

DESARROLLO DEL MÉTODO DE CARGA DE UN CAPACITOR PARA
ENCONTRAR LA RESISTENCIA INTERNA EN UNA CELDA DE COMBUSTIBLE
MICROBIANA

LAURA CRISTHINA PÁEZ CRIADO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2014

DESARROLLO DEL MÉTODO DE CARGA DE UN CAPACITOR PARA
ENCONTRAR LA RESISTENCIA INTERNA EN UNA CELDA DE COMBUSTIBLE
MICROBIANA

LAURA CRISTHINA PÁEZ CRIADO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero químico

Directores

Ph.D. Viviana Sánchez Torres

Ph.D. M. Nazmul Karim

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2014

DEDICATORIA

A Dios, por hacer posible la realización de cada meta en mi vida, por ser mi guía y mi consuelo en momentos de adversidad. Por permitirme descubrir su propósito en cada nuevo proyecto.

A mis padres y familiares, por ser mi apoyo incondicional. Por ser mi voz de aliento y motivación en cada una de mis metas.

A mis amigos, por su invaluable amor en cada momento de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A mis directores, el Dr. M. Nazmul Karim, director del Departamento de Ingeniería Química de Texas A&M University, por confiar en mis habilidades e involucrarme en su grupo de investigación; y la Dr. Viviana Sánchez, por su guía constante en la realización de este proyecto.

Al Dr. Alim Dewan, investigador del Departamento de Ingeniería Química de Texas A&M University, por su constancia y enseñanza en la ejecución de este proyecto.

A mis compañeros de investigación (Ravi, Jonathan, Xinghua y Carl) por su aporte en cada una de las etapas de mi proceso de aprendizaje.

CONTENIDO

| | pág. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN | 14 |
| 1. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA | 19 |
| 1.1 PREPARACIÓN DEL INÓCULO | 19 |
| 1.2 PUESTA EN MARCHA DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA | 19 |
| 1.3 CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA | 21 |
| 1.4 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA INTERNA DEL SISTEMA | 21 |
| 1.4.1 Método de carga del capacitor para hallar la resistencia interna de la MFC | 21 |
| 1.4.2 Método de corriente interrumpida para hallar la resistencia interna de la MFC | 24 |
| 2. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 25 |
| 2.1 GENERACIÓN DE POTENCIA DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA | 25 |
| 2.2 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA INTERNA EMPLEANDO EL MÉTODO DE CARGA DEL CAPACITOR | 26 |
| 2.2.1 Influencia de la capacitancia en la resistencia interna de la MFC | 26 |
| 2.2.2 Comparación entre los resultados experimentales y los valores teóricos del modelo de carga del capacitor | 28 |
| 2.3 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA INTERNA UTILIZANDO EL MÉTODO DE CORRIENTE INTERRUMPIDA | 32 |
| 3. CONCLUSIONES | 33 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 33 |

| | |
|--------------|----|
| BIBLIOGRAFÍA | 38 |
| ANEXOS | 41 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|---|------|
| Figura 1. Reacciones en una MFC | 12 |
| Figura 2. MFC de doble cámara usada en los experimentos | 17 |
| Figura 3. Esquema del MFCT | 19 |
| Figura 4. Diagrama de estado del MFCT | 20 |
| Figura 5. Esquema simplificado del circuito RC equivalente y los ciclos de carga y descarga del capacitor | 20 |
| Figura 6. Influencia de la capacitancia en la potencia generada por la MFC | 22 |
| Figura 7. Influencia de la capacitancia en la resistencia interna de la MFC | 24 |
| Figura 8. Influencia de la capacitancia en la resistencia interna de una batería alcalina | 25 |
| Figura 9. Curvas teóricas y experimentales del método de carga del capacitor | 26 |

LISTA DE TABLAS

pág.

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Resultados de la resistencia interna de la MFC empleando el método de corriente interrumpida | 29 |
|--|----|

LISTA DE ANEXOS

| | pág. |
|--|------|
| ANEXO A. Pérdidas de potencial de la celda de combustible microbiana | 35 |

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DEL MÉTODO DE CARGA DE UN CAPACITOR PARA ENCONTRAR LA RESISTENCIA INTERNA EN UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA*

AUTOR: LAURA CRISTHINA PÁEZ CRIADO**

PALABRAS CLAVE: Celda de combustible microbiana, *Shewanella oneidensis* MR-1, circuito RC, corriente interrumpida, resistencia interna.

CONTENIDO:

A pesar de que las celdas de combustible microbianas (MFCs) representan una fuente de energía renovable, su principal desventaja es la baja generación de potencia, comparada con la que las celdas de combustible tradicionales pueden generar. La potencia de una MFC, es resultado de las reacciones de óxido-reducción catalizadas por los microorganismos; y a su vez, está limitada por la resistencia interna del sistema. Con la finalidad de analizar el desempeño de una MFC, la resistencia interna necesita ser evaluada. Siendo una propiedad del sistema, incluye la resistencia ofrecida por el ánodo, el cátodo, los electrolitos y la membrana intercambiadora de protones (PEM).

En este estudio, el método novedoso y no invasivo, basado en el ciclo de carga de un capacitor, fue desarrollado para analizar la resistencia interna de una MFC de doble cámara. El método de carga del capacitor está basado en el arreglo de un circuito RC; en el cual, un resistor es conectado en serie con un capacitor, y la resistencia interna, queda expresada en términos de la capacitancia, la constante de tiempo (τ) del capacitor y la resistencia externa. Se determinó que un capacitor de $4,7 \times 10^{-1}$ F permite almacenar la máxima potencia generada ($0,7 \times 10^{-2}$ mW), y encontrar la resistencia interna real del sistema (80,7 Ω). Al comparar este valor con el obtenido usando la técnica de corriente interrumpida, el resultado fue de 7,8 Ω , el cual no representa las pérdidas totales de la MFC, pues emplea tiempos muy cortos durante la medición.

Se concluye pues, que la caracterización de la MFC requiere de un método que implique un tiempo suficiente para reflejar todas las pérdidas del sistema. Este requisito, que no es cumplido usando las técnicas tradicionales, es tenido en cuenta con el método de carga del capacitor.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías físico-químicas. Escuela de ingeniería química

Directores: Ph.D. Viviana Sánchez Torres.

Ph.D. M. Nazmul Karim.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF THE CHARGING CAPACITOR METHOD TO FIND THE INTERNAL RESISTANCE IN A MICROBIAL FUEL CELL*

AUTHOR: LAURA CRISTHINA PÁEZ CRIADO**

KEYWORDS: Microbial fuel cell, *Shewanella oneidensis* MR-1, RC circuit, current interrupt, internal resistance

CONTENT:

Although microbial fuel cells (MFCs) represent a renewable energy resource, their main disadvantage is that they generate lower power density compared to a traditional fuel cell. The power produced by a MFC results from redox reactions catalyzed by microorganisms; moreover, it is limited by its high internal resistance. In order to analyze the performance of the MFC, the internal resistance needs to be evaluated. Being a property of the system, the internal resistance includes the anode resistance, cathode resistance, electrolyte resistance, and proton exchange membrane (PEM) resistance.

In this study, a new and non-invasive method based in charging capacitor was developed, and the internal resistance of a double chamber MFC was analyzed. The charging capacitor method is based on the RC circuit arrangement; in which a resistor is connected in series with the capacitor and the internal resistance measured is related to the capacitance, the capacitor time constant (τ), as well as the external resistance. It was determined that using a $4,7 \times 10^{-1}$ F capacitor is possible to storage the maximum value of power generation ($0,7 \times 10^{-2}$ mW), and find the real internal resistance in the system (80,7 Ω). Using the current step technique the internal resistance was around 7,8 Ω . This result does not represent the total losses in the MFC because it uses very short times during the measurement.

As a conclusion, the characterization of the MFC requires a method that utilizes enough time to reflect all the system losses. This requirement is not achieved by traditional methods; however, it is considered by the charging capacitor method.

* Degree Project

** Physicochemical Engineering Faculty. Chemical Engineering Department

Directors: Ph.D. Viviana Sánchez Torres.

Ph.D. M. Nazmul Karim.

