Modificación de las propiedades eléctricas de *Escherichia coli* con campos magnéticos estáticos

A. Z. Martínez-Elena [1,2], J. L. Terán-Melo[2], G. L. Rueda-Morales[3] y G. Ortega-Cervantez[3]
[1]Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, Edif. 1-5, UPALM-Zacatenco, 07738 México D. F., México. Teléfono (55) 5729-6000, Ext. 54600 E-mail: zefe_2@yahoo.com.mx
[2]Universidad de Nuevas Ciencias médicas S. C., Av. Insurgentes Norte 1865,
Col. Tepeyac Insurgentes, 07020, CDMX, México. Teléfono (55) 5577-0058, juan.teran@escuelaisaacgoiz.com
[3]Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional, Edif. 9,
UPALM-Zacatenco, 07738 CDMX, México. Teléfono (55) 5729-6000 Ext. 55375

Resumen — **En el presente trabajo presentamos un análisis del efecto del campo magnético estático (CME) de 0.1 T en las propiedades eléctricas (constante dieléctrica, impedancia y conductividad) de la bacteria *Escherichia coli*. Este microorganismo fue expuesto al CME con las configuraciones Cara Norte (CN), Cara Sur (CS) y Cara Norte/Sur (CN/S) durante 20, 40 y 60 minutos a temperatura ambiente. La espectroscopía de impedancia eléctrica fue utilizada para caracterizar las propiedades eléctricas del material biológico post exposición a CME, esta metodología ha sido utilizada y es adecuada para analizar eléctricamente a los materiales biológicos. Observamos que después de la exposición a CME, la resistencia, reactancia y conductividad eléctrica son modificadas incluso en función del tiempo de exposición. Los resultados indican que los CME interactúan con los componentes biológicos modificando la dinámica interna y externa de las células bacterianas. El efecto más pronunciado, al comparar con el control (bacterias sin exposición al CME), se observa en la configuración cara Norte/Sur sugiriendo que ambas caras se complementan para interactuar con el material biológico y alterar las propiedades eléctricas de las macromoléculas. Llamamos a esta interacción par Biomagnético (PB).**

Palabras Clave – ***E. coli,* campo magnético estático, propiedades eléctricas.**

Abstract — **In this work, we present an analysis of the effect of a 0.1 T static magnetic field (SMF) on the electrical properties (dielectric constant, impedance, and conductivity) of *Escherichia coli bacteria*. This microorganism was exposed to SMF with North Face (NF), South Face (SF), and North/South Face (NS/S) configurations for 20, 40, and 60 minutes at room temperature. Electrical impedance spectroscopy was used to characterize the electrical properties of biological material after exposure to SMF. This methodology has been used and is suitable for the electrical analysis of biological materials. We observed that after exposure to SMF, the resistance, reactance, and electrical conductivity are modified even as a function of the exposure time. The results indicate that SMF interacts with biological components, modifying the internal and external dynamics of bacterial cells. The most pronounced effect, when compared to the control (bacteria not exposed to CME), is observed in the North/South face configuration, suggesting that both faces complement each other in interacting with the biological material and altering the electrical properties of the macromolecules. We call this interaction Biomagnetic Pair (BP).**

Keywords — ***E. coli*, static magnetic field, electrical properties**

I. INTRODUCCIÓN

La interacción de los campos magnéticos estáticos (CME) con la materia biológica ha sido de particular interés en los últimos años. Algunos grupos de investigación han reportado efectos a nivel bioquímico, morfológico e incluso fisiológico como consecuencia de la exposición del CME a sistemas biológicos. [1, 2, 3]

Los estudios de interacción del CME con la materia biológica han incluido células eucariotas, procariotas y mamíferos. Por ejemplo, en *Saccharomyces cerevisiae,* los efectos post exposición influenciaron la producción de glutatión así como la biomasa, el análisis se realizó después de exponer las células al CME durante 24, 48 y 72 horas. En 2021, Yu y colaboradores reportaron que, en ratones, la exposición al CME de mediana intensidad tiene efectos benéficos en el metabolismo del hierro, mejora la respuesta al estrés oxidativo y la viabilidad de las células pancreáticas. [4, 5]

Escherichia coli (*E. coli*) es una bacteria en forma de bacilo el cual es un modelo de estudio manejable en el laboratorio. Este microorganismo ha sido útil para elucidar varios fenómenos biológicos, por supuesto sin dejar de lado los efectos que tienen los CME al interactuar con materia biológica. En este sentido *E. coli* tiene la capacidad de migrar a zonas de mayor intensidad de campo magnético, un fenómeno conocido como magnetotaxis [6]. Mhamdi y colaboradores analizaron la capacidad de adhesión de la bacteria a las superficies, así como la orientación de las células en la dirección del CME, en este reporte se encontró que hay afectación de la adhesión a las superficies y ocurre orientación celular hacia el CME [7].

Además de las caracterizaciones bioquímicas, genéticas y magnéticas, entre otras, ha sido de especial interés conocer las características eléctricas de la materia biológica. A nivel de tejido, el conocimiento de las propiedades eléctricas proporciona información sobre la estructura, función, fisiología e incluso patológica. A nivel de células bacterianas, se han propuesto modelos para analizar la contribución de cada componente celular a las propiedades dieléctricas de los microorganismos considerando las membranas biológicas, así como el ambiente intracelular. [8, 9]

Es conocido que la exposición de material biológico a CME induce campos eléctricos, magnéticos y corrientes eléctricas [10 y 11], una de las estructuras celulares susceptibles a cambios bioeléctricos es la membrana celular [12]. Han sido poco explorados los cambios en las propiedades eléctricas de sistemas biológicos debido a la exposición a CME, en este trabajo nuestro objetivo es analizar los cambios en estas propiedades en dependencia del tiempo de exposición en la bacteria *E. coli*.

