

Práctica 3

Diseño de un sistema de medida de corriente y tensión para electrodomésticos

1. OBJETIVOS GENERALES

- Modelar el proceso de sensado de la corriente consumida por un electrodoméstico.
- Diseño e implementación de un acondicionador V/V.
- Diseño e implementación de un acondicionador I/V.
- Integración de bloques.

2. INTRODUCCIÓN

Dado un electrodoméstico (EDM) conectado a la red monofásica de baja tensión de UTE, se quiere medir la tensión en sus bornes (V_{EDM}) y la corriente que circula por el mismo (I_{EDM}), como se muestra en la figura 1.

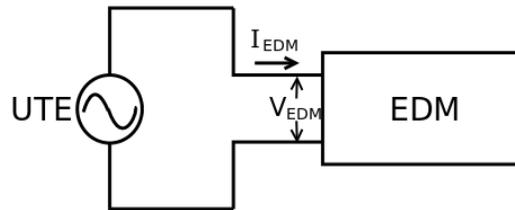


Figura 1. Electrodoméstico conectado a la red de UTE

Para medir de forma segura se usará la caja "Monitor EDM", que permite conectar el electrodoméstico a la red eléctrica y obtener tensiones proporcionales a las magnitudes de interés V_{EDM} e I_{EDM} . La figura 2 presenta un esquema eléctrico del Monitor.

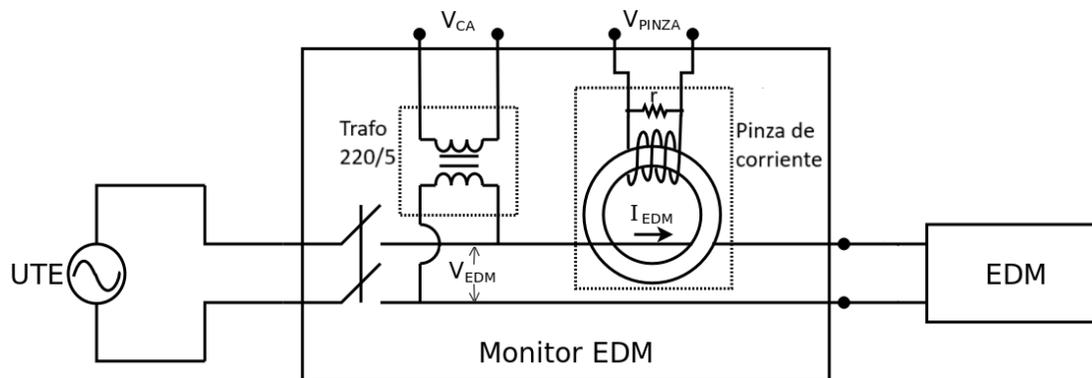


Figura 2. Conexión del Monitor EDM entre el electrodoméstico y la red

Las señales V_{CA} y V_{PINZA} serán acondicionadas a través de circuitos Acond.V/V y Acond.V/I (Figura 3), que se diseñarán en la práctica. El acondicionamiento permitirá adquirir correctamente las señales con la tarjeta adquisidora del AD2. Como se trabajará con electrodomésticos de muy variada potencia, el Acond.V/I tendrá una ganancia variable que se controlará mediante las salidas digitales del AD2 (D_0 y D_1).

Las señales adquiridas con el AD2 (V_{CH0} y V_{CH1}) serán proporcionales a I_{EDM} y V_{EDM} , respectivamente. Las ecuaciones (1) y (2) vinculan estas señales mediante las constantes de proporcionalidad de punta a punta, K_I^g y K_V . Así, es posible reconstruir las ondas de corriente y tensión por el electrodoméstico conectado.

$$I_{EDM} = K_I^g * V_{CH0}, \text{ para cada ganancia } g \quad (1)$$

$$V_{EDM} = K_V * V_{CH1} \quad (2)$$

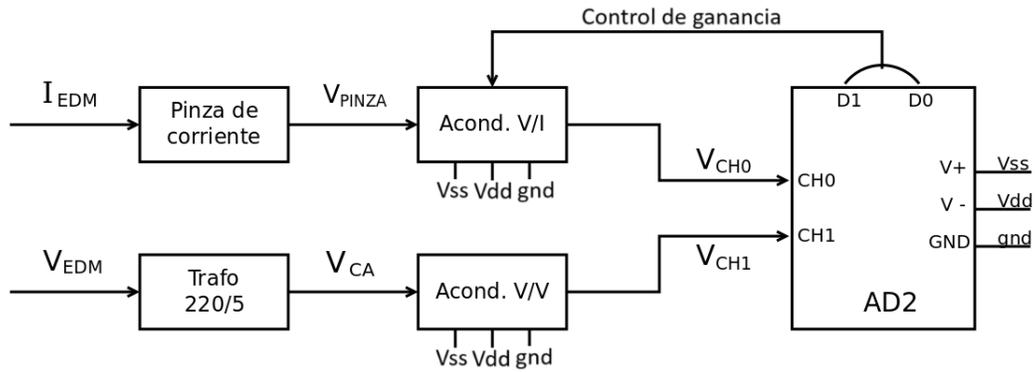


Figura 3. Esquema del acondicionamiento de las señales I_{EDM} y V_{EDM} .

