

Caracterización de los Circuitos de la Etapa de Acondicionamiento de Señal de un Electroencefalógrafo

A. Martínez¹, R. M. Higuera¹, T. J. Contreras¹ y V. H. Ortiz^{1*}

Tecnológico Nacional de México-Campus Ixtapaluca, Ixtapaluca, Estado de México, México
**victor.ortiz@tesi.edu.mx*

Resumen

Caracterizar circuitos eléctricos para un electroencefalógrafo es de suma importancia para conocer el error entre lo experimental y su simulación correspondiente. Se utilizaron métodos dinámicos como son: *Monte Carlo* y *Worst-Case*, para un mejor rendimiento del circuito. El electroencefalógrafo es un circuito que llega ocasionar problemas en la implementación ya que se presenta ruido, que puede originar una mala lectura y, por lo tanto, un mal diagnóstico. Se diseñaron las etapas de pre-amplificación, filtrado y amplificación final. Para la caracterización de los circuitos se utilizó un análisis de *Monte Carlo* y *Worst-Case*, en todas las etapas de diseño. En el método de *Monte Carlo* el valor de los componentes es similar a los utilizados en la simulación, en el caso del *Worst-Case*, con una tolerancia del 5% nos presenta valores análogos a los reales. Al utilizar métodos dinámicos nos ayuda en mejorar el diseño de un electroencefalógrafo por medio de la caracterización de los circuitos. Los métodos utilizados nos arrojaron valores similares a los experimentales, por lo cual el diseño propuesto es adecuado para usarlo en adquisición de señales electroencefalográficas.

Palabras clave: Caracterización, Electroencefalógrafo, Monte Carlo, Worst-Case.

1 Introducción

La caracterización de circuitos eléctricos es de suma importancia para conocer el error entre lo experimental y su simulación correspondiente. Existen dos tipos de análisis: el estacionario y el dinámico. Aunque algunos resultados se limitan al uso del análisis estacionario, el análisis dinámico proporciona una mejor respuesta del rendimiento del circuito, ya que realiza diferentes cambios en los valores de los componentes pasivos del mismo [1].

Para realizar el análisis dinámico de un circuito existen dos métodos. El primer método está basado en la estadística, que determina las diferentes respuestas del circuito variando aleatoriamente los valores de sus componentes electrónicos dentro de su rango de tolerancia [2]. Al utilizar el análisis Monte Carlo, se varía cada valor del componente dentro de ese intervalo para obtener así las posibles respuestas del circuito, además de un histograma que proporciona los valores máximos, mínimos y la media resultante [3]. El segundo método, denominado *Worst-Case*, es el más utilizado por los diseñadores de circuitos. Este se basa en la simulación del circuito con cada componente en sus límites de tolerancia, dando el resultado menos apropiado para el rendimiento del circuito [4]. Al final se obtiene la respuesta del circuito bajo las peores condiciones y su respuesta nominal, lo que permite obtener el porcentaje de variación entre ambas, además de la variación de cada uno de los componentes del circuito.

Existen diferentes trabajos referentes al uso de los métodos anteriormente mencionados. Por ejemplo, Huang et al., en su trabajo publicado en 2015 [5], utilizan el método Monte Carlo para estimar el rendimiento del amplificador de instrumentación (in-amp), el cual es estabilizado por un *chopper* de bajo ruido. Este circuito es utilizado en un electroencefalógrafo (EEG), el cual requiere una alta impedancia de entrada y alto rechazo en modo común para las entradas correspondientes a los electrodos, así como bajo voltaje suministrado para dispositivos portátiles. En ese trabajo, se realizaron cien simulaciones tipo Monte Carlo para analizar la impedancia de los electrodos y cien para analizar

el rechazo en modo común, donde se determinan 110 dB de esta última, considerando $1.32 \mu\text{W}$ en una fuente de 1.2 V. En el trabajo de Habibzadeh et al., 2020, [6] utilizan un amplificador operacional estabilizado por un *chopper* con un alto rechazo en modo común, para reducir el ruido entre los electrodos secos y el amplificador. Para analizar su rendimiento se realizan doscientas simulaciones de Monte Carlo, determinando 6.9 dB de desviación estándar en el rechazo en modo común. Pakdel y Faraji, 2018, realizan mil simulaciones del análisis Monte Carlo de un amplificador operacional para conocer la ganancia máxima y amplificar la señal de EEG; los resultados obtenidos validan la robustez del amplificador propuesto y determinan una ganancia de 2.34 [7]. Por otro lado Liu et al., en el trabajo publicado en el 2002, utilizan el método Monte Carlo para comparar el EEG y la magnetoencefalografía (MEG), por medio de simulaciones se estudian por separado, así como su combinación. Para cada prueba se utilizan diferentes modelos de ubicaciones de fuentes, tamaños y orientaciones, donde se determina que la combinación de ambos estudios proporciona datos más puntuales sobre el número de sensores utilizados [8].

