

Desarrollo, construcción y caracterización de sistema de registro neuronal.

Román A. Rolla, Juan F. Urriste, Felipe I. Cignoli y Ana Amador

Laboratorio 6

Laboratorio de Sistemas Dinámicos, Departamento de Física, FCEN - UBA

Resumen— El canto de las aves es el resultado de una coordinación precisa entre núcleos neuronales, el sistema respiratorio y el órgano vocal. En particular, los núcleos telencefálicos cumplen un rol central en la generación de comandos motores que controlan la periferia, siendo clave registrar la actividad neuronal durante la producción y/o el procesamiento del canto. En este trabajo, desarrollamos, construimos y caracterizamos un sistema de registro neuronal basado en electrocorticografía (ECoG) para aves pequeñas. Diseñamos un circuito seguidor de cuatro canales y un amplificador diferencial, optimizados para bajo peso y tamaño, permitiendo su implementación en animales pequeños [1].

I. INTRODUCCIÓN

El comportamiento vocal de las aves es producto de la interacción entre diversas estructuras cerebrales, el sistema respiratorio y el órgano vocal. Entre ellas, los núcleos telencefálicos cumplen un papel clave, ya que generan los comandos motores que controlan las estructuras periféricas encargadas de producir el canto. Esta complejidad convierte a las aves en un modelo relevante para el estudio de la neurobiología de la vocalización.

En particular, los Zebra Finches (*Taeniopygia guttata*) son ampliamente utilizados en estudios neuroetológicos por su repertorio vocal estructurado y aprendido. Diversos trabajos han documentado que, durante el sueño, estas aves reactivan patrones de actividad neuronal similares a los observados durante el canto, lo que sugiere la presencia de una forma de "sueño vocal"[3]. Este fenómeno motiva el estudio de la actividad cortical en estados de sueño y vigilia, para lo cual es necesario contar con técnicas de registro neuronal adecuadas.

La electrocorticografía (ECoG) es una técnica que permite registrar la actividad eléctrica cortical con alta resolución temporal y una mejor relación señal/ruido que el EEG, ya que los electrodos se colocan directamente sobre la superficie del cerebro. Esta técnica capta señales a nivel poblacional (es decir, integrando la actividad de múltiples neuronas), y resulta particularmente útil en animales pequeños, siempre que el sistema de registro sea suficientemente liviano y compacto. Ejemplos de esta técnica se pueden ver en estudios de las estructuras del sueño en estos sujetos[4]. En la Figura I.1 se muestran una señal temporal típica registrada mediante ECoG durante una etapa del sueño y el espectro de potencia para distintos tipos de etapas.

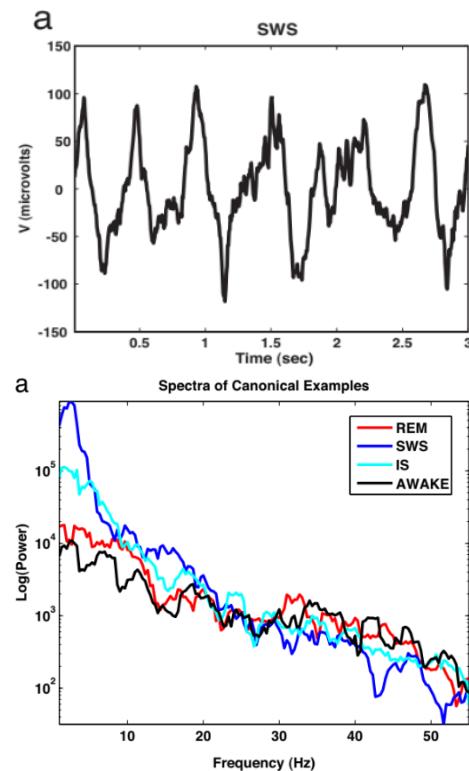


Fig. I.1. Arriba: señales ECoG registradas durante sueño de ondas lentas (SWS). Abajo: espectro de potencia correspondiente, destacando la actividad en bandas fisiológicamente relevantes.

En este trabajo, presentamos el desarrollo de un sistema de ECoG de cuatro canales, incluyendo tanto el diseño de la electrónica como la fabricación de cables específicos para aves pequeñas. El objetivo es disponer de una herramienta confiable para registrar señales corticales en contextos naturales o semilibre, facilitando estudios en neurociencia comportamental, incluyendo el análisis del sueño y el canto.

II. ESQUEMA EXPERIMENTAL

El diseño del sistema experimental descrito en este trabajo tiene como objetivo el registro de señales fisiológicas mediante la técnica ECoG en zebra finches. De manera general, se diagrama a continuación el esquema experimental (ver Fig.II.1), con el fin de motivar la razón y función de los distintos elementos en el mismo. Remarcando que nuestro trabajo se

centró en el desarrollo del dispositivo seguidor/amplificador de voltaje de la etapa (2b) y su conexión con el pre-amplificador mediante la etapa (3).

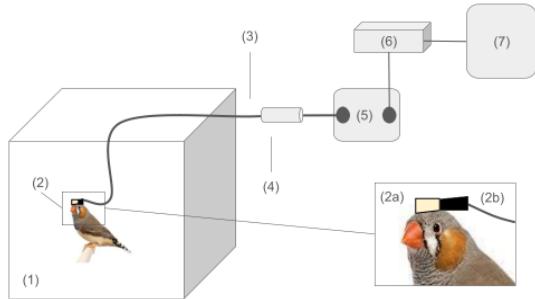


Fig. II.1. Esquema del dispositivo experimental. (1) Jaula. (2a) Electrodo y conector hembra. (2b) Conector macho y componente. (3) Microcables y malla. (4) Pre-amplificador. (5) Amplificador (6) Placa de adquisición (7) Computadora

Siguiendo la numeración dada en la imagen, se describe la función de cada elemento: (1) Jaula: tiene como primer objetivo restringir el rango de movimiento del ave. Además, funciona como jaula de Faraday al aislarla electromagnéticamente. Esto último se logra con una malla fina de alambre que la recubre por fuera. (2a) Electrodo y conector hembra: se utilizan 5 electrodos emplazados en un conector hembra. Los materiales fueron elegidos para minimizar el peso sobre el ave y la carga resistiva sobre la señal. (2b) Componente amplificador y conector macho: Se utiliza un componente seguidor/amplificador de voltaje y un conector macho (complementario al que se encuentran adheridos los electrodos). El primero adapta la diferencia de impedancias entre el tejido biológico y el resto del sistema de medición. El segundo hace de interfaz con la etapa 2a, permitiendo desconectar fácilmente el dispositivo sin necesidad de que quede adherido al ave. (3) Microcables y malla: Los microcables minimizan las pérdidas al comunicar la señal. Un malla externa conectado a tierra asegura el blindaje electromagnético de la señal. (4) Pre-amplificador: Teniendo en cuenta que el ruido aumenta con la longitud de los cables, se utiliza un amplificador previo al principal (headstage) para obtener una amplificación intermedia de la señal. (5) Amplificador: Permite procesar la señal con controles de ganancia ajustable, filtros y acondicionamiento de la señal. (6) Placa de adquisición: Se utiliza una placa NIDAQ para conversión analógico-digital de la señal y como interfaz con la computadora. (7) Computadora: Se procesan, analizan y guardan los datos de las señales.

