

CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE UN SENSOR DE SEÑALES MIOELÉCTRICAS

Dr. Ing. Marcelo Haberman
Investigador Asistente
CONICET

GIBIC | Grupo de
Instrumentación Biomédica,
Industrial y Científica del
LEICI | Instituto de
Investigaciones en
Electrónica, Control y
Procesamiento de señales

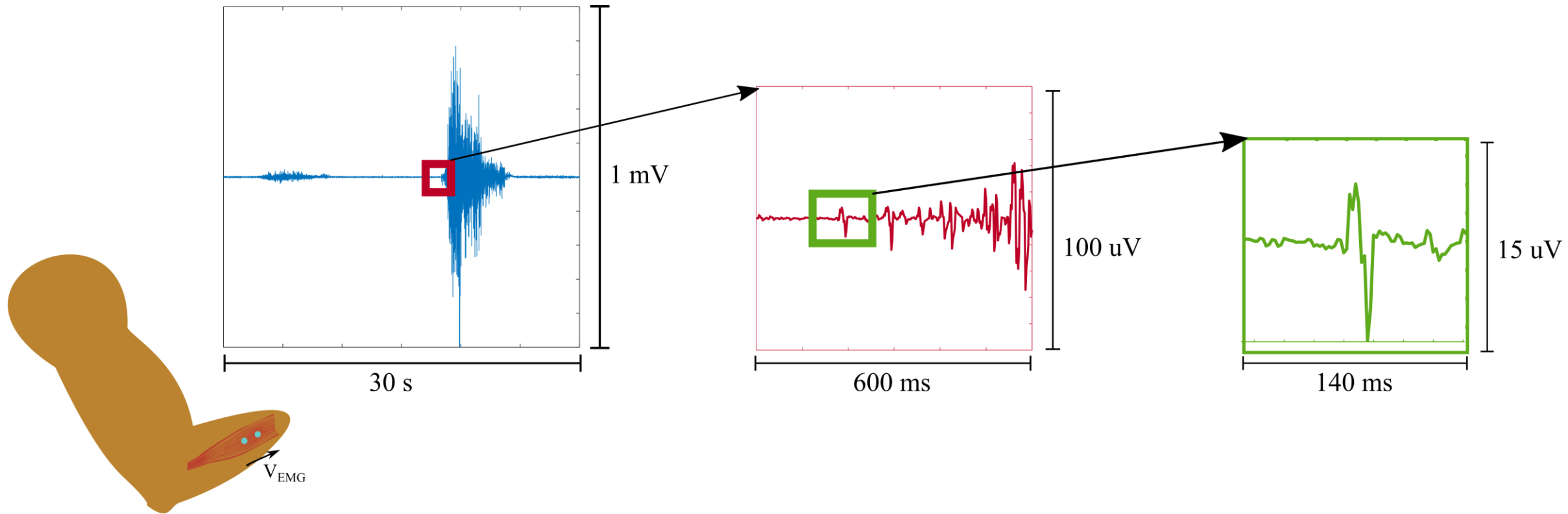
Facultad de Ingeniería de
la UNLP

CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE UN SENSOR DE SEÑALES MIOELÉCTRICAS

1. Contexto de la problemática y especificaciones
2. Acondicionamiento de la señal de EMG
3. Electrodo de referencia de modo común
4. Armado y caracterización del prototipo
5. Consideraciones de seguridad eléctrica

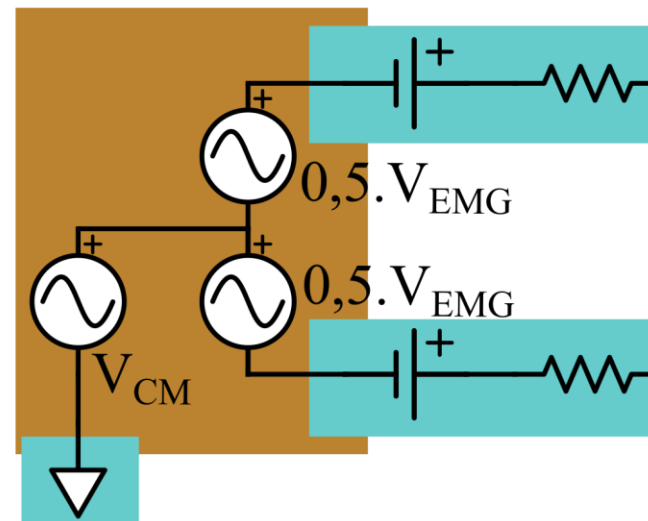
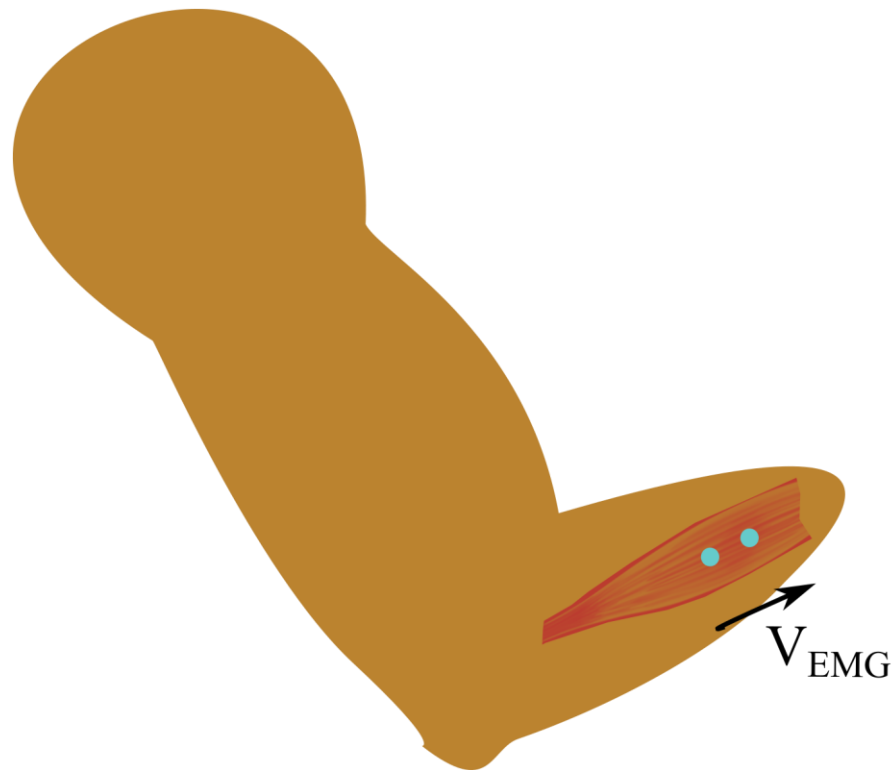
CONTEXTO DE LA PROBLEMÁTICA

Las señales a capturar tienen amplitudes entre una decena de μV y unos pocos mV



CONTEXTO DE LA PROBLEMÁTICA

Un electrodo superficial apoyado sobre la piel puede llegar a tener varios cientos de kOhm de impedancia y hasta ± 300 mV de offset de continua

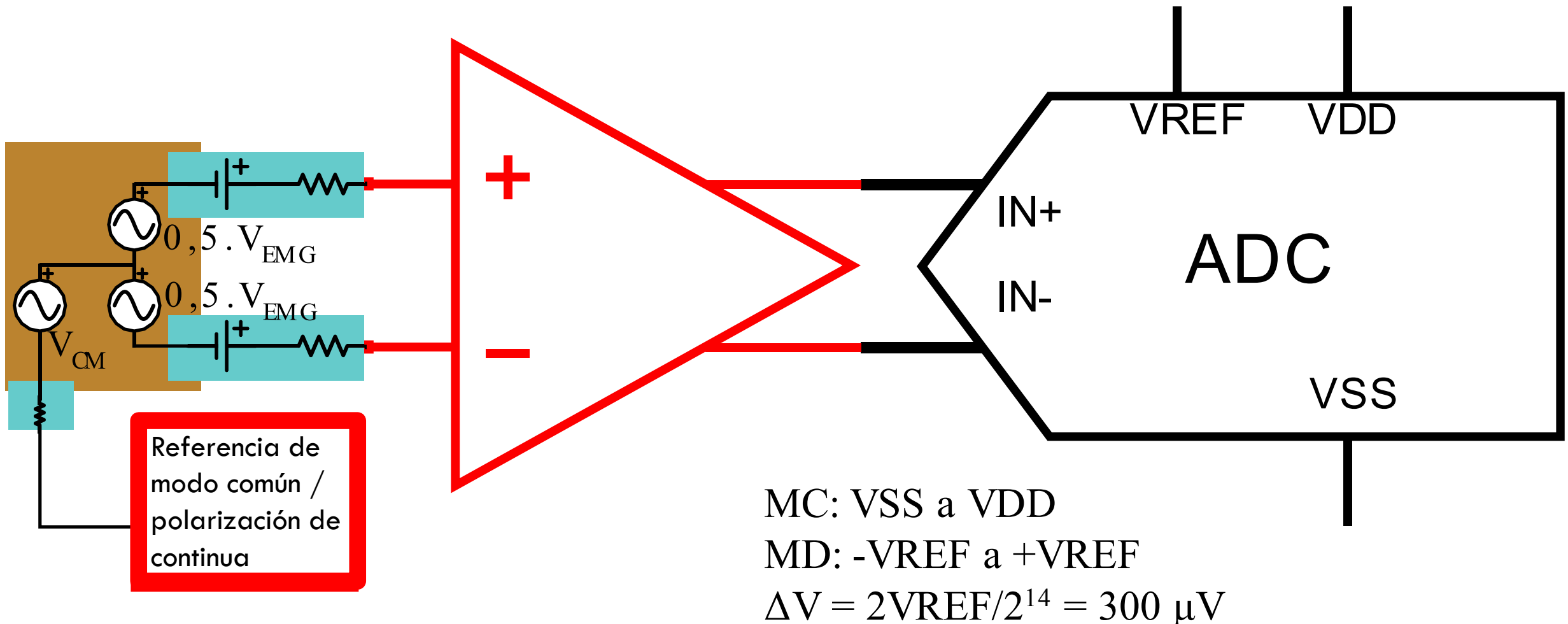


ESPECIFICACIONES

Se deberá diseñar un front-end para señales de EMG superficial, considerando:

- Uso del ADC interno del MSP432P401R:
 - 14 bits
 - Entrada diferencial
 - Referencia interna de 2.5V → Rango diferencial de -2.5 V a +2.5 V
 - Rango de entrada de modo común: 0 V a 3.3 V (Tensión de alimentación del uC)
- Fuente simple de 3.3V (se obtiene de la placa del MSP432P401R)
- Electrodo secos
- Tamaño de unos pocos cm
- Orificios para tornillos de fijación

ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE EMG

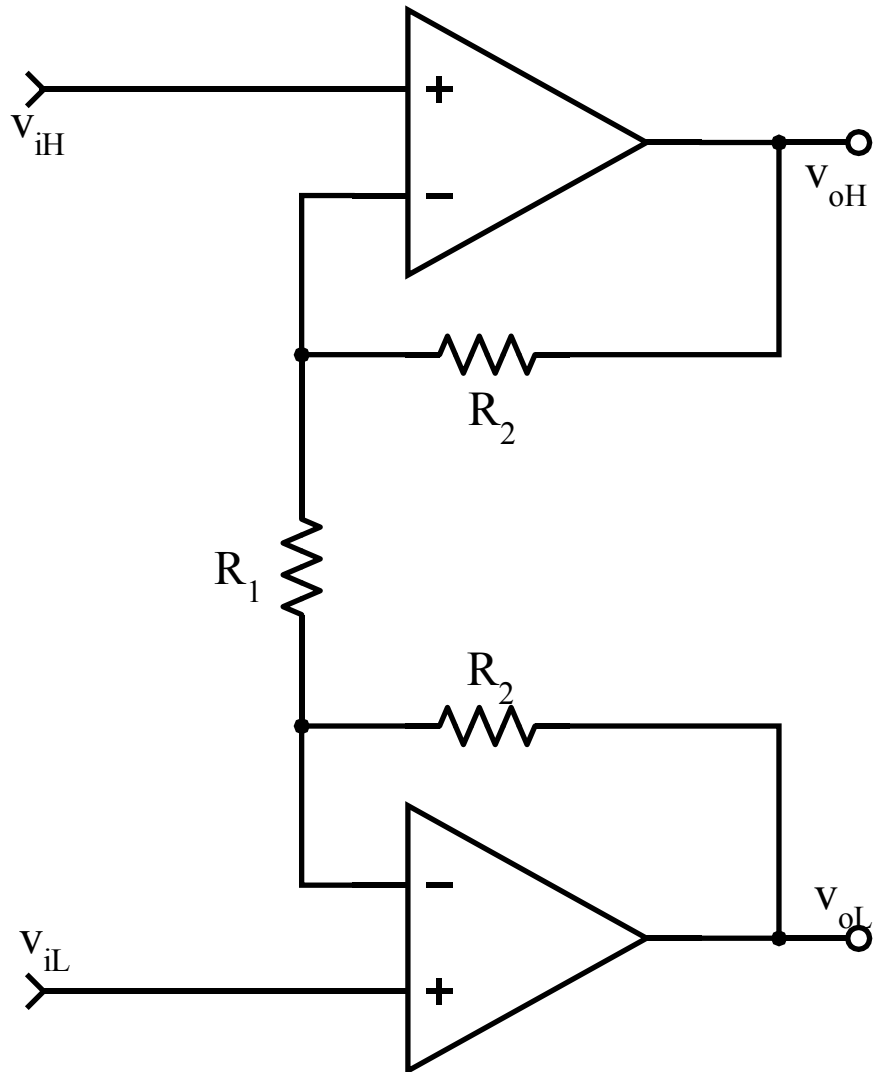


ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE EMG

Hay que diseñar un amplificador (front-end) que:

- Adapte los niveles de señal sobre la piel a los que debe recibir el ADC. Teniendo en cuenta MC y MD.
- También tiene que “adaptar impedancias” mostrando ALTA impedancia de entrada y BAJA impedancia de salida.
- Elimine ruido y señales espurias fuera de banda

