



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE
EL5202-2 LABORATORIO DE SISTEMAS DIGITALES

Informe Módulo 2

Adquisición de señal

Integrantes: Diego Campanini
Eduardo Hormazábal
Profesor: Helmuth Thiemer
Auxiliar: Carlos Navarro
Ayudante: Rodrigo Maureira
Fecha: 27 de octubre de 2015

Índice

1. Introducción	3
2. Circuito de adaptación de la señal	4
2.1. Diseño del circuito	4
2.1.1. Circuito Amplificador de entrada	4
2.1.2. Filtro pasa banda	5
2.1.3. Filtro rechaza banda	6
2.1.4. Amplificación final	7
2.1.5. Offset agregado	8
2.2. Simulaciones circuito de adaptación de la señal	9
2.2.1. Simulación señal de entrada	9
2.2.2. Simulación bloques circuito	9
2.3. Construcción del circuito	11
2.3.1. Circuito Amplificador de entrada	11
2.3.2. Filtro pasa banda	11
2.3.3. Filtro rechaza banda	13
2.3.4. Amplificación final	14
2.3.5. Offset agregado	15
3. Conversión A/D	17
4. Conclusión	18

Índice de figuras

1.	Circuito amplificador diferencial	5
2.	Circuito filtro pasa banda Sallen-Key de segundo orden	6
3.	Circuito filtro rechaza banda	7
4.	Circuito de amplificación de la señal de salida	8
5.	Circuito sumador inversor para el offset.	8
6.	Señales de entrada al circuito	9
7.	Voltajes de salida de los 4 bloques principales	10
8.	Diagrama de Bode de los tres bloques finales del circuito de adaptación de la señal de entrada	10
9.	Salida del bloque de amplificación para una entrada sinusoidal de $V_{pp} = 10[mV]$ y $250[Hz]$.	11
10.	Salida del bloque de filtrado pasa banda para una entrada sinusoidal de $V_{pp} = 10[mV]$ y $250[Hz]$	12
11.	Salida del bloque de filtrado pasa banda para una entrada sinusoidal de $V_{pp} = 10[mV]$ y $1[kHz]$	13
12.	Salida del bloque rechaza banda para una entrada sinusoidal de $V_{pp} = 10[mV]$ y $50[Hz]$.	14
13.	Salida del bloque de amplificación final para una entrada sinusoidal de $V_{pp} = 10[mV]$ y $250[Hz]$	15
14.	Salida del bloque del offset agregado para una medida por los electrodos.	16

Índice de códigos

1.	Conversión A/D con Arduino mediante librería de Matlab	17
2.	Conversión A/D y envío por SPI en Arduino	17

1. Introducción

El sensor utilizado para adquirir la señal corresponderá a un grupo de tres electrodos, uno de los cuales será la referencia a tierra con respecto a los otros dos. Es necesario que los electrodos estén relativamente cercanos para que el ruido se logre cancelar con facilidad mediante el amplificador diferencial.

Las señales biológicas con las que se trabajará serán del orden de 1 a 10 mV y de una frecuencia de entre 10 a 500 Hz, estas serán adquiridas desde dos músculos ubicados en el antebrazo, los cuales son el Flexor Carpi Ulnaris y el Extensor Carpi Radialis.

Para acondicionar la señal se utiliza un circuito en base a Op-amps, el cual aparece reiteradas veces en la literatura. El primer bloque amplifica diferencialmente la señal, luego se aplica un filtro pasa banda de segundo orden tipo Sallen-Key para eliminar parte del ruido circundante, el cual proviene desde el cambio de potencial en células vecinas a los músculos que se desean medir su potencial, el tercer bloque será un filtro rechaza banda a 50 Hz para eliminar los efectos de la red y finalmente se efectuará una amplificación.

Luego se procede a digitalizar la señal con el fin de obtener un muestreo de ésta y que se puedan realizar operaciones mediante un procesador digital de señales. Para ello se utiliza el conversor análogo-digital interno del Arduino.

2. Circuito de adaptación de la señal

2.1. Diseño del circuito

En esta sección se explica el diseño teórico del circuito de adaptación de la señal proveniente de los electrodos, en donde se explican las etapas de amplificación y filtrados tanto pasa-banda como rechaza-banda.

2.1.1. Circuito Amplificador de entrada

Las señales de entrada al circuito serán del orden de 1 a 10 mV pico-pico, es por esto que resulta necesario una primera etapa de amplificación de las señales. El circuito propuesto actúa como un amplificador diferencial de las señales de entrada y además atenúa el ruido común a ambas, proporcionando una alta tasa de rechazo al modo común (CMRR por sus siglas en inglés).

El circuito amplificador se basa en la estructura interna del amplificador INA 121, el cuál tiene como una de sus aplicaciones principales la amplificación de señales fisiológica. Los Op-amp utilizados en todos los bloques serán los de la familia TL072.

Para implementar la amplificación se utilizarán tres Op-amp TL072, una resistencia $R1 = 10\text{ K}\Omega$, dos resistencias $R2 = 120\text{ K}\Omega$, una resistencia $R4 = 100\text{ K}\Omega$ y un potenciómetro de $100\text{ K}\Omega$ para controlar la ganancia. La cuál está dada por la siguiente función de transferencia:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \left(1 + \frac{2 \cdot R2}{R1}\right) \cdot \left(\frac{R4}{R3}\right) \quad (1)$$

La topología final del circuito amplificador se aprecia en la figura 1, en la cual las señales de entrada son V_{in} (proveniente desde 1 electrodo) y la conexión a tierra. Usualmente las dos entradas al circuito son las que se adquieren con los dos electrodos, pero eso implicaría, que con dos electrodos se obtendría sólo una señal y en este caso se necesitan obtener dos señales con dos electrodos, por esta razón la diferencia se calcula con respecto a tierra. Mencionar que la tierra se obtiene con un tercer electrodo que se puede ubicar en el codo, y además se utilizan resistencias conectadas entre las entradas y tierra para compensar la baja impedancia de las mediciones.

