



Universitat Autònoma
de Barcelona

Facultat de Ciències

Treball de
fi de grau

Pilas biodegradables
como fuentes de
energía portátiles y
desechables

Direcció:

Juan Pablo Esquivel
Neus Sabaté

Derek García Pérez

Juliol 2019

Treball de Fi de Grau realitzat al Centre Nacional de Microelectrònica i presentat a la Facultat de Ciències de la Universitat Autònoma de Barcelona per a l'obtenció del Grau en Química

Resum en català

Piles biodegradables com a fonts d'energia portàtils i d'un sol ús.

Cel·la de combustible, cel·la de flux, cel·la de flux basada en l'evaporació, flux capil·lar, quinones, evaporació, residus electrònics, biodegradable.

En els últims anys, l'augment de l'ús d'aparells elèctrics ha comportat l'augment de la quantitat de residus generats portant a una creixent contaminació a nivell mundial. L'energia química emmagatzemada depèn dels reactius redox usats, que en la majoria de piles actuals es basen en les reaccions de reducció-oxidació de metalls pesants difícils de eliminar o recuperar.

A partir d'aquí, neix la necessitat d'avançar cap a una tecnologia més avançada, eficient, respectuosa amb el medi ambient, portàtil i de baix cost energètic amb l'objectiu de reduir la producció dels dispositius anteriors i la generació de deixalles.

Actualment, s'han integrat els coneixements sobre microfluids als de les cel·les de combustible. En aquestes cel·les de flux, el combustible i les espècies químiques que intervenen s'introdueixen a través d'un sistema de microcanals que resulten en un flux laminar paral·lel d'aquestes espècies, separant-les així sense necessitat d'incorporar una membrana. D'altra banda, aquests dispositius necessiten l'existència de bombes i un sistema de sortida per mantenir el flux constant. Amb l'objectiu d'incorporar un mecanisme de bombeig propi, s'estudien els sistemes microfluídics basats en paper. Aquests sistemes contenen uns canals fets de fibres de cel·lulosa capaços de generar un flux del líquid per capil·laritat, evitant l'ús de les bombes abans esmentades. En aquestes bateries de flux dels elèctrodes actuen com un mitjà de transferència de càrrega i prenen un paper actiu en les reaccions redox. A més, aquests dispositius són flexibles, portàtils, barats i aplicables a tecnologies de diagnòstic medicinal així com en el desenvolupament de fonts d'energia.

En aquest treball l'objectiu principal serà el desenvolupament d'una pila de flux basat en compostos de paper i fibres de carboni amb la idea d'obtenir un dispositiu de baix cost, biodegradable, d'eliminació segura i portàtil. En treballs anteriors s'ha aconseguit dissenyar una pila amb les mateixes finalitats basada únicament en flux capil·lar. Ara, l'objectiu marcat és el desenvolupament d'una cel·la de flux que actuï mitjançant un règim d'evaporació. Per tant, al llarg del projecte, s'estudiarà la validació de les espècies redox, la caracterització de flux capil·lar i per evaporació de la pila i les seves característiques electroquímiques amb l'objectiu de conèixer si és viable el desenvolupament d'una pila basada en el flux per evaporació, fent-la així més duradora en el temps.

Resumen en castellano

Pilas biodegradables como fuentes de energía portátiles y desechables

Celda de combustible, celda de flujo, celda de flujo basada en la evaporación, flujo capilar, quinonas, evaporación, residuos electrónicos, biodegradable.

En los últimos años, el aumento del uso de aparatos eléctricos ha conllevado al aumento de la cantidad de residuos generados llevando a una creciente contaminación a nivel mundial. La energía química almacenada depende de los reactivos redox usados, que en la mayoría de pilas actuales se basan en las reacciones de reducción-oxidación de metales pesados difíciles de eliminar o recuperar.

A partir de aquí, nace la necesidad de avanzar hacia una tecnología más avanzada, eficiente, respetuosa con el medio ambiente, portátil y de bajo coste energético con el objetivo de reducir la producción de los dispositivos anteriores y la generación de desechos.

Actualmente, se han integrado los conocimientos sobre microfluídos a los de las celdas de combustible. En estas celdas de flujo, el combustible y las especies químicas que intervienen se introducen a través de un sistema de microcanales que resultan en un flujo laminar paralelo de estas especies, separándolas así sin necesidad de incorporar una membrana. Por otro lado, estos dispositivos necesitan la existencia de bombas y un sistema de salida para mantener el flujo constante. Con el objetivo de incorporar un mecanismo de bombeo propio, se estudian los sistemas microfluídicos basados en papel. Estos sistemas contienen unos canales hechos de fibras de celulosa capaces de generar un flujo del líquido por capilaridad, evitando el uso de las bombas antes mencionadas. En estas baterías de flujo los electrodos actúan como un medio de transferencia de carga y toman un rol activo en las reacciones redox. Además, estos dispositivos son flexibles, portátiles, baratos y aplicables a tecnologías de diagnóstico medicinal así como en el desarrollo de fuentes de energía.

En este trabajo el objetivo principal será el desarrollo de una pila de flujo basado en compuestos de papel y fibras de carbono con la idea de obtener un dispositivo de bajo coste, biodegradable, de eliminación segura y portátil. En trabajos anteriores se ha conseguido diseñar una pila con las mismas finalidades basada únicamente en flujo capilar. Ahora, el objetivo marcado es el desarrollo de una celda de flujo que actúe mediante un régimen de evaporación. Por lo tanto, a lo largo del proyecto, se estudiará la validación de las especies redox, la caracterización de flujo capilar y por evaporación de la pila y sus características electroquímicas con el objetivo de conocer si es viable el desarrollo de una pila basada en el flujo por evaporación, haciéndola así más duradera en el tiempo.

Abstract in English

Biodegradable batteries as portable and disposable energy sources

Fuel cell, flow cell, flow cell based on evaporation, capillary flow, quinones, evaporation, electronic waste, biodegradable.

In recent years, the use of electrical appliances has increased and that has led to an increase in the amount of waste generated, leading to increasing pollution worldwide. The stored chemical energy depends on the redox reagents used, which in most current batteries are based on the heavy metal reduction-oxidation reactions difficult to eliminate or recover.

From here, the need to move towards a more advanced technology, efficient, respectful with the environment, portable and low energy cost with the aim of reducing the production of the previous devices and waste generation.

Currently, knowledge about microfluidics has been integrated into those of fuel cells. In these flow cells, the fuel and the chemical species that intervene are introduced through a microchannel system that result in a parallel laminar flow of these species, separating them without the need to incorporate a membrane. On the other hand, these devices need the existence of pumps and an exit system to keep the flow constant. In order to incorporate their own pumping mechanism, paper-based microfluidic systems are studied. These systems contain channels made of cellulose fibers capable of generating a liquid flow by capillarity, avoiding the use of the aforementioned pumps. In these flow batteries the electrodes act as a means of charge transfer and take an active role in the redox reactions. In addition, these devices are flexible, portable, cheap and applicable to medical diagnostic technologies as well as in the development of energy sources.

In this work, the main objective will be the development of a paper and carbon fiber based flow cell with the idea of obtaining a low cost, biodegradable, safe and portable disposal device. In previous works it has been possible to design a battery with the same purposes based only on capillary flow. Now, the marked objective is the development of a flow cell that acts through an evaporation regime. Therefore, throughout the project, the validation of the redox species, the characterization of capillary flow and by evaporation of the battery and its electrochemical characteristics will be studied in order to study the viability of the development of a battery based on a flow through evaporation, thus making it more durable over time.

Índice

Índice de abreviaturas	6
1. Introducción	7
2. Objetivos	14
3. Parte experimental.....	16
3.1. Materiales	16
3.1.1. Especies químicas.....	16
3.1.2. Materiales del dispositivo	17
3.2. Diseño del dispositivo	17
3.3. Métodos	18
3.3.1. Caracterización de flujo	18
3.3.1.1. Flujo por capilaridad	19
3.3.1.2. Flujo por evaporación.....	20
3.3.2. Caracterización electroquímica	21
4. Resultados y Discusión.....	23
4.1. Caracterización del flujo.....	23
4.1.1. Flujo por capilaridad	23
4.1.2. Flujo por evaporación	24
4.2. Validación de especies redox	26
4.3. Caracterización electroquímica de la pila	27
4.4. Caracterización de una pila de flujo por evaporación	29
5. Conclusiones	31
6. Agradecimientos.....	32
Bibliografía.....	32
Anexo de seguridad.....	34

Índice de abreviaturas

RAEE: Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico

ECs: Capacitores electroquímicos

EDL: Capa doble eléctrica

SPEED: Self-Powered Engineered Devices

H₂BQS: Ácido hidroquinosulfónico

pBQ: Para-benzoquinona

HQ: Hidroquinona

AO: Ácido Oxálico

LSV: Linear Sweep Voltametry

CV: Cyclic Voltametry

OCP: Open Circuit Voltage

1. Introducción

En las últimas tres décadas el uso de dispositivos electrónicos ha aumentado de forma considerable y, consecuentemente, el ratio de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) está creciendo de una forma alarmante, especialmente en los países pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) donde los mercados están saturados con grandes cantidades de nuevos productos electrónicos[1]. La gran cantidad de RAEE y la amplia variedad de materiales que estos contienen (muchos de ellos potencialmente peligrosos para los humanos y el medio ambiente) ha centrado la atención sobre cómo estos residuos son manipulados, generados y de qué manera pueden evitarse[2].

En los países en desarrollo, la mayoría de los RAEE se reciclan en talleres domésticos que utilizan métodos de desmontaje inapropiados, sin las instalaciones adecuadas para prevenir la contaminación ambiental con los riesgos consecuentes para la salud. Un ejemplo de esto es el que presentan C. Jean M. et al. de la comunidad de Sue Tai Utit, una antigua comunidad situada en Bangkok, Tailandia, que desmantela residuos de equipos eléctricos y electrónicos. Las muestras de suelo superficial en el sitio de desmantelamiento estaban contaminadas con cobre, plomo, zinc y níquel, especialmente alrededor de los vertederos de dichos residuos. El fraccionamiento de metales pesados en este sitio de desmantelamiento fue comparable al de muestras más profundas. Se llegó a la conclusión de que la contaminación comenzó por la chatarra electrónica depositada directamente sobre la superficie del suelo como fuente de metales pesados, luego se acumuló, se oxidó y se liberó a través de procesos naturales redistribuyéndose entre el material y el suelo[3].



Figura 1: Ejemplos de residuos electrónicos[4].