AMPLIFICADOR COMPLETAMENTE DIFERENCIAL



$$v_{iD} = v_{iH} - v_{iL} \quad v_{oD} = v_{oH} - v_{oL}$$

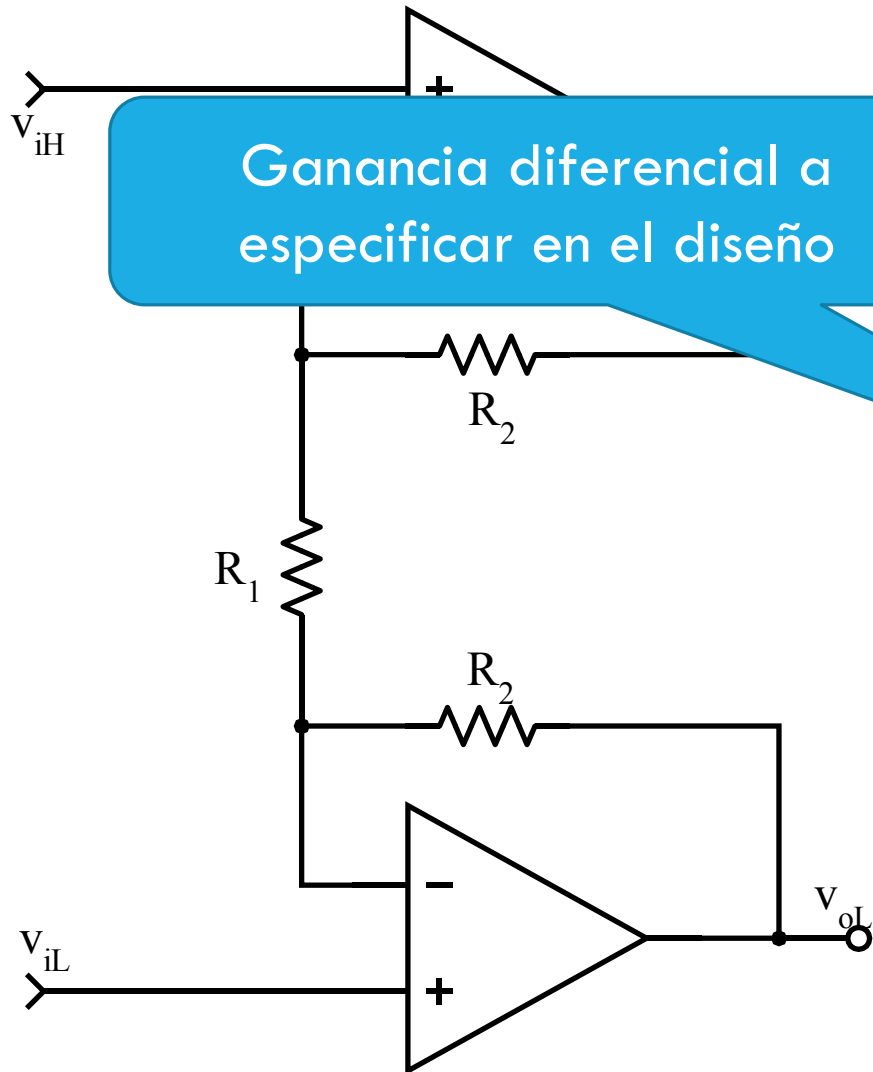
$$v_{iC} = \frac{v_{iH} + v_{iL}}{2} \quad v_{oC} = \frac{v_{oH} + v_{oL}}{2}$$

$$G_{DD} = \frac{v_{oD}}{v_{iD}} = 1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$G_{CC} = \frac{v_{oC}}{v_{iC}} = 1$$

$$G_{DC} = \frac{v_{oD}}{v_{iC}} = 0$$

AMPLIFICADOR COMPLETAMENTE DIFERENCIAL



Ganancia diferencial a especificar en el diseño

$$v_{iD} = v_{iH} - v_{iL}$$

$$v_{oD} = v_{oH} - v_{oL}$$

$$v_{iC} = \frac{v_{iH} + v_{iL}}{2}$$

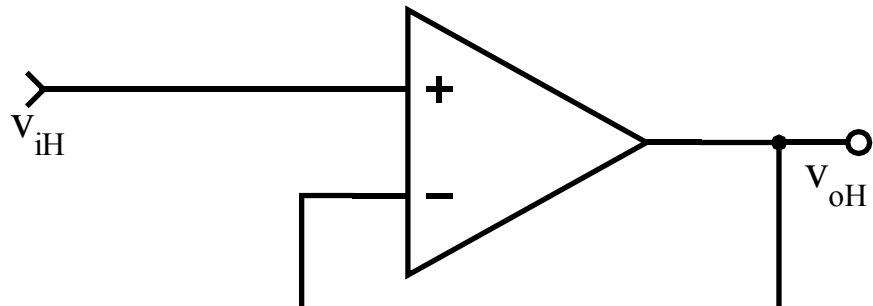
$$v_{oC} = \frac{v_{oH} + v_{oL}}{2}$$

$$G_{DD} = \frac{v_{oD}}{v_{iD}} = 1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$G_{CC} = \frac{v_{oC}}{v_{iC}} = 1$$

$$G_{DC} = \frac{v_{oD}}{v_{iC}} = 0$$

AMPLIFICADOR COMPLETAMENTE DIFERENCIAL



El modo común a la entrada será igual al modo común a la salida

$$v_{iD} = v_{iH} - v_{iL}$$

$$v_{oD} = v_{oH} - v_{oL}$$

$$v_{iC} = \frac{v_{iH} + v_{iL}}{2}$$

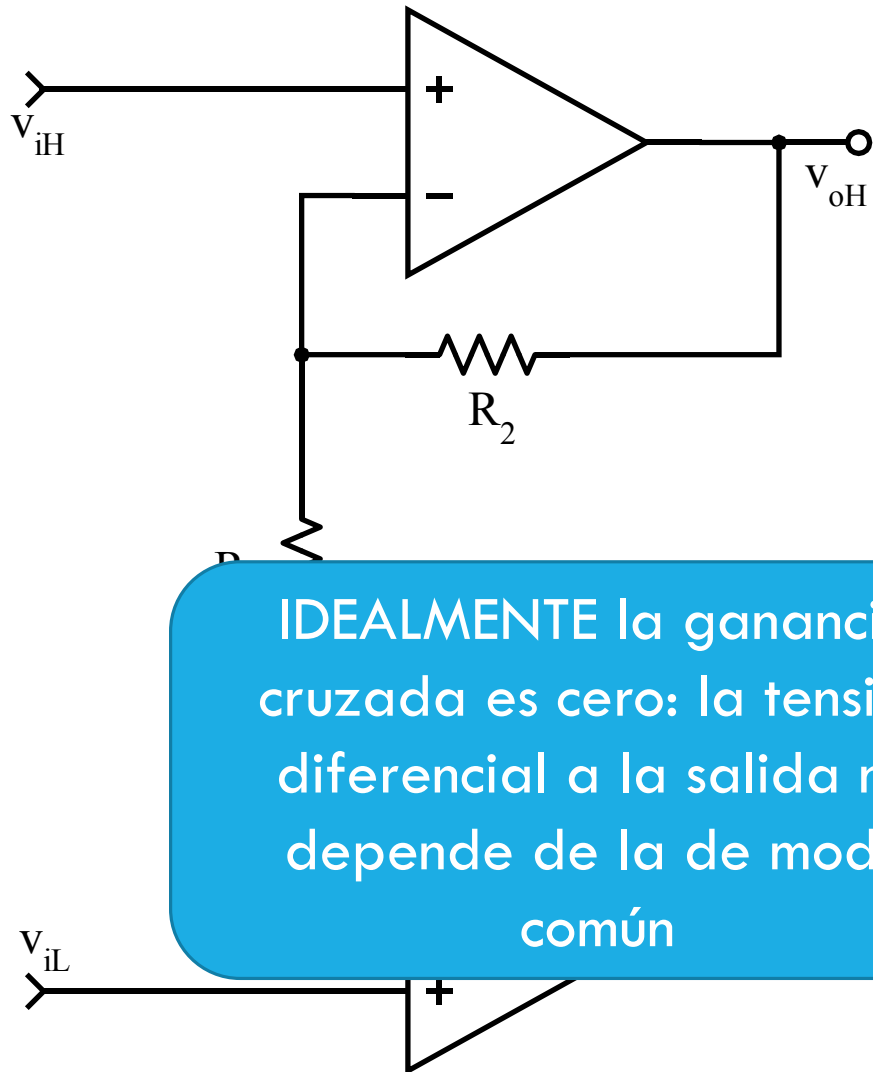
$$v_{oC} = \frac{v_{oH} + v_{oL}}{2}$$

$$G_{DD} = \frac{v_{oD}}{v_{iD}} = 1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$G_{CC} = \frac{v_{oC}}{v_{iC}} = 1$$

$$G_{DC} = \frac{v_{oD}}{v_{iC}} = 0$$

AMPLIFICADOR COMPLETAMENTE DIFERENCIAL



IDEALMENTE la ganancia cruzada es cero: la tensión diferencial a la salida no depende de la de modo común

$$v_{iD} = v_{iH} - v_{iL}$$

$$v_{oD} = v_{oH} - v_{oL}$$

$$v_{iC} = \frac{v_{iH} + v_{iL}}{2}$$

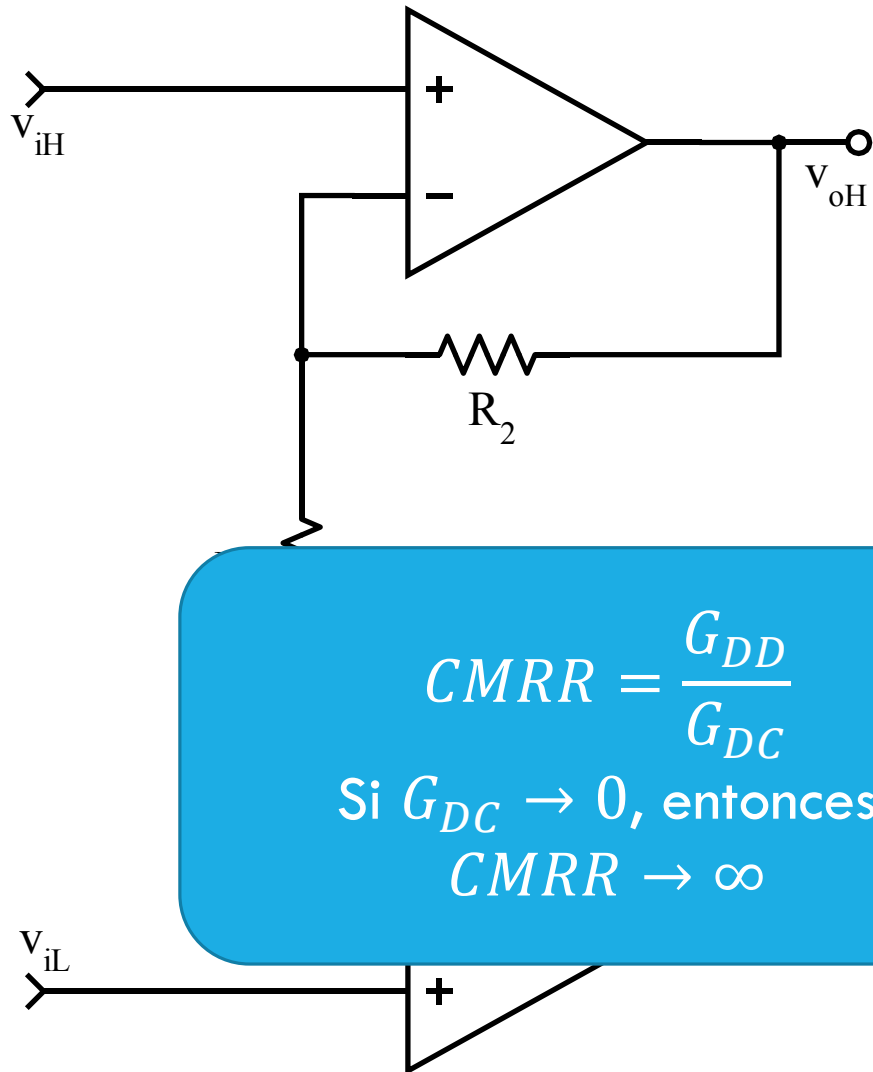
$$v_{oC} = \frac{v_{oH} + v_{oL}}{2}$$

$$G_{DD} = \frac{v_{oD}}{v_{iD}} = 1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$G_{CC} = \frac{v_{oC}}{v_{iC}} = 1$$

$$G_{DC} = \frac{v_{oD}}{v_{iC}} = 0$$

AMPLIFICADOR COMPLETAMENTE DIFERENCIAL



$$v_{iD} = v_{iH} - v_{iL}$$

$$v_{oD} = v_{oH} - v_{oL}$$

$$v_{iC} = \frac{v_{iH} + v_{iL}}{2}$$

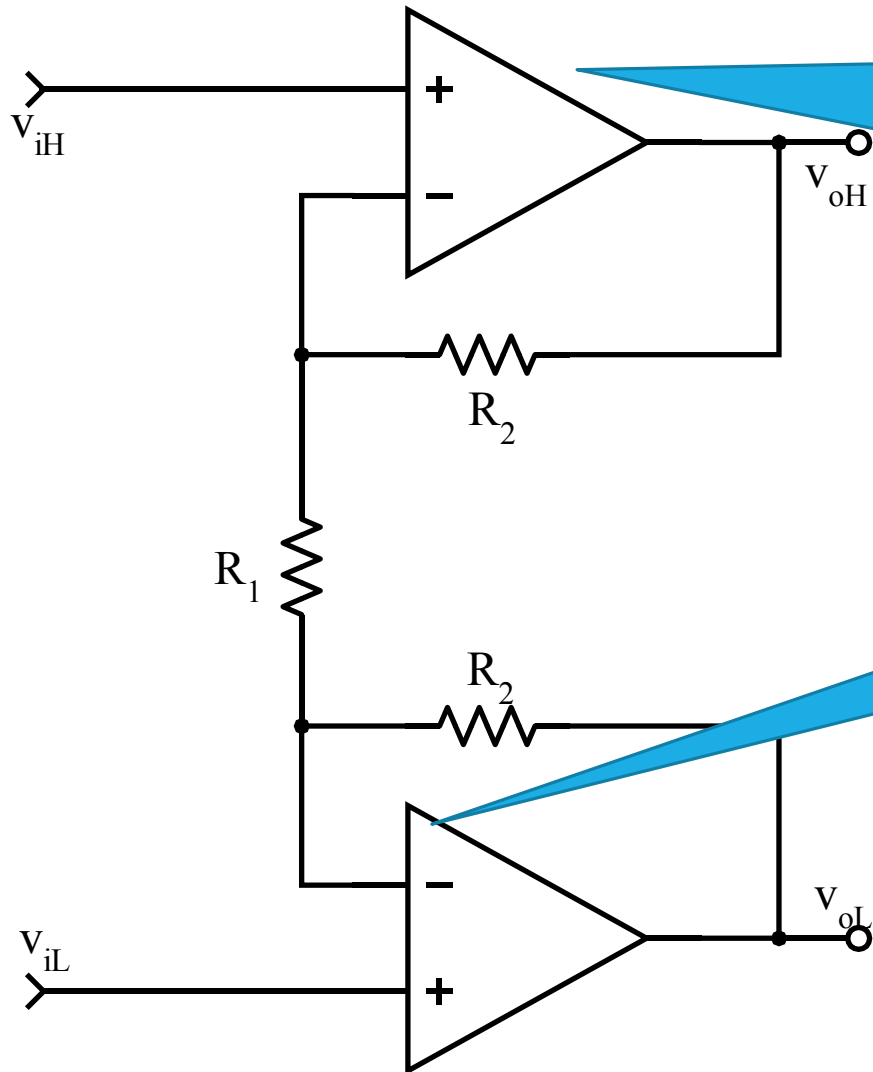
$$v_{oC} = \frac{v_{oH} + v_{oL}}{2}$$

$$G_{DD} = \frac{v_{oD}}{v_{iD}} = 1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$G_{CC} = \frac{v_{oC}}{v_{iC}} = 1$$