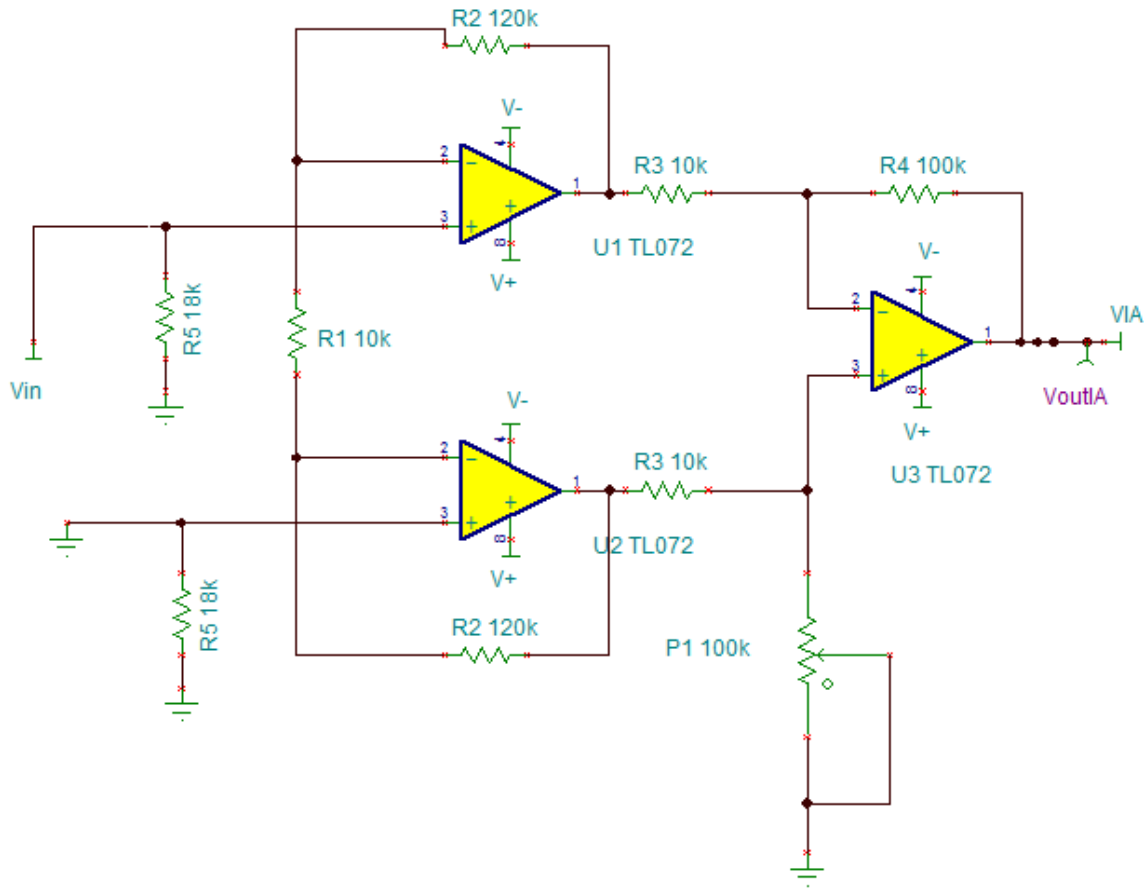


Figura 1: Circuito amplificador diferencial

2.1.2. Filtro pasa banda

El filtro pasa banda que se utilizará es del tipo Sallen-Key de segundo orden, la banda de frecuencia será entre 0.04 Hz y 500 Hz, de esta forma se abarca el rango de las señales fisiológicas. La arquitectura del circuito se presenta en la figura 2, los valores de los condensadores se fijaron en $C1 = 1 \mu F$ y $C2 = 0,1 \mu F$, luego considerando una ganancia deseada de 2 para los dos sub-bloques que forman este filtro, se procede a determinar los valores de los otros elementos del circuito por medio de las siguientes fórmulas:

$$f_l = 0,04 = \frac{1}{2\pi R5 \cdot C1} \quad (2)$$

$$f_h = 500 = \frac{1}{2\pi R8 \cdot C2} \quad (3)$$

$$G_l = 2 = 1 + \frac{R6}{R5} \quad (4)$$

$$G_h = 2 = 1 + \frac{R9}{R10} \quad (5)$$

Finalmente las resistencias a utilizar serán $R5 = 3,3 \text{ M}\Omega$, $R6 = R7 = 10 \text{ K}\Omega$, $R8 = 3,6 \text{ K}\Omega$, $R9 = R10 = 10 \text{ K}\Omega$. Mencionar que la entrada a este bloque corresponde a la salida de la etapa de amplificación anterior.

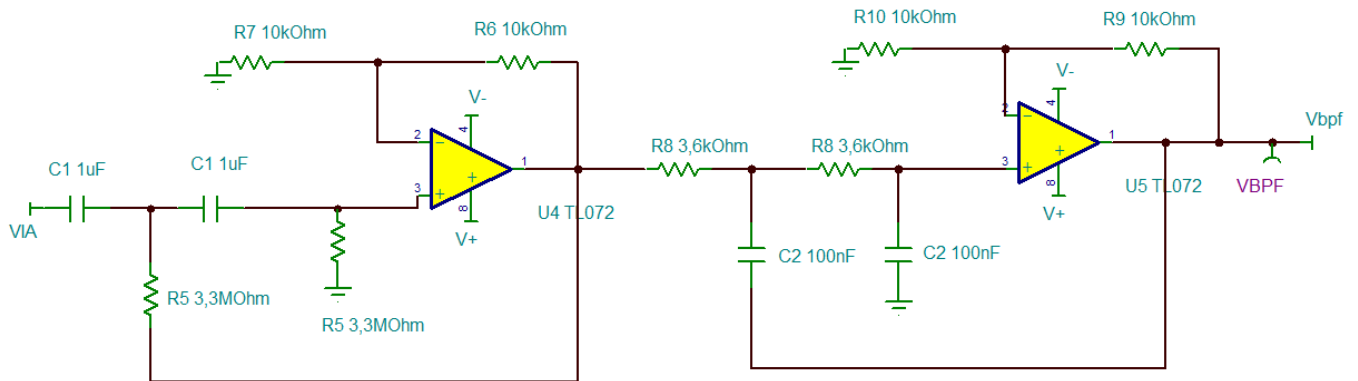


Figura 2: Circuito filtro pasa banda Sallen-Key de segundo orden

2.1.3. Filtro rechaza banda

Se implementará un filtro rechaza banda a 50 Hz, para evitar los efectos de la red eléctrica en la obtención de las señales. El circuito se aprecia en la figura 3, los valores de los componentes utilizados son $C3=270pF$, $C4=540pF$, $R11 = R12 = 6\text{ }M\Omega$ y un potenciómetro de $100\text{ }K\Omega$. Los valores antes señalados se calculan en base a las siguientes ecuaciones:

$$C3 = C4 = \frac{C5}{2} \quad (6)$$

$$R_{11} = 2 \cdot R_{12} \quad (7)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi C3 \cdot R11} \quad (8)$$

