

Instrumentación Básica para la Adquisición de Señal Mioeléctrica

Palabras Clave: Instrumentación, señal mioeléctrica.

Resumen

Se presenta el diseño electrónico de la etapa de acondicionamiento de señal electromioeléctrica, a fin de que se pueda mostrar en un osciloscopio o bien pueda adquirirse para el procesamiento de la misma señal. Se usan como sensores 3 electrodos de Plata cloruro de plata (Ag Cl/Ag) de montaje superficial, dos de los electrodos conectados a la entrada de un amplificador de instrumentación y el tercer electrodo como referencia. La propuesta es una configuración de cuatro amplificadores operacionales, los cuales forman un amplificador de instrumentación e incluye filtro correcto de basal y filtro pasa bajas frecuencias.

1. Introducción

El movimiento es el principal signo de la vida animal, por lo que el hombre ha tenido curiosidad acerca de los órganos de locomoción de su propio cuerpo y el de otras criaturas. Leonardo da Vinci, por ejemplo, dedicó muchos de sus pensamientos al análisis de los músculos y sus funciones. De ahí que se le llama el padre de la anatomía moderna; Andreas Vesalius, quien influyó a través de su obra monumental, "the fabrica", se restringe a la apariencia y la geografía de músculos muertos, más que a su dinámica.

El italiano Francesco Redi (1666) sospechó que el choque eléctrico del pez raya tenía un origen muscular. La relación entre electricidad y el músculo fue observada por primera vez por Luigi Galván en 1791, quien por medio de experimentos despolarizó los músculos de una pierna de rana tocándolas con rodillos de metal. Su concepto de "electricidad animal" fue recibido con entusiasmo. El libro original de Galván, "De Viribus Electricitatis", se tradujo en inglés por Green (1953). Este descubrimiento se conoce generalmente como la representación del nacimiento de la neurofisiología, haciendo esto a Galván como el padre de este campo.

Alessandro Volta cuestionó en 1793 los descubrimientos de Galván, poniendo en contacto metales similares con electrolitos (parecido a los que se encuentran en tejidos del cuerpo) que podrían generar corrientes eléctricas. En los siguientes años Galván reafirmó sus conceptos cuando encontró que la contracción de un músculo puede ser evocado poniendo la parte final libre de un nervio a través de un músculo sin la intervención de metales.

En 1820, Schweigger construyó el primer galvanómetro práctico basado en el descubrimiento de Oersted sobre el magnetismo. Cinco años después, Nobili mejoró la sensibilidad, compensando el torque del campo magnético de la tierra. En 1838, Carlos Matteucci finalmente probó que la corriente eléctrica se originaba dentro de los músculos. En 1844 él escribió: "Un punto en el interior de un músculo en contacto con otra parte cualquiera del mismo músculo produce una corriente que va dentro del animal desde la parte muscular a otra en donde no hay."

El trabajo de Matteucci atrajo el interés del Francés Du.Bois-Reumond, quien en 1849 fue el primero en reportar la detección de la señal eléctrica de una contracción de un músculo humano. El ideó un método de medición colocándose un electrodo, el cual consistía de un alambre amarrado con un papel húmedo e inmerso en una jarra con solución salina; encontró que los dedos sumergidos en solución salina, y cuando el brazo o la mano se contraían, la deflexión en el galvanómetro era mínima (aproximadamente 2 o 3°). Observó que la impedancia de la piel reducía la corriente que manejaba al galvanómetro, entonces se hizo una herida y la puso en contacto con la solución salina de los electrodos con lo que midió una mayor deflexión (65°) sobre su galvanómetro.

German Piper empleó electrodos superficiales (1907). La técnica para detectar se simplificó por el advenimiento del tubo de rayos catódicos inventado por Braun (1897), y fue usado junto con un galvanómetro por primera ocasión por Forbes y Thacher (1920) para amplificar potenciales de acción. Dos años después Gasser y Erlanger usaron el tubo de rayos catódicos del osciloscopio en lugar del galvanómetro y era el único aparato capaz de “mostrar” la señal del músculo. Con esta aplicación y con su interpretación de los potenciales de acción, ganaron el premio Nóbel en 1944. Después de esta reseña histórica de la electromiografía, que es el estudio de la función del músculo desde el punto de vista de las señales que de él emanan [1], podemos diseñar y construir un amplificador para detectar la señal mieléctrica a través de electrodos de superficie. Podemos observar esta señal en un osciloscopio.