$$G_{DC} = \frac{v_{oD}}{v_{iC}} = 0$$

AMPLIFICADOR COMPLETAMENTE DIFERENCIAL



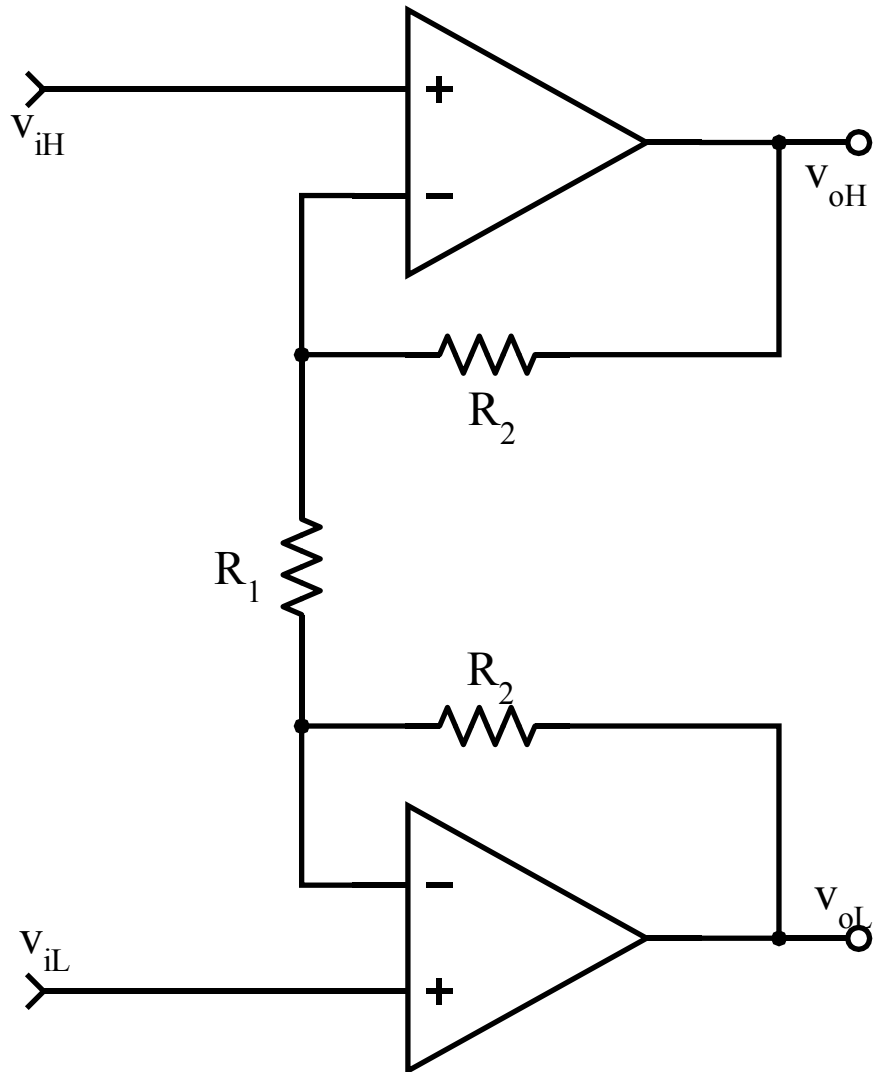
- El CMRR real dependerá solamente del desapareamiento entre operacionales →
- Conviene usar operacionales de un mismo encapsulado
 - La tolerancia de los resistores no es crítica

$$v_{iD} = 1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$G_{CC} = \frac{v_{oC}}{v_{iC}} = 1$$

$$G_{DC} = \frac{v_{oD}}{v_{iC}} = 0$$

DETERMINACIÓN DE LA GANANCIA



Mínima señal discernible: 1 μ V

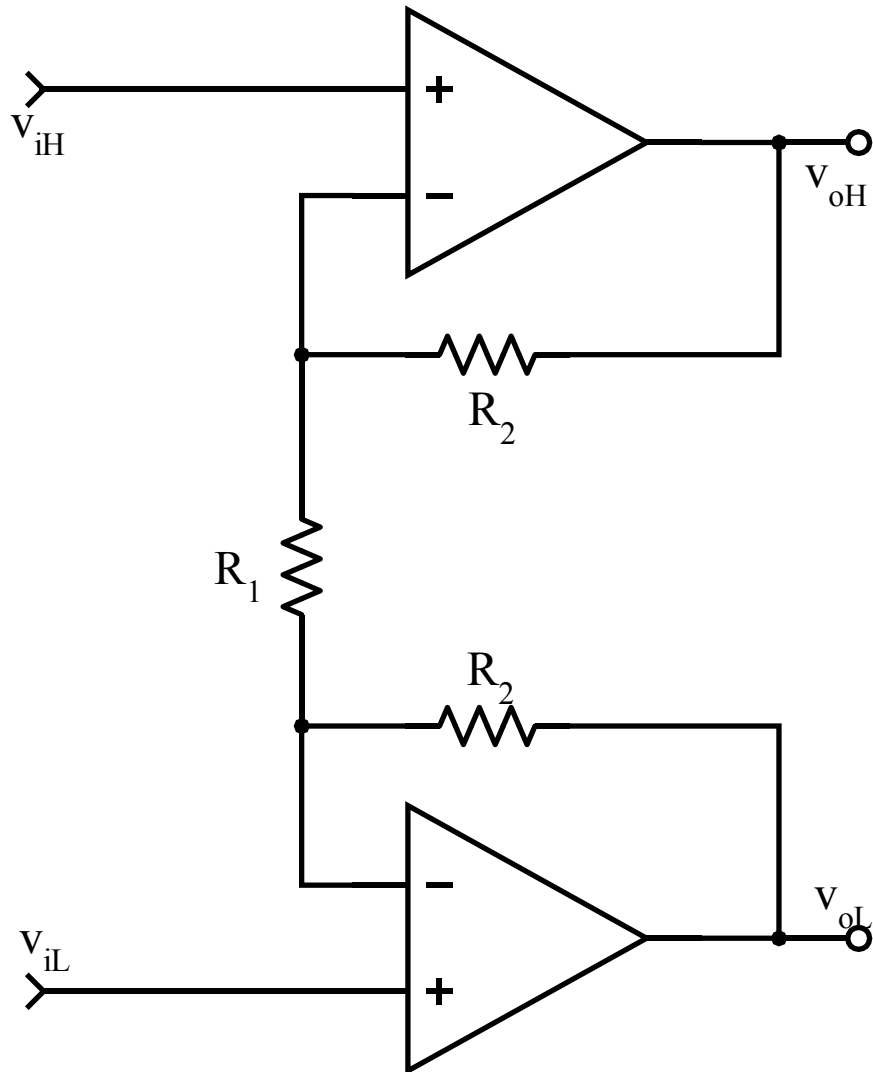
$$G_{DD} = \frac{v_{oD}}{v_{iD}} = 1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$G_{DDmin} = \frac{V_{LSB}}{1 \mu V} = \frac{\left(\frac{2 \cdot V_{REF ADC}}{2^N}\right)}{1 \mu V} = \frac{\left(\frac{2 \cdot 2,5 V}{2^{14}}\right)}{1 \mu V} = \mathbf{305}$$

$$G_{DDMAX} = \frac{V_{REF}}{2,5 mV} = \frac{2,5 V}{2,5 mV} = \mathbf{1000}$$

Máxima amplitud esperable: $\pm 2,5$ mV

DETERMINACIÓN DE LA GANANCIA



$$G_{DD} = \frac{v_{oD}}{v_{iD}} = 1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$G_{DDmin} = \frac{V_{LSB}}{1 \mu V} = \frac{\left(\frac{2 \cdot V_{REF ADC}}{2^N} \right)}{1 \mu V} = \frac{\left(\frac{2 \cdot 2,5 V}{2^{14}} \right)}{1 \mu V} = \mathbf{305}$$

$$G_{DDMAX} = \frac{V_{REF}}{2,5 mV} = \frac{2,5 V}{2,5 mV} = \mathbf{1000}$$

Para $R_1 = 10 k\Omega$ y $R_2 = 3,3 M\Omega$
Resulta $G_{DD} = 661$

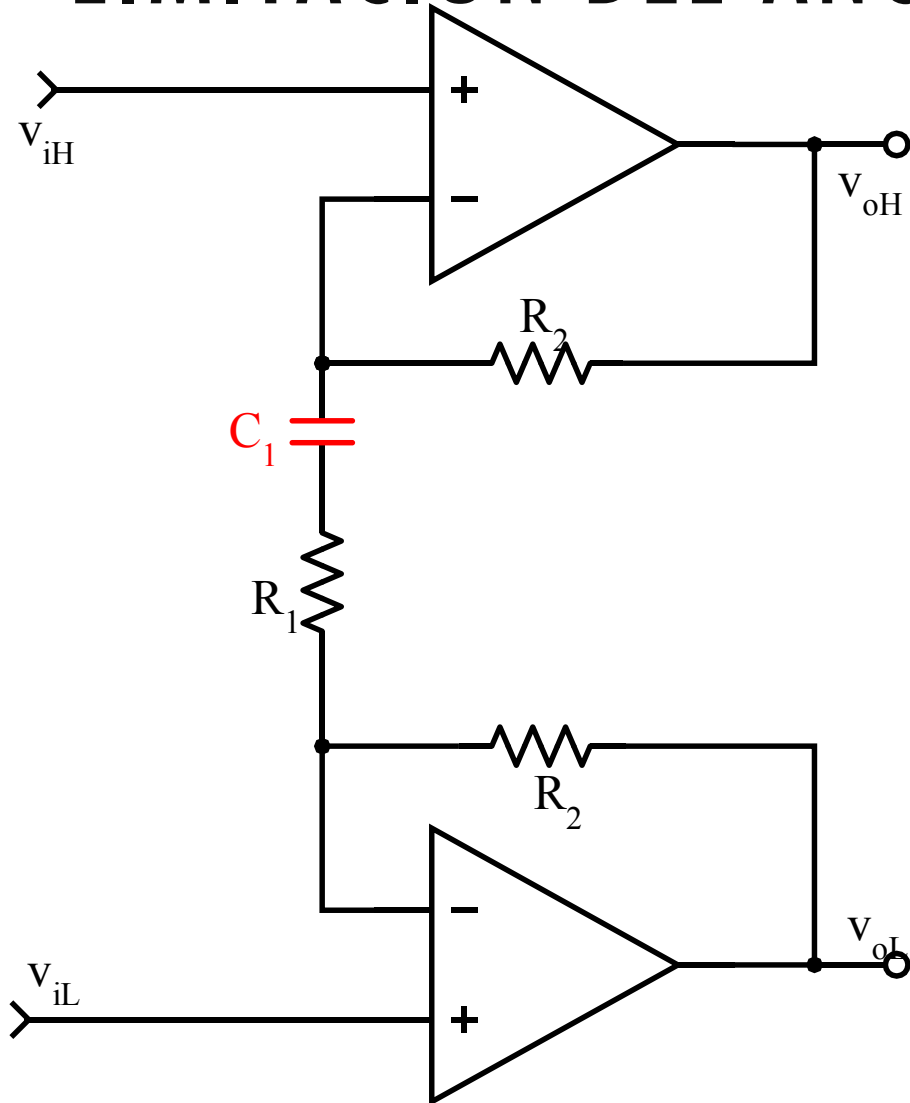
LIMITACIÓN DEL ANCHO DE BANDA

A bajas frecuencias:

Recordar que puede haber una componente de continua de 300mV, que para la ganancia de diseño (661) saturaría el amplificador. **SE DEBE ACOPLAR EN ALTERNA**

El EMG tiene componentes en frecuencia desde unos 10 Hz. Pero, en general conviene acoplar entre 20 y 30Hz para reducir artefactos de movimiento

LIMITACIÓN DEL ANCHO DE BANDA



$$G_{DD}(s) = 1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1} \left[\frac{s \cdot \tau_{HP}}{1 + s \cdot \tau_{HP}} \right]$$

$$\tau_{HP} = R_1 \cdot C_1 = \frac{1}{2\pi f_{HP}}$$

Se escogió $C_1 = 680 \text{ nF}$ y con esto se consigue $f_{HP} = 23,4 \text{ Hz}$

LIMITACIÓN DEL ANCHO DE BANDA

A altas frecuencias:

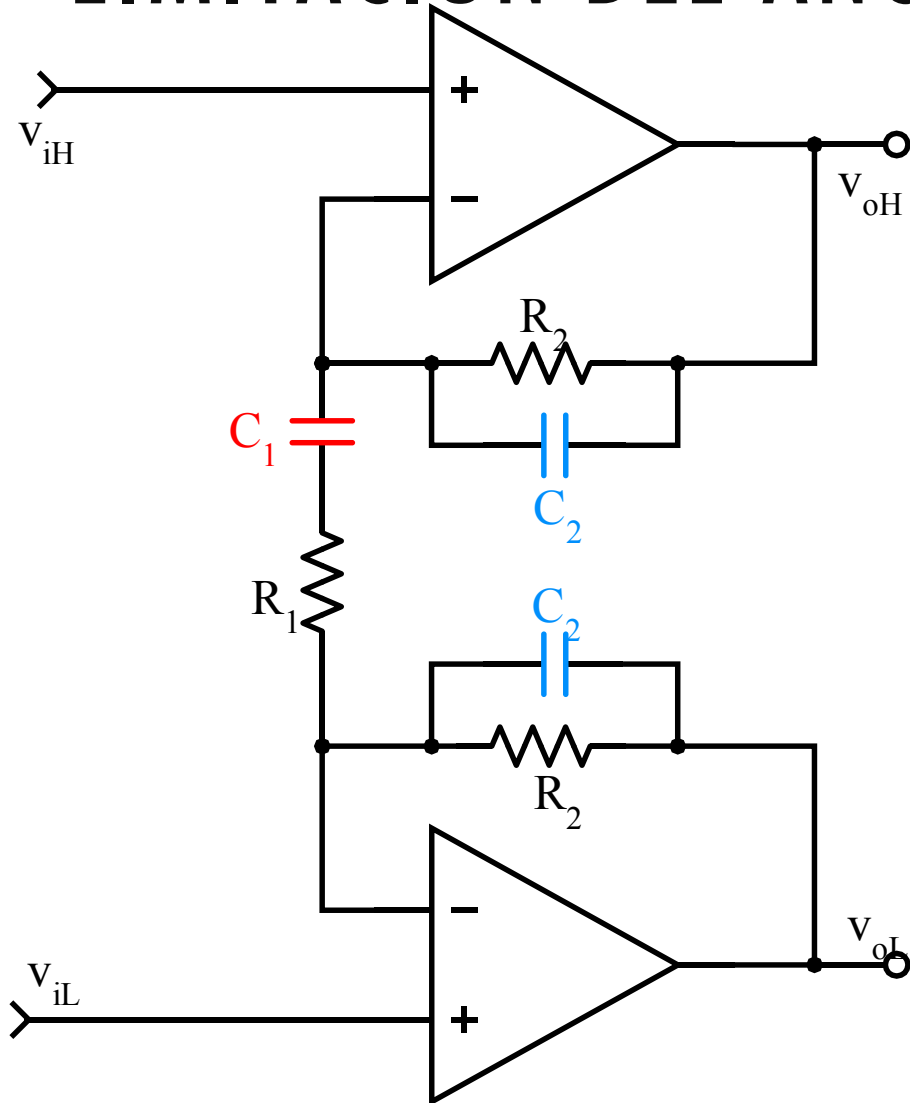
El EMG tiene componentes hasta 1kHz aproximadamente, pero esto depende de

- Distancia inter-electrodo
- Tamaño y geometría de los electrodos

Para los tamaños de electrodos de 1cm y distancias inter-electrodo de 2cm la señal no suele tener un contenido espectral por encima de los 300 Hz.

