evitar que la realimentación negativa se torne positiva al variar la frecuencia, ya que al haber presentes en el circuito estímulos de todas las frecuencias, por ejemplo por el ruido, de existir estas frecuencias a la que el circuito se torna inestables, el circuito oscilará. El criterio mas básico utilizado para verificar la estabilidad es observar el **margen de fase** y el **margen de ganancia** del lazo, verificando que ambas son positivas o que tienen un valor mínimo que garantice que ante variaciones del circuito las mismas no se tornen negativas. El buscar que los márgenes sean positivos corresponde a buscar que nunca se alcance el estado dado por el **criterio de Barkhausen**:

$$\begin{aligned} |a_{(j\cdot\omega)} \cdot \beta_{(j\cdot\omega)}| &= 1 \\ \wedge \\ \angle a_{(j\cdot\omega)} \cdot \beta_{(j\cdot\omega)} &= 2 \cdot n \cdot \pi, \quad n \in \{0, 1, 2, \dots\} \end{aligned} \quad (2.1)$$

En el caso particular de la fuente de alimentación, la realimentación se realiza entrando por la entrada negativa de la etapa diferencial, con lo que ya se tienen -180° de desfase, con lo que si la fase de la ganancia de lazo alcanza -180° , cuando la ganancia es aún mayor a 0dB, el circuito se tornará inestable. De lo dicho anteriormente, el margen de fase se obtiene de observar cuanto le falta a la fase de la ganancia de lazo para alcanzar los -180° cuando el módulo de la ganancia llega a 0dB, ganancia unitaria. Similarmente, el margen de ganancia se obtiene como la ganancia por debajo de 0dB cuando la fase alcanza los -180° .

2.2. Método general de compensación

El método de compensación consiste básicamente en agregar polos y ceros, de modo de lograr que en todos los casos el circuito realimentado sea estable, logrando el mayor ancho de banda posible con sobrepicos que sean aceptables para el uso del circuito. En el caso mas simple, que es el utilizado en el caso de la compensación que tienen internamente muchos amplificadores operacionales comerciales, se fuerza un polo dominante, de manera que el circuito se comporte aproximadamente como un sistema de un único polo estable, caso que es estable para toda frecuencia, ese es el motivo por el cual los fabricantes informan en sus hojas de datos el producto ganancia por ancho de banda, **GBP**, lo cual es justamente válido para un sistema de un único polo. En el caso mas general se suelen introducir múltiples polos y ceros de modo de lograr la compensación deseada, esto se hace en forma de redes de adelanto o de atraso de fase, estas redes introducen cada una, un cero y un polo, en el caso de las redes de atraso de fase, el polo aparece primero en la respuesta, en el caso de las redes de adelanto es el cero el que aparece primero en la respuesta. En algunos casos se introduce una red **R-C** y otros solo un capacitor en alguna parte del circuito de modo de lograr el efecto deseado, en estos casos se suele usar la técnica de multiplicación por **Miller**, colocando un capacitor

pequeño entre la entrada y la salida de una etapa que amplifique, logrando que se vea en la entrada con el valor buscado. Los puntos donde se introducen las redes de compensación dependerán de cada circuito. Para las redes de adelanto o atraso de fase, esperamos encontrar las de atraso en el camino directo de la señal, mientras que las de adelanto las esperamos encontrar en el camino de realimentación, esto es debido a que al cerrar el lazo la ubicación de los polos y ceros se invertirán aproximadamente.

Las singularidades se deben introducir ya sea en las etapas de ganancia, comúnmente asociadas a nodos de alta impedancia, o en las redes de realimentación, como se dijo antes introduciendo los polos primero en el camino directo y los ceros primero en la realimentación para lograr el efecto deseado.

2.3. Método de compensación en el circuito analizado

En esta sección analizamos la localización de las redes de compensación, el motivo de su ubicación y el efecto que las mismas tienen en la respuesta del circuito.