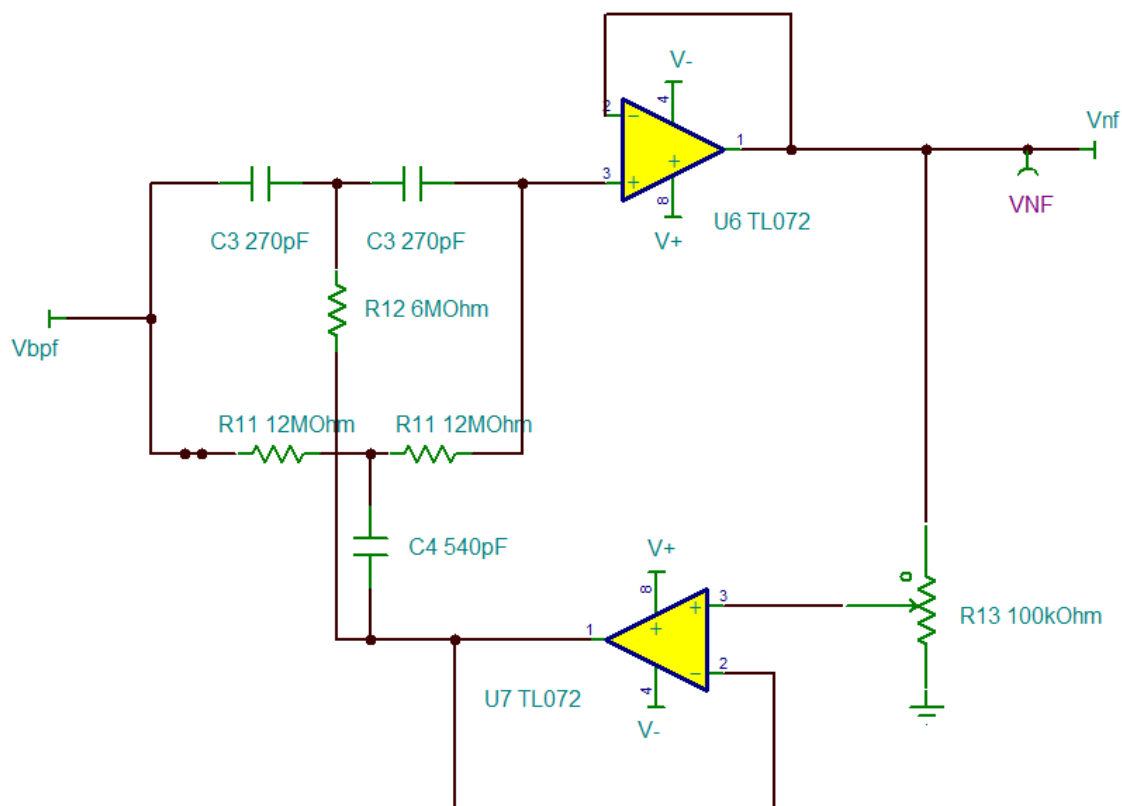


Figura 3: Circuito filtro rechaza banda

2.1.4. Amplificación final

El penúltimo bloque del circuito contempla una amplificación para obtener una amplitud apropiada de la señal que ingresará a la etapa de conversión análogo a digital. El circuito que realiza esta amplificación se muestra en la figura 4, para esto se utilizaron dos resistencias de $1\text{ K}\Omega$ y un potenciómetro de $100\text{ K}\Omega$ para ajustar la ganancia, luego la salida de este bloque V_{outFin} es la entrada de la etapa de conversión análogo a digital.

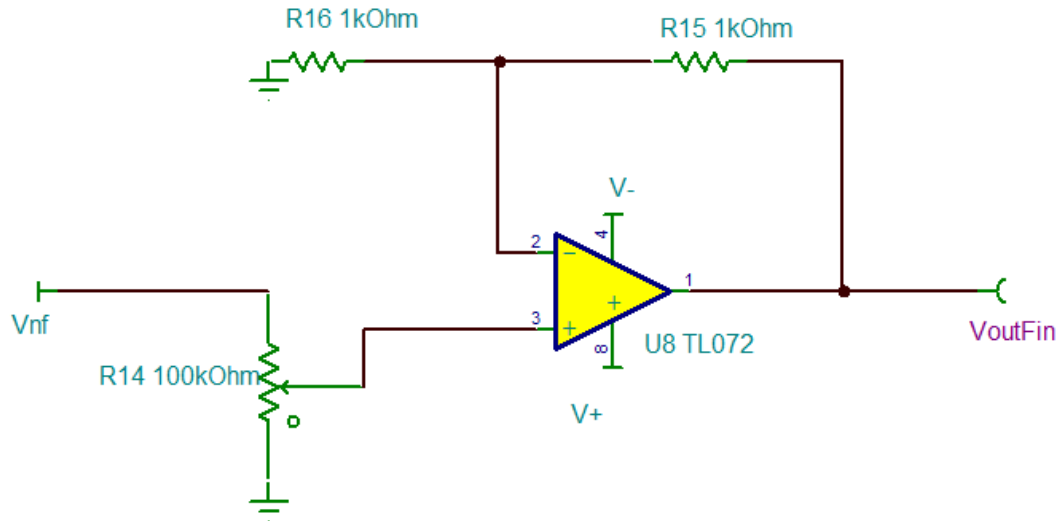


Figura 4: Circuito de amplificación de la señal de salida

2.1.5. Offset agregado

El último bloque del circuito corresponde a la suma de una componente continua al voltaje amplificado. Esto se debe a que el conversor análogo-digital puede procesar de forma correcta voltajes entre 0 y 5 [V], mientras que la salida del amplificador de la sección 2.1.4 está centrada en 0[V].