El análisis *Worst-Case* identifica aquellas combinaciones de valores de los componentes que ocasionan valores extremos en el rendimiento de circuitos. Tal es el caso de [9], donde es utilizado para determinar la dimensión del diseño de un circuito integrado, con un proceso de optimización determinista basado en las distancias del peor caso relacionado junto a las variaciones del proceso de fabricación. Para el desarrollo se elige el análisis *Worst-Case* en lugar del Monte Carlo, ya que este último involucra miles de simulaciones y un costo elevado de tiempo de cómputo.

En los trabajos antes mencionados, los métodos Monte Carlo y *Worst-Case* son utilizados para la caracterización de un componente en específico o para un circuito integrado. Sin embargo, la caracterización de las etapas de acondicionamiento de señal de un electroencefalógrafo es de suma importancia debido a que la amplitud de las señales de EEG es muy pequeña (en el rango de los microvolts), lo que las hace susceptibles al ruido.

En este trabajo se presenta el proceso correspondiente a la caracterización de los circuitos de las tres primeras etapas del acondicionamiento de una señal electroencefalográfica, por medio de diversas simulaciones de los análisis Monte Carlo y *Worst-Case*, en el software *ORCAD Lite*. Las etapas analizadas son pre-amplificación, filtrado y amplificación final.

2 Materiales y Métodos

2.1 Monte Carlo y *Worst-Case*

Cada componente eléctrico discreto o semiconductor dada su naturaleza pueden presentar variaciones en sus características de diseño y estas se ven reflejadas en el parámetro llamado tolerancia. Estos dispositivos al trabajar en conjunto en un circuito, generan que el efecto de esas tolerancias se vaya sumando, provocando desviaciones significativas en la respuesta esperada del circuito. Dados estos efectos es posible implementar análisis que permitan conocer esos rangos de variación con la finalidad de caracterizar el sistema, lo cual es muy importante en la medición de bioseñales, para poder diferenciar cuales variaciones son producto del sistema de medición y cuales corresponden al sistema que se está midiendo, en este caso señales electroencefalográficas. Monte Carlo permite hacer análisis estadísticos para calcular la respuesta de los componentes mediante la variación aleatoria de sus parámetros y respetando la tolerancia de estos. Los valores generados siguen una distribución estadística definida. El análisis del circuito puede realizarse en corriente directa (*CD*), corriente alterna (*CA*) o en transitorios, y es necesario repetir un número específicos de veces (entre cientos y miles de ejecuciones), para generar con cada ejecución un nuevo conjunto de valores de parámetros de componentes o modelos derivados aleatoriamente. Entre mayor sea el número de ejecuciones, mayor las posibilidades de que cada valor del componente con su rango de tolerancia sea usado para la simulación. Monte Carlo, en efecto, predice la robustez o rendimiento de un circuito variando los valores de los componentes o parámetros del modelo hasta los límites de tolerancia especificados. Otra herramienta de análisis es la llamada *Worst-Case*, la cual es utilizada para identificar los componentes más críticos que afectarán el rendimiento del circuito. Inicialmente, se ejecuta un análisis de sensibilidad en cada componente con su tolerancia

correspondiente. El valor del componente se empuja efectivamente hacia sus dos límites de tolerancia en un pequeño porcentaje de su valor para ver qué límite tendría el mayor efecto en el resultado del peor de los casos. Luego se realiza un análisis del peor caso configurando todos los componentes en sus valores límites de tolerancia que se identificaron en el análisis de *Worst-Case*. Para reducir el número de ejecuciones de simulación, las funciones de clasificación se pueden utilizar para detectar diferencias con respecto a la salida nominal del peor de los casos, como diferencias mínimas, máximas o de umbral[10, 3].