2. Metodología

La propuesta es un amplificador de instrumentación con filtro pasa-banda usando amplificadores operacionales como el TL084, que tiene cuatro, con Transistores de entrada de Efecto de Campo (FET), como se muestra en la figura 1.

Algunas de las características ideales de un amplificador son:

- Ancho de Banda infinito.
- Ganancia infinita.
- Offset de cero.
- Impedancia de entrada infinita.
- Impedancia de salida cero.

A partir de que la ganancia de un amplificador ideal en lazo abierto es infinita, se tiene que:

Si $V_e = e^+ - e^-$; $G = \frac{V_s}{V_e} = \frac{V_s}{e^+ - e^-}$ por lo que sustituyendo el valor ideal de la ganancia, se obtiene la ecuación, la cual nos servirá para analizar la configuración del amplificador de instrumentación.

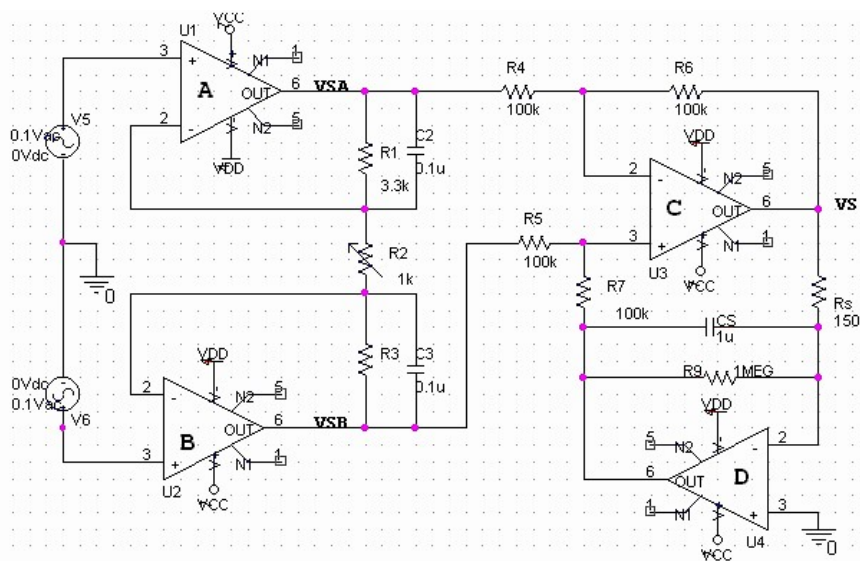


Figura 1: Amplificador de Instrumentación con filtro pasa-banda.

Aplicando el teorema de superposición en el análisis de la configuración del amplificador de instrumentación sin capacitores, tenemos:

Pacificando V_2 , es decir que esta a tierra. Analizando al amplificador A:

$$e^+ = V_1$$

$$e^- = \frac{R_2 V_{SA}}{R_1 + R_2}$$

Igualando y despejando V_{SA} de las ecuaciones anteriores:

$$V_{SA} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_1$$

Analizando el amplificador B:

$$e^+ = 0$$

$$e^- = \frac{R_3 V_1 + R_2 V_{SB}}{R_2 + R_3}$$

$$V_{SB} = -\frac{R_3}{R_2} V_1$$

Ahora, Pacificando V_1 y analizando al amplificador A:

$$e^+ = 0$$

$$e^- = \frac{R_1 V_2 + R_2 V_{SA}}{R_1 + R_2}$$

$$V_{SA} = -\frac{R_1}{R_2} V_2$$

Analizando al amplificador B:

$$e^+ = V_2$$

$$e^- = \frac{R_2 V_{SB}}{R_2 + R_3}$$

$$V_{SB} = \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) V_2$$

Finalmente sumando los efectos parciales tenemos:

$$V_{SA} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_1 - \frac{R_1}{R_2} V_2$$

$$V_{SB} = -\frac{R_3}{R_2} V_1 + \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) V_2$$