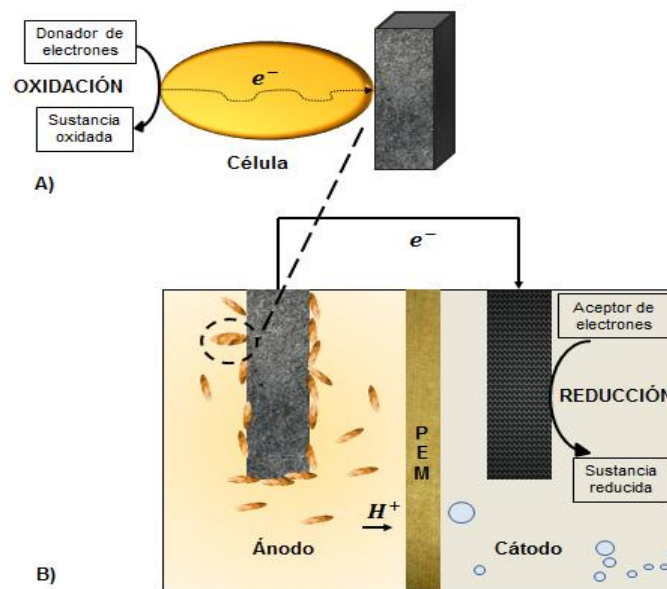
INTRODUCCIÓN

El incremento constante de la demanda de energía, las presiones geopolíticas, y la búsqueda de fuentes energéticas alternativas, continúan siendo los principales desafíos del campo energético mundial ^[1]. Según un reporte preparado por EIA ^[2], (U.S. Energy Information Administration), en el 2013, a parte del petróleo, la electricidad representó el mayor crecimiento mundial en términos de consumo de energía, haciendo evidente la necesidad de desarrollar novedosas técnicas, que en un futuro, suplan las necesidades mundiales. Dada la versatilidad en la generación de electricidad a través de microorganismos, éste ha sido un tema muy investigado ^[3]. Existen por tanto, diversos tipos de sistemas que emplean microorganismos en la generación de electricidad, entre ellos: las celdas de combustible microbianas (MFCs). Las MFCs son sistemas bio-electroquímicos, que se valen tanto de la capacidad de los microorganismos para interactuar eléctricamente con electrodos, así como del empleo de sustratos en reacciones de oxidación ^[4]. Las MFCs, al ser seleccionadas como fuente alternativa de energía poseen numerosas aplicaciones, entre ellas: *(i)* el tratamiento de aguas residuales, en los que la generación de electricidad no es el objetivo primordial; y *(ii)* el funcionamiento de dispositivos electrónicos en lugares remotos (por ejemplo, sensores instalados en ríos o en fuentes de agua profunda ^[5]). De igual manera, las MFCs pueden ser modificadas para emplearse en *(iii)* biorremediación y *(iv)* producción de hidrógeno ^[6].

Debido a su capacidad de generar energía eléctrica, una MFC puede ser comparada con una batería. Los mecanismos de reacción en ambos sistemas son similares. No obstante, en una MFC el combustible es almacenado fuera del sistema, y suplido constantemente; mientras que, en una batería el combustible es limitado y almacenado internamente. La idea detrás de las MFCs es separar la oxidación y reducción de las especies involucradas, permitiendo a los electrones fluir a través de un circuito externo. Por tanto, una MFC se compone de dos

ambientes: anódico y catódico (Figura 1). En el anódico, microorganismos como *Shewanella oneidensis* MR-1 son los encargados de oxidar lactato, liberando parte de los electrones producidos durante el proceso de respiración celular [7]. Estos electrones liberados, fluyen desde el ánodo y a través de un circuito externo, hasta alcanzar el cátodo; produciendo corriente. Por cada electrón liberado en el ánodo, un protón es transferido a través de una membrana intercambiadora de protones (PEM). Dicha PEM separa ambos compartimientos, permitiendo el paso de los protones desde el ánodo hacia el cátodo donde, junto con el oxígeno forman agua. Es ésta la reacción de reducción que se lleva a cabo en el entorno catódico.

Figura 1. Reacciones en una MFC. A) oxidación y B) reducción



La transferencia de electrones hacia el ánodo puede ser descrita mediante dos mecanismos: de transferencia directa y de transferencia indirecta -o con intervención de mediadores-. En la transferencia directa, se establece un contacto directo entre citocromos (proteínas incorporadas en la membrana celular) y el electrodo [8]; o bien, entre estructuras conocidas como nanocables y el electrodo.

Por ejemplo, cuando una MFC es inoculada con una colonia de *S. oneidensis* MR-1, ésta coloniza el ánodo rápidamente, produciendo un amplio número de nanocables, a través de los cuales se genera un contacto directo bacteria-electrodo y bacteria-bacteria [8, 9]. En la transferencia indirecta, mediadores solubles actúan como sustancias oxido-reductoras; básicamente, son transportadores de electrones desde los microorganismos hasta la superficie del electrodo, en la cual son oxidados. Una vez oxidados, se difunden de regreso a la célula y continúan con la transferencia. Existen dos tipos de mediadores: (i) endógenos, y (ii) exógenos (naturales o artificiales). Aun cuando el uso de mediadores exógenos facilita la transferencia de electrones al ánodo, su adición al sistema es costosa y algunas veces tóxica.

Sin importar el mecanismo en el que los electrones son cedidos, las MFCs poseen una gran desventaja al ser comparadas con las celdas de combustible convencionales: su baja generación de potencia. Dicha limitante, –cuyo valor es inferior en tres órdenes de magnitud– es en gran medida influenciada por la resistencia interna (R_i) del sistema. Pei-Yuan y Zhong-Liang [10] definen la R_i a través del concepto de pérdidas de voltaje del sistema. Una MFC posee un voltaje teórico, que representa el máximo potencial que puede ser alcanzado. Dicho valor, conocido como fuerza electromotriz (FEM, E_t), nunca es adquirido en la práctica; como consecuencia de las pérdidas de voltaje. Existen tres tipos de pérdidas de voltaje: (i) de activación (η_{act}), debida a la cinética de la reacción, (ii) óhmica (η_{ohmic}) y (iii) de concentración (η_{conc}), debida al transporte de masa. La ecuación (1) define que el voltaje de salida (V) de una MFC es:

$$V = E_t - \eta_{act} - \eta_{ohmic} - \eta_{conc} \quad (1)$$

Por consiguiente, la R_i queda definida conforme a cada pérdida de voltaje en la MFC en: resistencia interna de activación, resistencia interna óhmica y resistencia interna de concentración.

a) Resistencia interna de activación (R_{act}). Es debida al consumo de energía necesario para iniciar las reacciones de oxidación y reducción en la superficie del ánodo y cátodo, respectivamente. Depende de la naturaleza de la interfaz electrodo-electrolito en cada compartimiento de la MFC.

b) Resistencia óhmica (R_{ohmic}). Es causada por el flujo de electrones a través de los electrodos y demás interconexiones, así como el flujo de iones en el electrolito. Por tanto, depende del anolito, catolito y de la PEM.

c) Resistencia de concentración (R_{conc}). Depende de la transferencia de las especies gaseosas a través de los poros de cada electrodo. Es decir, resulta del cambio en la concentración de los electrolitos en la superficie de los electrodos, durante el paso de la corriente.

Una vez establecida la distribución de la resistencia interna, es posible definirla en términos de las pérdidas de voltaje (η_{act} , η_{ohmic} y η_{conc}) y la corriente (I), como muestra la ecuación (2):

$$R_i = \frac{\eta_{act} + \eta_{ohmic} + \eta_{conc}}{I} = R_{act} + R_{ohmic} + R_{conc} \quad (2)$$

Existen diferentes métodos para evaluar la R_i de la MFC, que comparten ciertas características; todas ellas relacionadas con perturbar las condiciones eléctricas del sistema, y medir las ondas de corriente y/o voltaje resultado de la perturbación.

Uno de los métodos empleados para medir la resistencia interna es **el método de corriente interrumpida** ^[15, 16], el cual es una técnica de corriente alterna en el dominio del tiempo. Básicamente, la corriente es rápidamente interrumpida y el voltaje antes y durante la interrupción es medido. Por tanto, en principio el voltaje de la celda alcanza un incremento casi instantáneo ΔV (V), debido al cambio en la

corriente ΔI (A). La resistencia interna de la celda R_i (Ω) queda establecida como el cociente de estos cambios instantáneos, como lo muestra la ecuación (3).

$$R_i = \Delta V / \Delta I \quad (3)$$

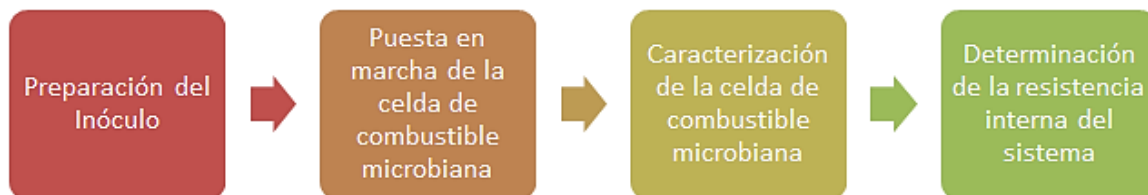
Otra de las técnicas empleadas es la **espectroscopía de impedancia electroquímica** (EIS) la cual involucra una perturbación de corriente alterna (AC) en un rango de frecuencias - típicamente entre 10,0 KHz hasta 1,0 Hz o menor- la variación resultante es monitoreada, e incluye la magnitud y fase del voltaje de la celda y de la corriente. Tanto el voltaje como la corriente son esenciales en la determinación de la impedancia compleja del sistema electroquímico en estudio [11].

Aunque ambas técnicas son utilizadas ampliamente, su principal limitación radica en la imposición de un cambio en las propiedades del sistema, aun cuando dicha variación se lleva a cabo en un corto periodo de tiempo. Debido a esto, el objetivo principal de este estudio es presentar un nuevo esquema no invasivo para medir la R_i de una MFC, el cual es conocido como '**el método de carga del capacitor**'. Este método está basado en el conocido arreglo de un circuito RC, en el cual la resistencia interna puede ser expresada como lo muestra la ecuación (4).

$$R_i = \tau / C - R_e \quad (4)$$

Donde τ es la constante de tiempo del capacitor, C es la capacitancia y R_e la resistencia externa del circuito.

1. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA



1.1 PREPARACIÓN DEL INÓCULO

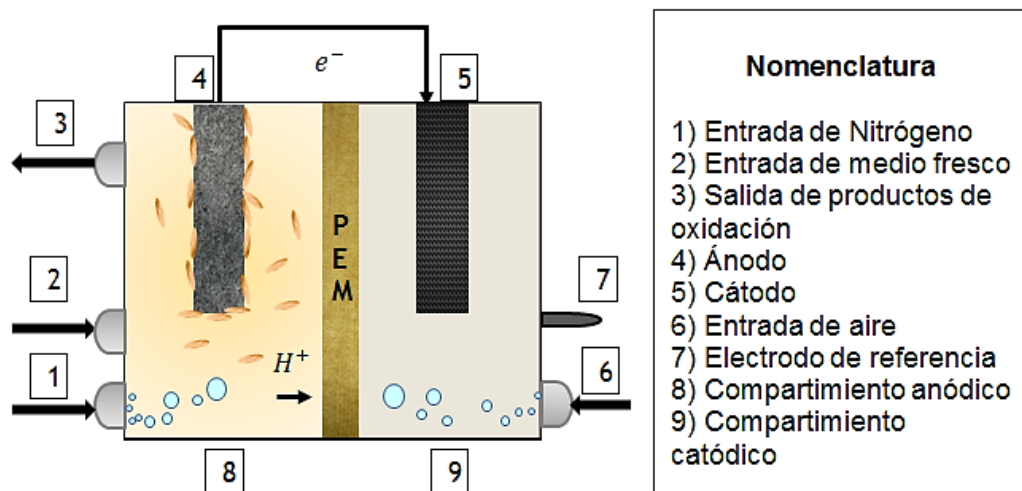
La bacteria anaerobia facultativa *Shewanella oneidensis* MR-1 fue utilizada en todos los experimentos. Como medio de cultivo fue empleado L.B. (lysogeny broth) cuya composición fue 10,0 gL⁻¹ de triptona, 5,0 gL⁻¹ de extracto de levadura y 10,0 gL⁻¹ de cloruro de sodio; adicionalmente, 8,4 mL⁻¹ de lactato de sodio fueron añadidos. Empleando 30,0 mL del medio de cultivo, *S. oneidensis* MR-1 fue inoculada y posteriormente mantenida a 30°C y 130 rpm por alrededor de 24 h. Esta cantidad corresponde al 10% del volumen total del compartimiento anódico, en el cual fue transferido el inóculo.

1.2 PUESTA EN MARCHA DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA

Se empleó una MFC de doble cámara, con un volumen de 300,0 mL. Cada cámara fue elaborada a partir de policarbonato y separada por una PEM (ESC-7000 Electrolytica Corporation). El catolito estaba compuesto por 3,5× 10⁻¹ gL⁻¹ KH₂PO₄ y 1,7 gL⁻¹ NaCl; el anolito estaba constituido por el medio de cultivo fresco. En *el compartimiento catódico*, el oxígeno (aceptor de electrones) es reducido en la formación de agua. Así mismo, dos electrodos fueron ubicados en este terminal positivo: un “electrodo de aire” y un electrodo de referencia Ag/AgCl. Existen dos puertos ubicados en la parte superior de la cámara; uno de ellos

contiene un filtro de 0,2 micrones que funciona como liberador de presión, mientras que el segundo puerto permite el acceso del electrodo dentro del compartimiento catódico. En el compartimiento anódico, *S. oneidensis* MR-1 fue la encargada de oxidar el lactato de sodio (fuente principal de carbono) para generar electrones y protones requeridos en la generación de electricidad. Las condiciones anaeróbicas se garantizaron suministrando nitrógeno continuamente. Los electrodos de ambos compartimientos fueron elaborados a partir de carbón catalizado con base de manganeso, bordeado por una malla de alambres de platino, -permitiendo alta conductividad eléctrica y mayor eficiencia de transferencia de electrones [12]-. El ánodo y el cátodo fueron situados paralelos a la PEM, distantes 1 cm de la misma. Las primeras 24 horas de operación fueron llevadas a cabo en modo discontinuo. Luego, se empleó el modo continuo; éste fue mantenido bombeando medio fresco con un flujo de 0,2 mL min⁻¹ directamente dentro del compartimiento anódico. Empleando el mismo flujo, residuos de biomasa y subproductos de la oxidación fueron extraídos del sistema. La Figura 2 muestra el montaje experimental descrito anteriormente.

Figura 2. MFC de doble cámara usada en los experimentos



1.3 CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA

La generación de potencia de la MFC fue caracterizada utilizando el método de carga del capacitor. Diferentes tamaños de capacitores ($1,0$, $4,7 \times 10^{-1}$, $3,3 \times 10^{-2}$ y $4,7 \times 10^{-3}$ F) fueron empleados para almacenar energía de manera intermitente. Dado que la MFC genera baja potencia, es necesario almacenar la energía en el capacitor, antes de emplearla en dispositivos electrónicos de alto consumo de potencia ^[13].

El proceso llevado a cabo fue el siguiente: se permitió la carga y descarga de cada uno de los capacitores en un rango de voltaje entre 0 V (voltaje de descarga) y el voltaje de circuito abierto del sistema (OCP); el cual fue medido una vez la celda de combustible microbiana se encontraba en estado estable. Teniendo en cuenta que al iniciar cada ciclo de carga y descarga para los capacitores, se debía tener la seguridad de estabilidad en el potencial de la celda. Al menos dos curvas de cada ciclo fueron recopiladas para cada una de las capacitancias empleadas. La ecuación (5) permitió hallar la generación de potencia. En ella, C representa la capacitancia (F), V_c y V_d los potenciales de carga y descarga (V); t_c y t_d son los tiempos de carga y descarga del capacitor (s), respectivamente.

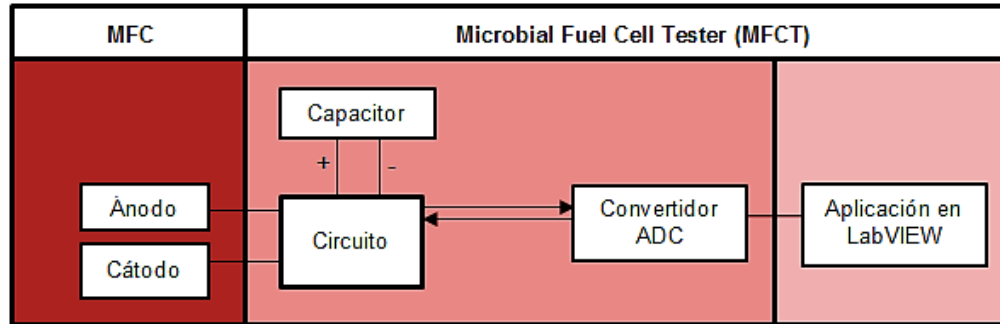
$$P_{prom} = \frac{W_c}{t_c - t_d} = \frac{1}{2} \frac{C(V_c^2 - V_d^2)}{t_c - t_d} \quad (5)$$

1.4 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA INTERNA DEL SISTEMA

1.4.1 Método de carga del capacitor para hallar la resistencia interna de la MFC. El dispositivo a través del cual fueron reunidos los datos necesarios, es conocido como –“the Microbial Fuel Cell Tester (MFCT)”- y corresponde a un esquema desarrollado por Dewan y otros ^[14]. La Figura 3 muestra que el MFCT consiste en un circuito electrónico, un capacitor, un convertidor análogo-digital

(convertidor ADC, 1608 FS, Measurements Computing™) y un software personalizado escrito en LabVIEW® (www.ni.com/labview).

Figura 3. Esquema del MFCT



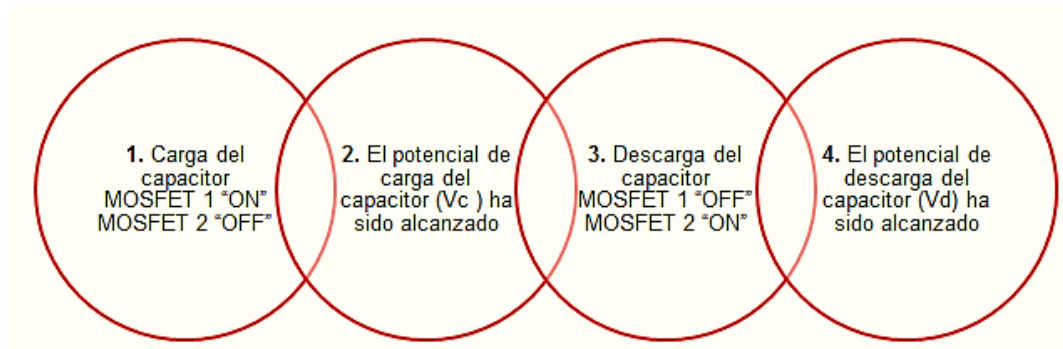
Adaptado de: Dewan y otros ^[14].