La fracción de residuo que incluye hierro, cobre, aluminio, oro y otros metales representa más del 60% de estos desechos mientras que los contaminantes ocupan el 2,7 %. Dada la alta toxicidad de estos compuestos, especialmente cuando se queman o se reciclan en ambientes no controlados, la Convención de Basilea ha identificado los residuos electrónicos como peligrosos y ha desarrollado un marco para los controles sobre el movimiento transfronterizo de tales desechos [5].

Teniendo en cuenta estos sucesos, la economía circular aparece como una alternativa prometedora para conectar las necesidades tecnológicas de la sociedad actual sin comprometer el medio ambiente. Esta estrategia de producción tiene como objetivo que durante el diseño del producto no solo se piense en su producción y uso, sino también en un proceso de fabricación con el mínimo de consumo energético, con materias primas abundantes y renovables, además de la extensión de su vida útil al máximo posible haciéndolos fáciles de reparar, reutilizar y reciclar.



Figura 2: Diagrama del ciclo de vida de un producto según la economía circular[6].

En la misma línea, la exploración de nuevos materiales no tóxicos, que sean abundantes en la naturaleza y sean biodegradables, se ha extendido. Algunos materiales como la celulosa, la seda y varios polímeros, naturales y sintéticos, están ampliando sus aplicaciones y ya pueden encontrarse en dispositivos comerciales [7,8].

Hasta el momento, se han iniciado avances en el diseño y desarrollo de nuevos conceptos de fuentes de energía usando materiales naturales y biocompatibles para los electrodos y electrolitos, hecho que minimizaría el uso de compuestos dañinos para el

medio ambiente y la salud de la población. Algunos ejemplos de dichos avances son: una pila comestible basada en electrodos de Zn y Pt y un separador hecho de cerámica[9], la degradación de una pila encapsulada en un polímero con electrodos hechos de Mg, Fe, W y Mo[10] y una pila in-vivo para implantes autoalimentados[11].

Fuentes de energía electroquímica

Los sistemas para el almacenamiento y conversión de energía electroquímica incluyen pilas, celdas de combustible y capacitores electroquímicos (ECs), todos ellos representados en la *Figura 3*. A pesar de que los mecanismos de almacenamiento de energía y conversión son diferentes, hay varias similitudes electroquímicas entre estos tres sistemas. Dos de los puntos en común son que los procesos de suministro de energía tienen lugar en la interfaz electrodo/electrolito y que el transporte de electrones e iones están separados. En todos estos sistemas encontramos dos electrodos en contacto con una disolución electrolítica.

En los condensadores electroquímicos (o supercapacitores) la energía no se administra a través de reacciones redox y, por lo tanto, el uso de los términos ánodo y cátodo puede no ser apropiado, pero es de uso común. Mediante la orientación de los iones electrolitos en la interfaz electrolito/electrolito, se forman y liberan las llamadas capas dobles eléctricas (EDL), que dan como resultado un movimiento paralelo de electrones en el cable externo, es decir, en el proceso de suministro de energía.

En las pilas y las celdas de combustible, la energía eléctrica se genera por la conversión de energía química por medio de reacciones redox en el ánodo y el cátodo. Las pilas son sistemas cerrados, con los electrodos siendo el medio de transferencia de carga y teniendo un papel activo en la reacción redox. Es decir, el almacenamiento y conversión de energía ocurren en el mismo compartimento. Dentro de las pilas encontramos dos tipos: pilas primarias, las cuales se desechan después de haberse agotado, y pilas secundarias, las cuales tras la descarga pueden volver a cargarse aplicando un flujo de corriente en la dirección opuesta. Estas últimas también conocidas en español como pilas recargables. Por otra parte, las celdas de flujo son sistemas abiertos donde el ánodo y el cátodo solo actúan como medio de transferencia de carga y las especies que generan la corriente eléctrica mediante reacciones redox son proporcionadas desde fuera de la celda, ya sea por el medio ambiente, como el oxígeno del aire, o desde un recipiente, como por ejemplo combustibles como el hidrogeno o hidrocarburos. En este

caso, el almacenamiento (recipiente) y la conversión de energía (en la celda de combustible) están separados[12].

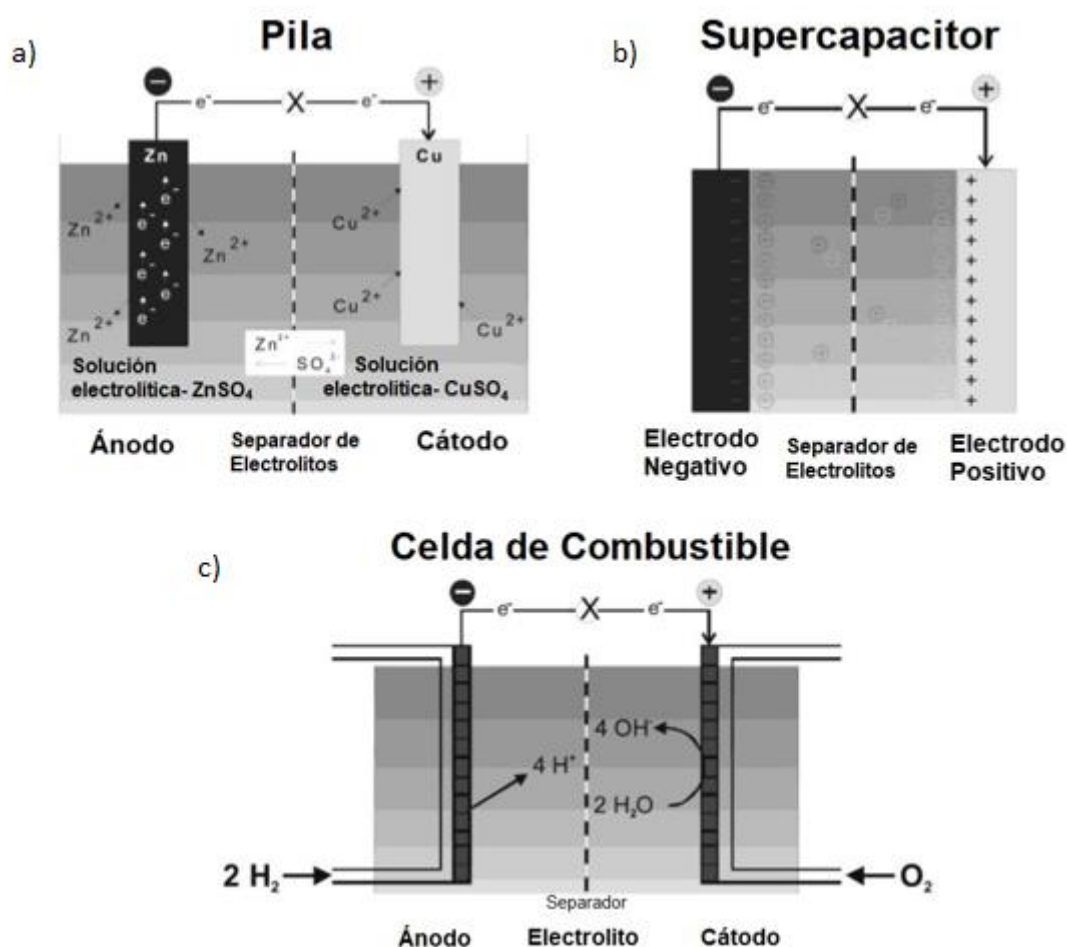


Figura 3: Representación de un pila Daniell (a) mostrando sus elementos claves, un supercapacitor (b) y una celda de combustible (c)[12].

Una pila de flujo, es un tipo de celda electroquímica en la cual la energía proviene de dos compuestos químicos disueltos en contenedores y separados por una membrana, hecho que facilita el intercambio iónico a través de la matriz, mientras que los dos líquidos están en su compartimento. Una pila de flujo puede considerarse como un tipo de celda de combustible siempre que el combustible consumido se extraiga y el sistema se renueve con combustible nuevo. Recientemente, se ha estudiado un tipo de pila de flujo que se basa en el flujo laminar[13] donde dos líquidos son bombeados por un canal en el que ocurren reacciones electroquímicas para almacenar o liberar energía. Las soluciones fluyen en paralelo y el flujo separa naturalmente los líquidos y de esta manera elimina la necesidad de membrana[14].

El almacenamiento de energía y características de los sistemas de conversión de energía siguen directamente las formulaciones de las leyes de la termodinámica y cinética de reacciones químicas adaptadas a las reacciones electroquímicas.

En cuanto a termodinámica electroquímica destaca por encima de todas la ecuación de Nernst (1), donde E es el potencial de la celda, E^0 es el potencial estándar de la celda, R es la constante de gases ideales, T es la temperatura, n es el número de electrones transferidos, F es la constante de Faraday, a_p es la actividad de los productos y A_R es la actividad de los reactivos. Esta ecuación determinará el potencial de la celda en función de los potenciales estándar de los reactivos, de la temperatura y de la actividad de las especies involucradas en la reacción.

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{A_P}{A_R} \quad (1)$$

Por otro lado, la cinética electroquímica sigue las mismas consideraciones que en las reacciones químicas. Sin embargo, difieren en dos puntos: en electroquímica observamos la influencia de la caída de potencial en la doble capa eléctrica en la interfaz del electrodo y también debemos tener en cuenta que las reacciones en el electrodo ocurren de manera bidimensional y no tridimensional.

Estos dos fenómenos se reflejan en las curvas de polarización como se puede observar en la *Figura 4*.

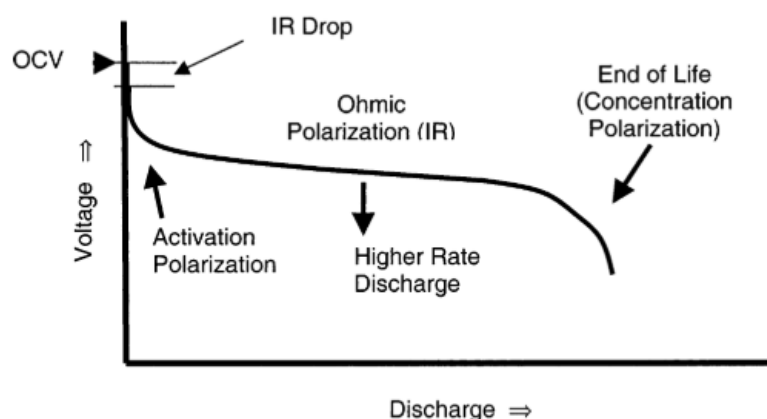


Figura 4: Curva típica de descarga de una pila, mostrando la influencia de varios tipos de polarización.[12].