Tomando la salida de los amplificadores A y B en forma diferencial, que servirá como entrada al amplificador C, se tiene:

$$V_{SB} - V_{SA} = -\frac{R_3}{R_2}V_1 + \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right)V_2 + \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)V_1 - \frac{R_1}{R_2}V_2$$

$$V_{SB} - V_{SA} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)(V_2 - V_1) + \frac{R_1}{R_2}(V_2 - V_1)$$

$$V_{SB} - V_{SA} = \left[\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + \frac{R_1}{R_2}\right](V_2 - V_1)$$

$$V_{SB} - V_{SA} = \left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)(V_2 - V_1)$$

Analizando el amplificador C, considerando que aún no esté conectado el amplificador D, y poniendo en su lugar la tierra, se tiene:

$$e^- = \frac{R_4V_S + V_{SA}R_6}{R_4 + R_6}$$

$$e^+ = \frac{R_7V_{SB}}{R_5 + R_7}$$

$$R_4 = R_5$$

$$R_6 = R_7$$

$$R_4V_S + R_6V_{SA} = R_7V_{SB}$$

$$V_S = \frac{R_6V_{SA} - R_6V_{SB}}{R_4}$$

$$V_S = \frac{R_6}{R_4}(V_{SB} - V_{SA})$$

$$V_S = \frac{R_6}{R_4} \left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right) (V_{SB} - V_{SA})$$

Qué es la relación para el voltaje de salida total del amplificador de instrumentación, sin tomar en cuenta los efectos de los capacitores.

Ahora, tomando la relación del voltaje de salida con respecto a la entrada de los amplificadores A y B, y considerando el efecto de los capacitores que son de igual valor y están en paralelo con las resistencias R1 y R3:

$$H(\nu) = \left(\frac{R_2 + 2R_1}{R_2} \right)$$

$$X_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{sC}$$

$$Z_1 = \frac{R_1 \left(\frac{1}{sC_1} \right)}{R_1 + \left(\frac{1}{sC_1} \right)} = \frac{R_1}{sR_1C_1 + 1} = Z_2$$

$$H(\nu) = \frac{R_2 + \frac{2R_1}{sR_1C_1 + 1}}{R_2} = \frac{sR_1R_2C_1 + R_2 + 2R_1}{sR_1R_2C_1 + R_2}$$

$$H(\nu) = \frac{s + \frac{2R_1 + R_2}{R_1R_2C_1}}{s + \frac{R_2}{R_1R_2C_1}} = \frac{s + \frac{2R_1 + R_2}{R_1R_2C_1}}{s + \frac{1}{\tau}}$$

$$H(\nu) = \frac{s + \frac{1}{K_1}}{s + \frac{1}{K_2}}$$

Qué es la función de transferencia de los amplificadores A y B.

La figura 2 muestra la respuesta en forma cualitativa de la función de transferencia para $\frac{1}{K_2} > \frac{1}{K_1}$, y corresponde a la característica de un filtro pasa altas-frecuencias.

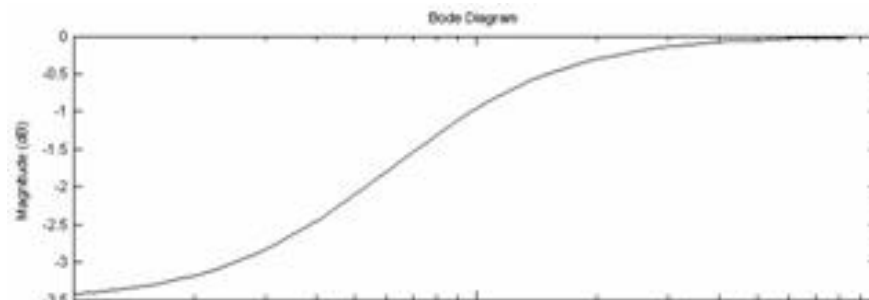


Figura 2: Gráfica de la función de transferencia para la condición $\frac{1}{K_2} > \frac{1}{K_1}$

La figura 3. muestra la respuesta en forma cualitativa de la función de transferencia para $\frac{1}{K_1} > \frac{1}{K_2}$ y corresponde a la característica de un filtro pasa-bajas frecuencias.

