

# Teoría de Circuitos 2019

## Trabajo Práctico de Laboratorio N°3

GIC, Ecualizadores y Amplificadores de Instrumentación

### Consideraciones generales:

- Salvo que se indique lo contrario, suponer siempre amplificadores operacionales ideales.
- Se utilizará la letra  $N$  para denotar al número del grupo y  $N_{max} = 8$  para denotar la cantidad de grupos.
- Cuando se indiquen valores de resistencias, se deberá sintetizar este valor con combinaciones de **a lo sumo** un par en serie o paralelo para obtener el menor error posible.
- Está permitido asistir el desarrollo matemático mediante programas algebraicos, sin embargo todos los resultados y pasos intermedios más importantes deberán quedar asentados en el informe.
- Se realizarán todas las simulaciones de circuitos mediante PSpice.
- Todas las gráficas de respuesta en frecuencia deberán expresarse en escala semi-logarítmica.
- Se espera coherencia en las cifras significativas a lo largo de las mediciones, cálculos y resultados, tanto en escala lineal como logarítmica.
- La resolución de cada ejercicio debe comenzar en una hoja aparte.
- Se les recuerda a los alumnos que la política de Fraude y Plagio del Instituto rige sobre este trabajo.
- Se evaluará la calidad de las placas.

### Pautas para la evaluación del informe (en orden de importancia):

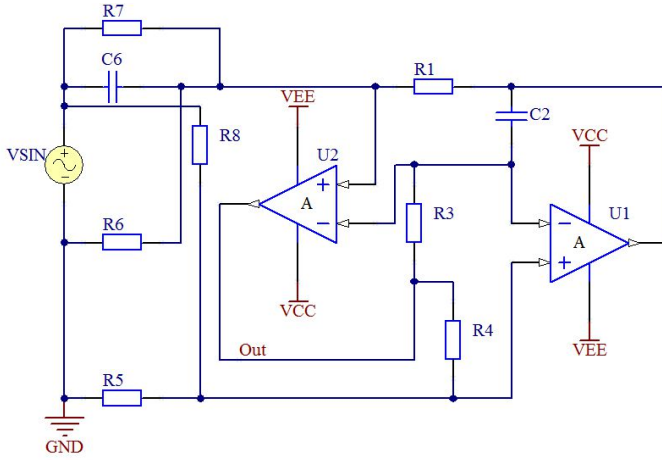
- Contenido y capacidad de síntesis.
  - Se penalizarán contenidos irrelevantes.
  - Se valorará la presentación clara, concisa, específica y sin redundancias.
  - Se esperan conclusiones relevantes dentro del desarrollo de cada tema y del trabajo práctico en general.
- Adecuado manejo y presentación de magnitudes numéricas.
- Organización grupal del trabajo.
  - Se espera el mayor grado de cohesión y homogeneidad en la resolución de los distintos enunciados. Se deben respetar un estándar y objetivos comunes.
- Originalidad e Inventiva
- Presentación, redacción y ortografía.
- Aportes no obligatorios

### Entregas:

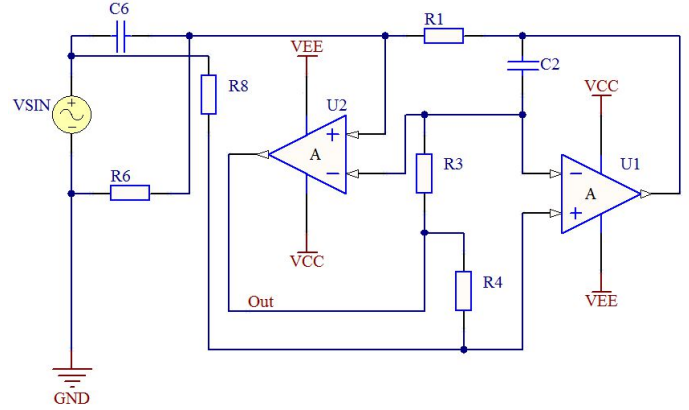
- Versión impresa y digital: Jueves 26 de Septiembre a las 23:59 Hs
- Revisión Oral: Jueves 3 de Octubre 9 Hs.