II. METODOLOGÍA

A. Cepa bacteriana y condiciones de cultivo

E. coli ATCC 25922 fue cultivada y preservada en agar Müller-Hinton. Después de incubar durante 24 horas a 37 °C, colonias individuales fueron tomadas para inocular 2 ml de medio mínimo que contiene NaCl al 0.9% suplementado con 0.5% de glucosa e incubado a 37 °C.

B. Campo magnético estático

Para obtener el CME utilizamos imanes de ferrita conocidos comercialmente como imanes de dominó, con intensidades promedio de 0.1 Tesla y con dimensiones de $5\ cm\ x\ 2\ cm\ x\ 1\ cm$. La intensidad de los imanes se midió con un teslámetro de la compañía Lake Shore modelo F71-Multi-axis

C. Aplicación del CME

Para estudiar los cambios en las propiedades eléctricas de *E. coli* después de la exposición a CME, las bacterias fueron cultivadas a 37 °C en 2 ml de medio mínimo durante 72 horas en tubos de ensayo. La concentración celular fue ajustada a un patrón de 0.5 en la escala de McFarland (~1.5 x 10^8 células/ml). Los imanes de ferrita fueron colocados a los lados de los tubos con las siguientes configuraciones: norte, sur y norte-sur durante 20, 40 y 60 minutos. Un tubo con *E. coli* sin exposición al CME fue utilizado como control. Las células fueron lavadas tres veces con 1 ml de agua desionizada con el fin de eliminar el NaCl del medio. Finalmente, las bacterias se resuspendieron en 1 ml de agua desionizada para realizar las mediciones de impedancia eléctrica.

D. Impedancia eléctrica

Las mediciones de impedancia eléctrica se realizaron con un analizador de impedancias HP4284A en un intervalo de 20 Hz a 1 MHz de frecuencia a temperatura ambiente ($25ºC$). A este analizador de impedancias conectamos un Testfixture HP16451B de placas paralelas circulares. Entre estas placas colocamos una muestra de $100\ \mu l$ (gota de $100\ \mu l$). En esta gota de $100\ \mu l$ realizamos las mediciones de impedancia eléctrica. En la espectroscopia de impedancia eléctrica se aplica un campo eléctrico variable en el tiempo sobre el material bajo análisis, este campo activa diferentes mecanismos de dispersión eléctrica los cuales están asociados a una constante de tiempo conocida como tiempo de relajación τ. Para materiales biológicos como tejidos, órganos y células en suspensión, se encuentran identificados tres intervalos principales de frecuencias ($\alpha, \beta\ y\ \delta$) asociados a mecanismos de dispersión eléctrica que ocurren a bajas y medianamente altas frecuencias. La dispersión α se encuentra entre $10\ Hz\ a\ 10\ kHz$, dispersión β entre $10\ kHZ\ a\ 10\ MHz$. polarización δ entre $100\ MHz\ a\ 10\ GH$. Para procesos de dispersión eléctrica que involucran efectos de dispersión sobre la estructura fina de los materiales biológicos (dispersión γ) ocurren a frecuencias mayores a $10\ GHz$ [13, 14].

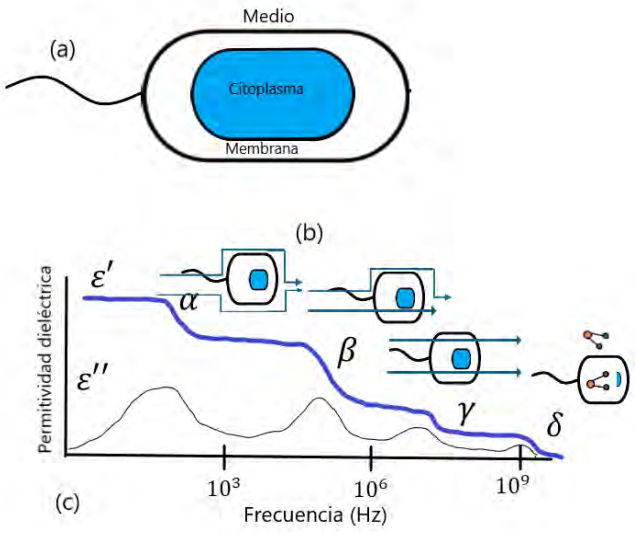

Fig. 1. (a) Esquema de una célula de *E. coli*. (b) Diagrama de interacción de una célula de E. coli con el medio (agua DI) al variar la frecuencia y (c) Curvas de $\varepsilon'\ y\ \varepsilon''$ para los mecanismos de dispersión $\alpha, \beta, \gamma\ y\ \delta$. Esquema adaptada de [3, 114, 15 y 16]

En la Fig. 1 (a) presentamos esquema de una célula de *E. coli.* Las células bicapa se modelan como una esfera de una sola capa que contiene una esfera conductora (citoplasma) con una fina capa aislante (membrana plasmática). En impedancia se utilizan resistencias y capacitores para modelar la polarización de células suspendidas en un medio acuoso [13]. Este modelo se describe mediante la teoría de mezclas de Maxwell (TMM). En el modelo TMM, la impedancia total de una mezcla celular es la contribución de la impedancia del medio, con la impedancia de la membrana, con la impedancia del citoplasma. En Fig 1 (b) muestra células polarizadas de *E. coli* que experimentan mecanismos de polarización $\alpha, \beta\ y\ \gamma$. La región de dispersión α representa la polarización de los iones en el medio conductor [15, 16]. La región de dispersión β está dominada por la polarización interfacial de la membrana celular con el medio (frecuencias más bajas) y con el citoplasma (frecuencias más altas) [15, 16]. La región de dispersión γ proporciona información que depende del comportamiento del acoplamiento del agua ligada con los aminoácidos, proteínas, carbohidratos y lípidos en la polarización molecular y dipolar. La región de dispersión δ proporciona información sobre la polarización de las moléculas de agua libres [15, 16].

