

MONITORIZACIÓN DEL LLENADO DE VEJIGA MEDIANTE BIOIMPEDANCA ELÉCTRICA: PROCESAMIENTO DE SEÑALES

BLADDER FILLING MONITORING BY ELECTRICAL BIOIMPEDANCE: DIGITAL SIGNAL PROCESSING.

Murillo Arredondo Roberto¹, Serrato Fuentes Julia Paula¹, Azpeitia Jauregui Xania Arlett¹, Argüelles Espinoza Cesia Eunice¹, Arellano Rosales Ana Valeria¹, Kashina Svetlana², Balleza Ordaz José Marco²

¹Programa educativo de licenciatura en Ingeniería Biomédica, División de Ciencias e Ingenierías-Campus León, ²Departamento de Ingeniería Física, División de Ciencias e Ingenierías-Campus León.
r.murilloarredondo@ugto.mx¹, jp.serratofuentes@ugto.mx¹, xa.azpeitiajauregui@ugto.mx¹, ce.arguellesespinoza@ugto.mx¹, av.arellanorosales@ugto.mx¹, k.svetlana@ugto.mx², jm.balleza@ugto.mx²

Resumen

Actualmente el equipo utilizado para monitorizar el volumen vesical de manera continua en personas con vejiga neurogénica, denominado equipo de urodinamia, es sumamente invasivo y representa una experiencia dolorosa para el paciente en cuestión. Por ello, se ha propuesto por parte del grupo de investigación el uso de la bioimpedancia eléctrica como técnica para monitorizar el llenado vesical. La detección de la señal únicamente conlleva la colocación de electrodos en el muslo y la cresta ilíaca del paciente.

En este estudio se le realizó la medición de llenado vesical a un grupo de 5 participantes hombres con un sistema de bioimpedancia EBI100C BIOPAC® (determinación de impedancia) y un sistema de ultrasonido SONOSITE EDGE II (volumen de llenado).

Las señales obtenidas fueron procesadas con ayuda del programa Python. Los resultados muestran cambios significativos al inicio y al final de la prueba. Además, se realizó las componentes frecuenciales, donde se evidencio una diferencia en el inicio y final de la prueba.

Palabras clave: vejiga, bioimpedancia eléctrica, análisis de datos, monitoreo.

Introducción

La vejiga neurogénica es una patología que se caracteriza principalmente por la incapacidad que tienen los pacientes de vaciar su vejiga de manera normal y funcional. Esta patología causa una afectación en la función vesical, ya que se desarrolla una disfunción vesical severa que afecta la calidad de vida de los pacientes, además ser muy costosa y demandante para el sistema de salud [1]. Es por ello que en este trabajo se pretende desarrollar una alternativa a la urodinamia tradicional para la detección de las presiones y volúmenes vesicales utilizando la técnica de bioimpedancia eléctrica. Estos datos de volumen y presión vesicales son esenciales que se encuentren, debido a que son claves para el diagnóstico a tiempo y certero de la enfermedad [2]. La bioimpedancia eléctrica puede ofrecer una solución sencilla dado que no es una técnica invasiva ni requieren aparatos sumamente costosos o complejos, como es el caso de la urodinamia tradicional. En este proyecto de investigación se propone una alternativa para calcular los volúmenes y presiones vesicales, tomando como herramienta la bioimpedancia eléctrica que produce la vejiga en su proceso de llenado. La base de este análisis está sustentada en que todos los tejidos biológicos tienen una resistencia natural al paso de la corriente eléctrica a través de ellos. Esta resistencia puede variar en los diferentes procesos fisiológicos que sufren los tejidos en el cumplimiento de su función, como por ejemplo en el llenado de la vejiga. Es así como podemos estimar parámetros bioeléctricos como la resistencia eléctrica y reactancia inductiva, que dependen del agua y la conducción iónica en el tejido que se esté analizando [3].