3. MATERIALES

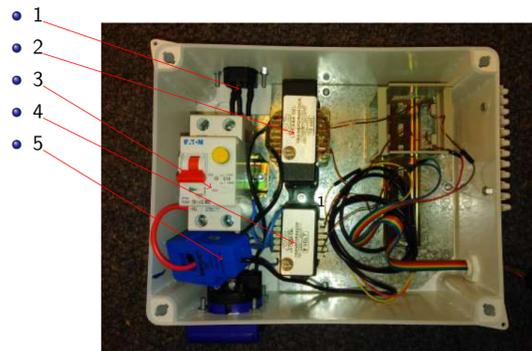
- **Analog Discovery 2:** se utilizarán las herramientas correspondientes para verificar los circuitos de acondicionamiento, adquirir señales y controlar las salidas digitales.
- **Monitor EDM:** se intercalará en la conexión entre el electrodoméstico y la red eléctrica, incorporando sensores de las magnitudes de interés y proveyendo una adecuada aislación eléctrica. En la figura 4 se muestran fotografías del sistema y se indican los componentes reales.
- **Materiales de laboratorio:** protoboards, cables, componentes electrónicos pasivos y componentes activos (Cuadro 1).
- **Computadora** para controlar la tarjeta AD2 y realizar simulaciones. Deberá tener los programas *Waveforms* y *LTSpice* instalados.

Cuadro 1
Componentes activos

Función	Operacionales	Llaves analógicas	Regulador de tensión
Modelo	TLV274	Intersil DG412	L78L33ACZ o AS431AZTR



(a) Vista externa



(b) Vista interna

Negro	5 V CA +
Blanco	5 V CA -
Rojo	V pinza +
Azul	V pinza -

(c) Cables de acceso al Monitor EDM

¹1) Alimentación Interlock, 2) Transformador 220V/12V, 3) Llave diferencial combinada $I_{\Delta n} = 30mA$ C10, 4) Transformador 220V/5V, 5) Pinza de corriente

Figura 4. Caja/Monitor EDM

TAREAS DE PARTE I

4. MODELADO DE SENSADO DE CORRIENTE

Se modelará la pinza de corriente del Monitor EDM. Este instrumento dispone de una abrazadera colocada alrededor del cable cuya corriente se desea medir. Genera una tensión proporcional a la corriente que circula por el cable.

4.1. Objetivos específicos

1. **Diseño:** Determinación de la constante de conversión K_p y del rango de tensiones V_{PINZA} esperado.
2. **Simulación** de la pinza en *LTSpice*.

4.2. Diseño

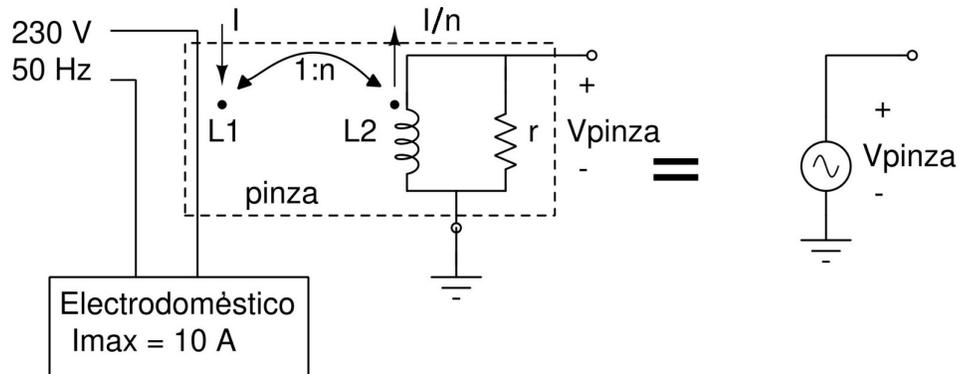


Figura 5. Modelado de pinza usada como sensor de corriente consumida por electrodoméstico

Observar que ocurre una conversión de corriente (I_{EDM}) a voltaje (V_{PINZA}). Modelar la salida de la pinza como una fuente de tensión proporcional a la corriente, como muestra la Fig. 5.