2.2 Análisis Monte Carlo

Se diseñó un circuito para la adquisición de señales electroencefalográficas que consta de tres etapas. La primera etapa es la de pre-amplificación, la cual es implementada con un amplificador de instrumentación; la segunda etapa es la de filtrado y esta formada por un filtro tipo pasa banda y la tercera etapa, es una amplificación final con una ganancia definida, como se muestra en la Fig. 1.

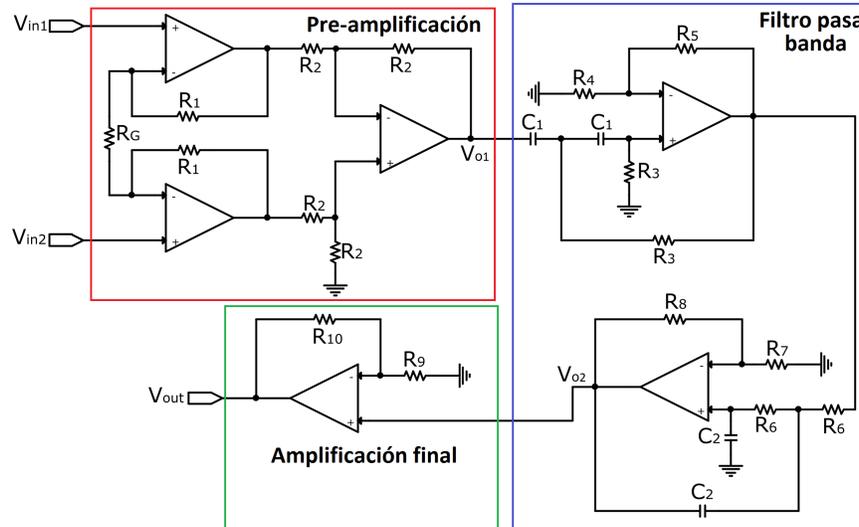


Fig. 1. Etapas que componen el acondicionamiento de señal del electroencefalógrafo.

Se realizó el análisis de Monte Carlo usando el programa *ORCAD Lite (Pspice)*. Como primer paso se asignan los valores de cada uno de los elementos pasivos (capacitores y resistores), así como los valores de fuentes de alimentación y magnitud de la señal de entrada. Se asignan los valores de tolerancia a utilizar de cada uno de los componentes pasivos, para este caso se utilizó una tolerancia de 5%. Los parámetros que se utilizaron en la simulación son, para el caso de la etapa de pre-amplificación y amplificación, se realiza una simulación en el dominio del tiempo (simulación transitoria). Los parámetros a configurar son tiempo de muestreo ($1 \mu s$) y tiempo en cuando termina la simulación (67 ms). En caso de la etapa de filtrado se realiza una simulación en el dominio de la frecuencia (simulación CA). Los parámetros a configurar son frecuencia de inicio (1 mHz), frecuencia final (1kHz), número de pasos (10000) y tipo de barrido en CA (lineal). En ambos tipos de simulaciones (transitoria o CA) se habilita la opción de Monte Carlo/*Worst-Case*. Primero se indica la variable de salida de cada una de las etapas. Después se elige el tipo de análisis, en este caso Monte Carlo. Se utiliza una distribución uniforme y se elige la opción (la mayor diferencia nominal de Y_{max}). Por último se configura el número de simulaciones a correr (1000). En estas simulaciones también se especifica una temperatura de trabajo, en este análisis se establece en $27^\circ C$. Una vez que se corre la simulación, el software elige valores aleatorios de los componentes dentro de los rangos de tolerancia establecido, este paso se repite el número de

simulaciones establecidas previamente (1000). De estas simulaciones se obtienen histogramas (Fig. 1) y los datos estadísticos de los resultado que obtuvo el programa.

