



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
IEE2183 – LABORATORIO DE MEDICIONES ELÉCTRICAS

Proyecto Final - Electrocardiógrafo

4 Sesiones

1. Descripción General

El proyecto final consiste en diseñar y simular un circuito para acondicionar y mostrar la señal eléctrica originada por el corazón de una persona, la cual será medida entre los dedos índices de ambas manos.

2. Objetivos

El proyecto tendrá por objeto:

- Calcular apropiadamente el valor de los componentes para las distintas etapas del circuito, a modo de cumplir con los requisitos de diseño indicados.
- Diseñar una placa de circuito impreso (PCB) para el proyecto, en tamaño no superior a 8 cm. x 8 cm..
- Armar y soldar el proyecto en una placa de circuito impreso
- Realizar la puesta en funcionamiento y solución de fallas (*debugging*) del circuito.
- Mostrar la señal acondicionada en un osciloscopio digital, configurado para una ganancia de $1 \frac{V}{div}$ y escala de tiempo de $500 \frac{ms}{div}$
- Indicar el pulso de la persona conectada al circuito mediante el destello de un LED

3. Teoría detrás del Electrocardiógrafo

Como recordará de biología, el corazón se excita electroquímicamente a sí mismo produciendo contracciones rítmicas que permiten bombear la sangre simultánea e independientemente a los pulmones para su oxigenación, y al resto del cuerpo para la distribución de oxígeno y nutrientes.

Evidentemente la magnitud de las señales producidas al interior del corazón para su adecuado funcionamiento son bastante pequeñas, pero es posible medirlas y con dicha información analizar el estado del músculo cardíaco y diagnosticar enfermedades. En esto, cobra importancia un instrumento llamado **electrocardiógrafo** que corresponde permite registrar la actividad eléctrica del Corazón.

Para realizar una medición, es necesario usar un set de electrodos distribuidos estratégicamente en el pecho, brazos y/o piernas. Ello dependerá de la información requerida por el instrumento para la graficación. Sin embargo, es posible simplificar el circuito de medición y elaborar un pequeño electrocardiógrafo *DIY* (sin fines médicos) y poder observar los mensajes eléctricos de nuestro corazón.

La señal eléctrica producto del funcionamiento del corazón humano puede ser captada entre los dedos índice de las manos, sin embargo, su detección requiere tener en cuenta los siguientes aspectos para acondicionarla a un nivel apropiado:

- La amplitud de la señal medida por el electrocardiógrafo es del orden de los microvolts, de manera que los circuitos de acondicionamiento deben tener una ganancia superior a 60 dB ($1000 [V/V]$).
- La señal medida tiene muy poca energía, de manera que el circuito de entrada debe tener una alta impedancia de entrada, típicamente de 1 M Ω o más.
- La señal medida se encuentra contaminada con el ruido de 50 Hz proveniente de la red eléctrica, de manera que la etapa de entrada debe operar en modo diferencial con un alto nivel de rechazo de modo común. En ocasiones se agrega un filtro notch sintonizado para rechazar la frecuencia de la red eléctrica, pero en este caso no es necesario ya que un filtro pasa-bajos cumplirá esta función.
- Es necesario eliminar las componentes de baja frecuencia, las que están asociadas a los movimientos del sujeto y al efecto de pila que se produce entre el cuerpo humano y el metal de los electrodos de medición. Para este propósito se utiliza un filtro pasa-altos con frecuencia de corte entre los cientos de mHz y unos pocos Hz.
- Es necesario eliminar las componentes de alta frecuencia, en particular aquellas asociadas a la red eléctrica y al ruido de las etapas de amplificación. Con este fin se utiliza un filtro pasa-bajos cuya frecuencia de corte puede estar entre las decenas de Hz hasta los cientos de Hz.

Con todo lo anterior dicho, se presentan las figuras 1 y 2. La figura 1 muestra dos ciclos completos de una señal de electrocardiograma teórica, mientras que la figura 2 contiene varias señales obtenidas de un electrocardiograma real. Note que la amplitud y la polaridad de la señal pueden variar a lo largo del tiempo.



