

## TOMOGRFIA DE IMPEDANCIA ELCTRICA COMO MTODO DE EVALUACIN DE LA SOBREHIDRATACIN

Juan David Muoz Sanchez<sup>1</sup>, Andrs Felipe Solis Pino<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Facultad de Ingeniera, Corporacin Universitaria Comfacauc-Unicomfacauc*

<sup>2</sup> *Facultad de Ingeniera, Corporacin Universitaria Comfacauc-Unicomfacauc*

---

**Resumen**— La sobrecarga hdrica est relacionada con la cantidad excesiva de lquidos que afecta el peso corporal total del cuerpo humano y se considera un factor de riesgo influyente en el desarrollo de enfermedades cardiovasculares y diabetes, siendo estas enfermedades la principal causa del aumento de las tasas de morbilidad y mortalidad a nivel mundial segn informes de la Organizacin Mundial de la Salud (OMS). En este sentido, es pertinente evaluar los niveles de hidratacin principalmente en pacientes sometidos a procesos de hemodilisis, pacientes pediatrcos diagnosticados con enfermedad renal terminal, e incluso enfermos crticos debido a la infusin de lquidos para aumentar el gasto cardiaco. En base a lo anterior, este trabajo pretende aplicar la tomografa de impedancia elctrica (TIE) en la evaluacin de la sobrehidratacin en el cuerpo humano. La metodologa implementada para el desarrollo del proyecto de investigacin consiste en la aplicacin de un mtodo experimental cuantitativo-analtico. La evaluacin del desempeo del sistema de TIE se llev a cabo mediante experimentos que incluyen un phantom cilndrico con solucin salina, en el cual, se sumergen cuerpos conductores y aislantes con geometra esférica y diferente dimensin, con el fin de determinar la capacidad del sistema para detectar objetos con distintos niveles de conductividad y tamao, mediante diversos patrones de medicin. Por otra parte, se determinó la relacin entre la conductividad y las medidas de impedancia obtenidas con el sistema TIE sobre el phantom con solucin salina, a partir del mtodo de regresin no lineal. Los resultados obtenidos muestran la capacidad del sistema electrnico de TIE para distinguir objetos que presentan niveles de conductividad y tamao diferentes, apropiado para aplicaciones biomédicas relacionadas con la evaluacin de la sobrehidratacin.

**Palabras Clave**— Bioimpedancia; Conductividad; Sobrehidratacin; Tomografa de Impedancia Elctrica.

---

**Abstract**— Water overload is related to the excessive amount of fluids that affects the total body weight of the human body and is considered an influential risk factor in the development of cardiovascular diseases and diabetes, these diseases being the main cause of the increase in morbidity rates and mortality worldwide according to reports from the World Health Organization (WHO). In this sense, it is pertinent to evaluate hydration levels mainly in patients undergoing hemodialysis processes, pediatric patients diagnosed with end-stage renal disease, and even in people in critical condition due to the infusion of fluids to increase cardiac output. Based on the above, this work aims to apply electrical impedance tomography (EIT) in evaluating overhydration in the human body. The methodology implemented for developing the research project consists

Contacto: Juan David Muoz Sanchez, [jdmunoz@unicomfacauc.edu.co](mailto:jdmunoz@unicomfacauc.edu.co)

of applying a quantitative-analytical experimental method. The evaluation of the performance of the TIE system was carried out through experiments that include a cylindrical phantom with saline solution, in which conductive and insulating bodies with spherical geometry and different dimensions are immersed, in order to determine the system's capacity to detect objects with different levels of conductivity and size, using various measurement patterns. On the other hand, the relationship between conductivity and impedance measurements obtained with the TIE system on the phantom with saline solution was determined using the nonlinear regression method. The results obtained show the ability of the TIE electronic system to distinguish objects that have different levels of conductivity and size, appropriate for biomedical applications related to the evaluation of overhydration.

**Keywords**— Bioimpedance; Conductivity; Electrical Impedance Tomography; Overhydration.

---

## Introducción

La sobrecarga de volumen está relacionada con la acumulación de líquidos y sodio que excede al 10% del peso corporal del cuerpo (Lewis, 2022), considerándose como un factor de riesgo influyente en el desarrollo de enfermedades cardiovasculares y diabetes (F. Henríquez-Palop, 2013) (M. V. Perez-Gomez, 2022) (F. Ponti, 2020). En cuanto a las muertes a nivel mundial a causa de enfermedades cardiovasculares, la OMS (Organización Mundial de la Salud) registró en el año 2015 alrededor de 17 millones de fallecimientos, considerándose como la principal causa de muerte en el mundo, mientras que las cifras de personas diagnosticadas con diabetes alcanzaron los 422 millones de pacientes en el año 2014, siendo los países de medios y bajos ingresos los principalmente afectados por estos problemas de salud (OMS, 2017).

Es por esto, que el exceso de líquidos es un inconveniente particularmente en pacientes sometidos a procesos de diálisis por su alta prevalencia en cuanto a morbilidad y mortalidad cardiovascular (G. F. Ling, 2022). Adicionalmente, la sobrecarga de volumen al convertirse en un problema de salud crónico puede conllevar a la precipitación de la hipertensión sistémica y pulmonar desencadenando en la hospitalización de los pacientes o en el aumento de las tasas de mortalidad (V. Sandys, 2022). En este sentido, se hace indispensable realizar procesos de evaluación de la hidratación principalmente en personas sometidos a hemodiálisis incluyendo pacientes pediátricos que presentan enfermedad renal terminal y en pacientes en estado crítico, debido a la infusión de líquidos para aumentar el gasto cardíaco (D. Karakaya, 2023) (D. De Backer, 2022).