Las redes de compensación que el diseño del circuito incluye se muestran en el cuadro [2.1], junto al nombre que le asignamos y el modo en el que actúan.

| Nombre | Componentes | Modo |
|--------------|---|----------------------------|
| Red número 1 | Ccomp (C1) y Rcomp (R6) | Tensión y corriente |
| Red número 2 | Ccomp2 (C9) y R9 | Tensión |
| Red número 3 | Ccomp3 (C16) y R17 | Corriente |
| Red número 4 | Ccomp4 (C15), Rcomp4 (R6) y R18 | Corriente |
| Red número 5 | Camort (C2) y Ramort (R60) | Tensión |

Cuadro 2.1: Redes de compensación del circuito.

Los componentes resaltados en negrita en el cuadro [2.1], son los agregados como compensación, los demás son parte del circuito original pero forman también parte de la red de compensación correspondiente.

En el caso del circuito de la fuente de alimentación que analizamos, se tienen dos lazos de realimentación independientes, donde solo uno está activo por vez, como se explico en el trabajo práctico anterior (**TP1A**). Como se vio, ambos lazos de realimentación comparten el amplificador, pero difieren en sus redes de realimentación, siendo del amplificador, la etapa diferencial, la única que provee ganancia de tensión.

2.3.1. Red número 1

Dado que las singularidades se deben introducir en las etapas de ganancia, en el caso del camino directo, estas están comúnmente asociadas a nodos de alta impedancia, es justamente por esta razón la etapa diferencial la indicada para introducir una red de compensación, es simple ver que de conectar una red, cuya impedancia disminuya con la frecuencia, en paralelo a la carga de esta primera etapa, su ganancia

disminuirá, es decir, introducimos un polo (y un cero) en la respuesta del amplificador diferencial. Esta red es la **Red número 1**. Viendo esta ganancia en detalle, se tiene:

$$a_{diff}(s) = g_m R_{ca} \frac{1 + R_{comp} \cdot C_{comp} \cdot s}{1 + (R_{comp} + R_{ca}) \cdot C_{comp} \cdot s} \quad (2.1)$$

Se ve claramente que C_{comp} y la impedancia en el nodo de colector R_{ca} , imponen el polo, el valor de R_{comp} es despreciable frente a esta, en el **TP1A** por cálculo y simulación se vio que esta resistencia está en el orden de los $53k\Omega$. El valor de C_{comp} y R_{comp} imponen el cero. Se puede ver que el polo, $\frac{1}{(R_{comp} + R_{ca}) \cdot C_{comp}}$, aparece primero en la respuesta que el cero, $\frac{1}{R_{comp} \cdot C_{comp}}$, con lo que se trata de una red de atraso de fase, cosa esperable ya que se está aplicando al camino directo de la señal, el amplificador.

Dado que no se tienen mas etapas que ganen en el circuito, y además que se tienen dos lazos de realimentación, el resto de las redes de compensación necesariamente irán en las redes de realimentación de cada lazo. Una razón para necesitar mas de una red de realimentación es justamente que se tiene mas de un lazo de realimentación y ambos deben ser compensados, la compensación que introduce la **Red número 1** no puede compensar ambos lazos para todas las combinaciones posibles de seteo de tensión, seteo de corriente y valor de la carga. Dado que solo un lazo está activo por lazo de realimentación, las redes de compensación actuarán en uno u otro modo, o en ambos, en el caso de la **Red número 1**, esto se indica en el cuadro [\[2.1\]](#).

3. Redes de compensación

A continuación se analizan cada una de las redes de compensación en los modos correspondientes.

3.1. Red de compensación **Ccomp/Rcomp**

La red formada por **Ccomp** y **Rcomp** actúa tanto para el lazo de tensión como para el de corriente, por lo que se analizan ambos modos.

