

**ESTUDIO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE ORGANICO  
UTILIZADA PARA LA GENERACION DE ENERGIA  
ELECTRICA EN PROCESOS DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO  
DE AGUAS RESIDUALES**

**JOSE CARLOS GALINDO GONZALEZ**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL  
FACULTAD DE INGENIERIA  
BOGOTA D.C., 2005**

**ESTUDIO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE ORGANICO  
UTILIZADA PARA LA GENERACION DE ENERGIA  
ELECTRICA EN PROCESOS DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO  
DE AGUAS RESIDUALES**

**JOSE CARLOS GALINDO GONZALEZ**

**Tesis de grado para optar el título de  
Magíster en Ingeniería Civil**

**Director:  
SERGIO BARRERA TAPIAS  
Ingeniero Civil, MSc.**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL  
FACULTAD DE INGENIERIA  
BOGOTA D.C., 2005**

*A mi padre,  
por su sublime e imponderable  
ejemplo de superación y tenacidad.*

*A mi madre,  
por su nobleza, ternura y apoyo incondicional.*

*A mis hermanas y sobrinos,  
por estar siempre a mi lado.*

*A mis demás familiares y amigos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa sus sinceros agradecimientos a:

Sergio Barrera Tapias, por sus valiosos aportes y orientación.

Luisa Fernández y William Romero, del Laboratorio de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad de los Andes.

Y en especial, al personal del laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de los Andes: Nancy Henao, Edna Delgado y Gloria Barriga, por su grandiosa e invaluable colaboración.

## **TABLA DE CONTENIDO**

INTRODUCCION	9
1. OBJETIVOS	11
1.1 OBJETIVO GENERAL	11
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	11
2. MARCO TEORICO	12
2.1 CELDAS DE COMBUSTIBLE ORGANICO	12
2.1.1 Antecedentes	12
2.1.2 Definición	14
2.1.3 Composición	14
2.1.4 Reacciones de oxidación y reducción en las celdas de combustible orgánico	16
2.1.5 Bioquímica celular en las celdas de combustible orgánico	18
2.1.6 Producción de energía eléctrica en las celdas de combustible orgánico	23
2.1.7 Limitantes en la producción de energía eléctrica en las celdas de combustible orgánico	29
2.1.8 Aplicaciones de las celdas de combustible orgánico	30
3. MATERIALES Y METODOLOGIA APLICADA	36
3.1 REACTOR BIOLOGICO Y CELDA DE COMBUSTIBLE ORGANICO	36
3.1.1 Circuito externo	38
3.1.2 Membranas de intercambio iónico	40
3.1.3 Agua residual sintética	41
3.1.4 Equipo adicional	42
4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	45

---

4.1 FASE I	45
4.2 FASE II	51
5. CONCLUSIONES	62
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	65
ANEXOS	70

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Características principales, voltajes y corrientes máximos alcanzados por investigaciones desarrolladas de celdas de combustible orgánico	30
<b>Tabla 2.</b>	Valores de la resistencia seleccionada según la posición del selector	38
<b>Tabla 3.</b>	Componentes utilizados para la preparación del agua residual sintética	41
<b>Tabla 4.</b>	Propiedades del agua residual sintética	41
<b>Tabla 5.</b>	Parámetros operacionales del sistema para la Fase I	45
<b>Tabla 6.</b>	Parámetros operacionales del sistema para la Fase II	51
<b>Tabla 7.</b>	Porcentajes de dilución del agua residual	52

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Esquema de una celda de combustible orgánico	
	<b>a.</b> Con puente salino	15
	<b>b.</b> Con membrana de intercambio iónico	16
<b>Figura 2.</b>	Esquema de las reacciones de oxidación y reducción en una celda de combustible orgánico	17
<b>Figura 3.</b>	Esquema del mecanismo de transferencia de electrones a nivel celular en una celda de combustible orgánico sin mediador	22
<b>Figura 4.</b>	Esquema de una celda de combustible biológica insertada en un vaso sanguíneo	32
<b>Figura 5.</b>	Gastrobot, plataformas móviles autopropulsadas	33
<b>Figura 6.</b>	Slugbot, robot que cuenta en su interior con una celda de combustible orgánico que convierte la biomasa en energía eléctrica.	34
<b>Figura 7.</b>	Esquema del reactor biológico utilizado como celda de combustible orgánico	36
<b>Figura 8.</b>	Esquema del circuito eléctrico implementado en la segunda fase	38
<b>Figura 9.</b>	Esquema del montaje inicial y del sistema de adquisición de datos implementados para la segunda fase de operación	43
<b>Figura 10.</b>	Montaje inicial y sistema de adquisición de datos implementado para la segunda fase de operación	44



---

<b>Figura 11.</b> Variación en el tiempo de las concentraciones de DQO del alimento y del efluente	46
<b>Figura 12.</b> Eficiencia en la remoción de materia orgánica	47
<b>Figura 13.</b> Variación de la corriente generada durante la fase I	48
<b>Figura 14.</b> Relación entre corriente producida y eficiencia en la remoción de materia orgánica medida como mg/L de DQO	49
<b>Figura 15.</b> Variación de la potencia producida durante la Fase I	49
<b>Figura 16.</b> Variación en el tiempo de pH en cámaras de oxidación y de transferencia de protones	50
<b>Figura 17.</b> Relación entre diferentes concentraciones de DQO del agua residual y la corriente generada	52
<b>Figura 18.</b> Voltaje generado para diferentes concentraciones del electrolito (NaCl)	54
<b>Figura 19.</b> Corriente generada para diferentes concentraciones del electrolito (NaCl)	54
<b>Figura 20.</b> Voltaje generado para diferentes concentraciones de FeCl <sub>3</sub>	55
<b>Figura 21.</b> Corriente generada para diferentes concentraciones de FeCl <sub>3</sub>	56
<b>Figura 22.</b> Voltaje generado para diferentes relaciones de áreas ánodo/cátodo	57
<b>Figura 23.</b> Corriente generada para diferentes relaciones de áreas ánodo/cátodo	58
<b>Figura 24.</b> Corriente generada para diferentes resistencias	59
<b>Figura 25.</b> Carga total generada durante el tiempo de operación en cada una de las configuraciones de la fase II	59
<b>Figura 26.</b> Desarrollo de biopelícula de microorganismos en la cámara de oxidación	60
<b>Figura 27.</b> Vista de la cámara de reducción	61

## **LISTA DE ANEXOS**

<b>ANEXO 1.</b> Pantalla de la aplicación desarrollada en LabVIEW utilizada para la adquisición de datos de la fase II	70
--	----

## **INTRODUCCION**

Por muchos años, la humanidad ha requerido de fuentes de energía para sus actividades. Durante el siglo pasado los consumos de energía a nivel mundial se incrementaron drásticamente. El Departamento de Energía de los Estados Unidos en su informe realizado en 1998, donde se presentan los consumos de la población a nivel mundial desde 1970 y proyectado hasta el año 2015 muestra que al final de este período los consumos de energía se triplicarán en comparación a los registrados en 1970.

Fuentes de energía como los combustibles fósiles, ampliamente utilizados en las actividades humanas, tienen problemas derivados de la contaminación que generan en el medio ambiente. Esta contaminación se da, básicamente, por la ineficiencia de los procesos que se implementan para extraer la energía de estos materiales. Adicional a estos problemas y debido a los altos consumos de energía que actualmente se registran hoy en día a nivel mundial, se hace necesario buscar fuentes alternativas de energía con el fin de aprovecharlos y que puedan erigirse como sustitutos de los ya existentes.

En la actualidad, las aguas residuales, consideradas un problema más de la contaminación del hombre sobre el medio ambiente, podría constituir esa fuente necesaria para la generación de energía eléctrica. Por tal motivo y basado en los conceptos de la biología, bioquímica y la electroquímica, se hace necesario el estudio de estas fuentes potenciales de energía para conocerlas en detalle y evaluar su implementación y uso a escala real. Una buena práctica de esto, esta encaminada a suplir las demandas

energéticas de plantas de tratamiento de aguas residuales cuyo requerimiento energético, utilizado principalmente para la operación de los aireadores que inyectan oxígeno en los procesos aerobios, demanda grandes cantidades de energía. De esta manera, si se logrará optimizar esta producción de energía eléctrica, las PTAR<sup>1</sup> que en la actualidad tienen asociado un sobre costo derivado del funcionamiento de los equipos, podrían ser enmarcadas como fuentes potenciales para suplir las demandas de energía eléctrica de una población en particular. Con todo esto se estaría colaborando con la protección y conservación de los recursos naturales con los que la humanidad hoy cuenta, utilizando un producto de desecho de las actividades humanas, las aguas residuales, para su propio beneficio.

Investigaciones adelantadas han planteado el acoplamiento de celdas de combustible orgánico a procesos de tratamiento biológico de aguas residuales con el fin de extraer parte de la energía que se genera en dicho proceso. En estas se pretende aprovechar la energía que los microorganismos obtienen de la materia orgánica y que utilizan para reproducirse, crecer, moverse y alimentarse.

En la presente investigación se llevo a cabo el estudio de una celda de combustible orgánico acoplada a un proceso de tratamiento biológico de aguas residuales por medio de lodos activados. Así mismo, bajo diversas hipótesis se seleccionaron, implementaron y evaluaron materiales y configuraciones del montaje original, cuyo fin fue identificar la incidencia de cada uno de estos en la obtención de energía eléctrica de este dispositivo.

---

<sup>1</sup> Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar y evaluar los aspectos que puedan afectar la eficiencia en la generación de energía eléctrica de una celda de combustible orgánico.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Llevar a cabo el diseño, montaje y operación de un reactor biológico de lodos activados utilizado para el tratamiento biológico de aguas residuales, al cual le será acoplada una celda de combustible orgánico.
- Implementar y evaluar modificaciones a la configuración original de la celda de combustible orgánico para optimizar la producción de energía eléctrica.
- Establecer las posibles relaciones entre la generación de energía eléctrica y la eficiencia del proceso de tratamiento de aguas residuales.
- Evaluar el uso del hierro (Fe) en la cámara de reducción como aceptor final de electrones en una celda de combustible orgánico.

## **2. MARCO TEORICO**

### **2.1 CELDAS DE COMBUSTIBLE ORGANICO**

#### **2.1.1 Antecedentes**

Los físicos italianos Luigi Galvani y Alessandro Volta llevaron a cabo los primeros experimentos que involucraron a la corriente eléctrica. En 1786, Luigi Galvani notó que al aplicar una corriente eléctrica sobre las extremidades de una rana, los músculos de ésta se contraían (Jensen y Sorensen, 1984). Al informar este inusual fenómeno, propuso que la fuente de la carga eléctrica era el músculo o los nervios de la rana, por ello utilizó el término: fuente “electricidad animal” (Serway, 1993).

Después de analizar los resultados de Galvani, Volta procedió a confirmar y ampliar estos experimentos. Él propuso que la fuente de carga no era animal, sino el contacto entre dos metales no similares, como hierro y cobre. Durante sus investigaciones, Volta notó que el contacto entre dos metales requiere un conductor acuoso (como el músculo de la rana) para obtener un efecto apreciable. Eventualmente probó este punto al demostrar que el efecto ocurría (aunque débilmente) cuando el músculo de la rana era reemplazado por una sustancia inorgánica. Por otro lado, demostró que ciertos pares de metales producían un mayor efecto que otros (Serway, 1993; Enciclopedia Encarta, 2000).

En 1800, Volta construyó la primera fuente artificial de energía electroquímica por diferencia de potencial que llamó pila o celda Voltaica,

la cual era una forma de la que se conoce hoy en día como la batería eléctrica (Jensen y Sorensen, 1984; Enciclopedia Encarta, 2000). Este invento representó no solo un evento puntual en la escala del tiempo, sino que fundamentó un amplio número de subsecuentes desarrollos en los conocimientos sobre la energía eléctrica.

En las celdas voltaicas, también llamadas celdas primarias, los químicos no pueden ser reconstituidos a su forma original una vez han sido convertidos en energía eléctrica. Este proceso representa un ciclo de descarga. Las baterías en las que los reactivos químicos pueden ser reconstituidos pasando una corriente eléctrica a través de ellas en sentido opuesto a su operación normal se conocen con el nombre de celdas secundarias, celdas recargables o acumuladores. Este proceso representa ciclos de carga y descarga de la batería (Jensen y Sorensen, 1984; Linden, 1984).

Otro tipo de celdas primarias son las celdas de combustible. En estas los reactivos químicos no son contenidos dentro de ella sino que son alimentados externamente (Linden, 1948). Se ha utilizado hidrógeno, amonio, metanol, glucosa, acetato, monóxido de carbono, agua residual y otros compuestos orgánicos como combustible para este tipo de celdas (Allen y Bennetto, 1993; Halme et al., 2000; Chaudhuri y Lovley, 2003; Bond y Lovley, 2003; Chang et al., 2003; Lissens et al., 2003; Liu et al., 2004).

Desde 1950 hasta hoy se han llevado a cabo numerosos estudios acerca de las celdas de combustible, y se ha hecho énfasis en el uso de celdas que utilizan combustibles en estado sólido y gaseoso. En Estados Unidos, la NASA desarrolló fuentes auxiliares de energía para los programas

espaciales Géminis y Apolo, utilizando celdas de hidrógeno y oxígeno que produjeron las mayores cantidades de energía por parte de estos dispositivos (Jensen y Sorensen, 1984).

### **2.1.2 Definición**

Las celdas de combustible orgánico son un dispositivo en el cual se convierte energía bioquímica a energía eléctrica con la ayuda de reacciones catalíticas efectuadas por diversos microorganismos. Los electrones que se generan por la oxidación de un combustible (sustrato) por parte de los microorganismos pasan a través de un circuito externo hasta otro compartimiento donde, mediante una reacción de reducción, llegan a un aceptor final de electrones (Park y Zeikus, 2000 y 2002; Rabaey et al., 2003; Bennetto, 1990; Berchmans, 2004; Bond y Lovley, 2003; Jang et al., 2003; Kim et al., 2002, 2003 y 2004).

### **2.1.3 Composición**

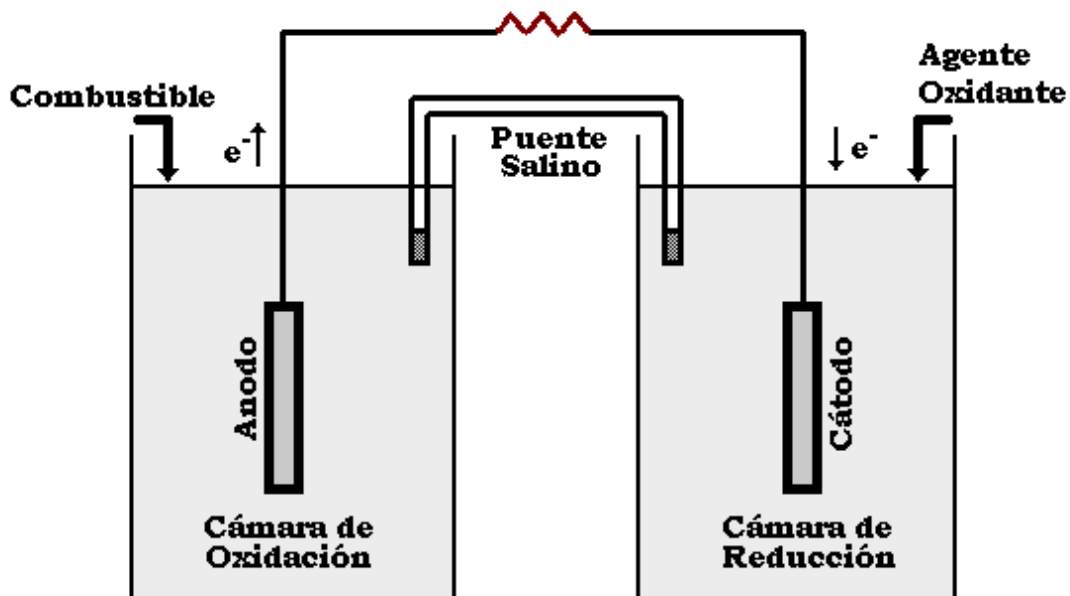
Las celdas de combustible orgánico constan de dos compartimentos. En uno se lleva a cabo la oxidación del agente reductor o combustible y en el otro la reducción del agente oxidante. Esta separación de procesos tiene como objetivo evitar que la transferencia de electrones se lleve a cabo directamente desde el combustible oxidado al reducido. Para compensar la acumulación de cargas en la cámara de oxidación se coloca un puente salino o una membrana de intercambio iónico, para permitir el intercambio de cationes y aniones entre las cámaras (Linden, 1984; Kim et al., 2002, 2003 y 2004) (Ver figura 1a y 1b).