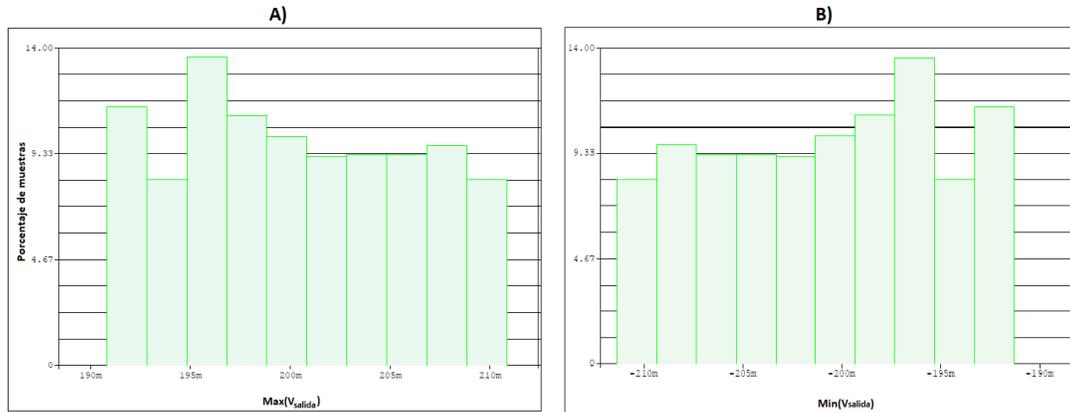


Fig. 2. Histogramas resultantes del análisis de Monte Carlo, para componentes electrónicos con tolerancia al 5 %.

2.3 *Análisis Worst-Case*

Para el análisis *Worst-Case* se utilizan los pasos descritos en el análisis de Monte Carlo desde el armado de circuito hasta establecer los parámetros de simulación. La diferencia de este análisis radica en que el software selecciona, valores máximos (Hi, +5%) o mínimos (Low, -5%) de tolerancias para los componentes y corre la simulación (transitoria o CA). Y como resultado obtenemos una gráfica con los valores nominales.

3 Resultados y Discusión

La etapa de pre-amplificación se implementó con un in-amp INA128, donde el valor R_1 esta preestablecido en 25 k Ω . La amplitud de las ondas cerebrales varía entre los 5 μV y 300 μV , tomando como referencia la amplitud máxima y una ganancia de 333.33 se cálculo el valor de $R_G = 150.45 \Omega$, dando como resultado una señal de salida con amplitud de 200 mV. El valor que se utilizó en la simulación y en la parte experimental fue de 150 Ω , valor más cercano al calculado. Se realizó un análisis Monte Carlo, donde se realizaron 1000 simulaciones, en la Fig. 3 a) se muestran los resultados tomando en cuenta el voltaje mínimo de la señal de salida de la etapa de pre-amplificación, dando como resultado una media de -200.08 mV y una mediana de -200.54 mV. En la Fig. 3 b) se muestra los resultados tomando en cuenta el voltaje máximo dando como resultado una media de 200.34 mV y una mediana de 200.04 mV. La variación máxima y mínima, tomando en cuenta la tolerancia de los componentes pasivos, es de 5.24 % y -4.74 % respectivamente (Fig. 3 c)). El filtro pasa-banda se implemento con el circuito integrado TL074, el cual cuenta con cuatro amplificadores operacionales en un solo chip. El ancho de banda de las señales de EEG se encuentra de 0.1 Hz a 35 Hz. El filtro pasa-altas se diseño tomando en cuenta una frecuencia de corte de 0.1 Hz y una ganancia del filtro de 1.58, se obtuvieron los siguientes valores, $C_1 = 10 \mu\text{F}$, $R_3 = 159.15 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 1 \text{ k}\Omega$ y $R_5 = 580 \Omega$. Debido a que no hay valor comercial de R_3 se utilizaron dos resistores en serie de 150 k Ω y 10 k Ω y en el caso del resistor R_5 se conectaron dos resistores en serie de 560 Ω y 22 Ω . El filtro pasa-bajas se diseño tomando en cuenta una frecuencia de corte de 35 Hz y una ganancia del filtro de 1.58, se obtuvieron los siguientes valores, $C_2 = 10 \mu\text{F}$, $R_6 = 454.72 \Omega$, $R_7 = 1 \text{ k}\Omega$ y $R_8 = 580 \Omega$. Debido a que no hay valor comercial de R_6 se utilizaron dos resistores en serie de 390 Ω y 68 Ω y en el caso del resistor R_8 se conectaron