La construcción del dispositivo se desarrolla en gran medida alrededor del correcto funcionamiento del componente amplificador/seguidor de voltaje de la sección (2b). Por ello, se realiza una caracterización de un sistema de amplificación de voltaje y un sistema seguidor de voltaje .

III. CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES

Se emplearon dos componentes eléctricos distintos de seguimiento y/o amplificación de señales con el objetivo de comparar su desempeño en el tratamiento previo de las mismas y

determinar cuál es más óptimo. Esta comparación es útil dado que los sistemas pueden ser intercambiados al momento de realizar mediciones mediante la desconexión y conexión con el conector hembra, sin requerir mayores modificaciones en el esquema experimental (ver fig. II.1). El sistema seguidor de voltaje consiste en un quadopamp, por lo que recibe 4 señales y da una salida de igual amplitud para cada una de ellas. El sistema amplificador de voltaje consta de dos amplificadores operacionales, donde cada uno recibe una señal y entrega una señal amplificada en función de una ganancia ajustable. Si bien esto se profundiza en las siguientes secciones, es importante tenerlo en cuenta ya que la elección de los sistemas tiene una de sus motivaciones en el hecho de que el conector con electrodos del esquema anterior (ver etapa 2a) dispone de 5 entradas, entonces, se necesita un dispositivo que al menos procese 2 o 4 señales con una quinta señal sin procesar de referencia.

III-1. Seguidor de voltaje: Los amplificadores operacionales [2] (opamps) se caracterizan por presentar una impedancia de entrada muy alta y una de salida baja. Configurado como seguidores de voltaje (o buffer), la salida (V_{out}) se conecta directamente a la entrada inversora (V_{in-}), mientras que la señal de interés se aplica a la entrada no inversora (V_{in+}). En esta configuración, el opamp fuerza a la salida a igualar la entrada, sin modificar amplitud ($V_{out} = V_{in}$), pero reduciendo de esta manera su impedancia. La Figura III.1 representa dicha configuración.

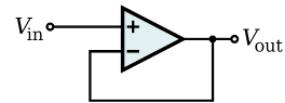


Fig. III.1. Esquema para la configuración de un opamp como buffer

Esta disposición es ideal ya que la alta impedancia de entrada del buffer impide que circule corriente significativa desde la fuente anterior. Esto es importante para garantizar que el preamplificador no interfiera con el comportamiento del sistema anterior ni modifique el voltaje de la señal que se desea amplificar posteriormente.

Los quadopamps utilizados son el TL074 y TL084, los cuales pertenecen a una familia de circuitos integrados que se componen de 4 opamps. La configuración antes discutida, requiere que los 4 opamps tengan conectadas sus respectivas salidas con su entrada inversora. Las conexiones para cada uno de sus 14 pines se especifican a continuación:

- Pines 2, 6, 9, 13 y 1, 7, 9, 14 (V_{in-} y V_{out}): en cada amplificador operacional ambos pines se conectan para lograr la configuración de buffer.
- Pines 3, 5, 10, 12 (V_{in+}): corresponden a la entrada no inversora, que en el caso trabajado se alimentan por las señales provenientes de los electrodos.
- Pines 4 y 11 (V_{s-} y V_{s+}): entradas de alimentación del integrado.

La Figura III.2 muestra la disposición de los pines del TL074 y señales típicas registrada durante su funcionamiento

como seguidor de voltaje.

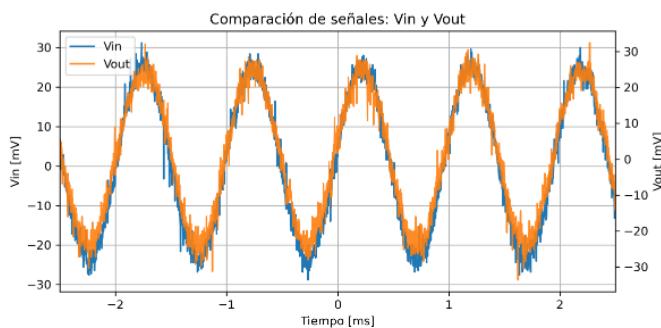
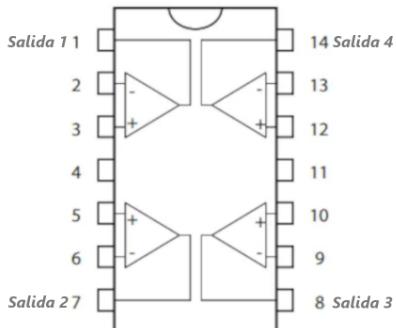


Fig. III.2. Arriba: Diagrama del TL074/84 donde se ven referenciados sus pines de salida, entrada y alimentación.

Abajo: Funcionamiento del TL074 configurado como seguidores de voltaje, con una señal de entrada $V_{in} = 52 \text{ mV}$ y salida equivalente.

Para los voltajes analizados (en torno a los 50 mV), la señal de salida presenta igual amplitud que la señal de entrada. A continuación se estudia su comportamiento para voltajes menores. Se realiza un barrido de voltaje para uno de los cuatro opamps de cada componente en un rango de voltajes cercanos a las decenas de mV. Observamos que se separa de la ganancia unitaria dejando de funcionar exactamente como follower. Este efecto, fácilmente perceptible para el TL084, es menor en el TL074. Dicho esto, la ganancia fue a partir de los voltajes rms, ya que la señal se vuelve ruidosa para voltajes bajos, como se observa en la Figura (III.3).

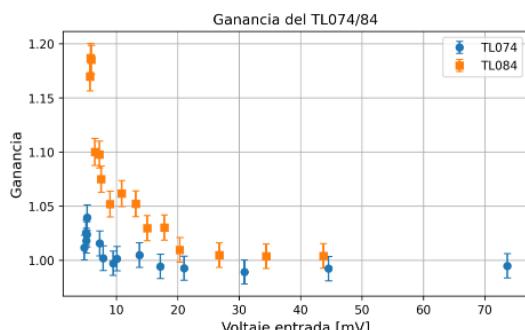


Fig. III.3. Comparación del funcionamiento de los TL074 y TL084 configurados como seguidores de voltaje.

