

Capítulo 6. Aplicaciones recientes en funcionamiento

6.1 Alimentación de una boya meteorológica

A continuación se describe la primera demostración de una celda microbiana de biocombustible (CMB) como una alternativa práctica para aplicaciones de bajo consumo energético. La aplicación reportada es una boya meteorológica de un consumo promedio de aproximadamente 18 mW, que mide la temperatura del aire, presión, humedad relativa y temperatura del agua, y que está configurada para proporcionar datos en tiempo real (Tender y col., 2008). El tipo específico de CMB utilizada en la demostración es la celda microbiana de biocombustible bentónica (CMBB). Las CMBB operan en el fondo de los ambientes marinos, en donde oxidan la materia orgánica que reside en los sedimentos sin oxígeno con la ayuda del oxígeno del agua que se encuentra sobre éstos. Son libres de mantenimiento, pueden funcionar indefinidamente y son lo suficientemente potentes como para operar una amplia gama de instrumentos científicos de bajo consumo de energía que normalmente funcionan con pilas. Se utilizaron dos prototipos de CMBB para alimentar la boya. El primero fue desplegado en el río Potomac en Washington, DC. EEUU, con un peso de 230 kg, un volumen de 1.3 m³, y sostenido con 24 mW (energía equivalente a aproximadamente 16 pilas alcalinas D por año a 25°C). Aunque no fue una aplicación práctica debido al alto costo y extensa manipulación, pero estableció la prioridad de que un instrumento científico en funcionamiento podría derivar toda su energía de una CMBB. También proporcionó lecciones valiosas para el desarrollo de una segunda y más práctica CMBB que se utilizó posteriormente para alimentar una boya en un pantano de sal cerca de Tuckerton, NJ. EEUU. La segunda versión tiene un peso de 16 kg, un volumen de 0.03 m³, sustentó 36mW (energía equivalente a aproximadamente 26 pilas alcalinas D por año a 25°C), y se desplegó por una sola persona en una pequeña embarcación con mínima o ninguna manipulación en el agua. Esta CMBB está siendo desarrollada para reducir costos y permitir una mayor salida de potencia de la conexión eléctrica de varias unidades en paralelo.

6.1.1 Celda microbiana de biocombustible bentónica (CMBB)

La celda microbiana de biocombustible bentónica (CMBB) se compone de un ánodo no corrosivo (típicamente grafito) incrustado superficialmente (1-5 cm de profundidad mínima) en los sedimentos marinos y está conectado a través de un circuito eléctrico (por ejemplo, un instrumento científico marino) a un cátodo no corrosivo (normalmente grafito) colocado en el agua (Reimers y col., 2001; Tender y col., 2002).

La materia orgánica que reside en los sedimentos de muchos ambientes marinos se deriva normalmente de fitoplancton muerto y/o detritus vegetal (Yan, 1977). Además, en muchos ambientes marinos oxidativos como el oxígeno y sulfato son suministrados dentro de los sedimentos desde el agua por medio de difusión y por la acción de esfuerzo cortante entre la interfaz sedimento-agua resultante del movimiento del agua sobre el sedimento. En tales ambientes, la combinación de materia orgánica y el suministro de oxidantes sustentan la actividad microbiana. Normalmente la cantidad de materia orgánica excede a la cantidad de oxidante, dando como resultado que los oxidantes se encuentren a milímetros o centímetros por debajo de la superficie del sedimento (Froelich y col., 1979). En estas condiciones, el ánodo de la CMBB actúa como un oxidante potente

debido a su conexión eléctrica a través del circuito intermedio y el cátodo con oxígeno del agua suprayacente.

Cuando una CMBB se despliega en los sedimentos anóxicos, se forma espontáneamente una biopelícula en la superficie del ánodo. En la mayoría de los ambientes marinos probados hasta ahora, la biopelícula del ánodo se enriquece con al menos dos tipos de microorganismos sedimentarios (Lowy y col., 2006). El primero, de la familia *Geobacteracea* (más similares a *Desulfuromonas acetoxidans*) se conocen por la oxidación del acetato en los poros de los sedimentos con la reducción de minerales oxidantes insolubles. Estos microorganismos utilizan el ánodo como oxidante inagotable, proliferan en la superficie del ánodo, oxidan acetato y explotan su capacidad para reducir oxidantes insolubles para transferir de forma directa electrones hacia el ánodo, sin la dependencia de añadir mediadores para realizar dicha transferencia (Reimers y col., 2006). Su fuente de acetato es la fermentación de materia orgánica (por ejemplo, glucosa o celulosa) por otros microorganismos anaerobios en los sedimentos (por ejemplo, *Clostridium*). El segundo tipo de microorganismos que enriquecen el ánodo son los *Desulfobulbus* o *Desulfucapsa*, que han demostrado oxidar el azufre elemental a sulfato (Holmes y col., 2004a). Ésto se realiza en el ánodo por la oxidación de sulfuro sedimentario y mediante la oxidación del azufre, estos microorganismos eliminan la suciedad precipitada en la superficie del ánodo. La actividad combinada de estos microorganismos y la reposición continua de combustible por difusión, convección y esfuerzo cortante garantizan que los ánodos de la CMBB puedan funcionar indefinidamente (Wilcock y Kauffman, 1996; Bond y col., 2002; Holmes y col., 2004b; Reimers y col., 2006).

Los electrones adquiridos en el ánodo fluyen a través del circuito externo hacia el cátodo. Una biopelícula también se forma en la superficie del cátodo y cataliza la reducción del oxígeno (Wilcock y Kauffman, 1996; Bond y col., 2002; Holmes y col., 2004b; Reimers y col., 2006). La reacción en la CMBB, el consumo de glucosa con el oxígeno y la formación de dióxido de carbono y agua es termodinámicamente favorable, permitiendo que la potencia generada se gaste en el circuito externo. Ésto se manifiesta como un voltaje de circuito abierto de aprox. 0.75 V.

Una característica clave de la CMBB es la longevidad, que se atribuye al suministro constante de combustible y oxidante por procesos ambientales, el rejuvenecimiento constante de los catalizadores microbianos en el electrodo, y la capacidad de estos catalizadores microbianos para intercambiar electrones con sus electrodos sin dependencia de mediadores y por oxidar completamente el acetato a dióxido de carbono (Bond y col., 2002). Lo anterior demuestra el auto-mantenimiento que pueden tener este tipo de celdas microbianas utilizando biopelículas anódicas de *Geobacteracea* como catalizadores (Chaudhuri y Lovley, 2003).

Hay una serie de propiedades de las CMBB que son importantes a considerar:

1. La CMBB es una verdadera celda de combustible microbiana; es decir, la reacción del ánodo es catalizada por microorganismos (Palmore y Whitesides, 1994; Logan y col., 2006).
2. La CMBB parece ser la más adecuada para los sedimentos que contienen materia orgánica suficiente para exhibir un gradiente redox a través de la interfaz bentónica (Reimers y col., 2001) lo que resulta en un voltaje de circuito abierto en la CMBB. Estos sedimentos son una característica común de los márgenes continentales. Los gradientes redox resultan del agotamiento de oxígeno por

microorganismos aerobios en la interfaz sedimento-agua, y la generación de reductores (por ejemplo, sulfuro) por microorganismos anaerobios situados debajo de la superficie del sedimento. La presencia de un gradiente redox indica que se cuenta con suficiente combustible y actividad microbiana para la generación de energía y aísla el ánodo del oxígeno del agua.

3. Hasta ahora, se ha demostrado que los prototipos CMBB en el campo han operado continuamente durante al menos 2 años.

4. El voltaje de operación de una CMBB es muy bajo (aproximadamente 0.35 V) (Reimers y col., 2001; Tender y col., 2002). Debido a que las CMBB están abiertas al medio ambiente, no pueden ser conectadas en serie para suministrar un voltaje más alto. Además, una CMBB no puede suministrar descargas de corriente cortas de gran intensidad que normalmente requieren los instrumentos científicos marinos. Para superar estas limitaciones, se utiliza un acondicionador de voltaje especializado para regular la potencia de salida de una CMBB y transformar la salida a un voltaje electrónicamente útil; por ejemplo, 6, 9, 12V, etc. El voltaje transformado es utilizado para cargar una batería o un capacitor.

6.1.2 Experimentos realizados con CMBB

6.1.2.1 Construcción y operación de la primera versión de CMBB

La primera versión CMBB estuvo compuesta por siete subunidades conectados en paralelo (Figura 6.1). Cada subunidad consistió de dos placas de grafito (GS10 Graphite Engineering, Inc.), cada una con medidas de 61 cm x 61 cm x 2.5 cm, colocadas en la parte superior e inferior de una caja de plástico de leche por medio de fuertes amarres de lazos. Se realizó la perforación por medio de un patrón de agujeros de 2.54 cm de diámetro a través de cada electrodo para que facilitara la incrustación de los ánodos en el sedimento. En cada electrodo se colocaron 14 cables eléctricos marinos aislados de 45 cm de largo enchufados a un conector húmedo. Estos cables se colocaron en los electrodos mediante la exposición de aproximadamente 5 cm del conductor con tornillos de titanio colocados en agujeros ajustados a través del electrodo.

Cuando se implementó en el río Potomac con una profundidad de 1 a 3 m dependiendo de la marea, las subunidades CMBB se asentaron en el fondo del río con los electrodos inferiores (ánodos) cubiertos por aproximadamente 5 cm de sedimento, y los electrodos superiores (cátodos) expuestos al agua. Las siete subunidades fueron separadas entre sí a una distancia de 30 a 45 cm. Todos los cátodos fueron conectados eléctricamente entre sí y de la misma forma también todos los ánodos, usando conectores húmedos para crear una sola CMBB.

6.1.2.2 Construcción y operación de la segunda versión de CMBB

El ánodo de la segunda versión CMBB consistió en 12 placas de grafito dispuestos en una matriz vertical con 2.5 cm de separación. Las placas de grafito se colocaron en la parte inferior de una placa de fibra de vidrio. Cada placa de grafito media 30.5 cm x 30.5 cm x 0.32 cm, mientras que la placa de fibra de vidrio medía 30.5 cm x 30.5 cm x 2.5 cm. Se colocaron tiras de titanio en cada placa y se realizó la conexión entre ellas, de las cuales se obtuvo un nodo común, este nodo se conectó a los cables eléctricos por medio de un conector húmedo. El cátodo de la segunda versión CMBB

consistió en un cepillo de grafito posicionado en el agua de un 1 m de largo, el cual fue conectado a cables eléctricos por medio de un conector húmedo. Este cepillo se formó con aproximadamente 3,000 hilos de grafitos de 7 μm de diámetro por 4 pulgadas de largo atrapados entre un par de cables trenzados de acero inoxidable. Recibió un tratamiento térmico para separar las fibras, con lo que aumentó la actividad catalítica para la reducción del oxígeno del agua.



Figura 6.1 Siete subunidades conectadas eléctricamente en paralelo para proporcionar potencia suficiente para a la boya (Tender y col., 2008)

6.1.3. Resultados

En agosto de 2004, la boya meteorológica alimentada por la primera versión CMBB fue desplegada en el río Potomac, en Washington, DC, EEUU. (Figura 6.2). Antes de conectar la boya, la potencia de salida de la CMBB fue de $24 \pm 2 \text{mW}$ a 0.35V a lo largo de 3 meses en el río Potomac. Una vez conectada, la boya alimentada con la CMBB operó desde octubre de 2004 a marzo de 2005 (casi 7 meses) sin incidentes hasta que la boya fue retirada del río debido a que el flujo de hielo cortó la conexión eléctrica a la CMBB.

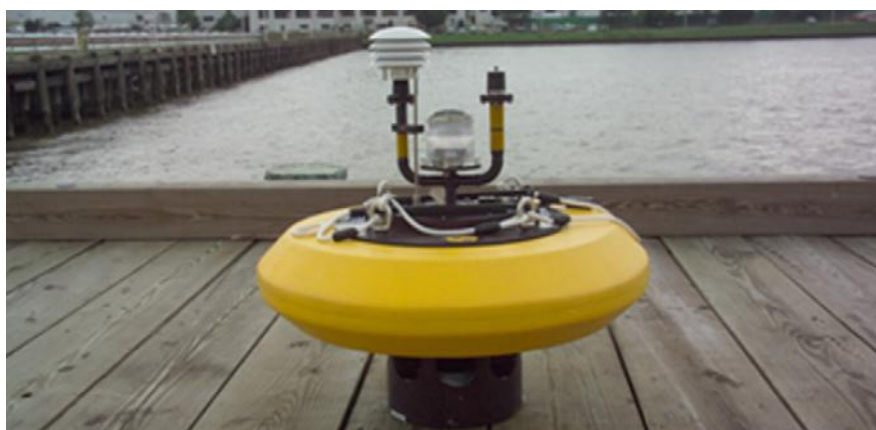


Figura 6.2 Boya meteorológica usada en la demostración en el muelle del Laboratorio de Investigación Naval en Washington, DC (Tender y col., 2008)

En la Figura 6.3 se muestra el registro de transmisión de datos meteorológicos de una semana transmitidos con la primera generación de CMBB que alimenta a una boya marina.

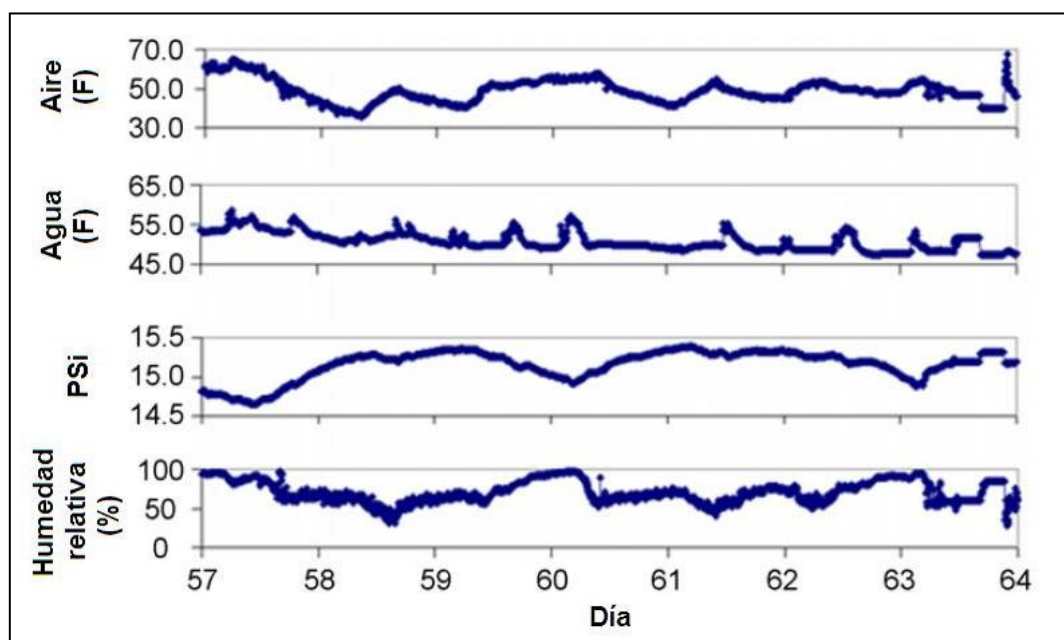


Figura 6.3 Ejemplo de un registro meteorológico de 7 días en una boya marina (Tender y col., 2008)

En la Figura 6.4 se presenta el ánodo de la segunda versión CMBB, se desarrolló para reducir costos y simplificar la instalación desde un muelle, un barco pequeño o por un vehículo operado remotamente. Esta CMBB se desplegó en agosto de 2006 para alimentar una boya en la cuenca de una laguna de sal cerca de Tuckerton, NJ, EUA y generó 36 mW en el ambiente de agua salada. Ésto representa una densidad de potencia de aproximadamente 16 mW/m² de la superficie geométrica del ánodo (36 mW/2.2m²), lo cual es consistente con la densidad de potencia observada durante los ensayos de la primera CMBB. La CMBB se incrustó al inicio del día uno. El voltaje de circuito abierto duró dos días y se observó un aumento de voltaje debido al restablecimiento del gradiente redox bentónico perturbado cuando el ánodo se incrustó. Comenzando el día tres, la CMBB descargó voltaje entre 0.35 y 0.65 (Figura 6.5). Este resultado indica que, aunque las placas individuales que componen el ánodo están estrechamente espaciadas, hay flujo suficiente de combustible para los procesos. Actualmente se está investigando la relación entre la separación entre placas, la generación de energía y la fuerza necesaria para empotramiento en diferentes tipos de sedimentos.

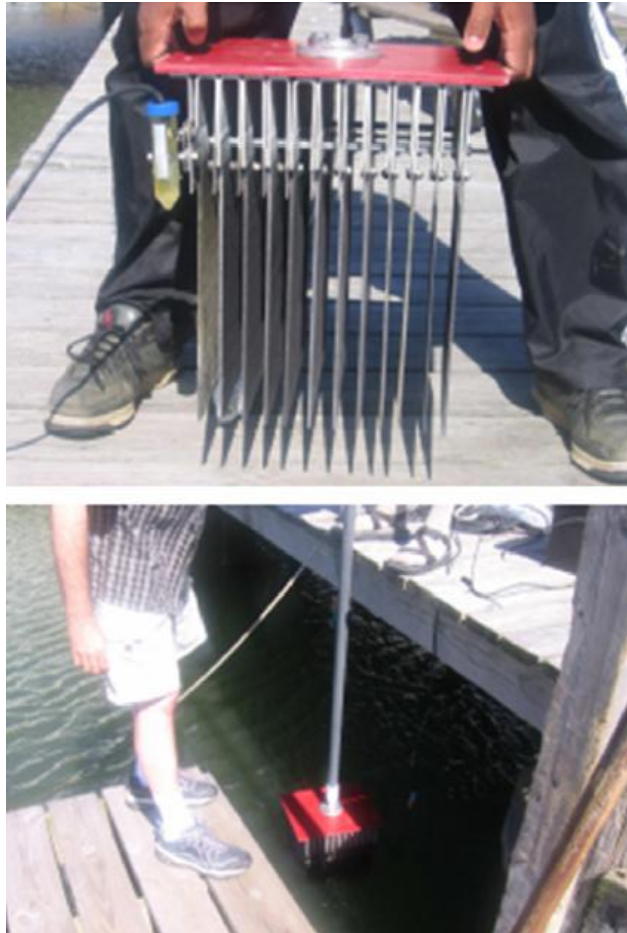


Figura 6.4 Ánodo de la segunda versión de una CMBB (Tender y col., 2008)

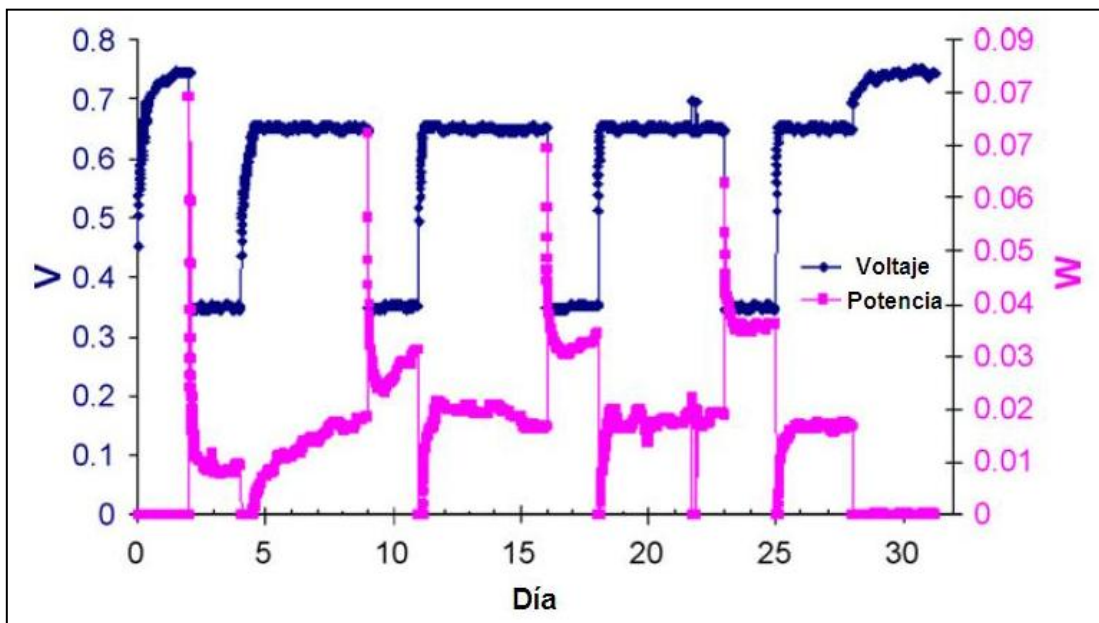


Figura 6.5 Registro de la generación de energía en los primeros 30 días de la instalación de la segunda generación de una CMBB (Tender y col., 2008)

6.2 Robots

El término “robot autónomo” se le ha atribuido a los sistemas de robótica que funcionan sin supervisión humana. De hecho, desde los tiempos antiguos, el hombre ha intentado construir sistemas que funcionen sin un control directo. Por ejemplo, en el año 60 DC, Herón de Alejandría construyó posiblemente el primer ejemplo registrado de un autómeta (Webb, 1999). Sin embargo, el término "autonomía" es un poco flexible, ya que se pueden considerar diferentes “modos de autonomía”. Hay dos modos principales (McFarland y Spier, 1997):

1. La autonomía de cómputo
2. La autonomía energética

La autonomía de cómputo se puede definir como la capacidad de determinar y llevar a cabo acciones independientemente, lo que puede o no estar relacionado con la obtención de energía (McFarland y Spier, 1997). La autonomía energética se refiere a la capacidad del agente para mantenerse en un estado viable por largos períodos de tiempo. Su comportamiento debe ser estable para no tener problemas con cualquier recurso vital, es decir, no deben cruzar cualquiera de sus límites letales (McFarland y Spier, 1997; Wilkinson, 2001). Hasta hace poco, la autonomía ha sido mayormente abordada desde la perspectiva de la computación. Por ejemplo, se considera el caso de un robot operado a baterías que se libera para llevar a cabo una tarea sin intervención externa. Al término de la tarea o cuando la carga de la batería es baja, el robot regresa a la base para recargarse y/o adquirir nuevas instrucciones. Por un lado, ciertos aspectos del comportamiento del robot se pueden considerar como autónomos, como la toma de decisiones de cálculo y control. Por otro lado, sin un ser humano, el robot no sería capaz de reponer su energía para realizar la tarea. Con esto en mente, en esta sección se presenta el desarrollo de robots que pueden generar energía por sí mismos.