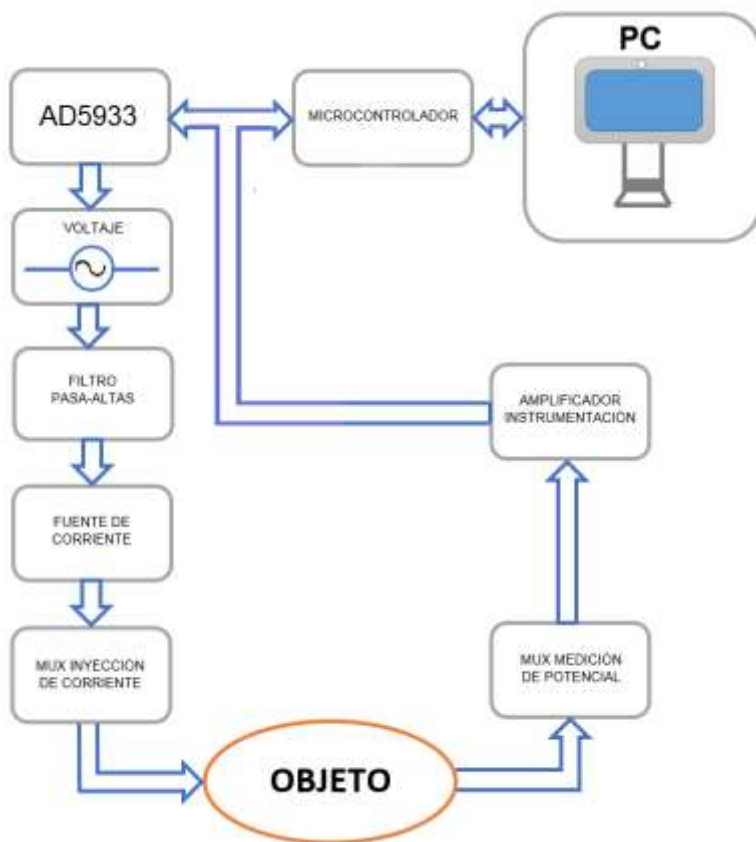
Los métodos que se han implementado en la evaluación de la sobrecarga de volumen, pueden llegar a presentar algunas limitaciones como por ejemplo baja precisión en la medición cuantitativa y distribución de la sobrecarga de líquidos (evaluación clínica) (A. de Ruiter, 2020), el estado de líquido corporal total (ultrasonografía) (A. de Ruiter, 2020), alto costo (biomarcadores BPN) (A. Malav, 2017), y el uso de agentes externos para el mejoramiento de la resolución de las imágenes médicas (Resonancia magnética) (N. Sangala, 2020). No obstante, métodos como la termodilución transpulmonar, la ecocardiografía y el ultrasonido, se han utilizado para evaluar el riesgo de la infusión de líquidos, estimar la sobrecarga de volumen a partir de volúmenes y presiones intravasculares y determinación del grado del edema pulmonar, respectivamente (D. De Backer, 2022) (F. Ponti, 2020).

Otro factor importante e influyente en las variaciones de la composición corporal que derivarían en el desarrollo de la sobrecarga de volumen es la grasa corporal, y para su evaluación se han empleado técnicas tradicionales que permitan determinar la distribución de la grasa corporal son la aplicación de los rayos X de energía dual, ultrasonido, tomografía computarizada y resonancia magnética (M. Marra, 2019) (F. Ponti, 2020). Sin embargo, un método novedoso no invasivo y libre de radiación que ha venido cobrando relevancia en la evaluación de la composición corporal es el análisis de bioimpedancia eléctrica por medio del cual es posible determinar la composición corporal a partir de la conductividad de los tejidos (F. Campa, 2022).

Partiendo de lo anterior, este trabajo tiene como objetivo implementar un prototipo electrónico de tomografía de impedancia eléctrica (TIE) basado en el convertidor de impedancia AD5933 para la evaluación de la sobrehidratación.

### Metodología

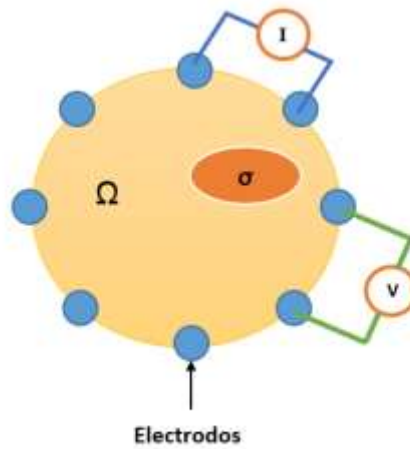
La metodología propuesta para el desarrollo del proyecto de investigación consiste en un enfoque experimental cuantitativo-analítico. El prototipo electrónico de TIE implementado en este trabajo está constituido por un convertidor de impedancia AD5933, una fuente de corriente, dos pares de multiplexores para inyección de corriente y medición de voltaje, un amplificador de instrumentación y un microcontrolador para la adquisición de datos, como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1:** Esquema sistema de tomografía de impedancia eléctrica (Elaboración propia).

