

REDUCCIÓN DE LA CAPACIDAD DE ENTRADA DE UN AMPLIFICADOR MEDIANTE TÉCNICAS DE BOOTSTRAP

Valentín A. Catacora, Federico N. Guerrero, Enrique M. Spinelli

Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales LEICI (CONICET - UNLP), Calle 48 y 116, CC 91 (1900), La Plata, Buenos Aires, Argentina.

E-mail: valentin.catacora@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Los amplificadores operacionales (AO) configurados como seguidores de tensión, es decir con ganancia unitaria, son ampliamente utilizados en instrumentación como primera etapa o “*front-end*” para conseguir altas impedancias de entrada. Una de sus aplicaciones es la medición de potenciales biológicos mediante electrodos superficiales. Estas señales son de baja amplitud, poseen alta impedancia de salida y su banda espectral alcanza hasta las centenas de Hz [1].

La impedancia de entrada de un AO de tecnología CMOS o JFET puede ser muy alta, del orden de los tera-ohms ($10^{12} \Omega$), pero decrece con la frecuencia debido a sus capacidades de entrada. Por tratarse de un circuito con entrada diferencial, la capacidad de entrada de un AO se compone por la capacidad de modo diferencial y la capacidad de modo común, ambas del orden de los pico-farads (10^{-12} F). La primera no influye significativamente en circuitos realimentados porque está definida sobre la tierra virtual del AO, pero la capacidad de modo común sí es un factor limitante. Una solución para reducir sus efectos es la técnica de bootstrap de fuente, que consiste en que todos los nodos del amplificador, incluyendo sus tensiones de alimentación, adopten incrementalmente el potencial de la entrada. De este modo, no existen cambios de potencial sobre las capacidades y sus efectos son eliminados. Esta técnica permite conseguir capacidades de entrada por debajo de las décimas de pF [2-5].

En este trabajo se presenta la caracterización experimental de un seguidor de tensión implementado con un amplificador operacional comercial y los resultados al implementar el bootstrap de fuente. Se describen especialmente las técnicas de medida para las pequeñas capacidades resultantes. En primer lugar se efectuaron medidas de la capacidad de entrada de modo común (C_{IN}) del AO y posteriormente se corroboró su reducción al implementar un circuito de bootstrap de fuente. Las mediciones se realizaron insertando una impedancia Z_S conocida en serie con la entrada y caracterizando el divisor de potencial formado por Z_S y C_{IN} .

La medición de las pequeñas capacidades C_{IN} requirió especiales cuidados en el sistema de medida. Los ensayos se llevaron a cabo haciendo uso de una guarda conectada a la salida del amplificador para evitar el acople capacitivo entre su entrada y otras pistas del circuito impreso. La etapa de alimentación del circuito se implementó mediante una fuente regulada basada en baterías y las mediciones se realizaron con el sistema completo dentro de un gabinete metálico conectado a tierra a modo de blindaje [6].

PARTE EXPERIMENTAL

Los modelos utilizados para las mediciones de capacidad de entrada con y sin bootstrap de fuente se muestran en la Figura 1.

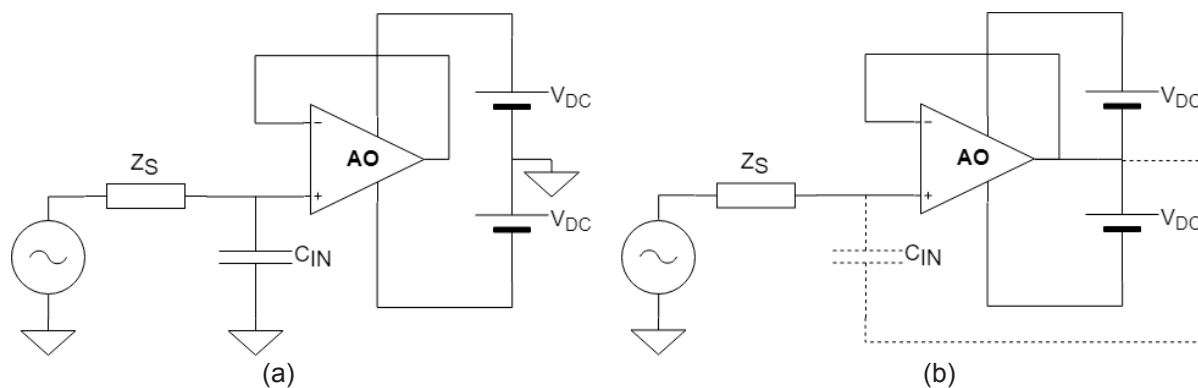


Figura 1. Esquemas representativos de los sistemas.