La adopción de tal estrategia puede tener un impacto en la manera en que los investigadores e ingenieros en la comunidad robótica incorporen nuevos requisitos en sus misiones. Hay tres cuestiones fundamentales: En primer lugar, la energía útil (en el futuro previsible) no se podrá convertir instantáneamente a partir de sustratos crudos. En segundo lugar, habrá tareas (en particular los efectos en el movimiento) que no se podrán alimentar de forma continua. El efecto neto es que esta clase de robot tenga que incluir un comportamiento de “espera” en su repertorio con el fin de acumular energía suficiente para llevar a cabo una tarea o sub-tarea. Se refiere a esta forma de conducta como “comportamiento de impulsos”. En tercer lugar, el robot deberá resolver múltiples problemas de selección de objetivo. En particular, puede ser necesario exhibir un comportamiento “oportunista” en términos de "interrumpir" la misión de recolección y aprovechar otro tipo de recurso energético de más fácil acceso.

6.2.1 EcoBot I

El primer robot construido en el mundo alimentado de manera directa y totalmente por energía de reducción bacteriana (Wilkinson, 2000a) recibe el nombre código de EcoBot I. Su construcción resultó económica y los materiales utilizados fueron explotados al máximo de su rendimiento para dar salidas de energía en el rango de 37.2J y lograr eficiencias del orden de 1.56%. Aunque esta

cifra es baja, es coherente con la actual tecnología CMB. La Figura 6.6 muestra al EcoBot I totalmente montado.

El robot utilizó un banco de ocho CMB (cultivos puros de *E. coli* con mediadores sintéticos), un circuito electrónico de control, dos fotodiodos y dos motores. La energía producida por las CMB se acumuló en un banco de seis condensadores y al llegar a cierto umbral se liberaba para alimentar a los motores de acuerdo a la indicación de los fotodiodos. Después de seguir la luz hasta que la energía se agotaba, el robot adoptaba una posición de reposo hasta que se acumulaba la suficiente energía para encender los motores de nuevo. El experimento del robot, pasando de un punto de partida hacia una fuente de luz se repitió siete veces. Dos de estos ensayos fueron de vídeo grabados y los otros cinco fueron registrados con datos. En la Figura 6.7 se muestra una fotografía de las videograbaciones, la Figura 6.8 es un gráfico que ilustra la carga promedio por ciclos de descarga, en términos de la distancia promedio y el tiempo de los cinco ensayos.

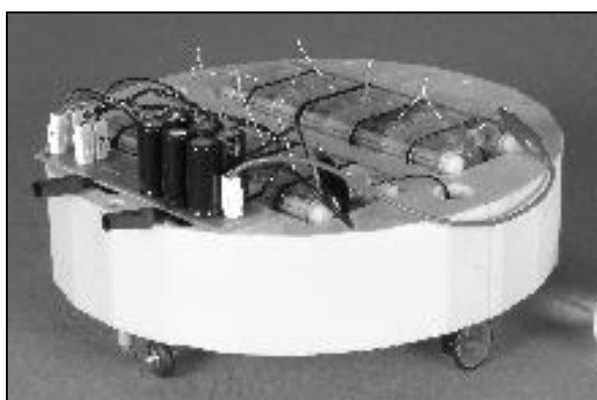


Figura 6.6 Fotografía de prototipo Ecobot I (Ieropoulos y col., 2003a)

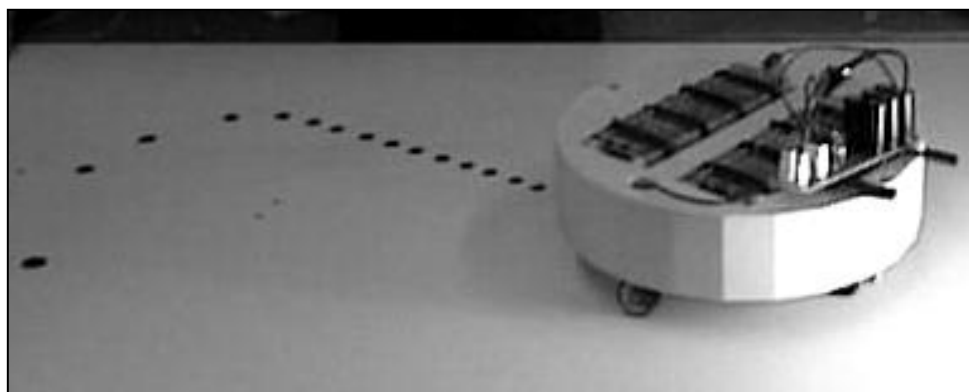


Figura 6.7 Desplazamiento del Ecobot I (Ieropoulos y col., 2003b)

El EcoBot I es solo el primer paso de muchos, para producir el sistema final para un robot independiente y hay una serie de implicaciones que deben considerarse para cualquier desarrollo posterior. Éstos se pueden dividir en dos categorías principales: El hardware y el comportamiento del sistema.

En un sistema donde se emplea un flujo de químicos continuo, tendrá que tener un cierto número de micro-bombas y filtros para mantener el sistema en operación. Parámetros como la temperatura, el pH y el nivel de líquido tendrán que estar continuamente monitoreados y controlados. A medida que el robot busque su fuente de energía, que será en forma de alimentos crudos y la extracción de los nutrientes de éstos, la electrónica y la mecánica involucrada tendrán que ser muy eficientes y precisos. Por supuesto, un efecto secundario importante es que el empleo de estos dispositivos tendrá un requerimiento de energía asociados, los cuales tienen consecuencias en el comportamiento.

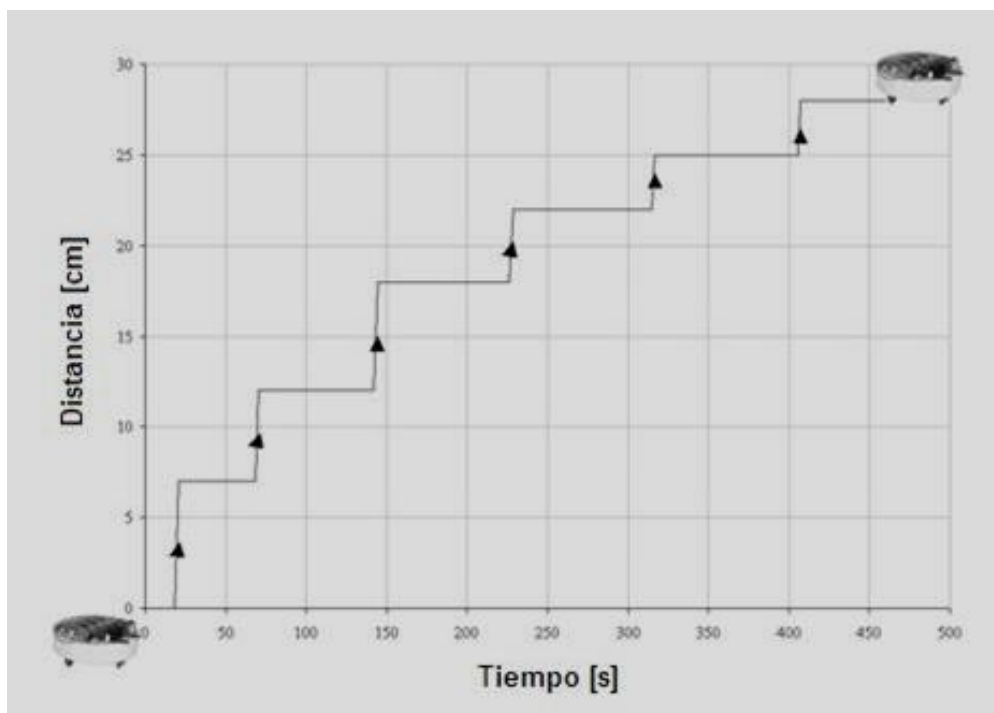


Figura 6.8 Promedio de ciclos de carga y descarga del EcoBot I (Ieropoulos y col., 2003b)

Simple advertencias de "batería baja" no son suficientes. Ésto implica que tanto los sensores internos que proporcionan la información para un control más preciso y sensores externos para que el agente pueda llevar a cabo su tarea tendrán que utilizarse. La realimentación negativa será un elemento clave en el sistema debido a que es el funcionamiento normal de los sistemas biológicos. Es a través de la realimentación que la homeostasis se logra en todos los niveles de organización en los sistemas vivos, desde lo molecular a lo social. Homeostasis significa "mantenerse igual" y se refiere a la capacidad única de los sistemas biológicos para mantener el control automático sobre las variaciones físico-químicas, por medio de la retroalimentación negativa. Imitar este parámetro crítico implica un gran desafío.

La tecnología CMB está todavía en su infancia y los niveles de potencia obtenidos son muy bajos. Es evidente que la fuente de energía no está en condiciones de proporcionar la energía suficiente para que el robot opere en un modo continuo. Por lo tanto, el prototipo EcoBot I primero tendrá que acumularla antes de usarla, resultando así en un "comportamiento de pulsos". Manejar la variable recurso energético no es un problema trivial ya que habrá situaciones en que las reservas de energía

deberán ser empleadas, como por ejemplo, cuando la distancia entre el agente y el alimento sea mayor de lo normal.

La autonomía real, en el contexto de la inteligencia artificial no es sólo una cuestión de ejecutar una tarea con un mínimo o ninguna intervención exógena, si bien, se tiene que confiar en el factor humano para las necesidades de energía. Los sistemas naturales metabólicos resuelven este problema mediante el empleo de la energía redox para realizar un trabajo. Al tratar de imitar a la naturaleza con el EcoBot I, se demuestra que este enfoque es factible.

En el futuro, tales robots podrían ser clasificados de acuerdo a la variedad de alimentos que consumirán. Un nombre adecuado para estos robots sería el de *Specivores*, los cuales podrían alimentarse de un tipo de alimento o tal vez mediante el uso de microorganismos de un cultivo mixto que podrían digerir la mayoría de las fuentes de alimentos naturales y los clasificaría como omnívoros.

6.2.2 EcoBot II

Los experimentos reportados en el trabajo de Ieropoulos y col. (2004), se llevaron a cabo utilizando una plataforma sencilla y de bajo costo (Figura 6.9 y Figura 6.10). Ésta consistió de estireno ligero como chasis, circuitos electrónicos y dos motores. El EcoBot II fue construido con bolsas en el chasis superior para acomodar y permitir la exposición de aire libre a los cátodos de O_2 de las CMB con cultivos mixtos de lodos activados. Esta estrategia ofrece las siguientes ventajas: Potencia de salida más alta, mejor estabilidad y la posibilidad de utilizar una amplia variedad de sustratos debido a la diversidad de la comunidad microbiana. El EcoBot II totalmente ensamblado registró un peso de 780 g, que fue de aproximadamente 180 g más ligero que el EcoBot I.

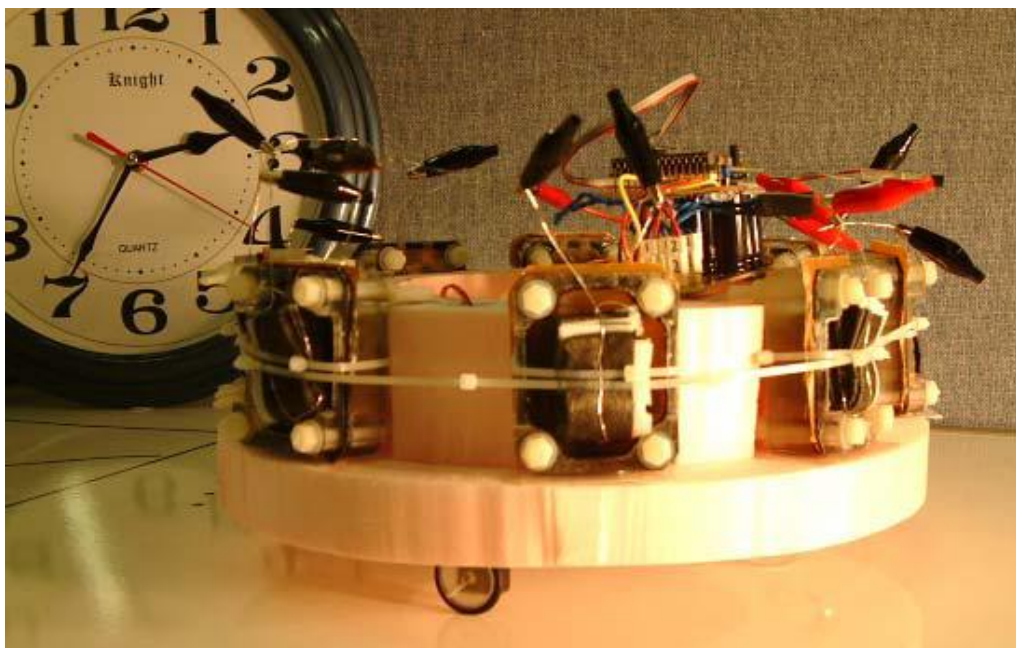


Figura 6.9 EcoBot II con una CMB y cátodos de O_2 colocados en el exterior para permitir su exposición al aire (Ieropoulos y col., 2004)

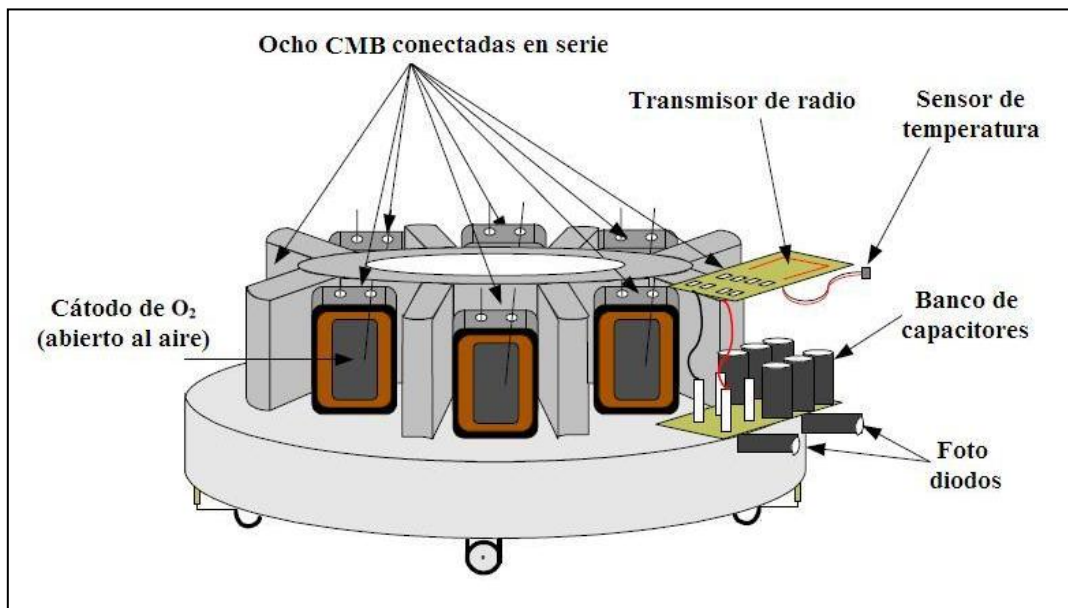


Figura 6.10 EcoBot II (Ieropoulos y col., 2004)

Como fue el caso del EcoBot I, el EcoBot II operó con destellos de energía. Ésto ha sido descrito anteriormente como “comportamiento de impulsos”. Ninguna de las dos versiones de EcoBot incorpora cualquier otro aspecto de comportamiento o tarea, aparte de la acumulación de energía. Por lo que fueron simplemente "inactivos" durante el tiempo necesario para cargar el acumulador a bordo. Una de las principales diferencias entre el EcoBot II y su predecesor el EcoBot I, fue que EcoBot II incorpora tareas adicionales. El EcoBot II realizó la detección de la temperatura ambiente y realizó la transmisión de datos de la temperatura detectada. Ésto dió lugar a que la energía se distribuyera en tres tareas, en lugar de ser solamente utilizada para la locomoción foto-táctica (EcoBot I) y por lo tanto resultó ser más lento que el EcoBot I.

Las CMB que se utilizaron en el EcoBot II se probaron con anterioridad por medio de su descarga a través de una resistencia de carga. Estos experimentos se realizaron para obtener un punto de referencia en la generación de electricidad. En la Figura 6.11 se muestra un ciclo típico de agotamiento para ocho diferentes CMB antes de conectarlas con el EcoBot II. La flecha que apunta hacia arriba indica el punto de alimentación de moscas (0,1% peso/volumen). Ésto equivale a 1 mosca/CMB. La base de referencia se estableció en 35µA. También para garantizar que la cantidad de nutrientes residuales se mantuvieran al mínimo y que la energía para conducir el robot se derivara sólo de la adicción de moscas como sustrato. Durante el ciclo de agotamiento, que normalmente duró 24 horas, los cátodos de O₂ se humedecieron una vez con agua de mar artificial (AMA).

Las carreras de corta distancia (Figura 6.12) se llevaron a cabo en 50 cm y la duración de cada carrera fue variable y dependió del ciclo carga/descarga del robot. El final de la carrera se produjo cuando el robot llegó a la fuente de luz. Para que EcoBot II realizara la búsqueda de la luz, el punto de inicio se colocó para las tres repeticiones en un ángulo de 90° con respecto a la fuente de luz.