Para ello se utiliza un sumador inversor (ver Figura 5) en donde una de las entradas a sumar es la salida del amplificador final, y la otra es un voltaje continuo con un valor tal que no se obtengan voltajes negativos con las señales reales adquiridas con los electrodos.

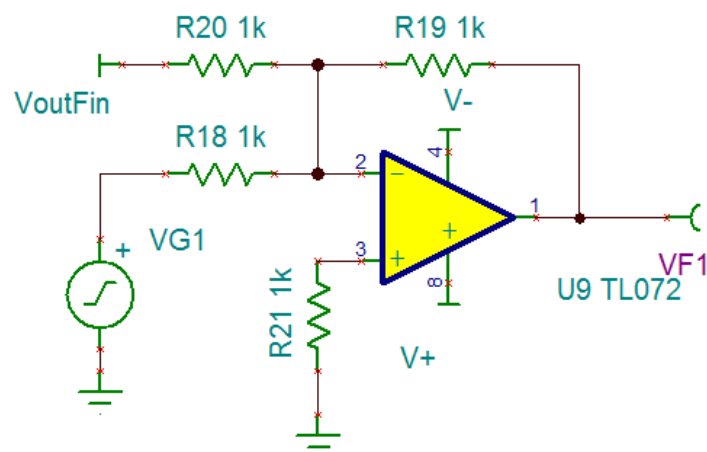


Figura 5: Circuito sumador inversor para el offset.

2.2. Simulaciones circuito de adaptación de la señal

2.2.1. Simulación señal de entrada

Para realizar las simulaciones del circuito se utilizó el *software* TINA. La alimentación de los Op-amp fue de $\pm 9V$ continuos y la señal de entrada se simuló mediante dos fuentes sinusoidales, una representando la señal fisiológica con frecuencia de 250 Hz y amplitud 10 mV_{pp} (figura 6) y la otra fuente simuló el ruido de la red mediante una senoide de 2 mV_{pp} a 50 Hz (figura 6).

Las entradas utilizadas no se asemejan a las que se obtendrán realmente con los electrodos, ya que, estas serán no estacionarias ni periódicas, además tendrán mucho más ruido que el simulado, sin embargo, se consideran las entradas antes mencionadas puesto que permiten observar el comportamiento de los bloques del circuito, fundamentalmente en lo que respecta a la amplificación de la señal y su el diagrama de Bode de los bloques.

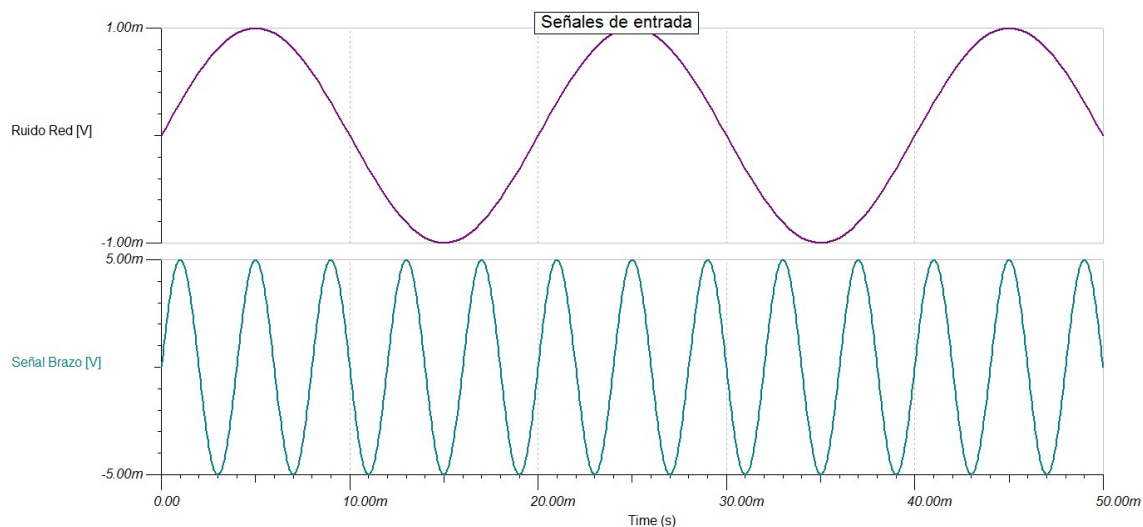


Figura 6: Señales de entrada al circuito

2.2.2. Simulación bloques circuito

Los resultados obtenidos en la simulación (figura 7) resultaron concordantes con los cálculos teóricos realizados en base a los cuales se escogieron los parámetros. La respuesta del primer bloque (V_{outIA}) muestra que se obtiene una amplitud de salida de aproximadamente 1.25 V (figura 7 curva azul), lo cual implica una amplificación de $1,25\text{ V}/5 \cdot 10^{-3}\text{ mV} = 250$, que fue la consideración de diseño impuesta.

Posteriormente la señal de salida del bloque amplificador ingresa al filtro pasa banda con el cual se logran amplitudes de 5 V promedio (figura 7 curva amarilla), por lo que está cumpliendo con el factor 4 de amplificación considerado en el diseño. Además desde el diagrama de Bode (figura 8 curva amarilla) se aprecia que el filtro corresponde a uno pasa banda en el rango de frecuencias diseñado, es decir, entre 0.04 Hz y 500 Hz.

La salida del filtro pasa banda mantiene la amplitud de las señal (figura 7 curva verde) con respec-

to al bloque anterior. El efecto de este bloque se visualiza desde el diagrama de Bode, ya que, se tiene una disminución en la ganancia a los 50.77 Hz, lo cual resulta cercano a los 50 Hz esperados en base a los cálculos (figura 8 curva verde). Finalmente se obtiene la señal de salida desde el último bloque (V_{outFin}), la cual mantiene la forma de la señal de entrada, pero ahora con una amplitud que alcanza aproximadamente los 6.2 V (figura 7 curva roja), además se sigue apreciando en el diagrama de Bode los efectos de los filtros antes mencionados (figura 8 curva Roja).