Básicamente, tres efectos cinéticos deben ser considerados para entender las curvas de polarización:

- 1) Región de activación. Relacionada con la cinética de las reacciones redox electroquímicas teniendo lugar en la interfase electrodo/electrolito. El flujo de corriente, i ($i = I/A$ y $i_o = I_o/A$, donde A es el área del electrodo), de una reacción de transferencia electrónica viene dado por la ecuación de Butler-Volmer

$$i = i_o \exp \frac{\alpha F \eta}{RT} - \exp \frac{(1-\alpha) F \eta}{RT} \quad (2)$$

donde α es el coeficiente de transferencia y η es el sobrepotencial dado por $\eta = E_{ocv} - E_T$, donde E_{ocv} es el potencial de la celda en circuito abierto y E_T es el potencial terminal de la celda. Como se deduce de la ecuación (2) el intercambio de densidad de corriente en esta primera parte está directamente relacionado con la constante de velocidad de la reacción, las actividades de los reactivos y productos y con la caída de potencial a través de la doble capa.

- 2) Región óhmica. Relacionada con la resistencia de los componentes individuales de la celda y a la resistencia debida a los problemas de contacto entre estos. Siguiendo la relación lineal de la Ley de Ohm (ecuación 3).

$$\eta = IR \quad (3)$$

- 3) Región de pérdidas por concentración. Debido a las limitaciones del transporte de masa durante el funcionamiento de la celda, por ejemplo, la difusión de las especies activas hacia la superficie del electrodo para reemplazar las sustancias que ya han reaccionado.

Antecedentes en el grupo de investigación

Este trabajo se enmarca en la línea de investigación en desarrollo de baterías biodegradables dentro del grupo Self-Powered Engineered Devices (SPEED) en el Instituto de Microelectrónica de Barcelona. Este grupo trabaja en la investigación y desarrollo de nuevos dispositivos electrónicos, y dispositivos de almacenamiento de energía, que no tenga ningún impacto medioambiental, sean económicos y un gasto energético mínimo a la hora de manufacturarlos.

En este mismo grupo, se ha diseñado y desarrollado una pila primaria a partir de celulosa, electrodos de carbono y cera de abejas. Se trata de una batería primaria basada en química redox con quinonas que funciona únicamente por difusión[15]. Por lo tanto el hecho de fluir reactivos por capilaridad ya ha sido comprobado. Ahora, se estudiará si la celda puede funcionar por evaporación.

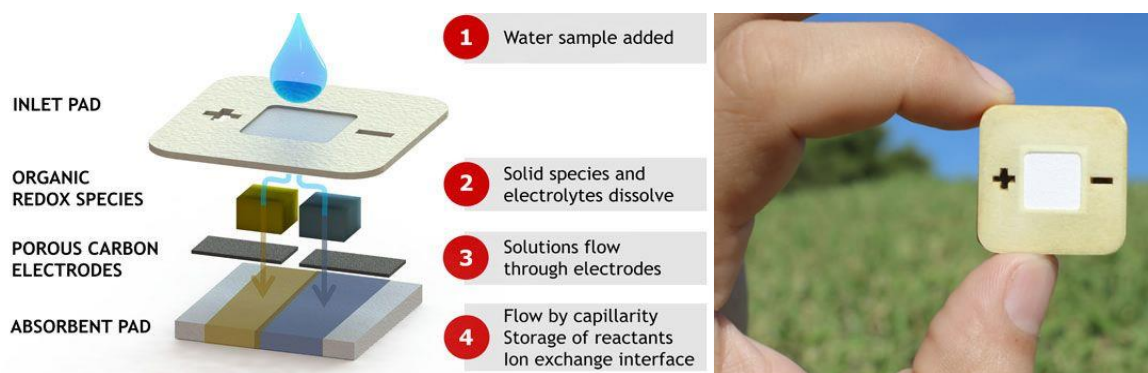


Figura 5. Disposición y diseño de batería primaria basa en difusión [15].

En este trabajo se ha optado por el uso de quinonas como especies redox. Las quinonas son una familia de compuestos químicos resultantes de la oxidación de fenoles. Se pueden encontrar en organismos vivos y son responsables de los colores de muchas plantas. Estos compuestos son un tipo de compuestos aromáticos que contienen dos grupos carbonilo ($C=O$). En este grupo se pueden incluir benzoquinonas, naftoquinonas o antraquinonas, entre otros. Al aumentar el número de anillos a la estructura se aprecia una disminución de la solubilidad y también del potencial estándar de reducción[16], parámetros que podemos modificar añadiendo diferentes grupos funcionales a la estructura de estas moléculas [17]. Cuando las quinonas se reducen reversiblemente a sus respectivas hidroquinonas, los dos grupos carbonilo se transforman en dos grupos hidroxilo ($-OH$).

Además, las quinonas cumplen gratamente los criterios establecidos para los reactivos de la pila que se estudia en este trabajo: son altamente biodegradables, presentan una rápida cinética en electrodos de carbono y no necesitan catalizador, tienen una buena solubilidad en agua y, por lo tanto, facilidad para fluir por capilaridad y su existencia en la naturaleza es abundante. También, son compuestos muy baratos y pueden ser extraídos de sustancias presentes en plantas, haciéndolas respetuosas con el medio ambiente.

En los últimos años, al concepto de las pilas de flujo se han sumado los conocimientos sobre sistemas microfluídicos basados en papel. El papel está hecho de una matriz porosa de fibras hidrofílicas donde el impulsor del flujo es la capilaridad. Las fibras hidrofílicas favorecen la adhesión y la difusión de líquidos, mientras que la tensión superficial del líquido tiende a disminuir el área entre fases líquido-gas, resultando en la absorción del fluido. Este hecho permite que el líquido fluya a través del papel sin el uso de una fuente de bombeo externa como ocurre en la microfluídica tradicional.

A su vez, mientras el fluido avanza por el papel, la fuerza de arrastre, provocada por la viscosidad del fluido, contrarresta el avance. Por tanto, en un medio poroso se crea un flujo capilar debido a la tensión superficial y se mantiene debido a la diferencia de presiones entre el área mojada del papel y el área seca al frente del fluido, donde la presión es menor. Como resultado, la velocidad, y en consecuencia el caudal de flujo, dependerá del equilibrio entre la tensión superficial y la resistencia viscosa del fluido o fuerza de arrastre[18]. En la *Figura 6* se puede observar esquemáticamente el proceso descrito.

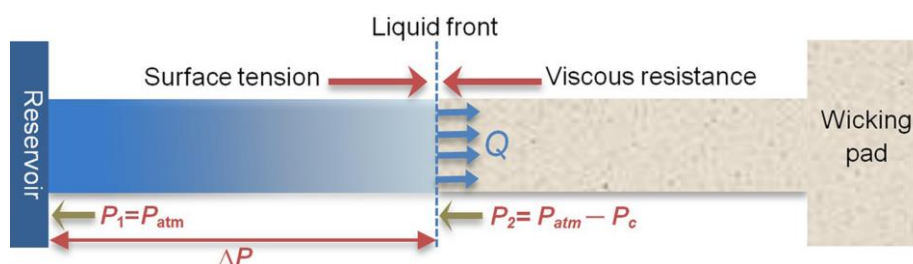


Figura 6: Esquema de las fuerzas involucradas en el flujo de microfluidos impulsado por capilaridad en papel. P_{atm} = Presión atmosférica, P_c = Presión provocada por las fuerzas de capilaridad, Q = caudal de flujo[18].

En este trabajo se detalla la metodología que se ha llevado a cabo a lo largo de la caracterización de una pila biodegradable con el fin de utilizarla como fuente de energía portátil y desechable. En él se exponen los materiales utilizados, los métodos para la caracterización del flujo y el diseño del dispositivo. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la validación de las especies redox, la caracterización de flujo capilar y por evaporación de la pila y sus características electroquímicas con el objetivo de conocer si es viable el desarrollo de una pila basada en el flujo por evaporación, haciéndola así más duradera en el tiempo.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el diseño y desarrollo de una celda de flujo basada en fibras de papel y carbono y, por lo tanto, biodegradable y desechable. Esta pila deberá trabajar en un régimen de flujo por evaporación, provocando que las especies redox, quinonas, pasen a través de los electrodos y se obtenga un funcionamiento constante y fiable.

Para hacer posible el objetivo principal se elaboran un seguido de objetivos secundarios:

- Diseño y fabricación de componentes para el montaje de celdas microfluídicas basadas en papel.
- Diseño y desarrollo de diferentes celdas con el objetivo de comprender y optimizar el sistema.
- Montaje y caracterización del flujo en papel por evaporación.
- Evaluación y capacitación en caracterización electroquímica de especies redox.
- Montaje y caracterización de una celda de flujo con especies redox.
- Optimización del dispositivo final.

La pila marcada como objetivo deberá generar un potencial y corriente suficiente para alimentar sensores en lugares remotos y campos de cultivo, donde al finalizar su vida útil pueda degradarse y no provocar daños en el medio ambiente.

3. Parte experimental

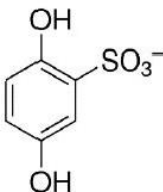
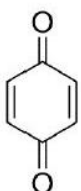
3.1. Materiales

3.1.1. Especies químicas

Las especies químicas redox utilizadas para la pila fueron el ácido hidroquinosulfónico (H₂BQS, CAS 21799-87-1), p-Benzoquinona (pBQ, CAS 106-51-4), hidróxido de potasio (KOH, CAS 1310-58-3) y ácido oxálico dihidratado (C₂H₂O₄·2H₂O, 6153-56-6), todos ellos comprados de Sigma Aldrich, St. Louis, Missouri, US.

La disolución correspondiente a la parte anódica de la pila se preparó disolviendo 0,2286 g de H₂BQS en 10 mL 1M de KOH, resultando en una disolución de 0,1M de H₂BQS (anolito). Por otro lado, la disolución catódica se obtiene disolviendo 0,1081 g de pBQ en 10 mL 0,5 M de C₂H₂O₄, obteniendo una disolución 0,1M de pBQ (catolito). La concentración de los electrolitos se ha calculado teniendo en cuenta la estequiometría de la reacción, apreciable en la tabla 1. Ambas soluciones se prepararon en pequeños volúmenes debido a que utilizamos 6 mL de cada disolución para hacer la pila operativa.

Tabla 1. Especies químicas utilizadas como anolito y catolito.

	Nomenclatura	Abreviación	Estructura	Reacción
Ánodo	Ácido hidroquinosulfónico	H ₂ BQS		$\text{H}_2\text{BQS} \rightarrow \text{BQS} + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+$
Cátodo	p-benzoquinona	pBQ		$\text{pBQ} + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{HQ}$

Los compuestos químicos usados para estudiar el flujo capilar de la pila mediante una disolución tintada fueron sal disódica de eurioglaucina ($C_{37}H_{34}Na_2N_2O_9S_3$, CAS 3844-45-9), de color azul, y tartrazina ($C_{19}H_9N_4Na_3O_9S_2$, CAS 1934-21-0), de color amarillo. Ambos compuestos se obtuvieron también de Sigma Aldrich, St. Louis, Missouri, US y se disolvieron por separado en agua destilada obteniendo concentraciones 100mM.