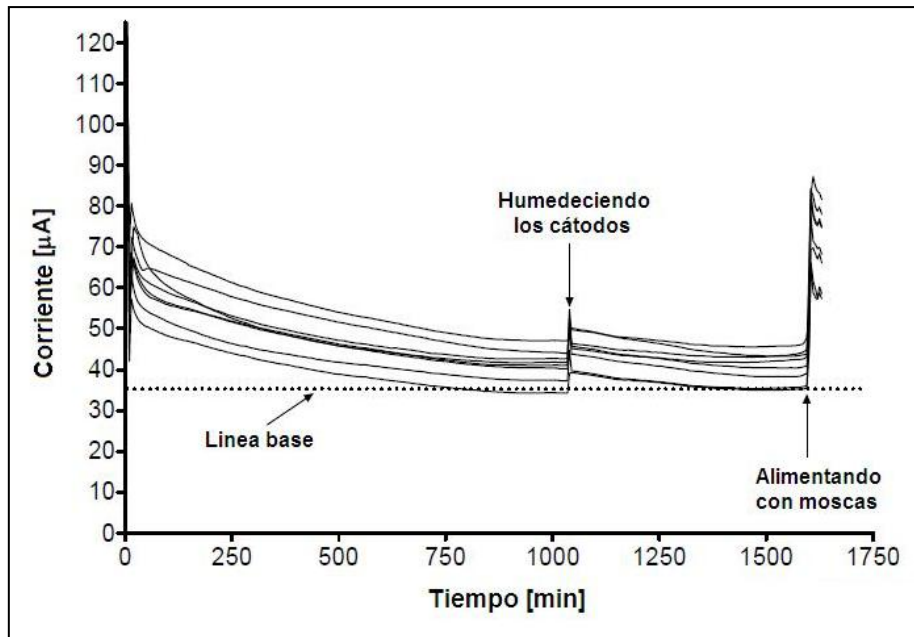


Figura 6.11 Ciclo típico de agotamiento para ocho diferentes CMB antes de conectarlas con el EcoBot II. (Ieropoulos y col., 2004)

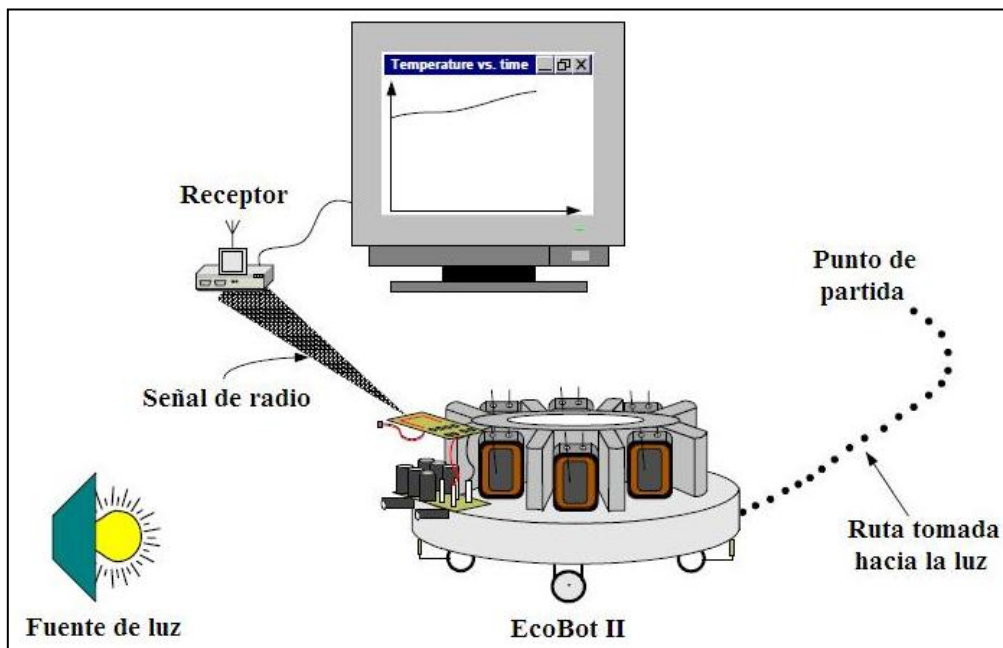


Figura 6.12 Arreglo experimental para las carreras del EcoBot II (Ieropoulos y col., 2004)

Los experimentos realizados se llevaron a cabo en diferentes días, comenzando a la misma hora. En cada caso, cada CMB fue alimentada con una mosca de masa idéntica, lo que fue equivalente a 0.1% peso/volumen en el inicio de la corrida. Durante cada corrida, los cátodos de O₂ se humedecieron una vez con 3 ml de AMA.

A continuación, en la Figura 6.13 se muestran los datos promedios de los tres experimentos. En promedio, el robot se movía cada 14 minutos por cada 2 ó 3 segundos de movimiento, para detenerse de nuevo y acumular energía. La distancia recorrida por cada movimiento fue de 2 a 3 centímetros. Los puntos muestran el avance promedio de las tres repeticiones y la línea continua es la curva de ajuste de la regresión no lineal. Como puede observarse, en promedio tomó seis horas para cubrir una distancia de 50 cm (8.3 cm/h).

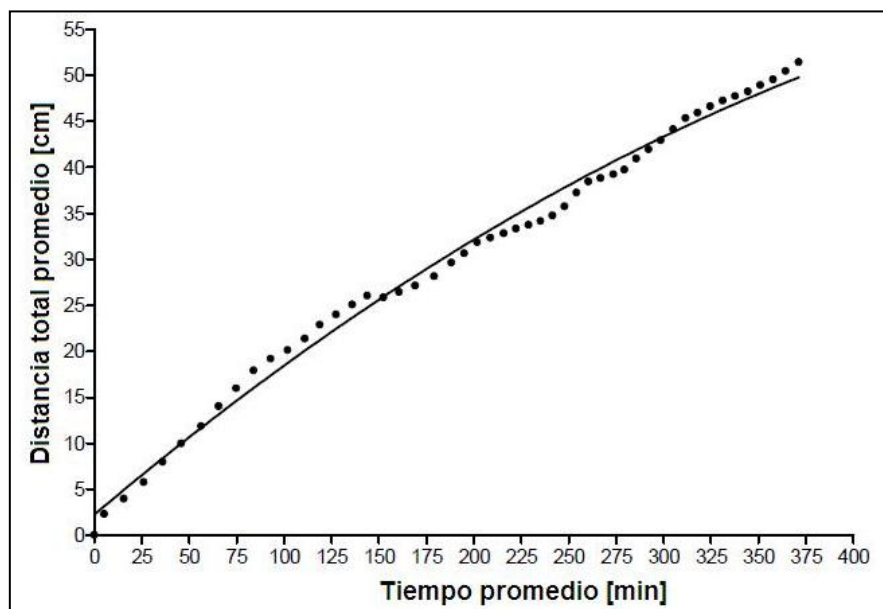


Figura 6.13 Tiempo promedio de las tres carreras para llegar a la meta del robot a 50 cm. (Ieropoulos y col., 2004)

La Figura 6.14 muestra la temperatura transmitida por el EcoBot II hacia un receptor. Un gradiente de temperatura desde el comienzo de la carrera hacia la línea de meta fue creado mediante el empleo de dos lámparas halógenas como fuente de luz. Ésto se realizó para probar la capacidad de detección de la temperatura del robot. Los puntos representan los datos promedios para las tres repeticiones, con un ajuste de curva de regresión no lineal (línea continua) y con bandas de confianza de $\pm 95\%$ (líneas punteadas).

Las bacterias en los ánodos fueron alimentadas con 0.1% peso/volumen de moscas y en este caso se dejó el robot en un espacio abierto para operar continuamente hasta que dejara de funcionar. Ésto se hizo para investigar la cantidad de tiempo que el robot podía funcionar de forma continua con el mismo cultivo bacteriano en un sistema de flujo no-continuo y alimentado con una sola mosca/CMB. Para las primeras etapas de estos experimentos (los primeros cinco días), los cátodos de O_2 fueron humedecidos manualmente con AMA una vez al día. La Figura 6.15 muestra el tiempo promedio con relación a la distancia promedio. En promedio, el robot operó durante 11 días (máximo de 12 días) y la distancia recorrida fue de 2 metros (máximo de 2.15 metros).

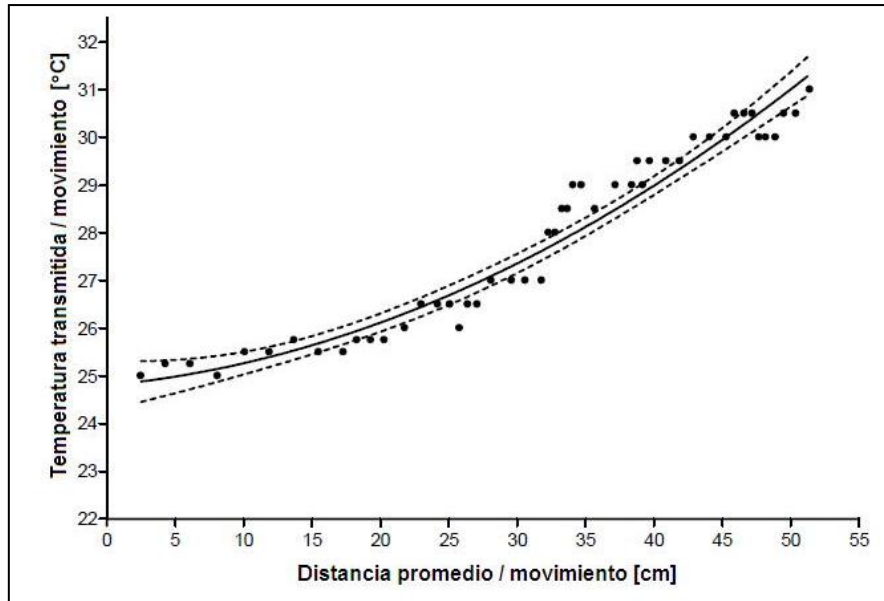


Figura 6.14 Gradiente de temperatura producido y detectado por el robot cuando se movía hacia el calor de la fuente de luz (Ieropoulos y col., 2004)

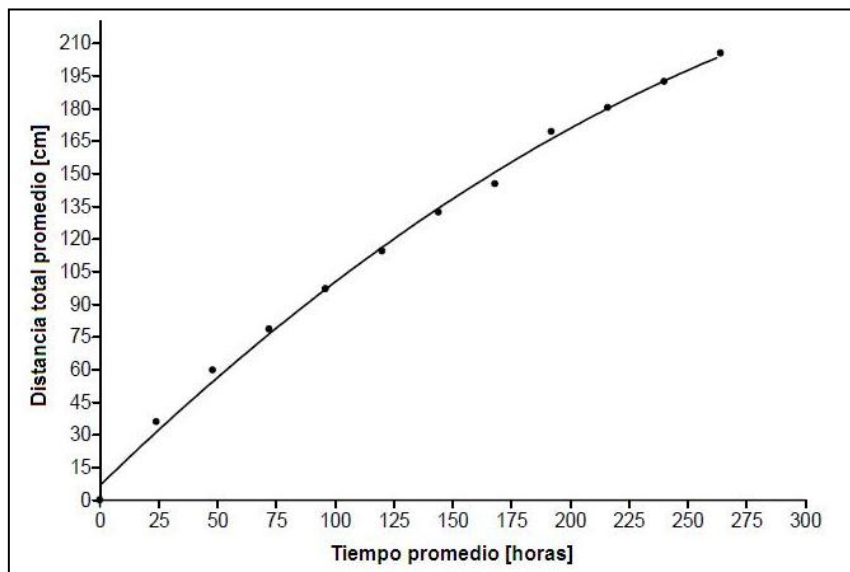


Figura 6.15 Datos promedio de distancia versus tiempo promedio para las pruebas de resistencia del EcoBot II (Ieropoulos y col., 2004)

La Figura 6.16 muestra la temperatura promedio reportada por el EcoBot II por día mientras se desplazaba hacia la fuente de luz. Las luces halógenas se colocaron a una distancia de seis metros con respecto al punto de inicio de las carreras. Debido a que el robot nunca se acercó lo suficiente a las lámparas, sólo se transmitió la temperatura ambiente. La línea continua es la curva de ajuste de la regresión no lineal para los datos medidos con puntos y las líneas punteadas son las bandas de confianza ($\pm 95\%$).

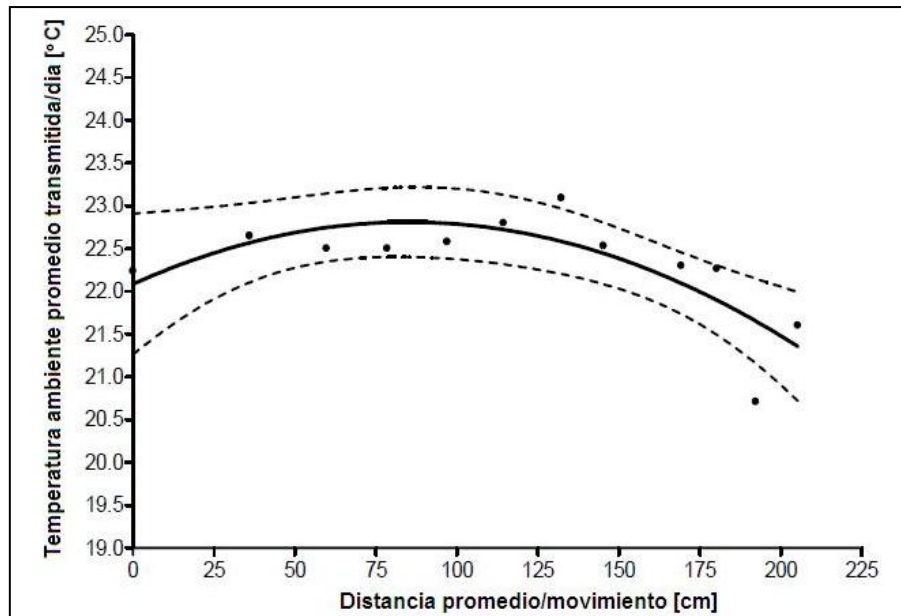


Figura 6.16 Relación entre la temperatura ambiente promedio transmitida por día y la distancia promedio en experimentos con EcoBot II (Ieropoulos y col., 2004)

6.2.3 Robot que se alimenta de materia orgánica (SlugBot)

Una aplicación de las CMB es un trabajo de Greenman y col. (2003) donde se aborda el problema de diseñar y construir un robot capaz de sostenerse por sí mismo por ciertos períodos de tiempo mediante la búsqueda de una fuente de energía natural (comida) y convertir ésta en una forma utilizable de energía para alimentarse (Greenman y col., 2003).

Para ello se deben considerar algunas cuestiones: Un robot tiene que ser capaz de moverse para buscar su respectivo alimento. Esta fuente de alimentación sólo estará disponible en ciertos momentos y lugares limitados dependiendo del clima, la hora del día, las estaciones, etc. y mucho depende de la naturaleza de los alimentos. La vegetación estática requiere una estrategia de alimentación diferente a la requerida para la caza de presas móviles. El proceso de encontrar alimento y después convertirlo y almacenarlo en una forma útil de energía se puede considerar como una especie de metabolismo artificial. En cuanto al robot, se debe prever un sistema que incorpore los elementos de un robot móvil y una unidad de conversión de energía. Éstos pueden ser combinados en un solo robot o separarse para que el robot lleve su alimento a un "digestor". Una opción es emplear el metabolismo artificial a bordo del robot (Wilkinson, 2000a). Otro sistema podría emplear una estación externa de metabolismo (digestor central) suministrado con material digerible por uno o varios robots. Sea cual sea la combinación que se emplee, se debe presupuestar de forma eficiente la energía, la eficiencia metabólica, tipo de alimento, tamaño físico del digestor, etc.

En el estudio se optó por separar físicamente el robot y el sistema digestor debido a que una unidad de fermentación es demasiado grande y pesada para ser transportada por un robot. Se eligieron a las babosas como la presa del robot por las siguientes razones:

- a) La presa debe ser lo suficientemente abundante y debe tener una densidad de energía suficiente para justificar el gasto de energía utilizado en la búsqueda, captura y transporte
- b) La presa no debe ser capaz de realizar movimientos rápidos ya que ésto requerirá que el robot consuma una cantidad de energía considerable en la captura de la presa

Las babosas se desplazan lentamente y son abundantes en la tierra agrícola del Reino Unido, especialmente las *Deroceras reticulatum* (South, 1992), esta especie representan una amenaza considerable a la vegetación y realiza un daño considerable en los cultivos. Su poder destructivo es contrarrestado por los agricultores del Reino Unido, los cuales gastan más de 20 millones de libras al año en medidas de control químico (Glen, 1994).

El robot denominado "Slugbot" está equipado con un brazo largo (Figura 6.17) con un gancho al final de este. En la "palma" del gancho se encuentra una cámara por medio del cual, el robot puede detectar la presencia de babosas en la noche. El robot puede recoger las babosas y depositarlas en su almacén. Cuando el robot necesita recargar su batería regresa a la estación para recargarla. Mientras se lleva a cabo este proceso se descargan las babosas acumuladas en el robot en un "sistema digestivo". El producto de la digestión es un biogás que se introduce en una celda de combustible, la cual produce la energía eléctrica.

6.2.3.1 La autosuficiencia en los robots

Para ser realmente autosuficiente, un agente debe mostrar estabilidad en el comportamiento y viabilidad de mercado. La estabilidad en el comportamiento implica que el agente no sucumba ante alguna deuda irrecuperable de cualquier recurso vital. Los recursos vitales son aquellos que permiten al agente llevar a cabo sus tareas de diseño y pueden incluir a la energía, tiempo, herramientas, etc. La viabilidad de mercado son variables que deben agrandar al que usa el robot (McFarland, 1999). El usuario quedará satisfecho si el agente es estable, si es capaz de realizar las tareas para las que está diseñado y que los gastos de funcionamiento sean aceptables.

Los agentes autosuficientes deben tener un grado de autonomía debido a que deben tener la libertad de decidir por sí mismos cuando recargar energía, cuando descansar, en qué momento realizar ciertas actividades, etc. (McFarland, 1993 y 1995). El grado de autonomía, por lo general equivale a la cantidad de recursos básicos que el agente tiene que manejar. Los agentes autosuficientes son egoístas en el sentido de que manejan sus propios recursos independientemente de otros agentes que puedan operar en el ecosistema.

Hay dos recursos básicos que deben ser proporcionados por el entorno del robot si éste es autosuficiente y económicamente viable. Se trata de la variable energética (E) que el robot debe ser capaz de obtener de alguna manera, y la variable M, que puede ser el resultado de realizar trabajo. M puede estar localizado en la memoria para guardar la cantidad de trabajo realizado, los puntos de mérito por el trabajo realizado, puede ser dinero o la viabilidad de mercado. Cada vez que el robot

tiene una cierta cantidad de trabajo (cumple la tarea de utilidad para el propietario) gana una unidad de M .

Cuando consideramos un robot autosuficiente, es evidente que debe realizar un ciclo básico de actividades para mantener la viabilidad. El robot pasa por un ciclo: trabajo - encontrar combustible - recargar energía. Cuando trabaja, el robot gana M y pierde E . En algún momento el robot debe interrumpir el trabajo y proceder a buscar combustible, lo que también conduce a una reducción de E , pero ¿qué pasa con M ? La respuesta a esta pregunta depende de la actitud del dueño del robot. M representa la utilidad del trabajo del robot desde el punto de vista del dueño del robot. Hay tres posibilidades básicas, como se indica en la Figura 6.18. Si el propietario está principalmente interesado en robots que gasten tanto tiempo como sea posible haciendo trabajo útil, independientemente de los gastos de energía, entonces el propietario no ganará utilidad del tiempo que se gastó no trabajando. Ésto significa que el robot debe estar diseñado de manera que M disminuya durante el tiempo improductivo, como se muestra en la Figura 6.18a.



Figura 6.17 Robot que se alimenta de babosas (Slugbot) (Greenman y col., 2003)

Si el dueño está preocupado por el gasto de energía en actividades que no son productivas, entonces M debe declinar durante ese período del ciclo básico, como se muestra en la Figura 6.18b. Si por el contrario, el propietario se ocupa de reducir al mínimo el gasto de energía, entonces tiene sentido para el robot pagar por el combustible. En la Figura 6.18c M se obtiene durante el trabajo y se gasta durante la recarga. En otras palabras, M es como el dinero que gana el robot por el trabajo realizado y que gasta para obtener combustible.

La estabilidad del ciclo básico depende de dos tipos principales de factores, la naturaleza del medio ambiente y las decisiones tomadas por el robot. Así, el sistema puede volverse inestable debido a que

el ambiente puede resultar demasiado difícil de afrontar. Un equivalente animal podría ser un entorno en el que la comida es muy escasa. El sistema también podría ser inestable simplemente porque el robot tomó malas decisiones, como ignorar una posibilidad de recarga de energía (cuando se acerca de la estación de recarga). Por lo tanto la estabilidad del comportamiento y la toma de decisiones están estrechamente relacionadas.