El MFCT fue implementado en una PCB (tarjeta de circuito impreso), y un capacitor externo fue conectado de tal manera que fuera fácilmente intercambiable. El convertidor ADC fue seleccionado con el fin de suplir tres diferentes necesidades: (1) encender y permitir el funcionamiento del circuito eléctrico, (2) monitorear el potencial del capacitor, y (3) monitorear los potenciales del ánodo y cátodo empleando para ello un electrodo de referencia. El programa personalizado en LabVIEW® con una interfaz de usuario gráfica (GUI) permitió seleccionar los potenciales de carga (V_c) y descarga del capacitor (V_d). En cuanto al circuito de diseño personalizado, fue controlado por el convertidor ADC a través de dos puertos digitales de salida. Cada uno de ellos estaba conectado a la terminal de compuerta (G, gate) de un transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET). Ambos MOSFETs actúan como interruptores en el proceso de carga y descarga del capacitor. La Figura 4 muestra el diagrama de estado del MFCT.

Ahora bien, el método de carga del capacitor emplea la constante de tiempo (τ), la resistencia externa y la capacitancia como principales factores. La Figura 5 muestra el circuito RC equivalente usado para explicar el método, así mismo

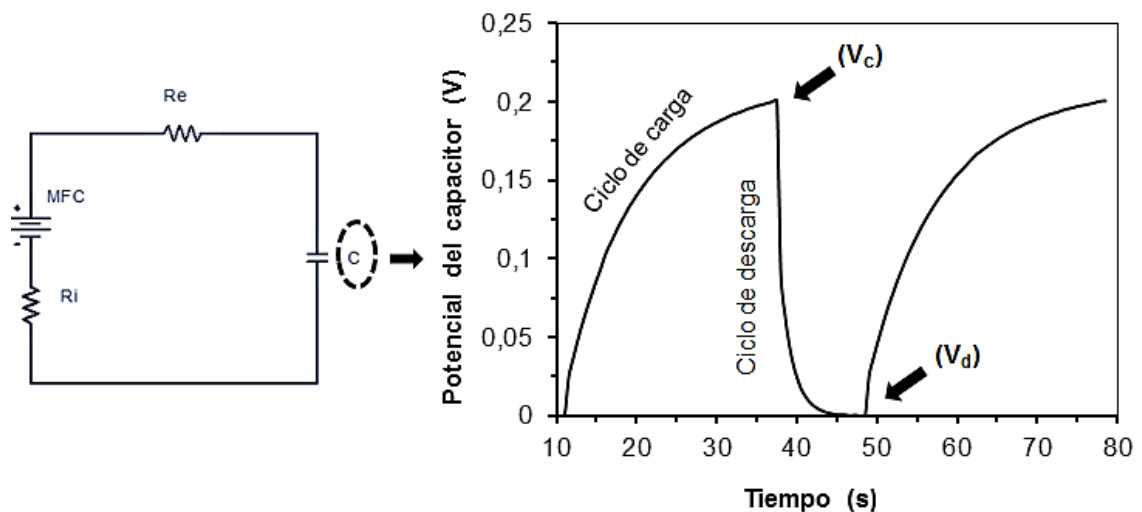
permite apreciar los ciclos de carga y descarga llevados a cabo por el capacitor, considerando MFC como la fuente de voltaje.

Figura 4. Diagrama de estado del MFCT



Adaptado de: Dewan y otros ^[14].

Figura 5. Esquema simplificado del circuito RC equivalente y los ciclos de carga y descarga del capacitor



La constante de tiempo (τ) manifiesta la velocidad a la cual es cargado el capacitor, es decir, es el tiempo en el que el potencial del capacitor incrementa su valor desde 0 hasta 0,632 del OCP. El ciclo de carga del capacitor fue descrito a

partir de la ecuación (6), en la cual V_c representa el voltaje del capacitor (V), V_o el OCP (V), τ es la constante de tiempo (s^{-1}) y t es el tiempo transcurrido (s).

$$V_c = V_o \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \quad (6)$$

En términos de almacenamiento de energía en un capacitor, τ se define como lo muestra la ecuación (7).

$$\tau = (R_i + R_e) * C \quad (7)$$

Como parte del proceso, se evaluó la resistencia interna de la MFC utilizando capacitores de 4,0, 2,0, 1,0, $4,7 \times 10^{-1}$, $3,3 \times 10^{-2}$, $2,2 \times 10^{-2}$ y $4,7 \times 10^{-3}$ F. Así mismo, para cada capacitancia, se hizo una comparación entre los resultados experimentales obtenidos y los valores teóricos del método. Finalmente, como control positivo del método de carga del capacitor, se empleó una batería alcalina de 1,5 V (RAYOVAC®). La batería funcionó como fuente de voltaje para cargar capacitores de 10,0, 4,0, 2,0, $4,7 \times 10^{-1}$ y $3,3 \times 10^{-2}$ F. El proceso de carga fue el mismo que el desarrollado para la MFC.

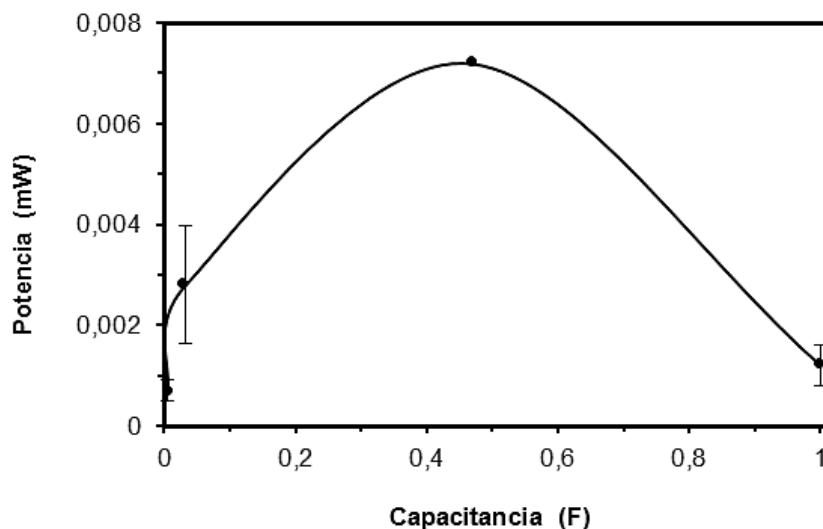
1.4.2 Método de corriente interrumpida para hallar la resistencia interna de la MFC. En este caso particular, un potencióstato (Wavedriver 10 Potentiostat/Galvanostat System, Pine Research Instrumentation), fue seleccionado, para medir la respuesta del potencial del sistema, al estar expuesto a tres intervalos de corriente, entre 0 y $-0,1 \times 10^{-1}$ A, entre $-0,1 \times 10^{-1}$ y 0 A, y entre 0 y $0,1 \times 10^{-1}$ A. La resistencia interna fue evaluada teniendo en cuenta la ecuación (3).

2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

2.1 GENERACIÓN DE POTENCIA DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA

La Figura 6 presenta la relación entre la potencia generada por la MFC, que es almacenada en cada capacitor; y la capacitancia respectiva (véase ecuación 5). Los resultados, obedecen a los valores promedios de diferentes días de corrida, y las barras de error están basadas en la desviación estándar de los datos. Como se aprecia, para capacitores pequeños (capacitancia $< 4,7 \times 10^{-1}$ F) se obtiene una potencia muy baja, que aumenta al incrementar el valor de la capacitancia. Así, para un capacitor de $4,7 \times 10^{-1}$ F, la relación entre la capacitancia y el tiempo de carga, obedece al valor máximo de potencia para el sistema. Igualmente, para capacitores más grandes (capacitancia $> 4,7 \times 10^{-1}$ F) la potencia disminuye. Aun cuando existe un valor óptimo de capacitancia, una potencia de $0,7 \times 10^{-2}$ mW indica que existen de altas pérdidas en la MFC durante la generación de corriente.