Para evaluar el desempeño del sistema de tomografía en la medición de impedancia se realizaron experimentos que consistieron en utilizar objetos conductores y aislantes ambos con geometría esférica sumergidos en un phantom con solución salina (4 g/L) y ocho electrodos de contacto superficial. El objetivo de este experimento estuvo enmarcado en determinar la capacidad del prototipo de TIE en la detección de cuerpos con diferentes niveles de conductividad y tamaño, aplicando distintos patrones de medición. Para este experimento se emplearon esferas conductoras con diámetros de 15.7 cm (Esfera 1), 19.8 cm (Esfera 2) y 21.5 cm (Esfera 3); en cuanto a los objetos aislantes se utilizaron esferas con diámetros de 12.5 cm (Esfera 1) y 25.8 cm (Esfera 2). Las dimensiones del phantom son 45 cm de diámetro y 60 cm de altura. Cada objeto esférico fue introducido uno a uno en el interior del tanque y posteriormente se obtuvo las medidas de impedancia para cada objeto. Finalmente, la distribución de impedancia de los objetos conductores y aislantes se obtuvo a partir del algoritmo EIDORS.

A partir de la Ecuación 1, se obtuvo las medidas de impedancia para cada objeto conductor y aislante, basándose en la medición descrita por la Figura 2, donde  $\Omega$  corresponde al objeto de estudio,  $I$  la corriente de inyección,  $V$  el voltaje de medición y  $\sigma$  la conductividad del objeto de estudio.

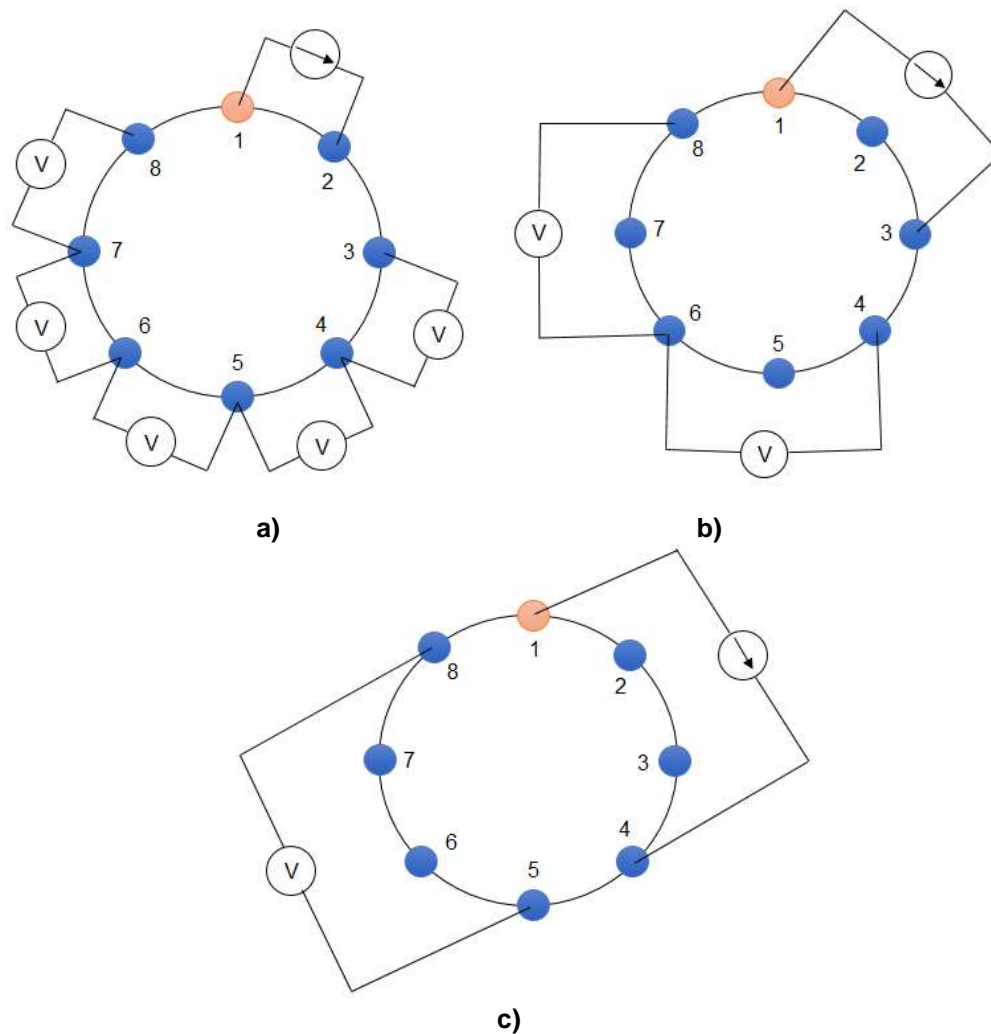


**Figura 2:** Medición de impedancia sobre el objeto de estudio (Elaboración propia).

$$\sum \sum \frac{I_{nh} - I_h}{I_h} = GI \quad (1)$$

De la Ecuación anterior,  $I_{nh}$  corresponde a la medidas de impedancia no homogéneas (objetos sumergidos en el phantom) e  $I_h$  indica las medidas de impedancia homogénea (solución salina) (Muñoz, 2022) (T. Schlebusch, 2013).

En la Figura 3, se muestran los patrones de medición de impedancia implementados en este trabajo.