Si importa evitar el efecto de aliasing hay que tener en cuenta la frecuencia de muestreo

LIMITACIÓN DEL ANCHO DE BANDA

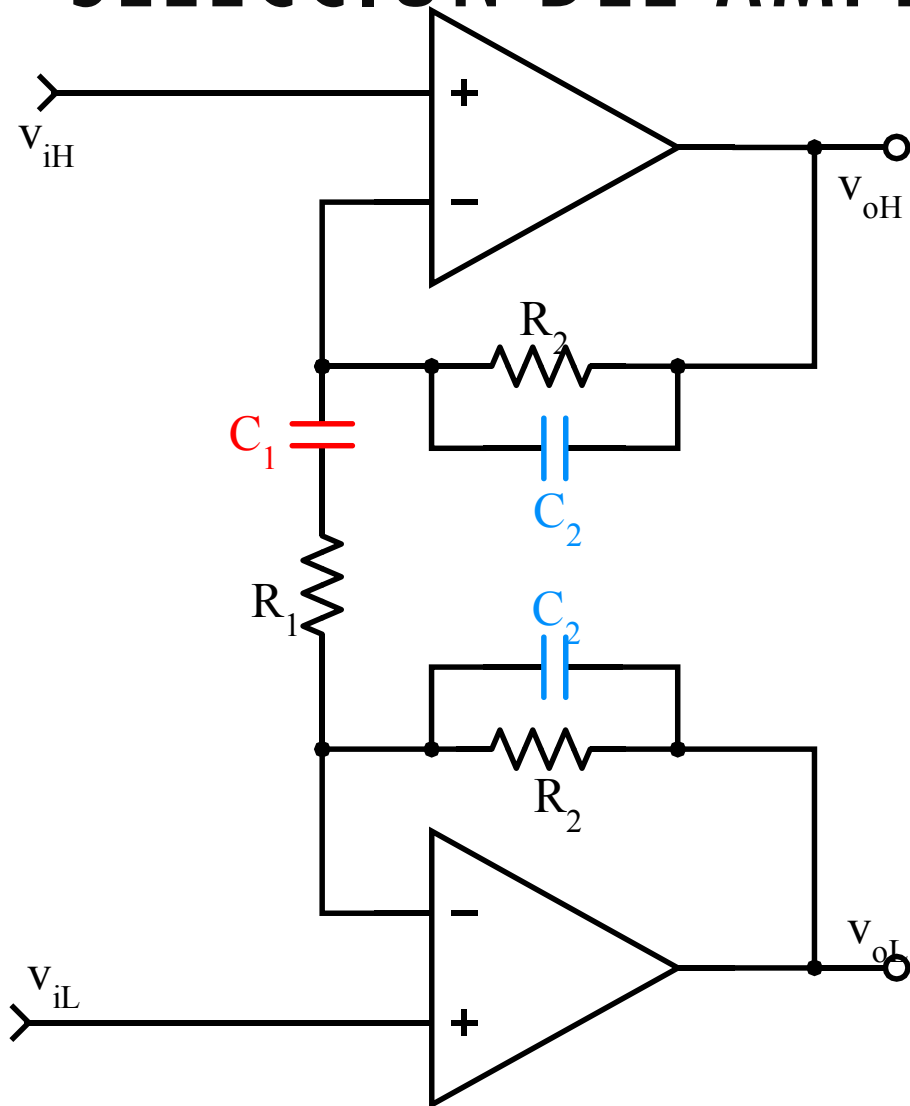


$$G_{DD}(s) = 1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1} \left[\frac{s \cdot \tau_{HP}}{1 + s \cdot \tau_{HP}} \right] \left[\frac{1}{1 + s \cdot \tau_{LP}} \right]$$

$$\tau_{LP} = R_2 \cdot C_2 = \frac{1}{2\pi f_{LP}}$$

Se escogió $C_2 = 220 \text{ pF}$ y con esto se consigue $f_{LP} = 219 \text{ Hz}$

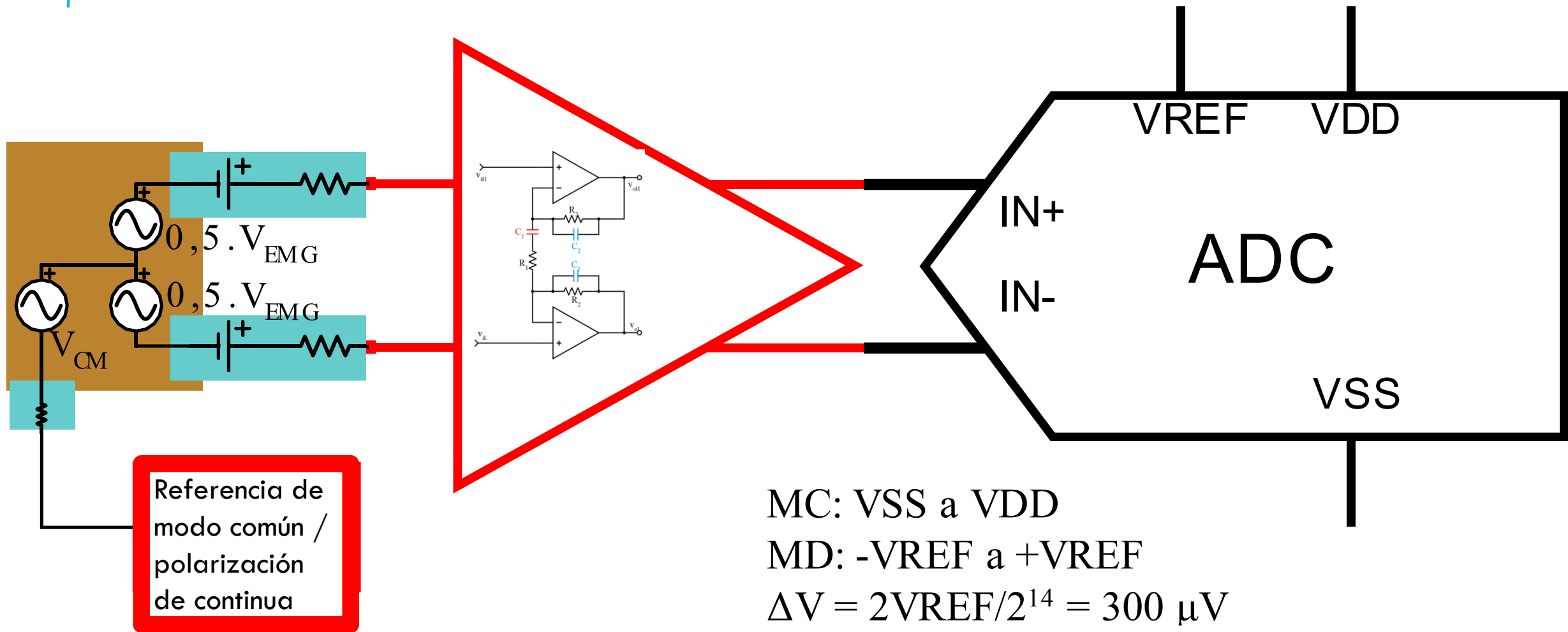
SELECCIÓN DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL



Se utilizarán los operacionales **OPA2333** (encapsulado dual) que entre sus características más relevantes tiene:

- Alimentación con fuente simple/dual 1,8 V ($\pm 0,9$ V) a 5,5 V ($\pm 2,75$ V)
- Muy bajo consumo 17 μ A/amp
- Rail to Rail I/O
- Bajo offset/drift (poca utilidad en este caso)
- 350 kHz de producto ganancia por ancho de banda (JUSTO)
- Densidad de ruido plana de 55 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$

REFERENCIA DE MODO COMÚN



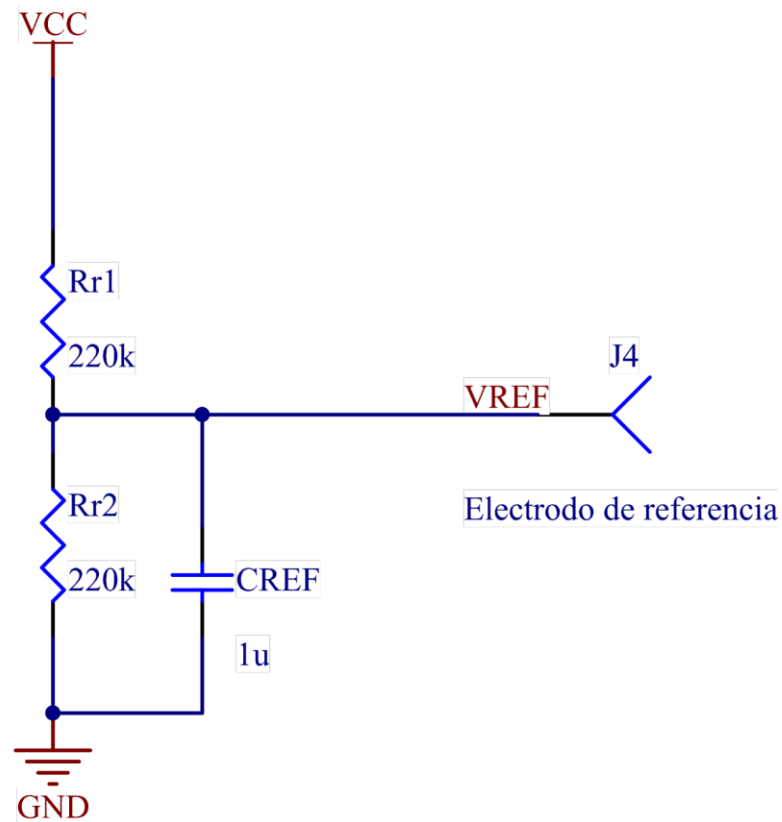
Referencia de MC mediante un electrodo extra necesaria para:

- Asegurar una tensión dentro del rango (GND-VCC) para cada entrada del amplificador
- Asegurar un camino de continua para la corrientes de polarización de cada entrada del amplificador
- Reducir interferencia electromagnética (EMI) de MC

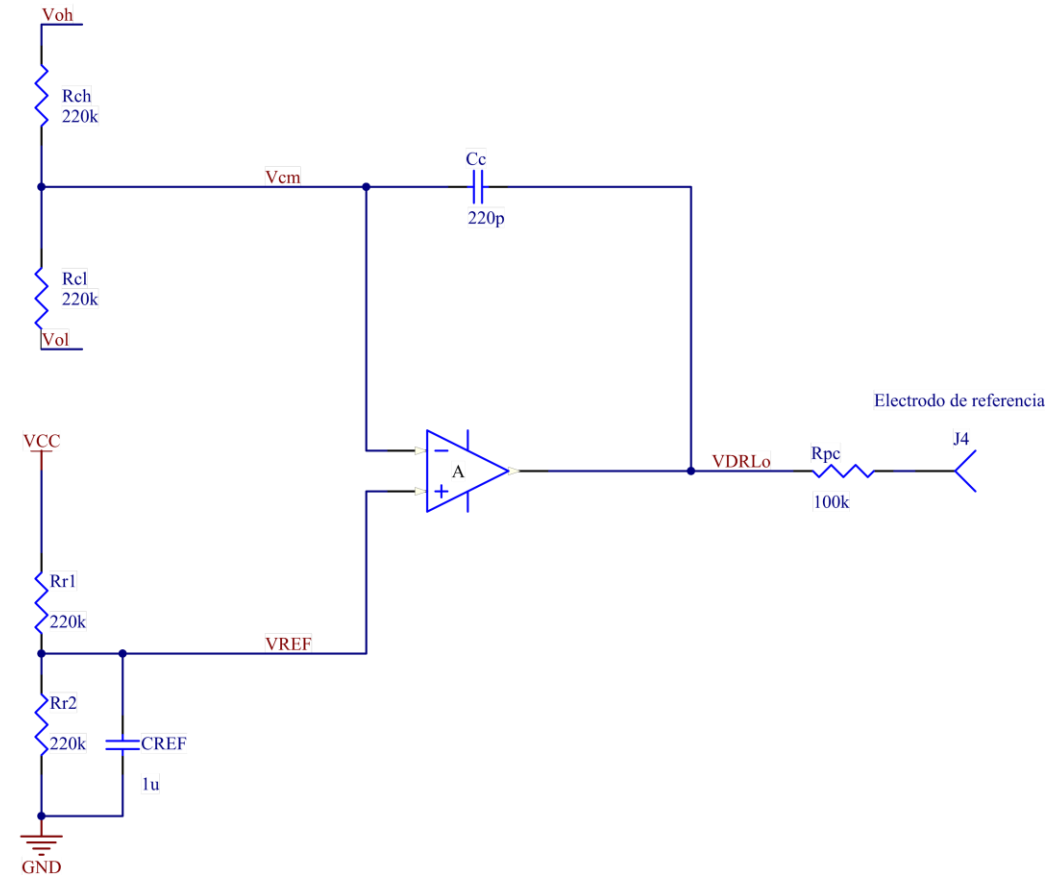


REFERENCIA DE MODO COMÚN

1- Conexión directa a VREF



2- Circuito de realimentación negativa del modo común (DRL)



REFERENCIA DE MODO COMÚN

1- Conexión directa a VREF:

Menos componentes

Menor consumo

Menor tamaño

Intrínsecamente Estable

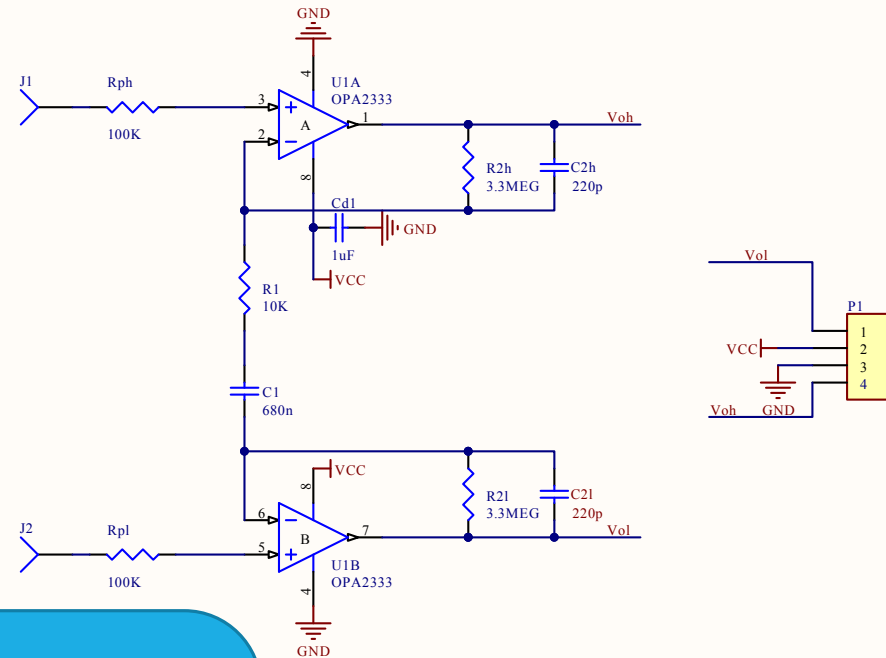
Solución típicamente usada en equipos pequeños, inalámbricos y alimentados a batería

2- Circuito de realimentación negativa del modo común (DRL):

Mayor rechazo de EMI

Solución típicamente usada en equipos grandes, con múltiples canales, conectados por cable a computadoras y/o alimentados por fuentes conectadas a la red eléctrica

PROTOTIPO (ARMADO DE UN DISEÑO DE REFERENCIA)