Figura 6. Influencia de la capacitancia en la potencia generada por la MFC



2.2 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA INTERNA EMPLEANDO EL MÉTODO DE CARGA DEL CAPACITOR

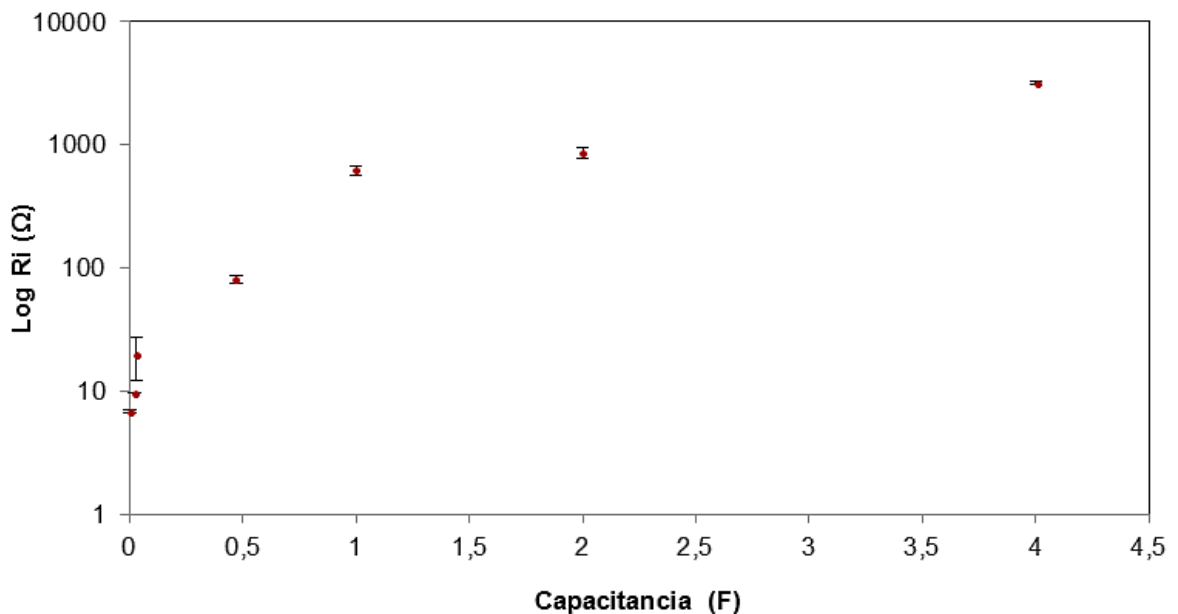
2.2.1 Influencia de la capacitancia en la resistencia interna de la MFC. Tal como fue descrito en la sección 1.4.1, se emplearon diferentes capacitores en la determinación de la R_i de la MFC. Para cada capacitancia, fueron recolectados al menos dos ciclos de carga, en diferentes días de corrida. Los resultados finales, mostrados en la Figura 7, fueron promediados y comparados con la desviación estándar para cada capacitancia. Así mismo, fueron analizados en tres intervalos: 1) entre $4,7 \times 10^{-3}$ y $2,2 \times 10^{-2}$ F; 2) entre $3,3 \times 10^{-2}$ y $4,7 \times 10^{-1}$ F; 3) mayores que $4,7 \times 10^{-1}$ F.

1) Capacitores entre $4,7 \times 10^{-3}$ y $2,2 \times 10^{-2}$ F. En este rango, los valores de R_i oscilan entre 6,0 y 10,0 Ω . Dado que los capacitores son muy pequeños, el tiempo del ciclo de carga no es suficiente para medir todas las pérdidas de potencial de la MFC. Ya que la MFC es un sistema que emplea microorganismos como catalizadores en las reacciones de óxido-reducción, el tiempo necesario en la generación de cargas obedece a un proceso lento, ampliamente marcado por pérdidas de tipo intracelular y extracelular ^[17, 21, 22, 23] (véase Anexo A para mayor información).

2) Capacitores entre $3,3 \times 10^{-2}$ y $4,7 \times 10^{-1}$ F. En este caso, los capacitores emplean un tiempo de carga mayor, comparados con capacitores menores. Los valores de R_i pertenecen a un rango de 20,0 a 80,0 Ω . Indicando que, durante el tiempo de carga del capacitor, más pérdidas de potencial del sistema son tenidas en cuenta. Partiendo del análisis hecho en la Figura 6, para estos valores de capacitancia se observa un aumento en la potencia almacenada por los capacitores. Por ello, en este rango es posible caracterizar correctamente la R_i de la MFC, y asegurar un óptimo desempeño del sistema en cuanto a la generación de la máxima potencia.

3) Capacitores mayores que $4,7 \times 10^{-1}$ F. Este rango muestra un incremento constante en la R_i medida; valores entre 600,0 y 3200,0 Ω , demuestran que los capacitores con gran capacidad de almacenamiento de energía eléctrica, fuerzan el desempeño de la MFC. Como ya se ha dicho, la MFC no es capaz de generar suficiente energía eléctrica, por tanto no es un sistema apto para suplir los requerimientos de altas capacitancias. En comparación, se ha determinado – Figura 6 - que para capacitancias mayores que $4,7 \times 10^{-1}$ F la potencia almacenada disminuye cada vez más, demostrando que este rango no es apropiado.

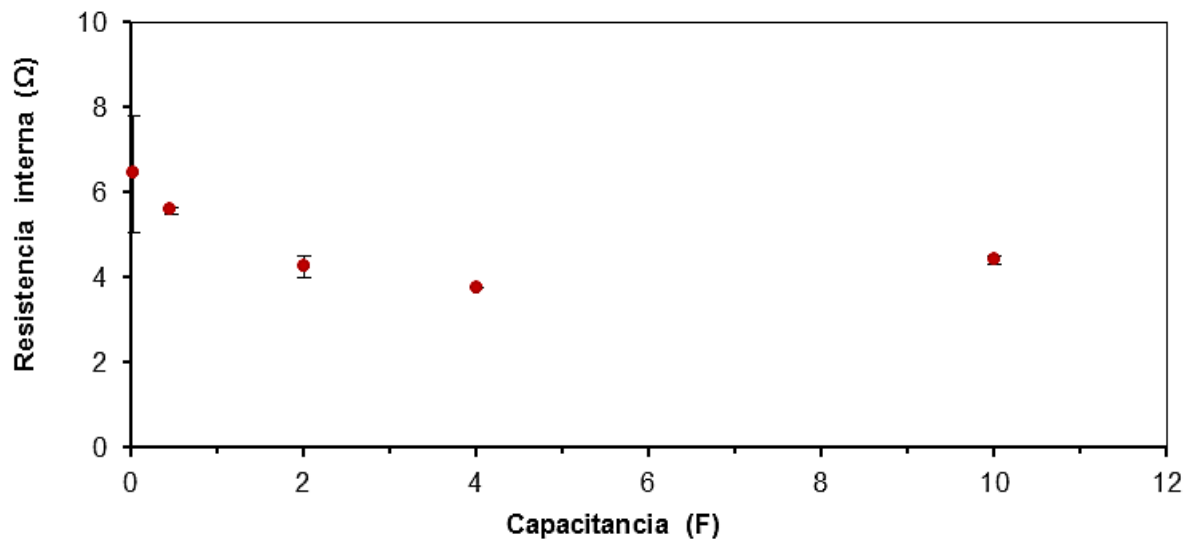
Figura 7. Influencia de la capacitancia en la resistencia interna de la MFC



Como se ha observado, el método de carga del capacitor permite caracterizar las diferentes pérdidas de potencial que ocurren durante la generación de energía eléctrica en la MFC. En este caso particular, para una capacitancia de $4,7 \times 10^{-1}$ F, la R_i de la MFC es de aproximadamente 80,7 Ω .

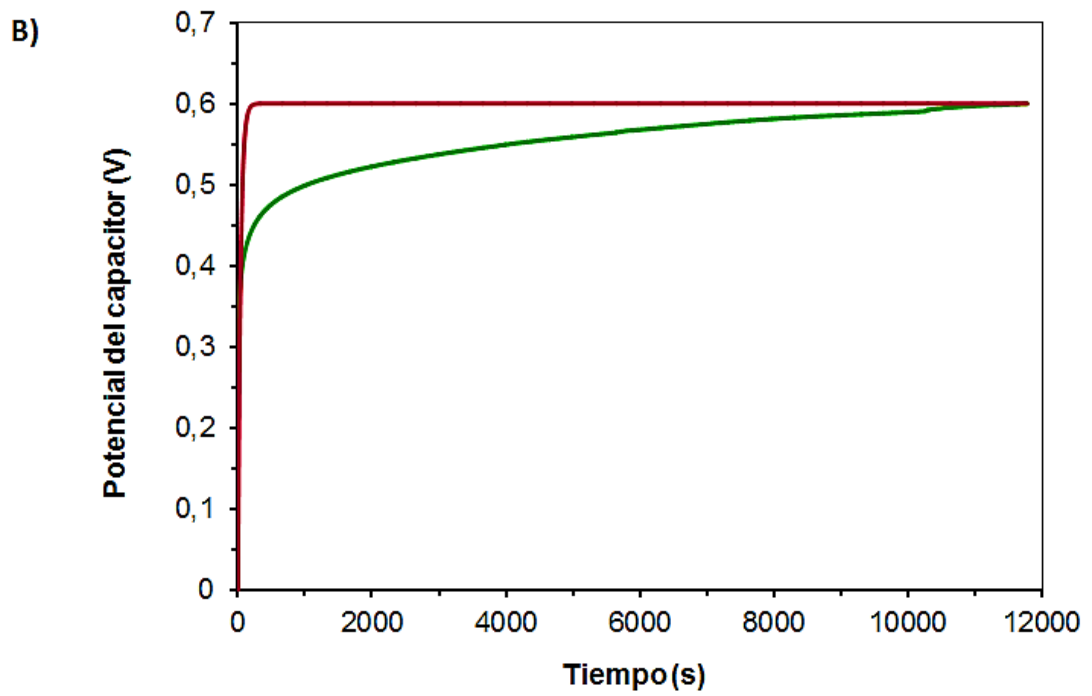
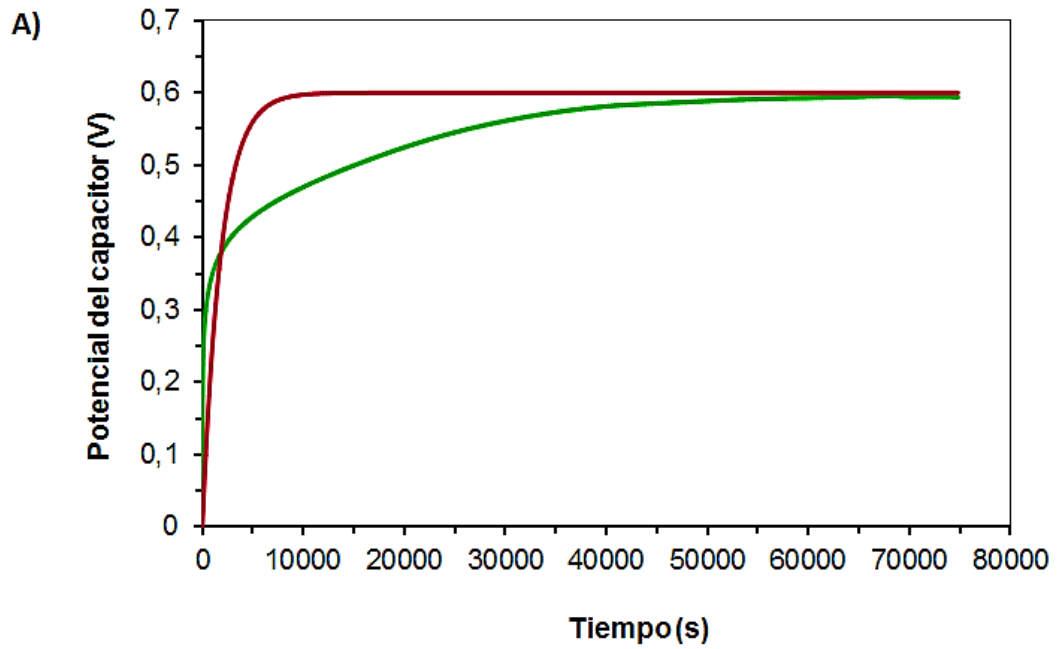
Ahora bien, si se emplea el método de carga del capacitor en una batería alcalina, y se determina el valor de la R_i , el comportamiento se aprecia en la Figura 8. En este caso, la R_i (que oscila de 3,0 a 6,0 Ω) no se ve influenciada por el tamaño del capacitor, ya que la batería es un sistema más potente que la MFC. Básicamente, las cargas necesarias en la generación de electricidad, son tomadas de las reacciones de óxido-reducción catalizadas por sustancias químicas (platino, por ejemplo). Lo cual hace que el tiempo no sea un factor tan determinante en la caracterización de la batería alcalina.