1. Encontrar la constante de conversión $K_p = V_{PINZA}/I_{EDM}$ utilizando la hoja de datos de la pinza.
2. A partir de los rangos de amplitudes de corriente consumidas por los electrodomésticos (40 mA a 10 A), encontrar el rango de amplitudes esperadas en V_{PINZA} .

4.3. Simulación

Modelar en *LTSpice* la conversión corriente-voltaje que ocurre en la pinza. Utilizar elementos disponibles en la biblioteca del simulador y modelar el electrodoméstico como una carga resistiva.

Para esto, utilizar el elemento "Ferrite Bead" (para L1) acoplándolo a un inductor ideal (L2) mediante la directiva **K1 L1 L2 1** en *LTSpice*. Analizar qué significa la directiva y cómo construir un modelo para la pinza a partir de estos elementos. Considerar $L = 1,5 H$ como estimación de la inductancia del secundario.

5. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ACONDICIONADOR V/V

El acondicionador V/V se implementará como un amplificador diferencial, cuya estructura será la de la figura 6.

5.1. Objetivos específicos

1. Diseño del circuito según requerimientos.
2. Simulación del circuito en *LTSpice*.
3. Armado del circuito en protoboard y relevamiento con *Waveforms*.
4. Comparación de los resultados.

5.2. Diseño del circuito

1. Hallar la transferencia del circuito de acondicionamiento de Voltaje en la Figura 6, en función de sus parámetros. Mostrar que tiene una respuesta pasa-banda.
 2. Diseñar los componentes R_a , R_b , C_a y C_b para que cumplan los requerimientos (cuadro 2). Utilizar resistencias de la serie E12 y capacitores cerámicos de la serie E3¹.
 3. Graficar la transferencia al variar la frecuencia, destacando las cantidades notables calculadas con los valores nominales de los parámetros del circuito.
1. Los capacitores cerámicos se pueden encontrar, en general, en el rango de 10pF a 470nF.

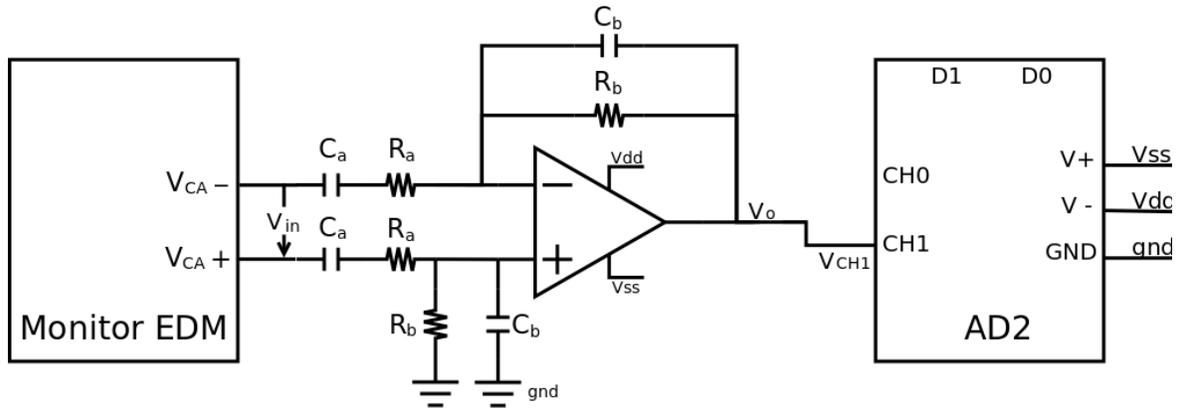


Figura 6. Circuito de acondicionamiento V/V usando un amplificador diferencial.

5.3. Simulación del circuito en LTSpice

Verificar, utilizando el simulador, que se cumplen cada una de las especificaciones.

En el [sitio del curso](#) está el modelo del amplificador operacional TLV271, para LTSpice. En este [tutorial](#) se explica cómo incorporar al simulador un modelo de un amplificador operacional similar. De esta forma, no es necesario crear un símbolo nuevo, pudiendo asociarlo a un símbolo de un operacional ya existente en LTSpice.

5.4. Armado del circuito y relevamiento

1. Armar el circuito de acondicionamiento V/V en una protoboard.
2. Medir el punto de operación del circuito.
3. Releva la respuesta en frecuencia.