Los dos metales sólidos que están conectados por el circuito externo en

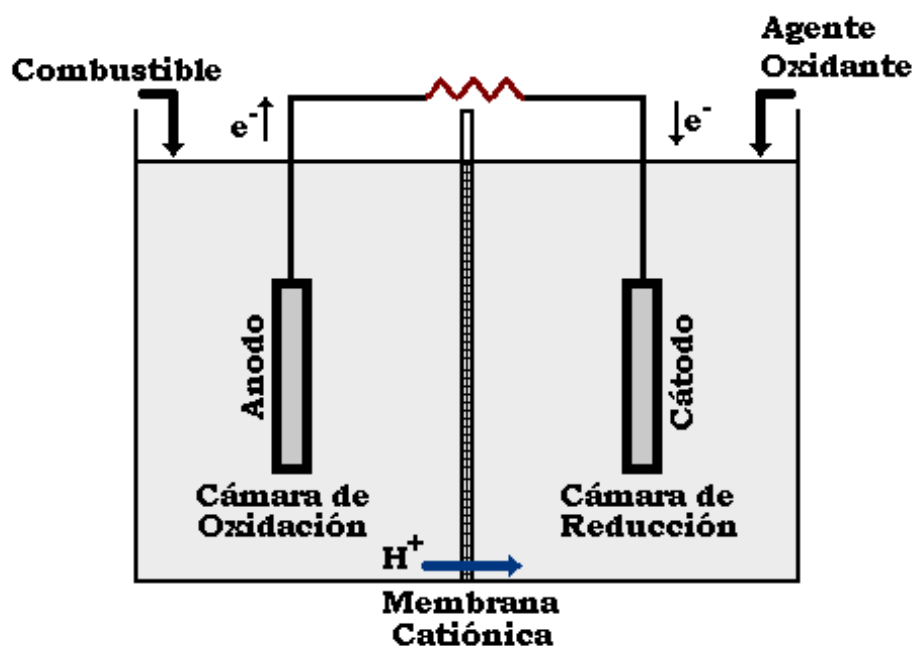


una celda de combustible se llaman electrodos. El electrodo en el cual ocurre la oxidación, es decir, al que se le entregan los electrones liberados se llama ánodo. El electrodo en el que ocurre la reducción, es decir, el que entrega los electrones luego de que estos pasan por el circuito externo recibe el nombre de cátodo.

Se ha requerido el uso de diversos mediadores para aumentar la eficiencia en la transferencia de los electrones al ánodo y aumentar así la generación de energía eléctrica en las celdas de combustible orgánico (Park y Zeikus, 2000). Aunque el uso de mediadores a gran escala puede resultar poco práctico, dado que se requiere una concentración constante de éste componente en la celda de combustible, elevando los costos asociados a la operación y mantenimiento del sistema (Escalante, 2002; Lovley y Chaudhuri, 2003).



(a)

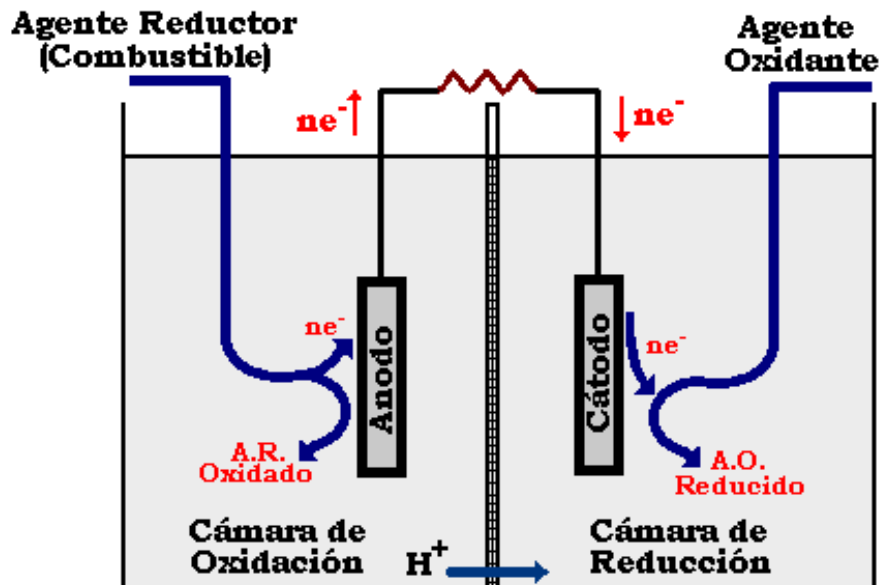


(b)

**Figura 1.** Esquema de una celda de combustible orgánico  
a. Con puente salino, b. Con membrana de intercambio iónico.

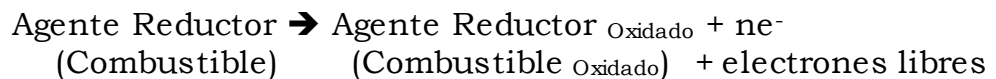
#### 2.1.4 Reacciones de oxidación y reducción en las celdas de combustible orgánico

Las reacciones de oxidación y reducción que se llevan a cabo en una celda de combustible deben ser separadas en dos reacciones independientes (semi-reacciones) que suceden en dos lugares distintos (Linden, 1984). En toda reacción de oxidación-reducción una sustancia se oxida, es decir, experimenta un aumento en su estado de oxidación. Esta sustancia se conoce con el nombre de agente reductor, debido a que causa la reducción de otra sustancia. Así mismo, una sustancia que experimenta la disminución en su estado de oxidación se conoce como agente oxidante, porque causa la oxidación de alguna otra sustancia (Brown et al., 1991; Metcalf y Eddy, 2003). Estas semi-reacciones se pueden representar de la siguiente manera:



**Figura 2.** Esquema de las reacciones de oxidación y reducción en una celda de combustible orgánico

- Primera semireacción (Cámara de oxidación):



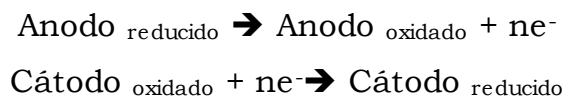
- Segunda semireacción (Cámara de reducción):



Estas reacciones indican que el número de electrones que libera el agente reductor o combustible es el mismo que recibe el agente oxidante (Benefield y Randall, 1980).

Similar a como ocurren las semireacciones en los compartimentos de las celdas de combustible, los electrodos también presentan este proceso, el cual se da luego que el agente reductor se ha oxidado y antes de la

reducción del agente oxidante (Linden, 1984). Esto es:



### **2.1.5 Bioquímica celular en las celdas de combustible orgánico**

Todo microorganismo necesita energía para reproducirse, crecer, moverse y alimentarse. Esta energía es obtenida, principalmente, de los compuestos orgánicos dentro de los cuales, los carbohidratos (compuestos a base de carbono), representan la mayor fuente de energía bioquímica disponible para las células (Shuler y Kargi, 1992).

Los carbohidratos al ser absorbidos por los microorganismos son sometidos por estos a diferentes reacciones de tipo bioquímico. Uno de estos procesos se conoce con el nombre de catabolismo, el cual es una reacción de oxidación exotérmica y de degradación enzimática. El otro proceso se conoce con el nombre de anabolismo, que es una reacción de reducción endotérmica y de síntesis enzimática (Benefiel y Randall, 1980; Shuler y Kargi, 1992). De esta forma, una porción de los compuestos orgánicos absorbidos por los microorganismos es oxidado abasteciendo a la célula de energía y la otra porción restante es usada para generar nuevos bloques que se utilizan para la síntesis celular. En otras palabras, los compuestos orgánicos al ser asimilados por los microorganismos inducen en su interior una serie de reacciones de oxidación-reducción que genera una cadena de transporte de electrones. Estos microorganismos capaces de realizar estas funciones se conocen con el nombre de heterótrofos y obtienen el carbono orgánico de compuestos orgánicos y con su degradación obtiene la energía necesaria para su manutención

(Benefield y Randall, 1980; Gaudy y Gaudy, 1980; Orozco y Salazar, 1987; Shuler y Kargi, 1992).

Para almacenar la energía que obtienen de los compuestos orgánicos, todos los organismos vivos utilizan el mismo mecanismo. Cualquiera que sea la fuente de energía, ésta siempre se almacena y se utiliza como energía bioquímica en forma de trifosfato de adenosina (ATP, por sus siglas en inglés) (Gaudy y Gaudy, 1980; Shuler y Kargi, 1992; Barrera, 1997).

Los organismos heterótrofos obtienen la energía liberada a través de la oxidación de la materia orgánica de dos formas. La primera es mediante un proceso de fosforilización a nivel del sustrato, donde una parte de la energía es liberada cuando se da lugar a la reacción de oxidación y esta es usada para llevar a cabo la reacción endergónica de fosforilización que convierte al ADP en ATP. La segunda, se refiere a la recuperación de la energía liberada durante el catabolismo y en esta los electrones son producidos por la oxidación de un donador de electrones. Estos electrones (usualmente en pares) son pasados a través de un sistema de transporte hasta un aceptor de electrones. Este sistema, como su nombre lo indica, está compuesto por una serie de transportadores de electrones quienes toman la energía producida por la oxidación del donador de electrones y los liberan en pequeñas dosis que finalmente conlleva a que se produzca la fosforilización endergónica y de esta forma se convierte al ADP en ATP (Benefield y Randall, 1980).

Asociado a este proceso de generación de energía por parte de los microorganismos, existen enzimas cuyo funcionamiento en este sistema depende básicamente de su estructura como proteínas. Por este motivo, muchas enzimas necesitan de cofactores para habilitar su funcionamiento

en el proceso. Estos cofactores pueden ser iones metálicos o moléculas orgánicas complejas conocidas con el nombre de coenzimas que funcionan como transportadores de electrones, de iones específicos o de grupos funcionales que son transferidos durante las reacciones enzimáticas. Una de las coenzimas más importantes a nivel celular es el dinucleótido de adenina y nicotinamida (NAD por sus siglas en inglés y en su forma oxidada o NADH<sub>2</sub> en su forma reducida) (Benefield y Randall, 1980). Este es un componente clave del proceso de obtención de energía por parte de los microorganismos, ya que posee la habilidad de oxidarse y reducirse pudiendo llevar electrones del sustrato orgánico hasta el aceptor de electrones (Orozco y Salazar, 1987; Shuler y Kargi, 1992).

Existen tres formas mediante las cuales los microorganismos heterótrofos pueden obtener su energía de los compuestos orgánicos. Una es la fermentación, en la cual los compuestos orgánicos son metabolizados por una serie de reacciones enzimáticas en la que la energía es liberada durante el proceso de oxidación y es retenida por la fosforilización que se da a nivel de sustrato. Esta forma de obtención de energía por parte de los microorganismos no requiere de un aceptor externo de electrones (Benefield y Randall, 1980).

Otra forma que utilizan los microorganismos heterótrofos para obtener energía es la respiración aerobia. En esta, al igual que en la fermentación, los compuestos orgánicos son metabolizados por una serie de reacciones enzimáticas en la que la energía es liberada durante el proceso de oxidación, con la diferencia de que sí existe un aceptor externo de electrones que en este caso es el oxígeno. En este proceso se oxidan ciertos subproductos generados en él mismo (p.e. en la metabolización de la glucosa el ácido pívurico es oxidado mediante el ciclo del ácido

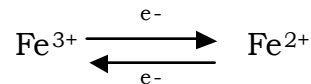
tricarboxílico o ciclo de Krebs) obteniendo como productos finales del proceso  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , típicos productos de un proceso aerobio (Benefield y Randall, 1980; Gaudy y Gaudy, 1980; Shuler y Kargi, 1992).

La eficiencia en la producción de energía es mucho mayor en la respiración aerobia que en la fermentación, con lo que se logra una oxidación más completa y mayor producción de ATPs. Por esta razón, la gran cantidad de energía producida durante la respiración aerobia proviene de la fosforilización oxidativa, la cual ocurre, como se anotó anteriormente, cuando los electrones son transportados a través del sistema de transporte de electrones. El objetivo de todo este proceso es oxidar y reducir sucesivamente las coenzimas que se forman ( $\text{NAD}$  y  $\text{NADH}_2$ ) como producto de las reacciones de oxidación que suceden en el interior de las células por la metabolización de la materia orgánica (Benefield y Randall, 1980; Gaudy y Gaudy, 1980; Orozco y Salazar, 1987; Shuler y Kargi, 1992).

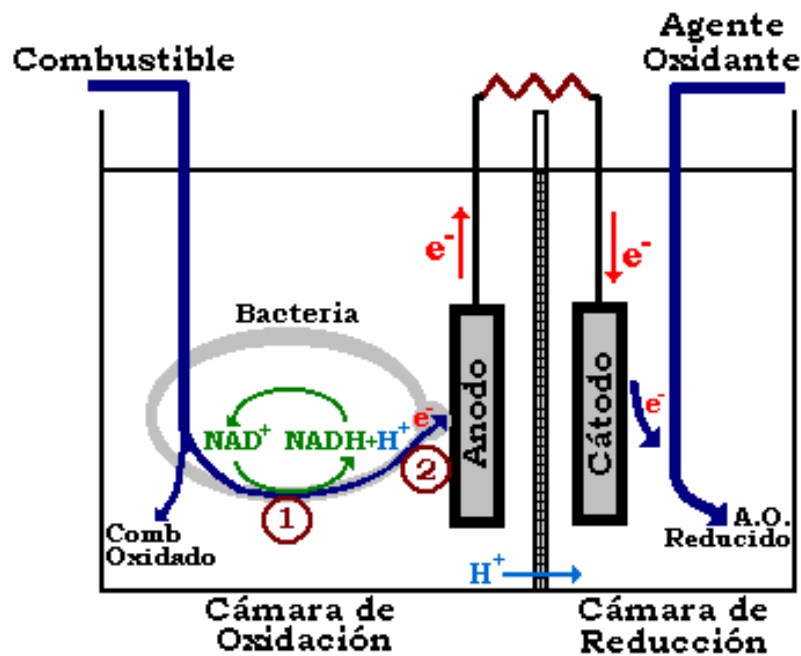
La otra forma que tienen los microorganismos para obtener energía de los compuestos orgánicos es la respiración anaerobia. Aunque el oxígeno es el aceptor de hidrógeno más común para el  $\text{NADH}_2$  en un sistema de transporte de electrones, existen alternativas de aceptores para el  $\text{H}_2$ . Cuando se utiliza uno de estos aceptores ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_4$  o  $\text{NO}_3$ ) se dice que hay respiración anaerobia. Uno de los aceptores alternos más comunes es el  $\text{NO}_3$  que se convierte a formas más reducidas del nitrógeno tales como el  $\text{NO}_2$ , el  $\text{N}_2\text{O}$  y el  $\text{N}_2$  (Orozco y Salazar, 1987).

Recientemente, se ha descubierto la capacidad de ciertos microorganismos para entregar los electrones directamente aun aceptor externo de electrones. Esto se produce debido a que poseen en su pared celular

citocromas que son proteínas con contenido de hierro (algunos en forma de grupos *heme*, como los presentes en la hemoglobina). La importancia de este grupo de proteínas radica en que puede ser oxidado y reducido con facilidad por un aceptor externo de electrones (Gaudy y Gaudy, 1980). Es decir:



De igual forma, pequeñas proteínas que contienen complejos de hierro y azufre tiene la capacidad de transportar los electrones de las células hasta un aceptor externo de electrones. Estas se conocen con el nombre de proteínas *ferrosulfuras* (Gaudy y Gaudy, 1980).



**Figura 3.** Esquema del mecanismo de transferencia de electrones a nivel celular en una celda de combustible orgánico sin mediador. 1) Sistema celular de transporte de electrones en la membrana celular de la bacteria. 2) Transferencia directa de electrones de la membrana celular al ánodo (vía citocroma).



En la figura 3 se puede apreciar un esquema del mecanismo de transferencia de los electrones (contenidos en las bacterias) al ánodo en una celda de combustible orgánico sin mediador.