Se observa un mejor desempeño del TL074 para señales de bajo voltaje, ya que cuando se presenta una desviación en la ganancia unitaria (idealmente $G = 1$), el TL074 alcanza un valor de $G = 1,025$, mientras que el TL084 llega hasta $G = 1,175$. Estos valores fueron calculados a partir de la amplitud RMS, ya que si se utilizaran valores pico a pico, la desviación respecto a la ganancia unitaria es aún mayor. Se concluye que en este aspecto es una mejor propuesta el TL074.

Aunque la separación de la ganancia unitaria sea chica a valor eficaz, ciertamente el ruido no es despreciable en la señal, esto se ve en la Figura III.4. Dado que el ruido en la señal se presenta en la forma de artefactos de alta frecuencia, con picos abruptos, se considera que la aplicación de un filtro pasabajo permitiría atenuarlos sin afectar significativamente las componentes de baja frecuencia, siendo estas últimas de interés.

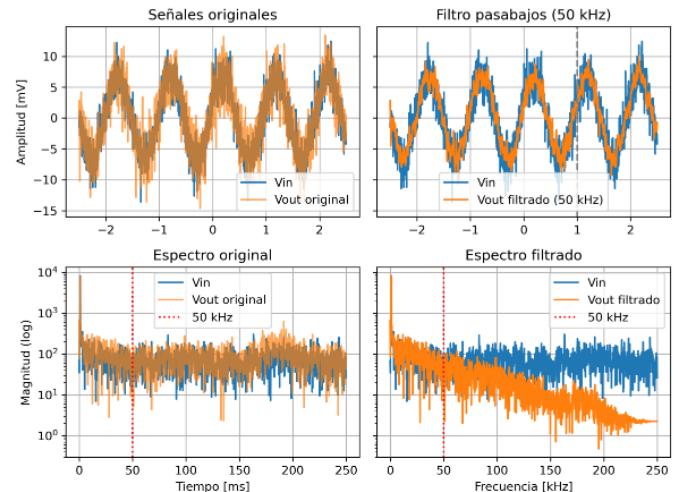


Fig. III.4. En la columna izquierda se muestra el funcionamiento del seguidor de voltaje para $V_{in} = 20 \text{ mV}$ junto con su espectro de frecuencia. En la derecha, la señal pasada por un filtro pasa bajos digital.

Se observa como la señal de salida es mas ruidosa que la de entrada, este efecto es claro al aplicar un filtro digital IIR de primer orden con una frecuencia de corte arbitraria de 50 kHz. Se observa una atenuación efectiva del ruido de alta frecuencia, lo que permite obtener una señal más nítida sin afectar el rango de interés, ubicado en el orden de los Hz[4]. Considerando el espectro de las señales de interés, utilizar un filtro en el proceso de las señales o analógicamente en el amplificador digital es una opción viable. El ruido que se observa en la señal es causado principalmente por una característica del opamp, el V_{offset} , que está indicado en el datasheet[5] de estos componentes. Este valor es de aproximadamente 3 mV, lo que significa que el amplificador no puede diferenciar bien cambios en la señal de entrada que sean menores a ese valor. Al trabajar con voltajes bajos estos efectos son perceptibles (próximos a la decena de mV), en cambio alrededor de los cientos de mV la ganancia es unitaria, como se ve en la Figura III.3.

III.-2. Amplificador diferencial: Para la amplificación diferencial de las señales provenientes de los electrodos se utiliza un AD623ARZ (en adelante AD623), el cual es un amplificador de instrumentación (INA, del inglés INstrumentation Amplifier) especializado para amplificar señales de bajo voltaje sin modificar la fase ni introducir ruido significativo. Su diseño permite amplificar únicamente la diferencia entre dos señales de entrada. La ganancia se ajusta mediante una resistencia externa de ganancia (R_G), siguiendo la relación especificada en el datasheet [7]. Esto garantiza una amplificación precisa y estable, fundamental en aplicaciones que requieren alta sensibilidad, como la adquisición de señales fisiológicas.

La relación mencionada es la siguiente

$$G = 1 + \frac{100 \text{ k}\Omega}{R_G}$$

de la misma manera, el voltaje de salida (V_{out}) está determinado por:

$$V_{\text{out}} = \left(1 + \frac{100 \text{ k}\Omega}{R_G}\right) \cdot (V_+ - V_-) \quad (1)$$

Las conexiones para cada uno de sus 8 pines se especifica a continuación:

- Pin 1 y 8 (R_G y R_G+). Determinan la ganancia de V_{out} al colocar entre estos pines una resistencia. Se utiliza una $R_G = 5,6 \text{ k}\Omega$ así $G = 18$
- Pin 2 y 3 (V_{in-} y V_{in+}). Entradas positiva y negativa. En el caso de este trabajo dichas señales provendrán de los electrodos.
- Pin 4 y 7 (V_{s-} y V_{s+}). Entradas de alimentación.
- Pin 6 (V_{out}). Señal de salida. En la configuración utilizada, sera una señal amplificada y diferenciada.
- Pin 5 (V_{ref}). Señal de referencia para seleccionar el offset del V_{out} .

La Figura III.5 muestra la disposición de los pines del AD623.

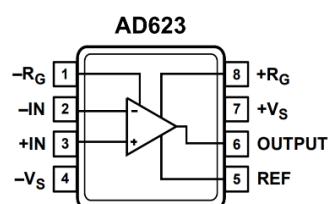


Fig. III.5. Diagrama del AD623 donde se ven referenciados sus pines.

Con el objetivo de caracterizar el sistema, primero se estudió el comportamiento de G vs. R_G , cuya dependencia teórica se ve en la ecuación 1. Para ello se realizó un barrido en resistencias a partir de un potenciómetro y se fijaron V_{in-} y V_{ref} a tierra, mientras que las alimentaciones V_{s-} y V_{s+} se establecieron en aproximadamente $\pm 2,5 \text{ V}$. La entrada V_{in+} se excitó con una señal senoidal de 1 kHz y 100 mV de amplitud. De esta manera, $G = \frac{V_{\text{out}}}{V_{in+}}$. Una típica captura de la señal levantada se puede ver en la Figura III.6 junto con el barrido de R_G . Los errores de la G se calcularon a partir de su dispersión de errores, los errores de V son los informados por el osciloscopio (Tektronix TBS1052B).