Cuadro 2
Requerimientos

Ganancia	$ V_o/V_{in} \approx 0,45 \text{ V/V}$
Frecuencia de corte superior	$f_{-3dB} \approx 2 \text{ kHz}$
Frecuencia de corte inferior	$f_{-3dB} \approx 5 \text{ Hz}$
OPAMP	TLV274

5.5. Comparación de los resultados

Comparar las transferencias obtenidas (teórica, simulada y relevada). Analizar los resultados considerando los valores de ganancia y frecuencias de corte obtenidos con los esperados.

6. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ACONDICIONADOR I/V

El acondicionador I/V se implementará como un amplificador de ganancia variable, cuya estructura será la de la figura 7. Debido a que se desea adquirir la onda de corriente consumida por diferentes electrodomésticos (cuyo rangos esperados van desde 40 mA a 10 A), de forma de obtener para todos éstos tensiones admisibles a la entrada del ADC ($V_o \geq 1V$), es necesario contar con una etapa de ganancia programable en la cadena de acondicionamiento del sensor de corriente (pinza).

6.1. Objetivos específicos

1. Diseño del circuito según requerimientos.
2. Simulación del circuito en LTSpice.
3. Armado del circuito en protoboard y relevamiento con Waveforms.
4. Comparación de los resultados.

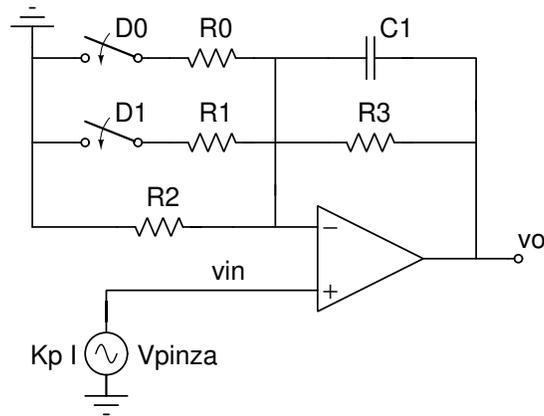


Figura 7. Esquemático de circuito amplificador con ganancia programable (PGA)

6.2. Diseño del circuito

1. Hallar la transferencia del circuito de acondicionamiento de corriente de la figura 7, en función de sus parámetros. Mostrar que tiene una respuesta pasabajos.
2. Diseñar los componentes R_0 , R_1 , R_2 y R_3 para que cumplan los requerimientos (cuadro 3). Utilizar resistencias de la serie E12.
3. Verificar que el efecto de las llaves D_1 y D_0 es despreciable en la determinación de las ganancias; y que para las señales esperadas en v_{in} , siempre se puede seleccionar las llaves para que se cumpla $V_o > 1 V$.
4. Graficar la transferencia al variar la frecuencia, destacando las ganancias y frecuencias notables calculadas con los valores nominales de los parámetros del circuito.
5. Analizar el offset esperado a la salida del bloque. Para esto, obtener los parámetros necesarios del Amplificador Operacional de la hoja de datos. ¿Para qué situación se espera el peor caso de offset en V_o ? ¿Cuánto vale?

6.3. Simulación del circuito en LTSpice

1. Implementar el circuito PGA en *LTSpice*. Verificar que se cumple cada una de las especificaciones. Explorar el elemento *sw* para construir el modelo de las llaves analógicas en *LTSpice*. Analizar qué significa la directiva *MYSW*² y usarla como valor de los elementos *sw*. Completar el modelo de la llave basándose en la hoja de datos del Intersil DG412.
2. Simular, para las diferentes ganancias, la respuesta del circuito al offset del operacional. Incluir una fuente DC para modelar el efecto del offset.

6.4. Armado del circuito y relevamiento

1. Armar el circuito de acondicionamiento I/V en una protoboard, sin el chip DG412. Implementar la funcionalidad de las llaves manualmente con cables.
2. Medir la ganancia para las distintas configuraciones de las llaves, implementando la conmutación de las mismas manualmente. Esto permitirá construir el PGA de forma más segura.
3. Preparar el chip de *Intersil DG412* para ser integrado al PGA, con el fin de controlar las ganancias con la AD2. Revisar cuidadosamente la hoja de datos del chip. ¿Es necesario agregar algún circuito auxiliar? Revisar dispositivos activos que le fueron suministrados. Explorar la funcionalidad *StaticIO* en *Waveforms* para controlar electrónicamente las llaves analógicas con la AD2. Seleccionar todo el bus digital en "BitIO" => "Switch" => "Push/Pull" => "0". Luego, manejar los bits 1 y 0 de la AD2, para controlar D_1 y D_0 , respectivamente.
4. Medir las resistencias *ON* de las llaves en el chip, contrastándolas con los valores detallados en la hoja de datos. Para esto, armar un divisor resistivo con una resistencia de 100Ω , excitar la entrada y medir la salida del divisor resistivo.
5. Integrar el *intersil DG412* para controlar las ganancias con la AD2.
6. Medir el punto de operación del PGA para cada modo de ganancia.
7. Releva la respuesta en frecuencia de cada modo de ganancia. ¿Existe alguna problemática en la medida para los distintos modos de ganancia?
8. De la medida del punto de operación, estimar el offset equivalente a la entrada del circuito.
9. Compensar el offset a la entrada ingresando el voltaje opuesto desde el Wavegen de la AD2 para así mejorar la medida de la respuesta en frecuencia.