La Figura 1-a corresponde a un circuito seguidor convencional alimentado con tensiones $\pm V_{DC}$. El circuito de la Figura 1-b incorpora el bootstrap de las tensiones de alimentación, que en este caso resultan:

$$V_+ = V_{IN} + V_{DC} \quad V_- = V_{IN} - V_{DC} \quad (1)$$

Por lo tanto, incrementalmente estos nodos toman el valor de la tensión de entrada haciendo nula la diferencia de potencial sobre las capacidades del circuito, en particular sobre C_{IN} , logrando así neutralizar sus efectos.

$$v_+ = v_{IN} \quad v_- = v_{IN} \quad (2)$$

El AO bajo estudio fue el OPA376 de Texas Instruments, que posee características apropiadas para medición de biopotenciales, como bajo nivel de ruido, baja corriente de polarización, alto CMRR, excursión *rail-to-rail* entrada/salida y bajo consumo.

La impedancia Z_S utilizada para el divisor de tensión fue un resistor de 10 M Ω dando como resultado en los modelos un filtro pasa-bajos de un polo seguidos de una ganancia unitaria.

La etapa de alimentación se diseñó a partir de dos baterías de gel recargables de 6.3 V para evitar interferencia proveniente de la red de distribución eléctrica. Además, para que las mediciones sean consistentes, se tuvo el cuidado de suministrar la misma tensión de alimentación al AO en ambos casos de estudio, ya que el valor de la capacidad C_{IN} puede variar con la tensión de alimentación. Por lo tanto, se implementó una fuente partida regulada por dos diodos zener de 2.5 V seguidos por dos operacionales LM358 configurados como buffer, de manera que al implementar el bootstrap no haya más modificaciones en el circuito que conectar la salida del operacional con el punto medio entre los diodos. Se muestran en la Figura 2 los esquemáticos implementados para las mediciones.

Al momento de diseñar el circuito impreso se incorporó una guarda en la entrada no-inversora del operacional bajo estudio (Figura 3). Esta guarda permite evitar acoplamiento capacitivo de la entrada del AO con las demás pistas de la placa al conectarla a la salida del mismo dada su baja impedancia. Para validar su funcionamiento, se implementó el plano

de guarda sin conexión a ningún nodo del circuito, dando así la posibilidad de comparar las mediciones con y sin ella.

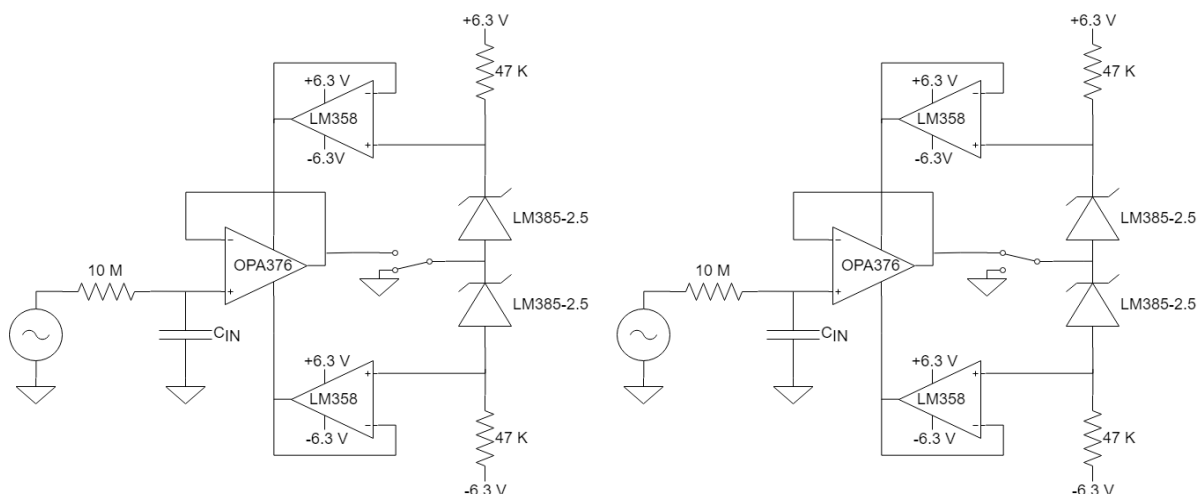


Figura 2. Esquemáticos de los circuitos implementados para las mediciones sin bootstrap (izquierda) y con bootstrap (derecha).