En algunos estudios sobre celdas de combustible orgánico, se han utilizados cultivo puros de bacterias que poseen en su pared celular estos citocromas. Estas bacterias son capaces de metabolizar y oxidar el combustible y transferir directamente los electrones al ánodo. Tal es el caso de las especies *Shawenella putrefaciens* (Kim et al., 2002; Park y Zeikus, 2002), *Rhodoferax ferrireducens* (Chaudhuri y Lovley, 2003), *Geobacter metallirreducens* (Jang et al., 2003; Liu et al., 2004) y *Geobacter sulfurreducens* (Bond y Lovley, 2002; Lovley et al., 2004; Liu et al., 2004).

### **2.1.6 Producción de energía eléctrica en las celdas de combustible orgánico**

La energía eléctrica que se puede obtener en una celda de combustible esta asociada al trabajo que ésta sea capaz de realizar. En términos de energía, equivale a la energía libre de Gibbs ( $G^\circ$ ) (Linden, 1984; Jensen y Sorensen, 1984; Metcalf y Eddy, 2003). Esta energía describe los cambios promovidos por las múltiples reacciones químicas de oxidación y de reducción que suceden en una celda de combustible y es denotada  $\Delta G^\circ$ . De esta forma, el cambio en la energía libre de Gibbs esta definida por la expresión:

$$\Delta G^\circ = -nFE^0 \quad (1)$$

Donde

n = Numero de electrones liberados en la reacción

F = Constante de Faraday (96485 C/mol)

$E^\circ$  = Potencial redox de la reacción  $\left( V = \frac{J}{C} \right)$

La energía libre de Gibbs neta puede ser positiva o negativa dependiendo de los signos de la energía de las semireacciones de oxidación y reducción. En el caso de que la energía libre de Gibbs sea negativa, esto quiere decir que la reacción se da espontáneamente y libera energía. Este tipo de reacciones se conocen con el nombre de reacciones exergónicas. En caso contrario, si la energía libre de Gibbs es positiva, la reacción no se da espontáneamente, por lo que requieren un aporte de energía para que ocurra. Este tipo de reacciones se conocen con el nombre de reacciones endorgónicas. (Metcalf y Eddy, 2003).

La diferencia de potencial entre los electrodos de una celda de combustible constituye una fuerza motriz que impulsa los electrones a través del circuito externo. Esta diferencia de potencial es la fuerza electromotriz (fem) o potencial de la celda de combustible y se mide en unidades de voltios. Un voltio (V) es la diferencia de potencial que se requiere para impartir una energía de 1 Joule a una carga de 1 Coulomb (Brown et al., 1993). Es decir:

$$1 \text{ V} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}}$$

Debido a que una corriente eléctrica requiere de una fuente de voltaje y de un circuito, en el estudio de las celdas de combustible se hace necesario incluir este concepto ya que existe un flujo de electrones que pasan a través del circuito externo y esto no es más que una corriente. La unidad

de corriente es el amperio (A). Un amperio es la cantidad neta de carga (Coulomb) que pasa a través del área transversal de un cable por unidad de tiempo (s) (Wilson, 1996). Esto es:

$$1A = 1 \frac{C}{s}$$

Así como se considera una reacción general en la celda de combustible como la suma de dos semireacciones, se puede considerar que la fem de una celda de combustible es la suma de los potenciales de dos semiceldas. De esta manera, el potencial de la semicelda debido a la pérdida de electrones en el ánodo se conoce como potencial de oxidación ( $E_{Oxid}$ ), y el debido a la ganancia de electrones en el cátodo se conoce como potencial de reducción ( $E_{Red}$ ) y la suma de estos dos potencial es el potencial o voltaje teórico de la celda de combustible (Brown et al., 1993). Es decir:

$$E_{Celda} = E_{Oxid} + E_{Red} \quad (2)$$

Se puede tomar, por ejemplo, como caso práctico el cambio en la energía libre de Gibbs en la formación de una molécula de agua debido a la oxidación del hidrógeno por el oxígeno molecular. Esto es:

			$G^\circ$ (kJ/mol e <sup>-</sup> )
Primera semireacción	Donador de electrones: hidrógeno	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	- 40,46
Segunda semireacción	Aceptor de electrones: oxígeno	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	-78,14
		$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	-118,60

Adaptado de Metcalf y Eddy, 2003.

Dado que  $\Delta G^\circ$  es negativo, esta reacción de oxidación-reducción, libera energía.

Conociendo el voltaje y la corriente que produce una celda de combustible se puede determinar la potencia que esta tendría. La potencia se define como el trabajo realizado en una unidad de tiempo. La unidad de potencia más conocida es el Watt (Wilson, 1996). De esta forma,

$$P = I * V \quad (3)$$

Donde

$$P = \text{Potencia} \left( \text{Watt} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} \right)$$

$$I = \text{Corriente} \left( \text{A} = 1 \frac{\text{C}}{\text{s}} \right)$$

$$V = \text{Voltaje} \left( \text{V} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}} \right)$$

En una celda de combustible el flujo de electrones (corriente) se da a través de un circuito externo, el cual tiene una resistencia, por lo que se puede aplicar la ley de Ohm, la cual define que el voltaje de un circuito es igual al valor de la corriente que pasa por este, multiplicado por la resistencia (Wilson, 1996). Es decir,

$$V = I * R \quad (4)$$

Donde

$$V = \text{Voltaje (V)}$$

$$I = \text{Corriente (A)}$$

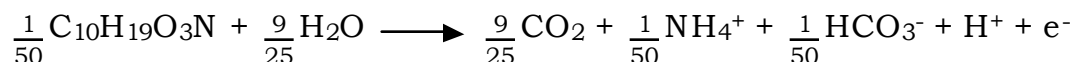
$$R = \text{Resistencia } (\Omega)$$

Al sustituir la expresión del voltaje representado por la ecuación (4) en la ecuación (3) se obtiene que la potencia puede ser expresada de la siguiente

manera:

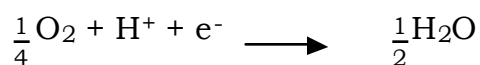
$$P = I^2 * R \quad (5)$$

Como ejemplo teórico que involucre los conceptos de la generación de energía por parte de las celdas de combustible orgánico, se podría determinar la potencia que esta generaría. Para esto, se plantea que el combustible sea agua residual doméstica (Agente reductor) y el agente oxidante sea oxígeno. De esta forma, (según Metcalf y Eddy, 2003) la energía involucrada en la metabolización del combustible (sustrato) en las ARD, llevada a cabo en la cámara de oxidación de la celda de combustible orgánico, es la siguiente:



La energía Libre de Gibbs de esta reacción es:  $\Delta G^\circ = -31,80 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

Así mismo, la semireacción de reducción, llevada a cabo en la cámara de reducción, donde el oxígeno actúa como aceptor final de electrones la describe la siguiente ecuación:



La energía Libre de Gibbs de esta reacción es:  $\Delta G^\circ = -78,14 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

Dado que la energía libre de Gibbs esta definida por la ecuación (1), al despejar de esta expresión el potencial redox (voltaje) y evaluar la producción de voltaje por cada semi-reacción, se tiene:

-Para la primera semireacción (Oxidación, donador de electrones: M. O.<sup>1</sup>)

$$E^{\circ}_2 = \frac{\Delta G^{\circ}}{nF} = \frac{31800 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}{1 \cdot 96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}}} = 0,33 \text{ V}$$

-Para la segunda semi-reacción (Reducción, aceptor de electrones: oxígeno)

$$E^{\circ}_1 = \frac{\Delta G^{\circ}}{nF} = \frac{78140 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}{1 \cdot 96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}}} = 0,81 \text{ V}$$

De esta manera el voltaje teórico que producirá la celda sería:

$$E^{\circ}_T = E^{\circ}_1 + E^{\circ}_2 = 0,81\text{V} + 0,33\text{V}$$

$$E^{\circ}_T = 1,14 \text{ V}$$

La energía libre de Gibbs para el proceso es:

$$\Delta G^{\circ} = 1 \cdot 96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}} \cdot 1,14 \text{ V}$$

$$\Delta G^{\circ} = 110000 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

Pero, como en la reacción de reducción se consumen 0,25 moles de O<sub>2</sub>, la energía libre de Gibbs disponible es:

$$\Delta G^{\circ} = 110000 \frac{\text{J}}{0,25 \text{ mol O}_2} = 440000 \text{ J}$$

$$\Delta G^{\circ} = 440 \text{ kJ}$$

Entonces, para una población en particular (por ejemplo 10000 habitantes) y teniendo en cuenta que la producción de materia orgánica

---

<sup>1</sup> Materia Orgánica.

per cápita es de 50 g DBO<sub>5</sub>/día (según el RAS, 2000), la potencia generada en un día por la celda bajo las condiciones planteadas es:

$$P = 440 \frac{\text{kJ}}{\text{mol O}_2} * \frac{1 \text{ mol O}_2}{32\text{g}} * \frac{50\text{g DBO}_5}{\text{hab} * \text{día}} * \frac{\text{DBO}_u}{0,7 \text{ DBO}_5} * \frac{1\text{día}}{86400\text{s}} * 10000 \text{ hab}$$

$$P = 113,7 \text{ kJ/s} = 113,7 \text{ kW}$$

En la tabla 1, se listan las principales características, voltajes y corrientes máximos alcanzados por algunas investigaciones desarrolladas de celdas de combustible orgánico.

### **2.1.7 Limitantes en la producción de energía eléctrica en las celdas de combustible orgánico**

La potencia calculada en la sección anterior, se produciría en el caso en que el proceso de metabolización de la materia orgánica y la transferencia de electrones al ánodo por parte de los microorganismos tenga una eficiencia del 100 %. Es difícil que esto suceda dado que existen ciertos factores que afectan la generación de energía eléctrica en las celdas de combustible orgánico que a su vez le restan atractivo. Algunos investigadores (Kim et al., 2002 y 2004; Jang et al., 2003) han concluido que estos limitantes son:

1. Adecuada oxidación del combustible en la cámara de oxidación.
2. Transferencia de los electrones al ánodo por parte de los microorganismos encargados de metabolizar el combustible.
3. Resistencia del circuito.
4. Transferencia de protones hacia la cámara de reducción a través de la membrana catiónica.
5. Adecuada reducción del Agente oxidante en el cátodo.

En la medida en que estas limitantes sean superadas, la eficiencia en la generación de energía eléctrica por parte de las celdas de combustible orgánico irá en aumento hasta alcanzar valores que justifiquen su aplicabilidad y uso a escala real.

**Tabla 1.** Características principales, voltajes y corrientes máximos alcanzados por investigaciones desarrolladas de celdas de combustible orgánico

Autores	Año	Combustible	Mediador	Electrodos	A. O. <sup>1</sup>	Bacteria	Voltaje máx. (V)	Corriente máx. (mA)
Allen & Bennetto	1993	Glucosa	HQN	Fibra de Carbono	O <sub>2</sub>	<i>Proteous Vulgaris</i>	0,500	0,50
Park & Zeikus	2000	Glucosa	Rojo Neutral	Grafito	O <sub>2</sub> y Fe(CN) <sub>6</sub>	<i>Escherichia Coli</i> y <i>Actinobacillus succinogenes</i>	0,680	4,50
Kim et al.	2002	Lactato	Azul de Metileno	Grafito	-	<i>Shewanella putrefaciens</i> y <i>Escherichia Coli</i>	0,600	0,04
Park & Zeikus	2002	Lactato, Piruvato, Acetato y Glucosa	Fe (III)	Grafito	-	<i>Shewanella putrefaciens</i>	0,450	2,50
Escalante & Barrera	2002	Leche en polvo	S. M.	Grafito	O <sub>2</sub> y FeCl <sub>3</sub>	N. R.	1,250	0,037
Abarca & Barrera	2002	Leche en polvo	S. M.	Grafito, Hierro y Aluminio	O <sub>2</sub>	N. R.	1,090	0,09
Chaudhuri & Lovley	2003	Glucosa	S. M.	Grafito	O <sub>2</sub>	<i>Rhodoferrax ferrireducens</i>	0,520	0,70
Bond & Lovley	2003	Acetato	S. M.	Grafito	O <sub>2</sub>	<i>Geobacter sulfurreducens</i>	0,250	2,00
Jang et al.	2003	Agua residual	S. M.	Grafito	O <sub>2</sub>	<i>Geobacter metallireducens</i>	0,550	14
Liu et al.	2004	Agua residual	S. M.	Grafito	O <sub>2</sub>	<i>Geobacter metallireducens</i>	0,500	2,40
Kim et al.	2004	Agua residual	HQN	Grafito	O <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> y PO <sub>4</sub>	N. R.	0,600	0,20
Cardona & Barrera	2004	Leche en Polvo	S. M.	Grafito	O <sub>2</sub> y FeCl <sub>3</sub>	N. R.	0,316	1,80

<sup>1</sup> Agente Oxidante

S. M. (Sin mediador), N. R. (No reportado)

### 2.1.8 Aplicaciones de las celdas de combustible orgánico

Algunos expertos aseguran que en algunos años los vehículos no serán diseñados ni construidos con tanques de gasolina, debido a que las

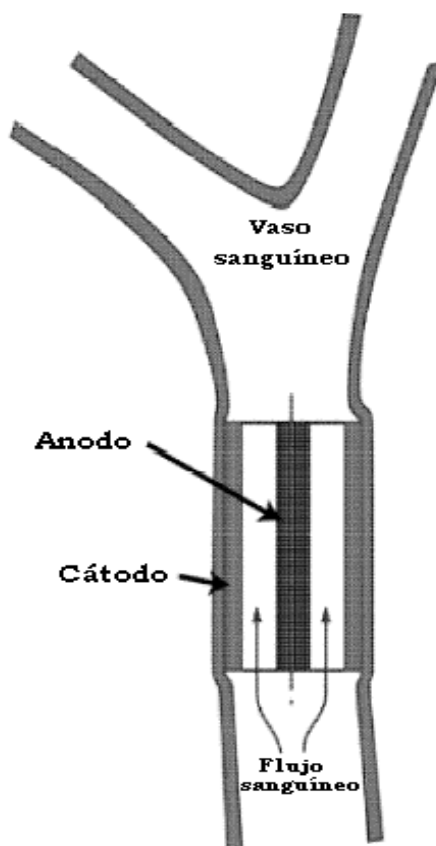


reservas de petróleo con que se cuenta hoy en día se habrán acabado. Una alternativa, la cual es considerada mucho más eficiente, económica y menos contaminante, es proveer a los vehículos de una fuente de energía utilizando directamente carbohidratos como combustible (Bennetto, 1987).

La energía liberada durante la oxidación completa de un monosacárido, como la glucosa, o un polisacárido, como la sacarosa, a dióxido de carbono y agua, es de aproximadamente 16000 kJ/kg, lo cual constituye en términos de energía eléctrica 5 kWh. Esto representa menos de la mitad de la energía que puede obtenerse de cantidades equivalentes de combustibles como el octano. Pero la eficiencia en la conversión de carbohidratos en las celdas de combustible es mayor que en los motores de combustión que utilizan gasolina como combustible. Por ejemplo, un automóvil de calle de tamaño mediano que necesita por lo menos 200 Wh para recorrer un kilómetro de distancia, podría recorrer de 25 a 30 kilómetros utilizando tan solo un kilogramo de una solución concentrada de un carbohidrato (Shukla et al., 1999). De acuerdo a esto y sustentado en las diversas investigaciones adelantadas, bastarían 50 litros de azúcar disuelta en agua para que un auto con estas características recorra más de 1000 km de distancia (Berchmans et al., 2004).