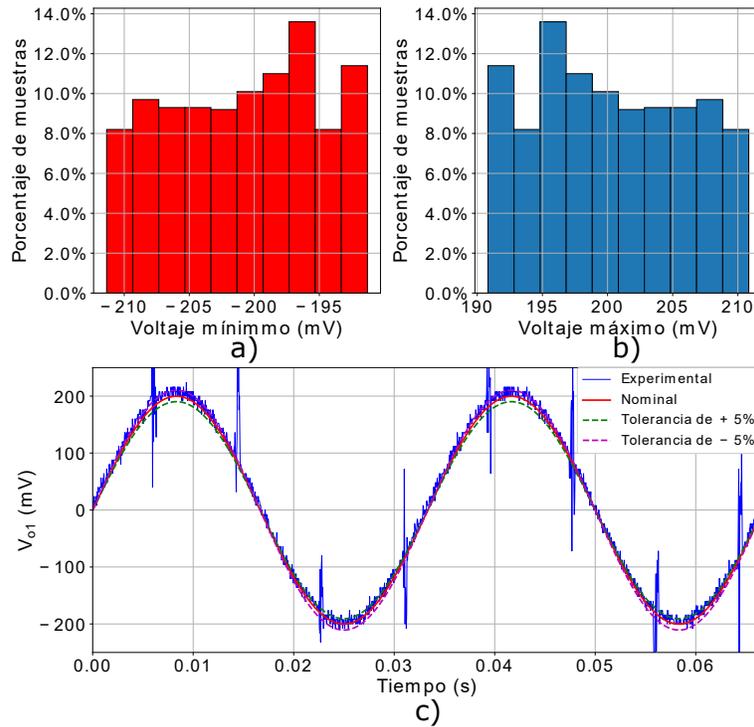


Fig. 3. a)Análisis Monte Carlo $V_{o1}(min)$, b)análisis Monte Carlo $V_{o1}(max)$ y c)análisis *Worst-Case* de la etapa de pre-amplificación.

dos resistores en serie de 560Ω y 22Ω . La variación máxima y mínima del ancho de banda del filtro pasa-banda es de 19.94% y -16.38% respectivamente (Fig. 4 a)). Se realizó un análisis Monte Carlo donde se corrieron 1000 simulaciones, en la Fig. 4 b) se muestran los resultados tomando en cuenta el ancho de banda del filtro, dando como resultado una media de 35.23 Hz y una mediana de 35.19 Hz .

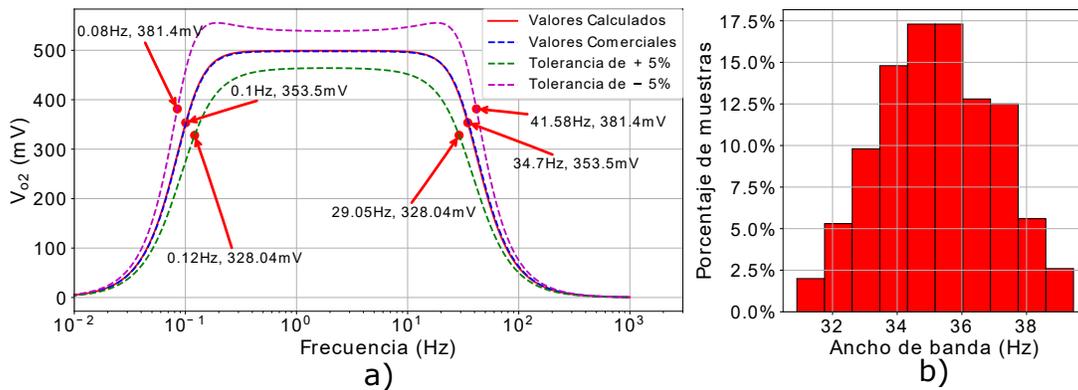


Fig. 4. a)Análisis *Worst-Case* de la etapa de filtrado y b)análisis Monte Carlo del ancho de banda.

La etapa de amplificación final se implementó con uno de los amplificadores del TL074. Debido a que el filtro pasa-banda cuenta con una ganancia de 2.5 la amplitud de la señal que entra al amplificador no inversor es de 500 mV, la amplitud de la señal de salida es igual a 2.5 V, por lo cual la ganancia es de 5. Se propuso el valor de R_9 a un 1 k Ω , dando como resultado un valor de R_{10} de 4 k Ω , donde se conectaron dos resistores en serie de 1.8 k Ω y de 2.2 k Ω . Se realizó un análisis Monte Carlo donde se corrieron 1000 simulaciones, en la Fig. 5 a) se muestran los resultados tomando en cuenta el voltaje mínimo de la señal de salida de la etapa de amplificación final, dando como resultado una media de -2.49 mV y una mediana de -2.49 mV. En la Fig. 5 b) se muestra los resultados tomando en cuenta el voltaje máximo dando como resultado una media de 2.49 mV y una mediana de 2.49 mV. La variación máxima y mínima tomando en cuenta la tolerancia de los componentes pasivos es de 8.4 % y -7.62 % respectivamente (Fig. 5 c)).