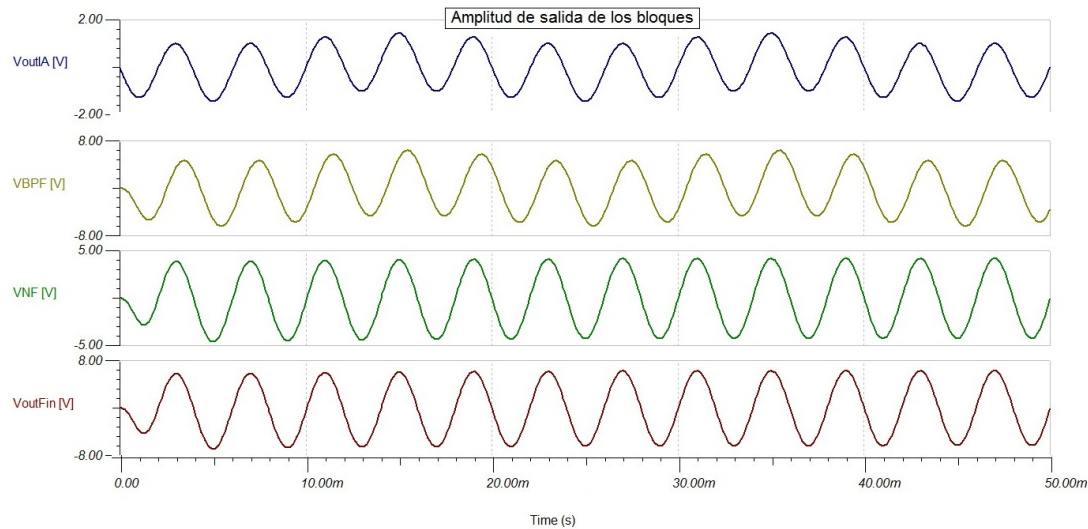


Figura 7: Voltajes de salida de los 4 bloques principales

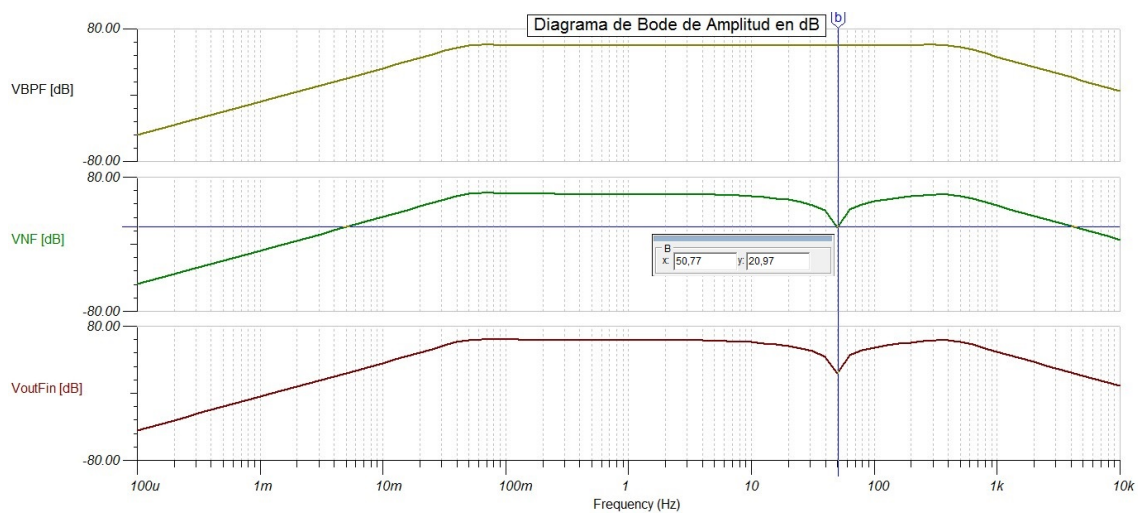


Figura 8: Diagrama de Bode de los tres bloques finales del circuito de adaptación de la señal de entrada

2.3. Construcción del circuito

El armado del circuito se realizó en una *protoboard* siguiendo el orden de los bloques de la sección 2.1. La comprobación de cada bloque se llevó a cabo con un generador de funciones para la señal de entrada, y un osciloscopio para visualizar el efecto del bloque respectivo a la entrada.

2.3.1. Circuito Amplificador de entrada

Luego de armar el bloque de la sección 2.1.1 se comprobó el correcto funcionamiento de éste, dándole una entrada de referencia $V_{in} = 10\sin(2\pi 250t)[mV]$, es decir una señal sinusoidal de $250[Hz]$ de frecuencia y una amplitud máxima de $10[mV]$, es decir la amplitud máxima producida por una señal mioeléctrica [1].

En la Figura 9 se observa que la salida del bloque efectivamente amplifica la señal, con una ganancia de 280 que está dentro del rango esperado de la ganancia teórica que es 250, considerando las variaciones de los valores en las resistencias utilizadas.

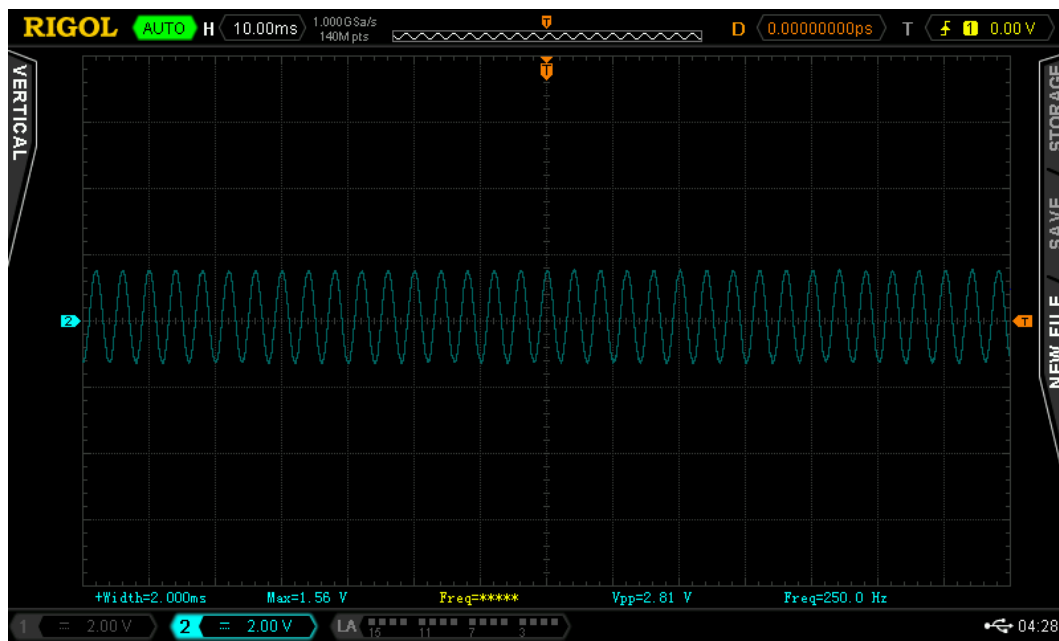


Figura 9: Salida del bloque de amplificación para una entrada sinusoidal de $V_{pp} = 10[mV]$ y $250[Hz]$.