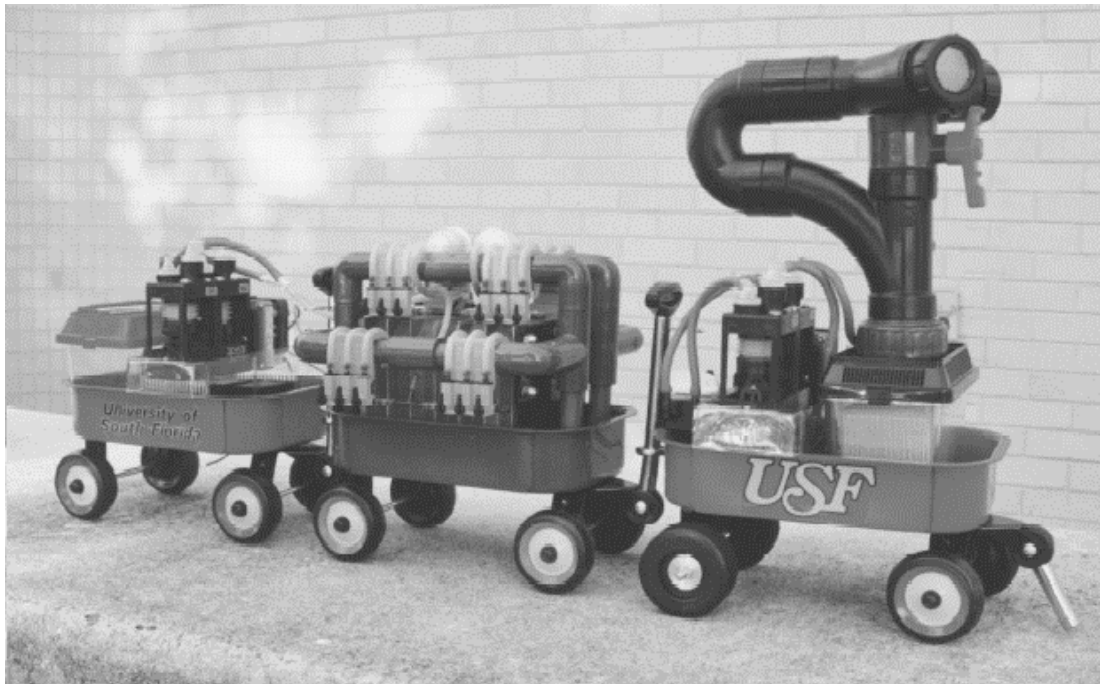
Investigadores de la Universidad de California han desarrollado una celda de combustible orgánico con una área de tan solo 0.07 cm<sup>2</sup>. Esta se diseño para generar cerca de 300  $\mu$ V por dos horas, cantidad suficiente para operar dispositivos a escala micro, como lo son los microsistemas de dosificación de medicinas. Esta aplicación podría ayudar a personas que necesiten una dosis regular de determinada medicina. Por ejemplo, pacientes con SIDA o diabéticos. Adicional a lo reducido de su tamaño, lo novedoso de este sistema es que utiliza el azúcar disuelto en el torrente

sanguíneo para su funcionamiento (Ver figura 4). En comparación con las baterías de litio utilizadas en muchos dispositivos implantables como los marcapasos, las celdas de combustible biológico son más pequeñas, más baratas y por sus características tendrían una mayor duración (Haselkorn, 2002).



**Figura 4.** Esquema de una celda de combustible biológica insertada en un vaso sanguíneo. Esta es utilizada para aplicar dosis medicamentos directamente en el torrente sanguíneo. Fuente: Berchmans et al., 2004.

Adicional a esta aplicación, se ha construido una plataforma móvil autopropulsada para robots, la cual obtiene su energía de la digestión directa en un bioreactor de alimentos reales. Estos robots llamados “Gastrobot” utilizan el dióxido de carbono liberado durante la fermentación y lo comprime en cilindros de gas que al accionarse generan su propulsión (Wilkinson, 2000) (Ver figura 5).



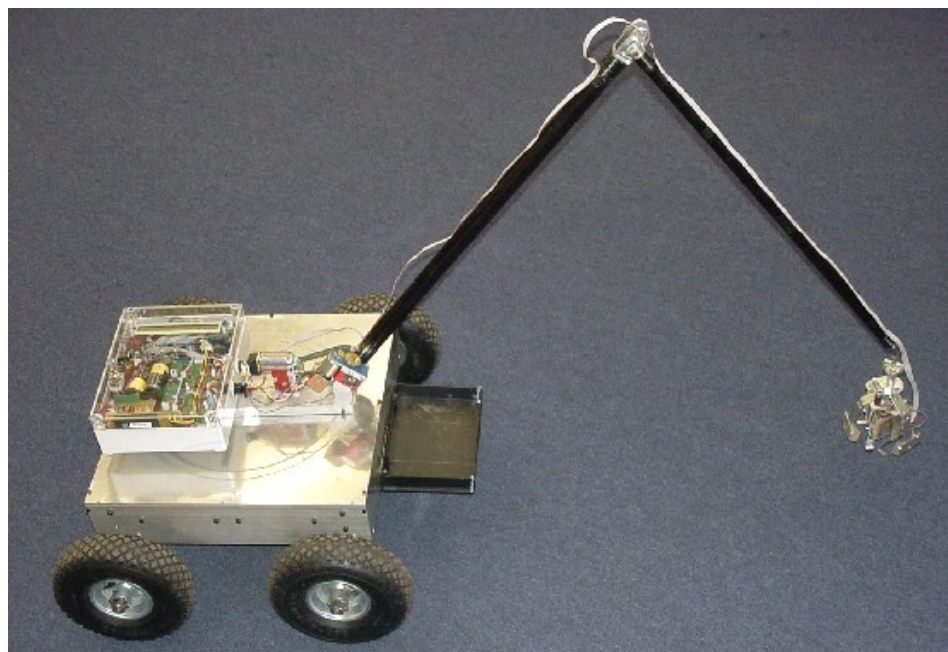
**Figura 5.** Gastrobot, plataformas móviles autopropulsadas que obtiene la energía mediante la acumulación y compresión de CO<sub>2</sub> liberado durante el proceso de fermentación de alimentos contenidos en su interior.

Fuente: Wilkinson, 2000.

De igual forma, investigadores del Laboratorio de Sistemas Autónomos Inteligentes de la Universidad del Oeste de Inglaterra, han inventado un robot llamado “Slugbot”. Este robot obtiene energía eléctrica para sus funciones a partir de una celda de combustible orgánico ubicada en su interior que, mediante un proceso fermentativo, procesa la materia orgánica. El Slugbot cuenta con un brazo de aproximadamente 1.5 m de largo que utiliza para recoger el alimento del suelo. Actualmente, se está estudiando su aplicabilidad para los campos de cultivo, donde pueda recoger animales de la superficie del suelo y transferirlo con ayuda de su brazo mecánico a la celda de combustible ubicada en su interior (Wilkinson y Applegarth, 2003) (Ver figura 6).

Otra aplicación importante de las celdas de combustible orgánico es en el

campo del tratamiento de aguas residuales. Bajo este esquema, las investigaciones adelantadas han podido obtener niveles significativos de energía:  $26 \text{ mW/m}^2$ , mientras se logran niveles de remoción de materia orgánica mayores al 80 % (Liu et al., 2004). Esta práctica puede significar una importante aplicación de las celdas de combustible orgánico, ya que se podría dar un valor agregado al tratamiento de aguas residuales.



**Figura 6.** Slugbot, robot que cuenta en su interior con una celda de combustible orgánico que convierte la biomasa en energía eléctrica.  
Tomado de: <http://www-robotics.usc.edu>

### **3. MATERIALES Y METODOLOGIA APLICADA**

Para la elaboración y el montaje de la planta piloto de lodos activados que se utilizó como una celda de combustible orgánico, se siguió la metodología y se usaron los materiales que se citan a continuación.

#### **3.1 REACTOR BIOLOGICO Y CELDA DE COMBUSTIBLE ORGANICO**

El reactor biológico que se utilizó en el desarrollo de la investigación fue elaborado con láminas de acrílico de 3 mm de espesor. Este reactor utilizado como celda de combustible orgánico, estaba dividido en 4 secciones que se describen a continuación:

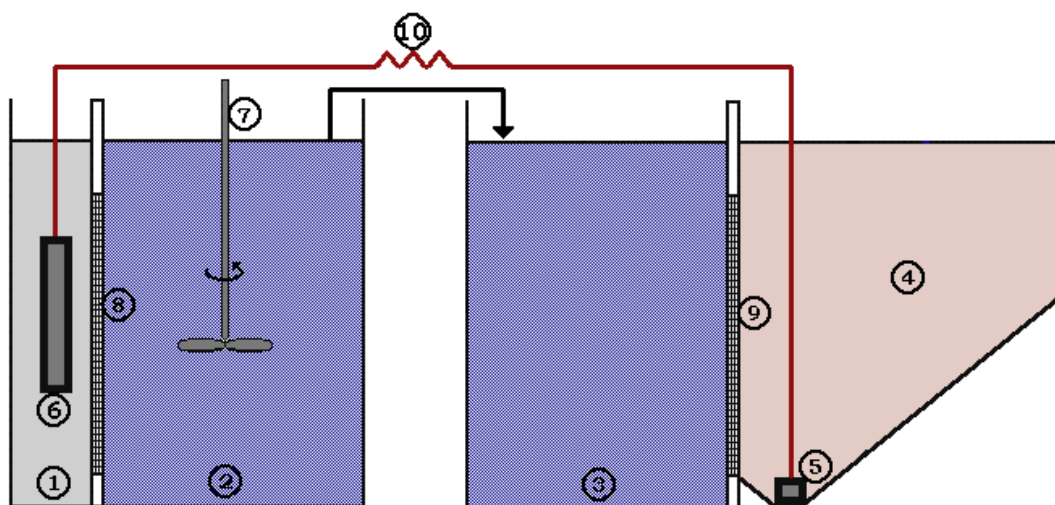
**Sección 1:** Esta almacenaba el electrolito (NaCl – 1.0 M) disuelto en agua destilada. En el se encontraba inmerso el cátodo y su volumen era de 2.25 litros (5 cm de ancho, 20 cm de largo y 25 cm de alto, con un borde libre de 5 cm).

**Sección 2:** Reactor biológico (cámara de oxidación). En el se encontraban los lodos activados encargados de metabolizar la materia orgánica. Estos fueron obtenidos de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Tenjo, Departamento de Cundinamarca. En esta sección, la cual tenía un mezclador, se dosificaba el agua residual ( $Q = 7.0 \text{ mL/min} = 10 \text{ L/d}$ , TRH= 12 horas). Tenía un volumen de 6 litros (15 cm de ancho, 20 cm de largo y 25 cm de alto, con un borde libre de 5 cm).

**Sección 3:** Cámara de transferencia de protones. En esta se vertía el efluente de la cámara de oxidación y su función era permitir el

paso de los protones  $H^+$  generados durante el proceso de metabolización del agua residual por parte de los lodos activados.

**Sección 4:** Cámara de reducción. En esta se encontraba una solución de cloruro férrico ( $FeCl_3 - 0.1 M$ ) disuelto en agua destilada, que se utilizó como agente aceptor final de electrones. Su pH fue modificado con el objetivo de que el hierro férrico se precipitara. Para esto se adicionó Bicarbonato de Sodio, elevando la pH de la solución hasta 9.7. Adicional a esto, se colocaron en el fondo láminas de acrílico inclinadas. Tenía un volumen de 6 litros y contaba con un aireador con el que se hacía el suministro del oxígeno y ayudaba a que el hierro férrico permaneciera en suspensión. En el fondo de esta sección se encontraba inmerso el cátodo.



**Figura 7.** Esquema del reactor biológico utilizado como celda de combustible orgánico. En la gráfica, el número 1 representa el electrolito (sección 1), el 2 representa la cámara de oxidación (sección 2), el 3 la cámara de transferencia de protones (sección 3), el 4 la cámara de reducción (sección 4). El circuito estaba conformado por 6, 5 y 10 que representan al ánodo, cátodo, el cable de cobre y la resistencia, respectivamente. El número 7 representa el mezclador y los números 8 y 9 las membranas de intercambio iónico, en este caso, aniónica y catiónica respectivamente.

### **3.1.1 Circuito externo**

El circuito externo, a través del cual se realizaba el flujo de electrones, estaba conformado por los electrodos (ánodo y cátodo) y el cable que los unía. Se utilizaron barras de grafito (15,8 cm de alto, 3,8 cm de ancho y 1,2 cm de espesor con un área superficial de 163.72 cm<sup>2</sup>). Según recomendación de algunos autores (Lovley y Chaudhuri, 2003; Lovley y Bond, 2003) los electrodos de grafito se debían preparar antes de su uso. Esto se hizo introduciéndolos en una solución de NaOH 1.0 N durante 24 horas y luego se colocaban en una solución de HCl 1.0 N durante el mismo tiempo. Después se almacenaban en agua destilada y se secaban al horno durante 30 minutos a una temperatura de 60°C antes de su uso. El objetivo de este procedimiento era eliminar cualquier residuo de metal o biomasa que se pueda adherir a ellos.

La conexión de los electrodos se hizo con un cable de cobre No. 12 AWG. Este se insertó directamente en los electrodos haciendo un orificio en el medio de su superficie y rellenándolo con silicona líquida transparente marca Loctite®.

En la primera fase de operación se colocó una resistencia de 1000 Ω entre los electrodos y los valores de voltaje se midieron con un multímetro marca EBC – 96820/UT30C. Los valores de corriente se determinaron dividiendo el voltaje que pasaba a través de la resistencia entre el valor de la resistencia. Es decir,

$$I = \frac{V}{R}$$

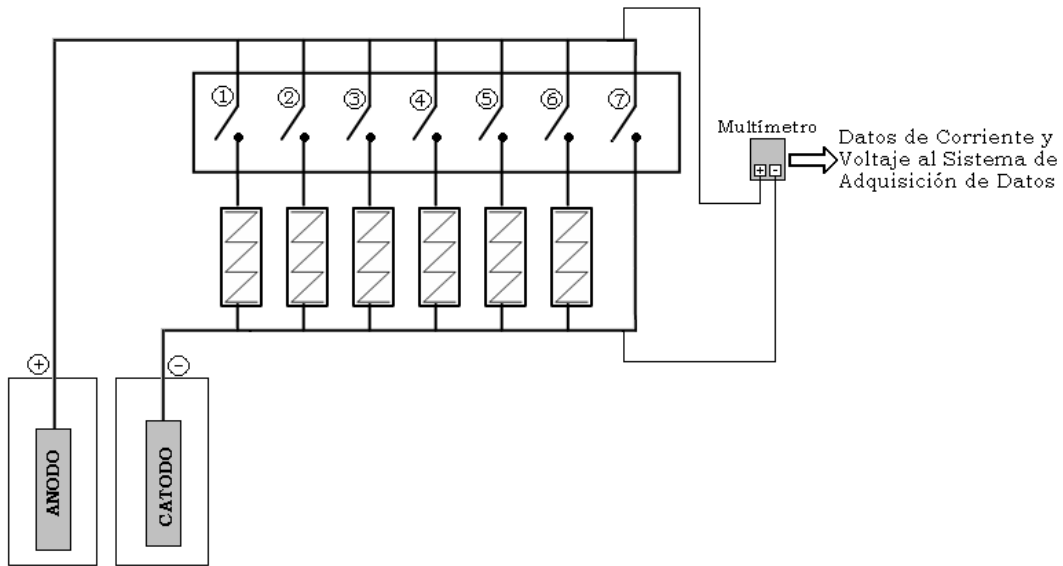
Donde:

I = Corriente (mA)

V = Voltaje (mV)

R = Resistencia ( $\Omega$ )

Para la segunda fase, se implementó una caja de resistencias con un selector, el cual permitía seleccionar una resistencia determinada.



**Figura 8.** Esquema del circuito eléctrico implementado en la segunda fase

La figura 8 muestra el esquema del circuito eléctrico implementado en la segunda fase de operación. En este caso, cada posición del selector indica una resistencia determinada tal como se especifica en la tabla 2.

**Tabla 2.** Valores de la resistencia seleccionada según la posición del selector

Posición del Selector	Resistencia (Ohmios)
1	1000
2	500
3	200
4	100
5	50
6	10
7	Paso Directo



Las lecturas de voltaje y corriente se determinaron bajo dos condiciones, las cuales fueron:

▪ **Circuito abierto:**

Cuando no se seleccionaba ninguna resistencia ni el paso directo, el circuito estaba abierto.

▪ **Circuito cerrado con resistencia:**

Cuando se seleccionaba alguna de las resistencias (posiciones 1 – 6 del selector), el circuito se cerraba contando con una resistencia.

### **3.1.2 Membranas de intercambio iónico**

Las membranas de intercambio iónico que se emplearon pertenecen a la serie Ionac® Ion Exchange Membranes y fueron suministradas por Sybron Chemicals Inc. Se utilizó una membrana aniónica (MA – 3475, área de 192 cm<sup>2</sup> y espesor de 1.5 mm) y una membrana catiónica (MC – 3470, área de 192 cm<sup>2</sup> y espesor de 1.5 mm). La primera estaba ubicada entre el electrolito y la cámara de oxidación (sección 1 y sección 2 respectivamente). Su función era permitir el paso de electrones desde la cámara de oxidación hasta el electrolito, con lo que se pretendía aumentar el área de transferencia de los electrones al ánodo. La segunda membrana utilizada se colocó entre la cámara de transferencia de protones y la cámara de reducción (sección 3 y sección 4 respectivamente) (ver figura 7). Su función era la de permitir el paso de los protones H<sup>+</sup> generados durante la metabolización del combustible por parte de los microorganismos. Con esto, se procuró mantener el equilibrio de cargas en la cámara de

oxidación y evitar la acidificación de ésta.