3.1.2. Materiales del dispositivo

Todos los componentes usados para el montaje de este dispositivo han sido diseñados usando CorelDraw (Corel, Ottawa, Canadá), un programa de diseño asistido por computadora.

El canal de entrada es de Standard 14, papel basado en fibra de vidrio con un grosor de 355 μm mientras que para el canal de salida se ha usado Whatman 1, basado en celulosa con un grosor de 180 μm . Ambos proporcionados por GE Healthcare. Pittsburgh, PA, US. Los adhesivos sensibles a la presión (PSA) utilizados en el soporte de la pila se han obtenido de Adhesives Research, Glen Rock, PA, US. Por otra parte, los electrodos TORAY utilizados son de papel poroso de fibra de carbono con un grosor 355 μm (TGP-H-090, Toray, Tokio, Japón). Estos electrodos se someten a un tratamiento térmico para favorecer su hidrofiliidad. Finalmente, se fabricó un soporte hecho de polimetilmetacrilato de 4 mm de grosor (Plexiglas, Evonik Performance Materials GmbH, Darmstadt, Alemania). Todos los componentes de este dispositivo se cortaron utilizando un cortador láser de CO_2 (Mini 24, Epilog Laser, Golden, CO, US) y ensamblados manualmente capa a capa usando plantillas y pines de alineación.

3.2. Diseño del dispositivo

El dispositivo está diseñado de tal forma que la pila, hecha de fibra de vidrio, fibra de carbono y papel de celulosa, queda situada sobre una plataforma de polimetilmetacrilato (PMMA). Este soporte contiene dos compartimentos separados en los que introduciremos las disoluciones de las especies redox, anolito a la izquierda y catolito a la derecha. Una vez los canales de entrada se sumergen en las disoluciones de manera simultanea, las especies empiezan a fluir por capilaridad a través de la fibra de vidrio. Seguidamente, los compuestos redox pasaran a través de los electrodos de fibra de carbono donde reaccionarán y provocaran el paso de electrones a través de un cable externo. Las especies ya reaccionadas, y algunos reactivos, pasaran al papel basado en celulosa y seguiran su curso hasta el absorbente, llenándolo desde el centro.

Finalmente, el disolvente, en nuestro caso agua, se evaporará provocando que el absorbente pueda aceptar más fluido y, en consecuencia, siga funcionando la pila al hacer pasar más reactivos por los electrodos. En la *Figura 7* se puede apreciar un esquema del dispositivo.

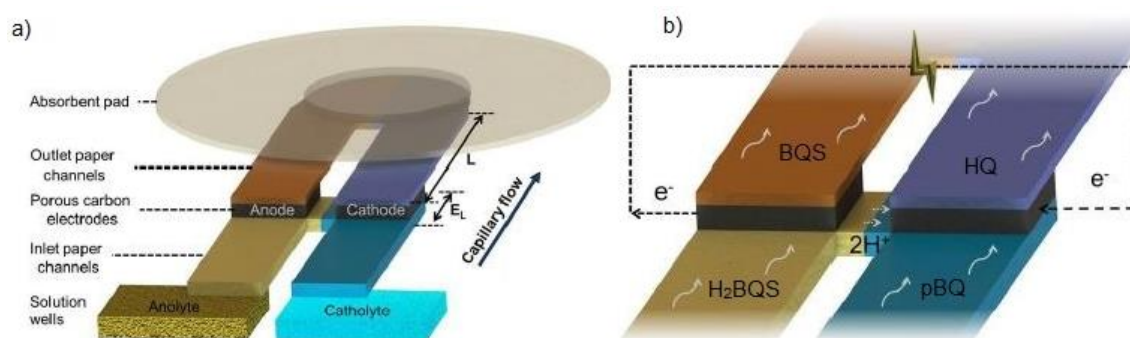


Figura 7. Esquema ilustrativo de la composición y distribución de la pila(a) y del recorrido de las especies(b).

En la *Figura 8* se puede apreciar una imagen real de la pila montada.

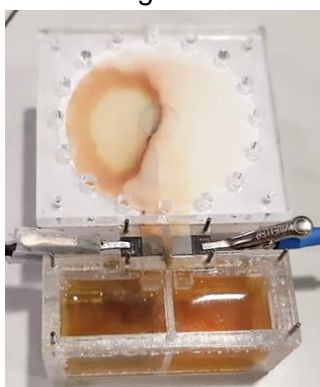


Figura 8. Imagen real del dispositivo en uso.

Con el objetivo estudiar de una manera más sencilla la viabilidad del dispositivo y conocer si era posible conseguir una pila basada en la evaporación, en una primera instancia se simplificó el sistema y se construyó un dispositivo de un solo canal. Con este, únicamente se trabaja con colorantes y no con especies redox, ya que solamente contamos con un electrodo.

3.3. Métodos

3.3.1. Caracterización de flujo

El flujo de las disoluciones de especies redox en una pila basada en la capilaridad es un parámetro a medir para validar la eficiencia del sistema y entender su funcionamiento.

El flujo capilar, definido como Q , se puede definir como el volumen de fluido que fluye a través de una sección de área por unidad de tiempo y se puede calcular siguiendo la siguiente ecuación:

$$Q = vA = \frac{\Delta A}{\Delta t} C \quad (4)$$

Donde Q es el flujo capilar ($\mu\text{L/s}$), v , velocidad de flujo (mm/s), A , área de la sección por la que circula el fluido (mm^2) y C , capacidad absorbente del papel ($\mu\text{L/mm}^2$).

Para la caracterización del flujo se han utilizado disoluciones tintadas en lugar de las disoluciones de las especies redox, ya que permiten observar con mayor facilidad un cambio en el absorbente. A pesar de esto, más tarde se ha podido comprobar que el flujo capilar no varía utilizar las disoluciones de las especies redox ya tienen un comportamiento muy similar a las tintadas.

3.3.1.1. Flujo por capilaridad

Para determinar el flujo capilar, tanto para el sistema monocal como para el bicanal, el procedimiento a seguir ha sido introducir en los compartimentos de la pila las disoluciones tintadas antes mencionadas y siguiendo un análisis visual. Este consiste en obtener imágenes cada cierto lapso de tiempo del absorbente final después de sumergir los canales de entrada en las disoluciones tintadas. Midiendo el aumento de área coloreada en el absorbente en función del tiempo (*Figura 9*) y sabiendo la capacidad absorbente del absorbente, en este caso el Whatman1 ($7 \mu\text{L/mm}^2$), se puede calcular el flujo capilar utilizando la *Ecuación 4*. Para este fin se ha utilizado una webcam Logitech C920 HD Pro (Logitech Europe S.A., Laussane, Suiza) y las imágenes han sido analizadas utilizando el programa ImageJ (US National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA).

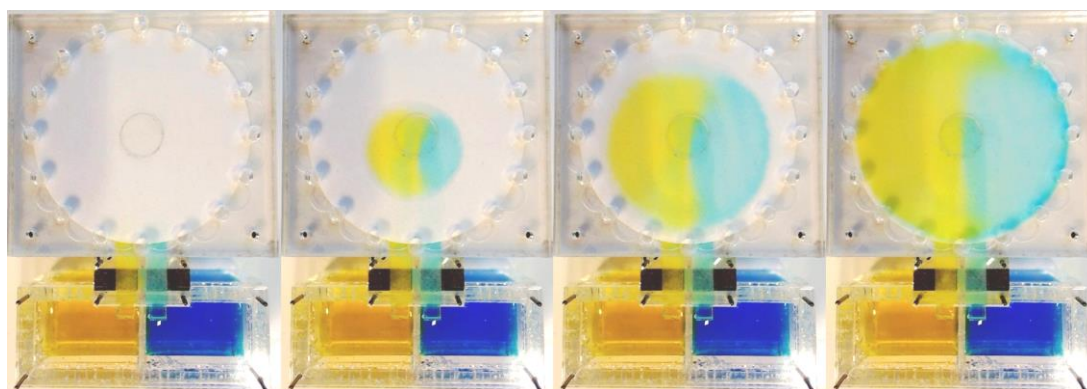


Figura 9. De izquierda a derecha se puede observar la evolución de las disoluciones tintadas en el absorbente.

3.3.1.2. Flujo por evaporación

Para determinar el flujo por evaporación, también para ambos sistemas, se han usado las mismas disoluciones tintadas y un sistema de captura de imágenes. Pero al ser el flujo por evaporación menor que el flujo por capilaridad se ha optado por tomar imágenes del nivel de la disolución presente en el compartimento para esta, en lugar de tomar imágenes del absorbente ya que este seguiría saturado. En este caso el dispositivo se ha dejado funcionando durante toda la noche (aproximadamente 18h) y luego usando el programa ImageJ para analizar las fotos se ha podido ver la variación del nivel de la disolución. Conociendo la variación del nivel (apreciable en la *Figura 10*) y las dimensiones del compartimento podemos conocer la variación de volumen en función del tiempo y, por lo tanto, el flujo por evaporación.

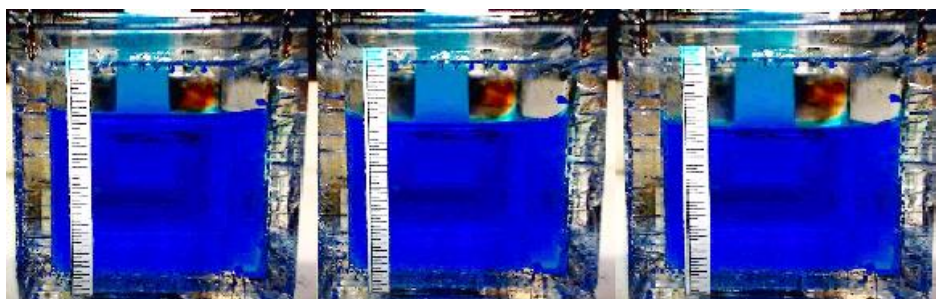


Figura 10. Secuencia de imágenes donde se aprecia la variación de nivel.

Para estudiar como varía el flujo por evaporación en función del área de absorbente en contacto con el aire se han diseñado diferentes tapas que después se colocarían encima de este: una con la que todo el absorbente está en contacto con el aire, otra que lo tapa completamente y por último una en la que solo el 50% del absorbente está tapado. Además, se ha estudiado también como varía el flujo por evaporación reduciendo el área del absorbente a la mitad y, más tarde, dejando ambas caras del absorbente en contacto con el aire, ambos dispositivos completamente abiertos. En la *Figura 11* se pueden ver imágenes de estos dispositivos.