2. `.model MYSW SW(Ron=?? Roff=?? Vt=??)`

6.5. Comparación de los resultados

1. Comparar las transferencias obtenidas (teórica, simulada y relevada). Analizar los resultados considerando los valores de ganancia y frecuencias de corte obtenidos con los esperados, para las configuraciones de las llaves que correspondan.
2. Analizar si la imperfección de offset del operacional afectará la adquisición. ¿Cómo podría disminuir el offset del circuito?

Cuadro 3
Requerimientos

Estado [D1 D0]	[OFF OFF]	[OFF ON]	[ON OFF]
Ganancia	$ v_o/v_{in} \approx 11 V/V$	$ v_o/v_{in} \approx 101 V/V$	$ v_o/v_{in} \approx 1001 V/V$
Frecuencia de corte OPAMP C1		$f_{-3dB} \approx 2 kHz$ TLV274 100 pF	

7. PARA EL INFORME

En el informe deben aparecer los siguiente ítems, con su debida justificación. Las transferencias deben graficarse en decibelios, usando escala horizontal logarítmica y destacando puntos notables (ganancia y frecuencias de corte). En las gráficas de señales, deben destacarse las amplitudes y defasajes cuando corresponda. Todos los resultados presentados deben venir acompañados de un análisis que luego se resumirá en las conclusiones.

7.1. Modelado del sensado de corriente

- Demostrar que la transferencia (V_{PINZA}/I_{EDM}) del sistema de la figura 5 es una constante, expresar su valor en función de los parámetros del sistema y el valor numérico obtenido de la hoja de datos.
- Rango de amplitudes de V_{PINZA}
- Imagen del circuito diseñado en *LTSpice*, indicando los valores elegidos por el grupo.
- Gráfica de V_{PINZA} e I_{EDM} en función del tiempo.

7.2. Acondicionador V/V

- Dar una expresión teórica de la transferencia en función de los parámetros del sistema de la figura 6.
- Observando la ecuación, explicar por qué la respuesta es pasabanda.
- Indicar en una tabla los valores calculados para los componentes y los nominales elegidos. Explicar claramente cómo se seleccionaron.
- Imagen del circuito diseñado en *LTSpice*, indicando los valores elegidos por el grupo.
- Verificación de que se cumplen las especificaciones.
- Indicar en una tabla los valores medidos para el punto de operación.
- Gráfica de la transferencia al variar la frecuencia: 1- teórica, 2- obtenida a partir de la simulación, 3- medida.

7.3. Acondicionador I/V

- Dar una expresión teórica de cada una de las transferencias en función de los parámetros del sistema de la figura 7.
- Observando las ecuaciones, explicar por qué la respuesta es pasabajos
- Indicar en una tabla los valores calculados para los componentes y los nominales elegidos. Explicar claramente cómo se seleccionaron.
- Imagen del circuito diseñado en *LTSpice*, indicando los valores elegidos por el grupo.
- Verificación de que se cumplen las especificaciones.
- Indicar en una tabla los valores medidos para el punto de operación.
- Gráficas de las transferencias al variar la frecuencia: 1- teórica, 2- obtenida a partir de la simulación, 3- medida (cuando es posible).
- Además, en otra gráfica, superponer las transferencias teóricas que se obtienen cuando las llaves D1 y D0 se encuentran en todas las posiciones consideradas.
- Explicación del efecto despreciable de las llaves en las ganancias.
- Indicar en una tabla los valores esperados (a partir de la hoja de datos del chip) y medidos de la resistencia ON de las llaves.
- Indicar en una tabla el valor de offset a la salida esperado teóricamente (a partir de la hoja de datos), simulado y medido. Incluir el peor caso observable.

TAREAS DE PARTE II

8. CIRCUITO ATENUADOR DE CONTINUA EN ESTRUCTURA NO-INVERSORA

Como medida para mitigar el problema observado en la pregunta 7 de la Sección 6.4, se añadirá al PGA ya construido el lazo de realimentación de la figura 8a. El objetivo de dicha realimentación es añadir un polo de manera que se atenúen las bajas frecuencias.