# 1 Filtro con GIC

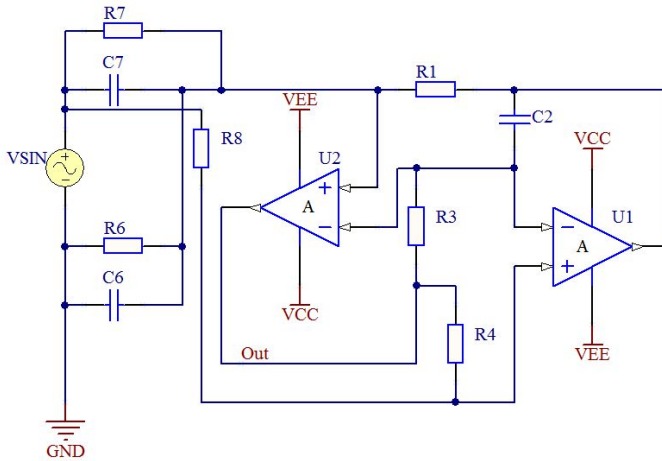
Se estudiará a continuación la implementación de un filtro mediante un GIC, para lo cual cada grupo analizará en detalle el circuito correspondiente a su número de grupo, atendiendo las inquietudes presentadas.



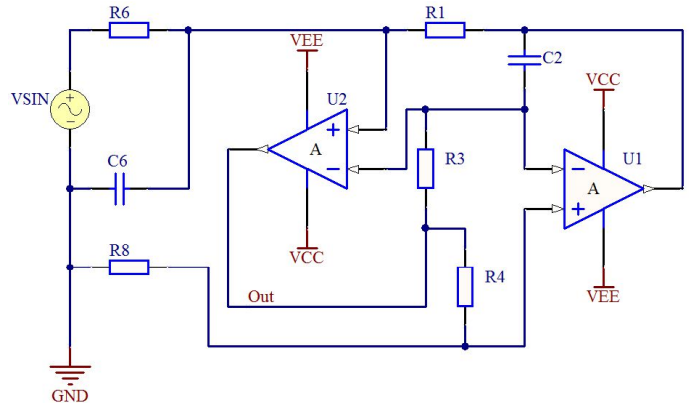
(a) Circuito 1



(b) Circuito 2



(c) Circuito 3



(d) Circuito 4

Figure 1: Ejercicio 1

- a. Encontrar la función transferencia del circuito y relacionar cada magnitud con los componentes que la determinan.
  1. ¿Cuál es la función de  $R_8$  en el circuito? ¿Qué sucede si  $R_8 \rightarrow \infty$ ? ¿Y si  $R_8 \rightarrow 0$ ? *Justifique.*
  2. Obtener el diagrama de polos y ceros de la transferencia del circuito y dejar en evidencia el comportamiento de estos para distintos valores de  $R_6$ .
    - i. ¿Qué sucede con las singularidades si  $R_6 \rightarrow \infty$ ? ¿Y si  $R_6 \rightarrow 0$ ? *Justifique.*
- b. Realizar el análisis de sensibilidades de los parámetros que se consideren relevantes para todos los componentes resistivos y capacitivos del circuito y verificar las propiedades de la suma que estas deben cumplir.
  1. ¿Qué componentes determinan la ubicación de los polos y de los ceros? ¿Alguno lo hace en mayor medida que otros?
  2. ¿Qué conclusión se puede obtener a partir del análisis de sensibilidades para la ubicación de las singularidades? *Justifique.*
- c. ¿Qué amplificadores operacionales emplearía en su circuito? *Justifique ampliamente.*

- d. Implementar el circuito cumpliendo las especificaciones de diseño de las tablas 1 de acuerdo al número de grupo.
- e. Determinar y medir las **limitaciones**, respuesta en frecuencia, rangos de funcionamiento, impedancias, y otros valores representativos del desempeño del circuito. Contrastar mediante simulación y mediciones. Indicar las magnitudes medidas y sus respectivas cotas de error.
- f. Para los circuitos **1 y 2**, investigar sobre *Notch Depth (ND)*, simular y medir. Para los circuitos **3 y 4**: Calcular, simular, medir y explicar la respuesta al escalón.
- g. **Opcional:** Calcular la transferencia del circuito con  $A_{vol}$  finito y realizar el análisis de sensibilidades correspondiente para todas las magnitudes relevantes.