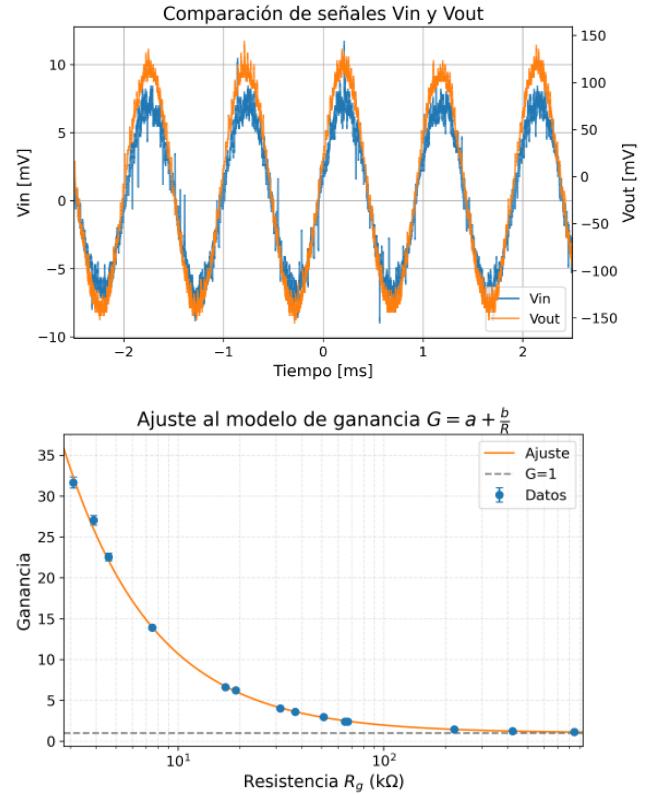


Fig. III.6. Arriba: para $V_{\text{in}} = 16 \text{ mV}$, se obtuvo $V_{\text{out}} = 294 \text{ mV}$, correspondiente a una ganancia $G = 18,4$. Abajo: ganancia observada contra ganancia teórica para el componente AD623.

Se obtuvo un comportamiento consistente con lo informado por el datasheet[6] , con un ajuste no lineal que arrojó como parámetros un offset de ganancia $G = 0,99 \pm 0,02$ y un valor equivalente de resistencia interna ($b = 97,2 \pm 0,8$) k Ω . El ajuste presentó un valor de chi-cuadrado reducido $\chi^2 = 1,2$, con un valor $p = 0,37$. Bajo un nivel de confianza del 95 %, no se puede rechazar la hipótesis de que los datos se ajustan al modelo propuesto.

Continuando con la caracterización del sistema, se analizó la respuesta de V_{out} frente a señales de baja amplitud, manteniendo la misma configuración, excepto por el valor de ganancia, que se fijó en $G = 18$ mediante una resistencia $R_G = 5,6 \text{ k}\Omega$ (ver Figura III.7). Se realizó un barrido en amplitud utilizando los voltajes más bajos que permitía el generador de funciones empleado, (GW Instek GFG-8219A). Durante este procedimiento se observó que el offset de la señal de salida era significativamente mayor al esperado para una ganancia de 18. Por este motivo, se estudió también la dependencia del offset de salida en función del voltaje de entrada.

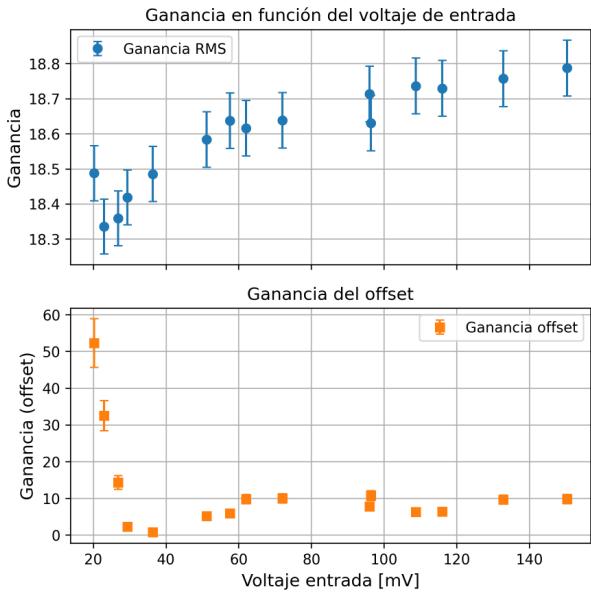


Fig. III.7. Arriba, el valor de G del amplificador para voltajes bajos; abajo, el valor de G_{offset} , calculado a partir de la división de la media de las señales.

Se observó que la ganancia efectiva de la señal de salida presenta una leve variación para tensiones de entrada en torno a 15 mV. Del gráfico de G_{offset} en función de V_{in} , se evidencia que la ganancia medida supera ampliamente el valor teórico esperado de $G = 18$.

Por último, se realizó un barrido en frecuencia con el objetivo de evaluar la respuesta del amplificador en dicho dominio (ver Figura III.8). Se utilizó una configuración similar a las anteriores, pero fijando la ganancia en $G = 1$ y aplicando una señal de entrada de $V_{\text{in}} = 100 \text{ mV}$.

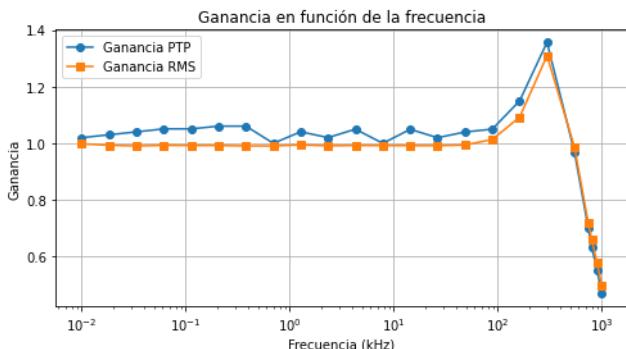


Fig. III.8

Se observó que el sistema presenta una respuesta adecuada dentro del rango de frecuencias de interés, aproximadamente entre el Hz y 100 Hz. Sin embargo, para frecuencias del orden de los MHz, la respuesta del sistema se degrada significativamente, evidenciando las limitaciones del AD623 en altas frecuencias.

Se concluye que el funcionamiento del amplificador instrumental es adecuado para señales de características similares a las de interés. Esto es consistente con la electrónica más avanzada que incorpora este tipo de amplificadores, logrando

especificaciones superiores en comparación con otros componentes activos más tradicionales.