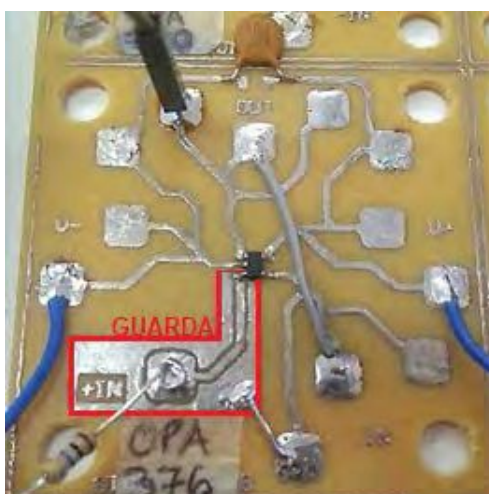


Figura 3. PCB con el AO utilizado y la guarda de protección.

Pruebas de banco

Las pruebas de banco comenzaron con la medición de la capacidad de entrada C_{IN} del operacional configurado como buffer alimentado a ± 2.5 V. Para ello, se inyectó una señal sinusoidal y se caracterizó la respuesta en frecuencia. Como el modelo consta de un divisor RC y un amplificador de ganancia unitaria, se ajustó la frecuencia del generador para encontrar la atenuación de 3 dB y el desfase de 45° . Sabiendo que esta frecuencia de

corte es $f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC_{IN}}$ y que R es de valor conocido, es posible estimar el valor de C_{IN} . Esta medición se realizó primero sin guarda, y luego con la misma conectada a la salida del AO dando como resultado los valores de la Tabla 1. Puede observarse que la guarda reduce C_{IN} en aproximadamente 0.54 pF, provenientes de acoplamientos a trazos del circuito impreso.

	Sin guarda conectada	Con guarda conectada
Frecuencia de corte – f_{3dB}	4.50KHz	5.30KHz
Capacidad de entrada – C_{IN}	3.54 pF	3.00 pF

Tabla 1. Resultados de las mediciones de C_{IN} con y sin guarda.

La siguiente prueba fue realizar las mismas mediciones con la implementación del bootstrap y corroborar la reducción de la capacidad C_{IN} . Sin embargo, al medir la señal de salida se encontró que el circuito presentaba oscilaciones, es decir, era inestable. Esto es posible ya que contiene una realimentación positiva a través de las fuentes de alimentación. Para conseguir un circuito estable se adoptó una solución sencilla que consiste en agregar una resistencia en serie (R_Z) a cada diodo zener, buscando eliminar la oscilación a cambio de resignar la eficiencia del bootstrap. Las tensiones de alimentación ya no seguirán exactamente a la tensión de entrada, sino que se verán afectadas por un factor α ligeramente menor que uno dado por el divisor resistivo [7].

$$v_+ = \alpha v_{IN} \quad v_- = \alpha v_{IN} \quad \alpha = \frac{47 \text{ K}\Omega}{R_Z + 47 \text{ K}\Omega} \quad (3)$$

Por lo tanto, la capacidad ya no se reducirá infinitamente y se deberá adoptar un factor de reducción en función del valor de la resistencia elegida¹. En estas condiciones, la capacidad de entrada resulta:

$$C_{bootstrap} = C_{IN} (1 - \alpha) \quad (4)$$

Se verifica que para R_Z nulo, el coeficiente α resulta unitario y por ende la capacidad con bootstrap se anula. Buscando reducir C_{IN} aproximadamente a un 10% de su valor, se adoptó $R_Z=3.3 \text{ K}\Omega$. El nuevo circuito es mostrado en la Figura 4.