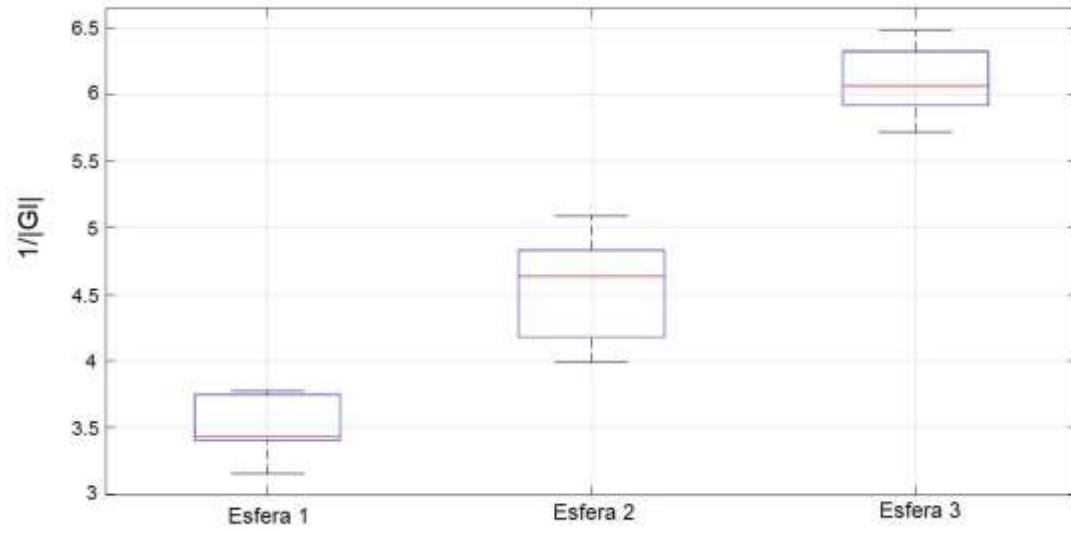
**Figura 3:** Patrones de medición de impedancia (Elaboración propia). **a)** Patrón de medida N0; **b)** Patrón de medida N1; **c)** Patrón de medida N2. (Elaboración propia)

Por otra parte, se determinó la relación entre la conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) medida por el equipo MW 802 y la impedancia ( $Z$ ) obtenida por el sistema de TIE sobre la solución salina a distintas concentraciones de sal disueltas en 2.6 L de agua.