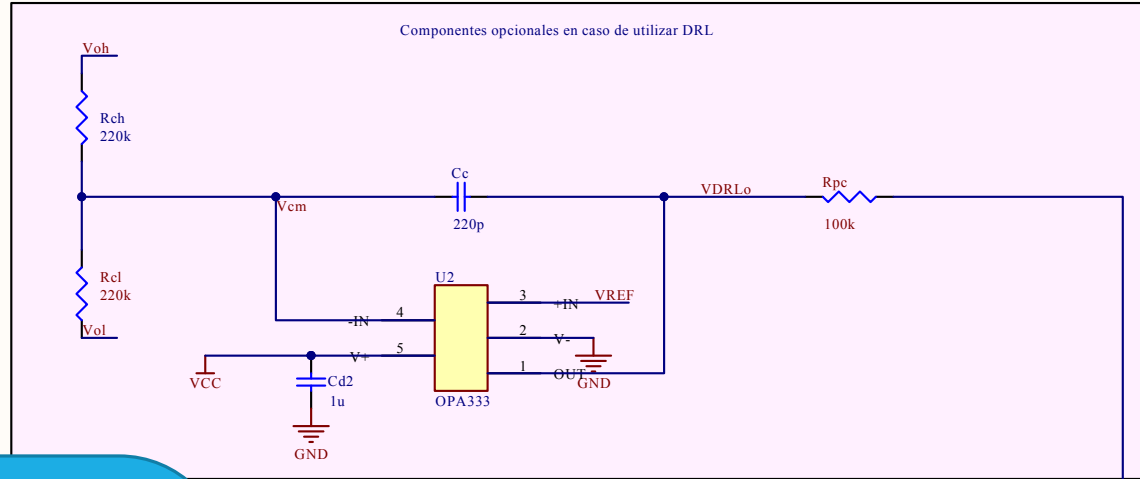
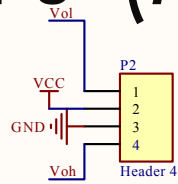
Sección amplificador

Incluye:

- capacitor de desacople de alimentación
- Resistores de limitación de corriente de electrodo
- Header para conexión de cable plano

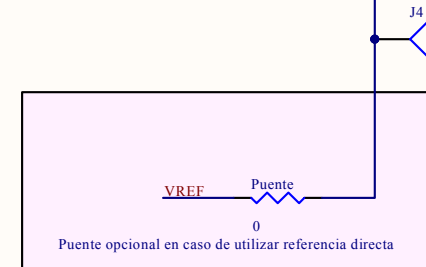
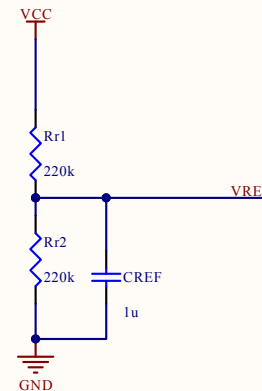
Title		
Amplificador de EMG completamente diferencial		
Size	Number	Revision
A4		1.0
Date:	26/02/2019	Sheet of
File:	D:\Dropbox\...Sheet1.SchDoc	Drawn By:

PROTOTIPO (ARMADO DE UN DISEÑO DE REFERENCIA)

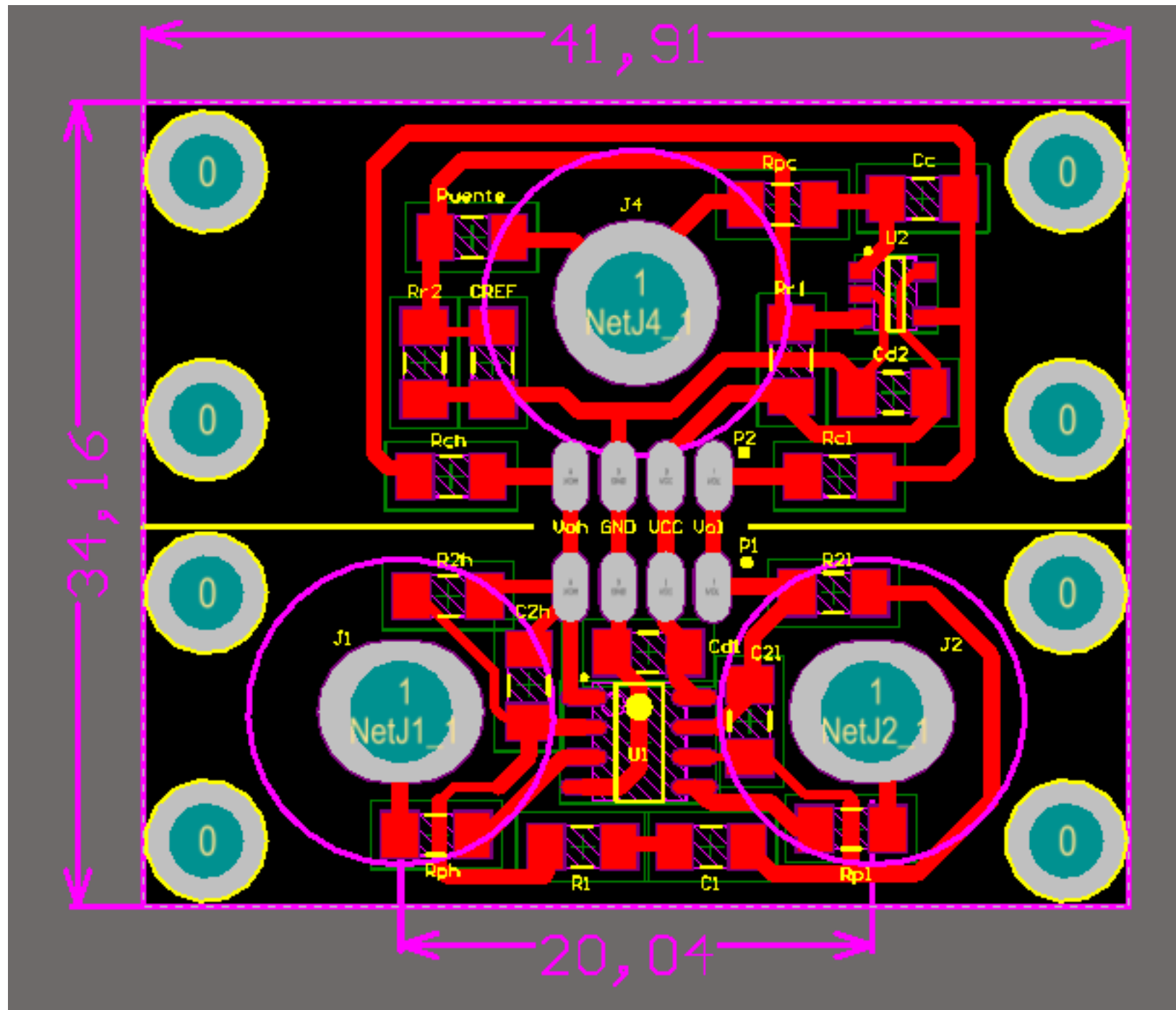


Sección referencia de modo común
Incluye:

- capacitor de desacople de alimentación
- Armado opcional de DRL o conexión directa a VREF
- Header para conexión de cable plano

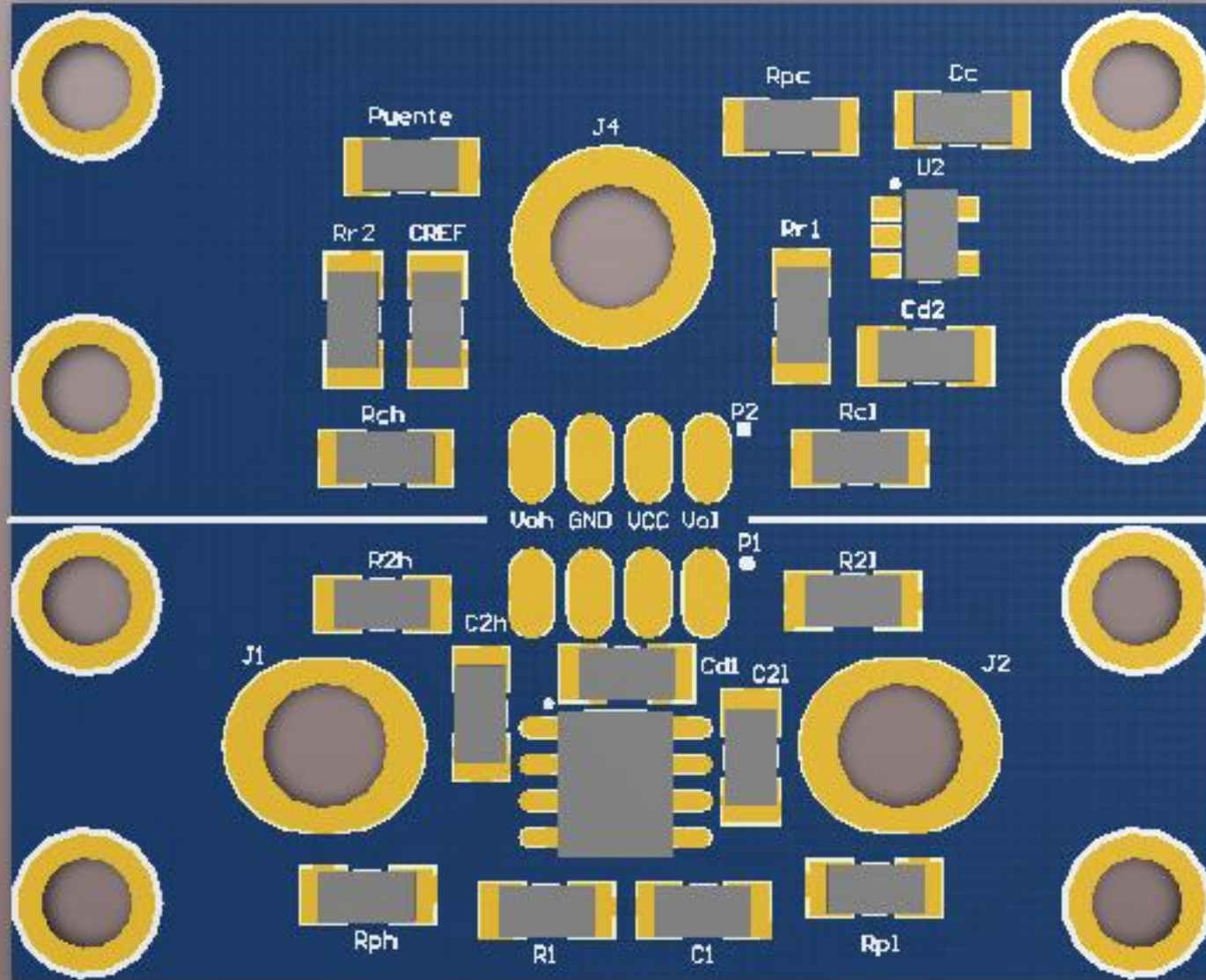


Title Electrodo de referencia		
Size A4	Number	Revision 1.0
Date: 27/02/2019	Sheet of	
File: D:\Dropbox\...\Sheet2.SchDoc	Drawn By:	



Circuito Impreso

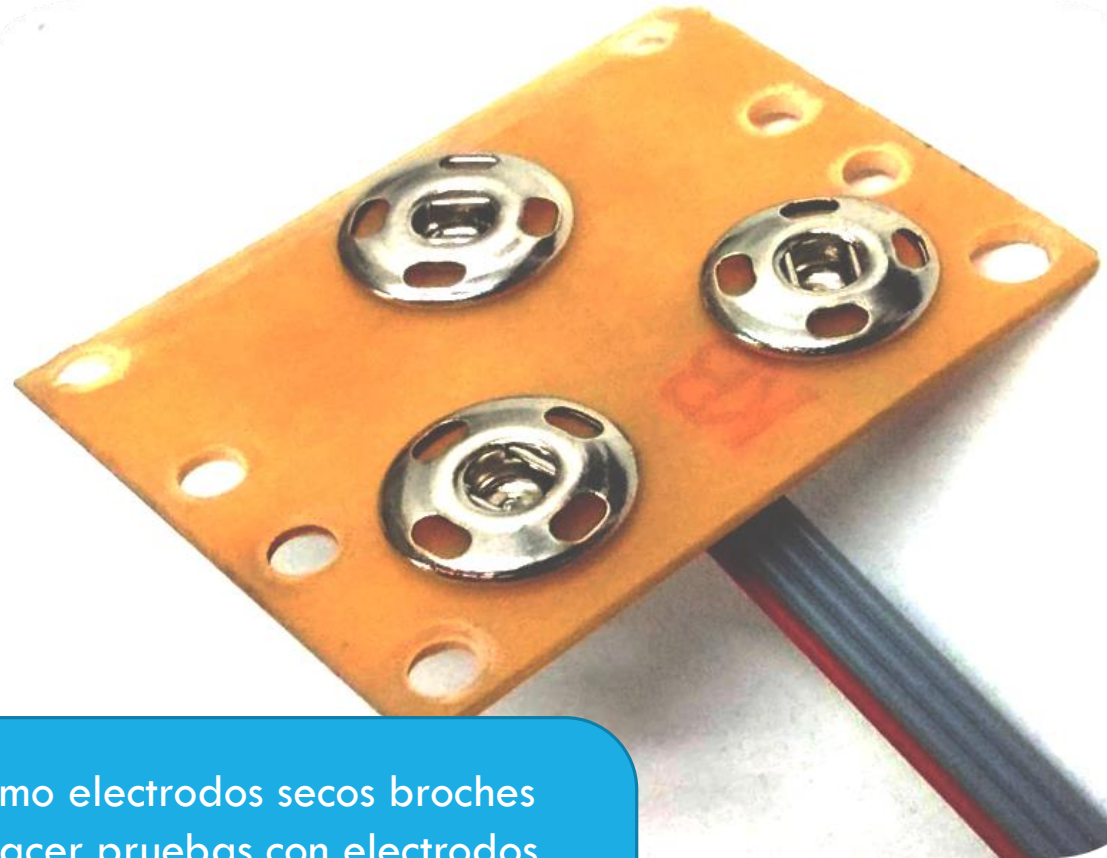
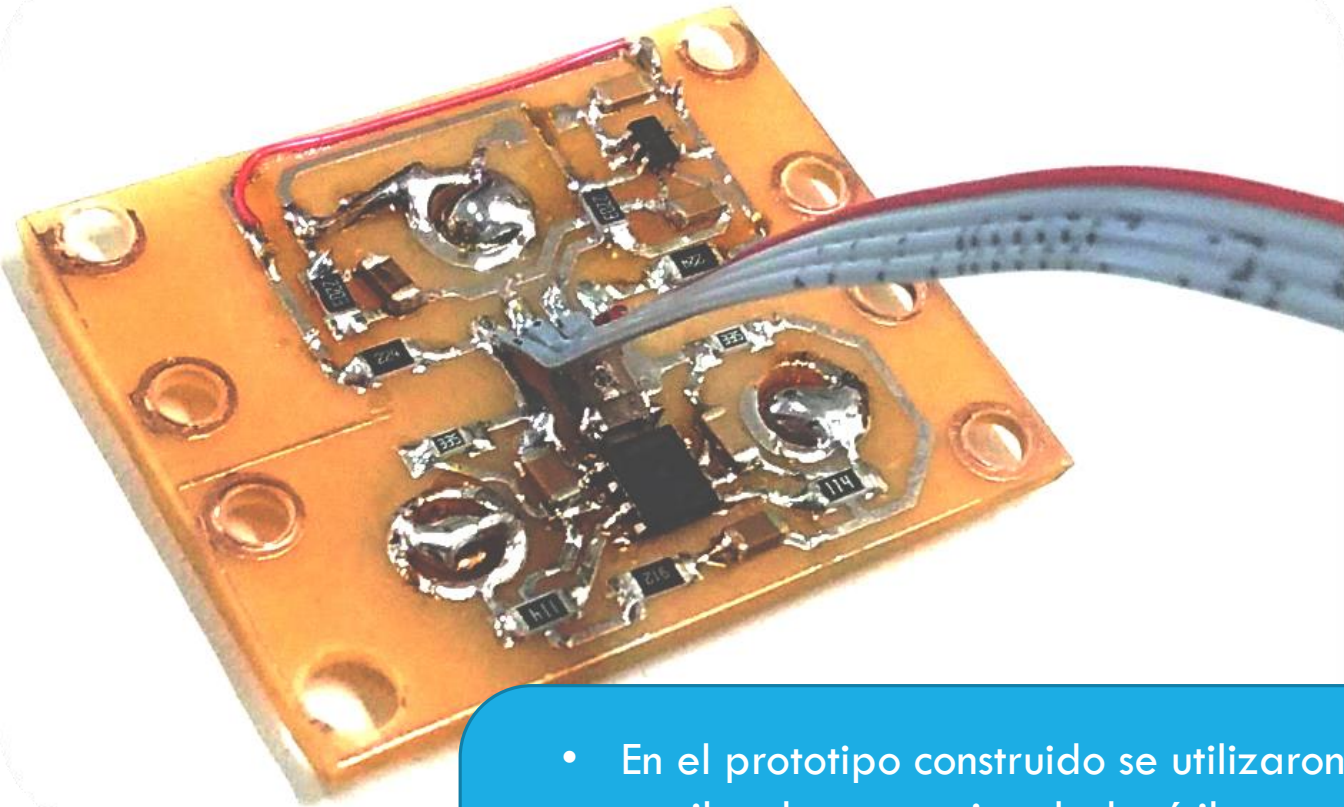
- Simple faz
- Secciones de amplificación y referencia de MC separables
- Orificios para tornillos de fijación
- Orificios para piezas metálicas que oficien de electrodos
- Componentes de montaje superficial con encapsulados de fácil manipulación (SOIC/SOT23-5/1206)