2.3.2. Filtro pasa banda

La salida del circuito anterior es conectada a la entrada del bloque del filtro pasa banda, por lo que la entrada a este bloque es del orden de $[V]$ (gracias a la amplificación anterior). Con el objetivo de comprobar el filtrado de las frecuencias relativamente altas, es decir mayor a $500[Hz]$, se realizaron dos mediciones: una para $250[Hz]$ y otra para $1[kHz]$.

En las Figuras 10 y 11 se muestran las señales de entrada al bloque de filtrado pasa banda (señal inferior de color amarillo) y la respuesta del bloque (señal superior de color azul). En la Figura 10 se

observa una ganancia de aproximadamente 5, mientras que en la Figura 11 la amplificación resultante es menor a la unidad, que es lo esperado según el diseño realizado en la sección 2.1.2.

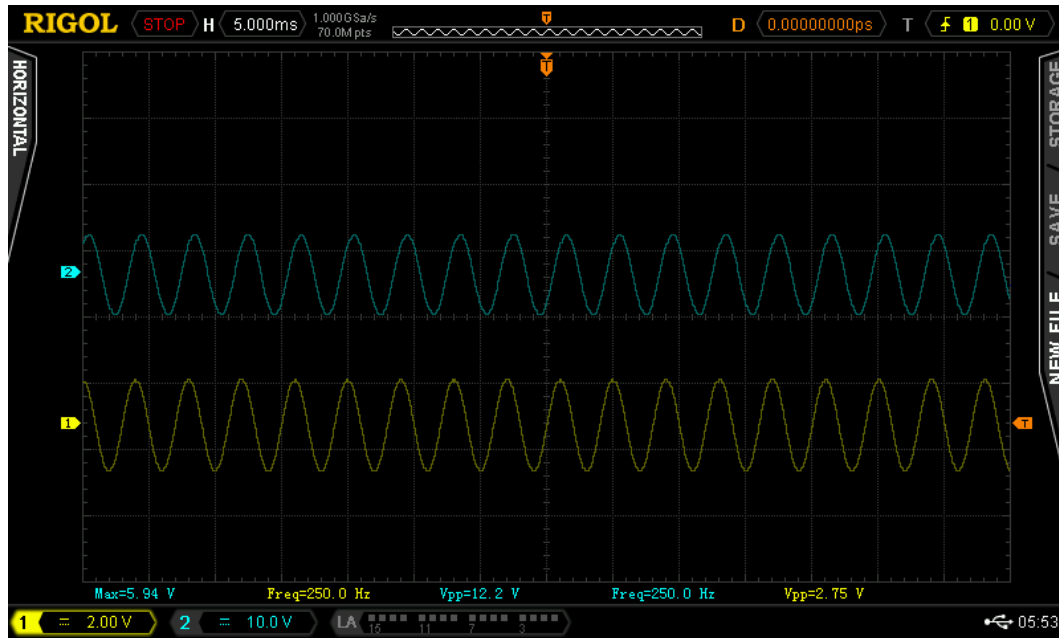


Figura 10: Salida del bloque de filtrado pasa banda para una entrada sinusoidal de $V_{pp} = 10[mV]$ y $250[Hz]$.

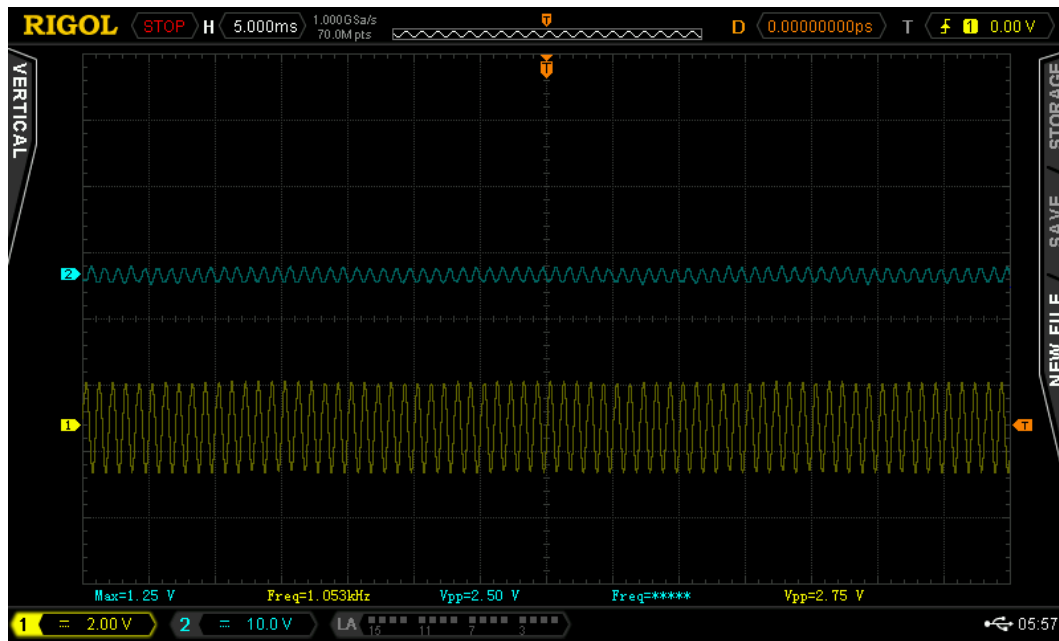


Figura 11: Salida del bloque de filtrado pasa banda para una entrada sinusoidal de $V_{pp} = 10[mV]$ y $1[kHz]$.

2.3.3. Filtro rechaza banda

Para la construcción de este bloque es esencial la precisión en los valores de las resistencias y capacitancias. Es por esto que se utiliza un potenciómetro, encargado de ajustar el filtrado óptimo para los $50[Hz]$ de la red.