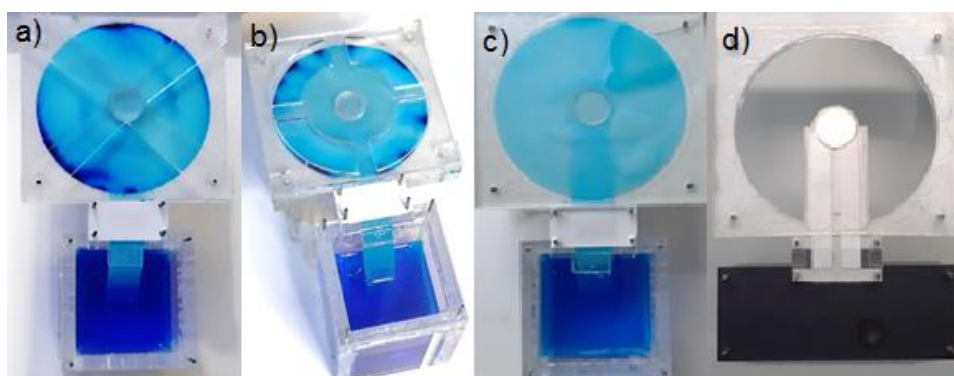


Figura 11. Imágenes del dispositivo abierto (a), 50% abierto (b), cerrado (c) y dos caras (d).

3.3.2. Caracterización electroquímica

Con el objetivo de determinar las características electroquímicas de la pila se han utilizado las técnicas usadas a continuación:

- Cronopotenciometría: se trata de una técnica electroanalítica que permite observar la evolución de la variación de potencial entre dos electrodos en función del tiempo. Esta técnica ha sido utilizada con el objetivo de conocer la variación de potencial obtenido por la pila y la durabilidad de esta. Para ello se ha medido la evolución del potencial en función del tiempo conectando resistencias de diferente valor a la pila estudiada.
- Voltametría Lineal (*Lineal sweep voltametry*, LSV): esta es una técnica electroanalítica utilizada para medir la intensidad de un sistema variando el potencial aplicado, ya sea de forma creciente o decreciente. Al llegar a este valor marcado la técnica no vuelve al valor inicial, como se observa en las voltametrías cíclicas. En este trabajo siempre se ha utilizado una velocidad de variación de potencial de 50 mV/s.
- Voltametría Cíclica (*Cyclic voltametry*, CV): es una técnica electroanalítica que, como en la voltametría lineal, mide la intensidad de un sistema electroquímico en función de una variación del potencial aplicado con la diferencia de que en esta técnica el potencial varía hasta un valor marcado y después vuelve al valor inicial. Cuando esta técnica es utilizada se puede observar a que potenciales ocurren una oxidación y/o una reducción, ya que se detecta un pico de intensidad en dicho punto, como ocurre en las voltametrías lineales si se escoge una ventana de potenciales de trabajo adecuada. La altura de este pico es directamente proporcional a la concentración de la especie redox. Esta técnica se ha utilizado para estudiar las especies redox por separado y tener conocimiento de la variación de potencial esperado a la hora de estudiar la pila. Se utiliza un sistema de tres electrodos: el electrodo de trabajo es aquel en el que ocurre la reacción de interés, el electrodo de referencia se utiliza para medir el potencial contra otros electrodos ya que tiene un potencial de equilibrio estable y conocido. Por otro lado, el contraelectrodo es aquel que compensa la corriente generada a causa del electrodo de trabajo.

Los datos obtenidos de los diferentes experimentos se han adquirido usando un DropSens μ Stat400 Biopotentiostat/Galvanostat y el software DropView 8400 (DropSens S.L., Asturias, España). Para el estudio de las especies químicas individualmente se ha utilizado un electrodo carbón vitro de área conocida como electrodo de trabajo, un electrodo de platino utilizado de contra y un electrodo de plata-cloruro de plata (Ag/AgCl) como electrodo de referencia, todos ellos obtenidos de Metrhom, AG, Herisau, Suiza.

4. Resultados y Discusión

En este apartado todos los resultados obtenidos a través de los experimentos antes detallados son presentados y discutidos.

Todos los experimentos se han repetido tres veces con el objetivo de asegurar la reproducibilidad. Aun así, se presenta únicamente la media de dichos experimentos.

4.1. Caracterización del flujo

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de los experimentos realizados para medir el flujo, tanto capilar como por evaporación. Para ello se ha seguido el procedimiento explicado anteriormente en el apartado “3.3.1 Caracterización del flujo”. El objetivo en este sentido siempre ha sido la consecución de un flujo constante para cada dispositivo con el objetivo de validar el sistema y demostrar su reproducibilidad.

4.1.1. Flujo por capilaridad

Con el objetivo de caracterizar el flujo capilar, se realizan diferentes medidas, tanto en el sistema monocanal como en el bicanal. Un flujo constante durante un cierto periodo de tiempo y con buena reproducibilidad es un objetivo importante, ya que se podrá lograr un mejor rendimiento de la pila. Los resultados obtenidos se muestran en la *Figura 12*.

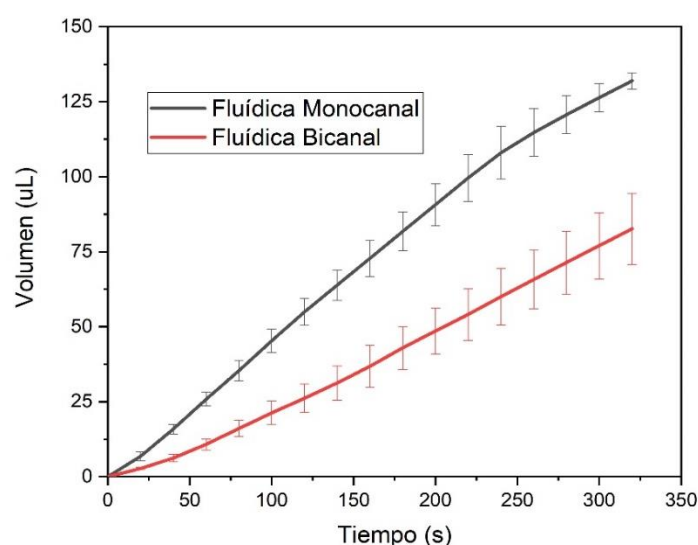


Figura 12. Volumen de disolución absorbido por la pila respecto tiempo en un régimen de flujo capilar. Los puntos y líneas de datos representan valores medios para $n=3$.

Los valores medios del flujo para el sistema monocal y el bicanal han sido $0.46\mu\text{L/s}$ y $0.30\mu\text{L/s}$, respectivamente.

La diferencia de flujo capilar entre los dos sistemas se debe a la diferente disposición de los componentes de la pila. Mientras en el sistema monocal solo tenemos un canal de entrada, un electrodo y un canal de salida, en el sistema bicanal se doblan todos ellos. Aun así, estos valores, más allá de validar el sistema, no proporcionan una información rentable para el funcionamiento de la pila debido a que el objetivo de este trabajo es lograr un buen funcionamiento por flujo de evaporación. Mientras que en un régimen únicamente de flujo capilar la pila trabaja durante 9 minutos, el objetivo marcado es que en un régimen de flujo por evaporación pueda llegar a operar durante días o incluso semanas.

4.1.2. Flujo por evaporación

En este apartado se muestran los resultados obtenidos al estudiar el flujo por evaporación de la pila variando la cantidad de absorbente expuesta al aire. Los resultados obtenidos se muestran en la *Figura 13*.

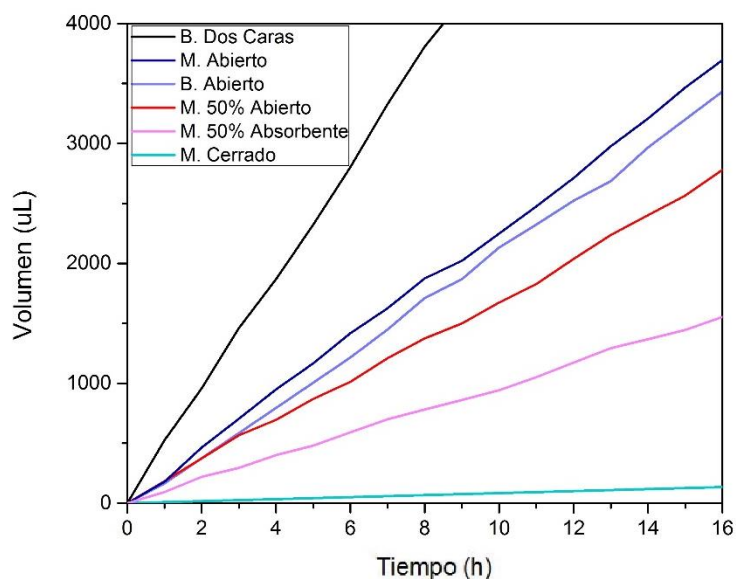


Figura 13. Volumen de disolución absorbido por la pila respecto tiempo en un régimen de flujo por evaporación. Los puntos y líneas de datos representan valores medios para $n=3$.

Los valores del flujo por capilaridad para el sistema monocal abierto, 50% abierto y cerrado son 0.23mL/h , 0.17mL/h y 0.007mL/h , respectivamente. Para el sistema bicanal abierto se ha obtenido un valor de 0.22mL/h mientras que para el dispositivo con un absorbente con la mitad de área se ha medido un flujo de 0.1mL/h . Por último, el valor obtenido para el sistema con las dos caras del absorbente expuestas al aire se obtiene un valor de caudal de 0.46mL/h .

Los resultados obtenidos muestran que a medida que aumenta el área del absorbente en contacto con el aire aumenta el flujo de disolución que pasa a través de los electrodos. Esto ocurre debido a que cuanto mayor es la superficie del papel en contacto con el aire, obtenemos una mayor evaporación del disolvente, en este caso el agua. Por lo tanto, el absorbente va perdiendo agua por evaporación y provoca que la disolución siga fluyendo desde los depósitos de reserva.

Comparando el flujo por evaporación del dispositivo monocanal abierto y monocanal 50% abierto, 0.23mL/h y 0.17mL/h respectivamente, se aprecia que no se obtiene un resultado proporcional entre el flujo y el área del absorbente al descubierto. Con el fin de comprender mejor el sistema se optó por reducir el área del absorbente a la mitad. En esta medida sí que se pudo relacionar el flujo por evaporación con el área del absorbente ya que se obtuvo un flujo de 0.1mL/h respecto los 0.2mL/h del sistema monocanal abierto.