$\omega_p$	$Q$	$ H(j\omega_p) $	$\omega_p$	$Q$	$\omega_z$
$13.000 \frac{rad}{s}$	4	6dB	$13.000 \frac{rad}{s}$	2	$\sqrt{2} \cdot \omega_p \frac{rad}{s}$

(a) Band Pass

$\omega_p$	$Q$	$ H(\infty) $	$\omega_p$	$Q$	Ganancia
$13.000 \frac{rad}{s}$	2	4dB	$13.000 \frac{rad}{s}$	4	0dB

(c) HP Notch

$\omega_p$	$Q$	$ H(j\omega_p) $	$\omega_p$	$Q$	$\omega_z$
$13.000 \frac{rad}{s}$	4	6dB	$13.000 \frac{rad}{s}$	2	$\sqrt{2} \cdot \omega_p \frac{rad}{s}$

(b) LP Notch

$\omega_p$	$Q$	$ H(\infty) $	$\omega_p$	$Q$	Ganancia
$13.000 \frac{rad}{s}$	2	4dB	$13.000 \frac{rad}{s}$	4	0dB

(d) All Pass

Table 1: Especificaciones de diseño

## 1.1 Ayuda en la selección de componentes

Considere las siguientes elecciones de valores, los cuales no se aplican para el análisis de sensibilidades.

- Band Pass:  $R_1 = R_3 = R_4 = R_8 = R$ ,  $R_6 = QR$ ,  $C_2 = C_6 = C$
  - LP Notch:  $R_7 = R_6 = 2QR$ ,  $R_1 = R_3 = R_4 = R_8 = R$ ,  $C_7 = (1 + \frac{1}{k^2}) \frac{C}{2}$ ,  $C_2 = C$ ,  $C_6 = (1 - \frac{1}{k^2}) \frac{C}{2}$ ,  $k = \left(\frac{\omega_z}{\omega_p}\right) \geq 1$
  - HP Notch:  $R_1 = R_3 = R_8 = R$ ,  $R_6 = (1 + k^2) QR$ ,  $R_7 = (1 + \frac{1}{k^2}) QR$ ,  $R_4 = \frac{2k^2}{1+k^2} R$ ,  $R_5 = \frac{2k^2}{1-k^2} R$  y  $C_2 = C_6 = C$ ,  $k = \left(\frac{\omega_z}{\omega_p}\right) \leq 1$
- a. All Pass:  $R_1 = R_3 = R_4 = R_8 = R$ ,  $R_6 = QR$ ,  $C_2 = C_6 = C$

## 2 Introducción a diseño de filtros

Se desean implementar cuatro filtros de segundo orden que cumplan con características descritas a continuación. El valor de  $\alpha$  será 1 para no recursantes y 0.87 para recursantes.

Tipo de filtro	$f_p$ [Hz]	$f_a$ [Hz]	$f_c$ [Hz]
<i>LP</i>	$1000 \cdot (N_{max} - \alpha N)$	$3500 \cdot (N_{max} - \alpha N)$	—
<i>HP</i>	$3500 \cdot \alpha N$	$1000 \cdot \alpha N$	—
<i>BP</i>	—	—	$2000 \cdot (N_{max} - \alpha N)$
<i>BR</i>	—	—	$1000 \cdot \alpha N$

Table 2: Especificaciones de diseño.

Se tienen también especificaciones extra para los casos *LP* y *HP*. Se desea que para el caso *LP* (o *HP*) la ganancia sea unitaria en continua (o  $f \rightarrow \infty$ ). Se espera que la ganancia sea mayor que  $-3dB$  para frecuencias menores (o mayores) a  $f_p$  y menor que  $-10dB$  para frecuencias mayores (o menores) a  $f_a$ . Además, la ganancia no deberá superar nunca los  $0dB$ . **Es obligatorio el cumplimiento de las especificaciones con una tolerancia de 0% para los casos HP y LP**. Sabiendo esto, se pide para cada caso:

- Diseñar una función transferencia que cumpla con las especificaciones.
  - Diseñar un circuito que implemente la función transferencia utilizando un **Gyrator**. *Justificar adecuadamente la elección de todos sus componentes y redactar una introducción teórica al tema.*
  - Determinar rangos de operación en zona lineal. *Se espera adecuada profundidad en este análisis.*
  - Contrastar el diseño del circuito con las simulaciones correspondientes.
  - Implementar el circuito y comprobar su funcionamiento con las mediciones correspondientes.
- Analizar el comportamiento del sistema en altas frecuencias.