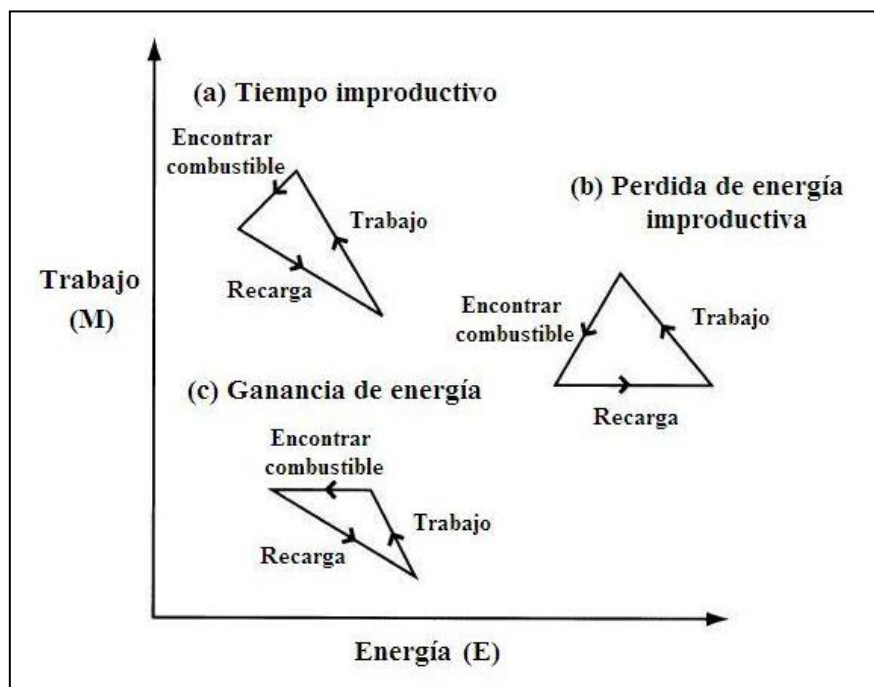


Figura 6.18 Ciclos básicos de operación de un robot (Greenman y col., 2003)

6.2.3.2 El ciclo básico del SlugBot

El ciclo básico del SlugBot se compone de las siguientes actividades: Recargar, buscar, examinar, capturar, regresar a casa. Ahora se tiene que considerar qué tipo de ciclo básico es el adecuado. De los tres tipos que se ilustran en la Figura 6.18a no es relevante, porque el gasto de energía del SlugBot es importante y si el SlugBot no puede cumplir con sus necesidades de energía, la energía adicional tendrá que ser suministrada y esto será costoso e inconveniente.

En el caso (b), en donde el dueño se preocupa solamente por el gasto de energía en actividades que no son productivas, tenemos que recordar que el robot puede descansar durante los tiempos improductivos. Durante el descanso, su gasto de energía será muy reducido.

El dueño del SlugBot debe desear reducir al mínimo, el gasto de energía en todos los ámbitos y por lo tanto el ciclo tipo (c) es el más apropiado. Como se observa en la Figura 6.18c, durante la recarga el robot tiene una ganancia neta de energía E. En todas las demás actividades tiene una pérdida neta de energía. Durante la recarga el robot tiene una pérdida neta de M, mientras que durante la búsqueda, exploración y captura se considera como trabajo, por lo que, tiene una ganancia en M. Durante su estancia en la base no gana ni pierde M. Una vez que el robot está en la estación de

recarga puede tomar energía a cambio de ciertas unidades de M . En otras palabras, M es como el dinero.

Una vez que el SlugBot inicia la búsqueda de alimento, su éxito depende en gran medida de la disponibilidad de las babosas en el lugar donde se lleve a cabo la captura. La alta disponibilidad dará lugar a un ingreso alto (en términos de M) para el robot, siempre que el robot capture de manera eficiente. Obviamente, el robot debe dejar de alimentarse si, en promedio, el gasto energético es mayor que la energía adquirida. Ésto puede ocurrir si la disponibilidad de babosas es muy baja o si la energía consumida por unidad de tiempo es muy alta debido al mal tiempo o terreno accidentado. Si el robot decide dejar de buscar alimento, entonces se debe tomar una de las dos opciones siguientes: (i) Volver a casa o (ii) Descansar. El primero incluirá excesivos gastos de energía dependiendo de la distancia a la estación, mientras que el segundo implica un gasto bajo de energía. Siempre que el robot permanezca inmóvil sólo consumirá energía suficiente para mantener a sus sensores en funcionamiento, por lo que se gasta muy poca energía. La desventaja del descanso es que el costo de ir a casa todavía tiene que ser pagado en el futuro, porque con el tiempo, la energía abordo se agotará.

Una vez esbozado el ciclo básico del SlugBot hay que considerar otras desventajas. Es evidente que el robot no debe gastar demasiado tiempo y energía en el trabajo o puede ser incapaz de encontrar la estación antes de que se quede sin combustible. El robot debe decidir cuándo dejar de trabajar y empezar a buscar la estación, si lo hace demasiado pronto no va a trabajar con la eficiencia máxima y si lo deja demasiado tarde puede quedarse sin combustible. Argumentos similares se aplican a las decisiones de dejar de recargar y comenzar a trabajar o parar de capturar y tomar un descanso.

6.2.3.3 Accesibilidad de las babosas

Hay una velocidad máxima del número de babosas que puede capturar el SlugBot. Una vez que una babosa es detectada, el robot debe abrir su pinza, recoger la babosa, retraer su brazo, depositarla en el contenedor, extender su brazo y reiniciar la rutina de búsqueda. Incluso cuando las babosas son muy abundantes, el robot no puede completar este ciclo en menos de 10 s.

Las *D. reticulatum* varían en tamaño desde unos pocos miligramos hasta 700 mg y es evidente que no vale la pena para el SlugBot capturar las pequeñas. La pregunta sobre el tamaño de babosas que sería rentable reunir es una cuestión para futuras investigaciones. Por el momento, las babosas de más de 500 mg son de interés. Si la tasa de captura máxima posible es una babosa cada 10 s, entonces habrá una tasa máxima correspondiente a la ingesta energética. Ésto dependerá del valor energético de cada babosa en el robot y éste, a su vez, dependerá de las pérdidas de energía producidas por la búsqueda de las babosas y en la eficiencia de conversión de las babosas en energía utilizable.

6.2.3.4 Aspectos cuantitativos

El ciclo básico, independientemente de la definición, consiste en el trabajo, encontrar la estación y recargar. Ahora se puede definir otro ciclo que considere el tiempo desde el final de una recarga de energía hasta completar otra. Una recarga implica una cierta cantidad de tiempo en la estación de reabastecimiento de combustible, una cierta cantidad de tiempo dedicado al trabajo y una cierta

cantidad de tiempo en encontrar la estación de nuevo. Para el SlugBot, este ciclo durará probablemente 16 h. La batería totalmente cargada permite cerca de 3 h de tiempo de búsqueda de alimento y se necesitara alrededor de 12 horas para recargar la batería. Sin embargo, la disponibilidad de babosas varía en un ciclo de 24 h, por lo que el SlugBot tendrá que llenar las nueve horas extras descansando ya sea en la estación de recarga o en el campo.

Se estima que el robot consumirá 45 J/h cuando esté descansando. El robot permanecerá inmóvil con todos los mecanismos que consuman electricidad apagados a excepción de su reloj interno. Algunos sensores se encenderán cada 15 minutos para que el robot pueda monitorear periódicamente su entorno. Entre estos sensores se encuentran los de temperatura, humedad y los receptores de luz, que dan una indicación de la disponibilidad de babosas.

Mientras realice las demás actividades, el robot se consumirá alrededor de 5,460 J/h. El SlugBot es capaz de escanear un área de 1.86 m de diámetro de suelo (se pueden encontrar aproximadamente 10 babosas/m²) mientras permanece inmóvil en la base (South, 1992; Glover, 1998).

Se estima a partir de pruebas de laboratorio, que el SlugBot consumirá 1,100 s para escanear el área y 13 s para pasar a la próxima área. En promedio, el robot debe ser capaz de capturar al menos 1,048 babosas en 3 h, gastando 390 kJ. Puesto que la capacidad de la batería es de 432 kJ, sobran 32 kJ para utilizarlos en el regreso a casa. Cada babosa capturada tiene un peso de por lo menos 500 mg y un valor de 1.5 kJ brutos (South, 1992). Esta cifra se obtiene con 75 mg de biomasa utilizable por cada babosa ya que el 85% de su masa es agua.

Obviamente, la cantidad de energía gastada en regresar a la estación de recarga depende de lo lejos que el robot se encuentre cuando decida volver a casa. Las pruebas de laboratorio indican que el robot recorrerá 1.8 m en 13 s con un consumo de 1 kJ. Cada área es de 1.8 m de diámetro, por lo que si el robot cubre 10 áreas en 3 h de búsqueda, la distancia máxima al hogar será de 18.6 m, el regreso tomará algo más de 2 minutos y consumirá 10.3 kJ. Así que el gasto total de energía por día (suponiendo un viaje de 3 horas de búsqueda) será de aproximadamente 400 kJ con una ganancia de energía bruta de 1,572 kJ. Ésto significa que la eficiencia del proceso de conversión de la biomasa de la babosa en electricidad utilizable debe estar en la región del 25%.

6.2.3.5 Generación de combustible

El SlugBot funciona con corriente eléctrica. Atrapa babosas y éstas tienen que ser convertidas en energía eléctrica de alguna manera. Una posibilidad es que se deben secar las babosas y luego quemarlas para producir energía en forma de calor. El problema aquí es que la conversión de calor en electricidad es un proceso ineficiente. Una alternativa es digerir las babosas y fermentar el producto digestivo. Esto produce una salida de energía en forma de combustibles químicos o gases.

6.2.3.5.1 Energía teórica de la materia orgánica

La materia orgánica se compone de materiales poliméricos (proteínas, lípidos y polisacáridos). Si están lo suficientemente secos pueden ser quemados para producir energía en forma de calor. La cantidad total de energía que contienen (suponiendo la oxidación completa del oxígeno del aire) sería de entre 4.1 y 9.3 kcal/g (17 a 39 kJ/g), dependiendo de su composición exacta. Los polisacáridos (la

celulosa, almidón, pectina, etc.) se construyen por medio de repetir unidades de hexosa (azúcar) ($C_6H_{12}O_6$) y producen menos energía que los lípidos (su fórmula empírica se aproxima a $C_{18}H_{36}O_2$), los cuales producen valores más altos de calor. El valor calórico de las proteínas es intermedio y contienen cerca de 5 a 6 kcal/g (21 a 25 kJ/g). Cantidades similares de energía también se pueden extraer a través del metabolismo de las células vivas. Estimaciones de Wilkinson (2000b) sugieren que el follaje contiene aproximadamente el 4% de hidratos de carbono en peso, lo que equivale a 0.82 kJ/ml para la materia licuada (a 4% peso/volumen). Según Wilkinson (2000b) si la energía de los alimentos se puede convertir en una forma eléctrica, daría 5 kWh/kg para la azúcar hexosa pura ó 0.2 kWh/l de materia vegetal licuada (a 4% peso/volumen). Wilkinson (2000b) comenta que “Este resultado es sorprendentemente similar a la densidad de energía de una batería de ion-litio, con la diferencia considerable que la energía química en los alimentos no está fácilmente disponible como electricidad”.

La degradación anaerobia puede convertir ciertas materias primas en una mezcla de compuestos altamente reducidos, tales como combustibles químicos (acetato, butirato, etanol) o gases (hidrógeno, metano) que pueden ser convertidos en energía eléctrica por otros medios tecnológicos. Las siguientes estrategias están disponibles:

1. Las moléculas volátiles de combustibles (metano e hidrógeno) se queman para producir energía térmica que a su vez puede alimentar un generador convencional. En esencia, lo que un digestor de aguas residuales hace. Este proceso es muy ineficiente a pequeña escala.
2. La combustión catalítica de combustibles químicos se puede realizar con celdas de combustible convencionales.
3. La digestión de sustratos para producir energía microbiana de reducción, que puede ser extraída por medio de una celda de combustible microbiana.
4. Se puede emplear un dispositivo que combine las estrategias anteriores, sobre todo las últimas dos.

6.2.3.5.2 Factores físicos que se deben considerar en la digestión artificial

Cuando aumenta el tamaño, la proporción entre el área y volumen o peso disminuye. Este simple hecho determina los límites de tamaño para los robots bio-autónomos. Para el tamaño pequeño, la transferencia de masa-energía se facilita, pero la pérdida de calor y los rápidos cambios de las condiciones (por ejemplo, la difusión de aire en lo que debería ser un proceso anaerobio) puede convertirse en un problema. A gran escala, el robot es más pesado y será mayor la demanda de energía y combustible. Un digestor grande es más difícil de mezclar y puede ser el mismo el contribuyente mayor del peso total del robot. La homeostasis del medio ambiente (temperatura y anaerobiosis) es más fácil de mantener a gran escala, pero la eliminación selectiva de los combustibles mediante tecnología de membrana (electrodifusión) que depende de la superficie puede llegar a ser problemática.

Para un sistema abierto, la tasa de dilución (D) se obtiene dividiendo la tasa de flujo (f) por el volumen (v). Si la tasa de dilución es mayor que la tasa de crecimiento de los principales grupos de

organismos, entonces se producirá el lavado del cultivo con la consiguiente desaceleración de la tasa de formación de producto. Si la tasa de dilución es demasiado lenta, la tasa de absorción de energía para el robot será demasiado baja para soportar la demanda. Por lo general, la tasa de dilución para los mamíferos es del orden de 0.01 a 0.1/h equivalente a un tiempo medio de generación de 60 a 6 h. La mayoría de los digestores parecen funcionar bastante bien a temperaturas de 35 °C a un pH neutro (7.0). Ésto se acerca a las condiciones que ocurren en el intestino grueso de los mamíferos. El uso de altas temperaturas por parte de algunos microorganismos (especies termófilas) podría tener importantes beneficios en lo que respecta a acelerar el ritmo del proceso. Por ejemplo, los microorganismos termófilos que funcionan a una temperatura de alrededor de 75 °C podrían tener tasas de transformación de más de 10 veces mayor que los microorganismos que operan a 35 °C. Una especie termófila metanogénica (*Methanopyrus kandleri*) aislada de las fuentes hidrotermales marinas pueden crecer a temperaturas por encima del punto de ebullición del agua.

En un digestor artificial, las etapas de la digestión se pueden separar en diferentes unidades dentro del sistema. En el futuro se podrá construir un robot que tenga un sistema digestivo tubular dividido en varias unidades y podrán llevar a cabo diferentes funciones dependiendo de las necesidades del sistema. Las unidades se podrán inocular con diferentes comunidades de microflora, las cuales se establecerán como biopelículas dentro de los envases. Si se recolecta material celulósico se podrá utilizar un dispositivo análogo al rumen que contendrá especies capaces de digerir y fermentar el material en ácidos. Otros dispositivos podrán contener diferentes actividades tales como la proteolítica, amilolítica o pectinolítica para obtener sustratos ricos en proteínas, almidón o pectina respectivamente. Otro dispositivo podría asegurar las condiciones para que la microflora y el ambiente lleven a cabo la acetogénesis mientras que un dispositivo final contendría metanógenos, los cuales podrán ser controlados y optimizados (pH, temperatura) con el fin de producir eficientemente metano. Para cualquier tipo de flujo determinado a través de todo el sistema, los tamaños de los dispositivos podrán predecir el tiempo promedio de residencia de los contenidos. La mezcla y el flujo podrían mantenerse por una bomba. Proveer la captación selectiva de ácidos o el cambio de fase de gases también serán necesarios.

Un sistema futuro de monitoreo o control del proceso se podrá obtener mediante la medición y el control de la temperatura, el pH y las concentraciones de productos importantes (ácidos grasos y metano). El monitoreo utilizará sensores y biosensores acoplados a un microprocesador, que mediante pequeñas bombas podrían liberar los reactivos necesarios para neutralizar el pH o corregir las condiciones físico-químicas.

6.2.3.5.3 Extracción de energía

Una vez en la estación de carga, el robot transferirá su carga de babosas a un fermentador. Aquí las babosas se fermentarán anaerobicamente para producir biogás, que es una mezcla compuesta principalmente de dióxido de carbono y metano. El biogás se pasará a través de una celda de combustible de óxido sólido tubular especialmente desarrollada para producir electricidad. Las modernas celdas de combustible de este tipo pueden producir electricidad a partir de biogás que contiene metano en concentraciones de 20% o menos (Staniforth y Kendall, 1998). El robot

Gastrobot desarrollado en la Universidad del Sur de la Florida utiliza celdas de combustible microbianas para producir electricidad a partir de una solución de glucosa pura (Wilkinson, 1999). A diferencia del sistema que se propone para el SlugBot, su ánodo es colocado directamente en la fuente de alimentos orgánicos. Se afirma que con celdas de combustible de este tipo se pueden esperar eficiencias de hasta el 80% en la conversión de alimentos disponibles en electricidad utilizable (Wilkinson, 1999). Sin embargo, en este momento, la membrana de intercambio en el diseño del SlugBot se atascaría por las fuentes de alimentos tales como las babosas.

El propósito de una celda de combustible es convertir la energía química de una molécula orgánica en electrones. En las células biológicas, ésto se hace a través de una membrana lípida, utilizando soluciones acuosas y catalizadores enzimáticos. El equivalente en el hombre es la celda de combustible de hidrógeno, en la que la membrana preferida es un polímero perfluorado con ácido sulfónico con electrodos de carbono catalizados con platino y es donde se separa el hidrógeno y el oxígeno en el gas (Buchi, 1999). Esta membrana no funciona con eficiencia con combustibles de hidrocarburos, por lo que en estos casos se prefieren las membranas de cerámica, permitiendo que el combustible reaccione a temperaturas altas.

En la Figura 6.19 se muestra una típica celda de combustible de alta temperatura basada en una membrana de óxido de circonio. Esta celda consiste en un tubo cerámico blanco con una pared delgada que actúa como un conductor de iones de oxígeno (Kendall y Prica, 1994). En el interior se encuentra el electrodo que generalmente es una mezcla de partículas de circonio y níquel, con un alambre de níquel para recolectar los electrones. En el exterior de la celda se encuentra el electrodo de oxígeno con un alambre envuelto alrededor de él para el suministro de electrones. El combustible fluye a través del tubo mientras que el aire circula en el exterior. Ésto ofrece un potencial de alrededor de 1.1 V con una potencia de salida de 0.2 W/cm² a 800 °C.

El principio de funcionamiento de este dispositivo es electroquímico. El oxígeno es reducido a iones O²⁻ en el cátodo y los iones son transportados a través de la membrana para liberar electrones en el ánodo, donde el combustible se oxida. Los electrones circulan por un circuito externo. Un dispositivo de 1 kWe podría operar al 50% de eficiencia con un bajo costo de mantenimiento. El calor producido se utiliza para mantener la temperatura del dispositivo y también para procesar el combustible crudo en hidrocarburos más adecuados.

6.2.3.6 Construcción del SlugBot

El robot tendrá que realizar sus actividades en el barro, humedad, lluvia y viento. La ingeniería debe hacer énfasis en la eficiencia energética, fiabilidad y robustez. El robot utiliza un sistema de cuatro ruedas con tracción para moverse por los campos de barro y es este sistema el que tiene el consumo más grande de energía. Con el fin de minimizar la deformación del suelo y ahorrar energía se utilizaron neumáticos de globo. Un motor maneja las ruedas izquierdas a través de una correa dentada y un sistema idéntico se aplicó a las ruedas derechas.