IV. CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO

El dispositivo se integra en el esquema experimental de la figura II.1, comprendiendo desde la interfaz con los electrodos (etapa 2a) hasta el preamplificador (etapa 4), con especial énfasis en el amplificador de la etapa 2b, el cual ya fue caracterizado y se corroboró su correcto funcionamiento para voltajes bajos. Esto permite el registro y acondicionamiento de la señal previo a su ingreso al sistema de amplificación comercial. La construcción se divide en diferentes etapas:

IV-A. Fabricación de la placa

Como parte del desarrollo del sistema, se diseñó una placa que satisface los requerimientos del proyecto en cuanto a costo, dimensiones, peso y funcionalidad, sirviendo como base para la construcción y la unión de componentes. Esto brinda mayor robustez al armado respecto de la simple unión de cables y componentes. El diseño fue realizado en el software Proteus[8] y consiste, para cada sistema, en:

- **Amplificador diferencial:** pines del componente SMD por cada placa y sus conexiones para ganancia ajustable.
- **Seguidor de voltaje:** pines del componente SMD, donde cada op-amp tiene conectado su salida con su entrada inversora (configuración como buffer).

La Figura IV.1 muestra una imagen del proceso de diseño para cada componente.

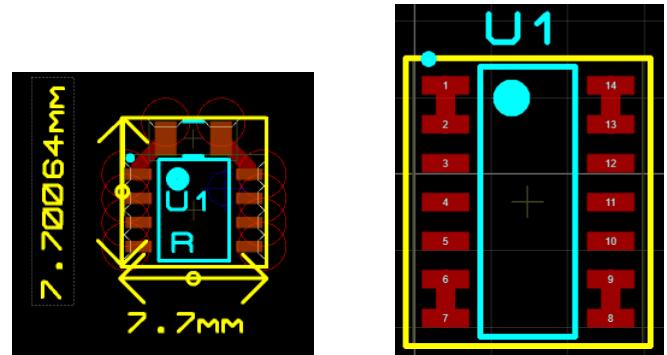


Fig. IV.1. Diseños del dispositivo para amplificación diferencial y seguimiento de voltaje.

El diseño fue transferido a placas de fenólico (espesor aproximado de 1,5 mm), la tinta del dibujo protege los lugares donde debe ir el circuito, el excedente se corre con ácido férrico. El método en detalle se explica en el apéndice. Impreso el circuito, los resultados para ambos casos se ven a continuación (Figura IV.4):

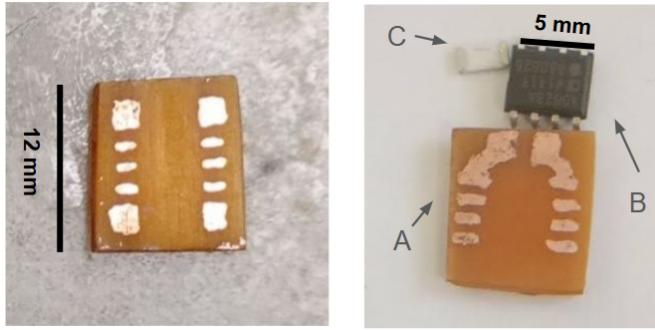


Fig. IV.2. Fotografía de la confección de ambas placas: a la izquierda, la correspondiente al seguidor de voltaje; a la derecha, la del amplificador diferencial. En la imagen se señalan: A) placa, B) componente SMD, C) resistencia SMD de 5,6 kΩ.

En el caso del amplificador diferencial, se diseñaron dos placas con el objetivo de procesar dos señales por placa. De este modo, tanto en la configuración de seguidor como en la de amplificación, es posible trabajar con un total de cuatro señales de forma simultánea.

Se observa que únicamente se conservaron las pistas correspondientes a las conexiones de interés, cumpliendo con los objetivos del diseño. El peso y las dimensiones de cada placa, incluyendo sus componentes, fueron de $(0,304 \pm 0,005)$ g y $(12 \pm 1) \times (11 \pm 1)$ mm², con un área aproximada de (132 ± 16) mm², para el seguidor de voltaje; y de $(0,244 \pm 0,005)$ g y $(10 \pm 1) \times (10 \pm 1)$ mm², con un área de (100 ± 14) mm², para el amplificador diferencial. Estas medidas se encuentran en un rango coherente, teniendo en cuenta las dimensiones del ave.

IV-B. Soldadura de componentes a la placa

Una vez fabricadas las placas, se procedió a la soldadura de los componentes activos (ver Figura IV.3). Se utilizó un TL074CD para el seguidor de voltaje y un AD623ARZ para el amplificador diferencial. El procedimiento consistió en aplicar previamente flujo sobre las pistas correspondientes, posicionar los pinos de los componentes sobre las pistas de cobre, y realizar la soldadura utilizando estaño Alloy 60/40 DIA 0.5mm Flux 2.2, una lupa binocular y un soldador de punta fina. Se debe prestar atención a evitar puentes de estaño entre terminales y a asegurar una buena unión mecánica en cada punto de soldadura.

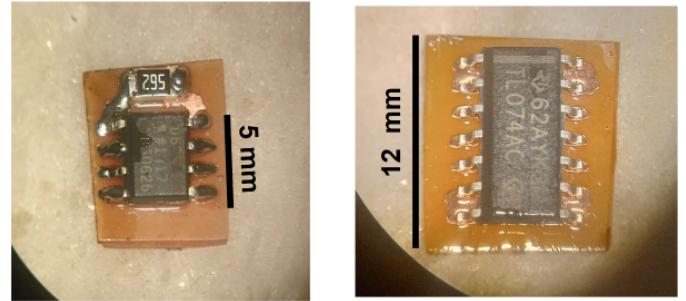


Fig. IV.3. Soldadura de los componentes a la placa.

Los pesos de las placas con componentes soldadas no variaron significativamente del peso antes informado.

IV-C. Armado de cable conector y soldadura cable conector-placa

Para realizar la conexión entre el amplificador conectado a los electrodos y el preamplificador, se fabricó un cable conector con Alambre Litz .06mm. Este se compuso de un trenzado principal y, como protección y blindaje electromagnético, un mallado. El trenzado fue realizado a partir de 6 cables para el seguidor y 8 para el amplificador diferencial. Para realizar los trenzados, se agruparon los cables en pares y se formaron trenzados de 3 y 4 hilos respectivamente.

El mallado se obtuvo a partir del recorte de un cable BNC, en la Figura IV.4 se ve una referencia de esto. Se abrió y saco el aislante del cable y posteriormente, fue cuidadosamente retirado el mallado para recuperar únicamente esta parte como elemento de protección. Este funciona como blindaje electromagnético de los conductores que conectan los electrodos con el amplificador.

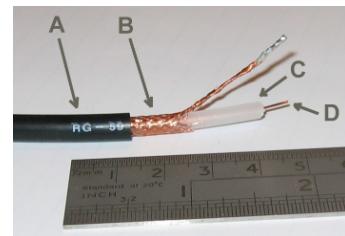


Fig. IV.4. Fotografia de cable BNC separando sus partes, A: Aislante, B: Mallado, C: Aislante, D: Señal

Una vez obtenida la malla y armado el trenzado de cables, se introdujo el trenzado dentro del mallado. Este paso se realiza con cuidado para evitar que los hilos del mallado dañaran el aislante de los cables, lo que podría generar una conexión no deseada entre el trenzado interno y la malla externa de protección.