En la Figura 8a, considerar que la resistencia R_{2eq} corresponde al paralelo de las resistencias según la configuración de D1 y D0.

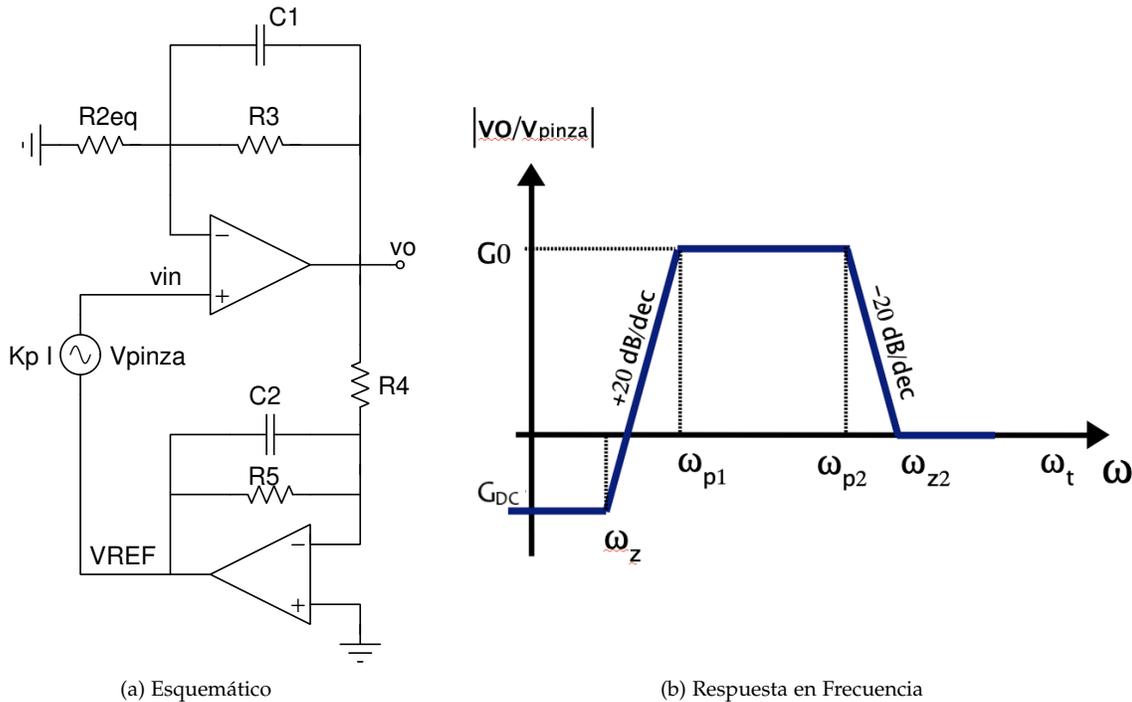


Figura 8. Esquema de circuito no inversor con atenuación en baja frecuencia

8.1. Objetivos específicos

1. Diseño del lazo de atenuación según requerimientos.
2. Simulación del circuito en *LTSpice*.
3. Comparación de resultados.

8.2. Diseño del lazo de atenuación

1. Hallar una expresión para la transferencia V_o/V_{PINZA} del circuito de la figura 8a, en función de sus parámetros. Mostrar que tiene una respuesta de tipo pasa-banda con atenuación en continua, como se muestra en la figura 8b.³
2. Determinar, a partir de la transferencia hallada, las expresiones paramétricas para las siguientes cantidades:
 - Atenuación DC (G_{DC}).
 - Límite de banda de atenuación DC (ω_z)
 - La frecuencia de corte inferior (ω_{p1})
 - La frecuencia de corte superior (ω_{p2})
 - Ganancia en banda pasante (G_0)
3. Diseñar los componentes R_4 y R_5 para que se cumplan las especificaciones (cuadro 4). Usar resistencias de la serie E12, con valores inferiores a $5.6 \text{ M}\Omega$.

8.3. Simulación del circuito en LTSpice

1. Repetir la simulación realizada para el PGA (sección anterior), pero esta vez agregando el circuito de atenuación DC.
3. Considerando un dominio de frecuencias que esté por debajo de la frecuencia de transición del amplificador operacional (ω_t).

8.4. Comparación de los resultados

1. Comparar la transferencia simulada con la de la sección anterior. ¿Qué cambios se observan? ¿Es consistente este resultado? Justificar

Cuadro 4
Requerimientos

Frecuencia de corte inferior C2	$f_{-3dB} \leq 5Hz$ $47\mu F$
------------------------------------	----------------------------------

9. INTEGRACIÓN: AMPLIFICADOR DE GANANCIA VARIABLE (PGA) CON ATENUACIÓN DC.

9.1. Objetivos específicos

1. Simulación del circuito de acondicionamiento V/I completo, utilizando el modelo de la pinza.
2. Simulación del circuito de test.
3. Armado del circuito de test y relevamiento con Waveforms.
4. Comparación de resultados.