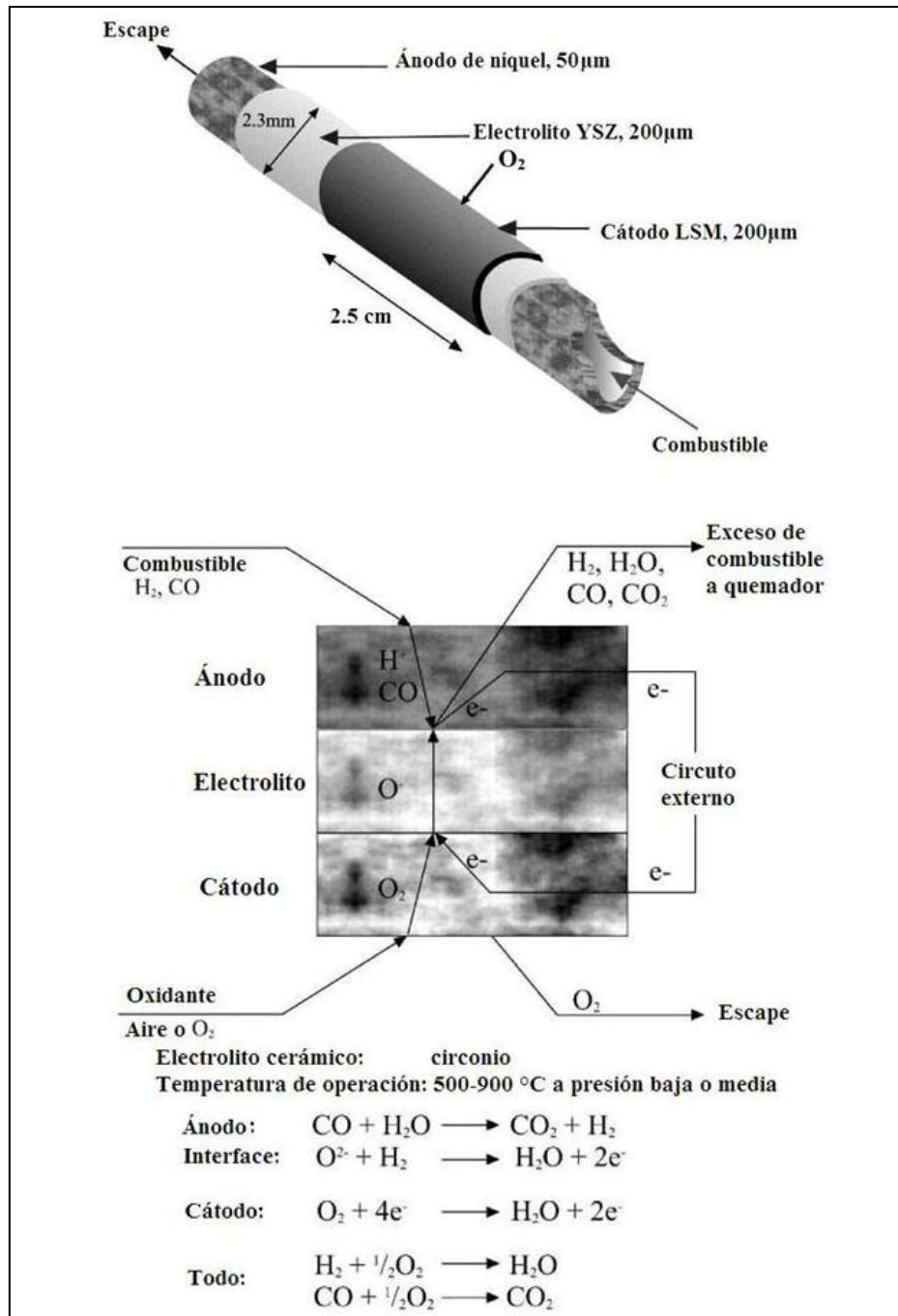


Figura 6.19 Celda de combustible de alta temperatura (Greenman y col., 2003)

Para reducir el consumo de energía, el escaneo y la captura de las babosas se lleva a cabo por un brazo ligero que puede buscarlas en un radio de 1.8 m. El final del brazo contiene una cámara para la detección, una pinza y transductores de sonar que exploran el terreno 360° alrededor del robot. Tan pronto como una babosa es detectada, se recoge y se deposita en un compartimento situado en el chasis del robot. El escaneo se reanuda a partir de la ubicación donde la babosa fue recogida. Una vez que el terreno circundante ha sido suficientemente analizado, el robot se mueve hacia un nuevo punto de inicio y la rutina de análisis se reanuda una vez más.

El diseño del brazo involucra un problema entre su longitud y el consumo de energía, por un lado, entre más largo sea el brazo mayor es el área que se puede escanear sin mover el robot, pero un brazo más largo es más pesado y se requiere más energía para moverlo. Se calculó que una longitud de brazo de 1.5 a 2 m produciría el mayor ahorro de energía con la máxima área de escaneo, por esta razón se optó por un brazo de 1.8 m de largo. Para cumplir con los criterios de ligereza y rigidez, el brazo se armó con dos secciones de tubo de fibra de carbono conectados por una junta articulada. Las demás partes que conforman el brazo se fabricaron con aluminio. Los motores de control del brazo se colocaron en su base para reducir el peso y la inercia del brazo. El movimiento del brazo se logra a través de una correa dentada colocada dentro del primer tubo. Las babosas están mayormente disponibles en determinados momentos del día, cerca de 2 horas después de la puesta del sol y cerca de 2 horas antes del amanecer. Esta ventana de tiempo limita la tasa de captura de babosas, por lo que se debe aprovechar de manera eficiente este tiempo. Como se muestra en la Figura 6.17, el brazo está fijado a una plataforma giratoria que le permite girar completamente alrededor de la base del robot. Las baterías se montaron en la parte posterior de la unidad de giro para actuar como un contrapeso para el brazo y la energía es transferida por la estructura principal a través de un par de cables. El chasis es lo suficientemente grande como para que las ruedas se monten en las posiciones que aseguran la estabilidad del robot en todas las extensiones posibles del brazo.

Se realizaron varios experimentos y diseños para lograr la construcción de una pinza ligera, la cual es capaz de recoger y liberar babosas húmedas y secas independientemente de su tamaño y su orientación en el suelo. Se encontró que las babosas secas son muy pegajosas, lo que hace que sean difíciles de liberar dentro del compartimento, mientras que las babosas húmedas son resbaladizas, lo cual hace difícil su recolección. El diseño de la pinza se construyó en torno a un sistema de tres dedos, cada uno con una separación de 120° con respecto a los demás, lo que permite que una babosa de menos de 75 mm de longitud se recolecte independientemente de su orientación. Cada uno de los dedos tiene una placa, lo que permite que al cerrarse estos dedos sea posible recoger a las babosas resbaladizas. También, cada dedo tiene una hoja de limpieza para garantizar que las babosas no tengan el tiempo suficiente para adherirse. La pinza se muestra en la Figura 6.20.

6.2.4 Branquias artificiales para robots

La autonomía energética en los robots es un área que gradualmente está recibiendo más atención. Se pueden utilizar diferentes estrategias para lograr la eficiencia energética, principalmente en función de la aplicación para la que se esté diseñando. Una de ellas es el empleo de la tecnología de las CMB, que permite la extracción de energía a partir de alimentos (plantas o insectos) a través de la degradación microbiana (Ieropoulos y col., 2005a y 2005b; Melhuish y col., 2006). Antes ya se mencionaron robots que emplean tecnología CMB para generar energía. Hasta la fecha, estos robots se han utilizado de forma terrestre y han utilizado oxígeno atmosférico en el cátodo (Ieropoulos y col., 2005a y 2005b; Melhuish y col., 2006).

En este trabajo se analizó la posibilidad de utilizar la tecnología CMB bajo el agua. De esta manera, se podría contemplar la posibilidad de utilizar la materia orgánica como "combustible" para las bacterias y a la vez emplear el oxígeno del agua en un cátodo acuoso. En cierto modo, este cátodo podría considerarse como una branquia artificial.

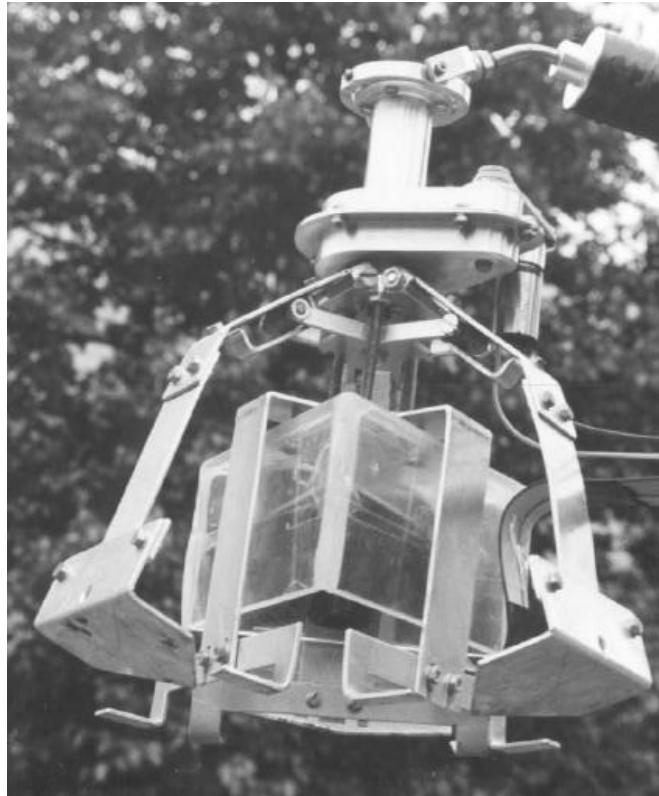


Figura 6.20 Pinza del Slugbot (Greenman y col., 2003)

En general, hay dos tipos de cátodos de uso común para las CMB, un sistema de cátodo químico basado en el ferrocianuro y el cátodo de difusión de gas, sistema que se basa en el oxígeno. Experimentos y trabajos anteriores han demostrado que el cátodo de difusión de gas puede emplear agua oxigenada como la que se puede encontrar en ambientes fluviales o marinos. A esta media-celda catódica se le nombra como “cátodo de oxígeno acuoso” para distinguirlo del “cátodo de oxígeno atmosférico” que se utilizó en los robots EcoBot I y II (Ieropoulos y col., 2005 a y b; Melhuish y col., 2006).

6.2.4.1 Cátodo de O₂

En los experimentos de laboratorio se han empleado varios compuestos sintéticos en el compartimiento del ánodo y el cátodo para investigar la mejora en la producción de energía en los sistemas de las CMB. Una de las mejoras es la adición de un agente altamente oxidante en el compartimiento del cátodo llamado ferrocianuro. Esta sustancia química ofrece excelentes características de corto plazo en el consumo de los electrones generados en el ánodo y en mantener el sistema de ciclo redox equilibrado. Sin embargo, este químico se consume durante el proceso. En términos de autonomía robótica, el empleo de ferrocianuro sería un factor limitante ya que se requiere el reemplazo frecuente del mismo para mantener la viabilidad del sistema.

El cátodo de difusión de O₂ ha sido empleado por muchos investigadores en el campo de la investigación en las CMB como una alternativa a los sistemas basados en químicos (Kang y col., 2003; Kim y col., 2003b; Chang y col., 2004; Liu y col., 2004; Liu y Logan, 2004; Min y Logan,

2004; Moon y col., 2004; Oh y col., 2004; Logan y col., 2005b). Ésto se debe principalmente a las propiedades redox que posee el O₂, ya que es una de las moléculas más electropositivas de la naturaleza y es el aceptor de electrones final para muchas reacciones aerobias. Una vez ensamblado como cátodo en la CMB, debido a las tasas sub-óptimas de difusión de gas en el electrodo, el rendimiento de este sistema es a corto plazo inferior a los sistemas de cátodos químicos. Sin embargo, es un sistema que no requiere de mantenimiento y puede, en teoría, seguir funcionando durante períodos prolongados. Por lo que resulta potencialmente adecuado para los robots autónomos.

6.2.4.2 Diseños de CMB

Se emplearon cuatro CMB en total para la primera parte de la investigación de Melhuish y colaboradores (2006). Dos de éstas tenían el cátodo abierto al aire como se muestra en la Figura 6.21 y las dos restantes eran exactamente del mismo tipo y tamaño, pero con una cámara cerrada para el cátodo como se muestra en la Figura 6.22. Estas cuatro unidades se consideraron apropiadas para la investigación de los distintos posibles escenarios de operación debajo o cerca del agua. Con el uso de las CMB de cámara cerrada con puertos de entrada y salida del agua sería posible examinar las propiedades de los cátodos totalmente sumergidos con agua estancada y en movimiento. Por otra parte, con el cátodo abierto al aire se pueden observar los efectos de la evaporación cuando el electrodo debe ser periódicamente humedecido.

El volumen de la cámara del ánodo, que es la misma para la cámara del cátodo en el caso de las CMB de cátodo cerrado fue de 25ml. En las cuatro CMB, los cultivos bacterianos empleados como biocatalizadores fueron del tipo que se encuentran en los lodos anaerobios, los cuales se alimentaron con 5 mM de acetato.

Para el ánodo y el cátodo, se emplearon electrodos de fibra de carbono con una superficie de 270 cm². En el caso de los cátodos abiertos al aire, se utilizó papel filtro de la misma superficie en el interior de las fibras de carbono para mejorar la retención de humedad. Una carga resistiva de 2.7 kΩ estaba conectada a través de los terminales de las cuatro CMB. También utilizaron membranas de intercambio protónico (MIP).

Las cuatro CMB fueron colocadas bajo un flujo constante de agua sobre los cátodos abiertos al aire y sobre los cátodos cerrados. Se utilizó agua a la misma temperatura para mantener húmedo a uno de los cátodos abiertos al aire, el cual fue denotado como humedecido-periódicamente. Lo anterior se realizó para comparar los efectos de un flujo continuo de agua sobre un cátodo abierto contra una pequeña cantidad de agua estacionaria suficiente para mantener el electrodo húmedo. La Figura 6.22 muestra las configuraciones de las CMB utilizadas.

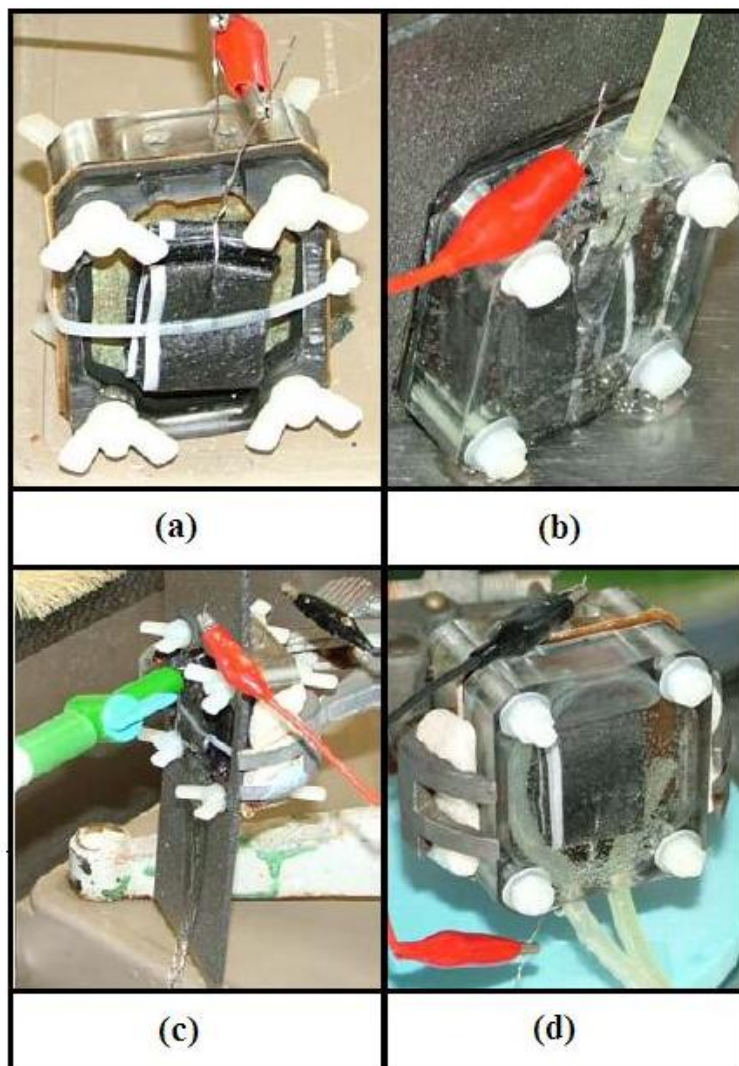
Los cultivos de lodos de la CMB que se adaptaron al medio ambiente por un período de 3 a 4 semanas se denominaron como cultivos maduros y tendieron a producir niveles más altos de energía como resultado de la adaptación y el adecuado enriquecimiento.



(a)

(b)

Figura 6.21. Dos tipos de CMB: a) CMB con cátodo expuesto al aire, b) CMB con cámara catódica cerrada (Melhuish y col., 2006)



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 6.22 Cuatro tipos de CMB: a) Periódicamente humedecido (p-h), b) Flujo continuo en cámara cerrada (entra desde arriba) (f-c-a), c) Flujo continuo en cámara cerrada (f-c), d) Flujo continuo en cámara cerrada (flujo invertido) (f-c-i) (Melhuish y col., 2006)

6.2.4.3 Resultados del experimento

El primer parámetro investigado fue el voltaje de circuito abierto (sin carga) de cada una de las CMB. Ésto establecería la salida máxima de voltaje que se podría lograr con tales unidades operando en un río. El voltaje final de circuito abierto producido por las CMB se logró en un período de aproximadamente 2 horas y media de flujo continuo de agua. Como se puede observar en la Figura 6.23, el voltaje más alto fue registrado por la CMB de cámara cerrada (Figura 6.22b), que fue de aproximadamente 1V.

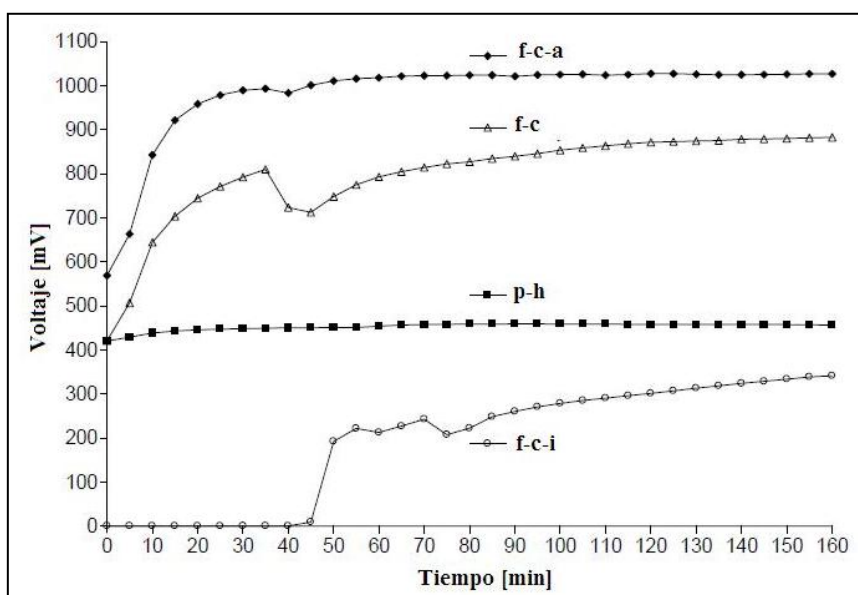


Figura 6.23 Voltaje de circuito abierto (Melhuish y col., 2006)

6.2.4.4 Efectos de la hidratación en los cátodos

Después de conectar una carga resistiva de $2.7\text{k}\Omega$, la potencia de salida se monitoreó bajo condiciones de hidratación (ON) y sin hidratación (OFF). La Figura 6.24 muestra la corriente de salida (I_s) para las cuatro CMB.

La I_s media de las CMB de cátodo cerrado durante los ciclos de hidratación fue de $40\mu\text{A}$. Para la CMB de cátodo abierto periódicamente humedecido fue de $25\mu\text{A}$. Para la CMB de cátodo abierto con hidratación continua fue de $15\mu\text{A}$. Los valores de corriente media (I_{med}), potencia media (P_{med}) junto con los valores de resistencia interna (R_{int}) de cada uno de CMB, se muestran en la Tabla 6.1.

La diferencia máxima entre las salidas de corriente de las 4 CMB fue inferior al 20%, siendo la mínima de 5%. En cuanto a la salida de potencia media, la diferencia entre la máxima ($4.65\mu\text{W}$) y la mínima ($2.54\mu\text{W}$) fue de 45%. La R_{int} mas pequeña ($4.90\text{k}\Omega$) se registró en la f-c-a (Figura 6.22b), la cual tiene una diferencia del 15% con respecto al siguiente valor de R_{int} ($5.74\text{k}\Omega$) utilizada en la f-c y una diferencia del 40% con respecto a la CMB periódicamente-humedecida ($8.26\text{k}\Omega$).