La bioimpedancia eléctrica se ha utilizado para analizar procesos biológicos, como el estudio de la urodinamia, y con esto monitorear volúmenes de la vejiga mediante la impedancia global (GI) y las mediciones de impedancia enfocada (FIM). En un estudio donde se emuló una vejiga humana, se hicieron estas mediciones GI y FIM, y se observó que las mediciones FIM son adecuadas para la estimación del volumen vesical debido a que esta medición es más estable al momento de medir la conductividad [3]. En otro estudio,

se connota otro uso de la bioimpedancia en estudios referentes a la urodinamia, como son en mediciones y evaluaciones de señales analógicas de alta precisión. Cabe destacar que en dicho artículo mencionan la importancia de la fase en dichas señales, por lo que proponen utilizar un circuito simplificado de medición de diferencia de fase. Con esto se pueden inferir los cambios de volumen en la vejiga midiendo la bioimpedancia y la diferencia de fase de la vejiga, logrando el propósito de evitar que un estudio como el volumen vesical sea invasivo con el método que se propone. [4] En cuanto a trastornos como el síndrome de vejiga hiperactiva, se han hecho estudios para proponer un método de detección del deseo de orina no invasivo, lo cual nuevamente propone utilizar un análisis del espectro de bioimpedancia; el cual consistió en proporcionar una corriente alterna a una cierta frecuencia. Los resultados arrojaron que la potencia espectral más alta disminuyó y la relación de frecuencia baja a alta aumentó significativamente, todo esto durante el llenado vesical; este método se podría usar para verificar la necesidad de micción y evaluar la regulación neural durante el llenado vesical [5].

Para este estudio, un grupo de cuatro participantes masculinos sanos fue monitorizado para analizar la función vesical durante largos periodos de tiempo haciendo uso de una bioimpedancia tetrapolar, que consistió en la colocación de nueve electrodos con el propósito de realizar una detección de volúmenes y presiones vesicales no invasiva.

Teoría

La bioimpedancia representa la oposición de un medio biológico al paso de una corriente alterna. Se basa en el principio de que los tejidos biológicos se comportan como conductores de la corriente eléctrica o dieléctricos o aislantes, esto depende de su composición. Para el caso de los tejidos blandos, especialmente los tejidos no grasos, las soluciones electrolíticas intra y extracelulares se comportan como óptimos conductores, al contrario que el tejido óseo, el cual se comporta como material dieléctrico o aislante [6][7].

La bioimpedancia se descompone en dos factores medibles: la resistencia, que es determinada por el paso de la corriente a través de las soluciones electrolíticas intra y extracelulares; y la reactancia, determinada por las propiedades dieléctricas de los tejidos, o bien por la acumulación temporal de cargas sobre las membranas celulares o sobre otros interfaces sumergidos en la solución electrolítica, estructuras que se comportan como condensadores al paso de la corriente [6][7].

La técnica de medición consiste en inyectar una corriente eléctrica alterna muy por debajo de los umbrales de percepción al tejido biológico a medir y esta corriente genera una tensión eléctrica, que es tan mayor como la impedancia eléctrica del material, posteriormente se registra el valor de la impedancia a partir de la amplitud de la corriente, amplitud de la tensión y el ángulo de fase [7].

Los circuitos RC consisten en la conexión de un capacitor y un resistor, ya sea en serie o en paralelo, como se muestra en la figura siguiente:

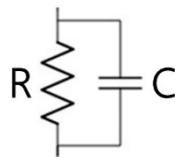


Figura 1. Sistema eléctrico de tipo resistor - condensador en paralelo

Este sistema se comporta matemáticamente de la siguiente manera:

$$i_C + i_R = 0 \quad (1)$$

Donde i_C e i_R son la corriente eléctrica del capacitor y de la resistencia respectivamente. El parámetro común a ambos elementos es el voltaje del capacitor (v_C).

Por lo que, la expresión en términos de voltaje del capacitor (v_C) resulta ser:

$$\frac{v_C(t)}{R} + C \frac{dv_C(t)}{dt} = 0 \quad (2)$$

El valor del capacitor se divide en ambos términos y se obtiene lo siguiente:

$$\frac{dv_C(t)}{dt} + \frac{v_C(t)}{RC} = 0 \quad (3)$$

Al resolver la ecuación diferencial para $v_C(t)$ se obtiene:

$$v_C(t) = k \times e^{\left(\frac{t}{RC}\right)} + k_{\text{Offset}} \quad (4)$$

Donde, k , k_{Offset} y C son las variables incógnitas que deberán ser estimadas por una regresión no lineal. Mientras, que R es el valor del elemento resistivo [8].