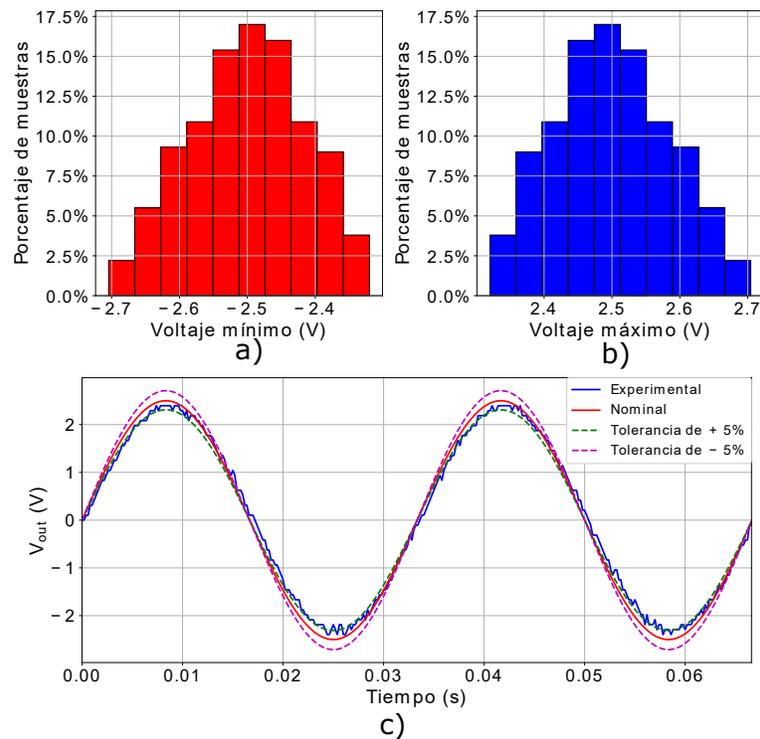


Fig. 5. a)Análisis Monte Carlo $V_{out}(min)$, b)análisis Monte Carlo $V_{out}(max)$ y c)análisis *Worst-Case* de la etapa de amplificación final.

4 Conclusión

Al utilizar análisis, por métodos dinámicos, enfocados en el diseño de los circuitos eléctricos que conforman las etapas de un electroencefalógrafo, se contribuye en garantizar que este tipo de dispositivos, muy importantes en el ámbito biomédico, funcionen correctamente mediante la atenuación de las señales de ruido, así como la amplificación de la señal de EEG en el rango de frecuencias de interés. Con la finalidad de ampliar el rango de análisis, se debe utilizar este método con mas valores de porcentajes de tolerancias y realizarse en todos los elementos que conforman el sistema de adquisición.

Declaración de conflictos de interés

”Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés para este trabajo”.

Referencias

- [1] L. Kolev, “Approximate solutions to a dynamic worst-case tolerance analysis problem,” 1992.
- [2] C. Sierra and R. Daniel, “Evaluación mediante análisis de monte carlo de filtros activos basado en redes doble T,” 2015.
- [3] D. Fitzpatrick, “Analog design and simulation using orcad capture and pspice,” 2017.
- [4] R. Spence and S. Singh, “Tolerance design of electronic circuits,” 1997.
- [5] G. Huang, T. Yin, Q. Wu, Y. Zhu, and H. Yang, “A 1.3 μ w 0.7 μ v rms chopper current-reuse instrumentation amplifier for eeg applications,” in *2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, pp. 2624–2627, 2015.
- [6] E. Habibzadeh, M. Marta, and T. Ytterdal, “A fully differential capacitively-coupled high cmrr low-power chopper amplifier for eeg dry electrodes,” *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2020.
- [7] R. Pakdel and H. Faraji, “Design of a low noise low power amplifier for biomedical applications,” in *2018 25th National and 3rd International Iranian Conference on Biomedical Engineering (ICB-ME)*, pp. 1–6, 2018.
- [8] A. Liu, A. Dale, and J. Belliveau, “Monte carlo simulation studies of EEG and MEG localization accuracy,” 2002.
- [9] A. Claassen and H. Shaukatullah, “Comparison of diodes and resistors for measuring chip temperature during thermal characterization of electronic packages using thermal test chips,” 1997.
- [10] D. Báez, “Análisis de circuitos con PSpice,” 2008.