### **3.1.3 Agua residual sintética**

Los materiales y equipos utilizados para la preparación del agua residual fueron los siguientes:

- Tanque para almacenar agua destilada con una capacidad de 45 litros.
- Probeta graduada de 2000 ml.
- Varilla agitadora de vidrio.
- Licuadora.
- Recipientes de plástico.
- Balanza de precisión (OHAUS® AS – 200, Analytical Standard).

Para la preparación del agua se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Se almacenaba agua destilada en el recipiente de 45 litros.
2. Con ayuda de una balanza de precisión se procedía a pesar la cantidad de cada uno de los componentes (Ver tabla 3).
3. Una vez pesada cada uno de los componentes, se procedía a mezclarlos con la ayuda de la licuadora utilizando un poco de agua destilada sacada del tanque de 45 litros. Luego se vertía la mezcla en el tanque y se agitaba para que hubiera una mezcla completa.
4. Se conectaba la manguera del tanque con la bomba para iniciar la dosificación del agua residual al sistema.

Cada 4 días se preparaba un nuevo sustrato y se lavaba todo el sistema hidráulico con el fin de no alterar las condiciones iniciales, ya que pasado cuatro días el agua perdía en gran cantidad sus características iniciales.

En la tabla 3 se listan cada uno de los componentes con sus respectivas cantidades utilizados en la preparación del agua utilizada en el desarrollo de la investigación.

**Tabla 3.** Componentes utilizados para la preparación del agua residual sintética

Componentes	Cantidad (mg/L)
Bicarbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{HCO}_3$ )	120
Hidrógeno Fosfato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ )	2.7
Cloruro Férrico Hexahidratado ( $\text{FeCl}_3 - 6\text{H}_2\text{O}$ )	4.0
Cloruro de Potasio (KCL)	3.2
Sulfato de Magnesio Heptahidratado ( $\text{MgSO}_4 - 7\text{H}_2\text{O}$ )	2.4
Papel higiénico	3.2
Jabón en polvo	2.4
Urea	24
Gelatina	48
Almidón	240
Leche en polvo desnatada	144

El agua residual sintética preparada en el laboratorio se analizó para llevar un control minucioso de sus características iniciales (ver tabla 4).

**Tabla 4.** Propiedades del agua residual sintética

DQO (mg/L)	$283.73 \pm 7.46$
pH	$6.89 \pm 0.05$
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	$18 \pm 0.7$

### 3.1.4 Equipo adicional

A continuación se lista el equipo adicional que se utilizó para la operación del reactor biológico.

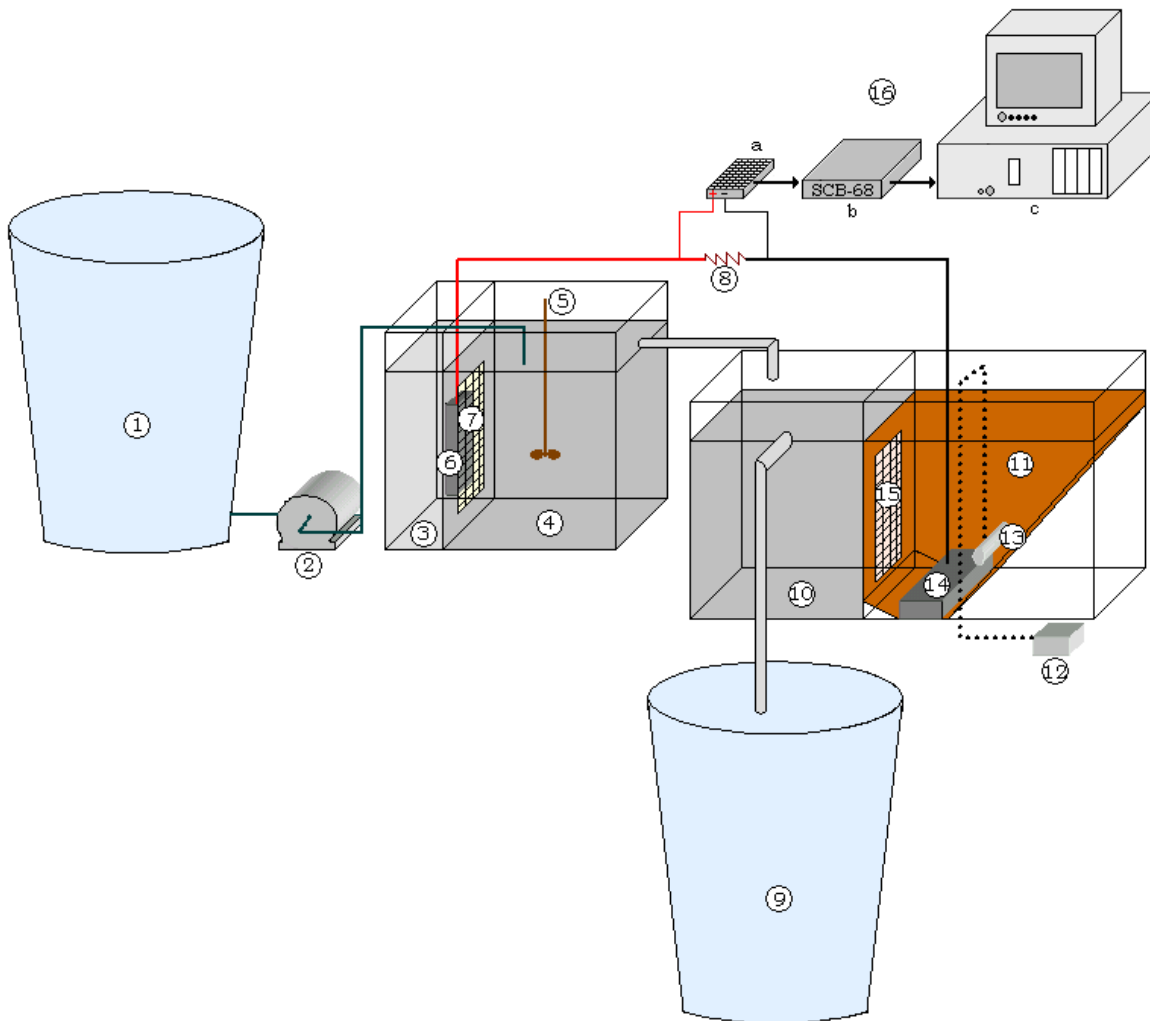
- **Bomba dosificadora:** Para la dosificación del agua residual sintética (combustible) se utilizó una bomba peristáltica de flujo continuo marca

Cole Parmer Instrument Co., Model No. 7553 – 70 y un control de velocidad Master Flex. Se utilizaron mangueras de silicona para las conexiones hidráulicas.

- **Mezclador:** Se utilizó un mezclador (Heidolph RZR – 2021) para mantener el reactor biológico en condiciones de mezcla completa (200 r.p.m.).
- **Aireador:** La inyección del oxígeno en la cámara de reducción se hizo con ayuda de una aireador P – 350, el cual contaba en la punta con una piedra difusora.
- **Tanque de almacenamiento del efluente:** Se colocó una salida desde la cámara de reducción (a 5 cm del borde) conectada mediante una manguera de silicona a un tanque para recolectar el efluente. A esta agua se le practicaba ensayos de laboratorio (DQO – Standard Methods, 5220D) para determinar la materia orgánica remanente luego del tratamiento y conocer de esta manera la eficiencia en la remoción de este parámetro.
- **Sistema de adquisición de datos:** Para cuantificar el voltaje y la corriente, en la segunda fase de operación se implementó un sistema de adquisición de datos National Instruments Corporation. Este constaba de los siguientes elementos: Hardware (Tarjeta AT MIO 16E – 10, Bloque conector SCB – 68, Cable conector R6868 y Computador de escritorio) y software (LabVIEW v 6.1, LabVIEW RunTime Engine v 6.1 y LabVIEW Application Builder v 6.1).

El montaje y operación del sistema con las especificaciones y equipos

listados anteriormente se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Ambiental ubicado en el CITEC (Centro de Innovación Tecnológica de la Universidad de los Andes). Su operación se mantuvo por espacio de 4 meses.



**Figura 9.** Esquema del montaje inicial y del sistema de adquisición de datos implementados para la segunda fase de operación. 1.-Tanque de Agua residual, 2.-Bomba Peristáltica, 3.-Electrolito, 4.-Cámara de Oxidación, 5.-Mezclador, 6.-Anodo, 7.-Membrana Aniónica, 8.-Circuito eléctrico, 9.-Tanque para almacenar el efluente, 10.-Cámara de Transferencia de Protones, 11.-Cámara de Reducción, 12.-Aireador, 13.-Piedra Difusora, 14.-Cátodo, 15.-Membrana Catiónica y 16.-Sistema de Adquisición de datos: a) Caja de resistencias, b) Bloque Conector y c) Computador.

A continuación, se muestra el montaje inicial junto con el sistema de adquisición de datos implementados para la segunda fase de operación.



**Figura 10.** Montaje inicial y sistema de adquisición de datos implementado para la segunda fase de operación

## 4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación se exponen los resultados obtenidos y su respectivo análisis.

### 4.1 FASE I

En esta etapa de la investigación se demostró la capacidad de generación de energía por parte de una celda de combustible orgánico. Así mismo, se evaluó la eficiencia del sistema en cuanto a la remoción de materia orgánica (medida como mg/L de DQO), la corriente y potencia generada y la variación del pH en las cámaras de oxidación y de transferencia de protones.

La tabla 5 muestra los parámetros bajo los cuales operó el sistema en esta primera fase de experimentación.

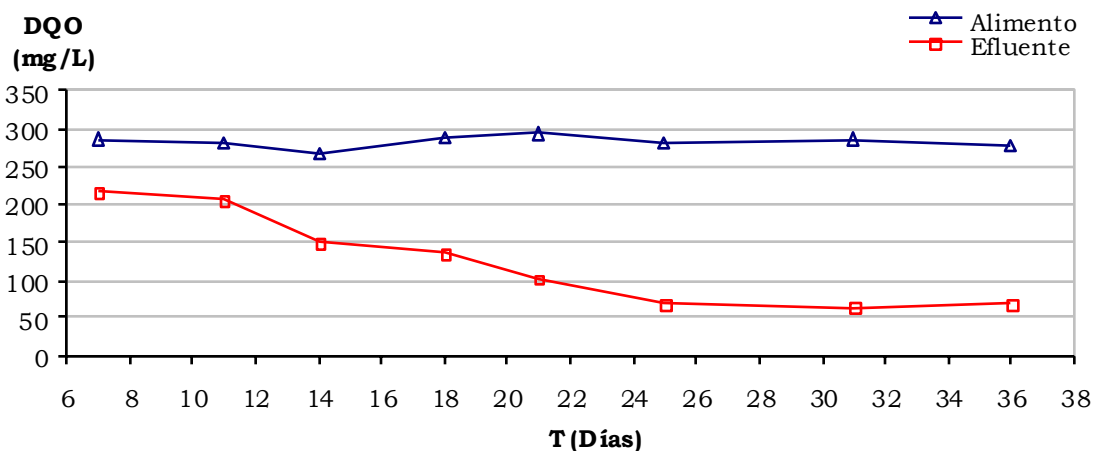
**Tabla 5.** Parámetros operacionales del sistema para la Fase I

Parámetro	
Caudal	7 mL/min = 10 L/día
DQO	283.73 ± 7.46 mg/L
TRH	0.5 d = 12 h
R circuito	1 kΩ = 1000 Ω
Conc. Electrolito (NaCl)	1.0 M
Conc. FeCl <sub>3</sub>	0.1 M

Como comportamiento típico de un sistema de tratamiento de aguas residuales por medio de lodos activados, durante los primeros días de operación los microorganismos se reprodujeron rápidamente, lo cual se

evidenció por el aumento en la turbiedad en la cámara de oxidación y en la presencia de lodos en el efluente. Este proceso fue producto de la síntesis del sustrato efectuada por los microorganismos, durante el cual se crean nuevos microorganismo, CO<sub>2</sub> (como producto de la respiración aerobia) y electrones entre otros productos. A partir del día 21 la presencia de lodos en el efluente disminuyó al igual que la turbiedad en la cámara de oxidación, lo cual indicó para esta época se alcanzó la fase estacionaria del crecimiento bacterial.

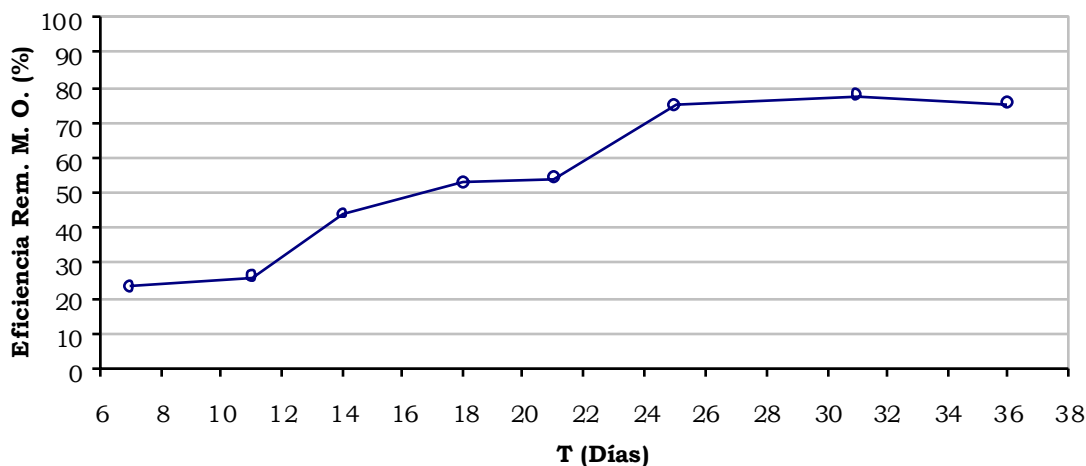
La figura 11 muestra la variación de las concentraciones de DQO del efluente y del agua residual con la que se alimentaba el sistema, para un período de 36 días. En esta, se observa que a partir del día 11 el sistema comenzó a realizar la degradación efectiva de la materia orgánica. Este periodo se debe a que este tipo de microorganismos (lodos activados) necesitan un tiempo para adaptarse a su nueva oferta nutricional, en este caso, el agua residual preparada en el laboratorio. Esta remoción de materia orgánica se mantuvo prácticamente en forma proporcional hasta el día 25, a partir del cual los niveles de remoción permanecieron constantes hasta el día 36.



**Figura 11.** Variación en el tiempo de las concentraciones de DQO del alimento y del efluente



La figura 12, derivada de los datos de la grafica anterior, muestra que entre los días 11 y 21 el sistema pasó de una remoción de materia orgánica del 27 al 54 %, llegando hasta valor máximo del 77.44 % para los últimos 11 días.

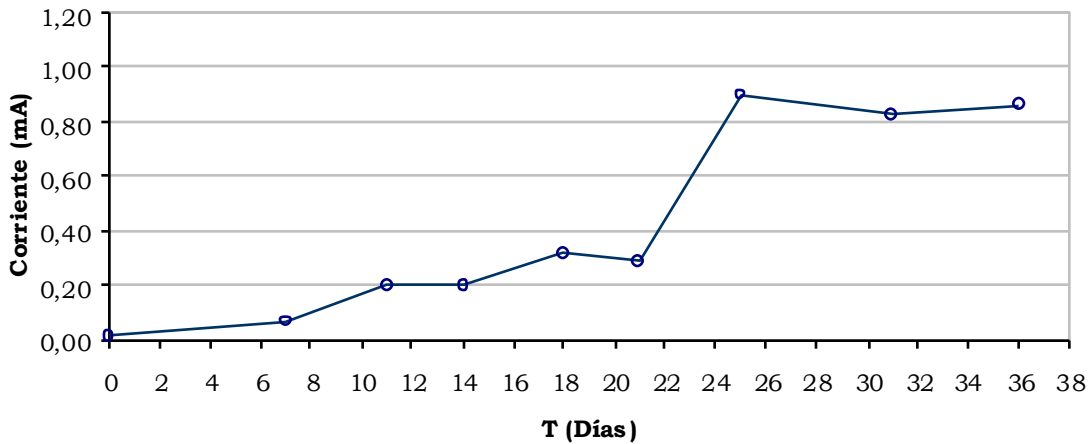


**Figura 12.** Eficiencia en la remoción de materia orgánica

Para calcular la corriente durante esta fase, se abría el circuito hasta que se estabilizara el valor del voltaje y luego se cerraba con una resistencia de 1 k $\Omega$ . Los valores de voltaje medidos con el multímetro se dividían entre esta resistencia y de esta forma se obtenían los valores de corriente. Esto se hizo simultáneamente en los días en que se tomaron muestra para determinar la DQO del sustrato y del efluente.