Parte experimental

Participantes

El estudio se realizó en cuatro participantes de sexo masculino que no presentaban patologías vesicales. Todos ellos participaron de manera libre y voluntaria, firmando un consentimiento informado donde se especificaba todas las implicaciones, procedimientos, ventajas, consecuencias, riesgos, etc., referente al estudio.

Equipo de Bioimpedancia Eléctrica.

Los cambios de impedancia debidos al llenado vesical se obtuvieron con un amplificador de impedancia BIOPAC EBI100C®. Dicho aparato inyecta una corriente eléctrica alterna de 400 μA a una frecuencia programable por el usuario de 12.5 kHz, 25 kHz, 50 kHz y 100 kHz. Para el presente estudio, la frecuencia a la que se inyectó la corriente fue de 50 kHz. El registro de los parámetros del vector de impedancia se realizó con el programa informático BIOPAC AcqKnowledge®. En este estudio se usó una frecuencia de muestreo de 200 muestras por segundo. El equipo se calibra mediante una resistencia de 22.8 ohm colocada en una tablilla de prueba, ver Figura 2.

Equipo de Electromiografía.

Los cambios eléctricos generados por los músculos pélvicos durante el llenado vesical fueron registrados por un equipo de electromiografía EMG100C BIOPAC®. Al igual que el equipo de bioimpedancia, los trazos electromiográficos fueron registrados por el programa informático AcqKnowledge®, a una frecuencia de muestreo de 200 muestras por segundo. De esta manera, es posible comparar de manera simultánea los cambios de bioimpedancia y las variaciones eléctricas que derivan de los músculos pélvicos durante el llenado de la vejiga.

Equipo de ultrasonido.

El volumen vesical fue estimado mediante un equipo de ultrasonido SONOSITE EDGE II usando un sensor convexo. Las determinaciones de volumen se obtuvieron colocando el sensor en la zona pélvica. (Ver Figura 3.)



Figura 2. Tablilla de calibración para el sistema de bioimpedancia BIOPAC EBI100C®



Figura 3. Dispositivo de ultrasonido SONOSITE EDGE II.

Procedimiento.

A cada participante se le explicó el protocolo al que se iba a someter, aceptando de manera voluntaria participar en el estudio. Previo al inicio del procedimiento, se le pide al voluntario que pase al baño a miccionar, esto con el objetivo de garantizar el máximo vaciado vesical y el menor error posible durante el procedimiento de medición de la vejiga.

Posteriormente, se colocaron en el participante 9 electrodos superficiales (AMBIDERM T715). El primer grupo de cuatro fueron colocados en la cresta iliaca a la altura de la zona pélvica para así monitorizar los cambios de impedancia debidos al llenado vesical. El segundo grupo de cuatro electrodos, dos colocados en el muslo de la pierna izquierda y dos en el muslo de la pierna derecha, se destinaron para evaluar que no hubiera movimiento y estimar la resistencia corporal del paciente (Figura 4). Finalmente, el electrodo restante se colocó en la prominencia ósea del pie izquierdo (referencia).

Una vez colocados los electrodos, inicia el ciclo de medidas con la medición referencial del volumen vesical realizada con el ultrasonido y la puesta en marcha del equipo de bioimpedancia. Este sistema monitoriza al participante de manera continua hasta que este exprese una intensa sensación de micción. Las mediciones de volumen se realizan con el ultrasonido cada 10 minutos. De esta manera se tiene referencia del estándar de oro cada 10 minutos durante un periodo de 120 minutos.

El procedimiento general del presente estudio se muestra en el esquema de la Figura 5.

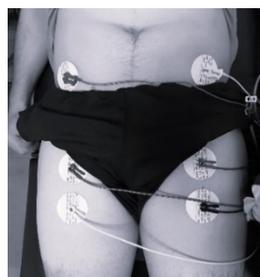


Figura 4. Colocación de electrodos en ambos muslos de las piernas para estimar la resistencia corporal de cada participante.