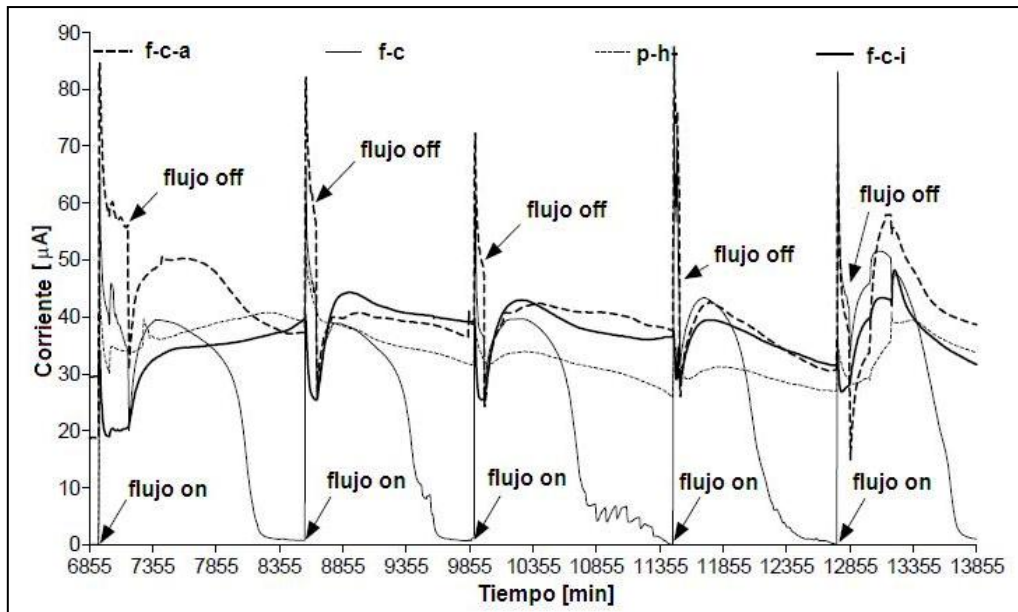


Figura 6.24 Corriente de salida de las cuatro CMB en diferentes condiciones de hidratación (Melhuish y col., 2006)

Tabla 6.1 Valores medios de salida de corriente y potencia de la CMB, junto con la resistencia interna calculada (Melhuish y col., 2006)

Tipo de CMB	I_{inicial} μA	I_{med} μA	P_{med} μW	R_{int} $\text{k}\Omega$
p-h	20.51	30.07	2.54	8.26
f-c-a	71.15	39.02	4.65	4.90
f-c	48.94	38.67	4.44	5.74
f-c-i	9.00	34.89	3.53	6.74

6.2.4.5 Efecto de la temperatura en el cátodo

La temperatura de la corriente de agua la controlaron de forma manual para establecer un perfil de respuesta en las 4 configuraciones. La temperatura del agua para estos experimentos osciló entre los 13°C y los 51°C. La Figura 6.25 muestra el efecto de la temperatura en las diferentes configuraciones de cátodos.

6.2.4.6 Efectos del flujo de agua

Se investigó el efecto del caudal de agua en el cátodo para establecer una relación entre este parámetro y la corriente de salida de las CMB. Ésto se llevó a cabo de manera cualitativa con aproximaciones de aumento o disminución en el caudal ya que un flujo preciso y cuantificable de agua no se puede establecer sin el empleo de una bomba. El flujo de agua fue controlado manualmente desde el grifo de agua con un indicador (jeringa de 20 ml), para indicar los aumentos y

disminuciones en el flujo, en términos del nivel de agua en la jeringa. La Figura 6.26 muestra las respuestas de las 4 CMB cuando el flujo de agua fue “duplicado”.

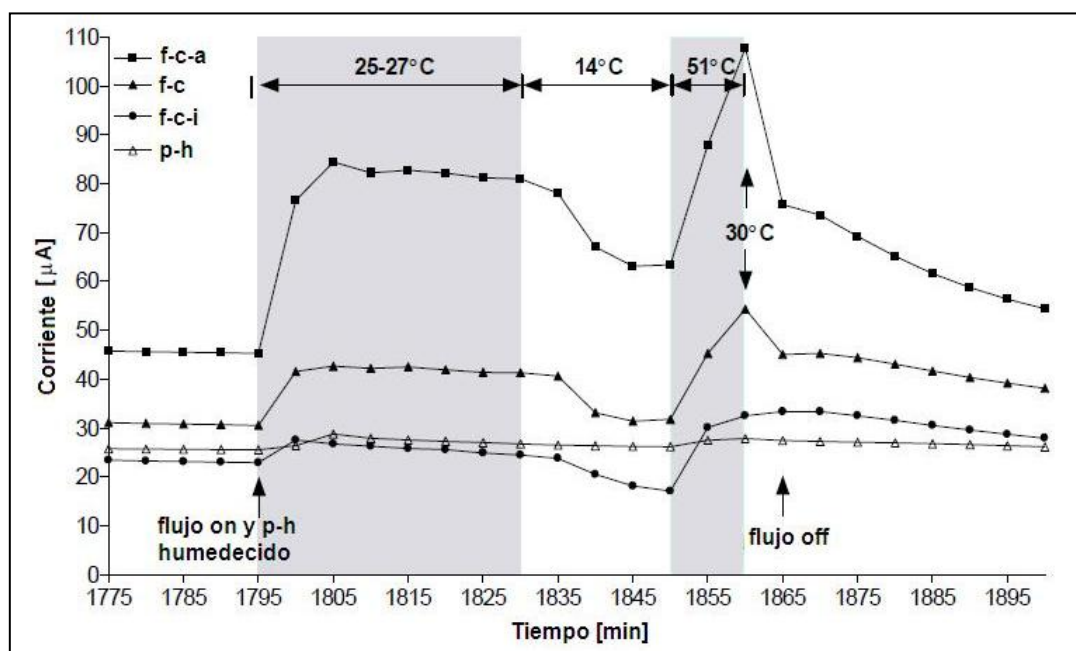


Figura 6.25 Efecto de la temperatura en las diferentes configuraciones de cátodos (Melhuish y col., 2006)

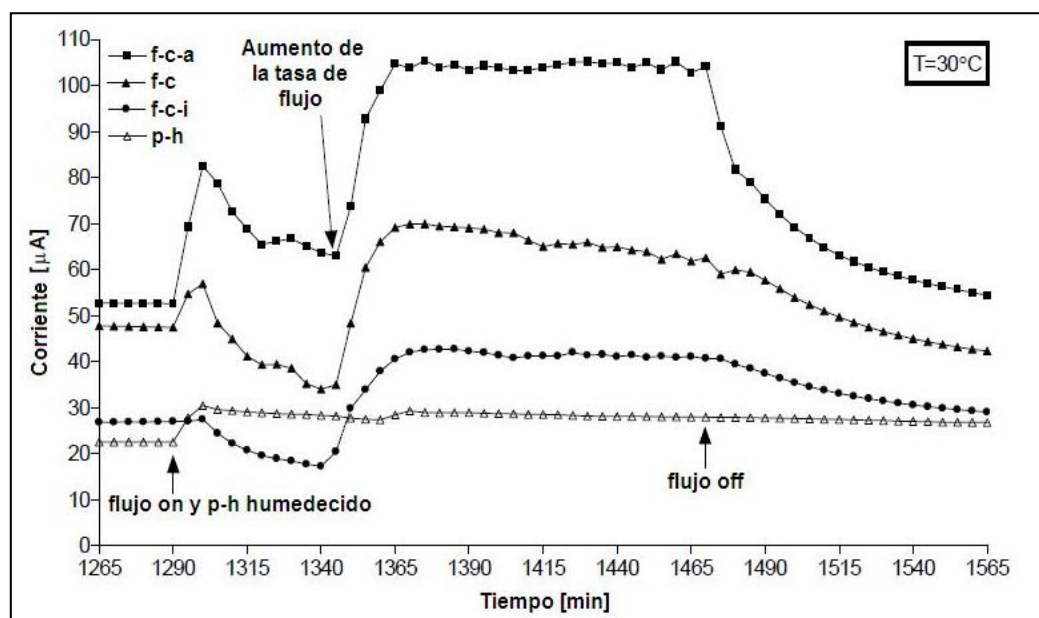


Figura 6.26 Respuesta de I_s como resultado de un aumento en el caudal de agua manteniendo constante una temperatura de 30°C (Melhuish y col., 2006)

El mayor incremento de I_s registrado fue para la f-c-i con 165%, seguido de un aumento del 100% en la f-c y el correspondiente aumento del 84% en la f-c-a. Éstas fueron las respuestas al "duplicar" el caudal de agua. Estos datos muestran una relación directa entre el caudal de agua y la I_s , con un incremento total del 100% registrado entre los caudales mínimos y máximos.

6.2.4.7 Discusión del experimento

El voltaje de circuito abierto de los datos registrados a partir de las 4 CMB muestra un sistema redox de buena reacción, con un valor máximo 1V de salida y 0.3V como mínimo. La variación existente entre los dos sistemas de cámara cerrada puede atribuirse al hecho de que en las etapas iniciales de la investigación, la circulación del agua y su mezcla en la cámara invertida fue insuficiente. Ésto habría dado lugar probablemente a un "volumen muerto" de H_2O , resultando en bajas tasas de difusión de O_2 . Esta explicación se ve reforzada por el hecho de que la hidratación continua de las CMB de cátodo abierto y cerrado obtuvo aumentos en el voltaje.

Las CMB no son la solución perfecta al problema de la energía en los robots autónomos, sobre todo porque la capacidad de estos dispositivos puede ser tan baja como 12 mA/h. Sin embargo, como se muestra con EcoBots I y II, es posible tener éxito con el "comportamiento de impulsos". Por otra parte, incluso con la producción de energía baja, tareas como la detección, procesamiento, comunicación y movimiento se pueden realizar (EcoBot-II).

Para robots autónomos que emplean CMB con cátodos de O_2 , la retención de agua parece ser muy importante. Una de las características de diseño que podrían emplearse en el desarrollo de robots autónomos (similar a lo que poseen los sapos y las salamandras), sería la incorporación de una estructura de micro-canales en la parte inferior del robot y que se extendiera hacia la parte superior del robot y por acción de capilaridad podría extraer agua desde el suelo húmedo para ser utilizado en los cátodos.

De acuerdo con la ley de Henry, la concentración de gas en un líquido es inversamente proporcional a la temperatura del líquido. Ésto significa que se encuentra menos O_2 presente en el agua a temperaturas más altas. Sin embargo, la investigación sobre el efecto de la temperatura del agua en las CMB mostró un aumento en la corriente de salida en respuesta al aumento de la temperatura del agua. Ésto tal vez se deba a tres razones diferentes:

- a) El aumento en la velocidad de reacción de difusión en la superficie del electrodo
- b) El gradiente de temperatura creado entre el ánodo y el cátodo, que sirvió como una termounión para la transferencia de energía y
- c) El aumento de la velocidad de reacción metabólica de las bacterias anódicas como resultado del aumento de la temperatura

Los robots submarinos impulsados por las CMB podrían aprovechar estos efectos buscando aguas más cálidas, las cuales aumentarían la tasa metabólica en el biocatalizador anódico, la diferencia de temperatura entre los dos electrodos y si el robot utilizara plancton como fuente de biomasa, se beneficiaría de tener mejores oportunidades de alimentación.

Durante los experimentos en relación al flujo de agua a temperatura constante se registró una relación directa entre los parámetros del caudal y la corriente de salida. Puesto que un gradiente de temperatura ya no estaba contribuyendo en la mejora de los parámetros en la CMB, el aumento en la potencia fue debida probablemente a la transferencia mayor de masa de moléculas de O₂ difundándose a través del electrodo.

6.3 Biosensor de CMB de una sola cámara (cámara anódica) para aguas residuales

Desde que fue seleccionada por la Comisión Real de Eliminación de Aguas Residuales en 1908 como una prueba definitiva, la demanda bioquímica de oxígeno de 5 días (DBO₅) se ha convertido en el parámetro más utilizado para medir el contenido de materia orgánica de las aguas residuales. Esta determinación se basa en la medición del oxígeno disuelto utilizado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de la materia orgánica. A pesar de su uso extendido, la prueba DBO tiene una serie de limitaciones, tales como la precisión cuestionable e irreproducibilidad, así como el trabajo y tiempo invertido en la misma. En consecuencia, esta prueba no es adecuada para el control de procesos y monitoreo en tiempo real.

En los últimos años, los biosensores han demostrado tener un gran potencial para ser considerados como una alternativa al método convencional de análisis DBO. Las ventajas principales que ofrecen los biosensores sobre las técnicas analíticas convencionales son: La posibilidad de ser portátiles, la miniaturización y la realización del trabajo en el sitio de operación, además no requieren de pasos adicionales de procesamiento tal como la adición de reactivos (Rodríguez-Mozes y col., 2006). Se han reportado varios biosensores de DBO que se basan en el control de oxígeno disuelto y utilizan microorganismos específicos, tales como *Bacillus subtilis* (Riedel y col., 1988), *Arxula ardeninivorans* (Riedel y col., 1998) y *Serratia marcescens* (Kim y Kwon, 1999), cultivos mixtos (Tan y Wu, 1999) o de lodos activados (Liu y Mattiasson, 2002). También se ha utilizado un biosensor basado en una bacteria luminosa. La intensidad de la luminiscencia es proporcional a la cantidad de compuestos orgánicos que se miden con un fotodiodo (Hyun y col., 1993).

Todos estos biosensores han demostrado una muy buena relación con la concentración de DBO, pero presentan la limitación de tener una estabilidad operacional muy corta y en el caso de los biosensores basados en un solo organismo, tienen poca versatilidad de sustrato. El rango de medición es muy bajo, generalmente del orden de 0 a 110 ppm (Kim y col., 2003a).

Las CMB han sido probadas como sensores de DBO (Chang y col., 2004 y 2005; Gil y col., 2003; Kang y col., 2003; Kim y col., 2003a y b; Kumlanghan y col., 2007; Moon y col., 2004; Pasco y col., 2004) mostrando una estabilidad operativa de más de 5 años con un mantenimiento mínimo (Chang y col., 2004 y 2005; Kim y col., 2003a y b). Todos estos estudios utilizaron CMB de dos cámaras con un cátodo acuoso.

Para el estudio descrito, se utilizó una CMB de una sola cámara (cámara anódica) con un cátodo de aire como un biosensor de DBO. El objetivo fue hacer un sistema más compacto y simple con menores costos de operación. Un cátodo de aire ofrece ventajas potenciales sobre el sistema de dos cámaras, porque no requiere aireación, reciclado, ni regeneración química del catolito (Fan y col., 2007). Además, el rango de concentraciones de DBO detectadas por el biosensor se puede aumentar debido a un mejor suministro de oxígeno al cátodo.

En estudios anteriores, se ha observado una relación lineal entre el caudal de las aguas residuales y la corriente generada sólo para valores por arriba de las 150 ppm (Kim y col., 2003a). Chang y col. (2004) aplicaron un modelo para predecir las concentraciones de DBO superiores a 100 ppm.

6.3.1 Materiales y métodos utilizados en el biosensor

6.3.1.1 CMB de una cámara y su funcionamiento

Las celdas utilizadas en estos experimentos fueron hechas de tubos de poliacrilato de 12.5 cm de diámetro interior y 4 cm de longitud. Cada celda tiene tres puertos de flujo (cada uno de 1 cm de diámetro), uno en la parte inferior y dos en la parte superior (Figura 6.27). El volumen de la cámara del ánodo fue de 50 cm³.

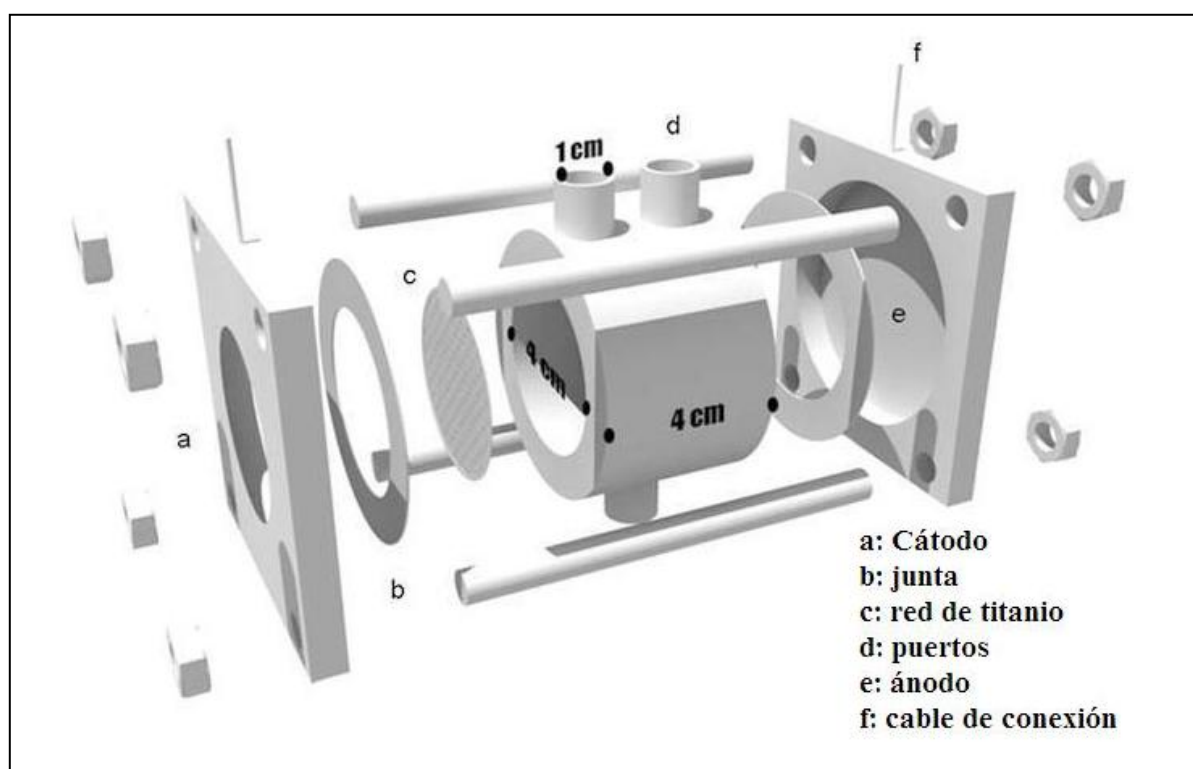


Figura 6.27 Celda microbiana de biocombustible de una sola cámara (Di Lorenzo y col., 2009)

El nuevo biosensor de CMB tenía un diseño similar al biosensor de CMB original. El área del ánodo y cátodo se mantuvo en 12.5 cm², mientras que el volumen fue de aproximadamente 75% menor, obtenido mediante la reducción de la longitud del reactor de 4 a 1 cm, resultando en un volumen de 12.6 cm³. La celda tiene dos soportes en ambos extremos del tubo: Uno para sujetar al ánodo y el otro para sujetar al cátodo. El ánodo es una pieza circular de tela de carbono (BASF) de 12.5 cm² y 0.1 cm de grosor. El cátodo se expone al aire en un lado y por el otro se separa del ánodo por medio de una membrana de intercambio catiónico (Nafion® 117 de DuPont).

El cátodo era de carbono con platino (0.3 mgPt/cm², el 60% en Vulcan, E-tek) depositado sobre una tela húmeda de papel carbón Toray de E-tek (20% en peso de teflón). El área de sección transversal

fue de 12.5 cm². En este estudio, el ánodo y el cátodo se conectaron a través de un voltímetro (Pico ®) y una resistencia externa se aplicó para polarizar a la celda y controlar la variación de corriente en condiciones de circuito cerrado. En la operación de la celda, el agua residual se alimentó a través del puerto de inyección con tasas de flujo en el rango de 0.12 a 1.5 cm³/min mediante una bomba peristáltica (Watson-Marlow, 520S). La Figura 6.28 muestra el diseño del sistema. Las celdas operaron a temperatura ambiente (21 ± 2°C). Cada experimento se realizó por duplicado.