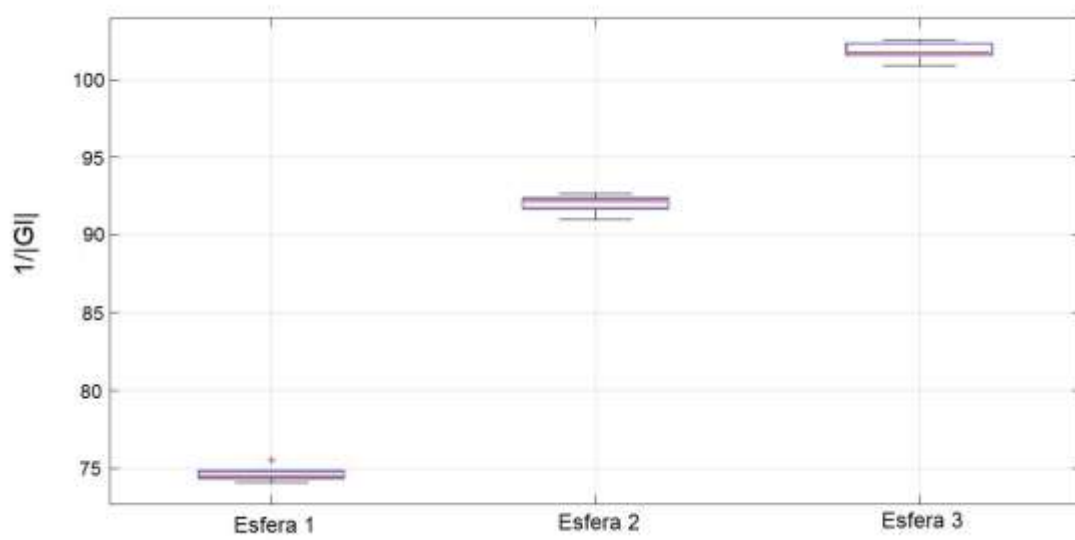
## Resultados

- **Medidas de impedancia para objetos conductores**

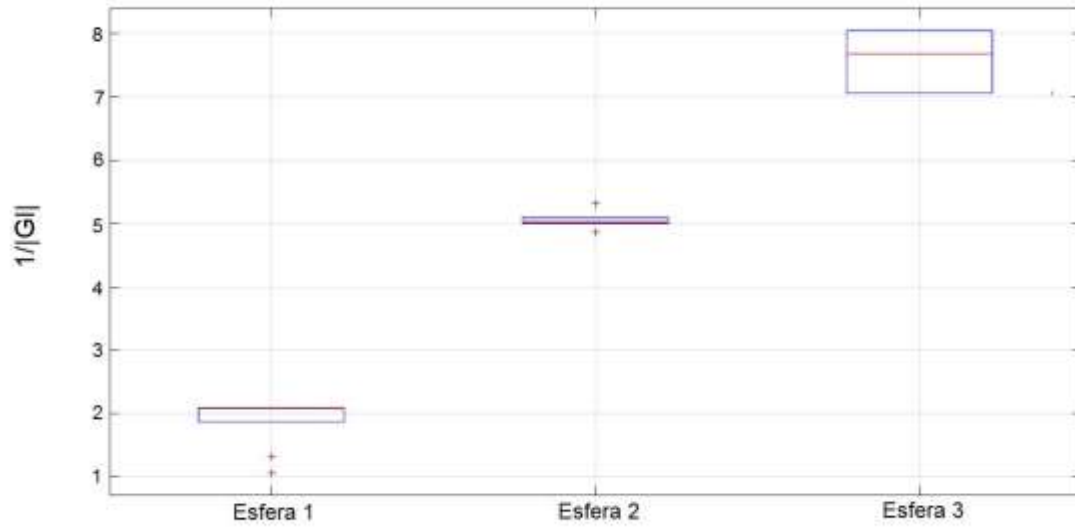
En las Figuras 4a, 4b y 4c, se indican las medidas de impedancia  $1/|G|$  aplicando los patrones de medición N0, N1 y N2 (Figura 3), respectivamente sobre el phantom con solución salina y las esferas conductoras sumergidas en dicho phantom.



a)



b)

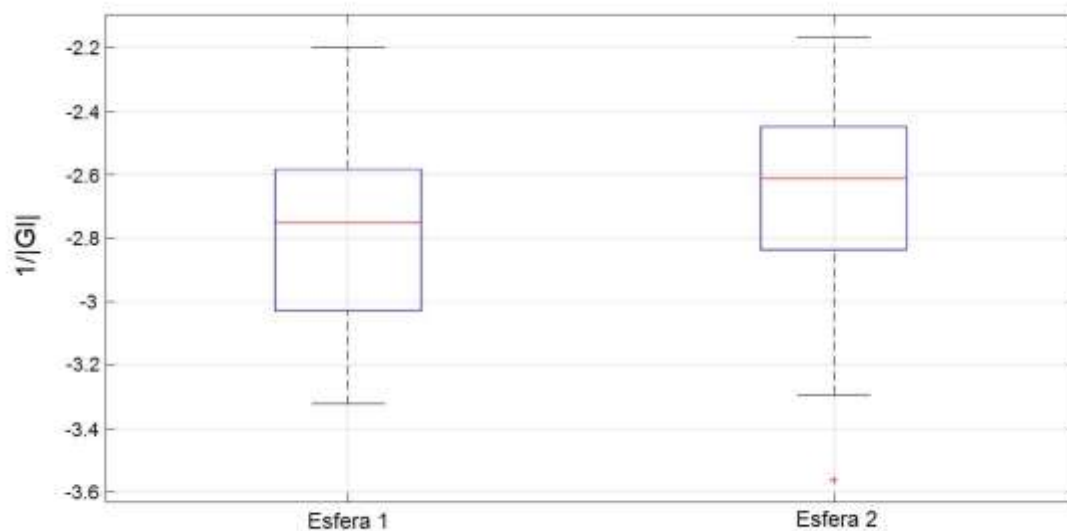


c)

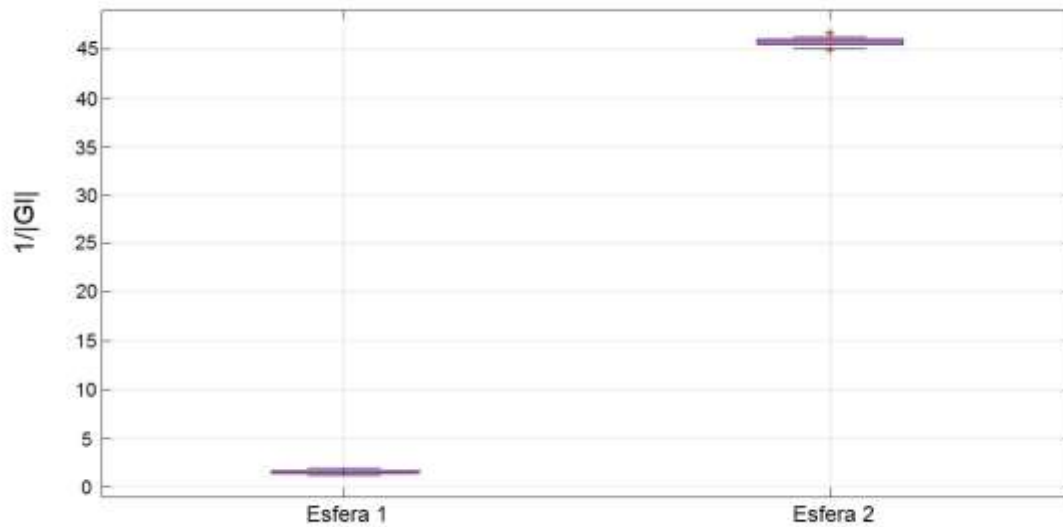
**Figura 4:** Medidas de impedancia  $1/|G|$  para esferas conductoras sumergidas en solución salina. **a)** Medidas de impedancia con patrón N0; **b)** Medidas de impedancia con patrón N1; **c)** Medidas de impedancia con patrón N2. (Elaboración propia)