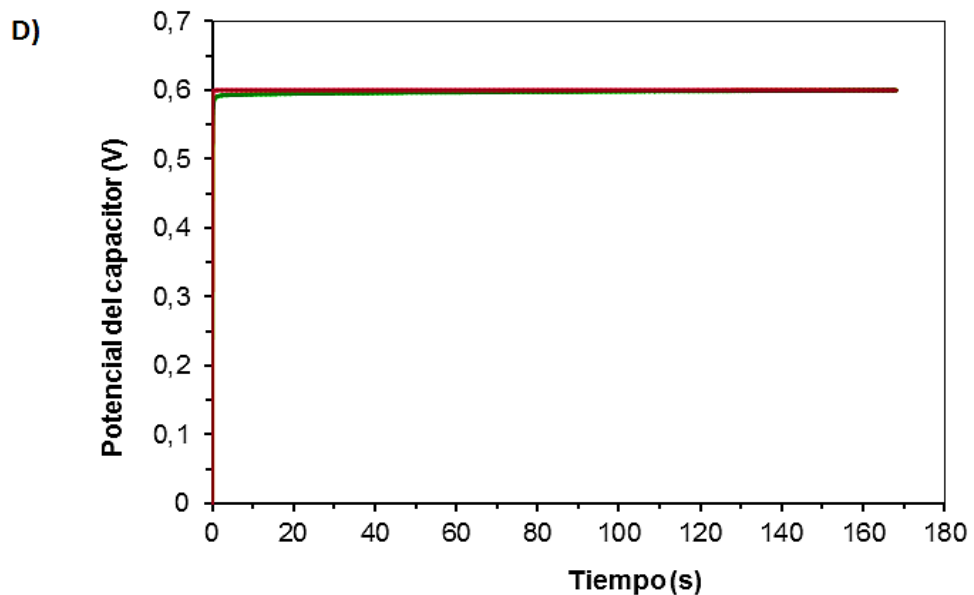
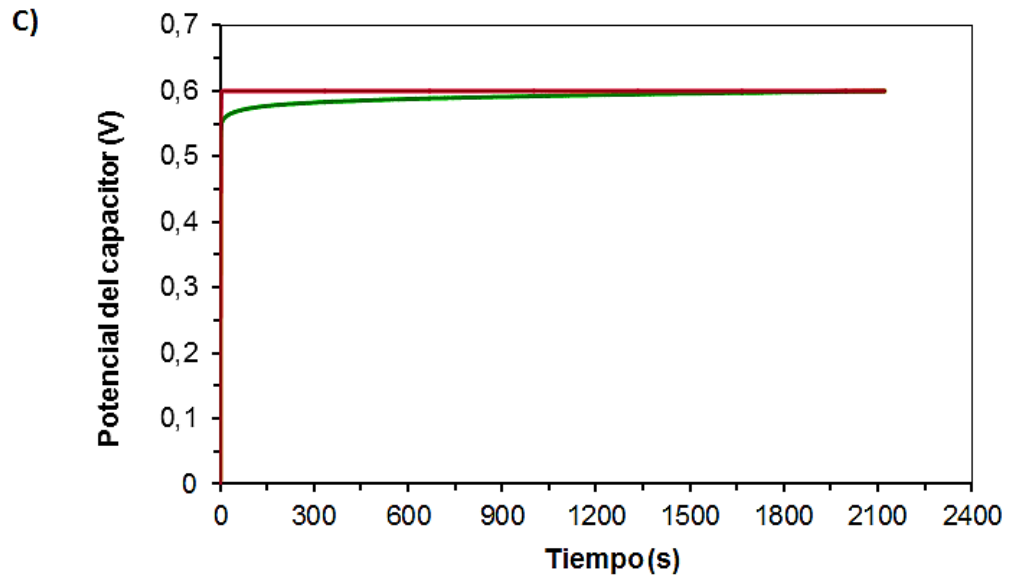
Figura 8. Influencia de la capacitancia en la R_i de una batería alcalina



2.2.2 Comparación entre los resultados experimentales y los valores teóricos del modelo de carga del capacitor. Con base a la ecuación (6), se modeló el método de carga del capacitor. La Figura 9 (partes A, B, C y D) representa el comportamiento entre los valores teóricos (usando la ecuación 6), y los resultados experimentales, para capacitores de 2,0, $4,7 \times 10^{-1}$, $3,3 \times 10^{-2}$ y $4,7 \times 10^{-3}$ F. Fue escogido un único ciclo de carga para cada capacitor.

Figura 9. Curvas teóricas (—) y experimentales (—) del método de carga del capacitor. Se emplearon capacitores de: A) 2,0 F, B) $4,7 \times 10^{-1}$ F, C) $3,3 \times 10^{-2}$ F y D) $4,7 \times 10^{-3}$ F.





En general, la curva de los valores teóricos está por encima de los resultados experimentales. Es decir, teóricamente el capacitor debería alcanzar su potencial de carga ($V_d = 0,6 \text{ V}$) en un tiempo menor. Sin embargo, los resultados experimentales en la Figura 9 (partes A, B, C y D) muestran un retraso durante la carga del capacitor, debido a las limitaciones presentes en la generación de energía eléctrica. Se puede entonces concluir que el uso de microorganismos

como catalizadores en la MFC, genera valores superiores de resistencia interna, debida principalmente a que las reacciones de óxido-reducción necesarias en la liberación de cargas, al ser del tipo biológico, ocurren en forma lenta.

Ahora bien, la tendencia observada en el modelamiento del método del capacitor (Figura 9 partes A, B, C, D) es la siguiente: a medida que la capacitancia se hace menor, la curva de los valores teóricos para la carga del capacitor se asemeja más a los resultados experimentales. Como consecuencia, capacitores con baja capacitancia requieren un tiempo menor de carga; tiempo en el cual, no se están caracterizando a cabalidad las pérdidas del sistema (valor real de la resistencia interna). Es por ello, que ambas curvas se muestran casi superpuestas para un capacitor de $4,7 \times 10^{-3}$ F, a diferencia de un capacitor de 2,0 F, en el que la diferencia es más marcada.

Finalmente, en todos los ciclos de carga para los diferentes capacitores (Figura 9 partes A, B, C, D), los valores experimentales muestran un salto considerable al inicio del ciclo de carga. Si se ha dicho que la transferencia de electrones es un proceso que inicia en el interior de la célula, y que requiere un tiempo suficiente para culminarse, ¿cuál es entonces la causa de este comportamiento? Diferentes investigaciones han demostrado que en la biopelícula de la MFC, se genera un proceso conocido como acumulación de carga [18, 19]. Durante la carga del capacitor, cuando se alcanza el V_d , la comunidad bacteriana no transfiere más electrones al ánodo, experimentando condiciones de circuito abierto. Los electrones son pues almacenados en los citocromos de *S. oneidensis* MR-1 [20]. Por consiguiente, cada salto al inicio del ciclo de carga (Figura 9 partes A, B, C, D), corresponde inicialmente a la transferencia de los electrones acumulados. Mientras que los electrones producto de la oxidación del lactato de sodio, que son recolectados después de un tiempo, son reflejados en el crecimiento gradual del voltaje hasta alcanzar el OCP.