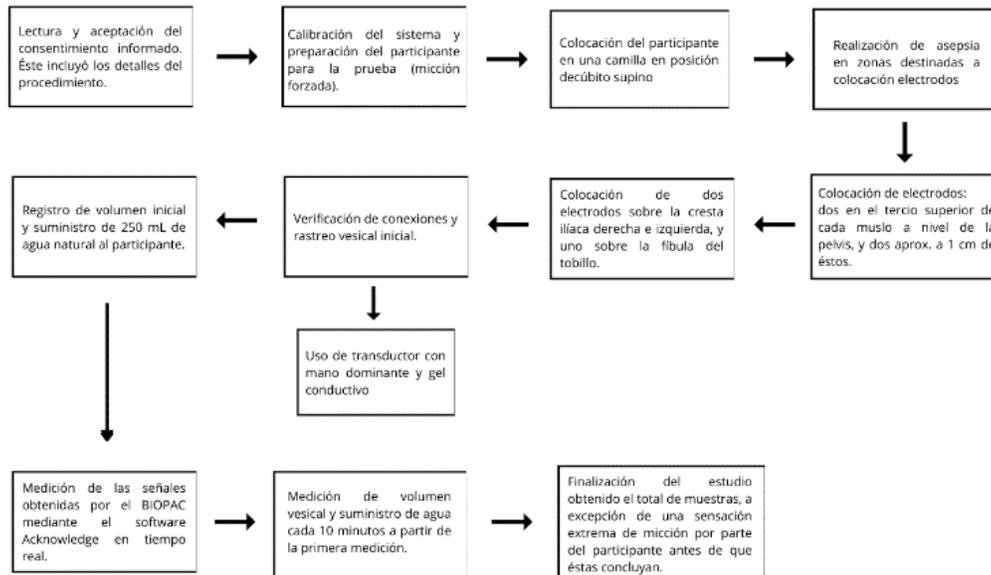
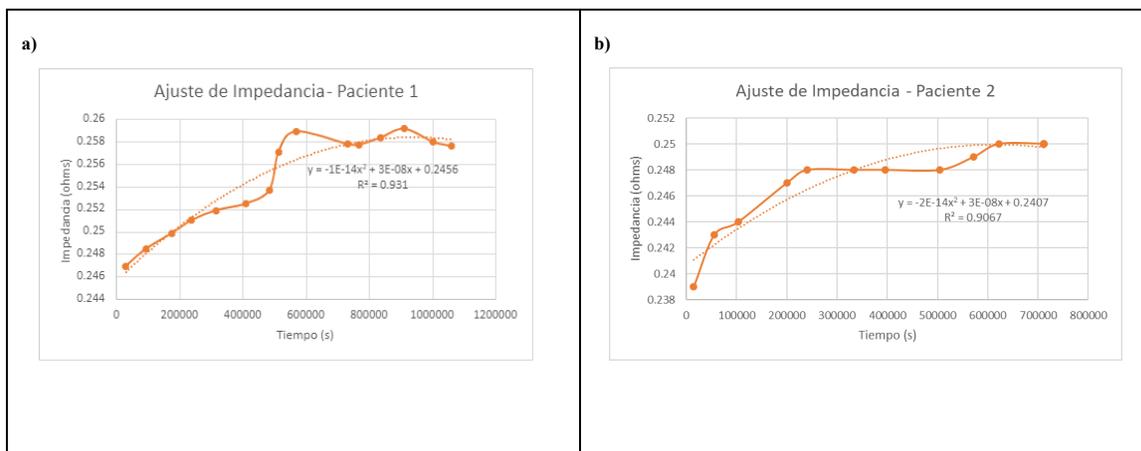


Figura 5. Procedimiento del estudio.

Una vez obtenidos los datos de bioimpedancia eléctrica, se requiere realizar un procesamiento de señales para poder analizar los volúmenes y presiones vesicales mediante el programa de acceso libre Python.

Resultados

Después de procesar los datos, se identificó que estos exhiben un comportamiento no lineal. Para adaptar un modelo adecuado a esta tendencia, se realizó el ajuste a un modelo polinómico en los cuatro conjuntos de datos. Como resultado, se obtuvieron las ecuaciones de las curvas y los respectivos coeficientes de determinación (R^2) para cada conjunto de datos.