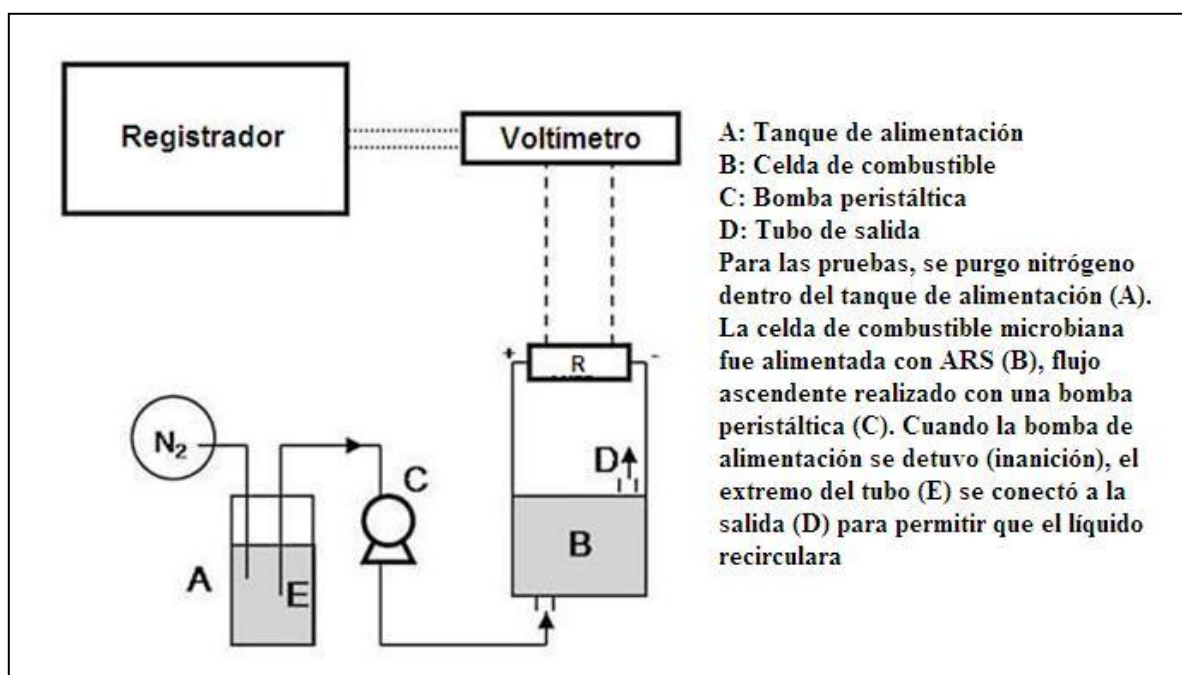


Figura 6.28 Diseño de sistema CMB de una sola cámara (Di Lorenzo y col., 2009)

6.3.1.2 Biocombustible para la CMB

El agua residual artificial (ARS) se preparó con los siguientes compuestos: 40 mg/dm de NH₄Cl, 10 mg/dm de MgCl₂, 0.1 mg/dm de CuSO₄, 5 mg/dm de CaCl₂, 0.1 mg/dm de MnSO₄, 0.1 mg/dm de ZnCl₂, buffer con fosfato (1.0 mol/dm (molar), pH7) y agua destilada. La concentración de DQO en el ARS fue controlada mediante la adición de una cantidad adecuada de glucosa. El ARS se colocó en un autoclave a 121°C durante 10 minutos antes de usarla.

El agua residual tratada (ART) fue recolectada del sistema de tratamiento de aguas residuales en la planta de tratamiento de Cramlington (Northumbrian Water, Reino Unido). Las aguas residuales se recolectaron durante un período de fuertes lluvias y con una DQO de 175 ± 50 mg/dm (Tabla 6.2). Fue muestreada en un solo lote y se almacenó a 4°C hasta su uso; su DQO no cambió notablemente durante el almacenamiento. Para prevenir alguna obstrucción en las celdas, la ART se filtró antes de usarse.

6.3.1.3 Enriquecimiento y adaptación de las bacterias

El enriquecimiento y adaptación de las bacterias electroquímicamente activas se llevó a cabo mediante una resistencia externa fija de 500 Ω durante un período de aproximadamente 4 semanas.

Cuando el agua residual artificial se utilizó como combustible, se seleccionó una DQO de 1,000 ppm para el enriquecimiento, también se agregó lodo anaerobio (planta de tratamiento Northumbrian en Cramlington, Reino Unido) al combustible como un inóculo bacteriano. Una vez que se observó un pico de corriente estable, las celdas fueron alimentadas con ARS con una DQO de 200 ppm sin inóculo.

Cuando el agua residual real se utilizó como combustible, la DQO se incrementó hasta el valor final de 1,000 ppm mediante la adición de una cantidad adecuada de glucosa. El agua residual proveyó por sí misma el inóculo, por lo que no se añadió inóculo en este caso.

6.3.1.4 Monitoreo del sistema

El trabajo descrito se basa en el análisis de la demanda química de oxígeno (DQO), ya que era más conveniente de medir en comparación con la DBO. Para el agua residual artificial, la DQO fue igual a la DBO, mientras que para el agua residual real, la DBO fue de aproximadamente la mitad (Tabla 6.2). La DQO se determinó mediante el método estándar utilizando cromato como oxidante, tal como se describió previamente en Eaton y col. (2005). Todas las muestras fueron filtradas a través de una membrana con poros de 0.22 μm de un diámetro (VWR International) antes de las mediciones de DQO.

Tabla 6.2 Características de las aguas residuales utilizadas en el experimento CMB de una sola cámara (Di Lorenzo y col., 2009)

Parámetro	Valor (20.7 ° C)
pH	7
Alcalinidad (ppm)	46 \pm 3
Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	1,570 \pm 10
DQO (ppm)	175 \pm 50
DBO (ppm)	88 \pm 5
COT (ppm)	98 \pm 2
NH ₃ -N (ppm)	21 \pm 0.3
Fosfato (ppm)	4.1 \pm 0.9
Sulfato (ppm)	49.4 \pm 9
Sólidos totales suspendidos (ppm)	187 \pm 18

La tasa de consumo de DQO se calculó con la siguiente fórmula:

$$Q \times (DQO_{\text{entrada}} - DQO_{\text{salida}}) \quad (6-1)$$

donde

Q (dm^3/h) es el flujo de combustible

DQO_{entrada} y DQO_{salida} (mg/dm^3) son la DQO del influente y el efluente respectivamente

La eficiencia coulombica en estado estacionario se calculó con la fórmula:

$$\epsilon_C = \frac{MI}{FzQ\Delta DQO} \times 100\% \quad (6-2)$$

donde

F : es constante de Faraday ($96,485 \text{ C}/\text{mol}$)

$M = 32$: es el peso molecular del oxígeno

I (A): es la corriente en el estado estacionario

$z = 4$: es el número de electrones intercambiados por mol de oxígeno

Q (dm^3/s): es el flujo a través del sistema

ΔDQO (g/dm^3): es la diferencia en la DQO del influente y efluente.

6.3.2 Resultados y discusión del experimento

6.3.2.1 Efecto de la tasa de alimentación

La Figura 6.29 muestra la variación de la corriente de salida de la CMB en el tiempo cuando se alimentó por lotes sucesivos de ARS. Los datos mostrados son el promedio de los resultados de dos reactores. Las flechas indican los puntos de alimentación. Sólo los seis primeros lotes se realizaron con lodo anaerobio como inóculo (0.5% en volumen) y ARS (1,000 ppm DQO). El lote indicado con ** se realizó con ARS conteniendo 1,000 ppm como DQO, mientras que los lotes siguientes contenían ARS con 200 ppm de DQO. Área del ánodo: 12.5 cm^2 , resistencia externa: 500Ω . La salida de corriente se elevó después de cada lote de alimento, alcanzando un pico antes de declinar debido al consumo del combustible. El pico de corriente pasó de un valor de $0.02 \pm 6 \times 10^{-4} \text{ mA}$ con el primer lote de combustible, hasta un valor de $0.12 \pm 4 \times 10^{-3} \text{ mA}$, alcanzado en el cuarto lote. Después de 400 horas (cuatro lotes) no se observó algún aumento de la corriente de salida; lo anterior supone que la biopelícula del ánodo se enriqueció con bacterias electroquímicamente activas y se mantuvo estable. Cuando la concentración de DQO en el ARS se redujo a 200 ppm sin utilizar inóculo, se generó una corriente estable de aproximadamente 0.04 mA. El período de enriquecimiento total fue de aproximadamente 550 h.

Una vez que el enriquecimiento de las celdas se completó, el rendimiento del sistema se experimentó en modo continuo. El agua residual sintética (ARS, 100 ppm DQO) se introdujo dentro de las celdas a diferentes tasas de flujo. Las celdas se alimentaron con un flujo específico hasta que una corriente estable se generó y luego la velocidad del caudal se incrementó.

La Tabla 6.3 muestra el cambio en la respuesta de corriente sobre el aumento de la tasa de flujo de ARS en aumentos de 0.1 a $0.56 \text{ cm}^3/\text{min}$. Se utilizó ARS como combustible. La DQO se fijó en 100 ppm. Área del ánodo: 12.5 cm^2 , resistencia externa: 500Ω . Los datos mostrados son el promedio de dos reactores. La corriente aumentó con cada aumento de la tasa de flujo, variando desde

0.063 ± 0.002 mA para un flujo de $0.12 \text{ cm}^3/\text{min}$ hasta un valor de 0.27 ± 0.003 mA para un flujo de $0.56 \text{ cm}^3/\text{min}$. El aumento de corriente se observó hasta un flujo de $0.46 \text{ cm}^3/\text{min}$; cuando las celdas fueron alimentadas con flujos más altos ($0.56 \text{ cm}^3/\text{min}$), sólo se observó un pequeño incremento del 4% en la corriente. No se observó aumento de la corriente para tasas de flujo por encima de $0.56 \text{ cm}^3/\text{min}$ (datos no presentados). El aumento de la corriente con los flujos podría indicar un aumento de la actividad electroquímica de las bacterias debido a un aumento en la tasa de transporte de masa.

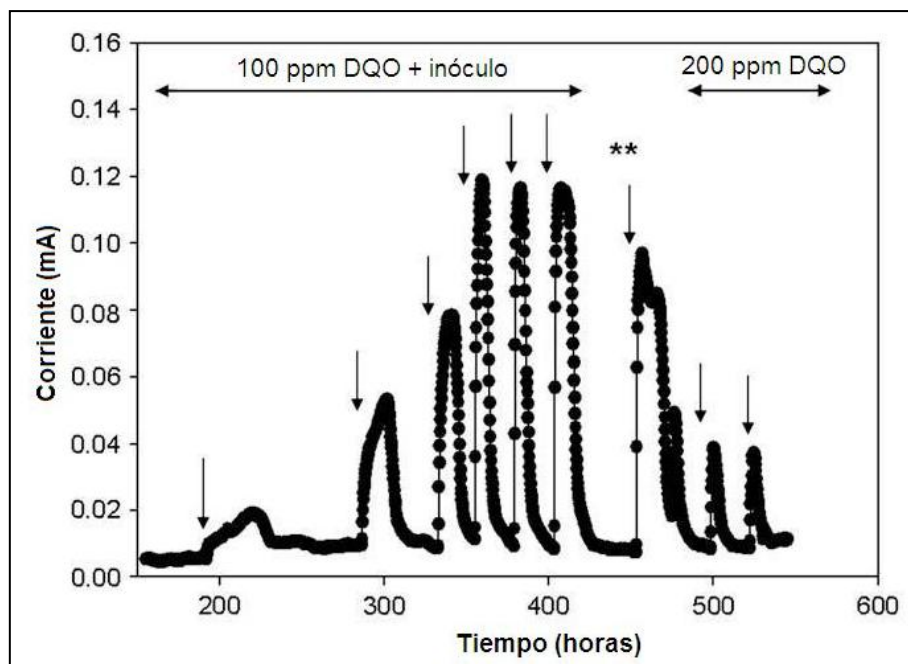


Figura 6.29 Variación de la corriente con el tiempo para el enriquecimiento de bacterias electroquímicamente activas (Di Lorenzo y col., 2009)

Tabla 6.3 Efecto de la tasa de alimentación en la corriente generada y eficiencia coulombica (Di Lorenzo y col., 2009)

Tasa de flujo (cm^3/min)	Tasa de carga ($\text{mg DQO}/\text{hcm}^2$)	Corriente (mA)	HRT (min)	DQO efluente (ppm)	Tasa de remoción de DQO ($\text{mg DQO}/\text{h}$)	Eficiencia coulombica (%)
0.12	0.058	0.063	417	34 ± 8.3	0.475 ± 0.06	4 ± 0.7
0.26	0.125	0.151	192.3	40 ± 0.25	0.936 ± 0.02	5 ± 1
0.38	0.182	0.181	131.6	39.9 ± 2.6	1.37 ± 0.1	4 ± 0.8
0.46	0.221	0.26	108.7	50 ± 1.8	1.38 ± 0.2	6 ± 1.2
0.56	0.267	0.27	89.3	52 ± 2.7	1.61 ± 0.8	5 ± 0.9

La Tabla 6.3 también describe la respuesta de la celda para diferentes flujos en términos del cambio en la DQO y las tasas de consumo de la DQO, también se presentan las eficiencias coulombicas observadas para cada tipo de alimentación. Al aumentar el caudal y por lo tanto reducir el tiempo de retención hidráulico (TRH), la tasa de remoción de DQO y la DQO del influente aumentó. El efecto del aumento de la DQO del efluente en los pasos siguientes produjo sucesivos decrementos en la tasa de remoción de DQO. El aumento del primer paso fue de aproximadamente el 97%, mientras que para el último ($0.46 \text{ cm}^3/\text{min}$ a $0.56 \text{ cm}^3/\text{min}$) fue sólo el 17%.

Un gran caudal debería ser ideal para aumentar la respuesta dinámica del sistema debido al aumento en el transporte de masa. Por lo tanto, se decidió usar el flujo de $0.46 \text{ cm}^3/\text{min}$ en todos los experimentos siguientes.

Para todas las tasas flujo, se obtuvieron valores bajos de eficiencia coulombica (4 a 6%), por lo que un alto porcentaje de remoción de DQO no estaba relacionado con la corriente generada.

6.3.2.2 Efecto de la resistencia externa en el funcionamiento de la celda

Se ha demostrado anteriormente que la resistencia externa puede afectar el rendimiento de las CMB y por lo tanto podría ser una limitación en la respuesta del sensor CMB (Kang y col., 2003; Kumlanghan y col., 2007). Se llevó a cabo una serie de pruebas, en las que las resistencias externas (R_{ext}) variaron desde 50 hasta 500Ω a una concentración de entrada de DQO constante de 100 ppm y un flujo de $0.46 \text{ cm}^3/\text{min}$. El objetivo fue determinar el valor de la resistencia externa que dio la menor respuesta dinámica del sistema. Las celdas fueron alimentadas hasta generarse una corriente constante. Posteriormente se realizó una inhibición celular mediante la interrupción de la alimentación hasta que la salida de corriente alcanzó aproximadamente $0.015 \pm 0.05 \text{ mA}$. Durante la inhibición, la solución dentro del reactor se recirculó a la misma tasa de flujo ($0.46 \text{ cm}^3/\text{min}$) para garantizar la mezcla dentro de la celda. La Tabla 6.4 muestra los resultados obtenidos. El pico de corriente aumentó y el tiempo de respuesta para alcanzar el estado estacionario disminuyó a medida que la resistencia se redujo. Con la disminución de la resistencia externa a 50Ω , el tiempo de respuesta disminuyó aproximadamente un 67% con respecto a una R_{ext} de 500Ω . El estado de equilibrio de la corriente se alcanzó después de 4.5 horas en comparación con las 13.75 h cuando la R_{ext} fue de 500Ω . Una R_{ext} de 50Ω fue la más baja que se podría utilizar para tener voltajes confiables: Cuando una R_{ext} inferior a 50Ω se utilizó, la corriente de salida fue muy baja y no pudo medirse con precisión.

La Tabla 6.4 también muestra que los cambios en la resistencia externa no tuvieron ningún efecto importante sobre la tasa de remoción de DQO. Esencialmente, la mayoría de remoción de DQO se asoció con procesos no anódicos (eficiencia coulombica baja).

6.3.2.3 Respuesta del sensor a la concentración de la DQO y calibración con carga externa de 50Ω

La calibración del estado de equilibrio de la corriente versus la DQO (50 a 1,000 ppm) condujo a utilizar una R_{ext} de 50Ω , la cual corresponde a la respuesta más rápida del sistema. No fue posible considerar concentraciones de DQO por debajo de las 50 ppm debido a la sensibilidad del registrador de datos utilizado. La Figura 6.30a muestra la respuesta dinámica del sistema para diferentes

concentraciones de entrada de la DQO. Las celdas se alimentaron continuamente a una DQO específica hasta que se generó una corriente constante, seguido de un periodo de inanición hasta que se obtuvo una corriente de aproximadamente 0.015 ± 0.05 mA. Se observó una buena reproducibilidad del sistema.

La Figura 6.30b muestra la variación de la corriente con la concentración de DQO. Se obtuvo una respuesta lineal (Figura 6.30c) con valores de DQO por arriba de 350 ppm ($r^2 = 0.96$). Para las celdas CMB de dos cámaras, se ha reportado una respuesta lineal hasta concentraciones de DQO de 150 ppm. Los datos son el promedio de dos reactores (Chang y col., 2004; Kim y col., 2003b).

Tabla 6.4 Efecto de la resistencia externa en la respuesta dinámica del biosensor CMB (Di Lorenzo y col., 2009)

Resistencia externa (Ω)	Tiempo de Respuesta (h)	Corriente máxima (mA)	Tasa de remoción de DQO (mg DQO/h)	Voltaje (mV)
50	4.5	0.14	2.7 ± 0.9	7
120	5	0.126	3 ± 0.5	15.12
250	5	0.105	2.3 ± 1.2	26.25
500	13.75	0.084	2.37 ± 1	42

Biosensores de las CMB anteriores también se han calibrado considerando la relación entre la concentración de DQO y la carga total generada (Gil y col., 2003; Kim y col., 2003a). En este caso, se obtuvo una relación lineal entre la concentración de DQO por encima de 250 ppm de DQO (Gil y col., 2003; Kim y col., 2003a). La Figura 6.31 muestra una calibración de carga generada versus la DQO. En este caso se obtuvo una respuesta lineal con concentraciones de DQO por encima de 500 ppm. Para cada valor de DQO, la carga generada se calculó mediante la integración de la corriente de salida en el tiempo desde el punto de inicio del lote de alimentación hasta el momento en que la corriente se redujo al 5% de su valor máximo. Tasa de flujo: $0.46 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$. $R_{\text{ext}} = 50 \Omega$. Los datos son el promedio de dos reactores.

También se confirmó la reproducibilidad de la CMB bajo una resistencia externa de 50Ω para el caso de alimentación de forma continua, como se muestra en la Figura 6.32. El sistema se alimentó de forma continua con ARS conteniendo las concentraciones de DQO indicadas (en ppm). Los datos son el promedio de los resultados dos reactores. De hecho, la Figura representa la respuesta dinámica de la corriente bajo concentraciones de DQO variables, desde 60 hasta 210 ppm, con un flujo constante de $0.46 \text{ cm}^3/\text{min}$.

La celda dio valores constantes razonables de respuesta en corriente cuando la entrada de DQO era la misma. Por ejemplo, cuando los reactores fueron alimentados con una solución con 60 ppm de DQO, la corriente de salida fue de 0.07 mA con una desviación estándar relativa de 0.22%. Con 160 ppm de DQO, la corriente de salida fue de 0.147 mA con una desviación estándar de 0.53%.