Circuito Impreso

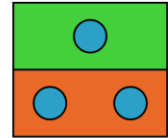
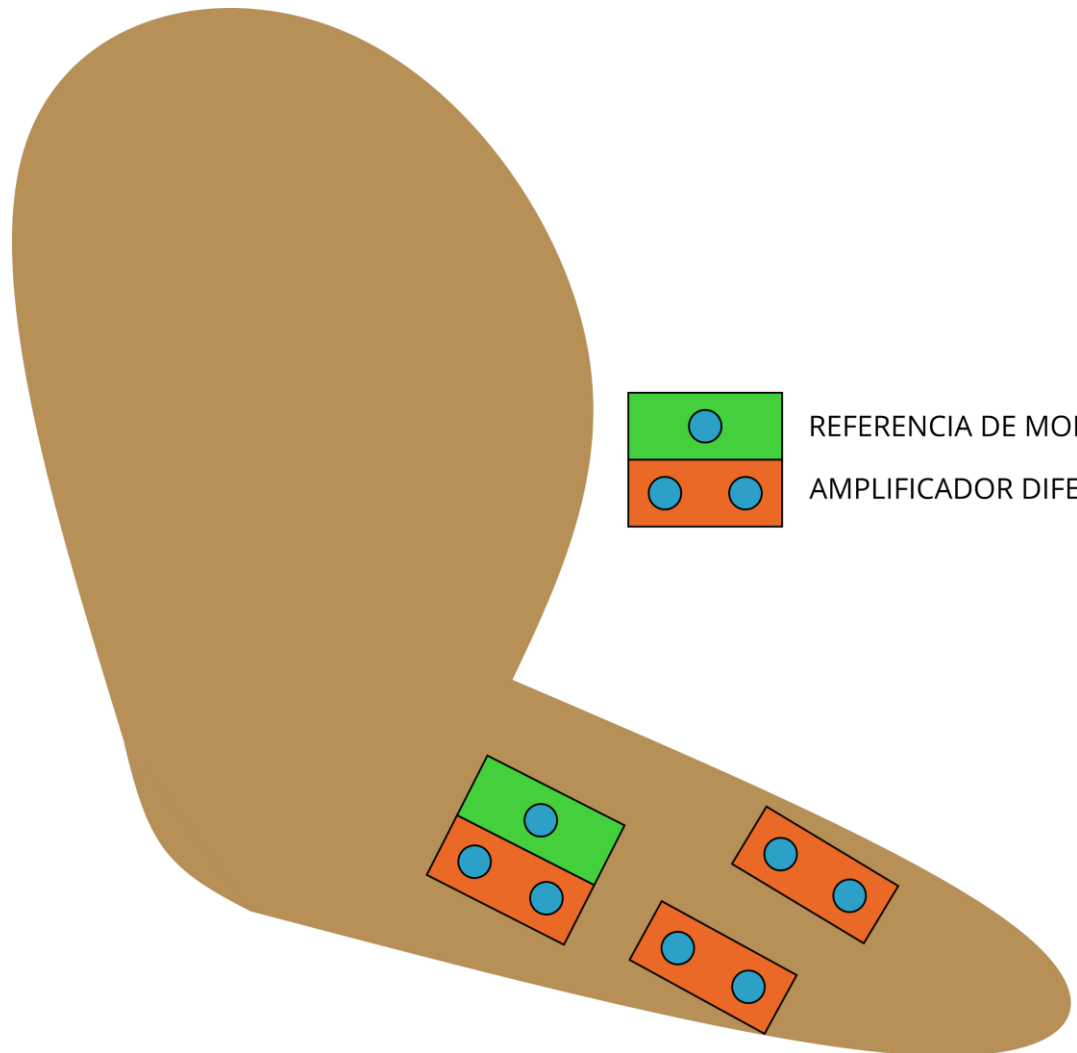
- Simple faz
- Secciones de amplificación y referencia de MC separables
- Orificios para tornillos de fijación
- Orificios para piezas metálicas que oficien de electrodos
- Componentes de montaje superficial con encapsulados de fácil manipulación (SOIC/SOT23-5/1206)

PROTOTIPO (ARMADO DE UN DISEÑO DE REFERENCIA)



- En el prototipo construido se utilizaron como electrodos secos broches textiles de acero niquelado, útiles para hacer pruebas con electrodos descartables. Los mismos pueden ser reemplazados por piezas de otros materiales con recubrimientos más adecuado.
- Por falta de disponibilidad de resistores de $10\text{ k}\Omega$ se usó $R1=9,1\text{ k}\Omega$, haciendo $GDD = 726$ y $f_{HP} = 25,6\text{ Hz}$