III. RESULTADOS

A. *Constante dieléctrica del agua desionizada*

Para llevar a cabo las mediciones eléctricas utilizamos agua desionizada (DI) comercial de la empresa de reactivos química MEYER. Las especificaciones del proveedor en la conductividad específica a temperatura ambiente (25 $ºC$) es de 2 $\mu S/cm$. Para validar nuestra metodología, realizamos mediciones de la constante dieléctrica del agua y comparamos nuestro valor con el establecido para el agua de $\varepsilon' = 78$. En [17] midieron la constante dieléctrica DI y reportan que el valor de $\varepsilon' = 78$, corresponde a la frecuencia de 10 kHz. Nuestras mediciones indican un valor de $\varepsilon' = 78.69$ a una frecuencia de 213.166 KHz. En la Fig 2 presentamos la curva de la parte real de la constante dieléctrica del agua DI en función de la frecuencia. Se sabe que la conductividad eléctrica del agua DI ultrapura ($\sigma' = 0.055 \mu S/cm$) se asigna únicamente a la presencia de iones autodisociados $H^+ y\ OH^-$. Como las muestras de agua se contaminan en cuestión de segundos debido a las reacciones de intercambio de gases atmosféricos, esto hace difícil obtener los valores de referencia de la conductividad eléctrica para el agua usando espectroscopia de impedancia.

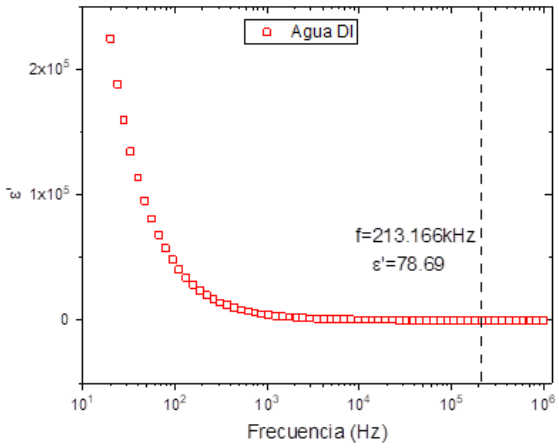

Fig. 2. Curva de permitividad dieléctrica vs la frecuencia para determinar la constante dieléctrica del agua DI.

El valor obtenido de nuestra medición para la conductividad eléctrica del agua DI es de $\sigma' = 62.8\ \mu S/cm$, el cual está alejado del valor de referencia para el agua que estamos utilizando ($2\ \mu S/cm$). Esto ocurre por lo complejidad propia de las condiciones experimentales de la medición, los cuales fueron reportados en [18], por mencionar algunos factores, (i) la disociación en iones se afecta por el voltaje aplicado, (ii) las reacciones de intercambio de gases con el agua DI dan lugar a la presencia de iones extraños adicionales y (iii) la dependencia de las reacciones ion-electrodo y su topografía superficial. Estos argumentos los utilizamos para justificar nuestros valores de referencia de $\varepsilon' = 78.69\ y\ \sigma' = 62.8 \mu S/cm$.

Para este trabajo, partimos de estos valores de referencia para el agua DI. Las bacterias se suspenden en 100 ml de agua DI para realizar las mediciones de impedancia eléctrica. En la Fig 3. presentamos las curvas de la constante dieléctrica del agua DI y agua DI con bacterias en función de la frecuencia. La constante dieléctrica del agua DI ($\varepsilon' = 78.69$) y agua DI con bacterias a la frecuencia de 213. 166 kHz se recorre a $\varepsilon' = 51.08$. Este cambio del valor de la constante dieléctrica del agua a la misma frecuencia se atribuye a la contribución eléctrica de las células de *E. coli*. En la misma Fig 3 observamos que a bajas frecuencias el valor de la permitividad eléctrica del agua DI (por ejemplo, a 24 Hz $\varepsilon' = 188302.01$) es mayor que el del agua DI/*E. coli* (a 24 Hz $\varepsilon' = 52635.38$). Ambas curvas decrecen conforme aumenta la frecuencia y tienen un comportamiento constante a partir de 1 kHz de frecuencia.

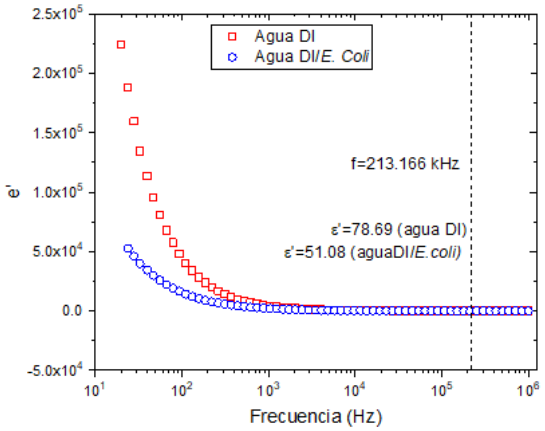

Fig. 3. *E. coli* sin exposición al CME fue utilizado como control. Comparación de ε' con agua DI.