**Nota:** la implementación de todos los circuitos pedidos debe realizarse en un solo PCB. A su vez, sólo puede utilizarse un IC en la implementación pedida. La entrega de la placa debe realizarse previo a la hora de finalización del trabajo práctico.

### 3 Amplificadores de Instrumentación

Los amplificadores de instrumentación son dispositivos que permiten medir una diferencia de tensión entre sus entradas y generan a su salida una tensión proporcional a esa diferencia relativa entre sus terminales de entrada (modo diferencial). Su principal ventaja frente a circuitos que simplemente amplifican una señal referenciada a masa (modo común) es su gran inmunidad frente al ruido, lo cual los hace aptos para medir señales de muy baja amplitud que de ser medidas de otra forma no podrían ser distinguidas del piso de ruido. Se buscará por lo tanto estudiar su comportamiento para determinar las principales características y limitaciones que este tipo de circuitos presentan, tomando como punto de partida aquel presentado en la figura 2.

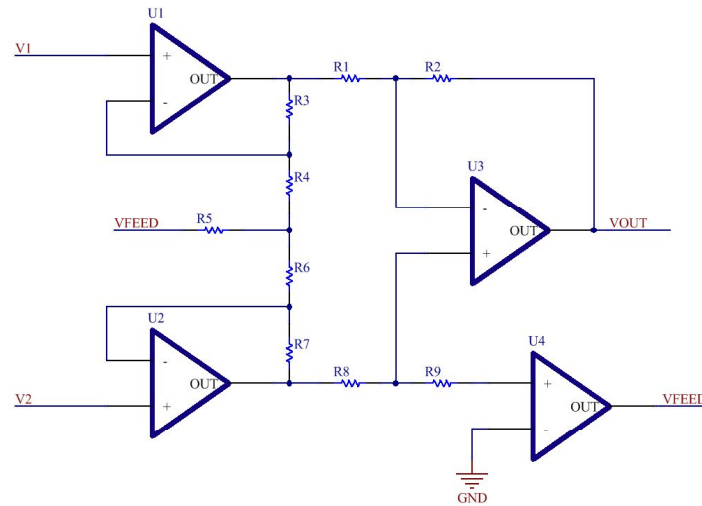
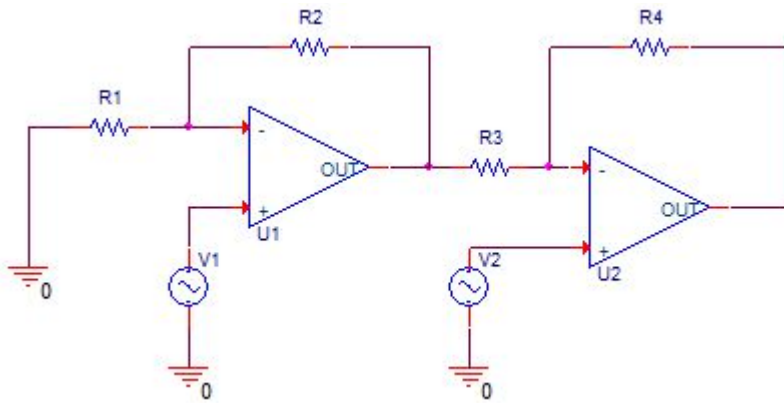