Figura 1: Señal de Electrocardiograma Teórica

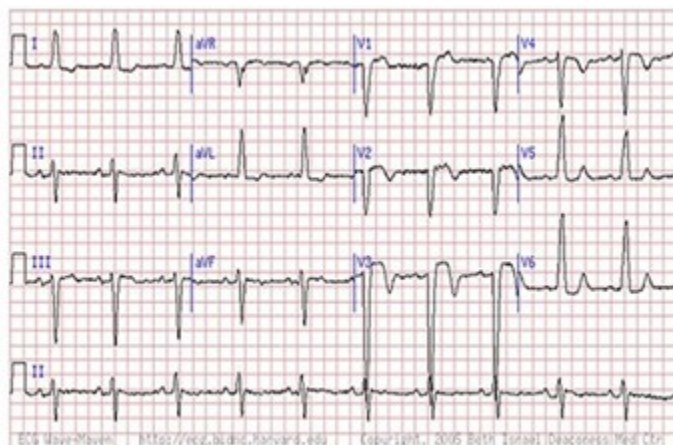


Figura 2: Señal de Electrocardiograma Real

La figura 3 muestra un diagrama en bloques genérico para un circuito acondicionador de señales de electrocardiograma. En este proyecto no se usará el filtro notch.

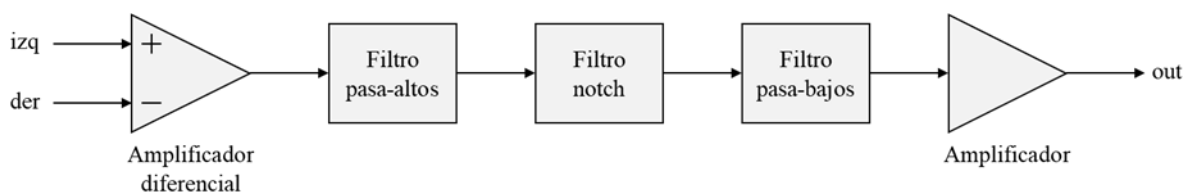


Figura 3: Diagrama en Bloques del Acondicionador para Señales de Electrocardiograma

4. ¿Cómo Diseñar el Circuito? - Instrucciones

Las figuras 4 y 5 muestran en detalle el circuito que deberá implementar. Tenga en cuenta que deberá calcular los valores del circuito que no están especificados, mientras que los valores indicados, no deben ser cambiados.

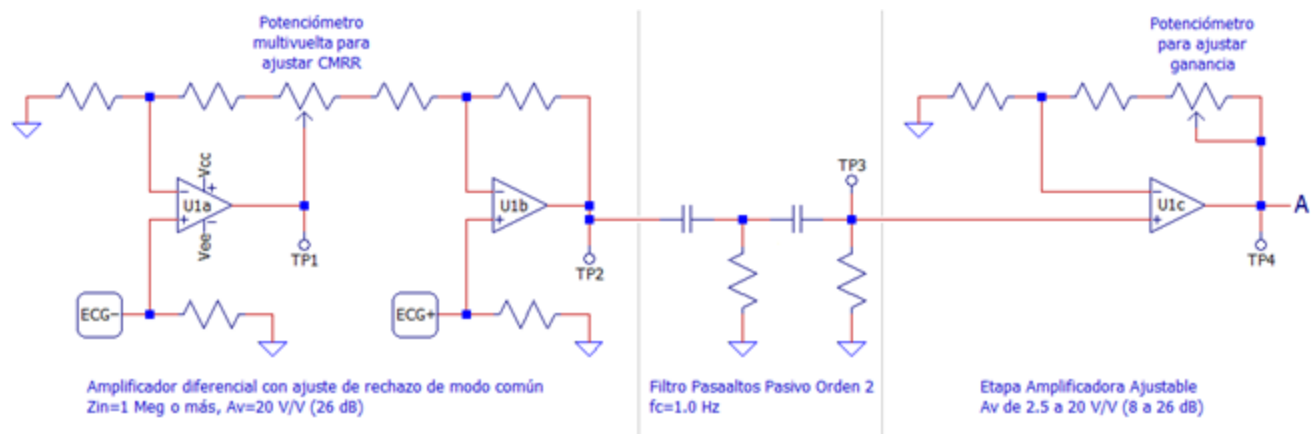


Figura 4: Circuito acondicionador para señales de electrocardiograma (parte 1 de 2)