3.1.1. Variación de la ganancia de lazo con Ccomp en modo tensión

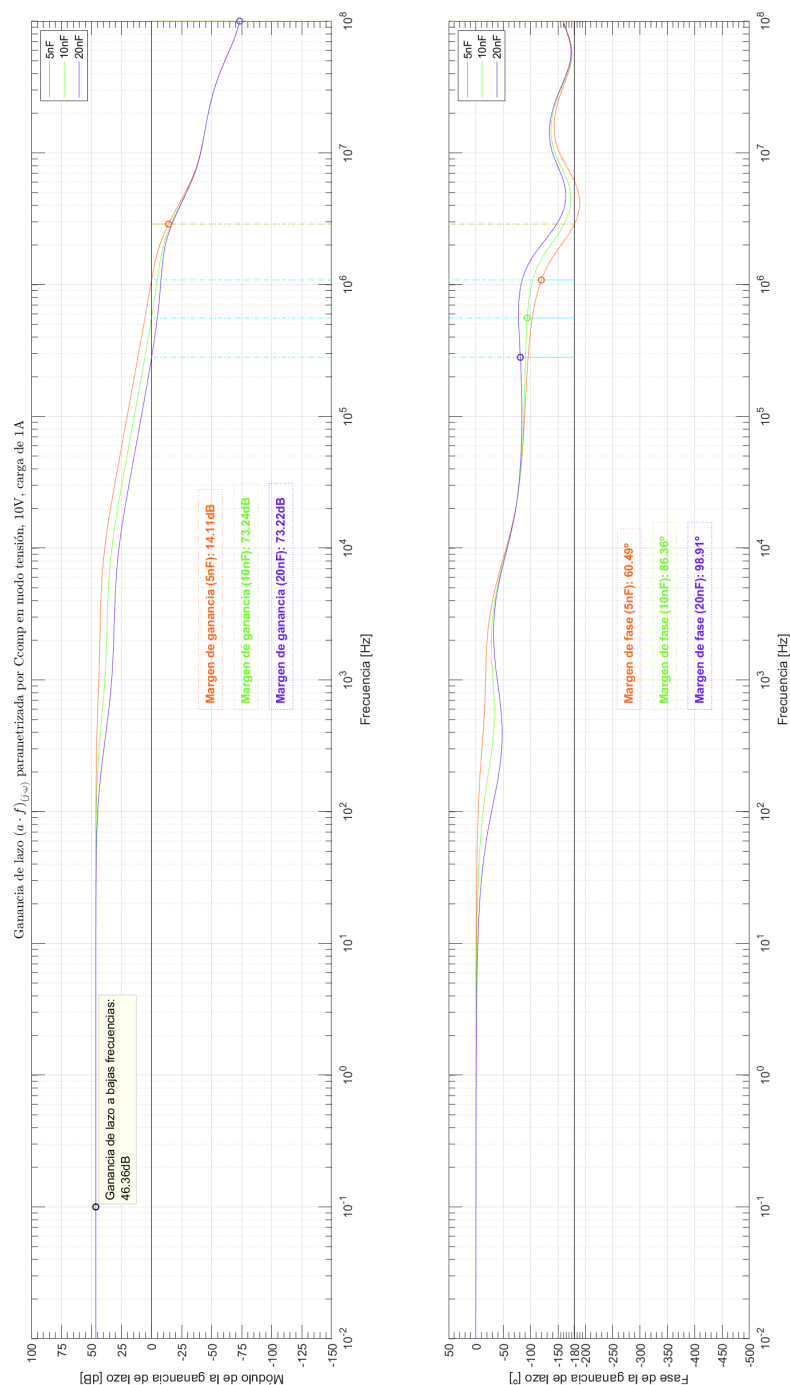


Figura 3.1: Ganancia de lazo en función de la frecuencia parametrizada por Ccomp.