La figura 13 muestra que durante los primeros 21 días el sistema no generó una corriente superior a 0.2 mA, en comparación con los últimos 15 días donde se generaron corrientes entre 0.805 y 0.86 mA. Este comportamiento se debió a que durante los primeros 21 días (fase de crecimiento exponencial) los microorganismos requieren gran parte de la energía disponible, y que obtienen del sustrato, para alcanzar su desarrollo, representado por sus procesos de reproducción, crecimiento, movimiento y manutención.

Bajo estos parámetros operacionales se obtuvo una corriente máxima de 0.86 mA para un voltaje de aproximadamente 900 mV (ver figura 13).

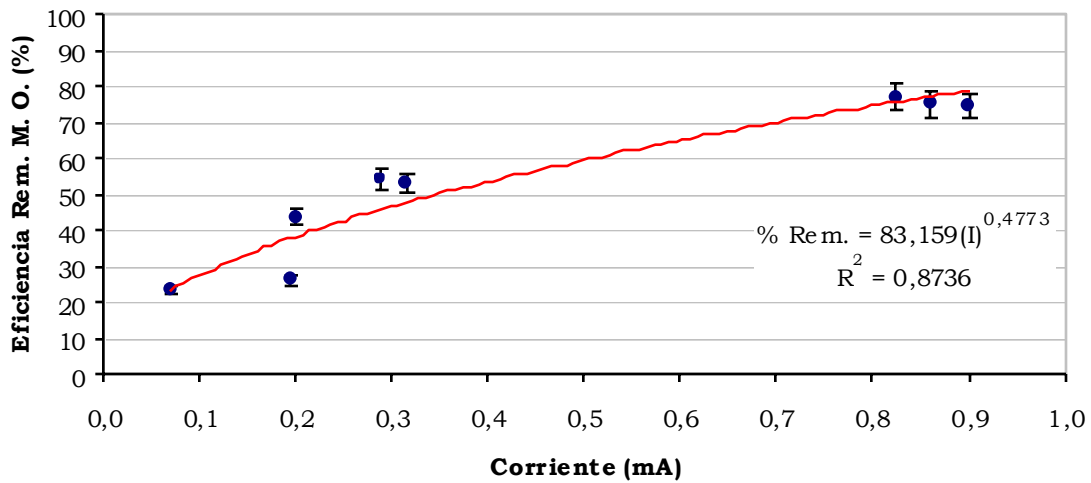


**Figura 13.** Variación de la corriente generada durante la fase I

Al comparar estos valores de corriente obtenidos con investigaciones efectuadas, se obtuvo que son muy similares corroborando de esta manera que los niveles de energía obtenidos en una celda de combustible orgánico dependen de las etapas en que se encuentre el desarrollo microbio del sistema. Es decir, un sistema en proceso de aclimatación generará menos corriente que aquel que se encuentre en una etapa o fase madura.

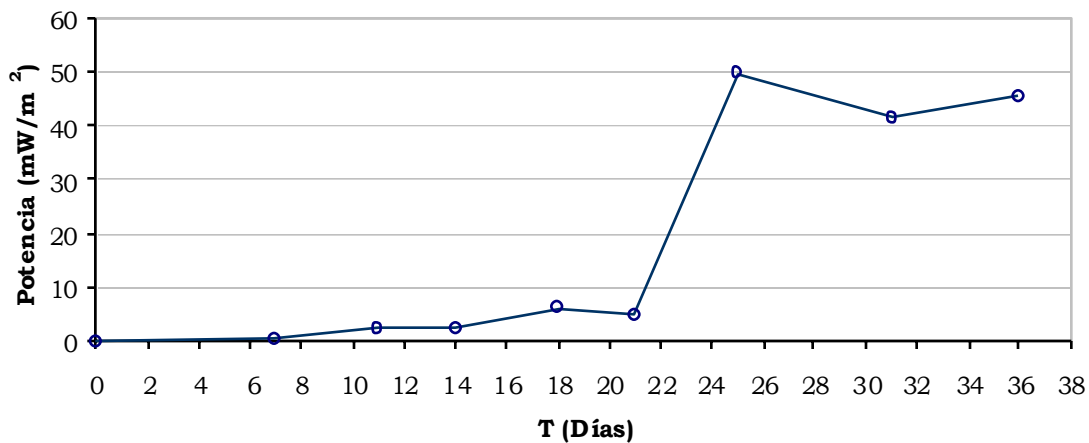
Se correlacionaron los valores de corriente generados y la eficiencia en la remoción de materia orgánica y se obtuvo que estos se ajustaron a un comportamiento exponencial con una correlación de los datos de 0.87 y un error típico del 8.17 % (Ver figura 14).

Con este calculo, se podría predecir la remoción de materia orgánica conociendo el valor de la corriente producida en un instante dado, bajo las condiciones planteadas.



**Figura 14.** Relación entre corriente producida y eficiencia en la remoción de materia orgánica medida como mg/L de DQO

De igual forma, se determinó la potencia generada por el sistema en esta fase. Este calculo se hizo según la ecuación 5, multiplicando el valor del cuadrado de la corriente por el de la resistencia y estos valores se normalizaron dividiéndolos entre el área de cada electrodo (0.01637 m<sup>2</sup>).

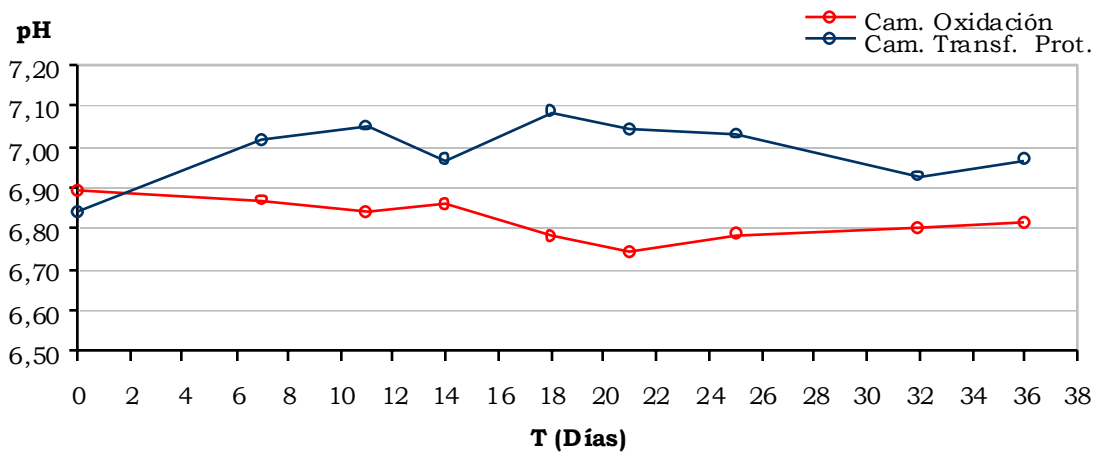


**Figura 15.** Variación de la potencia producida durante la Fase I

De esta manera, se alcanzó un valor máximo de potencia generado por el sistema de 49,47 mW/m<sup>2</sup>, que comparados con los obtenidos en otras

investigaciones citadas resulta ser superior, puesto que el área de los electrodos (expresada en metros cuadrados) de esta investigación es superior, lo cual hace que el valor de la potencia sea amplificado en el calculo.

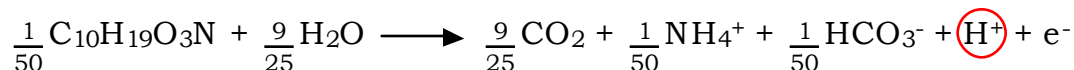
De igual forma, se midieron los valores de pH en la cámara de oxidación y de transferencia de protones, resultando ser los de la primera ligeramente inferiores a los de la segunda. Aunque en teoría el agua que contenían ambas cámaras era la misma, esta diferencia evidencia el propósito para el cual se colocó la membrana catiónica. Su función en el sistema era la de permitir el paso de los  $H^+$  generados en la cámara de oxidación durante el proceso de oxidación de la materia orgánica por parte de los microorganismos, y que permitía el equilibrio de cargas entre la cámara de oxidación y la de reducción (Ver figura 16).



**Figura 16.** Variación en el tiempo de pH en cámaras de oxidación y de transferencia de protones

La ecuación siguiente representa el proceso aerobio de degradación de la materia orgánica. El círculo rojo muestra que como producto del proceso se liberan hidrónios ( $H^+$ ) los cuales, como se acaba de anotar, son

liberados en la cámara de oxidación y transferidos a la de reducción por medio de la membrana catiónica.



Con esto se demostró que es indispensable la ubicación de la membrana catiónica en una celda de combustible, ya que esta ayuda a la migración de cationes, equilibrando las cargas en el sistema derivadas del transporte de electrones efectuado a través del circuito externo.

## 4.2 FASE II

Posterior a la evaluación de los datos de la fase I, se siguió operando el sistema en las mismas condiciones por espacio de 45 días, tiempo después del cual se implementó el sistema de adquisición de datos y la caja de resistencias para proceder a efectuar la fase II de la investigación. En esta se pudo demostrar la incidencia que tiene, en la generación de energía eléctrica por parte de las celdas de combustible orgánico, la concentración del electrolito, la concentración de FeCl<sub>3</sub> de la cámara de reducción, la relación de áreas ánodo/cátodo y la variación de la resistencia del circuito.

**Tabla 6.** Parámetros operacionales del sistema para la Fase II

Parámetro	
Caudal	7 mL/min = 10 L/día
DQO	DQO Variada
TRH	0.5 d = 12 h
R circuito	200 Ω <sup>1</sup>
Conc. Electrolito (NaCl)	1.0 M <sup>1</sup>
Conc. FeCl <sub>3</sub>	0.1 M <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Valores iniciales que posteriormente fueron variados según los cambios hechos a la configuración inicial

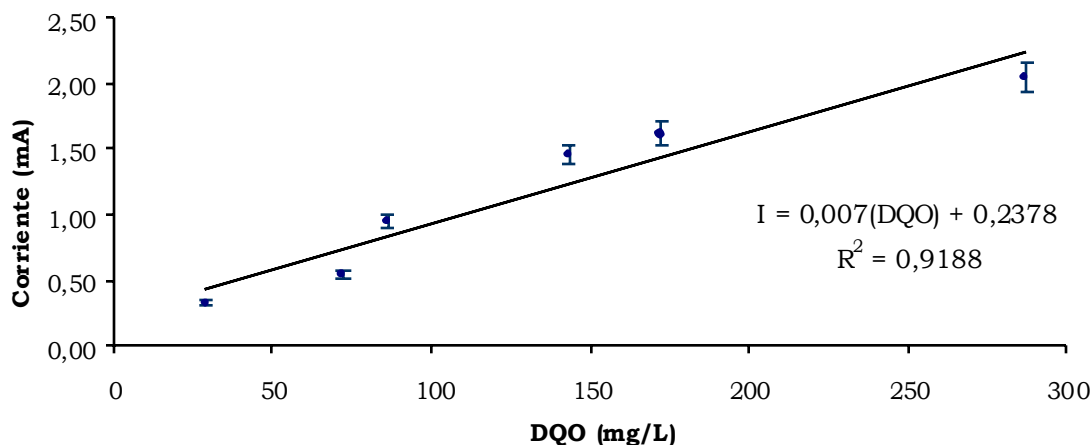
Inicialmente, se hicieron múltiples diluciones del afluente y se alimentó el sistema durante 1 día con cada una de éstas (Ver tabla 7). Se determinó el valor máximo de corriente producido en cada día. Se anotó el valor máximo de corriente alcanzado al cerrar el circuito con la resistencia de 200 Ω.

**Tabla 7.** Porcentajes de dilución del agua residual

Dilución %	DQO mg/L
100	287
60	172,2
50	143,5
30	86,1
25	71,8
10	28,7

Los datos obtenidos fueron ajustados mediante una regresión lineal con una correlación de 0.9188 y un error típico del 4.93 % (Ver figura 17). La siguiente ecuación fue la arrojada por la regresión:

$$I \text{ (mA)} = 0.007 * \text{DQO (mg/L)} + 0.2378$$



**Figura 17.** Relación entre diferentes concentraciones de DQO del agua residual y la corriente generada

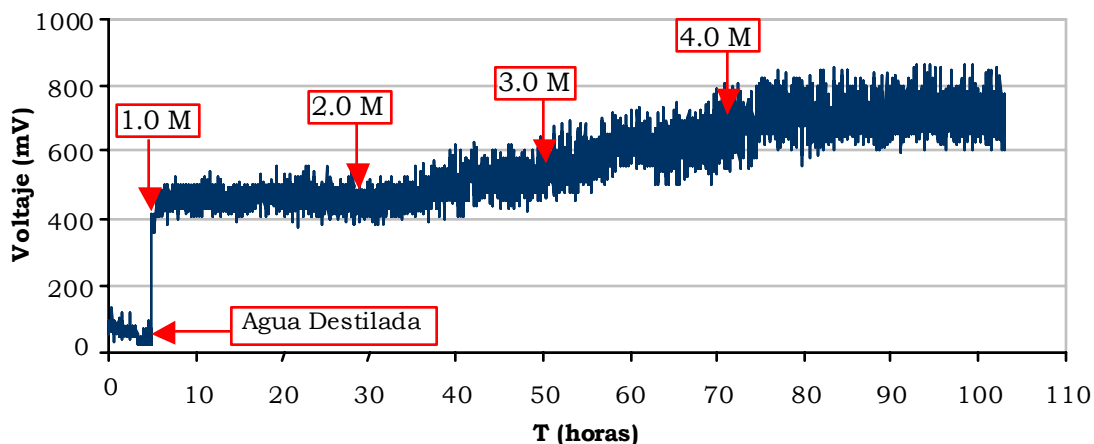
El objetivo de este procedimiento fue evaluar el efecto que tiene la carga orgánica con que se alimenta el sistema con respecto a la generación de energía. De esta manera, se obtuvo que a mayor carga orgánica aplicada, mayor fue la generación de energía eléctrica del sistema. Esto, teniendo en cuenta que se consideró que el sistema y, en particular, que los microorganismos habían alcanzado su estabilidad.

Diversas investigaciones se han adelantado con un procedimiento similar al efectuado anteriormente, concluyendo que las celdas de combustible orgánico se pueden utilizar como un biosensor para determinar la DBO<sub>5</sub> de muestras de aguas en corto tiempo. Esta aplicación podría tener un alcance significativo si se tiene en cuenta que se podría desarrollar un dispositivo que emplee esta técnica y que pueda ser utilizado en campo para determinar la concentración de materia orgánica presente en cuerpos de agua, y no esperar el tiempo (asociado al transporte, procesamiento e incubación de las muestras) para conocer este parámetro,.

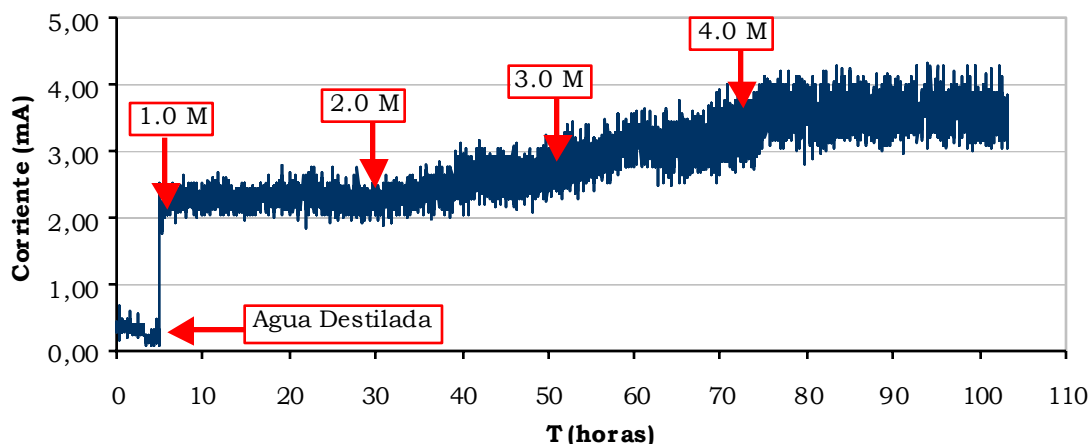
Posteriormente, se varió la concentración inicial del electrolito pasando de 1.0 M a 2.0, 3.0 y 4.0 M, registrando los voltajes alcanzados con estas concentraciones. Así mismo, se convirtieron cada una de estos voltajes a corriente utilizando una resistencia de 200  $\Omega$  (Ver figura 18 y 19).