B. *Efecto del CME en las propiedades eléctricas de E. coli*

Con el fin de estudiar los cambios provocados por el CME en las propiedades eléctricas de *E. coli,* los tubos de cultivo bacteriano fueron expuestos al campo magnético colocando imanes de ferrita de 0.1 T a los lados de los tubos durante 20, 40 y 60 minutos (Fig.4). Después de cada tiempo de exposición, una muestra de 100 µl fue tomada para analizarla por espectroscopía de impedancia. Un tubo de cultivo sin exposición al CME fue utilizado como control.

Fig. 4. Diseño experimental para estudiar el efecto del CME en las propiedades eléctricas de *E. coli.*

C. *Impedancia eléctrica Z*

Aquí presentamos resultados de las mediciones de impedancia eléctrica Z^*. Los cambios provocados por el CME en las propiedades eléctricas de *E. coli* las analizamos por medio de las curvas de la parte real de la impedancia (resistencia Z') e imaginarias (reactancia Z''). La Fig 5 (a) y (b) muestras curvas de Z' y Z'' contra la frecuencia, los tiempos de exposición de la bacteria al CME fueron de 20, 40 y 60 minutos.

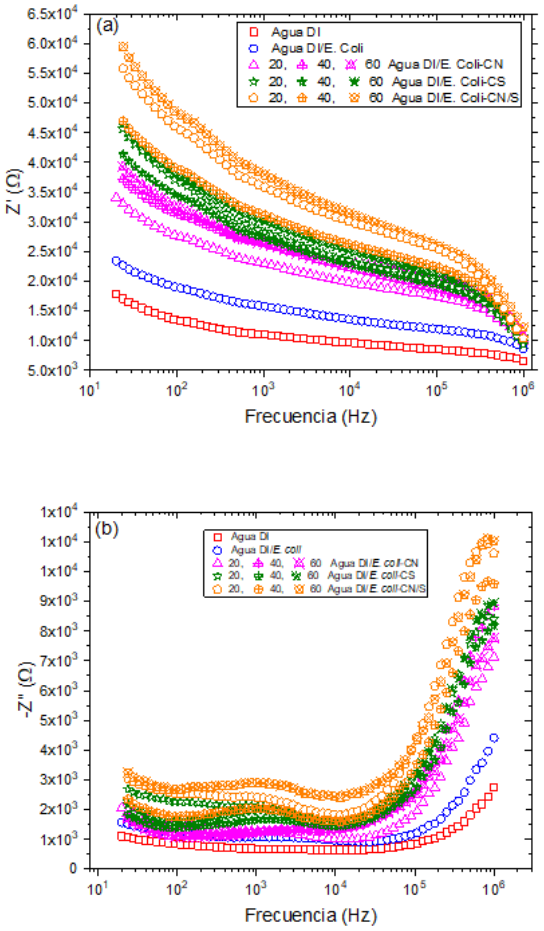

Fig. 5. (a) Curvas de parte real de Z' y (b) parte imaginaria Z'' vs frecuencia, para estudiar el efecto del CME en las propiedades eléctricas de *E. coli.* para tiempos de 20, 40 y 60 minutos de exposición

La conducción observada para Z' *y* Z'' para el agua DI/*E.coli* (dispersión α *y* β) se debe a una combinación de iones autodisociados del agua con iones de la bacteria. Como la concentración de bacterias se distribuye uniformemente en el agua y es pequeña en comparación con el número total de moléculas de agua, las bacterias disociadas con los iones del agua contribuyen ligeramente al cambio en el valor de la resistencia eléctrica, y el efecto de la polarización interfacial de las bacterias polarizadas con el agua también induce pequeños cambios en la capacitancia del sistema: Las curvas de la Fig. 5 (a) y (b) para el agua y agua DI/*E.coli* muestra una dispersión eléctrica que se considera prácticamente invariable. Cuando las bacterias son expuestas a un CME, usamos los fundamentos de la teoría electromagnética para afirmar que el CME activa componentes eléctricos y magnéticos en la bacteria, el cual induce cambios en sus propiedades eléctricas. En la Fig. 6 presentamos un modelo cualitativo de algunos posibles mecanismos eléctricos y magnéticos que se activan en la bacteria. Es importante para

nosotros mencionar nuevamente que las mediciones eléctricas se realizaron a las bacterias post exposición al CME y los resultados de las mediciones eléctricas indican que el efecto del campo permanece después de un tiempo. La Fig. 5 (a) y (b) presentamos las curvas experimentales de Z' y Z'' en función de la frecuencia para las bacterias expuestas al CME con las configuraciones cara norte (CN), cara sur (CS), cara norte/sur (CN/S), y con tiempos de exposición de 20, 40 y 60 minutos. En estas curvas observamos que el valor de Z' para las bacterias expuestas al CME incrementa su magnitud en comparación con el control, este cambio lo asociamos completamente al orden magnético y eléctrico inducido por el CME. Para precisar los cambios, a bajas frecuencias alrededor de 1 KHz, dominan la dispersión α y aparecen efectos de conductividad eléctrica asociados con la formación previa de iones inducidos por la exposición al CME. Para altas frecuencias en el intervalo medido, alrededor de 100 kHz, inicia el mecanismo de dispersión eléctrica β. Este mecanismo es originado por los efectos de polarización interfacial del medio con las bacterias, para el control este proceso comienza en 1 MHz de frecuencia. El corrimiento en frecuencia para la dispersión β del control con las bacterias expuestas al CME, puede deberse a la polarización eléctrica formada previamente por la exposición all CME.