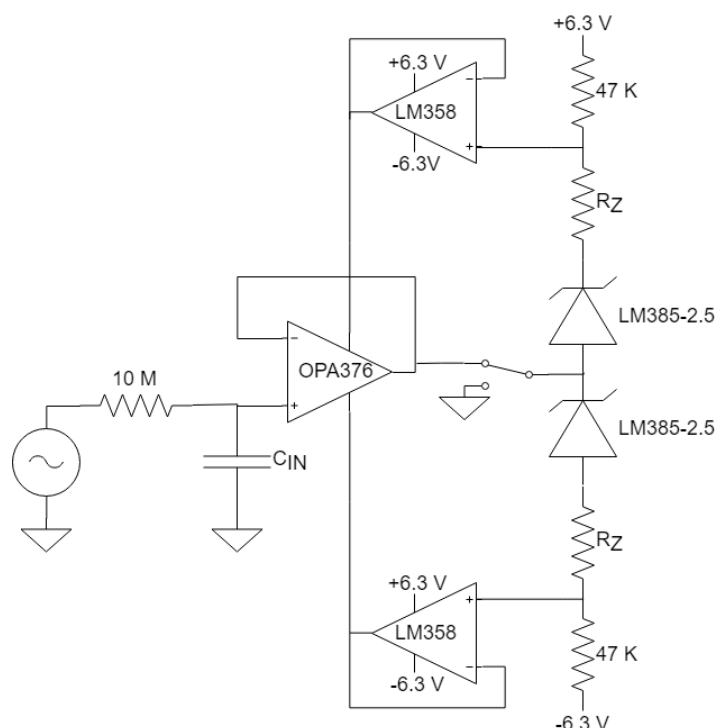
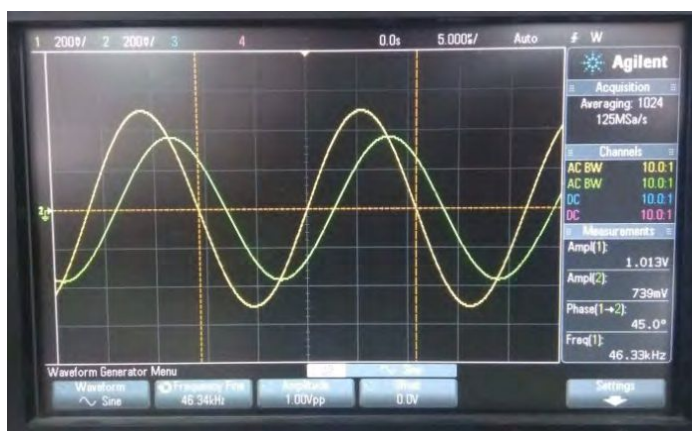


Figura 4. Circuito final utilizado para el bootstrap de fuente.

Repitiendo la medición de C_{IN} con el generador de señales y midiendo la frecuencia de corte, se verificó la reducción dando como resultado una capacidad de entrada de 0.34 pF . En la Figura 5-a se muestra el resultado de la medida, la cual fue efectuada haciendo uso de la guarda de protección, y en la Figura 5-b el prototipo construido para los

¹ Se aclara que la reducción infinita de capacidad es un caso ideal, ya que aún sin el resistor colocado existe una pequeña resistencia serie al diodo debido a sus propias características constructivas y a la de los conductores.

ensayos. Este cuenta con sócalos para cambiar los resistores junto con los diodos y pines para conectar la alimentación al AO. También posee pines que permiten fácilmente conectar el nodo entre los diodos a tierra, o conectarlo a la salida del AO.



(a)



(b)

Figura 5. (a) Captura de la pantalla del osciloscopio donde se observa la tensión de entrada y de salida del circuito con bootstrap. (b) Prototipo construido para los ensayos.

Las medidas anteriores se realizaron utilizando un osciloscopio. Para verificar hasta qué frecuencia es válido el modelo de primer orden asumido, y al mismo tiempo las medidas de C_{IN} , se utilizó el analizador de señal dinámico 35670A de Agilent, que permitió relevar la respuesta en frecuencia del sistema con y sin bootstrap.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 6 puede verse la respuesta del sistema sin bootstrap, donde la frecuencia de corte toma el valor que se predijo anteriormente. También puede observarse que el sistema se comporta como de primer orden hasta decenas de KHz. Si bien queda en discusión qué ocurre con el AO y su C_{IN} a altas frecuencias, la representación del modelo es satisfactoria en la banda de interés de los potenciales biológicos, ya que estos alcanzan a lo sumo centenas de Hz.

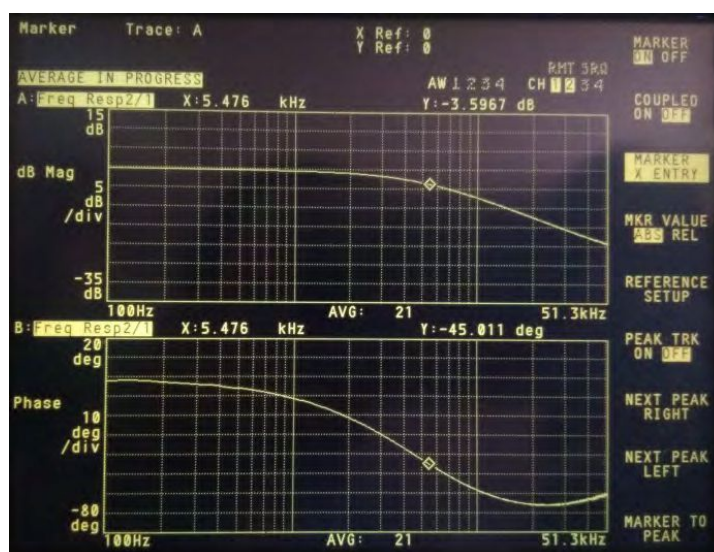


Figura 6. Respuesta en frecuencia del sistema sin bootstrap.