Una vez ajustado el potenciómetro se obtuvo el filtrado mostrado en la Figura 12 en donde la señal superior amarilla corresponde a la entrada al bloque, mientras que la señal inferior azul corresponde a la salida de éste. Como se observa en la figura prácticamente se eliminan los $50[Hz]$, mientras que para las demás frecuencias el bloque es visto como una ganancia unitaria.

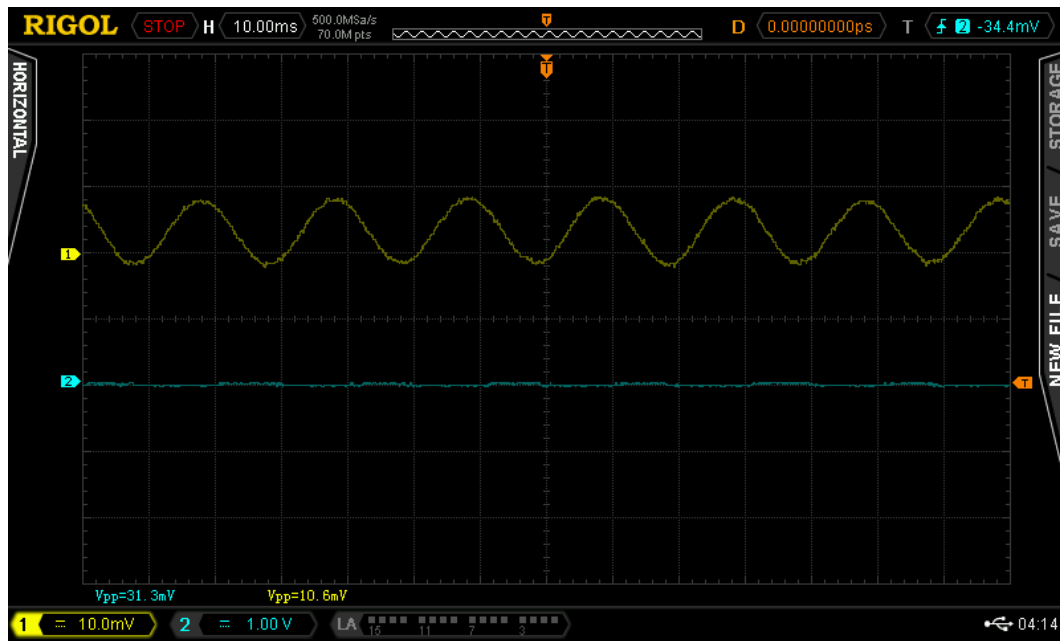


Figura 12: Salida del bloque rechaza banda para una entrada sinusoidal de $V_{pp} = 10[mV]$ y $50[Hz]$.

2.3.4. Amplificación final

El último ajuste en la ganancia también se regula con un potenciómetro, y así obtener el rango deseado de la señal acondicionada. Para efectos prácticos se reguló la resistencia variable para obtener una ganancia de 1,2, como se muestra en la Figura 13 (señal superior azul corresponde a entrada del bloque, mientras que señal inferior amarilla corresponde a salida del bloque). En esta se observa que la amplitud *peak-peak* es de $12,5[V]$ mientras que en el simulado es de $12,4[V]$, lo que ratifica el buen comportamiento del circuito construido con respecto a las simulaciones.

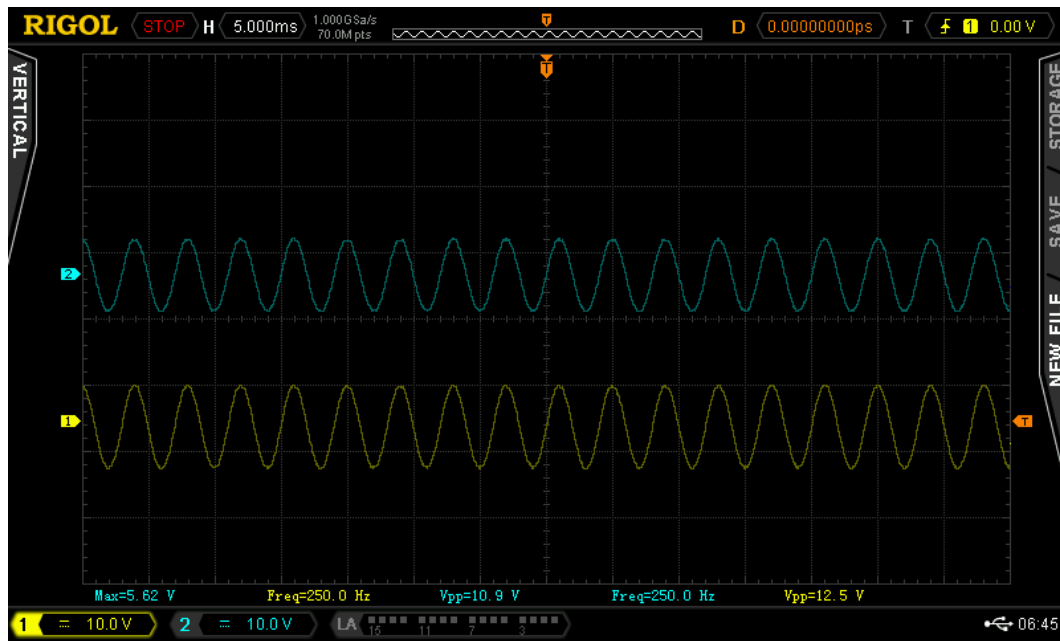


Figura 13: Salida del bloque de amplificación final para una entrada sinusoidal de $V_{pp} = 10[mV]$ y $250[Hz]$.

2.3.5. Offset agregado

Por último se construyó el circuito que le agrega el offset a la señal. En el caso de las pruebas realizadas se dio un offset de $1,5[V]$, evitando así que el rango de la señal de salida tome valores negativos.

En la Figura 14 se muestra una señal procesada por el circuito definitivo, con las mediciones realizadas por los electrodos. El momento de la perturbación corresponde a una contracción muscular categorizada como fuerte, realizada por el sujeto de pruebas.