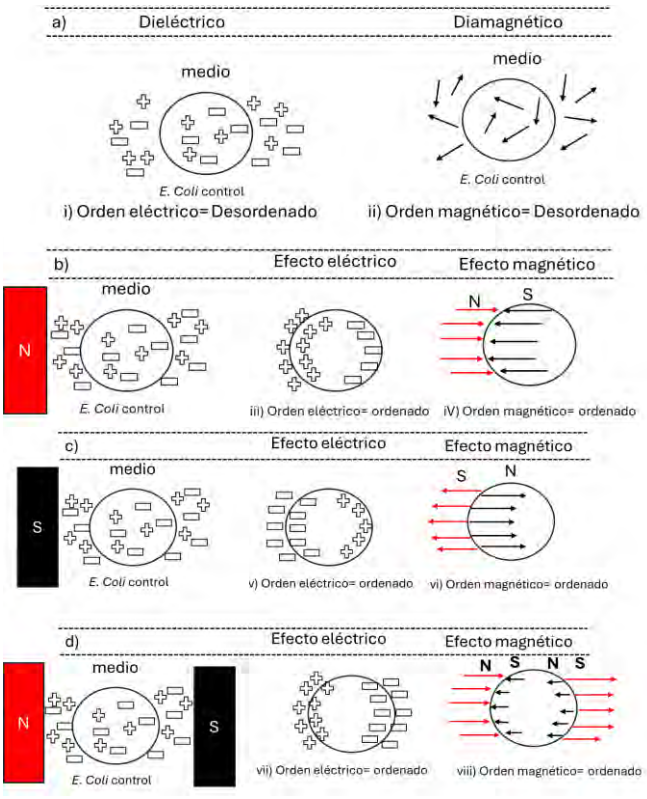

Fig. 6. Propuesta de un modelo cualitativo para explicar la interacción de un CME con bacterias en agua DI. a) Esquema de *E. coli* control, la bacteria y su medio son dieléctricos, exhiben un desorden eléctrico (i). Por otro lado, la bacteria y su medio también son diamagnéticos, exhibiendo un desorden magnético (ii). Las flechas representan momentos magnéticos orientados en una dirección. Cuando las bacterias son expuestas a un CME. En b) se muestra el esquema de CN de un imán de 0.1 T, (las líneas de campo del imán se representan con las flechas de color rojo). El campo N activa mecanismos eléctricos y magnéticos en el sistema. Primero induce orden eléctrico, ordenando las cargas eléctricas como se muestra en el esquema (iii), y también el campo N induce orden magnético representado por las flechas orientadas en una dirección preferencial. Las bacterias y el medio son diamagnéticos, esto significa que las bacterias y el medio se oponen al campo N aplicado por el imán. En el esquema se muestra que las líneas de campo para el imán N e inducido S apuntan en direcciones opuestas (iV). En c) las bacterias son expuestas al CME con la cara sur de un imán de 0.1 T, este campo S induce orden eléctrico y magnético como se observa en (v) y (vi) respectivamente. En d) La bacteria es colocada entre imanes de 0.1 T en la configuración CN/S. A esta configuración la llamaremos Par biomagnético (PB). En la configuración PB, la bacteria se polariza eléctricamente como en el esquema (vii) y el efecto magnético se ilustra en el esquema (viii). La configuración PB modifica completamente la estructura eléctrica y magnética de la bacteria. Una de las consecuencias de esta modificación, es la manera en que interaccionan las bacterias eléctricamente con bacterias vecinas, con iones del medio y hasta con la superficie de las paredes del medio que las contienen. La interacción puede ser del tipo eléctricamente repulsiva entre las bacterias y con las paredes del contenedor que las almacena evitando así contacto íntimo entre ellas y con la pared. Una consecuencia de este efecto puede ser la disminución de la capacidad de la colonia de bacterias de formar biopelículas. Una aplicación para la configuración PB para la medicina, es en coadyuvar a eficientizar el tiempo y el efecto de antibióticos bacterianos en animales y humanos, además de que se podría usar al PB para evitar la formación de biopelículas bacterianas.

La Fig. 7 muestra las gráficas Cole-Cole de las mediciones de impedancia eléctrica para bacterias expuestas a un CME de 0.1 T, con las configuraciones CN, CS y CN/S con tiempos de exposición de 20, 40 y 60 minutos. Para analizar los resultados tomamos como referencia la curva control de *E. coli*. En el eje real de la impedancia Z', sobre este eje cerca de cero (origen) se encuentra la región de altas frecuencias, mientras que, de lado derecho, alejado del origen se encuentra la región de bajas frecuencias. En las Fig 7 a), b) y c) observamos que las curvas que representan las mediciones de bacterias expuestas al CME, se alejan de la curva control indicando el primer efecto ocasionado por el CME. Este efecto se relaciona con el reordenamiento de la distribución de carga eléctrica en la membrana plasmática de la bacteria y con el reordenamiento de iones del medio que rodea la bacteria, esto ocasiona cambios en la interacción bacteria-bacteria y bacteria-medio. Por otro lado, las curvas medidas con bacterias expuestas a CME con la misma cara de imán, no muestran una clara dependencia temporal, ya que la separación entre curvas es muy similar. Para todas las curvas de impedancia de la Fig. 7 correspondientes a bacterias expuestas a CME, presentan dos semi-arcos claramente definidos. El primer arco se encuentra en la región de bajas frecuencias, y para bacterias expuestas con la CN del imán el arco inicia alrededor de $Z' = 30k\Omega$, y para bacterias expuestas con CS y CN/S el primer arco inicia en $Z' = 35k\Omega$ y $Z' = 40k\Omega$ respectivamente. Este arco se genera por fenómenos de dispersión α, y corresponde a mecanismos de polarización interfacial bacteria-bacteria y bacteria con el

medio.