Con el cable conector ya armado, se procedió a soldar los extremos de los conductores a la placa confeccionada previamente, respetando la siguiente disposición (Figura IV.5 y IV.6):

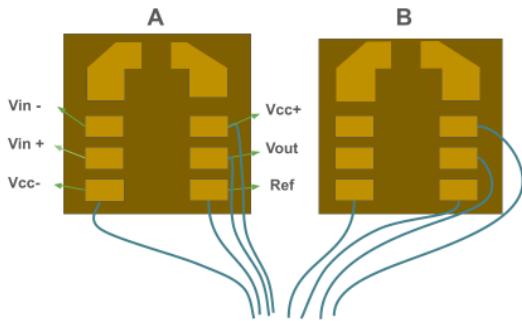


Fig. IV.5. Esquema de conexión entre el cable conector y la placa del amplificador diferencial. A: Primera placa con diseño impreso, B: segunda placa con diseño impreso espejado. Debajo, se observa el cable conector con el trenzado deshecho para permitir su conexión.

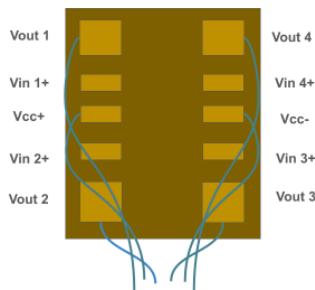


Fig. IV.6. Esquema de conexión entre el cable trenzado y la placa del buffer.

El método utilizado para soldar los microcables a la placa consistió en descubrir las puntas del cable trenzado utilizando un mechero, con el objetivo de eliminar el esmalte o aislamiento de los hilos conductores. Luego, se aplicó flujo sobre cada punta y se procedió a estañarlas.

Las puntas ya estañadas se soldaron a los sitios correspondientes de la placa, los cuales también estaban previamente estañados como parte del montaje inicial de componentes. En este proceso, se emplean soportes con pinzas tipo cocodrilo para sujetar la placa y pinza fina para manipular los microcables durante la soldadura. Así se logra la siguiente conexión (Figura IV.7)

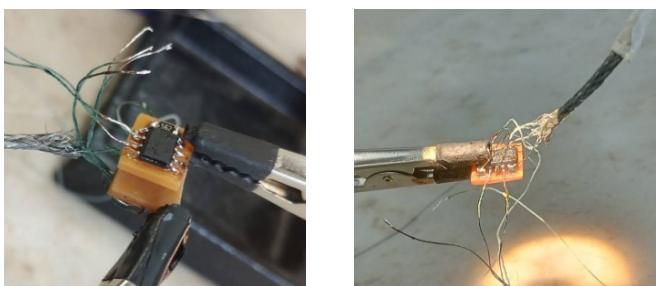


Fig. IV.7. Primero se ve el proceso de soldadura de los cables a una de las placas del amplificador diferencial. Segundo se ve el resultado para el seguidor de Voltaje.

IV-D. Pegado de conector a la placa y conexión conector-placa

Los conectores hembra y macho utilizados para establecer la conexión entre los electrodos y el componente (ver etapa 2 del esquema de la Fig.II.1), respectivamente, pertenecen a la marca Omnetics [9], especializada en la fabricación de conectores de alta precisión para aplicaciones fisiológicas. El procedimiento de fijación del conector Omnetics macho a la placa consiste para el dispositivo seguidor en marcar previamente la zona donde se ubicará el conector. Luego, se aplica una pequeña cantidad de adhesivo epóxico (Poxipol) con una aguja en el área señalada, se posiciona el conector y se refuerzan sus alrededores con más adhesivo para asegurar su firme sujeción. Posteriormente, se soldaron las señales de entrada (V_{in+}) a pinos específicos del conector Omnetics macho. Para ello, se aplicó flujo sobre los pinos seleccionados y se procedió a estañarlos. Luego, se prepararon cables cortados a la longitud necesaria, de modo que no quedara cable sobrante ni tensión mecánica en las conexiones. Tras retirar el aislamiento de los extremos de los cables, se estañaron sus puntas y se soldaron un extremo al pin correspondiente del conector, y el otro a la entrada del componente activo en la placa.

Tenemos entonces cinco conexiones que comunican señales desde los electrodos, a través de los conectores. Cuatro de ellas van a las entradas (V_{in+}) del seguidor y una quinta señal de referencia que va al trenzado sin procesar como muestra la Figura IV.8.

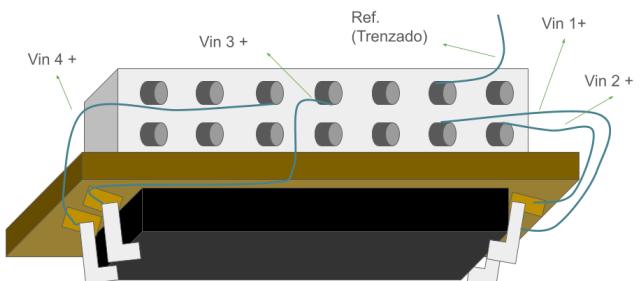
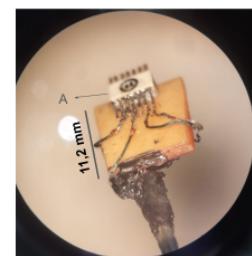


Fig. IV.8. Primero se ve el proceso de soldadura de los cables entre el conector y los pinos del TL074. Donde se señala, A: conector Omnetics. Segundo se ve una imagen ilustrativa del resultado final, que incluye TL074, placa PCB, conector y la representación de la disposición real de los cables en los pinos del conector.