USO DE MÚLTIPLES CANALES

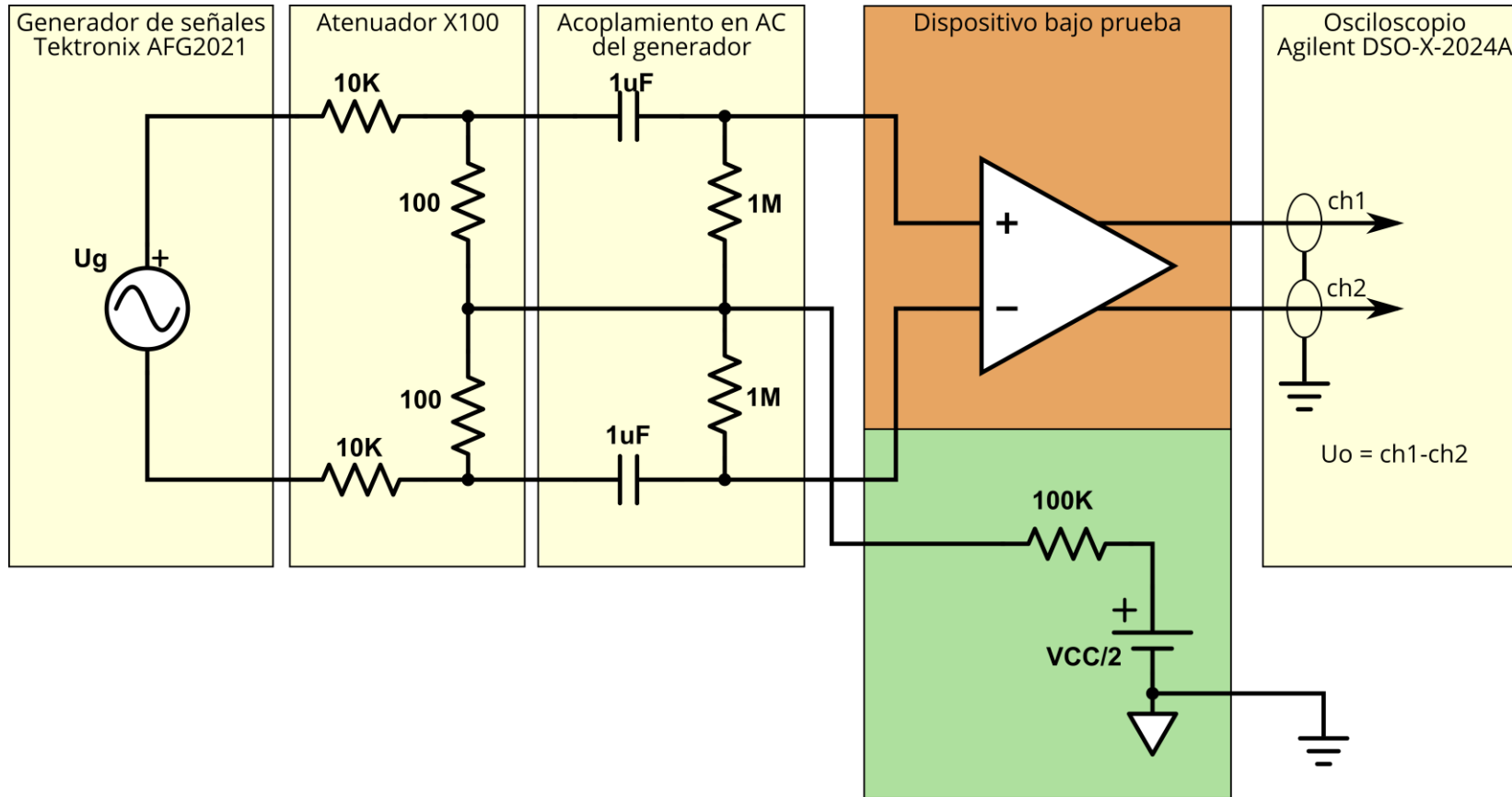


REFERENCIA DE MODO COMÚN

AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO

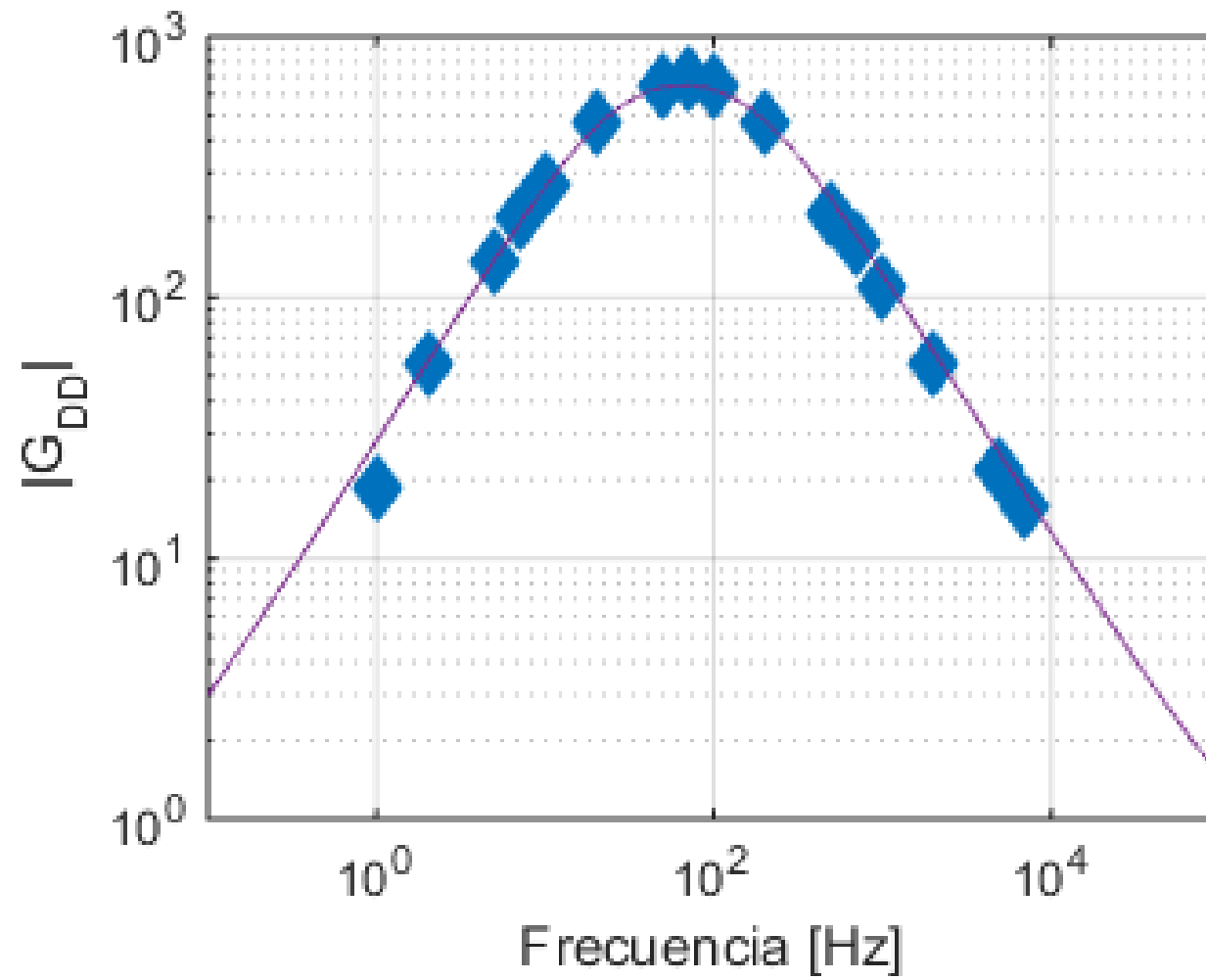
Respuesta en frecuencia



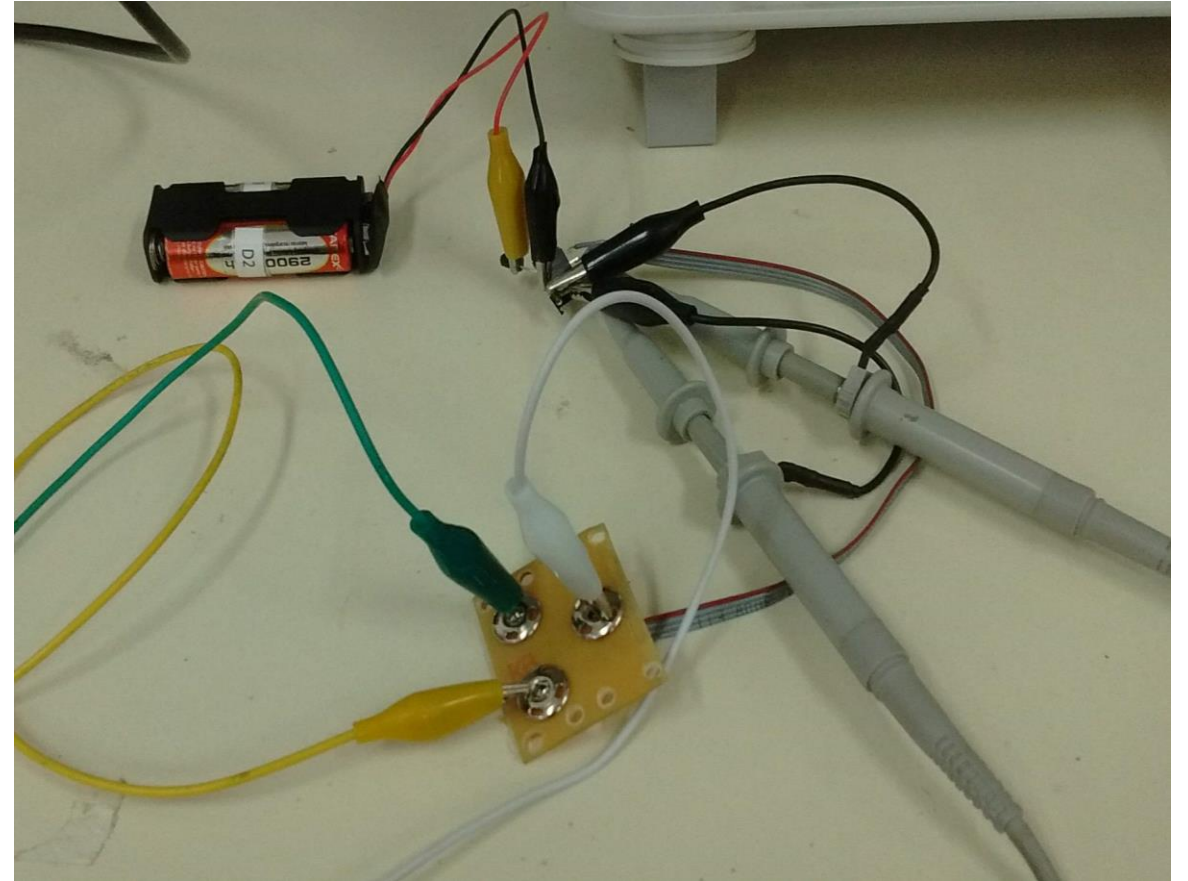
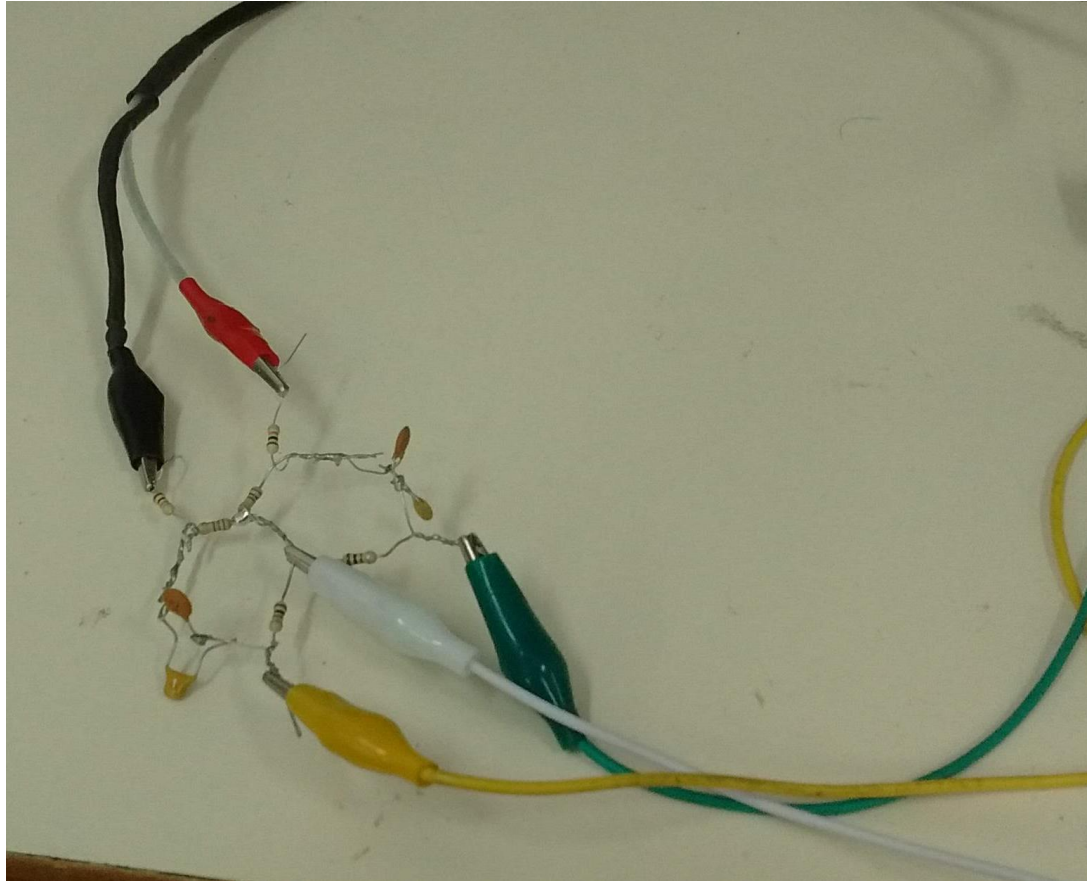
$$|G_{DD}| = \frac{|U_o|}{|U_g|} \times 100$$

CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO

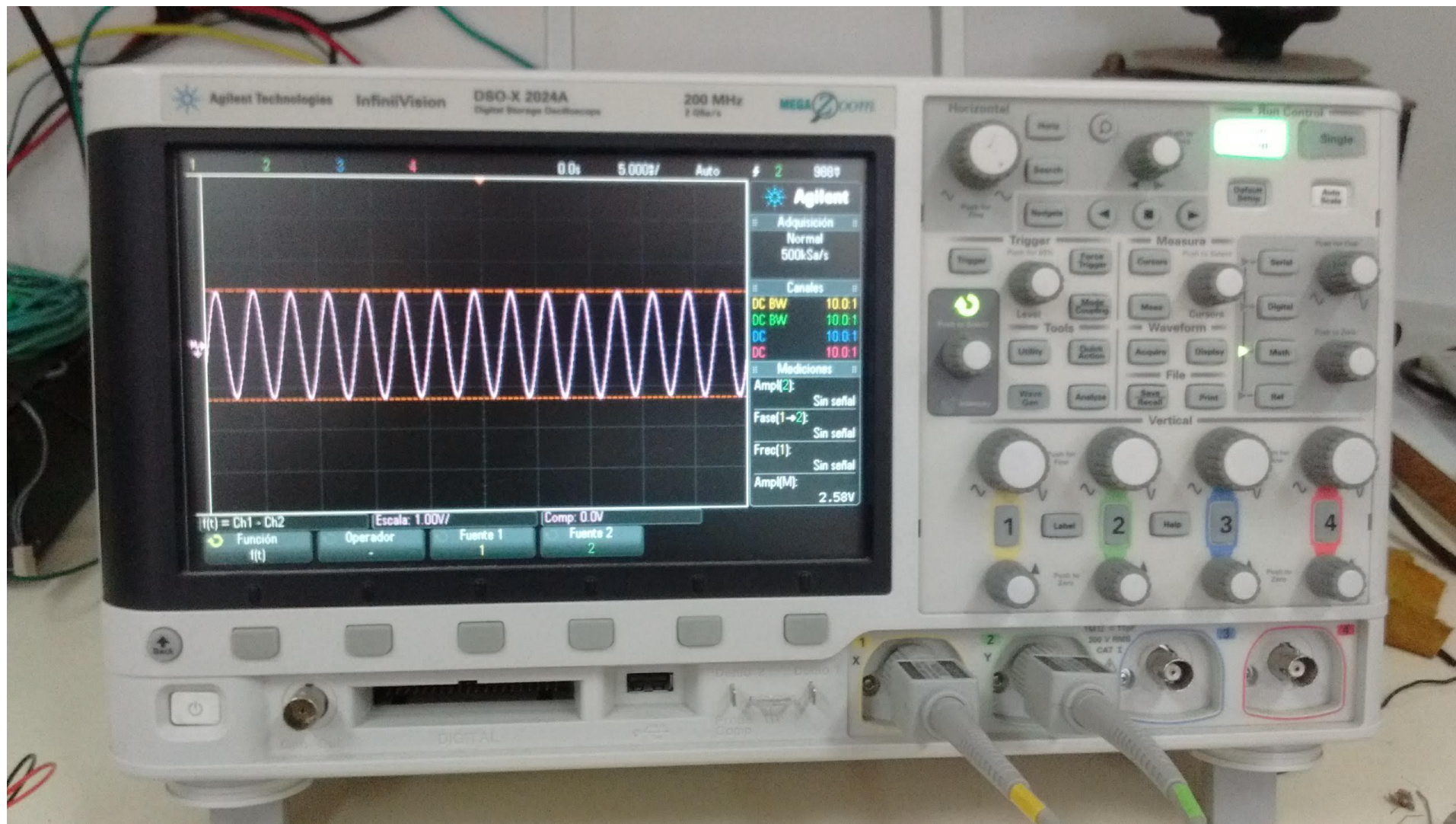
Respuesta en frecuencia



CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO

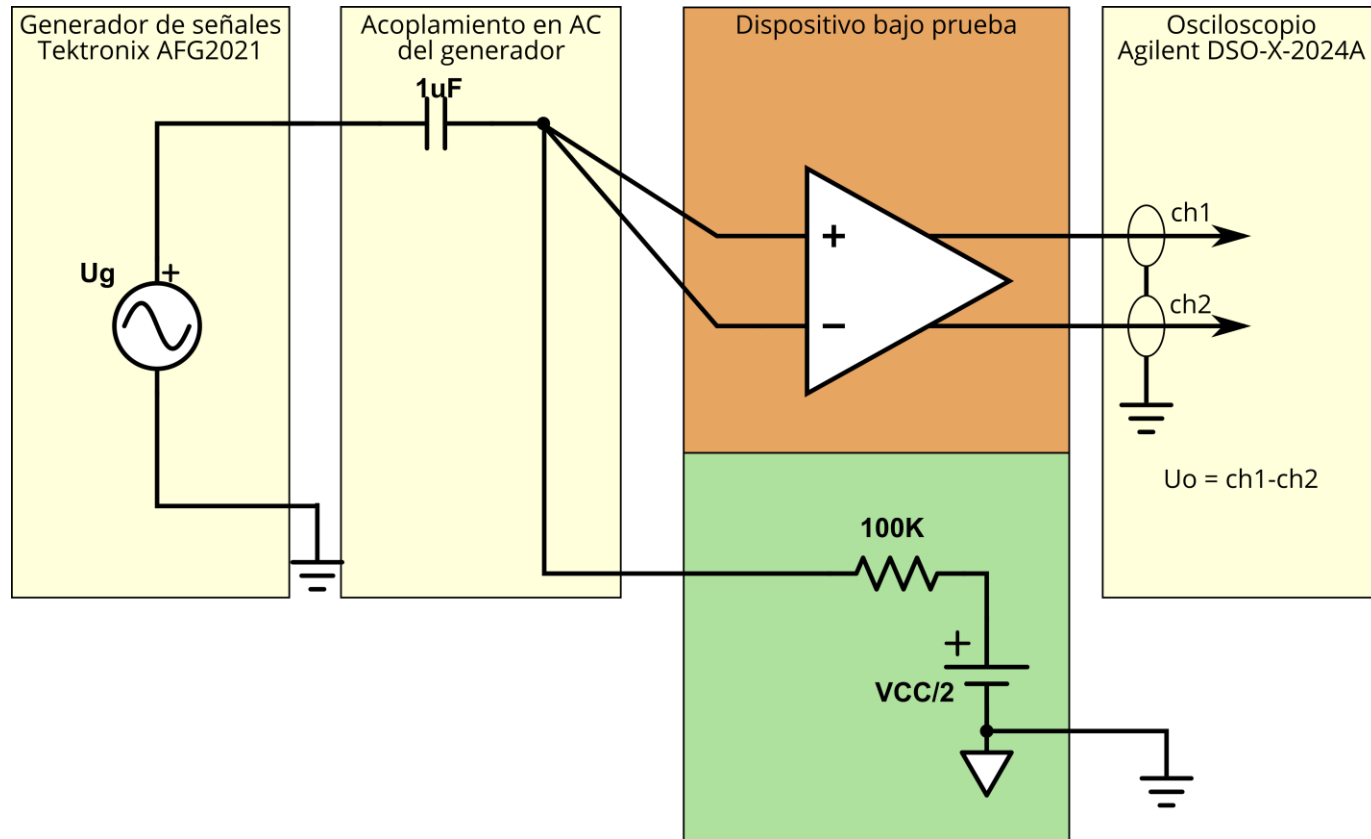


CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO



CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO

Rechazo de modo común

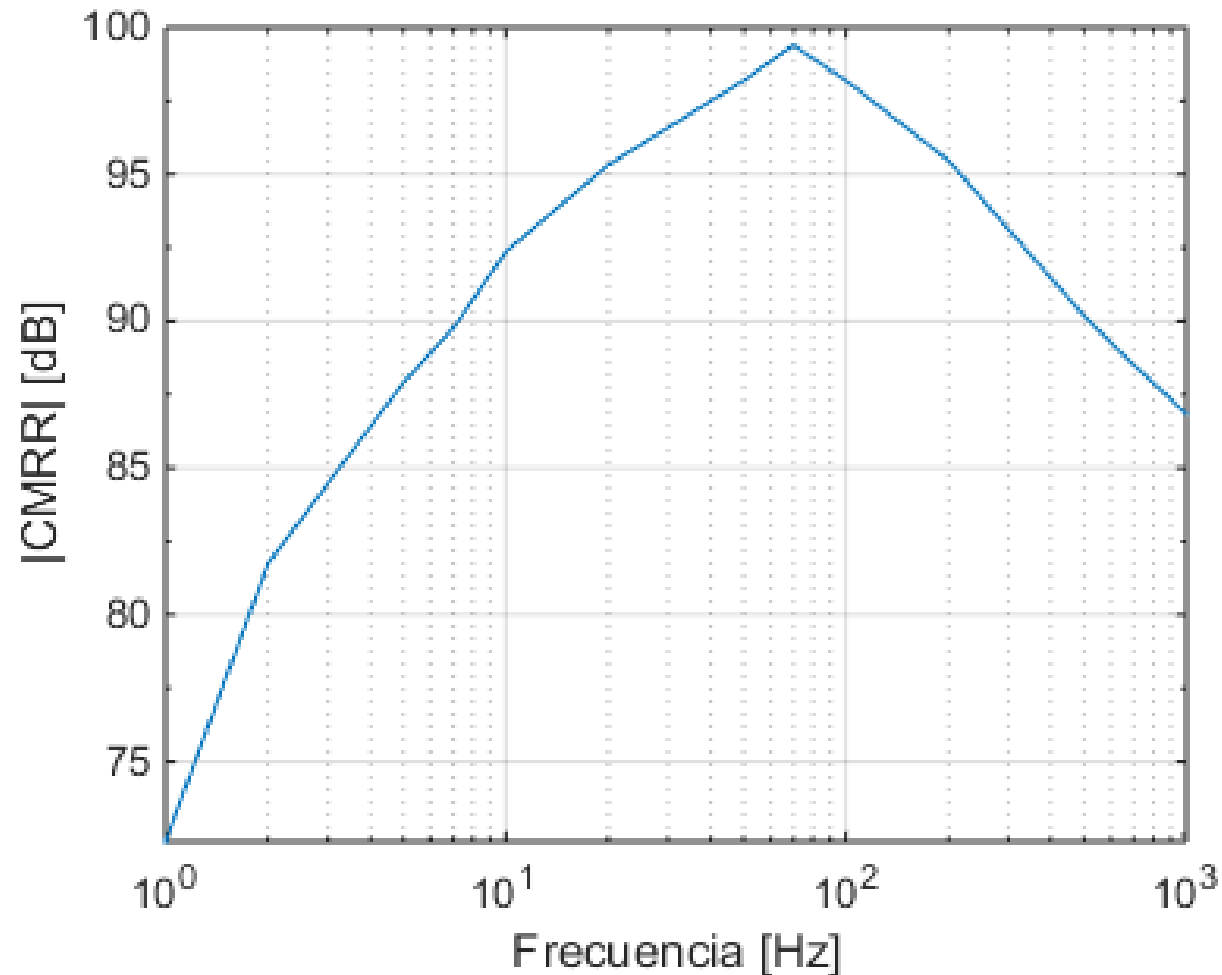


$$|G_{DC}| = \frac{|U_o|}{|U_g|}$$

$$CMRR_{[dB]} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{|G_{DD}|}{|G_{DC}|} \right)$$