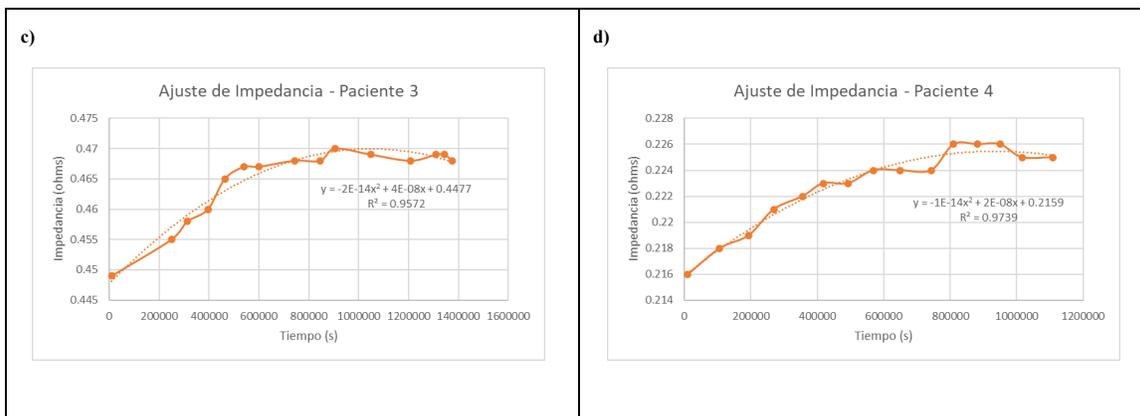


Figura 6. Gráficas de impedancia ajustadas a un modelo no lineal: a) Medidas correspondientes al paciente número uno, se observa un incremento en la impedancia respecto al tiempo. b) Medidas correspondientes al paciente número dos. El comportamiento es similar al paciente uno. c) Medidas correspondientes al paciente número tres. d) Medidas correspondientes al paciente cuatro.

En la Figura 6, se observan parábolas con curvatura hacia abajo en todos los casos. Aunque esto no es perceptible a simple vista, al obtener la ecuación de la curva, notamos que efectivamente es así. La forma de la curva y el comportamiento esperado de la impedancia durante el llenado y vaciado de la vejiga muestra una concordancia relevante y esperada.

Al analizar los datos recabados, se observa que la impedancia comienza en un valor cercano a cero, lo cual corresponde al inicio del llenado de la vejiga. Estos datos nos llevan a interpretar que la vejiga alcanza un punto máximo de impedancia y, por lo tanto, de volumen, que representa el límite de expansión de los tejidos de la vejiga. Después de alcanzar este punto máximo, la vejiga se vacía y tanto la impedancia como el volumen disminuyen, lo que refleja el comportamiento parabólico descrito por la ecuación.

Tabla 1. Componentes de la ecuación polinómica de segundo grado, así como el coeficiente de determinación.

| | Paciente 1 | Paciente 2 | Paciente 3 | Paciente 4 |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| a | $-1x10^{-14}x^2$ | $-2x10^{-14}x^2$ | $-2x10^{-14}x^2$ | $-1x10^{-14}x^2$ |
| b | $3x10^{-8}x$ | $3x10^{-8}x$ | $4x10^{-8}x$ | $2x10^{-8}x$ |
| c | 0.2456 | 0.2407 | 0.4477 | 0.2159 |
| R² | 0.931 | 0.9067 | 0.9572 | 0.9739 |

Las ecuaciones polinómicas de segundo grado obtenidas de cada curva corresponden a la ecuación de la parábola la cual se conforma por 3 parámetros; $f(x) = ax^2 + bx + c$. Donde 'a' es el coeficiente del término cuadrático e indica el grado de curvatura de la parábola, es decir, si abre hacia arriba o hacia abajo. 'b' indica el coeficiente del término lineal y representa la pendiente de la parábola, si se desplaza hacia la izquierda o hacia la derecha. 'c' corresponde al término constante y expresa el punto donde se interseca la parábola en el eje y.