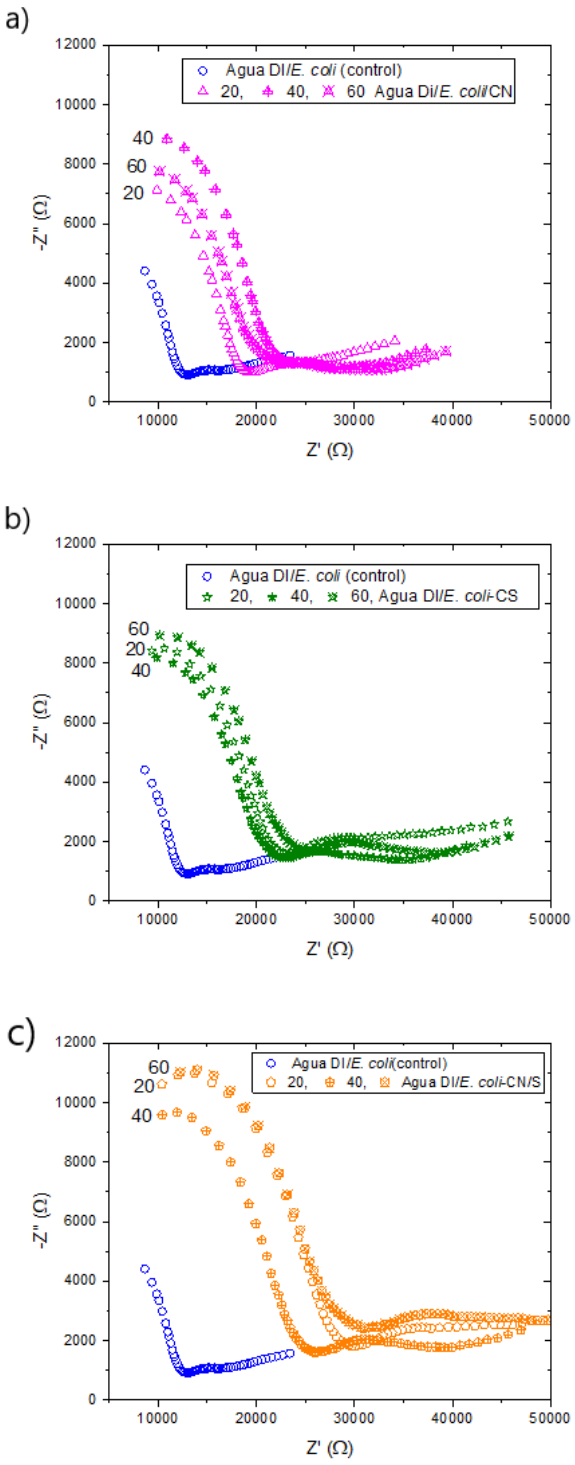

Fig. 7. Diagramas Cole-Cole o también llamadas curvas de impedancia eléctrica para a) Bacterias expuestas con la cara norte (CN). En b) y c) bacterias expuestas con la cara sur (CS) y cara norte/sur (CN/S) respectivamente. Los tiempos de exposición de la bacteria al CME de 0.1 T fueron de 20, 40 y 60 minutos. En todos los casos se toma como referencia la curva control

El segundo arco de impedancia para bacterias expuesta a CME para las tres configuraciones de exposición CN, CS y CN/S se encuentra en la región de altas frecuencias. Estos arcos los asociamos a mecanismos de dispersión β y corresponden a polarización molecular de la membrana plasmática de la bacteria junto con polarización de los dipolos de agua del medio y dipolos ligados a la bacteria.

Las curvas de impedancia de la Fig 7 para el control, también exhibe dos arcos, y ambos se encuentran en la región de altas frecuencias. El primer arco (asociado a dispersión α) para el control es muy pequeño e inicia alrededor de $Z' = 15\ k\Omega$, mientras el segundo arco inicia alrededor de $Z' = 10\ k\Omega$. La dispersión β para el control es muy débil y se necesitaría mayor frecuencia para activar con mayor claridad los fenómenos de polarización asociadas a este mecanismo.