De igual manera se caracterizó el sistema con bootstrap de fuente obteniendo los resultados de la Figura 7, en donde verifica la frecuencia de corte calculada anteriormente. A su vez, se

verifica que el sistema corresponde a uno de primer orden, principalmente en la banda de interés ya que posee un comportamiento constante tanto en módulo como en fase.

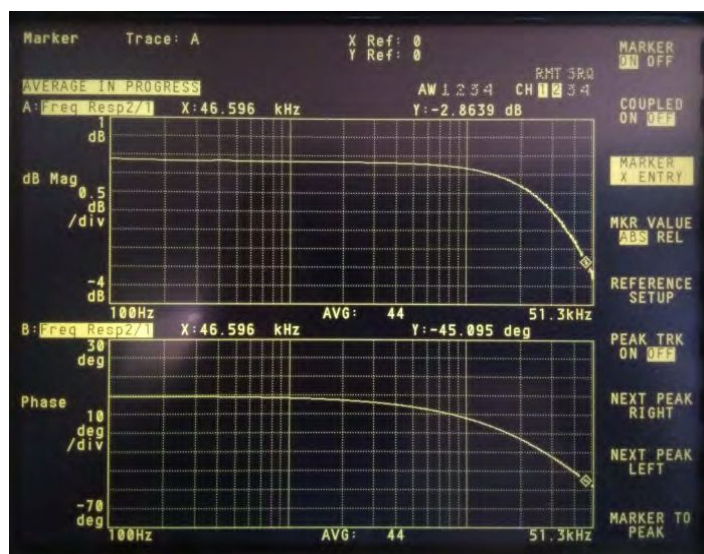


Figura 7. Respuesta en frecuencia del sistema con bootstrap.

CONCLUSIONES

Pudo realizarse una caracterización de la capacidad de entrada de modo común del amplificador operacional OPA376, obteniendo valores que acuerdan con los reportados por el fabricante.

El circuito con bootstrap de fuente puede presentar problemas de estabilidad y una forma simple de solucionarlo es resignando su eficiencia en la reducción de C_{IN} . Para el AO utilizado se consiguió un circuito estable que reduce la capacidad de entrada al 10 % de su valor.

Se llevaron a cabo medidas de protección para las mediciones como blindar el sistema completo montado dentro de un gabinete metálico, implementar una guarda de protección en el circuito impreso y resolver la etapa de alimentación con baterías recargables reguladas.

Se logró validar las mediciones tomadas con el osciloscopio haciendo uso de un analizador de señales, donde era posible obtener la respuesta en frecuencia en un ancho de banda suficiente.

Luego de la inserción en el tema de estudio, como línea a futuro, se profundizará en el análisis de estabilidad de la técnica de bootstrap de fuente junto con diferentes aplicaciones a electrodos capacitivos para la medición de biopotenciales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. G. Webster, "Theorigin of biopotential," en *Medical Instrumentation: Application and Design*, 3rd ed., New York: Wiley, 1998.
- [2] J. M. Kootsey and E. A. Johnson, "Buffer amplifier with femtofarad input capacity using operational amplifiers," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. BME-20, pp. 389-391, 1973.
- [3] S. Gagne and D. Poussart, "Recordings of bioelectric potentials with glass microelectrodes: limitations of unity-gain follower with buffer," *IEEE Trans. On Biomed. Eng.*, vol.23, pp. 81-83, Jan. 1976.
- [4] P. Bergveld, "Alternative Design of a Unity-Gain Follower with Buffer," *IEEE Trans. On Biomed. Eng.*, vol. BME-25, pp. 567-568, 1978.
- [5] Š. Lányi and M. Pisani, " A High-Input-Impedance Buffer," *IEEE Trans. On Circuits and Systems – I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 49, no. 8, pp. 1209-1211, 2002.

- [6] E. Spinelli and M. Haberman, "Insulating electrodes: a review on biopotential front-ends for dielectric skin-electrode interfaces," *Physiol. Meas.*, vol. 31, no. 10, pp. 183-98, 2010.
- [7] F. Guerrero and E. Spinelli, "A Two-Wired Ultra-High Input Impedance Active Electrode," *IEEE Trans. On Circuits and Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 437-445, 2018.