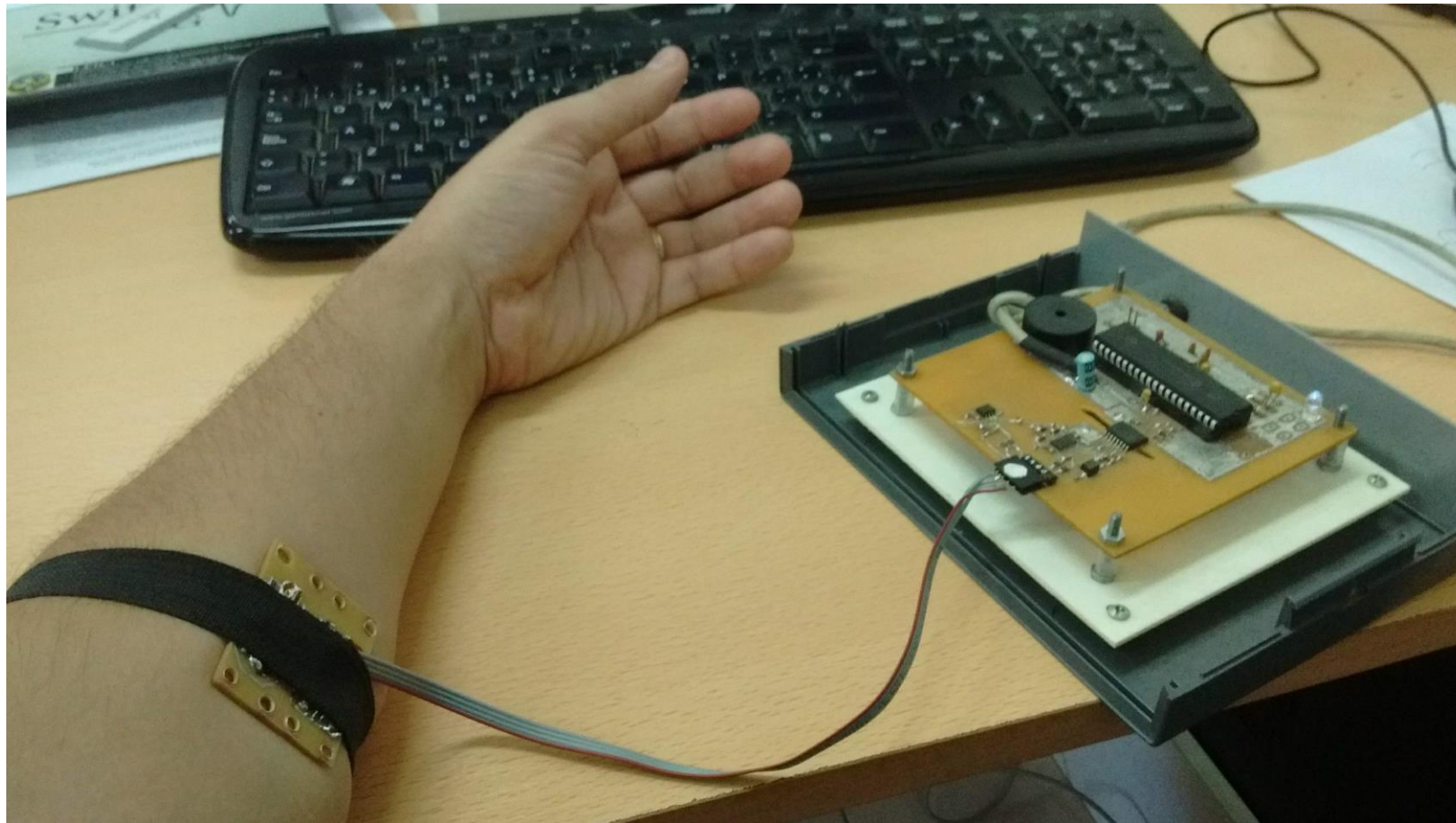
CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO

Rechazo de modo común



CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO

Adquisición de señales de EMG superficiales



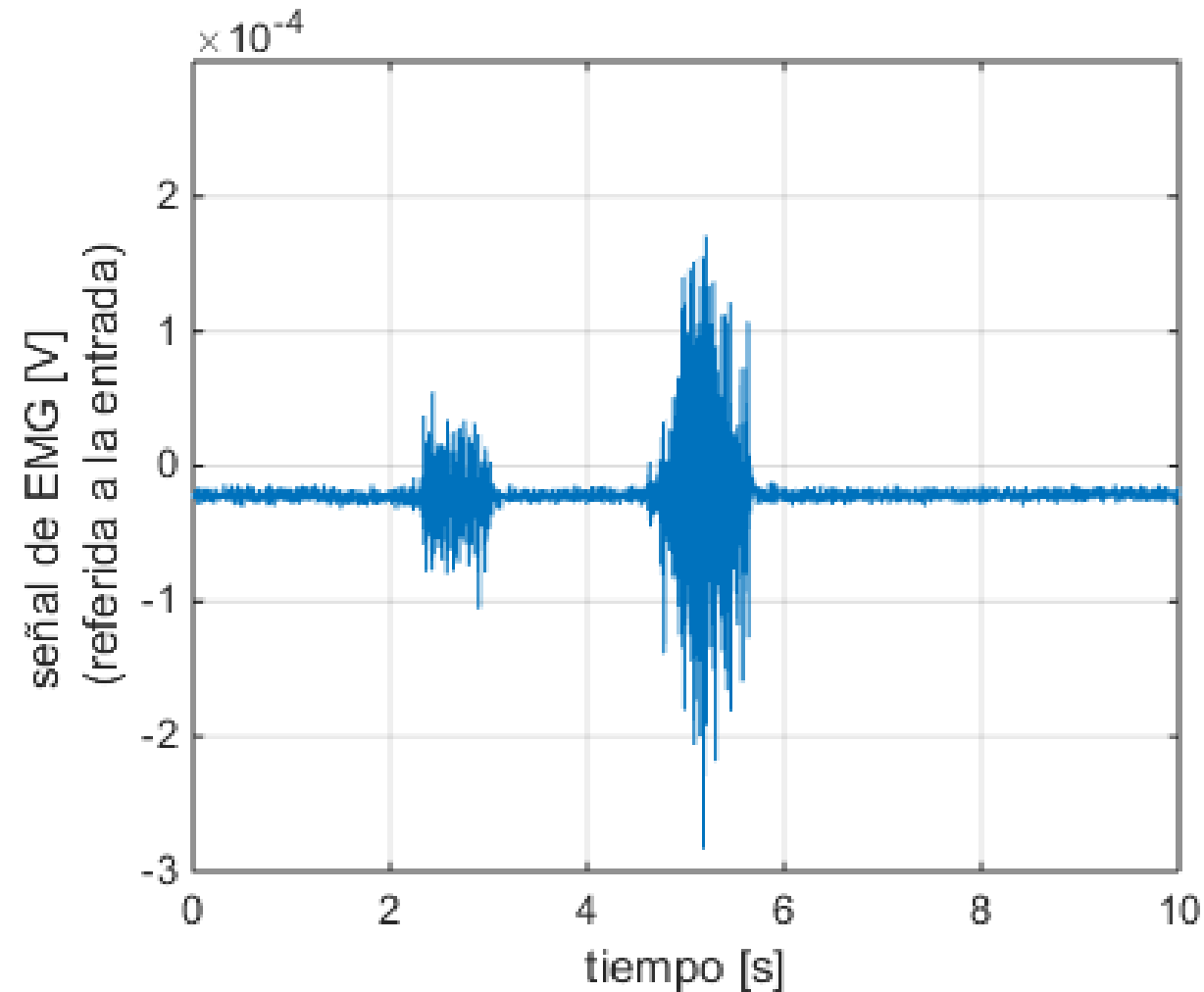
CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO

Adquisición de señales de EMG superficiales



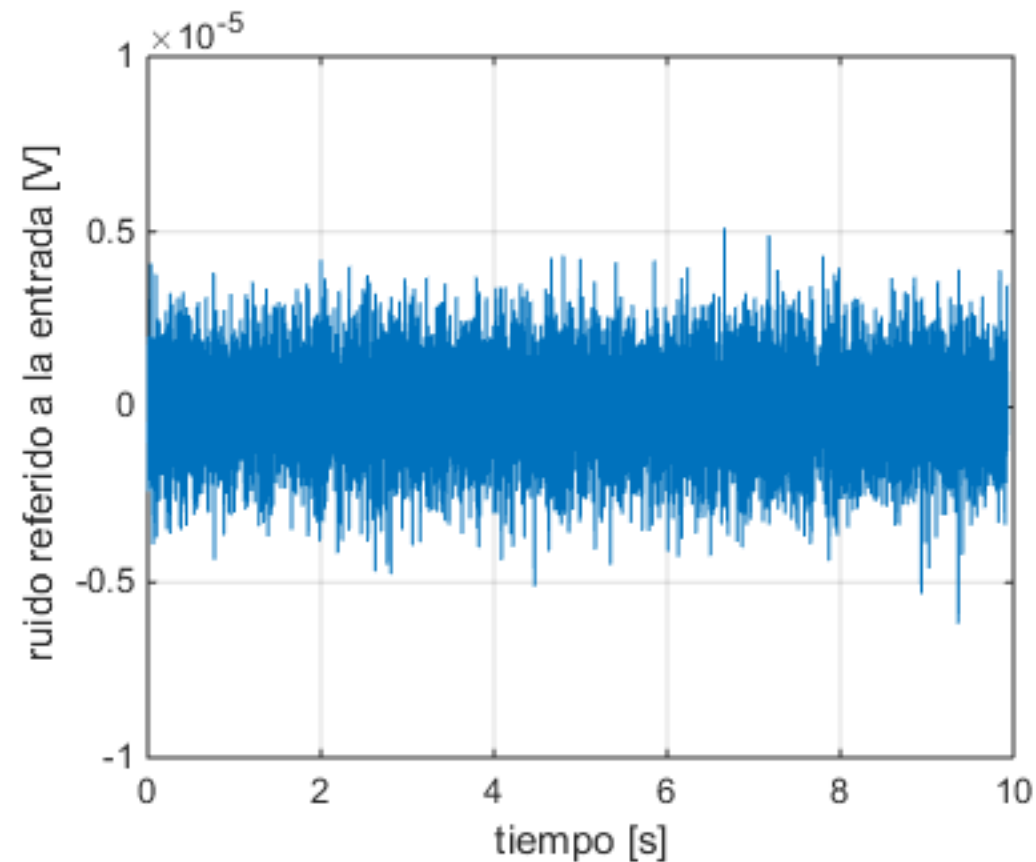
CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO

Adquisición de señales de EMG superficiales



CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO

Ruido referido a la entrada



Ruido interno medido
contocircuitando los dos
electrodos de medida con el
de referencia

- $1,35 \mu V_{RMS}$
- $11,3 \mu V_{PP}$

CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO

Consumo de corriente



Consumo de corriente medido con multímetro en modo amperímetro, en serie con la fuente de alimentación de 2,4 V (2 pilas recargables de 1,2V). Con los dos electodos de medida y el de referencia en cortocircuito

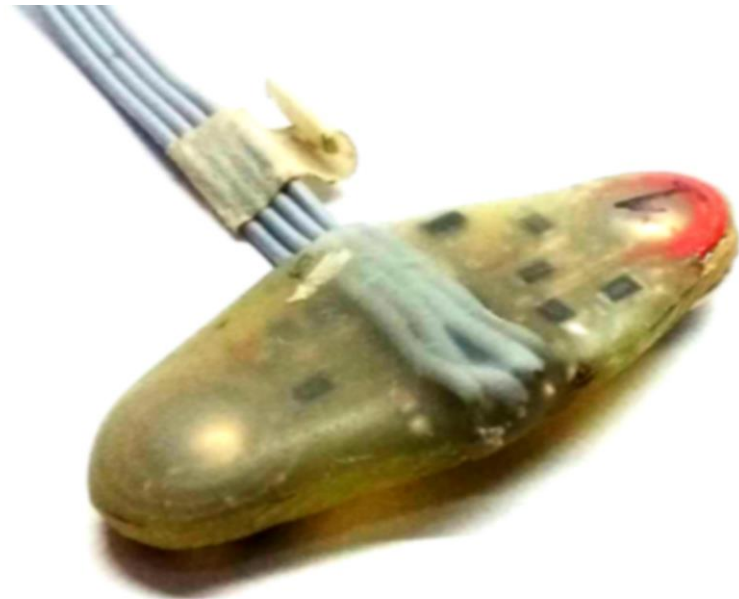
- $40\mu\text{A}$

CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD ELÉCTRICA

AISLACIÓN

Los electrodos deben ser la única parte del circuito en contacto directo con la piel del usuario. Esto aplica no solo a la electrónica de acondicionamiento de señal, sino también al resto del sistema (microcontrolador, actuadores, etc.).

Se recomienda encapsular el sensor con algún material que exponga solo los electrodos.



CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD ELÉCTRICA

La norma de seguridad eléctrica IEC 60601-1 establece límites para las corrientes que pueden circular entre el usuario y un equipo electro-médico, tanto en **operación normal (10 μA)** como en **condición de una primera falla (50 μA)**.

En caso de operación normal, las altas impedancias de entrada de los amplificadores de tecnología FET o CMOS limitan la circulación de corriente, siendo la corriente de polarización de los mismos de algún pA hasta cientos de pA. La suma de las corrientes de polarización de cada electrodo será provista por el electrodo de referencia.

CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD ELÉCTRICA

Posibles fallas, aunque poco probables son que alguna de las entradas de los amplificadores se cortocircuite internamente con la fuente de alimentación, conectando directamente al usuario a dicho potencial.

Para limitar las corrientes que podrían circular en estos casos basta con incluir una impedancia limitadora en el electrodo de referencia.

- En el circuito de referencia se corresponde con el paralelo entre R_{r1} y R_{r2} en el caso de conexión directa a V_{REF} , y con R_{pc} en caso de utilizar el DRL.
- Si se desea limitar la corriente ante una segunda falla pueden incluirse en el circuito los resistores R_{ph} y R_{pl} en serie con cada electrodo. Esto último tiene como desventaja un incremento en el nivel de ruido.
- La utilización de resistores de 100 k con tensiones de alimentación máximas de 3 V, limita las corrientes que circularan por el usuario en caso de una primera falla a 30 μA .

Para cumplir la norma (con resistores de limitación de 100 k) debe asegurarse que la tensión de alimentación NUNCA supere los 5 V