D. Conductividad eléctrica σ'

En la Fig. 8 presentamos conductividad eléctrica en función de la frecuencia para el control y bacterias expuestas a CME de 0.1 T en la configuración CN, CS y CN/S por un tiempo de 20 minutos. La conductividad eléctrica de las bacterias expuestas al CME se observa que cambia en comparación con el control e incrementa con el aumento de la frecuencia. Este comportamiento de la conductividad eléctrica es reproducible para los tiempos de exposición de 40 y 60 minutos, y que no presentamos en este trabajo

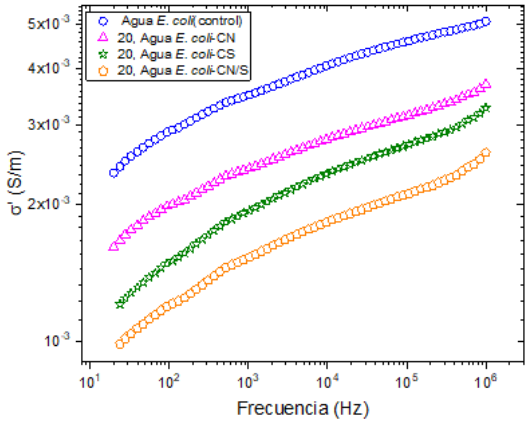

Fig. 8. Conductividad eléctrica σ' en función de la frecuencia, para control y bacterias expuestas a CME de 0.1 T por 20 minutos para configuración CN, CS y CN/S.

IV. DISCUSIÓN

El estudio de los efectos de CME en los procesos biológicos como consecuencia de su interacción con la materia biológica ha abarcado tanto organismos completos como microorganismos. Algunos de estos reportes utilizan

CME de imanes de ferrita y neodimio. En la levadura *Candida albicans* se ha analizado el efecto de la cara Norte, la cara Sur, así como la contribución de ambas caras a los efectos biológicos. El efecto de la cara Sur, así como de Norte/Sur parece ser más pronunciado en la disminución de la longitud de las hifas así como de un fenómeno de sinergia entre el CME y la anfotericina B aumentando el efecto antifúngico de este fármaco. Es posible que el CME influencia la organización de la membrana plasmática [19]

En un estudio previo, se utilizó a la bacteria *E. coli* para analizar los cambios a nivel morfológico como consecuencia de la exposición al CME utilizando las configuraciones cara Norte, cara Sur y caras Norte/Sur. Los resultados mostraron una disminución de la longitud celular dependiendo del tiempo de exposición para todas las configuraciones. En el caso de la cara Norte/Sur el efecto fue pronunciado a los 60 minutos de exposición. Además de la longitud celular se observó que la respuesta eléctrica de E. coli cambia post exposición al CME. Existen mecanismos que controlan la longitud celular tales como proteínas que responden a estímulos externos modificando su actividad principalmente en el control del tráfico de sustancias hacia el espacio extracelular e intracelular [20].

En este trabajo quisimos ampliar el estudio de los cambios de las propiedades eléctricas de *E. coli* después de la exposición al CME con las configuraciones cara Norte, cara Sur y caras Norte/Sur. Es bien conocido que los sistemas biológicos se encuentran compuestos por macromoléculas como las proteínas, los lípidos, los ácidos nucleicos y los carbohidratos. En general estas sustancias tienen una naturaleza polimérica y su composición química permite deducir que poseen cargas eléctricas distribuidas, debido a esto es lógico considerar que las macromoléculas tienen una contribución a las propiedades eléctricas generales de los sistemas biológicos. Tanto la composición química como eléctrica son importantes para las funciones biológicas [21]. Nuestros resultados sugieren que el campo magnético estático interactúa con las macromoléculas cambiando las propiedades eléctricas de estas y por lo tanto modificando la constante dieléctrica, la impedancia y la conductividad total de la bacteria *E. coli*. Queda por estudiar la significancia biológica de estos cambios en la bioelectricidad de los sistemas biológicos y cómo se relacionan con la fisiología celular.

V. CONCLUSIONES

Completamos el estudio y análisis del efecto del campo magnético estático de 0.1 T en las propiedades eléctricas de E. Coli. Para validar nuestras mediciones eléctricas, partimos de medir la constante dieléctrica y conductividad eléctrica del agua DI, $\varepsilon' = 78.69\ y\ \sigma' = 62.8 \mu S/cm$ a la frecuencia de 213.166 kHz. Tomamos como control bacterias sin exposición al campo magnético. La constante dieléctrica del control a la frecuencia de 213. 166 kHz fue de $\varepsilon' = 51.08$. Este cambio del valor de la constante dieléctrica del agua a la misma frecuencia lo atribuimos a la contribución eléctrica de las células de *E. coli*. Cuando *E. coli* fue expuesta a CME en las configuraciones de cara norte, cara sur y cara norte/sur por tiempos de 20, 40 y 60 minutos se modificaron sus propiedades eléctricas. Los cambios provocados por el CME en las propiedades eléctricas de *E. coli* las analizamos por medio de las curvas de la parte real de la impedancia Z' e imaginarias reactancia Z''. En el intervalo de frecuencias medido, observamos mecanismo de dispersión α y β. Estos mecanismos se modifican comparados con el control. Para explicar los cambios inducidos por el CME propusimos un modelo de interacción campo magnético - bacteria. En este modelo propusimos que el CME actúa en el reordenamiento de las cargas eléctricas del medio dieléctrico y también induce orden magnético al medio diamagnético. Este modelo nos ayudó a explicar el cambio en los valores de impedancia, resistencia eléctrica y conductividad de las bacterias expuestas a CME. De este modelo cualitativo deducimos que la configuración CN/S, la cual llamamos configuración del Par Biomagnético (PB). Esta configuración provoca interacción eléctrica del tipo repulsiva entre las bacterias y con las paredes del contenedor que las almacena evitando así contacto íntimo entre ellas y con la pared. Una posible consecuencia de este efecto puede ser la disminución de la capacidad de las bacterias de formar biopelículas. Una aplicación para la configuración PB para la medicina, es en coadyuvar a eficientizar el tiempo y el efecto de antibióticos bacterianos en animales y humanos, además de que se podría usar al PB para evitar la formación de biopelículas bacterianas en alimentos. Este modelo podría tener un potencial muy prometedor para continuar su estudio en futuros trabajos.