Por otro lado, se ha podido observar que el flujo por evaporación del sistema monocanal y bicanal abierto son prácticamente iguales y por ello se extrapolará al resto de sistemas.

En la tabla 2 se puede apreciar un resumen de los valores de flujo por evaporación obtenidos en estos experimentos.

Tabla 2. Tabla resumen de los valores de flujo por evaporación obtenidos

	Tipo de sistema				
	Abierto	50% Abierto	Cerrado	50% Abs	Dos Caras
Monocanal	0,23 mL/h	0,17 mL/h	0,007 mL/h	0,10 mL/h	-
Bicanal	0,22 mL/h	-	0,016 mL/h	-	0,46 mL/h

4.2. Validación de especies redox

Como ya se ha mencionado en la introducción de este trabajo, para este proyecto se han utilizado compuestos basados en la estructura de las quinonas. Se utilizan estos compuestos debido a su alta biodegradabilidad, rápida cinética en electrodos de carbono sin necesidad de catalizador, son solubles en agua y su existencia en la naturaleza es abundante, haciéndolos reactivos baratos y respetuosos con el medio ambiente.

La disolución anódica se consigue disolviendo la sal potásica del ácido hidroquinossulfónico en una disolución KOH 1M hasta conseguir una concentración 0,1M. Por otro lado, la disolución catódica se prepara disolviendo p-Benzoquinona en una disolución de ácido oxálico 0.5M, resultando en una disolución 0.1M de pBQ. El beneficio de usar un medio ácido en el cátodo y un medio alcalino en el ánodo es doble. Por una parte, se incrementa el potencial de Nernst de la celda entre los dos electrodos, hecho que se traduce en un mayor rendimiento de la pila. Por otro lado, al llegar las disoluciones al absorbente ambos electrolitos se neutralizan al mezclarse, provocando así un incremento de la seguridad al desechar la pila.

Se ha estudiado el carácter redox de ambas disoluciones por separado, mediante voltametrías cíclicas apreciables en la *Figura 14*, y en uso en la pila, obteniendo un potencial de circuito abierto (OCP) mayor a 0.7 V, adecuado para las aplicaciones deseadas.

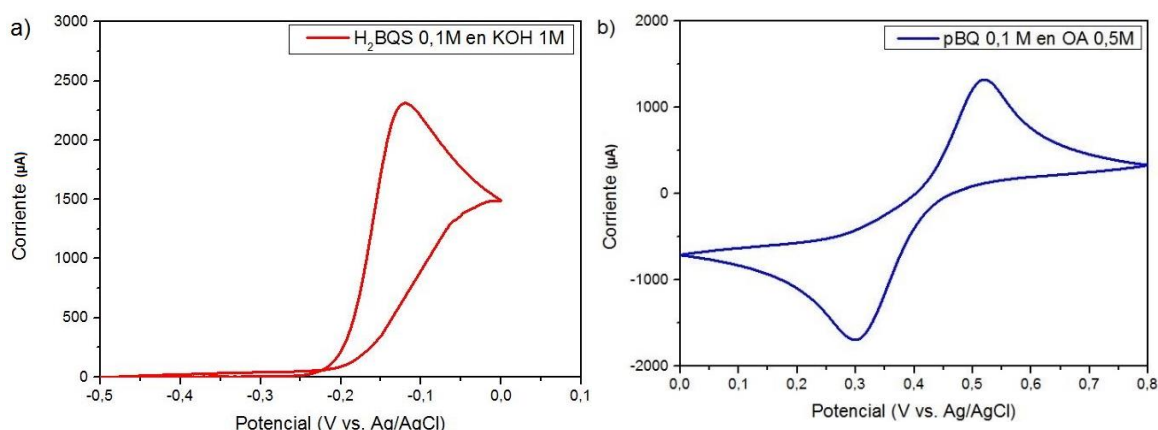


Figura 14. Voltametría cíclica de la disolución anódica (a) y catódica (b).

La voltametría cíclica de la disolución anódica (a) muestra de izquierda a derecha la oxidación irreversible de la hidroquinona utilizada, obteniendo una intensidad de pico de $2250\mu\text{A}$. Por otro lado, en la parte inferior de la voltametría de la disolución catódica podemos observar de derecha a izquierda la reducción de la p-benzoquinona, en este caso de forma reversible ya que en la parte superior del gráfico vemos de izquierda a derecha la oxidación para dar el reactivo inicial. En esta última gráfica se observa una menor intensidad de pico debido a una menor solubilidad de la p-BQ en agua y una menor conductividad iónica por parte del ácido oxálico.

De esta manera, se dan por validadas las especies químicas y sus respectivas disoluciones pudiendo asegurar que obtenemos los requisitos necesarios para alimentar sensores y otros dispositivos.

4.3. Caracterización electroquímica de la pila

Con el objetivo tener un mayor entendimiento de la pila, se realizan voltametrías lineales en régimen de flujo capilar y sin este. Los resultados se muestran en la *Figura 15*.

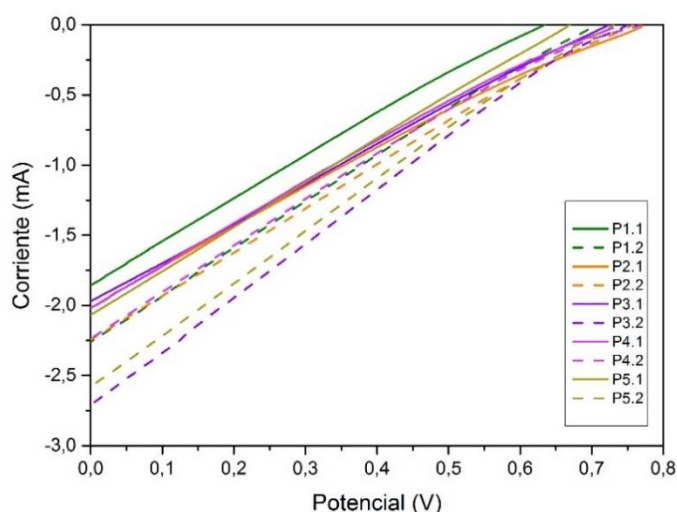


Figura 15. Voltametrías lineales de la pila en régimen de flujo capilar (líneas lisas) y sin flujo capilar (líneas discontinuas).

En estas curvas de polarización podemos apreciar la obtención de una corriente mayor a -1.75mA cuando la pila trabaja con flujo capilar y mayor a -2.25mA sin flujo capilar. Al ver las voltametrías, apreciamos que son líneas rectas y no se curvan en la parte final, a potenciales más bajos. Esto, conociendo los distintos efectos que se pueden apreciar en las curvas de polarización mencionadas en la introducción, se puede traducir en el hecho de que la pila no llega a un proceso de polarización por difusión, sino que se mantiene en un régimen de polarización óhmica.

Estas voltametrías no están realizadas en un sistema de flujo por evaporación, pero a través de ellas se ha podido obtener valores de resistencias que al conectarlas a la pila trabajaría a potencia máxima, 0.1V y 0.5V. Los resultados obtenidos se muestran en la *Figura 16*.

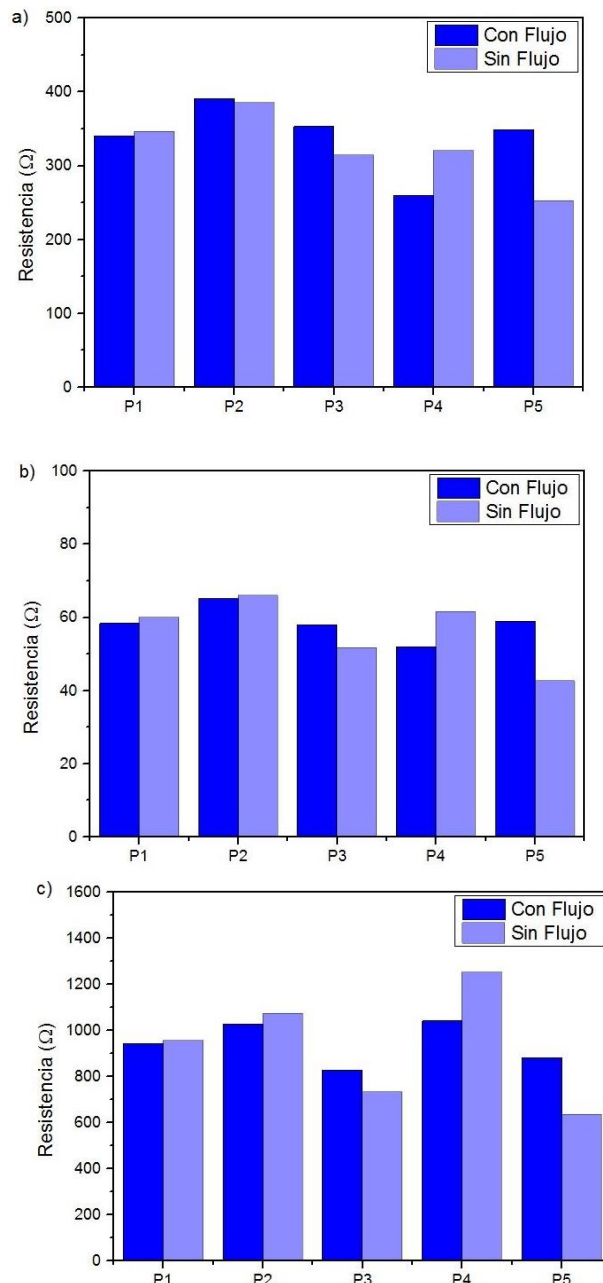


Figura 16. Resultados del cálculo de resistencias con el fin de que la pila trabaje a potencia máxima (a), a 0.1V (b) y a 0.5 V (c).

Por lo tanto, para que la pila funcione a potencia máxima, a 0.1V y a 0.5V, se han escogido resistencias de 330 Ω , 60 Ω y 900 Ω , respectivamente.

4.4. Caracterización de una pila de flujo por evaporación

Tal y como se ha descrito anteriormente, se conectan tres resistencias al dispositivo y se evalúa el comportamiento de este mediante cronopotenciometrías. En la *Figura 17* se muestran los resultados obtenidos.