9.2. Simulación usando el modelo de la pinza.

1. Implementar el circuito de la Figura 9 en *LTSpice*, integrando los bloques de las partes anteriores.
2. Verificar (utilizando el simulador) que se cumplen los requerimientos del cuadro 5.
3. Simular, para las diferentes ganancias, su respuesta en frecuencia.

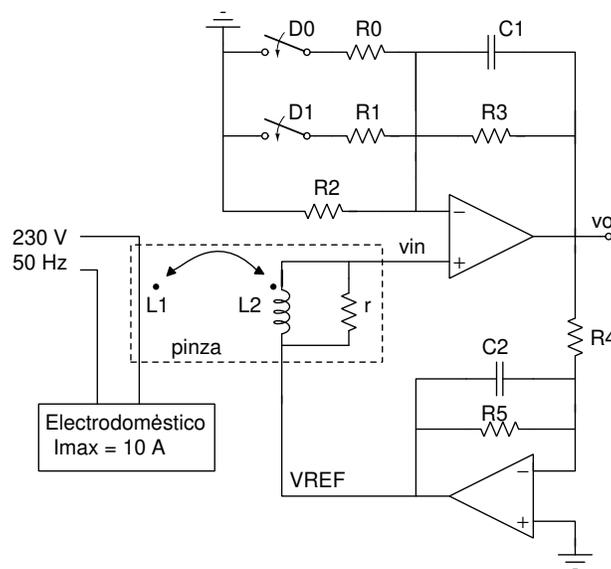


Figura 9. Circuito de acondicionamiento V/I completo.

Cuadro 5
Requerimientos

Entrada	$40\text{ mA} - 10\text{ A}@50\text{ Hz} - 2\text{ kHz}$
Amplitud de salida	$V_o > 1\text{ V}_p$
Offset a la salida	$V_o \ll 1\text{ V}$
Ganancia	$ V_o/vin \approx 11\text{ V/V}$ ([OFF OFF])
	$ V_o/vin \approx 101\text{ V/V}$ ([OFF ON])
	$ V_o/vin \approx 1001\text{ V/V}$ ([ON OFF])
$\omega_{p1}/2\pi$	$f_{-3dB} < 5\text{ Hz}$
$\omega_{p2}/2\pi$	$f_{-3dB} \approx 2\text{ kHz}$
C_{min}	$\geq 100\text{ pF}$
C_{max}	$\leq 47\text{ }\mu\text{F}$
R_{max}	$5,6\text{ M}\Omega$

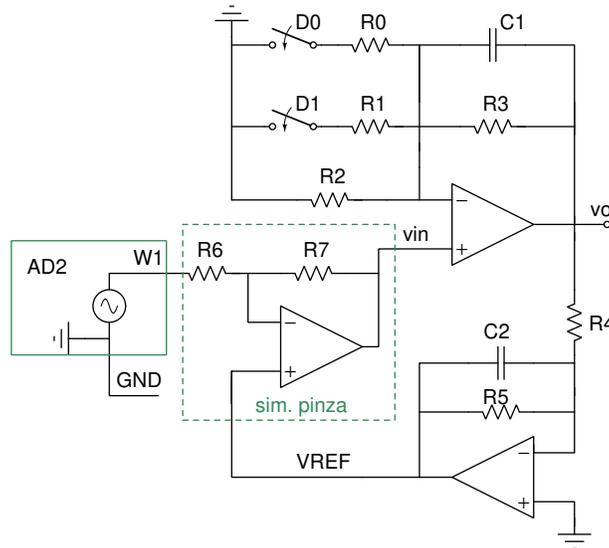


Figura 10. Circuito de test para medir la respuesta en frecuencia de la etapa de acondicionamiento I/V.

9.3. Simulación de circuito de test

1. Implementar el circuito de la Figura 10 (circuito de test) en *LTSpice*.
2. Verificar (utilizando el simulador) que la incorporación del circuito de test no afecta el cumplimiento de los requerimientos del cuadro 5.
3. Simular, para las diferentes ganancias, su respuesta en frecuencia.

9.4. Armado del circuito de test y relevamiento con Waveforms

1. Medir el punto de operación cuando la entrada es nula.
2. Medir el offset a la salida para cada nivel de ganancia considerado, verificando que el nuevo lazo de realimentación cumplió su objetivo.
3. Releva la respuesta en frecuencia para las distintas posiciones a considerar de las llaves, indicando en una tabla sus cantidades relevantes.