AGRADECIMIENTOS

A. Z. Martínez-Elena y J. L. Terán-Melo agradecemos de sobremanera a la directora de la Universidad de Nuevas Ciencias Médicas S. C. Mtra. Vivian Elena Goiz Martínez por facilitar el uso de las instalaciones de su universidad y financiar parte de esta investigación y de la misma manera extendemos nuestro agradecimiento a la M. en C. Eva Elisa Terán Melo, adjunta al hospital del Norte de Puebla, quien nos proporcionó la cepa bacteriana *E. coli* ATCC 25922.

REFERENCIAS

[1] J. F. Schecnk, “Physical interactions of static magnetic fields with living tissues”, *Progress in Biophysiscs and Molecular Biology*, Vol. 87, p.p. 185-202, 2005.

[2] M. A. Elblbesy, “Effect of static magnetic field on erythrocytes characterizations”, J. Biomedical Science and Engineering, Vol 3, p.p. 300-303, 2010.

[3] X. Zhang, “Biological Effects of Static Magnetic Fields”, Second Edition, Springer, 2023
[4] L. Oliveira dos Santos, T. Araujo González, B. Torsani Úbeda and R. Monte Alegre. Glutathione production is using magnetic fields generated by magnets. Braz Arch Biol Technol, Vol 55, pp. 921-926, 2012
[5] B. Yu, J. Liu, J. Cheng, L. Zhang, C. Song, X. Tian, Y. Fan, Y. Lv, and X. Zhang. A static magnetic field improves iron metabolism and prevents high-fat-diet/streptozocin induced-diabetes. Cell Press. The Innovation 2 (1), 100077. 2021
[6] G. Asgari, R. Khoshniyat and M. M. Golrokhi. “Survey of Magneto-tactic Properties of *Escherichia coli* Under Static Magnetic Fields” Avicenna j. Environ Health Eng. Vol 7, Issue 1, 2020
[7] L. Mhamdi, N. Mhamdi, N. Mhamdi, P. Lejeune, N. Jaffrezic-Renault, et al. Effect of static magnetic field on *Escherichia coli* adhesion and orientation. Canadian Journal of Microbiology, 62(11), pp. 944-952, 2016
[8] D. A. Dean, T. Ramanathan, D. Machado and R. Sundararajan. Electrical impedance spectroscopy study of biological tissues. J Electrostat, 66(3-4), 165-177, 2008
[9] W. Bai, K. S. Zhao and K. Asami. Dielectric properties of *E. coli* cell as simulated by the three-shell spheroidal model. Biophysical Chemistry, 122, 136-142, 2006
[10] J. Enderle, J. Bronzino, “Introduction to Biomedical Engineering”, pp. 667-746, 2012.
[11] G. Beretta, A. F. Mastorgio, L. Pedrali, S. Saponaro and E. Sezenna, “The effects of electric, magnetic and electromagnetic fields on microorganisms in the perspective of bioremediation”, Rev. Environ sci. Biotechnol. Vol. 18, p.p. 29-75, 2019
[12] V. Zablotskii, T. Polyakova, and A. Dejneka, “Cells in the Non-Uniform Magnetic World: How Cells Respond to High-Gradient Magnetic Fields”, *BioEssays,* pp. 1-10
[13] S. Abasi, J. R. Agass. G. G. Garayar-Leyva, B. K. Walther and A. Giuseppe-Elie, “Biolectrical Impedance Spectroscopy for Monitoring Mammalian Cellas and Tissues under Different Frecuency Domains: A review”. ACS Meas. sci. Au. 2022, 2, 495-516.
[14] O. G. Martisen, S. Grimnes and H. P. Schwan, “Interface phenomena and dielectric properties of biological tissue”. Encyclopedia of Surface and Colloid Science”. 2002.
[15] L. L. Crowell, J. S. Yakisich, B. Aufderheide and T. N.G Adamas, “Electrical Impedance Spectroscopy for Monitoring chemoresistance of cancer cells” Micromachines, 11, 832, 2020.
[16] T. Sun, N. G. Green and H. Morgan, “Analytical and numerical modeling methods for impedance analysis of single cells on-chip”, Nano, 3, 55-63, 2008.
[17] S. Gupta, P. K. Kilpatri, E. Melvin and O. D. Velv, “On chip latex agglutination immunoassay readout by electrochemical impedance spectroscopy”, Lab Chip, 12, 4279-4286, 2012.
[18] C. S. Raju and C. V. Krishnamurthy, “Charge migration model for the impedance response of DI water”, AIP Advances 9, 0.35141, 2019.
[19] D. Sztafrowski, J. Suchodolski, J. Muraszko, K. Sigler, A. Krasowska. The influence of N and S poles of static magnetic field (SMF) on Candida albicans hyphal formation and antifungal activity of amphotericin B. Folia Microbiologica, 64, 727-734, 2019.
[20] A. Z. Martínez-Elena and J. L. Terán-Melo. Estudio de los efectos de campo magnético estático en la longitud de la bacteria *Escherichia coli* y de sus propiedades eléctricas. Reunión Nacional Académica de Fisica y Matemáticas, 29, 2024
[21] R. H. W. Funk and F. Scholkmann. The significance of bioelectricity on all levels of organization of an organism. Part 1: From the subcellular level to cells. Progress in Biophysics and Molecular Biology, 177, 185-201, 2023