En el caso del amplificador diferencial, el procedimiento se realizó en orden inverso debido a su diseño compuesto por dos placas. La mejor disposición mecánica se da cuando el conector Omnetics es ubicado en el centro entre ambas placas, ya que de otra forma el sistema no estaría equilibrado o la conexión al sujeto de prueba podría resultar incómoda. Esta configuración, con el conector entre las placas PCB, dificulta el acceso para soldar luego del pegado, por lo que se optó por soldar primero los cables al conector. Una vez completada esta etapa, el conector fue fijado con adhesivo a ambas placas, y finalmente se completaron las soldaduras de los extremos libres de los cables a los respectivos puntos de conexión de los componentes, evitando así la necesidad de puentear con cables entre placas. Luego de este procedimiento, contamos con 5 señales provenientes de los electrodos y que a través de los conectores llegan a los componentes. Correspondiéndole dos señales a cada amplificador diferencial, y siendo la quinta de referencia para ambos (ver Figura IV.9)

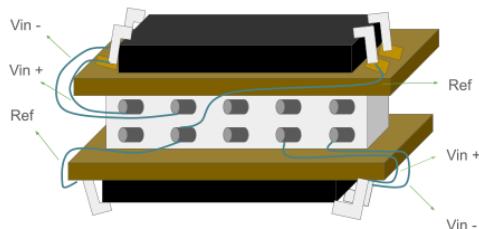
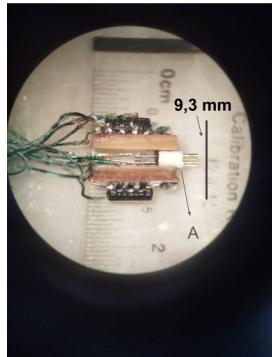


Fig. IV.9. Primero se ve el proceso de soldadura de los cables entre el conector y los pines del AD623. Donde se señala, A: conector Omnetics. Segundo se ve una imagen ilustrativa del resultado final, que incluye los AD623, placas PCB, conector y la representación de la disposición real de los cables en los pines del conector.

IV-E. Aislamiento

Por las características de los microcables utilizados, las conexiones pueden desplazarse fácilmente durante la manipulación del dispositivo, lo que puede provocar cortocircuitos o, en el peor de los casos, la rotura de los cables por torsión, lo que requiere reacondicionarlos y volver a soldarlos.

Para evitar estos inconvenientes, se realizó un trabajo previo de acondicionamiento, en el que se acomodaron los cables buscando que no se toquen las partes conductoras y que queden

lo más compactos posibles. Esto fue necesario debido a que una vez aislado, el dispositivo toma una forma casi definitiva respecto a lo realizado anteriormente ya que retirar el aislante seco puede romper las conexiones. Se utilizó un recubrimiento aislante el cual, tras una breve exposición al ambiente, puede esparcirse con facilidad sobre los cables, formando una capa protectora sin requerir herramientas adicionales. El método de aplicación consistió en tomar una porción considerable con un escarbadienes y esparcir el recubrimiento aislante cuidadosamente entre los cables, asegurando una cobertura uniforme y evitando aplicar producto en exceso. En relación con esto último debe remarcarse que, si bien este proceso aísla cables y componentes, a la vez que brinda mayor robustez a los dispositivos, implica un peso y volumen adicional. Balancear ambos aspectos es fundamental a la hora de llevar adelante este paso. La Figura IV.10 presenta imágenes del proceso descripto.

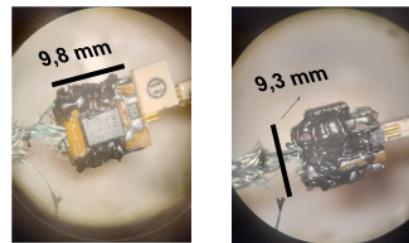


Fig. IV.10. Proceso de aislamiento. Se observa como primero se cubren las conexiones expuestas y luego se completa cuidando de no aplicar en exceso.

IV-F. Conexión a preamplificador y configuración para prueba de funcionamiento

Una vez finalizado el dispositivo, resta únicamente trabajar con el otro extremo del cable conector. En este extremo, las puntas deben ser descubiertas, estañadas y soldadas a conectores especiales que permitan una correcta conexión con el preamplificador comercial (etapa 4 del esquema en la Fig. II.1).

Para verificar el correcto funcionamiento del dispositivo se soldaron cables de cobre al final del cable conector. Junto con un conector Omnetics hembra, el cual, en vez de electrodos, contiene puntas de prueba realizadas por un estudiante anterior.

Estas pruebas se realizaron configurando los sistemas de la misma forma en que se hizo durante la caracterización previa, con la diferencia de que en lugar de emplear una placa protoboard, se utilizaban directamente las puntas y entradas de prueba para establecer las conexiones necesarias.

V. RESULTADOS

Los resultados de las pruebas de funcionamiento se observan en la Figura V.1

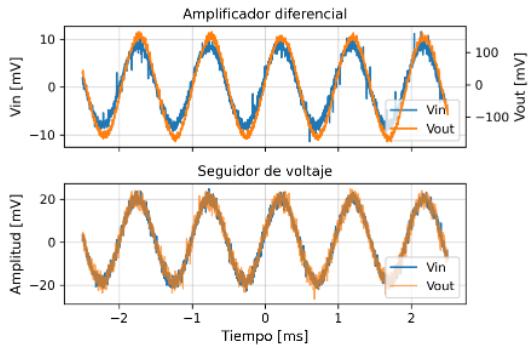


Fig. V.1. Respuesta del sistema amplificador a $V_{in} = 17 \text{ mV}$, con $V_{out} = 302 \text{ mV}$, correspondiente a una ganancia $G = 17,7$. En el caso del seguidor de voltaje, no se observa diferencia significativa en el valor eficaz (RMS), aunque la salida presenta mayor nivel de ruido.

Se observa que cada uno cumple su función y se notan los mismos fenómenos para voltajes bajos vistos en la caracterización. Se puede concluir que el proceso descripto no modificó el funcionamiento normal de los componentes eléctricos.

Los dispositivos en el estado alcanzado al finalizar este trabajo se muestran en las Figuras V.2 y V.3, donde se pone el foco en las dimensiones correspondientes a la etapa 2b. Las longitudes que se muestran en las imágenes como referencia corresponden a los promedios de 20 mediciones tomadas para cada dimensión en el programa ImageJ[10]. A su vez, se calculó el error estadístico a partir de las 20 mediciones para cada dimensión, pero se desprecia frente a errores experimentales como puede ser el paralelo de los objetos respecto a la regla a la hora de tomar las imágenes. Teniendo esto en cuenta se toma un error de 1 mm para cada longitud. Las longitudes estimadas fueron $(600 \pm 138) \text{ mm}^3$ para el dispositivo basado en TL074, y $(873 \pm 158) \text{ mm}^3$ para el basado en AD623. El error al estimar el volumen se obtuvo al propagar los errores de las longitudes. Ver Tabla I en el Apéndice.

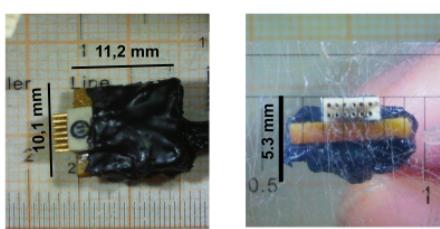


Fig. V.2. Resultado final. Dimensiones del dispositivo seguidor de tensión de 4 canales con TL074.