- **Medidas de impedancia para objetos aislantes**

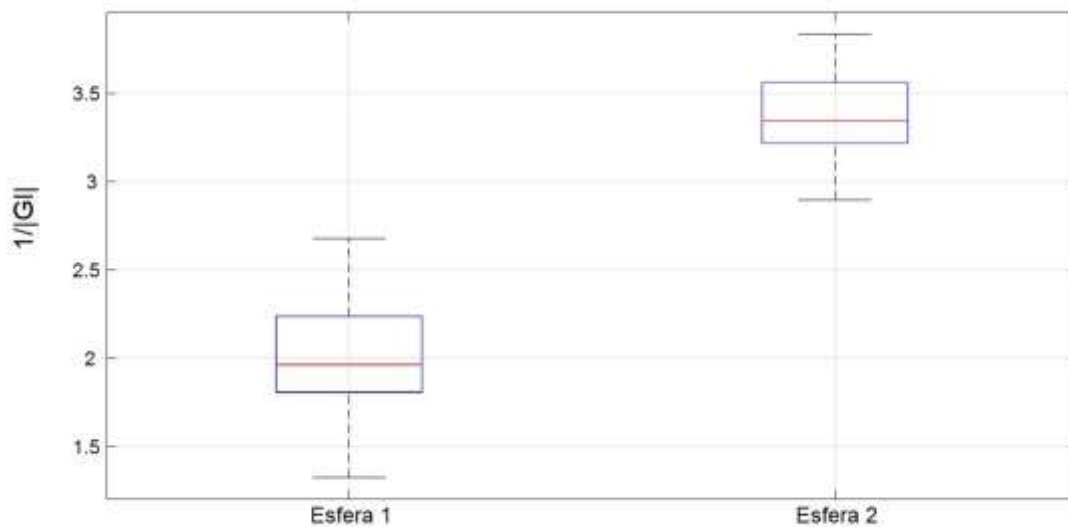
Las medidas de impedancia  $1/|G|$  en objetos aislantes sumergidos en el phantom con solución salina aplicando los patrones de medición N0, N1 y N2 (Figura 3), se registran en las Figuras 5a, 5b y 5c.



a)



b)



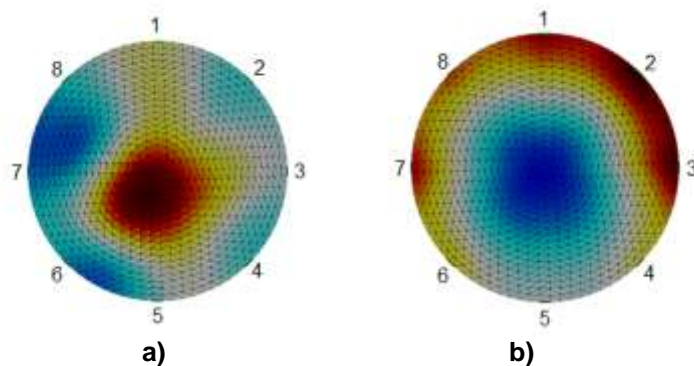
c)

**Figura 5:** Medidas de impedancia  $1/|G|$  para esferas aislantes sumergidas en solución salina. **a)** Medidas de impedancia con patrón N0; **b)** Medidas de impedancia con patrón N1; **c)** Medidas de impedancia con patrón N2. (Elaboración propia)

- **Distribución de impedancia**



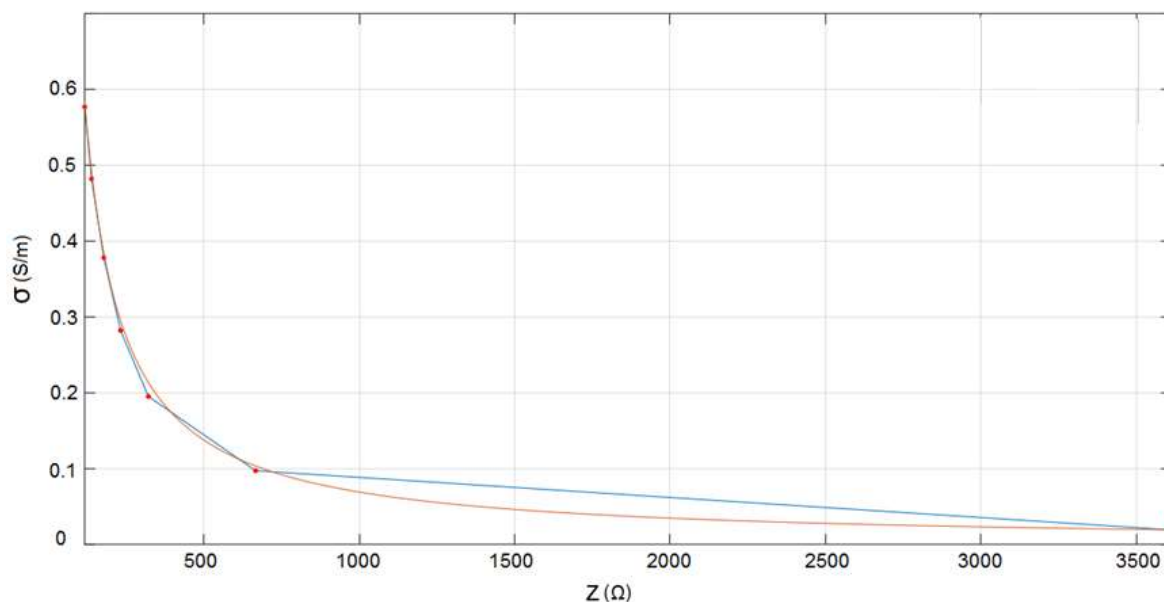
Partiendo de los resultados presentados anteriormente, la reconstrucción de imágenes de distribución de impedancia (Figura 6) fue realizada mediante las medidas de impedancia obtenidas aplicando el patrón de medida N0.