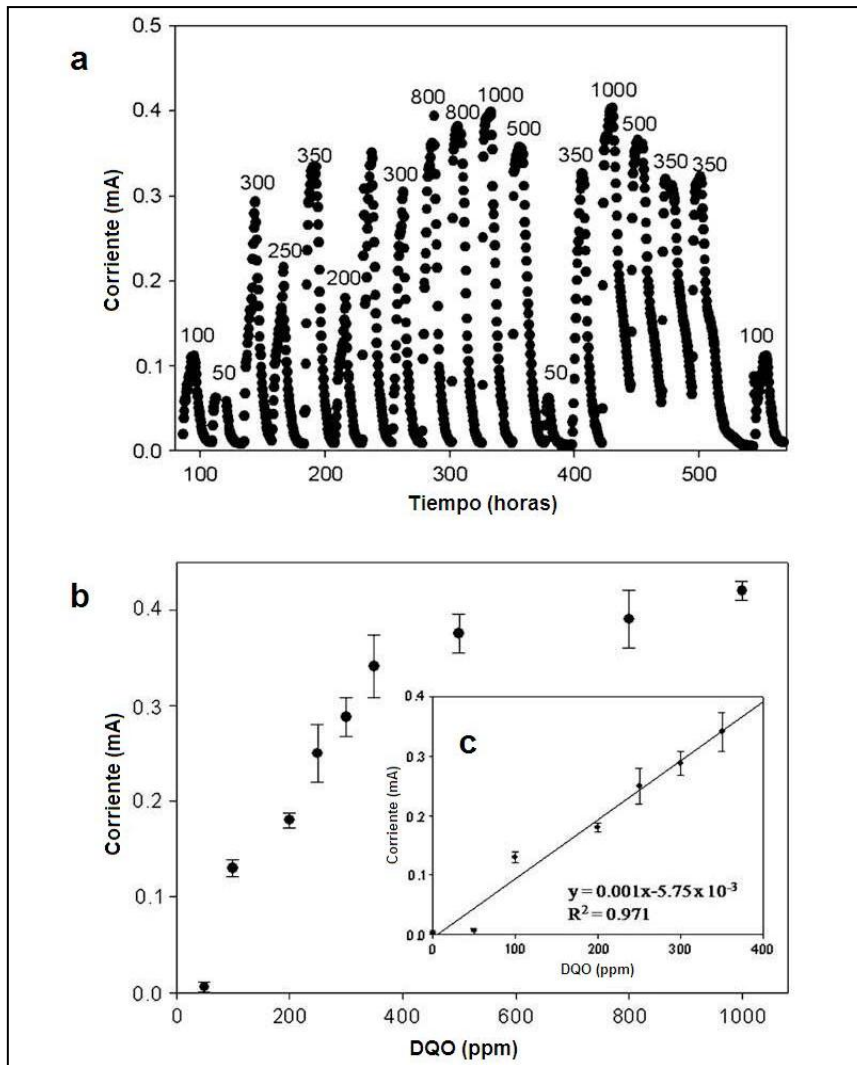


Figura 6.30 Respuesta a la concentración de DQO con una resistencia externa de 50Ω . a: Corriente generada bajo diferentes concentraciones de DQO; b: corriente en estado de equilibrio en relación con la DQO de entrada; c: Curva de calibración (Di Lorenzo y col., 2009).

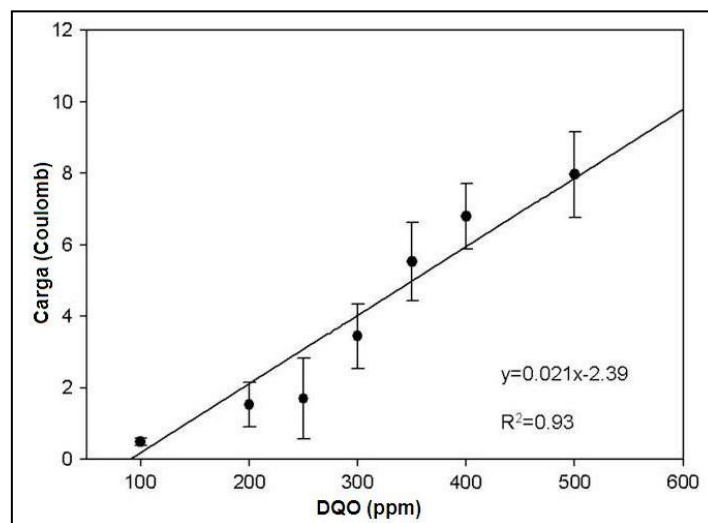


Figura 6.31 Relación entre la carga generada y la concentración de la DQO (Di Lorenzo y col., 2009)

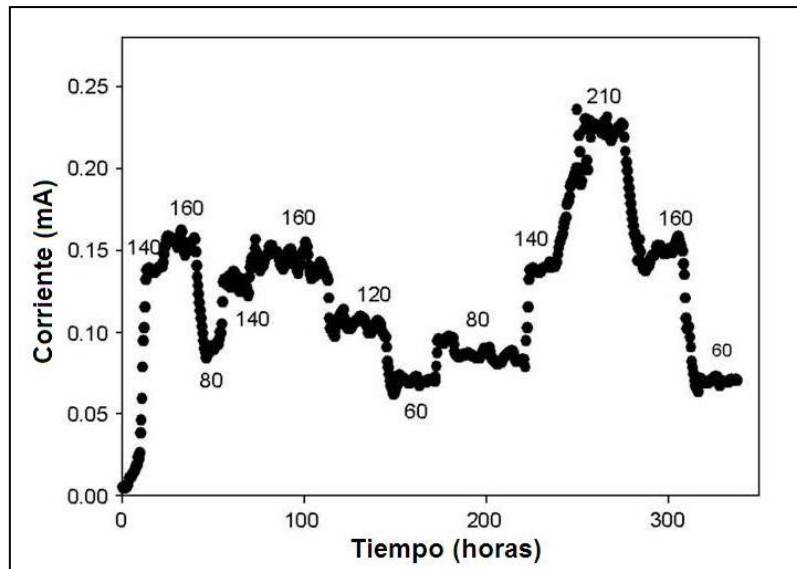


Figura 6.32 Reproducibilidad del biosensor de una CMB (Di Lorenzo y col., 2009)

6.3.2.4 Efecto del volumen del reactor en las celdas

El efecto del volumen del reactor en la respuesta del sistema se investigó debido a que se consideró una configuración de un nuevo reactor con un volumen 75% menor. De esta manera, para una tasa de alimentación de $0.46 \text{ cm}^3/\text{min}$, el TRH (tiempo de retención hidráulico) se redujo a 27 min. La Figura 6.33 muestra la generación de corriente durante el período de enriquecimiento de la biopelícula del ánodo con bacterias electroquímicamente activas en el biosensor CMB de menor volumen. Las flechas indican los puntos de alimentación del reactor. Los datos son el promedio de dos reactores. Volumen del reactor: 12.6 cm^3 . Ánodo: tela de carbón. $R_{\text{ext}} = 50 \Omega$

El biosensor CMB de menor volumen requirió 400 horas para alcanzar un máximo estable. Los lotes adicionales de combustible durante las primeras 250 horas de enriquecimiento no causaron ningún aumento de corriente y por lo tanto no se muestran en la Figura 6.33. Siguiendo con el periodo de enriquecimiento, cuando los biosensores CMB fueron alimentados con ARS conteniendo DQO con 1,000 ppm sin inóculo, las corrientes pico obtenidas fueron de $0.12 \pm 0.009 \text{ mA}$.

Se investigó y se comparó la respuesta de las dos configuraciones de biosensor CMB a los cambios en la alimentación de DQO bajo una resistencia fija externa de 50Ω (Figura 6.34 a y b). Como se muestra, la respuesta dinámica del biosensor mejoró: El TRH inferior del sensor de menor volumen resultó en una respuesta mucho más rápida del sistema para un cambio hacia arriba, pero también para un cambio hacia abajo en la concentración de DQO. En particular, en el caso de un cambio hacia arriba, el sistema requirió sólo 40 minutos para llegar a una corriente estable, lo que contrasta con las 4 horas requeridas con el biosensor CMB de mayor volumen. Cuando la concentración de DQO se redujo de 250 a 70 ppm, en general, el tiempo de respuesta fue más largo, pero aún el reactor pequeño fue más rápido en responder con 2 horas en comparación con las 8.8 horas requeridas por el reactor de mayor volumen. La tasa de alimentación de combustible fue de $0.46 \text{ cm}^3/\text{min}$ y la resistencia externa fue de 50Ω .

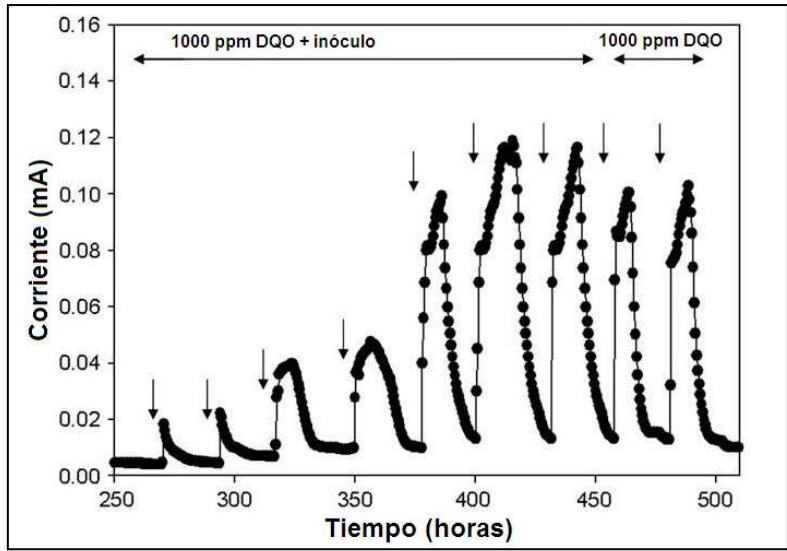


Figura 6.33 Variación de la corriente con el tiempo para el enriquecimiento de bacterias en el biosensor CMB de menor volumen (Di Lorenzo y col., 2009)

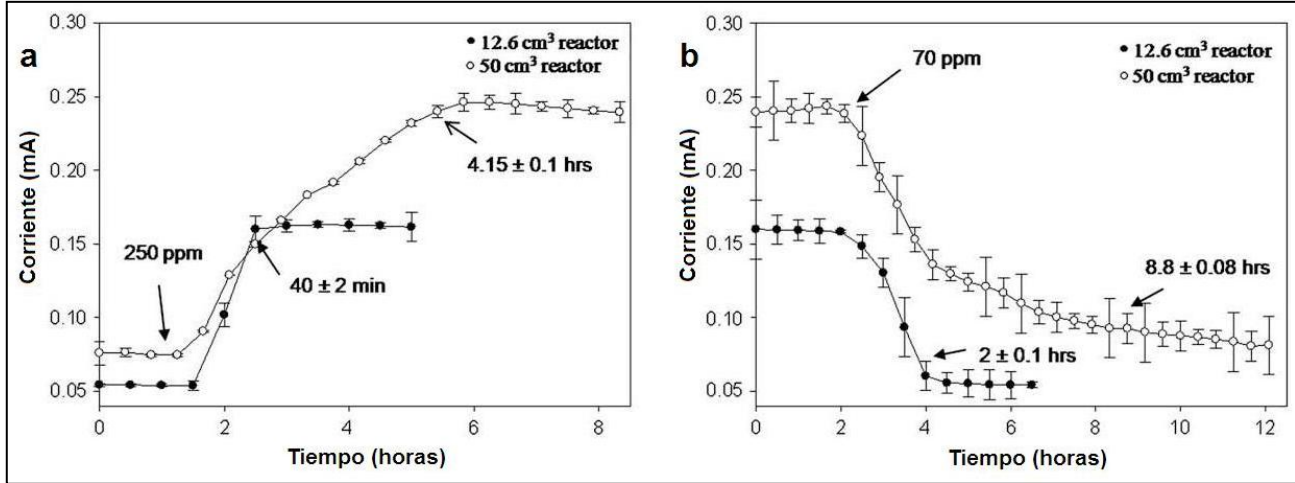


Figura 6.34 Influencia del volumen de los reactores en el tiempo de respuesta de los biosensores a los cambios por etapas en la concentración de DQO (Di Lorenzo y col., 2009)

La Tabla 6.5 reporta el desempeño del biosensor CMB de menor volumen en términos de la remoción de DQO y la eficiencia coulombica y los compara con el biosensor CMB de mayor volumen. Como se muestra, el espacio reducido entre los electrodos en el biosensor CMB de menor volumen resultó en un mejor rendimiento con una eficiencia coulombica del 56% que contrasta con la eficiencia coulombica del 6% obtenida con el reactor de 50 cm³. La DQO del efluente se fijó en 100 ppm.

Los biosensores CMB exhibieron una muy buena estabilidad durante un período de 7 meses. La Figura 6.35 muestra el valor de las corrientes en estado estacionario obtenidas mediante una entrada

fija de DQO de 200 ppm durante el período de 7 meses. Después del sexto mes de funcionamiento se observó un depósito blanco en el cátodo. Sin embargo, como se muestra en la Figura 6.35, esto afectó el rendimiento del sistema de forma marginal. La composición del depósito no se analizó, aunque se piensa que fue un carbonato. Los datos son el promedio de los resultados de los dos reactores.

Tabla 6.5 Comparación de los biosensores CMB en relación con el volumen del reactor (Di Lorenzo y col., 2009)

Volumen del Reactor (cm ³)	Corriente (mA)	TRH (min)	Tasa de remoción de DQO (mg DQO/h)	Eficiencia coulombica (%)
12.6	0.12 ± 0.01	27	0.06 ± 0.007	56 ± 4
50	0.14 ± 0.007	108.7	1.2 ± 0.2	6 ± 0.5

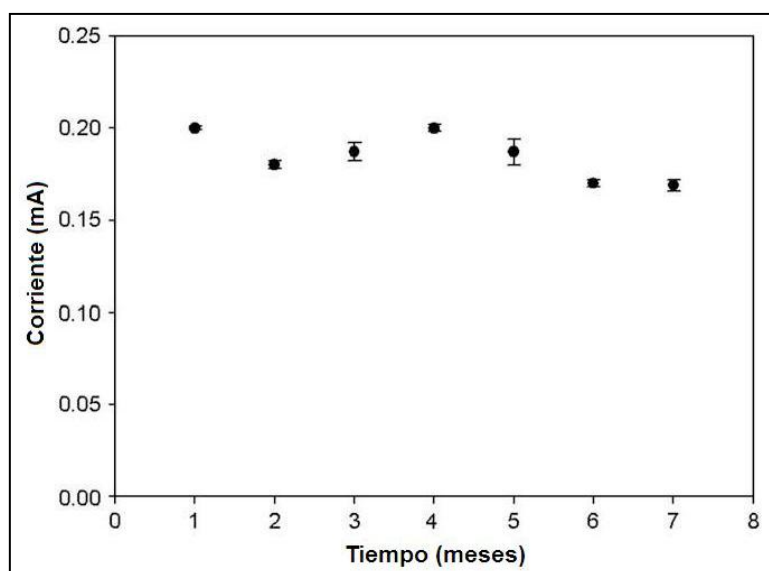


Figura 6.35 Estabilidad a largo plazo del biosensor CMB (Di Lorenzo y col., 2009)

6.3.2.5 Funcionamiento del biosensor CMB con agua residual real

Para investigar la aplicabilidad del biosensor CMB en una planta de tratamiento de aguas residuales, se utilizó agua residual real para probar la relación entre la generación de corriente y la concentración de DQO. Este estudio se realizó con el biosensor CMB de menor volumen debido a que obtuvo el mejor rendimiento en términos de tiempo de respuesta y eficiencia coulombica cuando se utilizó ARS como combustible.

Los biosensores CMB fueron alimentados en modo continuo con varias soluciones de agua residual. La Figura 6.36 reporta la corriente de salida observada para una alimentación continua (caudal de 0.46 cm³/min) de agua residual. El sistema mostró una buena relación entre la concentración de

DQO y la corriente de salida, lo que demuestra la aplicabilidad de este sistema en plantas de tratamiento de agua. La DQO de las aguas residuales no diluidas fue de 175 ± 50 ppm. Las soluciones se realizaron utilizando agua del grifo. Las flechas indican las condiciones de estado estacionario obtenidas a una solución de agua residual particular, mientras que los números se refieren a los valores de entrada ó del influente de DQO expresados en ppm.

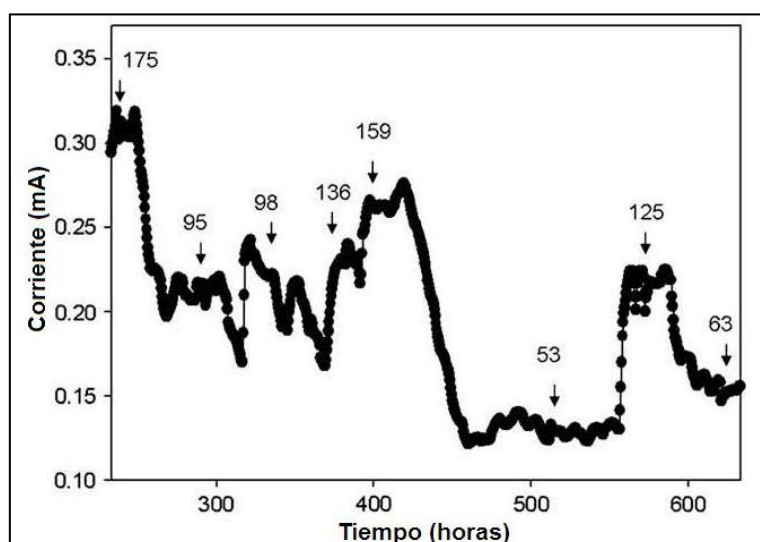


Figura 6.36 Variación de la corriente en el biosensor CMB en respuesta a diferentes soluciones de efluentes de una planta de tratamiento de aguas residuales (Di Lorenzo y col., 2009)

Por otra parte, cuando se utilizaron soluciones de aguas residuales de concentración DQO desconocidas, el sistema dió buena correspondencia entre la DQO medida con método químico y el valor dado por el biosensor (Tabla 6.6). La DQO de las muestras se determinó por medio del método estándar descrito por Eaton y col. (2005) y por la alimentación de las muestras en el biosensor CMB para determinar su concentración de DQO.

Tabla 6.6 DQO medida con método químico y biosensor

Biosensor CMB	Método estándar
169 ± 9	175 ± 50
98.5 ± 2.1	100 ± 9
122 ± 1	120 ± 10
61.5 ± 0.9	60 ± 5

6.3.2.6 Efecto de la temperatura

Todos los trabajos realizados anteriormente con biosensores CMB se llevaron a cabo a temperaturas de 30°C o superiores. En este estudio, las pruebas se realizaron a temperatura ambiente, la cual fue de aproximadamente $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Las temperaturas del experimento fueron de 20 y 25°C, debido a que fue la temperatura más baja y la más alta respectivamente registradas en el laboratorio, éstas se compararon con una temperatura de 30° C. La Tabla 6.7 reporta las salidas de corriente promedio observadas para cada temperatura por dos CMB (volumen de 12.6 cm³, ánodo de tela de carbón) alimentados con agua residual real. Los porcentajes de remoción de DQO y eficiencia coulombica también fueron comparados. No es sorprendente que una temperatura de funcionamiento de 30°C haya dado el valor más alto de corriente (0.55 mA) con un aumento de aproximadamente el 72% en comparación con los 25°C (0.32 mA) y de 96% en comparación con los 20°C (0.28 mA). La remoción de DQO mejoró también a temperaturas más altas. Las temperaturas más altas aceleran la hidrólisis de compuestos complejos y explican la disminución de los tiempos de respuesta al aumentar la temperatura. Como se muestra en la Tabla 6.7, al reducir la temperatura de los 25 a 20°C no se observaron variaciones sustanciales en el tiempo de respuesta y eficiencia coulombica.

Tabla 6.7 Efecto de la temperatura en un biosensor CMB

Temperatura (°C)	Corriente (mA)	Remoción de DQO (%)	Eficiencia coulombica (%)	Tiempo de respuesta (min)
20	0.28 ± 0.008	24 ± 6	10 ± 1.2	41 ± 2
25	0.32 ± 0.007	28.7 ± 10	11 ± 0.8	40 ± 4
30	0.55 ± 0.008	46 ± 8	28 ± 0.5	31 ± 2

6.3.3 Conclusiones del estudio con CMB

Este estudio demostró que una CMB con un cátodo de aire tiene el potencial para ser utilizado como un biosensor para carbono orgánico. La optimización del biosensor se llevó a cabo considerando al ARS como combustible. Posteriormente, el biosensor optimizado se probó con aguas residuales reales.

- Con una resistencia externa de 50 Ω, el rango de medición de la CMB fue mayor en comparación con biosensores CMB de dos cámaras reportadas previamente.
- La repetición de mediciones realizadas al mismo tiempo fueron altamente reproducibles (0.53% de coeficiente de variación) y las mediciones realizadas durante tiempo prolongado (aproximadamente 7 meses) también fueron estables, con una variación total de sólo el 15%.
- Cuando el volumen del reactor se redujo de 50 cm³ a 12.6 cm³, se observó un tiempo de respuesta ajustado al TRH (40 min). El reactor pequeño también proporcionó eficiencias coulombicas nueve veces más altas que el reactor grande con ánodo de tela de carbón.

- Cuando se utilizaron aguas residuales reales en el biosensor se obtuvo una buena correlación entre la concentración de DQO y la corriente de salida, lo que demuestra la aplicabilidad de este sistema en el tratamiento de aguas residuales.
- Aunque las condiciones de funcionamiento óptimo se observaron a 30°C, este estudio también demostró un buen rendimiento del sistema cuando se operó a temperatura ambiente (~20°C), lo que permitiría una mayor simplicidad del sistema y reducir los costos operativos.