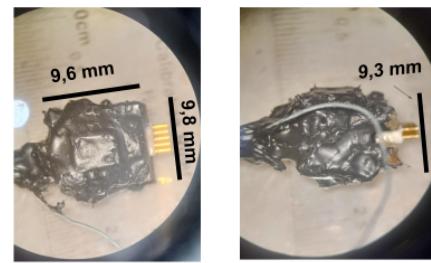


Fig. V.3. Resultado final. Dimensiones del dispositivo de doble amplificador diferencial con AD623.

En el mismo sentido, en la Figura V.4 la atención se centra en la dimensión longitudinal de la etapa 3 del esquema experimental, que corresponde a una longitud de $(40 \pm 2) \text{ cm}$ para el dispositivo basado en TL074, y de $(45 \pm 2) \text{ cm}$ para el basado en AD623. Estas medidas son aproximadas, ya que se evitó someter los dispositivos a tensiones innecesarias durante el proceso.



Fig. V.4. Resultados finales. Imagen superior: Dimensiones del dispositivo amplificador de tensión. Imagen inferior: Dimensiones del dispositivo seguidor de tensión

En cuanto a los pesos de los dispositivos, la forma de pesarlos en una balanza regular presenta ciertos desafíos, debido a que queremos conocer el peso del mismo al colgar desde el techo de la jaula y esto supone una normal variable sobre la superficie de la balanza, que incluye fuerzas debido a la sujeción del cable desde arriba. Se fija una cota máxima, concluyendo que el dispositivo con el componente TL074 posee un peso inferior al gramo y el del AD623 no supera los dos gramos.

VI. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todos los integrantes del Laboratorio de Sistemas Dinámicos del Departamento de Física por abrirnos las puertas, el buen ambiente de trabajo, los conocimientos brindados y la constante buena predisposición a resolver nuestras dudas. En el marco de este trabajo, agradecemos especialmente a la estudiante de doctorado Fiamma L. Leites por su colaboración en la etapa de aislamiento de la construcción de los dispositivos.

VII. CONCLUSIONES

Se caracterizaron 3 componentes electrónicos, entre los que se diferencian dos quadopamps (TL074 y TL084) y un

amplificador instrumental (AD623). Se corroboró su utilidad para ser empleados en el tratamiento de las señales de interés, frecuencias en el rango (1,100) Hz y voltajes en el orden de las decenas de milivoltios. En el caso de los seguidores, la caracterización permitió optar por el TL074 debido a su mejor desempeño respecto al TL084.

Se desarrollaron un sistema seguidor y otro amplificador para señales en el rango de milivoltios, logrando módulos funcionales y que cumplen, en diferentes grados, con los objetivos establecidos respecto a robustez, peso y dimensiones. En cuanto a robustez, ambos dispositivos son más resistentes respecto a conexiones directas, sin placas PCB o recubrimiento aislante. En cuanto al peso, el seguidor de voltaje presenta un valor inferior a 1 gramo, situándose dentro del rango admisible, mientras que el amplificador diferencial, con un peso entre 1 y 2 gramos, excede el umbral deseado y queda sujeto a revisión. Respecto a las dimensiones, el circuito basado en el TL074 exhibe un tamaño más optimizado, adecuado para su integración en sistemas compactos. Por otro lado, el módulo del amplificador de instrumentación tiene un tamaño aproximadamente un 45 % mayor que el seguidor de voltaje, con una diferencia de volumen respecto a éste de $\Delta V = 274 \pm 209 \text{ mm}^3$.

REFERENCIAS

- [1] A. Nieder and R. Mooney, The neurobiology of innate, volitional and learned vocalizations in mammals and birds, *Philosophical Transactions of Royal Society*.
- [2] Horowitz, P., Hill, W. (1978). *The art of electronics* (Vol. 109). Cambridge: Cambridge university press.
- [3] Young, B. K., Mindlin, G. B., Arneodo, E., Goller, F. (2017). Adult zebra finches rehearse highly variable song patterns during sleep. *PeerJ*, 5, e4052.
- [4] Low, P. S., Shank, S. S., Sejnowski, T. J., Margoliash, D. (2008). Mammalian-like features of sleep structure in zebra finches. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(26), 9081-9086.
- [5] Texas Instruments. TL074 Amplificador Operacional de Entrada JFET de Bajo Ruido. Hoja de datos, 2015. Disponible en: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl074.pdf>
- [6] TBS1052B Digital Storage Oscilloscope Datasheet, 2015. Disponible en:
- [7] Analog Devices. AD623 Amplificador de Instrumentación, Rail-to-Rail. Hoja de datos, Rev. F, 2019. Disponible en: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD623.pdf>
- [8] Proteus Design Suite. Labcenter Electronics Ltd. Disponible en: <https://www.labcenter.com/>
- [9] Omnetics Connector Corporation. Disponible en: <https://www.omnetics.com/>
- [10] Rasband, W.S. ImageJ. National Institutes of Health, USA. Disponible en: <https://imagej.net/ij/>

APÉNDICE

Este apéndice describe el procedimiento para realizar una impresión de circuito sobre una placa de fenólico con baño de

cobre simple faz. La idea es proteger con tinta aquellos sectores en los cuales estamos interesados en que haya conexión (el dibujo de nuestro circuito) y corroer el resto del cobre de la placa. Los pasos a seguir se detallan a continuación.

1) Imprimir el circuito en hoja A4. 2) Pegar el papel de transferencia con cinta de papel sobre el dibujo del paso 1), tal que el lado que transfiere esté expuesto. Imprimir nuevamente el diseño del circuito sobre el papel de transferencia. 3) Cortar un rectángulo de simple faz fenólico, limpiar con virulana y alcohol isopropílico. 4) Envolver firmemente el papel del paso 2) en la placa del paso 3). 5) Planchar durante 15 minutos sobre el papel del lado que se encuentra el circuito para transferir la tinta a la placa; realizar en intervalos de 40 s planchando y 15 s de descanso. 6) Preparar un recipiente con ácido férrico, en contacto con una fuente de calor (como puede ser otro recipiente exterior con agua caliente). 7) Colocar la placa en el ácido, remover cada tanto y renovar el agua caliente o la fuente de calor, este proceso dura 20 minutos, o lo necesario hasta que todo el cobre sea corroído.

Se recomienda dada una mala transferencia de la tinta a la placa, luego del planchado en el paso 5), corregir con una fibra indeleble punta fina.

Objeto	Largo (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)	Volumen (mm ³)
Seguidor	$11,2 \pm 1,0$	$10,1 \pm 1,0$	$5,3 \pm 1,0$	599 ± 138
Amplificador	$9,6 \pm 1,0$	$9,8 \pm 1,0$	$9,3 \pm 1,0$	873 ± 158

TABLA I: Dimensiones y volumen con propagación de error considerando $\Delta L = 1 \text{ mm}$. Las dimensiones largo, ancho y alto pueden consultarse en las Figuras V.2 y V.3.