2.3 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA INTERNA UTILIZANDO EL MÉTODO DE CORRIENTE INTERRUPTIDA

El método de corriente interrumpida se desarrolló según lo expuesto en la sección 1.4.2 cuyos resultados son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la resistencia interna de la MFC empleando el método de corriente interrumpida.

| Resistencia interna (Ω) | Primer intervalo de corriente | Segundo intervalo de corriente | Tercer intervalo de corriente |
|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| R_1 | 8,5 | 8,1 | 8,4 |
| R_2 | 7,4 | 7,1 | 7,4 |
| R_{prom} | 7,9 | 7,6 | 7,9 |

Una R_i promedio de $7,8 \Omega$ es demasiado baja para una MFC que sólo es capaz de generar $0,7 \times 10^{-2}$ mW de potencia. Ya que el método de corriente interrumpida usa un corto periodo de perturbación (60,0 s), no caracteriza todas las pérdidas de potencial de la MFC, sino que solo tiene en cuenta aquellas debidas a la transferencia de la carga acumulada en la biopelícula. Si se compara el resultado del método de corriente interrumpida ($R_i = 7,8 \Omega$), con el valor obtenido al cargar un capacitor de $4,7 \times 10^{-3}$ F ($R_i = 6,9 \Omega$), los valores difieren entre sí en un 10,8%. Se demuestra pues, que aunque el método de corriente interrumpida predice buenos resultados en otro tipo de sistemas electroquímicos, incluyendo baterías y celdas de combustible tradicionales ^[15], no es adecuada para caracterizar en su totalidad las pérdidas en la MFC.

3. CONCLUSIONES

Con respecto al análisis de la generación de potencia en la MFC, se demostró que un capacitor de $4,7 \times 10^{-1}$ F es capaz de almacenar la máxima potencia de manera intermitente. Sin embargo un valor de potencia máximo de $0,7 \times 10^{-2}$ mW demuestra que el sistema experimenta grandes pérdidas de voltaje durante el proceso de generación y transferencia de cargas (electrones y protones). Es decir, la generación de potencia de la MFC está altamente limitada por altos valores de resistencia interna.

Del análisis de la influencia de la capacitancia en la resistencia interna de la MFC, se demostró que debido a que la resistencia interna es una característica involucrada en la generación de energía eléctrica, requiere ser evaluada por un método que emplee tiempos suficientes para caracterizarla en su totalidad. En este caso un capacitor de $4,7 \times 10^{-1}$ F emplea un tiempo de carga adecuado para tener en cuenta más limitaciones de la MFC (un valor de resistencia interna de $80,7 \Omega$). En comparación con capacitores muy pequeños, que no evalúan completamente las pérdidas del sistema; y capacitores muy grandes que fuerzan el desempeño del mismo.

El análisis del método de corriente interrumpida, como herramienta para encontrar la resistencia interna de la MFC, arrojó un valor muy bajo ($7,8 \Omega$); el cual no concuerda con la baja generación de potencia del sistema. Se tiene por tanto, que a pesar de que esta técnica funciona apropiadamente para la mayoría de sistemas electroquímicos, no caracteriza completamente la resistencia interna de la MFC. El factor contundente en el método de corriente interrumpida, es el tiempo en el cual se perturba el sistema, y éste es demasiado corto para reflejar cada una de las pérdidas llevadas a cabo en la generación de energía eléctrica de la MFC.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ARORA, R. Emerging trends in microbial biotechnology: energy and environment. En: Microbial biotechnology: energy and environment. Delhi : CAB International, 2012. p. 1 - 13.
- [2] UNITED STATES OF AMERICA. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. International energy outlook 2013 with projections to 2040. Washington, D.C.: Office of Energy, 2013. 312 p.
- [3] POTTER, M.C. Electrical effect accompanying the decomposition of organic compounds. The Royal Society 1911; 84: 260-276.
- [4] HENSLEY, S., VARGAS, M., FRANKS, A. The microbiology of microbial electric systems. En: ARORA, R. Microbial biotechnology: energy and environment. Delhi: CAB International, 2012. p. 1 – 30.
- [5] DONOVAN, C., DEWAN, A., HEO, D., BEYENAL, H. Batteryless, wireless sensor powered by a sediment microbial fuel cell. Environmental Science & Technology 2008; 42: 8591-8596.
- [6] LOGAN, B.E., REGAN, J.M. Microbial fuel cells: challenges and applications. Environmental Science & Technology 2006; 40(17): 5172-5180
- [7] TANG, Y., MEADOWS, A., KEASLING, J. A kinetic model describing *Shewanella oneidensis* MR-1 growth, substrate consumption, and product secretion. Biotechnology and Bioengineering 2007; 96: 125-133.

- [8] LOVLEY, D.R., NEVIN, K.P. Electricity production with electricigens. *Bioenergy* 2008; 295-306.
- [9] LOGAN, B.E., REGAN, J.M. Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. *Trends in Microbiology*. 2006; 14(12): 512-518.
- [10] PEI-YUAN, Z., ZHONG-LIAN, L. Experimental study of the microbial fuel cell internal resistance. *Journal of Power Sources* 2010; 195: 8013-8018.
- [11] RHOADS, A., BEYENAL, H., LEWANDOWSHI, Z. Microbial fuel cell using anaerobic respiration as an anodic reaction and biomineralized manganese as a cathodic reactant. *Environmental Science & Technology* 2005; 39: 4666-4671.
- [12] DRAPCHO, C.M., PHU-NHUAN, N., WALKER, T.H. Microbial fuel cells. En : _____ . *Biofuels engineering process technology*. New York : McGraw-Hill, 2008. p. 303 – 323.
- [13] DEWAN, A., BEYENAL, H., LEWANDOWSHI, Z. Intermittent energy harvesting improves the performance of microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology* 2009; 43(12):4600-4605.
- [14] DEWAN, A., DONOVAN, C., HEO, D., BEYENAL, H. Evaluating the performance of microbial fuel cells powering electronic devices. *Journal of Power Sources* 2009; 195: 90-96.
- [15] COOPER, K.R., SMITH, M. Electrical test methods for on-line fuel cell ohmic resistance measurement. *Journal of Power Sources* 2006; 160: 1088-1095.

- [16] SCHWEIGER, H.G., OBEIDI, O., KOMESKER, O., RASCHKE, A., SCHIEMANN, M., ZEHNER, C., GEHNEN, M., KELLER, M., BIRKE, P. Comparison of several methods for determining the internal resistance of lithium ion cells. *Sensors* 2010; 10: 5604-5625.
- [17] TORRES, C.I., MARCUS, A.K., LEE, H., PARAMESWARAN, P., KRAJMALNIK-BROWN, R., RITTMANN, B.E. A kinetic perspective on extracellular electron transfer by anode-respiring bacteria. *FEMS Microbiology Reviews* 2010; 34: 3-17.
- [18] BONANNI, P.S., SCHROTT, G.D., ROBUSCHI, L., BUSALMEN, J.P. Charge accumulation and electron transfer kinetics in *Geobacter sulfurreducens* biofilm. *Energy and Environmental Science* 2012; 5: 6188-6195.
- [19] LEDEZMA, P., DEGRENNE, N., BAVILACQUA, P., BURET, F., ALLARD, B., GREENMAN, J., IEROPOULOS, I. Dynamic polarization reveals differential steady-state stabilization and capacitive-like behavior in microbial fuel cells. *Sustainable energy technologies and assessments* 2014; 5: 1-6.
- [20] URÍA, N., MUÑOZ BERBEL, X., SÁNCHEZ, O., MUÑOZ, F.X., MAS, J. Transient storage of electrical charge in biofilms of *Shewanella oneidensis* MR-1 growing in a microbial fuel cell. *Environmental Science & Technology* 2011; 45: 10250-10256.
- [21] MARSILI, E., BARON, B.D., SHIKHARE, I.D., GRALNICK, J.A., BOND, D.R. *Shewanella oneidensis* MR-1 secretes flavins that mediate extracellular electron transfer. 2008; 195: 3968-3973.

[22] von CANSTEIN, H., OGAWA, J. SHIMIZU, S., LLOYD, J.R. Secretion of flavins by *Shewanella* species and their role in extracellular electron transfer. *App. Environmental Microbiology* 2008; 74: 615-623.

[23] GORBY, Y.A., YANINA, S., McCLEAN, J.S. Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* MR-1 and other microorganisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2006; 103: 11358-11363.

BIBLIOGRAFÍA

ARORA, R. Emerging trends in microbial biotechnology: energy and environment. En : _____ . Microbial biotechnology: energy and environment. Delhi : CAB International, 2012. p. 1 - 13.

BARON, D., LABELLE, E., COURSOLLE, D., GRALNICK, J., BOND, D. Electrochemical measurement of electron transfer kinetics by *Shewanella oneidensis* MR-1. The Journal of Biological Chemistry 2009; 42: 28865–28873.