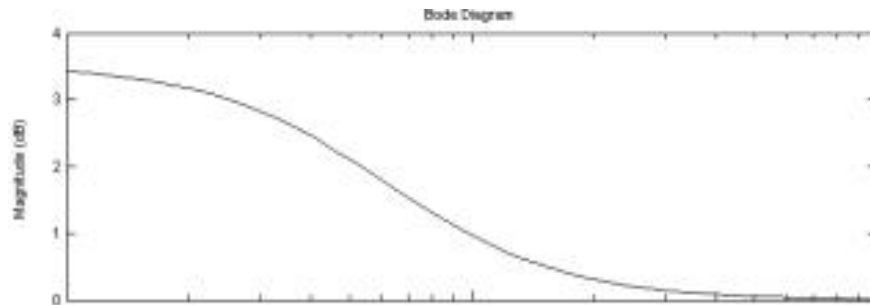


Figura 3: Gráfica de la función de transferencia para la condición $\frac{1}{K_1} > \frac{1}{K_2}$

Analizando el amplificador D que está en una configuración de integrador, sin considerar la resistencia de $1\text{ M}\Omega$, que está conectada en la retroalimentación, para dar una trayectoria de descarga del capacitor, se tiene:

$$e^+ = \frac{V_{SB}R_7 + V_1R_5}{R_5 + R_7}$$

$$e^- = \frac{V_{SA}R_6 + V_S R_4}{R_4 + R_6}$$

Si

$$R_4 = R_5$$

$$R_6 = R_7$$

$$V_1 = \frac{V_S}{RCS}$$

$$V_{SB}R_6 + \left(\frac{-V_S}{RCS}\right)R_4 = V_{SA}R_6 + V_S R_4$$

$$V_S \left(R_4 + \frac{R_4}{RCS}\right) = R_6(V_{SB} - V_{SA})$$

$$V_S = \frac{R_6(V_{SA} - V_{SB})}{R_4 + \frac{R_4}{RCS}}$$

$$H(\nu) = \frac{R_6}{R_4 + \frac{R_4}{RCS}} = \frac{RR_6CS}{R_4(RCS + 1)} = \frac{\frac{R_6}{R_4} S}{S + \frac{1}{RC}}$$

Qué es la función de transferencia para el amplificador D. Se grafica el comportamiento en forma cualitativa en la figura 4, y corresponde a la respuesta de un filtro pasa-altas frecuencias, el cual hace la función de corrector de basal.

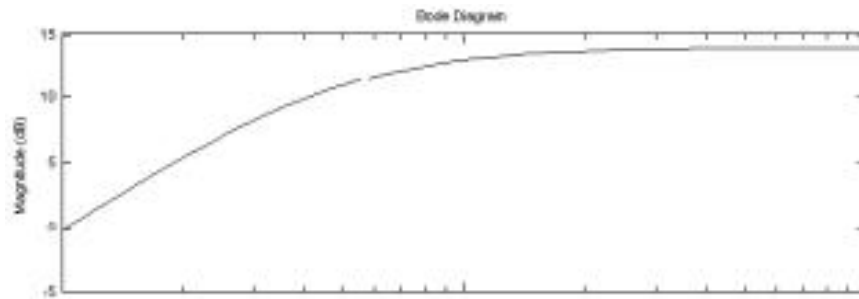


Figura 4: Gráfica de la función de transferencia en el amplificador D.