El coeficiente de determinación, R^2 , es una métrica estadística clave del análisis de regresión que se utiliza como para evaluar la bondad del ajuste de un modelo de regresión a los datos observados. Se interpreta como la proporción de la variación de la variable dependiente que es previsible de la variable independiente.

Dicho de otra manera, R^2 indica qué tan bien ajustados son los valores predichos por el modelo a los valores reales ajustados. El valor de este coeficiente oscila entre 0 y 1, siendo 1 el valor que indica el ajuste ideal del modelo.

Conclusiones

El objetivo de este estudio fue monitorizar el llenado vesical utilizando como base la bioimpedancia eléctrica además del procesamiento de los datos obtenidos de este. Para esto se analizó un grupo de 4 participantes del sexo masculino sin patologías vesicales.

Se observó una tendencia no lineal en las determinaciones de bioimpedancia, similar a la carga de un capacitor en un sistema eléctrico resistor-capacitor (RC) en configuración paralela. Los datos obtenidos, graficados y posteriormente filtrados se ajustaron a una ecuación polinomial de segundo grado dado a la tendencia que se presentó en la que, partiendo de un valor cercano a cero, la impedancia aumenta en función del tiempo hasta que llega un punto máximo, mismo que indica el momento en el que la vejiga ya no puede expandirse más, y los valores impedancia también se mantienen. De esto, se puede llegar a la conclusión que la bioimpedancia es proporcional al volumen de llenado de la vejiga.

La bioimpedancia eléctrica resultó ser una técnica efectiva para este propósito, teniendo como ventaja la no invasividad del procedimiento. Sin embargo, aún es necesario encontrar u obtener métodos matemáticos que se ajusten a las características antropométricas de cada participante.

Bibliografía/Referencias

- [1] S. Arlandis Guzmán, J.L. Ruiz Cerdá, E. Martínez Agulló. (2005). "Las pruebas funcionales urodinámicas en el diagnóstico de la vejiga neurógena" Volume 39, Issue 6, Pages 343-357, recuperado de: [https://doi.org/10.1016/S0048-7120\(05\)74368-1](https://doi.org/10.1016/S0048-7120(05)74368-1).
- [2] Einstein, A., B. Podolsky, and N. Rosen, 1935, "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?", *Phys. Rev.* 47, 777-780.
- [3] Quesada, L., León, R., Cira, C., Betancourt, B., Pestana, J., Elizabeth. (2016). Elementos teóricos y prácticos sobre la bioimpedancia eléctrica en salud. *Revista Archivo Médico de Camagüey*, 20(5), 565-578. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1025-02552016000500014&lng=es&tng=es
- [4] Noguchi, T., Fukai, S., Ishikawa, Y., Shimizu, A., Kimoto, A., & Toyoda, I. (2018). A urinary bladder volume measurement circuit using a simplified very small phase difference measurement circuit. *Electrical Engineering in Japan*, 203(1), 28-36.
- [5] Wang, Q., Wang, H. B., Xu, H., Zhou, W., & Liu, G. Z. (2016). Noninvasive urination-desire sensing method based on bladder bioimpedance spectrum analysis. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 36(2), 191-196.
- [6] Picolli, A., Nescolarde, L. D., & Rosell, J. (2002). Análisis convencional y vectorial de bioimpedancia en la práctica clínica. *NEFROLOGÍA*, XXII(3), <https://www.revistanefrologia.com/es-analisis-convencional-vectorial-bioimpedancia-practica-articulo-X0211699502014897?referer=buscador>.
- [7] Sánchez-Iglesias, Andrés, Fernández-Lucas, Milagros, & Teruel, José L.. (2012). The electrical basis of bioimpedance. *Nefrología (Madrid)*, 32(2), 133-135. Recuperado en 31 de mayo de 2023, de http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0211-69952012000200001&lng=es&tng=en.
- [8] Murillo, R., Serrato, Azpeitia, X. A., Argüelles, C. E., Banda, D., Kashina, S., & Balleza, J. M. (2022). CUANTIFICACIÓN DE LAS PRESIONES Y VOLÚMENES DE VEJIGA MEDIANTE BIOIMPEDANCIA ELÉCTRICA. JÓVENES EN LA CIENCIA, 16, <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3590>.