BIFFINGER, J., PIETRON, J., RAY, R., LITTLE, B., RINGEISEN, B. A biofilm enhanced miniature microbial fuel cell using *Shewanella oneidensis* DSP10 and oxygen reduction cathodes. Biosensors and Bioelectronics 2007; 22:1672–1679.

BONANNI, P.S., SCHROTT, G.D., ROBUSCHI, L., BUSALMEN, J.P. Charge accumulation and electron transfer kinetics in *Geobacter sulfurreducens* biofilm. Energy and Environmental Science 2012; 5: 6188-6195.

COOPER, K.R., SMITH, M. Electrical test methods for on-line fuel cell ohmic resistance measurement. Journal of Power Sources 2006; 160: 1088-1095.

DEWAN, A., BEYENAL, H., LEWANDOWSHI, Z. Intermittent energy harvesting improves the performance of microbial fuel cells. Environmental Science & Technology 2009; 43(12):4600-4605.

DEWAN, A., DONOVAN, C., HEO, D., BEYENAL, H. Evaluating the performance of microbial fuel cells powering electronic devices. Journal of Power Sources 2009; 195: 90-96.

DONOVAN, C., DEWAN, A., HEO, D., BEYENAL, H. Batteryless, wireless sensor powered by a sediment microbial fuel cell. *Environmental Science & Technology* 2008; 42: 8591-8596.

DRAPCHO, C.M., PHU-NHUAN, N., WALKER, T.H. Microbial fuel cells. En : _____ . Biofuels engineering process technology. New York : McGraw-Hill, 2008.

HENSLEY, S., VARGAS, M., FRANKS, A. The microbiology of microbial electric systems. En : ARORA, R. Microbial biotechnology: energy and environment. Delhi : CAB International, 2012. p. 1 – 30.

LEDEZMA, P., DEGRENNE, N., BAVILACQUA, P., BURET, F., ALLARD, B., GREENMAN, J., IEROPOULOS, I. Dynamic polarization reveals differential steady-state stabilization and capacitive-like behavior in microbial fuel cells. *Sustainable energy technologies and assessments* 2014; 5: 1-6.

LOGAN, B.E., REGAN, J.M. Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. *Trends in Microbiology*. 2006; 14(12): 512-518.

LOVLEY, D.R., NEVIN, K.P. Electricity production with electricigens. *Bioenergy* 2008; 295-306.

MARSILI, E., BARON, B.D., SHIKHARE, I.D., GRALNICK, J.A., BOND, D.R. *Shewanella oneidensis* MR-1 secretes flavins that mediate extracellular electron transfer. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2008; 195: 3968-3973.
PEI-YUAN, Z., ZHONG-LIAN, L. Experimental study of the microbial fuel cell internal resistance. *Journal of Power Sources* 2010; 195: 8013-8018.

POTTER, M.C. Electrical effect accompanying the decomposition of organic compounds. The Royal Society 1911; 84: 260-276.

RHOADS, A., BEYENAL, H., LEWANDOWSHI, Z. Microbial fuel cell using anaerobic respiration as an anodic reaction and biomineralized manganese as a cathodic reactant. Environmental Science & Technology 2005; 39: 4666-4671.

SCHWEIGER, H.G., OBEIDI, O., KOMESKER, O., RASCHKE, A., SCHIEMANN, M., ZEHNER, C., GEHNEN, M., KELLER, M., BIRKE, P. Comparison of several methods for determining the internal resistance of lithium ion cells. Sensors 2010; 10: 5604-5625.

TANG, Y., MEADOWS, A., KEASLING, J. A kinetic model describing *Shewanella oneidensis* MR-1 growth, substrate consumption, and product secretion. Biotechnology and Bioengineering 2007; 96: 125-133.

TORRES, C.I., MARCUS, A.K., LEE, H., PARAMESWARAN, P., KRAJMALNIK-BROWN, R., RITTMANN, B.E. A kinetic perspective on extracellular electron transfer by anode-respiring bacteria. FEMS Microbiology Reviews 2010; 34: 3-17.

URÍA, N., MUÑOZ BERBEL, X., SÁNCHEZ, O., MUÑOZ, F.X., MAS, J. Transient storage of electrical charge in biofilms of *Shewanella oneidensis* MR-1 growing in a microbial fuel cell. Environmental Science & Technology 2011; 45: 10250-10256.

von CANSTEIN, H., OGAWA, J. SHIMIZU, S., LLOYD, J.R. Secretion of flavins by *Shewanella* species and their role in extracellular electron transfer. Applications in Environmental Microbiology 2008; 74: 615-623.

ANEXOS

ANEXO A. Pérdidas de potencial de la celda de combustible microbiana

La siguiente figura ejemplifica las pérdidas exhibidas durante la transferencia de electrones de la comunidad bacteriana. En ella, **las pérdidas de potencial intracelulares** se originan por la transferencia de electrones desde el lactato de sodio (donador), al portador de electrones (NADH), que es producto de la oxidación del sustrato; y de éste a los citocromos de la membrana celular. Las pérdidas de potencial intracelulares, pueden ser vistas como la diferencia de potencial entre el donador de electrones ($V_{donador}$), y el portador de electrones ($V_{portador}$); y entre éste y los citocromos ($V_{citocromo}$).

Igualmente, **las pérdidas de potencial extracelulares** son debidas a la diferencia entre el potencial de los citocromos ($V_{citocromo}$) y la superficie del ánodo ($V_{ánodo}$). Ya que las pérdidas se originan secuencialmente, la energía disipada producto de las pérdidas intracelulares, determina la energía a la cual los electrones son liberados hacia el electrodo. Existen diferentes mecanismos de transferencia de los electrones entre la comunidad bacteriana y el electrodo. Para este caso, la literatura establece que *S. oneidensis* MR-1 posee dos estrategias de transferencia de electrones: (i) a través de mediadores, y (ii) con el uso de nanocables. No se ha determinado con certeza bajo qué condiciones *S. oneidensis* MR-1 selecciona uno de los mecanismos. Sin embargo, cada uno de ellos implica un proceso lento con ciertas pérdidas de voltaje, las cuales contribuyen a la resistencia interna de la MFC.

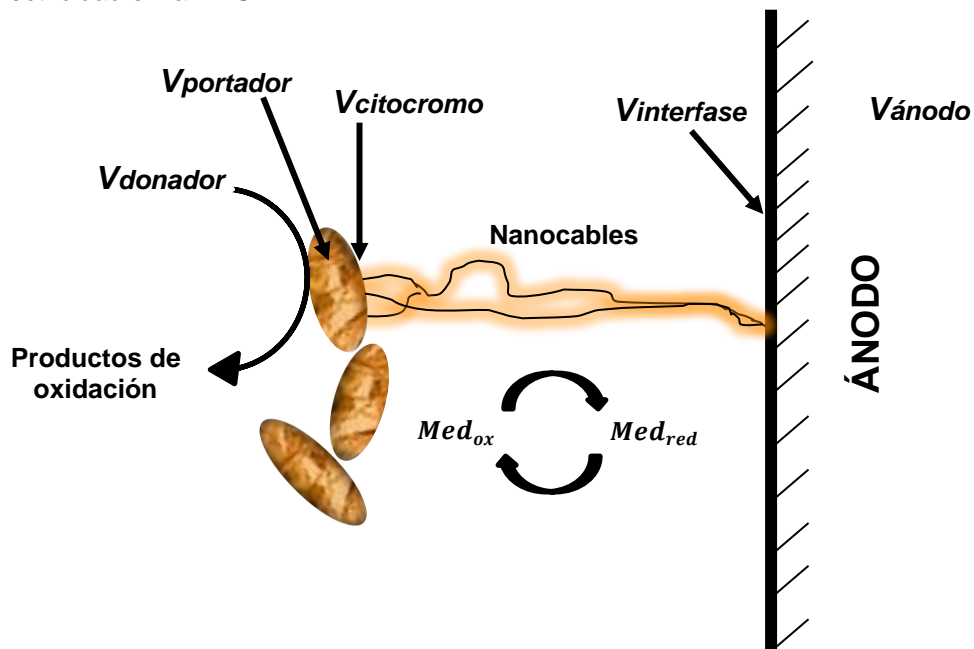
i. Pérdidas de potencial extracelular por el uso de mediadores solubles.

Considerando la distancia entre *S. oneidensis* MR-1 y el ánodo, las limitaciones de difusión de los mediadores solubles representan el factor más importante. Dado que los coeficientes de difusión de componentes orgánicos son en general muy

pequeños, es posible asegurar que el proceso de difusión de los mediadores es relativamente lento. Además, dicha difusión se determina por la concentración de mediadores presentes en la biopelícula, la cual es casi imperceptible comparada con los otros iones que también migran hacia el ánodo. En otras palabras, el transporte de mediadores genera pérdidas de potencial, ya que se requiere un gradiente de concentración para llevar a cabo la difusión de estas sustancias hacia el electrodo.

ii. Pérdidas de potencial extracelular por el uso de nanocables. En este caso, el factor limitante para la transferencia de electrones, es la conductividad a lo largo de los nanocables.

Figura Anexo A. Pérdidas de potencial intracelulares y extracelulares durante la generación de electricidad en la MFC.



Adaptado de: Torres, C.I. y otros. "A kinetic perspective on extracellular electron transfer by anode-respiring bacteria".