3. Resultados.

Para el diseño de los filtros se usa la siguiente ecuación: $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$. Se recomienda proponer un valor de capacitor y calcular la resistencia para la frecuencia de corte deseada. Por ejemplo, para el diseño del corrector de basal a 1 Hz, se propone un capacitor de $1 \mu\text{F}$, por lo que resulta un valor de resistencia de 159155Ω , el valor comercial más cercano a este valor es de $150 \text{ k}\Omega$. Para el diseño del filtro pasa bajas a una frecuencia de corte de 500 Hz, y proponiendo un capacitor de $0,1 \mu\text{F}$, resulta un valor de resistencia de 3183Ω , y su valor comercial más cercano es de $3,3 \text{ k}\Omega$, además, con valores de $R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = 100 \text{ k}\Omega$, y simulando el circuito para valores de $R_2 = 10 \Omega, 20 \Omega, 50 \Omega, 100 \Omega$ y $1 \text{ k}\Omega$, con una señal de entrada de amplitud $0,1 \text{ V}$, se obtiene la figura 5, en la que se observa que se respetan las frecuencias de corte para los filtros diseñados. La ganancia también varía para los distintos valores de R_2 . Se puede observar que el corrector de basal es hasta de 1 Hz y el filtro pasa bajas tiene una frecuencia de corte de 500 Hz.

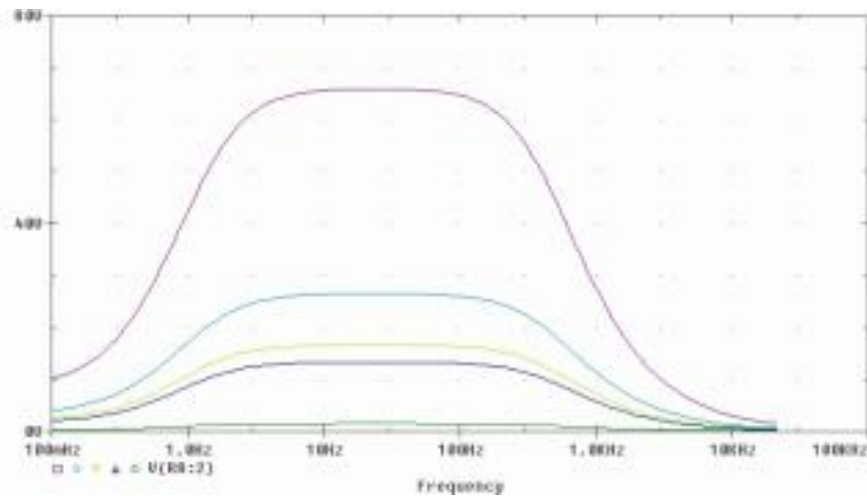


Figura 5: Simulación del amplificador de instrumentación con filtro pasa-banda.

4. Conclusión

Es posible analizar, diseñar y simular circuitos de una forma precisa y económica, aunque en la realidad existen factores que intervienen en el proceso de acondicionamiento de la señal, por ejemplo, la Interferencia del ruido de la línea de alimentación de energía eléctrica comercial, cuya frecuencia de 60 Hz, muchas veces es mayor que la señal a procesar, por lo que se recomienda utilizar filtros rechazabanda con frecuencia central de 60 Hz, además de tener en cuenta las precauciones necesarias con respecto al blindaje del circuito. Se recomienda que la amplificación de la señal sea en dos etapas, la primera con ganancia pequeña, por decir de 10, y en una segunda etapa con la ganancia requerida para la aplicación, a fin de evitar la amplificación del ruido. Cuando se hace la interfase con el osciloscopio o con una computadora se recomienda como medida de seguridad, agregar una etapa de aislamiento eléctrico por medio de un par fotodiodo-fototransistor. Antes de la etapa de aislamiento se alimenta con pilas, considerando que el sujeto no toque partes metálicas ni el circuito.

Existen circuitos integrados que contienen el amplificador de instrumentación completo por mencionar el CI AD620, y también filtros integrados como el CI LMF60, que tienen mejores características, para aplicaciones donde se requiera de mayor fidelidad en la señal, la desventaja es el precio.

Referencias

- [1] John v. Basmajian, Carlo j. De Luca, Muscle Alive Their Functions Revealed by Electromiography, 5th Williams & Wilkins. 1985.