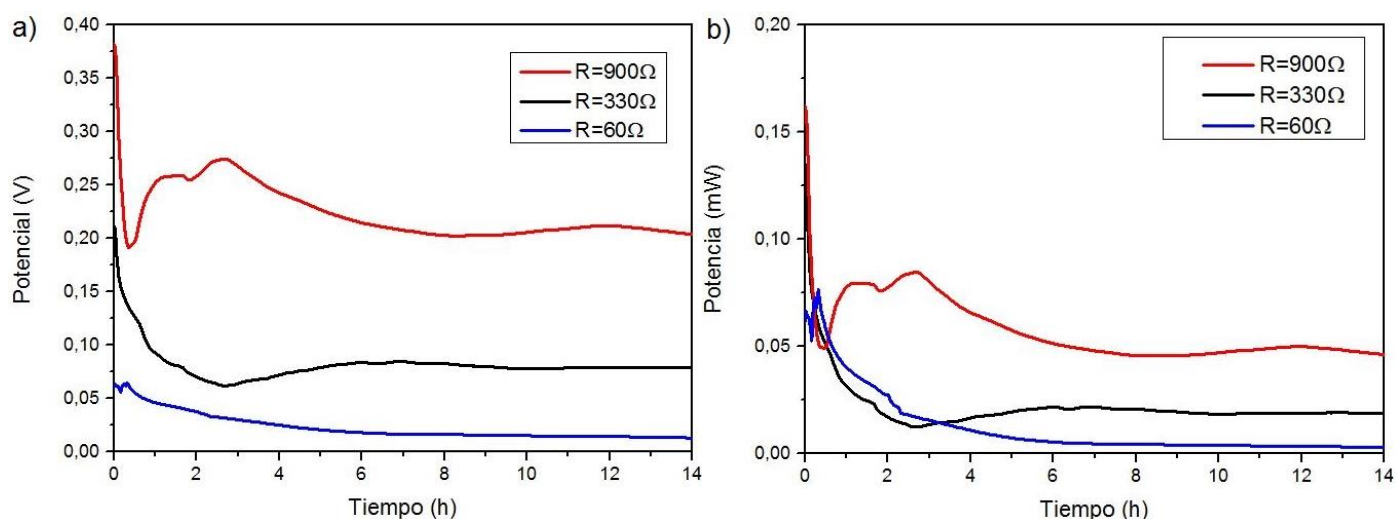


Figura 17. Cronopotenciometría realizada del dispositivo abierto conectando diferentes resistencias externas (a) y representación de la potencia respecto el tiempo (b). Los puntos y líneas de datos representan valores medios para $n=3$.

Los valores medios obtenidos para $R=900\Omega$, $R=330\Omega$ y $R=60\Omega$ han sido 0.22V, 0.06V y 0.01V, respectivamente. Los resultados obtenidos eran los esperados teniendo en cuenta la Ley de Ohm, que implica que a mayor resistencia alcanzaremos un mayor potencial. En cuanto a la potencia obtenida, en el mismo orden los valores medios obtenidos son 0.50mW, 0.02mW y 0.002mW. La cronopotenciometría resulta presenta una caída de voltaje inicial que se estabiliza a partir de 2 horas en la mayoría de los casos.

De este experimento podemos concluir que manteniendo el mismo flujo por evaporación, aumentaremos el potencial obtenido conectando una resistencia mayor.

En el mismo sentido, se estudia como puede afectar una misma resistencia de 330Ω variando el flujo por evaporación utilizando diferentes dispositivos. Los resultados se muestran en la *Figura 18*.

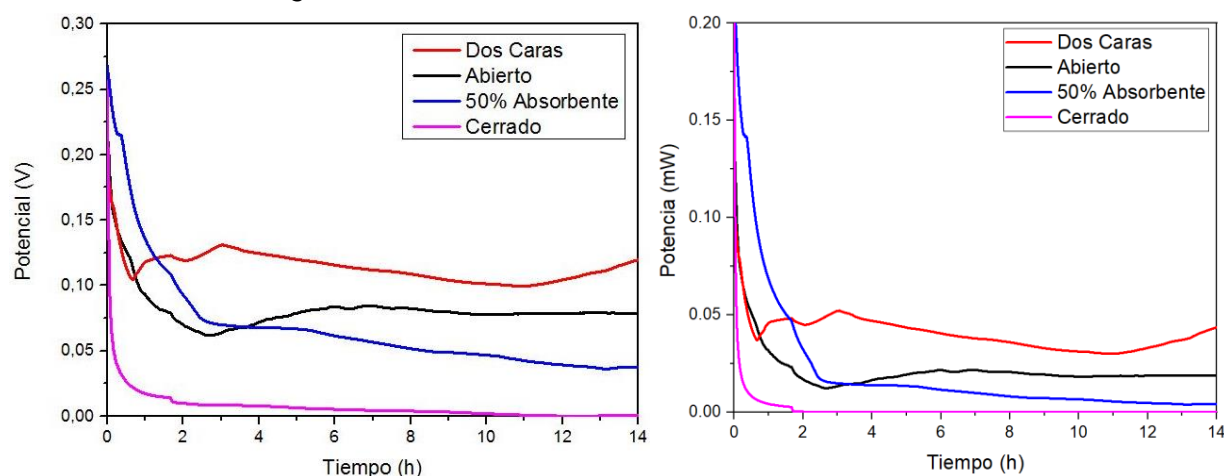


Figura 18. Cronopotenciometría realizada de distintos dispositivos conectando una resistencia externa de 330Ω (a) y representación de la potencia respecto el tiempo. Los puntos y líneas de datos representan valores medios para $n=3$.

Los valores medios de potencial entre 2 y 14 horas obtenidos para el sistema abierto por las dos caras y el sistema abierto y cerrado son 0.12V y 0.08V, respectivamente. Para el sistema con el absorbente reducido a la mitad el voltaje medio ha sido 0.05V en el mismo intervalo. Y finalmente, para el sistema cerrado observamos que el potencial cae por debajo de 0.002V a partir de las dos horas de funcionamiento. Mientras, en el mismo orden, los valores medios de potencia calculada a partir de los valores de voltaje promedio son 0.04mW, 0.023mW y 0.005mW, para el sistema abierto por las dos caras, el sistema abierto y el sistema con el absorbente reducido a la mitad, respectivamente.

Valorando los datos obtenidos observamos que a un valor fijado de resistencia, 330Ω en este caso, a medida que aumentamos el flujo por evaporación del dispositivo aumenta el potencial obtenido y, consecuentemente, la potencia.

5. Conclusiones

En este trabajo, se ha desarrollado una celda de flujo basada en fibras de papel y carbono y, por lo tanto, biodegradable y desechable. En consecuencia, se establece como logrado el objetivo principal marcado al principio del estudio.

La pila trabaja en un régimen de flujo por evaporación, provocando que las especies redox, quinonas, pasen a través de los electrodos y se obtenga un buen funcionamiento de la pila. Al evaluar las especies redox, y sus respectivas disoluciones, se han podido establecer como especies químicas válidas para este dispositivo, proporcionando unos valores de potencial y intensidad adecuados para las aplicaciones deseadas.

Al estudiar diferentes sistemas, se ha podido obtener celdas con diferentes flujos por evaporación. Al valorar los resultados se ha podido apreciar una relación entre el área expuesta del absorbente y el flujo por evaporación. A mayor área expuesta, provocaremos una mayor evaporación del disolvente en el absorbente y este podrá aceptar más líquido que provendrá de los compartimentos de reserva.

Además, al caracterizar electroquímicamente el dispositivo basado en un régimen de evaporación, se ha podido observar que al conectar una mayor resistencia a la pila obtendremos un mayor potencial, tal y como demuestra la ley de Ohm. También, se ha observado que el potencial y la intensidad obtenidas por la pila hacen posible su aplicación como fuente de energía de sensores en localizaciones remotas.

Finalmente, al conectar una misma resistencia a dispositivos con un diferente flujo por evaporación, se ha podido establecer una dependencia. A mayor flujo por evaporación, mayor cantidad de especie redox pasará a través del electrodo y, en consecuencia, se obtendrán valores de potencial más altos.

Como futuros proyectos en el marco de este trabajo, se marcan dos principales objetivos. El primero es estudiar el efecto electroquímico que podría tener variar el grosor y longitud de los electrodos. Por último, sería adecuado estabilizar el sistema frente a diferentes condiciones de humedad, temperatura y presión.

6. Agradecimientos

Me gustaría agradecer a Juan Pablo Esquivel y Neus Sabaté por darme la oportunidad de desarrollar este trabajo dentro del SPEED Research Group. Doy las gracias a todos los miembros del grupo por hacerme sentir un miembro más del grupo y por esta experiencia tan agradable y enriquecedora. Especialmente, quiero agradecer a Marina Navarro por ser la persona que me ha ayudado a adaptarme al laboratorio, me ha introducido en el mundo de la investigación y me ha guiado a través de todo el trabajo. Ha sido una pieza fundamental para la elaboración de este proyecto.

Además, me gustaría agradecer a mis padres, Antonio y Aurora, a mi hermano, Ian, y a todos mis amigos y amigas por hacer de este un camino más fácil y llevadero. Finalmente, deseo agradecer a Rebeca por todo el apoyo y la motivación aportadas durante la elaboración de este trabajo.

Bibliografía

- [1] Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M., Böni, H., 2005. Global perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review* 25 (5), 436–458.
- [2] F.O. Ongondo, I.D. Williams, T.J. Cherrett, How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes, *Waste Manag.* 31 (2011) 714–730. doi:10.1016/j.wasman.2010.10.023.
- [3] C. Jean M., H.A. Ronald. Electronic waste management approaches: An overview. *Waste Manag.* 33 (2013) 1237–1250. doi: 10.1016/j.wasman.2013.01.006.
- [4] Staff, M. N. (2017, January 10). Here's where your electronic waste is landing. It's not pretty. Retrieved from https://www.mprnews.org/story/2017/01/10/mpr_news_presents
- [5] R. Widmer, H. Oswald-Krapf, D. Sinha-Khetriwal, M. Schnellmann, H. Böni, Global perspectives on e-waste, *Environ. Impact Assess. Rev.* 25 (2005) 436– 458. doi:10.1016/j.eiar.2005.04.001.
- [6] Economía Circular: Algunos datos básicos para esta estrategia de futuro para la empresa. (n.d.). Retrieved from <http://againsl.com/economia-circular-algunos-datos-basicos-para-esta-estrategia-de-futuro-para-la-empresa/>