**Figura 6:** Distribución de impedancia. **a)** Esfera conductora (15.7 cm de diámetro); **b)** Esfera aislante (25.8 cm de diámetro). (Elaboración propia)

- **Relación entre la conductividad y las medidas de impedancia**

La Figura 7 indica la relación entre las medidas de impedancia y conductividad al aplicar el método de regresión no lineal; asimismo, la Ecuación 1 representa esta relación entre ambos parámetros, a partir del experimento descrito en la sección anterior.



**Figura 7:** Regresión no lineal entre la conductividad y la impedancia de la solución salina. (Elaboración propia)

$$\frac{1}{0.0145 * Z + 0.026} = \sigma$$

**Ecuación 1:** Relación entre la conductividad y la impedancia de la solución salina.

En la Tabla 1, se registran las medidas de impedancia y conductividad obtenida sobre el phantom con solución salina.

**Tabla 1:** Medidas de impedancia y conductividad de la solución salina.

Cantidad de sal (g)	$\sigma$ (S/m)	$Z$ ( $\Omega$ )
0	0.019	3612.6
1	0.097	666.4
2	0.195	321.4
3	0.282	231.9
4	0.378	177.9
5	0.482	138.5
6	0.577	116.4

## Discusión

El experimento realizado con esferas conductoras sumergidas en solución salina arrojó buenos resultados para determinar diferencias entre las dimensiones de los objetos a partir de las medidas de impedancia  $1/|G|$ . La aplicación del patrón de medida denominado N0, presentó mayor dispersión de las medidas, sin embargo, al comparar los valores medios de impedancia (Figura 4a) se pueden determinar diferencias en los tamaños de los objetos esféricos conductores con base en la impedancia obtenida para cada cuerpo. No obstante, con el patrón de medida N1 se obtuvo menor dispersión de las medidas para los tres objetos (Figura 4b), por consiguiente, al comparar las medidas de impedancia entre las tres esferas conductoras es posible determinar diferencias significativas en las dimensiones de dichos objetos. En la Figura 4c, los valores de impedancia se encuentran mayormente dispersos particularmente en la esfera 3, además en estas medidas se obtuvieron valores atípicos al utilizar el patrón de medida N2, aunque sus valores medios permiten diferenciar las dimensiones de los tres objetos con base en la impedancia  $1/|G|$ .

Resultados similares se obtuvieron al utilizar objetos aislantes con geometría esférica, en este caso, la Figura 5a muestra una alta dispersión de los datos observándose incluso el traslape entre los diagramas de ambas esferas, pese a estos resultados, los valores medios de impedancia para cada esfera permiten evidenciar las diferencias de tamaño entre los dos objetos aislantes al aplicar el patrón de medida N0. Sin embargo, al utilizar el patrón de medida N1, las medidas de impedancia registradas sobre las esferas aislantes se encuentran mucho más confinadas (Figura 5b), haciendo posible distinguir de manera significativa en cuanto a tamaño, cada cuerpo sumergido en el phantom con solución salina. El patrón de medida N2, arrojó resultados de impedancia  $1/|G|$  con valores medios que permiten distinguir las dos esferas aislantes con respecto a sus dimensiones, a pesar de que estas medidas presentan una mayor dispersión, como se observa en la Figura 5c.

Partiendo de lo anterior, la reconstrucción de imágenes de distribución de impedancia se obtuvo mediante el algoritmo EIDORS aplicando los algoritmos de Gauss-Newton y la

regularización de Noser, como se observa en la Figura 6. En esta imagen se pueden evidenciar diferencias tanto en conductividad como en dimensiones de los cuerpos esféricos sumergidos en el phantom con solución salina. Así mismo, aplicando el método de regresión no lineal permitió determinar la relación entre la conductividad y la impedancia (Ecuación 1), medida por el sistema de TIE diseñado, con base en los datos registrados en la Tabla 1.

Por consiguiente, los resultados muestran la capacidad del dispositivo electrónico de TIE para determinar diferencias de distribución de impedancia entre objetos con distintos niveles de conductividad empleando una señal de corriente de 1 mAp-p con una frecuencia de 50 kHz, además, con el sistema de tomografía de impedancia fue posible diferenciar el tamaño de objetos conductores sumergidos en solución salina independientemente del patrón de medida aplicado. Finalmente, los resultados obtenidos en el experimento de conductividad indican que, al aumentar la cantidad de sal disuelta en agua, la impedancia medida por el sistema de TIE disminuye, debido a que la solución salina es más conductora a mayor concentración de sal, por lo tanto, es posible estimar la conductividad eléctrica a partir de la medición de impedancia obtenida mediante el dispositivo electrónico de TIE.

## Conclusiones

Basándose en estos resultados obtenidos previamente, se puede comprobar que la capacidad del prototipo electrónico TIE para diferenciar objetos con distintos niveles de conductividad y tamaños, independientemente del patrón de medida aplicado, es relevante en aplicaciones biomédicas, teniendo en cuenta que el cuerpo humano está compuesto por tejidos con distintos niveles de conductividad. Sin embargo, el patrón de medida N1 presenta mejores resultados debido a la baja variabilidad de las medidas de impedancia. Por otro lado, la medición de impedancia con el sistema TIE permite estimar la conductividad eléctrica del objeto de estudio a partir de la aplicación del método de regresión no lineal (Ecuación 1).