4. Observaciones y conclusiones

4.1. Observaciones y conclusiones

5. Bibliografía

Referencias

- [1] *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits (3rd Edition)*
Author: Paul R. Gray
Author: Robert G. Meyer
Publisher: John Wiley & Sons, Inc.; 3rd Edition (January 15, 1993)
Copyright: © 1993, John Wiley & Sons, Inc.
ISBN 10: 0471574953
Website: [Analysis and Design of Analog Integrated Circuits \(3rd Edition\)](#)
- [2] *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits (4th Edition)*
Author: Paul R. Gray
Author: Paul J. Hurst
Author: Stephen H. Lewis
Author: Robert G. Meyer
Publisher: John Wiley & Sons, Inc.; 4th Edition (2001)
Copyright: © 2001, John Wiley & Sons, Inc.
ISBN 10: 0471321680
ISBN 13: 9780471321682
Website: [Analysis and Design of Analog Integrated Circuits \(4th Edition\)](#)
- [3] *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits (5th Edition)*
Author: Paul R. Gray
Author: Paul J. Hurst
Author: Stephen H. Lewis
Author: Robert G. Meyer
Publisher: John Wiley & Sons, Inc.; 5th Edition (2009)
Copyright: © 2001, John Wiley & Sons, Inc.
ISBN 10: 0470245999
ISBN 13: 9780470245996
Website: [Analysis and Design of Analog Integrated Circuits \(5th Edition\)](#)

[4] *Circuitos microelectrónicos (4^{ta} Edición) español*

Author: Adel. S. Sedra

Author: Kenneth C. Smith

Publisher: Oxford, University press; 4^{ta} Edición (2001)

Copyright: © 1999, Oxford, University press México.

Original Copyright: © 1998, 1991, 1987, 1982, Oxford, University press Inc.

ISBN 10: 01951166310

Website: [Circuitos microelectrónicos \(4^{ta} Edición\) español](#)

[5] *Microelectronic circuits (5th Edition)*

Author: Adel. S. Sedra

Author: Kenneth C. Smith

Publisher: Oxford, University press; 5th Edition (2004)

Copyright: © 2004, 1998, 1991, 1987, 1982, Oxford, University press Inc.

ISBN 10: 0195142527

Website: [Microelectronic circuits \(5th Edition\)](#)

Apéndices

A. Análisis teórico de subcircuitos

B. Hojas de datos

B.1. TL431

TL431

Adjustable precision shunt regulator

Manufacturer page: <http://www.ti.com/product/TL431>

Manufacturer Datasheet: <http://www.ti.com/lit/gpn/tl431>

B.2. TL082

TL082

Dual High Slew Rate JFET-Input Operational Amplifier

Manufacturer page: <http://www.ti.com/product/TL082?keyMatch=TL082>

Manufacturer Datasheet: <http://www.ti.com/lit/gpn/tl082>

B.3. BC548

BC548

NPN Epitaxial Silicon Transistor

Manufacturer page: <https://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=BC548>

Manufacturer Datasheet: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/BC550-D.pdf>

B.4. BC558

BC558

PNP Bipolar Transistor

Manufacturer page: <https://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=BC558B>

Manufacturer Datasheet: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/BC556B-D.PDF>

B.5. BD137

BD137

1,5A, 60V *NPN Bipolar Power Transistor*

Manufacturer page: <https://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=BD137>

Manufacturer Datasheet: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/BD135-D.PDF>

B.6. MJE15032

MJE15032

Bipolar Transistor, NPN, 250V, 8,0A

Manufacturer page: <https://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=MJE15032>

Manufacturer Datasheet: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MJE15032-D.PDF>

B.7. MJE2955

MJE2955

Bipolar Power Transistor, PNP, 10A, 60V, 75W

Manufacturer page: <https://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=MJE2955T>

Manufacturer Datasheet: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MJE2955T-D.PDF>

B.8. Metal film resistor

Metal film resistor

Metal film resistor

Manufacturer page: <https://www.vishay.com/resistors-fixed/metal-film/tab/doclibrary/>

B.9. Carbon film resistor

Carbon film resistor

Carbon film resistor

Manufacturer page: <http://www.vishay.com/resistors-fixed/carbon-film/tab/doclibrary/>

B.10. Ceramic capacitor

Ceramic capacitor

Ceramic disk capacitor

Manufacturer page: <https://www.vishay.com/capacitors/ceramic/disc/>

B.11. Electrolytic Aluminum capacitor

Electrolytic capacitor

Electrolytic aluminum capacitor

Manufacturer page: <https://www.vishay.com/capacitors/aluminum/>