9.5. Comparación de resultados

1. Identificar las dificultades de realizar medidas al circuito de la figura 9 utilizando directamente la AD2. ¿Qué rol cumple el circuito de test? Considerar $R6 = R7 = 10k\Omega$.
2. Comparar las respuestas en frecuencia obtenidas para los circuitos de las figuras 9 y 10. Verificar que es posible estimar la respuesta en frecuencia del circuito real a través de medidas con el circuito de test.

10. MEDIDA DE CONSUMO DEL ELECTRODOMÉSTICO

10.1. Objetivos específicos

- Integración de bloques.
- Calibrar constantes.
- Medida de consumo del electrodoméstico.

10.2. Integración de bloques

1. Armar el circuito de la Fig. 9 en la protoboard.
2. Agregar un filtro RC entre la salida del circuito y la AD2. Diseñar RC con frecuencia de corte en 20 kHz. ¿Por qué es necesario este pasa-bajos adicional?

10.3. Calibración de constantes

Es necesario obtener las constantes de proporcionalidad (entre la corriente consumida por el electrodoméstico y la señal adquirida por canal de acondicionamiento I/V) para las diferentes ganancias del PGA.

1. Escribir paramétricamente las constantes teóricas *punta a punta* del sistema.
2. Calcular el valor nominal (numérico) de las constantes.
3. En clase se calibrarán las constantes reales, conectando cargas resistivas conocidas en el lugar del electrodoméstico.

10.4. Medidas de consumo de electrodomésticos

1. Conectar la salida de la pinza de corriente a la entrada del circuito de acondicionamiento I/V.
2. Conectar la salida del transformador de tensión a la entrada del circuito de acondicionamiento V/V.
3. Conectar el Monitor EDM a un electrodoméstico conocido. Se puede utilizar una lamparita incandescente para observar que las ondas a adquirir son proporcionales entre si.
4. **Adquirir las señales (proporcionales al) voltaje y corriente consumida por el electrodoméstico.** Adquirir la corriente en el canal 0 y el voltaje en el canal 1 de la tarjeta AD2. Utilizar las herramientas de adquisición disponibles en el *Scope* del *Waveforms*. Seleccionar la ganancia del PGA más adecuada para la adquisición de la onda de corriente para este electrodoméstico en particular. Para esto, empezar utilizando la ganancia más baja, e ir aumentando (de a pasos) la ganancia conforme la adquisición lo requiera.
5. **Descargar los datos y graficar las ondas de voltaje y corriente consumida por el electrodoméstico.** Ajustar adecuadamente las onda para ser visualizada en ejes de Voltios vs. mili-segundos y Amperes vs. mili-segundos, respectivamente. Para esto, usar las constantes de proporcionalidad calculadas.

11. PARA EL INFORME

En esta sección se presentan los ítems de la Parte II que deben aparecer en el informe, con su debida justificación. Ambas partes de la práctica se presentarán en el mismo informe.

11.1. Circuito atenuador de continua en estructura no inversora

- Dar una expresión teórica de la transferencia en función de los parámetros del sistema de la figura 8a.
- Observando la ecuación, explicar por qué el circuito atenúa la continua.
- Indicar en una tabla los valores calculados para los componentes y los valores nominales elegidos.
- Imagen del circuito diseñado en *LT Spice*, indicando los valores elegidos por el grupo.
- Verificación de que se cumplen las especificaciones.
- Gráfica de la transferencia simulada.

11.2. Integración: PGA con atenuación DC

- Imagen de los circuitos de las figuras 9 y 10 diseñados en *LT Spice*.
- Verificación de que se cumplen las especificaciones.
- Comparación de los resultados de simulaciones de respuesta en frecuencia para ambos circuitos y todas las ganancias.
- Indicar en una tabla los valores medidos para el punto de operación.
- Indicar en una tabla el valor de offset a la salida esperado teóricamente (a partir de la hoja de datos), simulado y medido. Incluir el peor caso observable
- Gráfica de la transferencia al variar la frecuencia, para las distintas ganancias.
- Comparar los resultados, explicando la utilidad del circuito de test.

11.3. Medida de consumo del electrodoméstico

- Indicar en una tabla los valores elegidos para las componentes del filtro RC, y explicar su utilidad.
- Indicar en una tabla: las expresiones paramétricas de las constantes teóricas; sus valores nominales calculados; y los valores medidos para cada una.
- Gráficas de las señales adquiridas.
- Gráficas de voltaje y corriente por el electrodoméstico.