Figure 2: Amplificador de Instrumentación

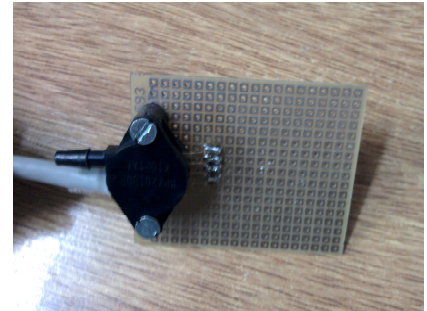
- a. Describir matemáticamente el comportamiento del circuito, analizando la función de cada uno de sus componentes.
  1. ¿Qué relación de valores de resistencias debe utilizarse para una cierta ganancia dada?
  2. ¿Cuál es la función de  $R_5$ ? ¿Cuáles son sus rangos posibles para operar el circuito de manera estable, considerando amplificadores operacionales ideales y reales?
  3. ¿Cuál es la respuesta en frecuencia del circuito para señales diferenciales y señales en modo común, considerando amplificadores operacionales ideales y reales?
  4. ¿Cómo afectan las tolerancias de los componentes al desempeño del circuito?
  5. ¿Cómo afectan las no-idealidades de los amplificadores operacionales y las diferencias entre ellos al desempeño del circuito?
- b. Proponer y validar un método de generación de señales compuestas mediante el uso de un *Puente de Wheatstone*.
  1. Determine analíticamente el efecto de las tolerancias de los componentes en las señales generadas. ¿Qué métodos se pueden aplicar para minimizar el error resultante?
  2. ¿Por qué es necesario para el amplificador que señal diferencial esté referenciada a su tensión de tierra? ¿Qué ocurriría si se genera una señal diferencial con un generador sin esa referencia? (Ayuda: Esto lo pueden medir utilizando un transformador de aislamiento.)
- c. Diseñar e implementar el circuito, fundamentando rigurosamente la elección de valores de cada uno de sus componentes, a modo de maximizar el  $CMRR$  y obtener una ganancia  $G = 120 + 20 \cdot \sin\left((N-1) \cdot \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{6}\right)$ .
  1. Evaluar que todos los parámetros estimados en forma analítica se correspondan con aquellos experimentales y simulados.
  2. ¿Qué modificaciones es necesario hacer al circuito para que la tensión de salida se encuentre montada sobre un nivel de DC? Presentar el nuevo circuito y su respaldo analítico correspondiente.

## 4 Circuito de medición de presión

Diseñar e implementar en PCB un circuito con un amplificador de instrumentación con la capacidad de alimentar y recibir una señal proveniente de un sensor de presión *MPX2010DP*. Este circuito debe medir en toda la escala de presión del sensor y la salida de tensión debe ser de 0 a 3,3 Volt. Si el sensor mide la máxima diferencia de presión posible, la salida debe tener una amplitud de al menos 3,1 V y menos que 3,3 V. Si el sensor mide una diferencia de presión nula, la salida debe ser de 0 Volt. Este circuito debe tener una única fuente de alimentación.



(a) Amplificador de instrumentación



(b) Sensor de presión

Figure 3: Ejemplo de un sistema de medición de presión

- Utilizando generadores de onda, medir la ganancia del sistema en modo común, en modo diferencial y el rechazo a modo común.
- Utilizando una probeta con agua, medir la presión de 0 a 1m de profundidad, realizando al menos diez mediciones. Comparar las mediciones realizadas con los valores teóricos.
- Explicar analíticamente cómo podría adaptarse el circuito para medir el volumen de agua presente en un tanque cilíndrico de radio  $R$  conocido. Indicar qué condiciones debe cumplir el sistema para poder realizar la medición. ¿Cómo adaptaría el sistema si en vez de agua se utilizara otro líquido?
- Conclusiones.

## 5 Control de tonos y ecualizador de fase

Se estudiará a continuación el funcionamiento del circuito de la figura 4, en la cual se muestra un circuito de control de tonos.

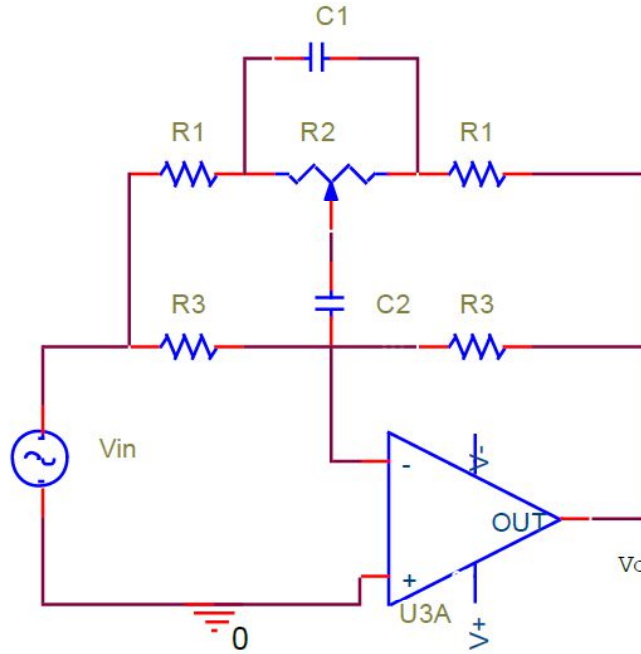


Figure 4: Circuito de Control de Tonos

- a. Obtener la función transferencia en su expresión más completa. Luego simplificarla aplicando las siguientes condiciones de diseño:

1.  $R_3 \gg R_1$
2.  $R_3 = 10 \cdot R_2$
3.  $C_1 = 10 \cdot C_2$

Verificar que:

1.  $f_0 = \frac{\sqrt{2 + \frac{R_2}{R_1}}}{20\pi \cdot R_2 \cdot C_2}$
2.  $\frac{3 \cdot R_1}{3 \cdot R_1 + R_2} \leq A_0 \leq \frac{3 \cdot R_1 + R_2}{3 \cdot R_1}$

- b. Explicar cualitativamente el funcionamiento mediante un diagrama paramétrico de las singularidades en plano S.

1. ¿Es un sistema de fase mínima o uno de fase no mínima? *Justifique.*
  - i. Si se trata de un sistema de fase mínima: diseñar los valores de los componentes de modo de que sea posible transformarlo en un sistema de fase no mínima haciendo uso de un ecualizador de fase de segundo orden. Mostrar y simular los resultados.
  - ii. Si se trata de un sistema de fase no mínima, estudiar si es posible que cumpla la función de ecualizador de fase y diseñar de modo de obtener el mismo comportamiento que la implementación del ecualizador de fase. Analizar, simular y comparar los resultados.

- c. Combinando 3 implementaciones del circuito de la figura 4, diseñar un ecualizador de 3 bandas.

1. Escoger el valor apropiado para cada frecuencia central ( $f_0$ ) de modo de cubrir eficientemente el espectro audible maximizando los efectos del ecualizador diseñado. *Se valorará la investigación dentro del ámbito de la percepción auditiva para justificar la elección de cada banda.*

2. Investigar y analizar la forma de combinar las etapas para obtener un resultado óptimo en cuanto a la figura de ruido. Interpretar y justificar claramente la elección de la implementación escogida teniendo en cuenta magnitudes y fases.
3. Hacer un análisis detallado de las singularidades del circuito. ¿Se corresponden a aquellas predichas por la teoría? *Justifique*.
4. Redactar una hoja de datos especificando las características de entrada y salida del sistema, impedancias, tensiones máximas, rango de alimentación, etc.
5. Realizar una implementación sobre placa impresa, teniendo en cuenta que deberá poder conectarse a una interfaz de audio standard.
6. Medir la respuesta en frecuencia para los casos que se consideren pertinentes, comparar con lo esperado y contrastar mediante simulación.
7. Exponer un análisis crítico de los resultados, redactando con conclusiones relevantes.
8. **Opcional:** Ingresar al control de tonos con una señal de audio, describir sus resultados y obtener grabaciones representativas.



## 6 Medición Automática de Respuesta en Frecuencia

Conocidos todos los problemas y limitaciones que trae consigo la medición de la respuesta en frecuencia de circuitos en forma manual, resulta óptimo conocer métodos automáticos para acelerar este proceso. Existe para ello un estándar conocido como Virtual Instrument Software Architecture (VISA), el cual provee una interfaz genérica entre instrumentos para ser controlados en forma automática.

- a. Escribir un programa que sea capaz de realizar las mediciones de respuesta en frecuencia de un circuito mediante el control automático de la combinación osciloscopio-generador o del analizador de impedancias. Se dejan a continuación algunos hipervínculos con material auxiliar.
  1. Matlab Instrument Control Toolbox
  2. Agilent VISA User's Guide
  3. PyVISA
  4. Linux Test Automations
  5. Agilent: Using Linux to Control USB Instruments
- b. Para el uso de dicho código en la resolución del trabajo práctico se deberá incluir con la entrega:
  1. El código fuente completo.
  2. Un instructivo de uso.
  3. Una descripción de las capacidades del programa.

Se espera que el programa escrito sea un **original**, no podrá sumar puntos si se encuentra basado en versiones de años anteriores ni accionar sobre dispositivos portátiles como Analog Discovery o similares.