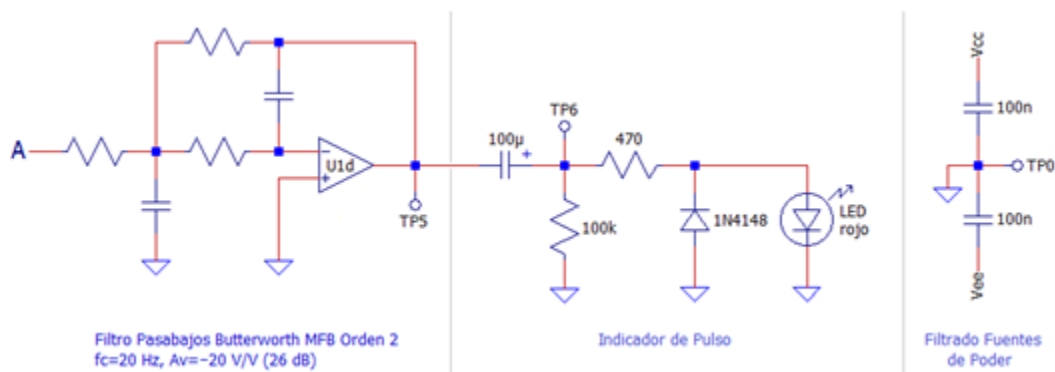


Figura 5: Circuito acondicionador para señales de electrocardiograma (parte 2 de 2)

La topología del circuito, las ganancias de cada etapa, las frecuencias de corte, y el orden de los filtros han sido optimizados para conseguir un circuito funcional con una cantidad mínima de componentes, y a la vez, sin necesidad de utilizar componentes de precisión o amplificadores de instrumentación especiales.

Los requisitos y condiciones que deberá cumplir para el cálculo de los componentes del circuito son:

1. Tensiones de Alimentación

- +12 [V], GND, -12 [V]
- Debe considerar dos capacitores de filtro entre 100 nF y 220 nF conectados entre cada una de las tensiones de alimentación y tierra (ver circuito). Estos sirven para filtrar el ruido de alta frecuencia que pudiera tener la fuente de alimentación.
- Considere una regleta de 3 terminales para la alimentación

2. Valores y tolerancias de los componentes

- Resistencias: $\pm 5\%$ (serie E24)
- Capacitores cerámicos y poliéster: $\pm 10\%$ (serie E12)
- Capacitores electrolíticos: $\pm 20\%$ (serie E6)
- Como norma, la impedancia de carga equivalente que “ve” la salida de un OpAmp no debiera ser inferior a $2\text{ k}\Omega$.
- Evite usar resistencias superiores a $1\text{ M}\Omega$ en la realimentación de los OpAmp

3. Elementos Activos

- OpAmp cuádruple TL074, TL084 o LF347 (son equivalentes).
- El OpAmp debe ir montado en una base soldada a la PCB, de manera que pueda ser reemplazado con facilidad en caso que se dañe.

4. Amplificador Diferencial

- Implementado con dos OpAmp para permitir una impedancia de entrada $\geq 1\text{ M}\Omega$.
- Ganancia fija en 26 dB para cada una de las entradas.
- Se incluye un potenciómetro de ajuste multivuelta que permite ajustar con precisión el rechazo de modo común (CMRR), con el objeto de compensar la tolerancia de las resistencias utilizadas.
- Debe considerar dos electrodos de unos 3 cm^2 de superficie c/u para las entradas ECG+ y ECG-. Estos electrodos pueden ser un par de monedas de 10 pesos o incluso retazos pequeños de placas de cobre... pero recuerde que deben tener algún medio de conexión a la placa principal.

5. Filtro Pasa-Altos

- Filtro pasivo de orden 2.
- Su respuesta debe ser muy similar a dos filtros de primer orden idénticos, interconectados con un buffer de ganancia unitaria, es decir, $F(s) \approx \frac{s}{(s+k)^2}$
- Frecuencia de corte en 1 Hz (medida a -3 dB).

6. Amplificador de Ganancia Ajustable

- Configuración No-Inversora.
- Ganancia ajustable entre 8 y 26dB mediante un potenciómetro de panel.

7. Filtro Pasa-Bajos

- Configuración MFB (*Multiple FeedBack*) de segundo orden.
- Frecuencia de corte de 20Hz (medida a 3dB bajo la ganancia en DC).
- Ganancia en DC de 26 dB.

8. Indicador de Pulso

- Usa un LED de color rojo de alta eficiencia (otros colores de LED requieren una mayor amplificación de tensión para que la señal resulte visible).
- Respetar la polaridad indicada para el capacitor electrolítico.
- No alterar los valores indicados para los demás componentes.

9. Puntos de Medición (Test Points) y Entradas

- El diseño de la placa de circuito impreso debe considerar los 7 puntos medición indicados en el circuito esquemático (TP0 a TP6).
- Se debe considerar dos electrodos de superficie aproximada de 3 cm^2 , los cuales sirven para hacer contacto con los dedos de la persona.

5. Desarrollo del Proyecto

El proyecto se desarrolla a lo largo de cuatro (4) sesiones de laboratorio. Adicionalmente, es necesario desarrollar y entregar una guía de trabajo previo antes de la primera sesión.