En las figuras 18 y 19 se observa que la ausencia de un electrolito restringe la generación del voltaje y de corriente respectivamente. Con agua destilada y sin ningún electrolito en esta, se alcanzaron valores mínimos de voltaje y de corriente: 24 mV y 0.04 mA respectivamente. Así mismo, con la incorporación de NaCl como electrolito (1.0M), se observó un aumento considerable en estos valores, llegando hasta 420 mV y 3.2 mA respectivamente. Las variaciones posteriores de la concentración del

electrolito no representaron una variación tan considerable como lo fue el cambio de agua destilada a una solución de NaCl de 1.0 M. Con la última concentración ensayada (4.0 M), se obtuvieron valores máximos de voltaje y corriente de 800 mV y 4 mA respectivamente.



**Figura 18.** Voltaje generado para diferentes concentraciones del electrolito (NaCl)



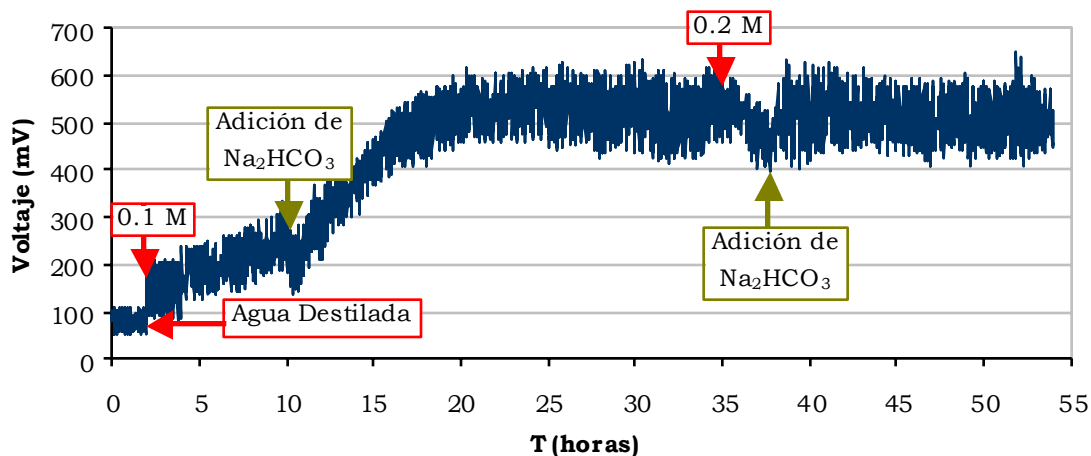
**Figura 19.** Corriente generada para diferentes concentraciones del electrolito (NaCl)

La configuración que se utilizó, en la cual el ánodo no estaba en contacto directo con los microorganismos de la cámara de oxidación (tal como recomiendan diversos autores), sino que estos se debían adherir a la



membrana aniónica, facilitó la transferencia de los electrones al ánodo, debido a que la función del electrolito en la celda de combustible orgánico fue la de aumentar el área de transferencia de estos electrones al ánodo. De esta manera, se observó que la presencia del electrolito en la celda de combustible orgánico tuvo mayor relevancia que la concentración final de éste.

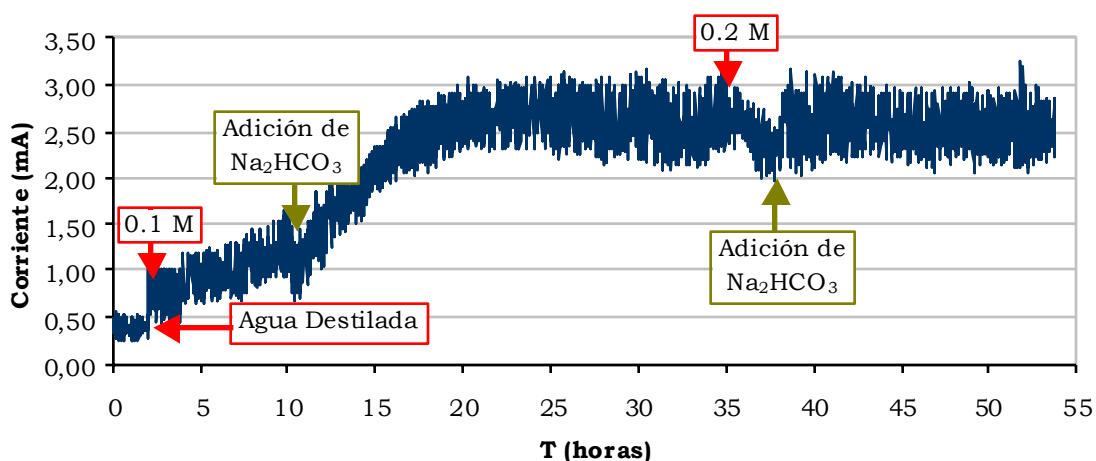
Luego de realizar este proceso, se volvió a colocar una concentración del electrolito de 1.0 M, y de esta forma, se hizo la variación de la concentración de  $\text{FeCl}_3$  contenido en la cámara de reducción. En un principio, se ensayó sólo con agua destilada sin la presencia de  $\text{FeCl}_3$ . Posteriormente, se varió la concentración de 0.1 M a 0.2 M, registrando los voltajes alcanzados con estas concentraciones. Se convirtieron cada una de estos voltajes a corriente utilizando una resistencia de  $200 \Omega$  (Ver figura 20 y 21).



**Figura 20.** Voltaje generado para diferentes concentraciones de  $\text{FeCl}_3$

Cuando se adicionó el cloruro férrico al agua destilada de la cámara de reducción su pH bajó a 2.0 unidades, asociándose con los iones hidroxilos

del agua y volviéndose poco soluble. Este pH fue ajustado posteriormente (a 9.7) con la adición de bicarbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{HCO}_3$ ), con el fin de que el hierro férrico se precipitara y entrara en contacto con el cátodo ubicado en el fondo de la cámara de reducción y para una mejor reacción de este con los electrones provenientes de la cámara de oxidación. Con ayuda del aireador, el hierro férrico que tiende a precipitarse en pH superiores a 7.0 unidades, permaneció en suspensión.



**Figura 21.** Corriente generada para diferentes concentraciones de  $\text{FeCl}_3$

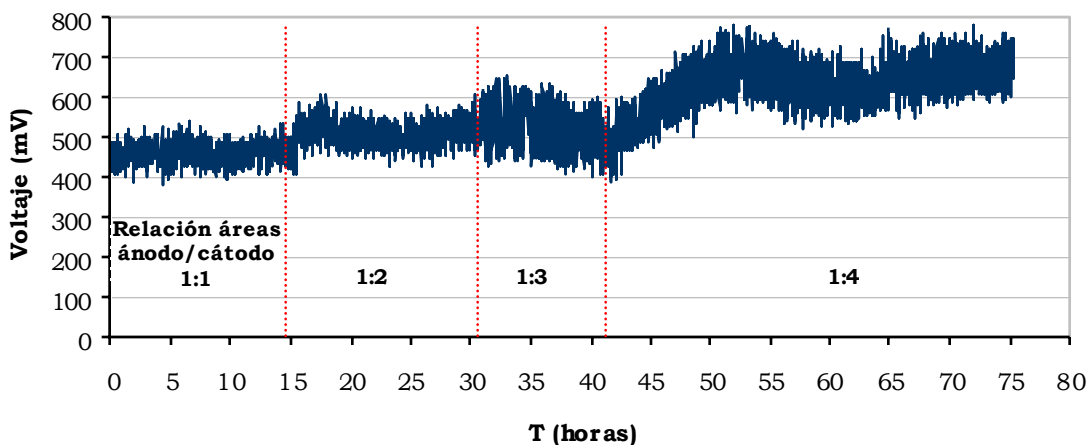
Al adicionar el cloruro férrico al agua destilada de la cámara de reducción, se obtuvo un aumento en los valores de corriente y voltajes generados, los cuales se elevaron paulatinamente durante 13 horas aproximadamente, luego de que el pH fue subido hasta 9.7 unidades, alcanzando valores promedios de 2.7 mA y 554 mV respectivamente.

Cuando se aumentó la concentración de cloruro férrico a 0.2 M, los valores de corriente y voltaje tendieron a bajar durante 2 horas, tiempo después del cual se ajustó el pH nuevamente, y posteriormente permanecieron constantes.

Luego de que se ajusto el pH la primera vez, el aumento del voltaje y de la corriente hasta valores estables pudo deberse al proceso de disociación y posterior asociación del hierro férrico con el agua destilada y con los electrones provenientes de la cámara de oxidación respectivamente.

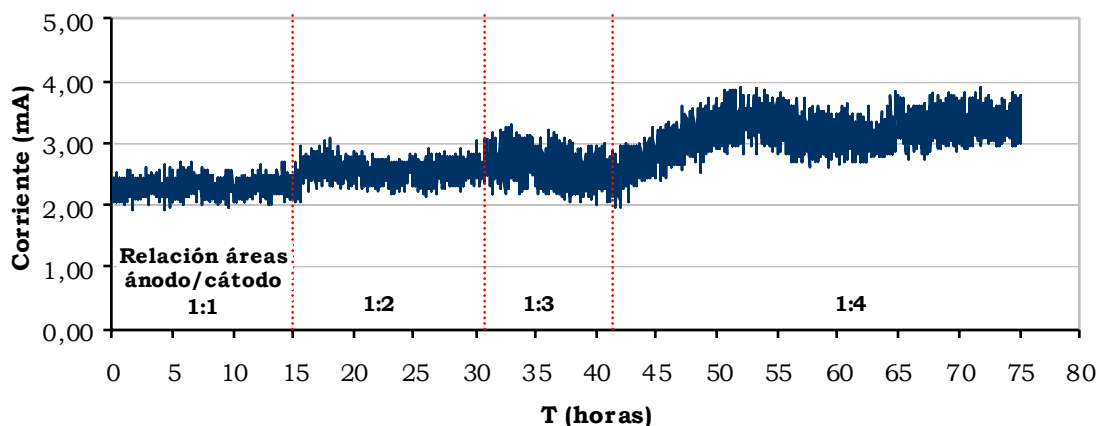
Al no haber cambio significativo luego de la estabilización de la producción de voltaje y corriente en cada cambio de concentración de  $\text{FeCl}_3$ , se puede decir que el sistema no es tan sensible a la variación de este parámetro.

Posteriormente, se colocó la concentración inicial de  $\text{FeCl}_3$  (0.1 M) en la cámara de reducción y se redujo el área del cátodo para operar el sistema con diferentes relaciones de áreas ánodo/cátodo. Se implementaron relaciones de áreas de 1:1, 1:2, 1:3 y 1:4. Esto se hizo con el fin de probar la hipótesis de que al tener el cátodo una menor área, es más fácil que los electrones provenientes de la cámara de oxidación entren en contacto con el  $\text{FeCl}_3$  al tener un recorrido físico menor sobre este. De esta manera, se registraron los valores de los voltajes y se procedió a determinar la corriente en forma similar a los ensayos anteriores, con la resistencia de  $200 \Omega$  (Ver figuras 22 y 23).



**Figura 22.** Voltaje generado para diferentes relaciones de áreas ánodo/cátodo

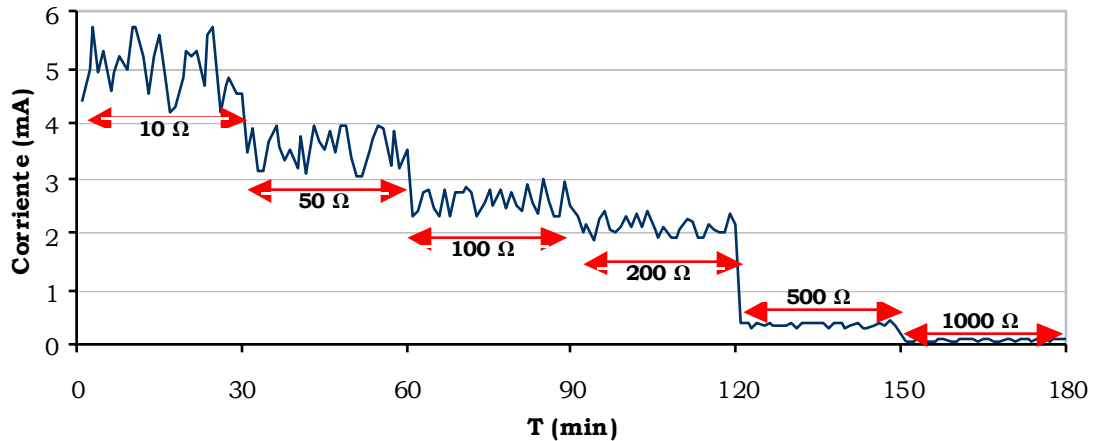
En las figuras 22 y 23 se observa que no existió una variación significativa para las relaciones de áreas ánodo/cátodo ensayadas. Para la relación de áreas de 1:4 se obtuvieron los mayores valores de corriente y voltaje de este ensayo: 3.84 mA y 784 mV respectivamente.



**Figura 23.** Corriente generada para diferentes relaciones de áreas ánodo/cátodo

Finalmente, se procedió a variar la resistencia del circuito sucesivamente de 10, 50, 100, 200, 500 a 1000 ohmios, previa estabilización del voltaje con el circuito abierto.

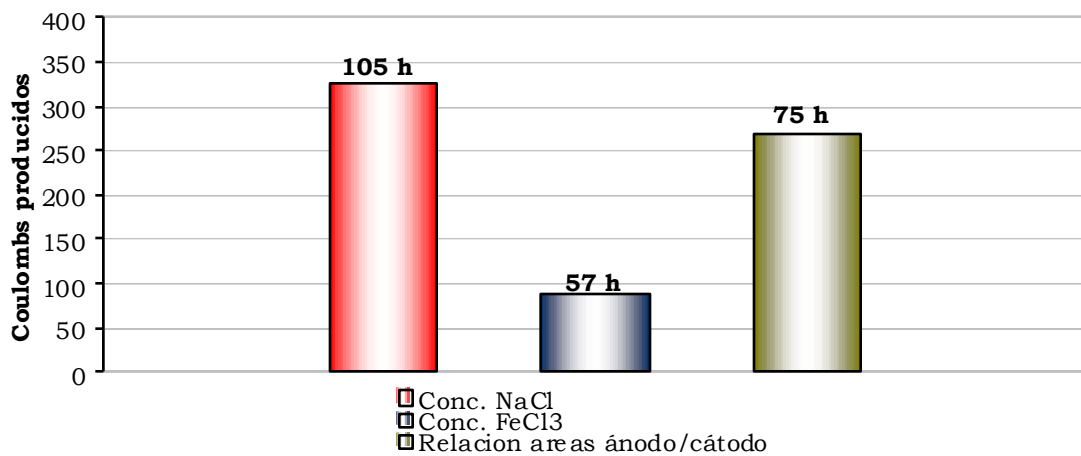
Con la resistencia de 10  $\Omega$  se obtuvieron los mayores valores de corriente del sistema: 5.71 mA. Para 50, 100, 200, 500 y 1000  $\Omega$  se obtuvieron valores promedios de corriente de 3.57, 2.67, 2.09, 0.75 y 0.34 mA respectivamente. Los resultados de este ensayo tienen este comportamiento decreciente, puesto que al ir cambiando de resistencia el voltaje baja ya que las resistencias hacen que la fuente se descargue. Aunque por la naturaleza del sistema, en el cual se hacía una dosificación constante y continúa del combustible (agua residual), la carga de la fuente tiende a bajar pero nunca a agotarse.