## Agradecimientos

Agradecimientos a la Corporación Universitaria Comfacaucua - Unicomfacaucua por el apoyo tecnológico y de infraestructura para la realización de este proyecto, en el marco del Semillero de Ingeniería Mecatrónica (SIM).

## Referencias Bibliográficas

- A. de Ruiter, A. Bello and B. Braam (2020). Fluid management in chronic kidney disease: what is too much, what is the distribution, and how to manage fluid overload in patients with chronic kidney disease? *Current Opinion in Nephrology and Hypertension*, 29(6), 572-580.
- A. Malav, K. Kadam and P. Kamat (2017). Prediction of heart disease using k-means and artificial neural network as hybrid approach to improve accuracy. *International Journal of Engineering and Technology*, 9(4), 3081-3085.
- D. De Backer, N. Aissaoui, M. Cecconi, M. S. Chew, A. Denault, L. Hajjar, G. Hernández, A. Messina, S. N. Myatra, M. Ostermann, M. R. Pinsky, J. L. Teboul, P. Vignon, J. L. Vincent and X. Monnet (2022). How can assessing hemodynamics help to assess volume status? *Intensive Care Medicine*, 48, 1482–1494. doi:10.1007/s00134-022-06808-9

- D. Karakaya, T. Gungor, E. K. Cakici, F. Yazilitas, E. Celikkaya and M. Bulbul (2023). Evaluation of fluid overload markers in pediatric hemodialysis patients. *Medicine Science*, 12(2), 417-423.
- F. Campa, L. A. Gobbo, S. Stagi, L. T. Cyrino, S. Toselli, E. Marini and G. Coratella (2022). Bioelectrical impedance analysis versus reference methods in the assessment of body composition in athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 122, 561–589. doi:10.1007/s00421-021-04879-y
- F. Henríquez-Palop, G. Antón-Pérez, S. Marrero-Robayna, F. González-Cabrera and J .C. Rodríguez-Pérez (2013). La sobrecarga hídrica como biomarcador de insuficiencia cardíaca y fracaso renal agudo. *Nefrología (Madrid)*, 33( 2), 256-265.
- F. Ponti, A. Santoro, D. Mercatelli, C. Gasperini, M. Conte, M. Martucci, L. Sangiorgi, C. Franceschi and A. Bazzocchi (2020). Aging and Imaging Assessment of Body Composition: From Fat to Facts. *Frontiers in Endocrinology*, 10, 1-12. doi:10.3389/fendo.2019.00861
- G. F. Ling, T. Du, J. Shuang, C. C. Chai, C. M. Nyein and A. Y. Lun (2022). Automated lung ultrasound image assessment using artificial intelligence to identify fluid overload in dialysis patients. *BMC Nephrology*, 23(410), 1-12. doi:10.1186/s12882-022-03044-7
- J. L. Lewis (2022). *Sobrecarga hídrica - Trastornos endocrinológicos y metabólicos*. Manual MSD versión para profesionales. Obtenido de <https://www.msdmanuals.com/es-mx/professional/trastornos-endocrinol%C3%B3gicos-y-metab%C3%B3licos/metabolismo-h%C3%ADrico/sobrecarga-h%C3%ADrica>
- M. Marra, R. Sammarco, A. De Lorenzo, F. Iellamo, M. Siervo, A. Pietrobelli, L. M. Domini, L. Santarpia, M. Cataldi, F. Pasanisi and F. Contaldo (2019). Assessment of Body Composition in Health and Disease Using Bioelectrical Impedance Analysis (BIA) and Dual Energy X-Ray Absorptiometry (DXA): A Critical Overview. *Contrast Media & Molecular Imaging*, 2019(3548284), 1-6. doi:10.1155/2019/3548284
- M. V. Perez-Gomez, D. Sánchez-Ospina, A. Tejedor and A. Ortiz (2022). The mysterious death of the beer drinking champ: potential role for hyperacute water loading and acute hyponatremia. *Clinical Kidney Journal*, 15(6), 1196-1201. doi:10.1093/ckj/sfac072
- N. Sangala, M. Ficheux, H. Fessi, N. Borman and A. Collins (2020). Using more frequent haemodialysis to manage volume overload in dialysis patients with heart failure, obesity or pregnancy. *Nephrology Dialysis Transplantation*, 35, 11-17.
- OMS (17 de mayo de 2017). [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)).
- V. Sandys, C. Edwards, P. McAleese, E. O'Hare and C. O'Seaghdha (2022). Protocol of a pilot-scale, single-arm, observational study to assess the utility and acceptability of a wearable hydration monitor in haemodialysis patients. *Pilot and Feasibility Studies*, 8(17), 1-8. doi:10.1186/s40814-022-00976-7
- J. D. Muñoz (2022). Tomografía por impedancia eléctrica para diagnóstico de osteoartritis de rodilla. Tesis de maestría. Universidad del Cauca, Popayán.
- T. Schlebusch, S. Nienke, S. Aguiar, and S. Leonhardt (2013). Bladder volume estimation from electrical impedance tomography. *35th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, 1-4.