5.1. Trabajo Previo - ¡Traer para la Primera Sesión!

1. Averigüe cuáles valores pertenecen a cada una de las siguientes series de componentes: E6, E12 y E24
2. Calcule los valores faltantes para los componentes de los circuitos de las figuras 4 y 5, según las indicaciones e instrucciones para el diseño de la sección 4.
3. Como ayuda, puede utilizar alguna de las siguientes calculadoras online para calcular filtros:
 - [Okawa Denshi - Diseñador de Filtros](#)
 - [Analog Devices - Filter Wizard](#)
 - [Texas Instruments - Filter Design Tool](#)
4. Simule el **amplificador diferencial** y verifique que cumple con la especificación de ganancia y rechazo de modo común (ajustable mediante potenciómetro de ajuste).

5. Simule el **filtro pasa-altos** y verifique que cumple con la especificación de frecuencia de corte.
6. Simule el **amplificador de ganancia ajustable** y verifique que cumple con la especificación de ganancia y rango de ajuste de ésta.
7. Simule el **filtro pasa-bajos** y verifique que cumple con la especificación de respuesta, frecuencia de corte y ganancia.
8. Indique cuáles son las ganancias mínima y máxima TOTAL que proveen las etapas del circuito al ajustar el potenciómetro del **amplificador de ganancia variable** entre sus extremos.
9. Simulación del Circuito Completo que muestre la señal de salida obtenida en LTSpice usando al **humano de apoyo**. Si el circuito está bien diseñado, debería mostrar un ECG adecuado. Use el archivo de apoyo LTSpice proveído (ECG-Humano.asc), que contiene una fuente de señal compleja que representa la medición cardíaca de un ser humano.

El trabajo previo debe enviarse vía buzón de CANVAS al inicio de la primera sesión, de forma de dar feedback a los grupos de los valores calculados.

5.2. Primera Sesión - Miércoles 31/Mayo

- Clase acerca del diseño y fabricación de placas de circuito impreso (PCB).
- Trabajo de los grupos diseñando su PCB usando algún software de uso libre, por ejemplo, [Autodesk Eagle](#) o [Easy EDA - Basado en Cloud](#). Los archivos requeridos para la fabricación de la PCB serán enviados al encargado de laboratorio para su ruteo de forma posterior y fuera del horario de clases.

Una nota importante del proyecto, es que **NO** es necesario que arme su circuito en *protoboard* para verificar su funcionamiento, pues la topología circuital ya ha sido validada y las simulaciones debieran bastar. Además, la alta ganancia e impedancia del circuito hacen que sea difícil hacerlo funcionar en un *protoboard*.

5.3. Segunda Sesión - Miércoles 07/Junio

- Clase teórico-práctica acerca del uso del cautín y soldadura de componentes. Se entregará a los estudiantes (de forma individual) una placa simple de armar para practicar y hacer mediciones.
- En caso que los grupos tengan un diseño ya ruteado, se les hará entrega de su PCB fabricada, y podrán ir a la etapa de montaje y soldadura de los componentes.

5.4. Tercera Sesión - Miércoles 14/Junio

- Puesta en marcha del circuito: ajuste de rechazo de modo común, verificación de control de ganancia y funcionamiento general.
- Iteración en el diseño de placas de ser necesario. **En esto no se sorprendan, el diseño de PCB es prueba y error.**

5.5. Cuarta Sesión - Semana del 21/Junio o Miercoles 28/Junio (Por Definir)

- Presentación final y evaluación de los proyectos funcionando. Sólo se revisará y evaluará aquellos proyectos armados en PCB, no se considerará circuitos armados en *protoboard*.

6. Evaluación

La evaluación y nota final del proyecto considerará los siguientes aspectos:

- Trabajo previo.
- Las distintas etapas del circuito cumplen con todos los requisitos de diseño, incluyendo el ajuste de rechazo de modo común, el control de ganancia y los electrodos de entrada.
- Calidad del ruteo de la PCB.
- Calidad de las soldaduras en la PCB
- Es posible visualizar apropiadamente la señal acondicionada del pulso en un osciloscopio digital, configurado para una ganancia de 1 V/div y escala de tiempo de 500 ms/div.
- El circuito indica correctamente el pulso de la persona conectada al circuito mediante el destello del LED.

7. Bibliografía

Se le recomienda consultar la siguiente bibliografía complementaria, la cual está disponible en la página del proyecto:

- [ECG signal acquisition hardware design](#)
- [Designing of portable and low-cost ECG signal acquisition system](#)
- [ECG signal conditioning](#)

- Spectral signal properties of ECG signal
- Wikipedia - Heart
- Wikipedia - Electrocardiography