**Figura 24.** Corriente generada para diferentes resistencias

Con los datos de corriente obtenidos, se determinó la carga generada por el sistema (número de coulombs) en cada uno de las tres configuraciones evaluadas, para determinar que tan sensible era el sistema al cambiar ciertos parámetros. La figura 25 muestra el total de coulombs producidos por el sistema, que se calcularon teniendo en cuenta la definición de coulomb.

$$1 \text{ Coulomb} = 1 \text{ Amperio} \cdot 1 \text{ segundo}$$

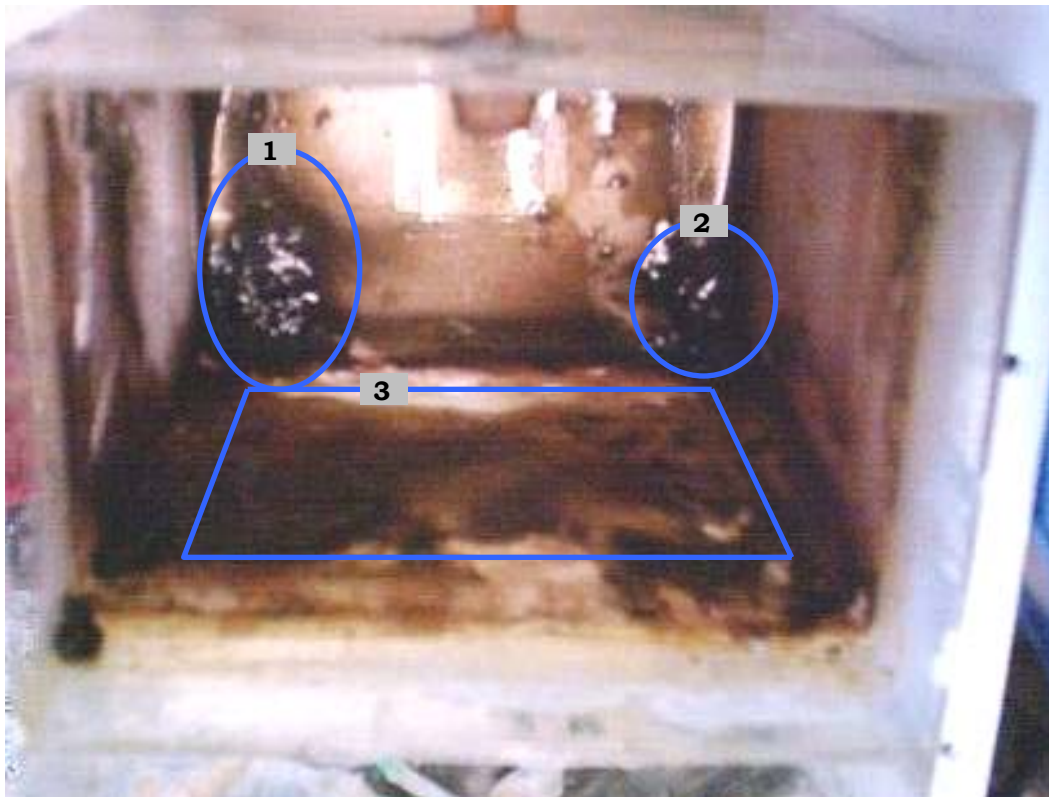


**Figura 25.** Carga total generada durante el tiempo de operación en cada una de las configuraciones de la fase II

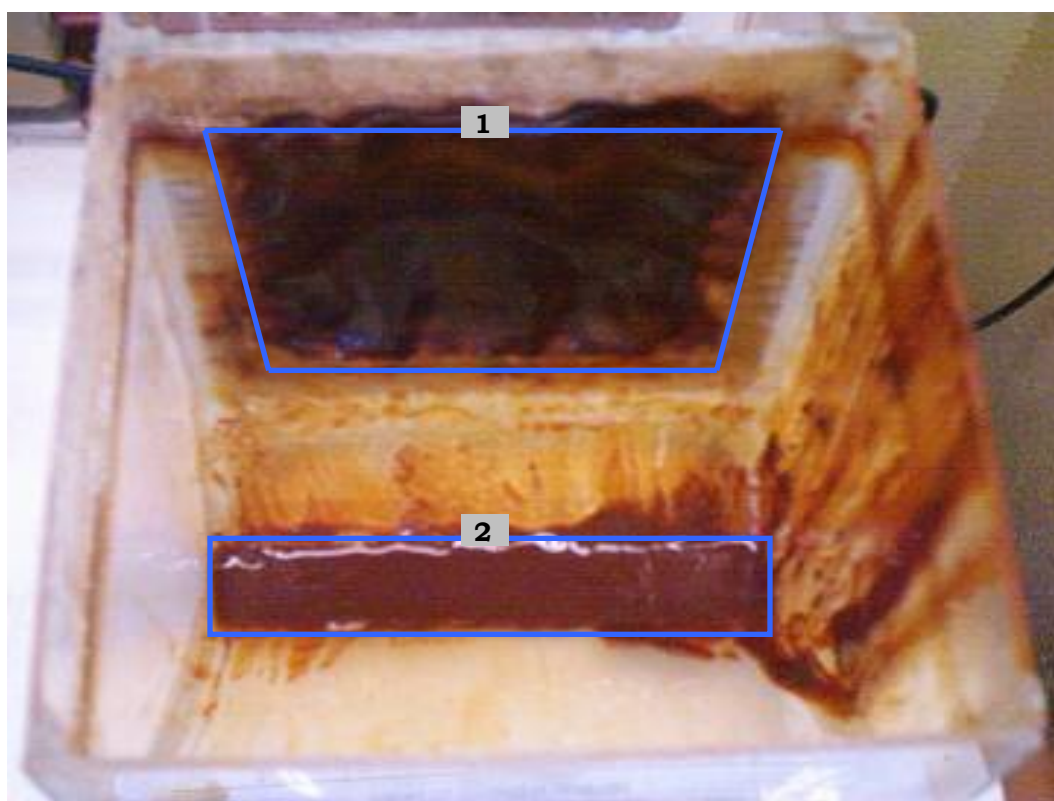
Aquí se muestra que uno de los factores que puede afectar el desempeño de una celda de combustible orgánico, bajo las condiciones operadas, puede ser, en su orden, la concentración del electrolito, la relación de áreas ánodo/cátodo y por último la concentración de  $\text{FeCl}_3$ .

Cuando se desmonto el sistema, se tomaron fotografías presentadas en las figuras 26 y 27, que muestran el desarrollo de biopelículas adheridas a las paredes de la cámara de oxidación y el hierro férrico precipitado en el fondo de la cámara de oxidación respectivamente.

Estas biopelículas adheridas a la membrana aniónica y en las paredes de la cámara de oxidación muestra la abundante población bacteriana que se desarrolló.



**Figura 26.** Desarrollo de biopelícula de microorganismos en la cámara de oxidación. 1) y 2) adheridas al fondo, y 3) adherida a la membrana aniónica



**Figura 27.** Vista de la cámara de reducción. 1) Membrana Cationica y 2) hierro férrico precipitado en fondo, el cual entraba en contacto con el cátodo

## **5. CONCLUSIONES**

El poder generar energía eléctrica a partir de un producto de desecho como lo son las aguas residuales crea un reto interesante a futuro sí se tiene en cuenta que los combustibles fósiles, principales fuente de energías usadas hoy en día en todo el mundo, generan tantos efectos adversos al medio ambiente. Dentro de unos años el petróleo con que se cuenta hoy en día se acabará y desde el presente es necesario buscar fuentes alternativas de energía que desde hoy puedan considerarse como sustitutos de este, y que no afecten la calidad del medio ambiente y la salud humana. Bajo este planteamiento, el estudio de una celda de combustible orgánico utilizada para la generación de energía aporta sus bases conceptuales y sus resultados para que en un mañana sea tenido en cuenta como fuente biológica de energía.

Con la elaboración de esta investigación se comprobó que es viable acoplar una celda de combustible orgánico a un proceso de tratamiento biológico de aguas residuales, con el fin de extraer parte de la energía que se genera a nivel microbiano en el proceso de degradación de la materia orgánica, y dar de esta forma un valor agregado al tratamiento de las aguas residuales.

Se evaluaron ciertos parámetros que tienen incidencia en la generación de energía eléctrica por parte de las celdas de combustible orgánico. Entre estos están: la concentración del electrolito, la presencia de un agente oxidante diferente al oxígeno en la cámara de reducción y la relación de áreas entre el ánodo y el cátodo. De esta forma, se observó que en su



orden, tiene mayor incidencia la concentración del electrolito, luego la relación de áreas ánodo/cátodo y por último la concentración de cloruro férrico en la cámara de reducción.

Así mismo, se estableció que existe una relación entre la generación de energía eléctrica y el grado de madurez de la población de microorganismos encargados de degradar la materia orgánica en una celda de combustible orgánico. A mayor madurez, los microorganismos tendrán mayor capacidad de generar electrones para transferir a un circuito exterior. Bajo este esquema, las celdas de combustible orgánico pueden ser utilizadas para predecir valores del contenido de materia orgánica presentes en cuerpos de agua.

De igual forma, se comprobó que no es necesario que los microorganismos estén en contacto directo con el ánodo para que haya transferencia de electrones a este. Con la configuración implementada se comprobó que es viable utilizar una membrana aniónica y junto a ella un electrolito para aumentar el área de transferencia de los electrones al ánodo. Esto se evidenció con la biopelícula de microorganismos adheridos a la membrana aniónica.

Se obtuvieron valores máximo de voltajes y corrientes de 900 mV y 5.71 mA, similares en orden de magnitud a los obtenidos por investigaciones internacionales adelantadas en la misma línea. Cabe anotar la importancia del desarrollo de este tipo de sistemas sin el uso de mediadores que, en caso de una aplicación a escala real, elevarían los costos asociados a su operación.

Se recomienda para futuras investigaciones en esta línea, la

implementación de electrodos de diferentes materiales inocuos a ambientes altamente corrosivos, por ejemplo fibras de carbono. Así mismo, se recomienda la implementación de equipos de bombeo y mezclado que funcionen a bajos voltajes y corrientes para poder determinar la relación entre la energía producida por el sistema y la requerida por el equipo necesario para su funcionamiento.

## **6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

ABARCA BAYONA, Juan Nicolás. Generación de energía eléctrica en procesos de tratamiento biológico de aguas residuales. Tesis Ingeniería Civil, Uniandes. 47 Pág. 2003.

BARRERA TAPIAS, Sergio Fernando. Introducción a la problemática del medio ambiente. UNIANDES, 303 p.1997.

BENEFIELD, Larry y RANDALL, Clifford. Biological Process Design for Wastewater Treatment. Prentice Hall, 515 p. 1980.

BENNETTO, H. P. Electricity generation by microorganisms. Biotechnology Education, Vol 1 No. 4, p 163 – 168. 1990.

BERCHMANS, S., RAJENDRAN, A., SHUKLA, A., SURESH, P. Biological fuel cells and their applications. Current Science. Vol. 87 No. 4, p 455 – 468. Agosto 25, 2004.

BOND, Daniel y LOVLEY, Derek. Electricity Production by *Geobacter sulfurreducens* Attached to Electrodes, Applied and Environmental Micorbiology, p 1548 – 1555, Marzo 2003.

BOND, Daniel, LOVLEY, Derek y GREGORY, Kelvin. Graphite electrodes as electron donors for anaerobic respiration. Environmental microbiology. Vol. 69 No. 6, p 596 – 604. Jun 2004.

BROWN, Theodore. LE MAY, Eugene y BURSTEN, Bruce. CHEMISTRY: The Central Science. Prentice Hall, 7a Ed. Pag. 733 – 761. 1997.

CACCAVO, Frank, CLEGERN, William, MILLER, Isaac, MONTOYA, Crystal. The Biological fuel cell. The American Biology Teacher. Vol. 65 No. 8. p 615 – 618. Oct. 2003.

ESCALANTE MORA, Nicolás. Celda de combustible biológica acoplada al tratamiento de aguas residuales. Tesis Ingeniería Civil. Uniandes. 37 p. 2002.

GAUDY, Anthony y GAUDY, Elizabeth. Microbiology for environmental scientists and engineers. McGraw Hill, 723 p. 1980.

HASELKORN, A., Microbial fuel cells to power future: New Design Promises Medical Breakthroughs, Daily Californian, Berkeley. California, 28 August 2002.

JENSEN, Johannes y SORENSEN, Bent. FUNDAMENTALS OF ENERGY STORAGE. Wiley-Interscience publication, p 141 – 204. 1984.

KIM, Byung, CHANG, Seop, KIM, Mia, HYUN, Moon, PARK, Hyung, KIM, Hyung. Mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, shewanella putrefaciens. Enzyme and Microbial Technology, Elsevier Vol 30 p 145 – 152, 2002.

KIM, Byung, CHANG, Seop, CHO, Kyung, KANG, Kui, JANG, Jae, MOON, Hyunsoo and PHAM, Hai. Construction and operation of a novel mediator

and membrane-less microbial fuel cell. *Process Biochemistry*, Elsevier, p 1 – 7, 2002.

KIM, Byung, CHANG, Seop, GIL, Geun, KIM, Mia, JANG, Jae, PARK, Hyung and KIM, Hyung. Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell. *Biosensors and Bioelectronics*, Elsevier, p 327 – 334, 2003.

KIM, Byung, CHANG, Seop, CHO, Kyung, KANG, Kui, JANG, GIL, Geun, CHO, Won and KIM, Mia. Continuous determination of biochemical oxygen demand using microbial fuel cell type biosensor. *Biosensors and Bioelectronics*, Elsevier, p 607 – 613, Julio 2004.

KIM, B., PARK, H., KIM, H., KIM, G., CHANG, S., LEE J., PHUNG, N. Enrichment of microbial community generating electricity using a fuel-cell-type electrochemical cell. *Applied Microbiology Technology*, p 672 – 681, 2004.

LINDEN, David. *Handbook of Batteries and Fuel Cells*, McGraw-Hill, 1043 p. 1984.

LISSENS, Geert, RABAEY, Korneel, SICILIANO, Steven and VERSTRAETE, Willy. A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnology letters*, Vol 25, p 1531 – 1535. 2003.

LIU, Hong, RAMNARAYANAN, Ramanathan y LOGAN, Bruce. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial

fuel cell. *Environmental Science and Technology*, Vol 38 No. 7, p 2281 – 2285. Marzo 2004.

LIU, Hong y LOGAN, Bruce. Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Environmental Science and Technology*, Vol 38 No. 14, p 4040 – 4046. Julio 2004.

LOVLEY, Derek y CHAUDHURI, Swades. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. *Nature biotechnology*, Vol 21 No. 10, p 1229 – 1232, Oct. 2003.

LOVLEY, Derek y NEVIN, Kelly. Mechanisms for accessing insoluble Fe(III) oxide during dissimilatory Fe(III) reduction by *Geothrix fermentans*. *Environmental microbiology*. Vol. 68 No. 5, p 2294 – 2299. May 2002.

METCALFF & EDDY, INC., *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. McGraw-Hill, 1820 p. 2003.

OROZCO, Alvaro y SALAZAR Alvaro. *Tratamiento Biológico de las Aguas Residuales*, Universidad de Antioquia, 473 p. 1987.

PARK, Doo Hyunk, ZEIKUS J. Gregory. Electricity Generation in Microbial Fuel Cells using Neutral red as Electronophore. *Applied and Environmental Microbiology*, p 292 – 297, Abril 2000.

PARK, Doo Hyunk, ZEIKUS J. Gregory. Impact of electrode composition on electricity generation in a single-compartment fuel cell using *Shewanella putrefaciens*. *Applied Microbiology Technology*, p 58 – 61, Marzo 2002.

SERWAY, Raymond. FÍSICA, Tomo I. McGraw Hill, Tercera Edición, 638 p. 1993.

SHUKLA, A. K., AVERY, N. R. y MUDDLE, B. C., Future cars: The electric option. Current Science, Vol. 77, p 1141 – 1146, 1999.

SHULER, Michael y KARGI, Fikret. BIOPROCESS ENGINEERING, Basics Concepts. Prentice Hall, 469 p. 1992.

STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. 5220 D, Close Reflux Colorimetric Method. 20<sup>th</sup> Ed., 1998.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, International Energy Outlook, Washington D.C., 207 p., Abril 1998.

WILKINSON, S., “Gastrobots” – Benefits and challenges of microbial fuel cells in food powered robot applications. Autonomous Robots. Vol. 9, pág. 99 – 111, 2000.

WILKINSON, S. y APPELGARTH, S., A hybrid biofuel cell approach using cellular disruption. 204 Meeting of the Electrochemical Society Inc., Abstr. 1243, 2003.

WILSON, Jerry D. College Physics 2. Ed. Prentice Hall Inc., 735 p. 1996.

**ANEXO 1.** Pantalla de la aplicación desarrollada en LabVIEW utilizada para la adquisición de datos de la fase II