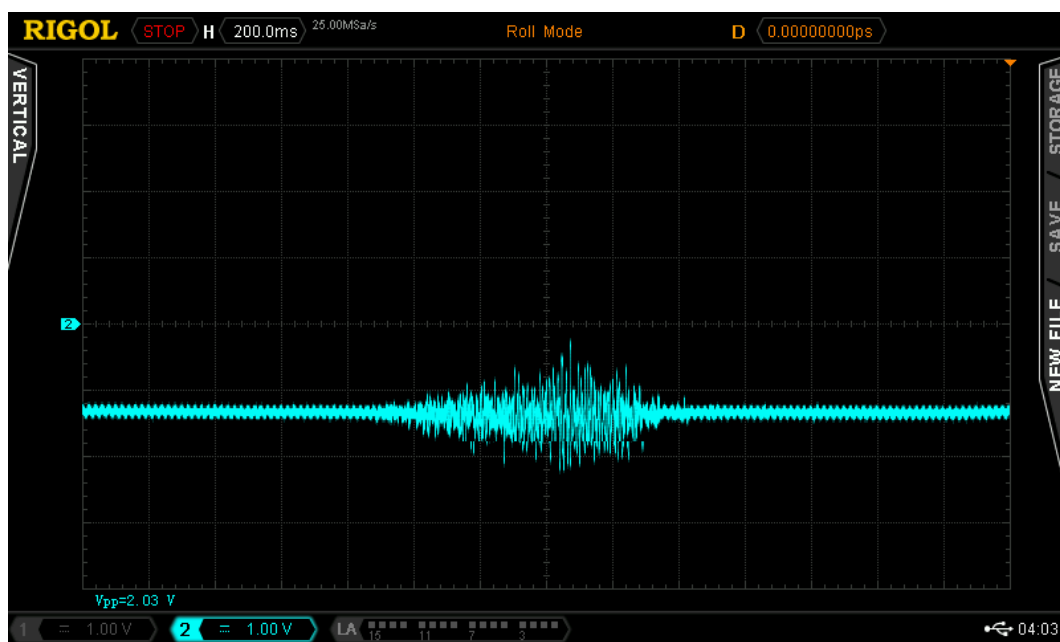


Figura 14: Salida del bloque del offset agregado para una medida por los electrodos.

3. Conversión A/D

Para muestrear la señal analógica proveniente del circuito anterior se utilizará el conversor A/D del Arduino. En particular el Arduino UNO posee un conversor análogo-digital de 10 bits, con una frecuencia de muestreo máxima de aproximadamente $10[kHz]$ [3]. Esto hace posible muestrear la señal a una frecuencia mayor que $500[Hz]$, que es la frecuencia utilizada en el *paper* en que está basado el proyecto [1].

Para visualizar la señal digitalizada por el Arduino se utilizará una librería de Matlab que permite obtener los valores medidos directamente en el espacio de trabajo del software, y graficarlos rápidamente. El código a utilizar para depurar el proceso de digitalización es el mostrado en el Código fuente 1.

Código fuente 1: Conversión A/D con Arduino mediante librería de Matlab

```

1 a = arduino('COM1');      % crear objeto arduino conectado en puerto COM1
2 in = 0;                   % pin de entrada de señal analogica
3 tic;                      % inicializar conteo de tiempo
4 i = 0;
5 while toc<30              % ejecutar durante 30 toc
6     i = i+1;
7     time(i) = toc;         % vector de tiempo con toc
8     v(i) = a.analogRead(in); % vector de lecturas
9 end
10 figure(1); plot(time,v/256); % graficar voltaje normalizado en 4V/1024

```

Una vez visualizada la conversión análoga-digital en Matlab, se procederá a enviar por protocolo SPI la información obtenida por el conversor A/D del Arduino. Para ello se utilizará la librería SPI de Arduino y así construir un simple código que cada vez que se obtiene un valor digitalizado de la señal, éste se envía por SPI (ver Código fuente 2).

Código fuente 2: Conversión A/D y envío por SPI en Arduino

```

1 #include "SPI.h" // libreria de SPI
2 int in = 3; // pin analogico de entrada
3 int ss = 10; // salida digital slave select de SPI
4 void setup() {
5     pinMode(ss, OUTPUT);
6     SPI.begin(); // despertar bus de SPI
7     SPI.setBitOrder(MSBFIRST); // seleccionar orden de bits
8 }
9 void setValue(int value){
10     digitalWrite(ss, LOW); // comenzar transmision de byte
11     //SPI.transfer(0); // enviar byte de comando si es necesario
12     SPI.transfer(value); // enviar valor
13     digitalWrite(ss, HIGH); // finalizar transmision de byte
14 }
15 void loop() {
16     val = analogRead(in)/4; // leer la entrada en el pin in y normalizar en 1 byte
17     setValue(val);
18 }

```

4. Conclusión

Es factible la construcción de un circuito de amplificación y filtrado de señales de baja amplitud, del orden de los mV, tal como se logró verificar por medio de las simulaciones. Además la construcción de este dispositivo considera elementos de bajo costo. Esto se reafirma en la práctica al momento de construir el circuito, el que logró resultados esperados, entregando una señal discriminatoria en presencia de contracciones musculares.

Mencionar que las ganancias de los distintos bloques son ajustados en el laboratorio y los valores de los parámetros antes expuestos varían dependiendo de la señal de entrada real, por lo que se deben calibrar utilizando los potenciómetros del circuito. Esto es necesario sobre todo para el filtro rechaza banda de los 50[Hz], con el fin de encontrar la ganancia mínima para dicha frecuencia.

Con respecto a la conversión A/D del Arduino, se obtuvo una frecuencia de muestreo aceptable con respecto a los que se mencionan en los *papers* estudiados. Con la utilización del DSP se espera alcanzar una suficiente velocidad de procesamiento para los objetivos que se plantean sobre este proyecto, y será el tema a tratar en las siguientes experiencias de laboratorio.

Bibliografía

- [1] Sapsanis, C.; Georgoulas, G.; Tzes, A., EMG based classification of basic hand movements based on time-frequency features,in Control & Automation (MED), 2013 21st Mediterranean Conference on , vol., no., pp.716-722, 25-28 June 2013
- [2] Rahman K K, M.; Nasor, M.,Multipurpose Low Cost Bio-Daq System for Real Time Biomedical Applications, 2015 International Conference on Information and Communication Technology Research (ICTRC2015)
- [3] <https://www.arduino.cc/en/Reference/AnalogRead>