- [7] D. Tobjork, R. Osterbacka, Paper electronics, *Adv. Mater.* 23 (2011) 1935–1961. doi:10.1002/adma.201004692.
- [8] T. Kaneko, T.H. Thi, D.J. Shi, M. Akashi, Environmentally degradable, highperformance thermoplastics from phenolic phytomonomers, *Nat. Mater.* 5 (2006) 966–970. doi:10.1038/nmat1778.
- [9] H. Jimbo, N. Miki, Gastric-fluid-utilizing micro battery for micro medical devices, *Sensors Actuators B Chem.* 134 (2008) 219–224. doi:10.1016/j.snb.2008.04.049.
- [10] L. Yin, X. Huang, H. Xu, Y. Zhang, J. Lam, J. Cheng, J.A. Rogers, Materials, designs, and operational characteristics for fully biodegradable primary batteries, *Adv. Mater.* 26 (2014) 3879–3884. doi:10.1002/adma.201306304.
- [11] X. Huang, D. Wang, Z. Yuan, W. Xie, Y. Wu, R. Li, Y. Zhao, D. Luo, L. Cen, B. Chen, H. Wu, H. Xu, X. Sheng, M. Zhang, L. Zhao, L. Yin, A Fully Biodegradable Battery for Self-Powered Transient Implants, *Small.* (2018) 1800994. doi:10.1002/smll.201800994.
- [12] M. Winter, R. J. Brodd. What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors? *Chem. Rev.* (2004), 104, 4245–4269. doi: 10.1021/cr020730k
- [13] Bamgbopa, Musbaudeen O.; Almheiri, Saif; Sun, Hong (2017). "Prospects of recently developed membraneless cell designs for redox flow batteries". *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 70: 506–518. doi:10.1016/j.rser.2016.11.234. ISSN 1364-0321.
- [14] Braff, William A.; Bazant, Martin Z.; Buie, Cullen R. (2013). "New rechargeable flow battery enables cheaper, large-scale energy storage". *Nature Communications.* 4: 2346. arXiv:1404.0917. doi:10.1038/ncomms3346. PMID 23949161. Retrieved 20 August 2013.
- [15] J. P. Esquivel, P. Alday, O. A. Ibrahim, B. Fernández, E. Kjeang, and N. Sabaté, "A Metal Free and Biotically Degradable Battery for Portable Single-Use Applications," *Adv. Energy Mater.*, vol. 7, no. 18, p. 1700275, Sep. 2017.
- [16] J.B. Conant, H.M. Kahn, L.F. Fieser, S.S. Kurtz, An electrochemical study of the reversible reduction of organic compounds, *J. Am. Chem. Soc.* 44 (1922) 1382–1396. doi:10.1021/ja01427a020.
- [17] K. Wedege, E. Dražević, D. Konya, A. Bentien, G. Sandstede, Organic Redox Species in Aqueous Flow Batteries: Redox Potentials, Chemical
- [18] Snober A. , Minh-Phuong N.B., Abdenmour A. Paper-based chemical and biological sensors: Engineering aspects. *Biosensors and Bioelectronics* 77 (2016) 249–263. doi: 10.1016/j.bios.2015.09.038 0956-5663.



Anexo de seguridad

Fichas Internacionales de Seguridad Química

p-BENZOQUINONA

ICSC: 0779

 <p style="text-align: center;"> p-BENZOQUINONA 2,5-Ciclohexadieno-1,4-diona Quinona 1,4-Benzoquinona $C_6H_4O_2$ Masa molecular: 108.1 </p> <p> N° CAS 106-51-4 N° RTECS DK2625000 N° ICSC 0779 N° NU 2587 N° CE 606-013-00-3 </p> 			
TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Combustible. Se pueden liberar gases tóxicos en un incendio (monóxido de carbono, humos de quinona).	Evitar llama abierta, NO producir chispas y NO fumar. NO poner en contacto con oxidantes fuertes.	Pulverización con agua, polvos, dióxido de carbono.
EXPLOSION	Por encima de 40°C pueden formarse mezclas explosivas vapor/aire. Las partículas finamente dispersas forman mezclas explosivas en el aire.	Evitar el depósito de polvo; sistema cerrado, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión de polvos.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones por pulverización con agua.
EXPOSICION		¡EVITAR LA DISPERSION DE POLVOS! ¡HIGIENE ESTRICTA!	¡CONSULTAR AL MEDICO EN TODOS LOS CASOS!
• INHALACION	Sensación de quemazón, tos, hemorragia nasal, dificultad respiratoria, jadeo, dolor de garganta.	Extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo y someter a atención médica.
• PIEL	¡PUEDEN ABSORBERSE! Corrosivo. Enrojecimiento, dolor, manchas marrones, ampollas.	Guantes protectores, traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas, aclarar y lavar la piel con agua y jabón y solicitar atención médica.
• OJOS	Corrosivo. Enrojecimiento, dolor, pérdida de visión, manchas marrones.	Protección ocular en combinación con protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después consultar a un médico.
• INGESTION	Corrosivo. Dolor abdominal, sensación de quemazón, diarrea, vómitos, muerte.	No comer, beber ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca; NO provocar el vómito y someter a atención médica.
DERRAMAS Y FUGAS		ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO

<p>Barren la sustancia derramada e introducirla en un recipiente, recoger cuidadosamente el residuo, trasladarlo a continuación a un lugar seguro. NO permitir que este producto químico penetre en el ambiente (protección personal adicional: equipo autónomo de respiración).</p>	<p>Separado de alimentos y piensos, oxidantes fuertes. Mantener en lugar frío, seco; mantener en una habitación bien ventilada.</p>	<p>No transportar con alimentos y piensos. Símbolo T Símbolo N R: 23/25-36/37/38-50 S: (1/2)-26-28-45-81 Clasificación de Peligros NU: 6.1 Grupo de Envasado NU: II CE:</p> <div>   </div>
VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE		
ICSC: 0779	Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994	

Fichas Internacionales de Seguridad Química

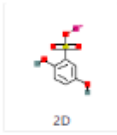
p-BENZOQUINONA

ICSC: 0779

D A T O S I M P O R T A N T E S	ESTADO FISICO; ASPECTO Cristales amarillos o sólido amarillo, con olor acre. Puede sublimar, aún a temperatura ambiente.	VIAS DE EXPOSICION La sustancia se puede absorber por inhalación, a través de la piel y por ingestión.
	PELIGROS FISICOS Es posible la explosión de polvo si se encuentra mezclada con el aire en forma pulverulenta o granular. Si está seca, puede cargarse electrostáticamente por turbulencia, transporte neumático, vertido, etc.	RIESGO DE INHALACION En la evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar muy rápidamente una contaminación nociva del aire.
	PELIGROS QUIMICOS Reacciona con oxidantes fuertes originando riesgo de incendio y explosión. Reacciona violentamente con bases fuertes. Por encima de 60°C, cuando se humedece, se autocalienta y se descompone, desprendiendo gases tóxicos (monóxido de carbono).	EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION La sustancia es corrosiva para los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La exposición a altas concentraciones puede producir la muerte.
	LIMITES DE EXPOSICION TLV (como TWA): 0.1 ppm; 0.44 mg/m ³ (ACGIH 1990-1991).	EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis. Una exposición prolongada puede producir (severos) efectos en la piel y en los ojos.
PROPIEDADES FISICAS	Punto de fusión: 115.7°C Densidad relativa (agua = 1): 1.3 Solubilidad en agua: Escasa Presión de vapor, Pa a 20°C: 12	Densidad relativa de vapor (aire = 1): 3.7 Punto de inflamación: 38-93°C Temperatura de autoignición: 560°C Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 0.2 (calculado)
DATOS AMBIENTALES	Esta sustancia puede ser peligrosa para el ambiente; debería prestarse atención especial a los organismos acuáticos. Se aconseja firmemente impedir que el producto químico penetre en el ambiente.	
NOTAS		
Las propiedades físicas (p.e. punto de inflamación) dependen, en gran medida, de la humedad. Está indicado examen médico periódico dependiendo del grado de exposición. NO llevar a casa la ropa de trabajo. Tarjeta de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-61G12b		
Código NFPA: H 1; F 2; R 1;		
INFORMACION ADICIONAL		

FISQ: 1-038 p-BENZOQUINONA	
ICSC: 0779	p-BENZOQUINONA
© CCE, IPCS, 1994	
NOTA LEGAL IMPORTANTE:	Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).
© INSHT	


Potassium 2,5-dihydroxybenzenesulfonate

PubChem CID:	23672329
Structure:	 <p>2D</p> <p>Find Similar Structures</p>
Chemical Names:	<p>21799-87-1</p> <p>Potassium 2,5-dihydroxybenzenesulfonate</p> <p>Hydroquinonesulfonic acid potassium salt</p> <p>2,5-Dihydroxybenzenesulfonic acid potassium salt</p> <p>MFCD00007475</p> <p>More...</p>
Molecular Formula:	$C_6H_5KO_5S$
Molecular Weight:	228.259 g/mol

[Learn More About LCSS Project](#) >

1 GHS Classification



Pictogram(s)	 <p>Irritant</p>
Signal	Warning
GHS Hazard Statements	<p>Aggregated GHS information provided by 84 companies from 8 notifications to the ECHA C&L Inventory. Each notification may be associated with multiple companies.</p> <p>Reported as not meeting GHS hazard criteria by 1 of 84 companies. For more detailed information, please visit ECHA C&L website</p> <p>Of the 7 notification(s) provided by 83 of 84 companies with hazard statement code(s):</p> <p>H302 (56.63%): Harmful if swallowed [Warning Acute toxicity, oral]</p> <p>H315 (38.55%): Causes skin irritation [Warning Skin corrosion/irritation]</p> <p>H317 (60.24%): May cause an allergic skin reaction [Warning Sensitization, Skin]</p> <p>H319 (95.18%): Causes serious eye irritation [Warning Serious eye damage/eye irritation]</p> <p>H335 (37.35%): May cause respiratory irritation [Warning Specific target organ toxicity, single exposure: Respiratory tract irritation]</p> <p>Information may vary between notifications depending on impurities, additives, and other factors. The percentage value in parenthesis indicates the notified classification ratio from companies that provide hazard codes. Only hazard codes with percentage values above 10% are shown.</p>
Precautionary Statement Codes	<p>P261, P264, P270, P271, P272, P280, P301+P312, P302+P352, P304+P340, P305+P351+P338, P312, P321, P330, P332+P313, P333+P313, P337+P313, P362, P363, P403+P233, P405, and P501</p> <p>(The corresponding statement to each P-code can be found at the GHS Classification page.)</p>

▶ from European Chemicals Agency (ECHA)

2 Identifiers



2.1 CAS



21799-87-1

from ChemIDplus; EPA Chemicals under the TSCA; EPA DSSTox; European Chemicals Agency (ECHA)

Related CAS

20123-80-2 (Parent)

from ChemIDplus

2.2 InChI



InChI=1S/C6H6O5S.K/c7-4-1-2-5(8)6(3-4)12(9,10)11;/h1-3,7-8H,(H,9,10,11);/q;+1/p-1

from PubChem

2.3 InChI Key



VKDSBABHIXQFKH-UHFFFAOYSA-M

from PubChem

3 Physical Properties



3.1 Physical Description



DryPowder

from EPA Chemicals under the TSCA

