

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Implementación de un circuito de cosecha y almacenamiento  
de energía eléctrica producida por celdas microbianas**

**Proyecto de investigación**

**Ricardo Esteban Fonseca Ortega**

**Ingeniera Electrónica**

Trabajo de titulación presentado como requisito  
para la obtención del título de  
**INGENIERO ELECTRÓNICO**

Quito, 21 de diciembre de 2017

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERIAS

HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Implementación de un circuito de cosecha y almacenamiento de energía eléctrica  
producida por celdas microbianas

**Ricardo Esteban Fonseca Ortega**

Calificación:

\_\_\_\_\_

Nombre del profesor, Título académico

Lotfi Boubekeur, PhD

Firma del profesor

\_\_\_\_\_

Quito, 21 de diciembre de 2017

## Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: \_\_\_\_\_

Nombres y apellidos: Ricardo Esteban Fonseca Ortega

Código: 00110831

Cédula de Identidad: 1715433593

Lugar y fecha: Quito, 21 de diciembre de 2017

## RESUMEN

Uno de los retos del siglo 21 es el reto de la energía: producción de energía eléctrica barata, limpia, renovable y amigable con la naturaleza la cual pueda sostener el crecimiento de la población humana. Esto es especialmente importante debido a la escasez de combustibles fósiles. Los candidatos más prometedores para el uso como energía renovable son las Celdas de Combustible Microbiano (MFCs por sus siglas en ingles). Los microorganismos dentro de estas celdas oxidan la materia orgánica, produciendo así energía eléctrica que puede ser cosechada y usada de forma práctica en diversas aplicaciones. El principal problema es la cantidad de electricidad ya que a pesar de que es continua esta es pequeña. Esto requiere de un dispositivo especial el cual pueda cosechar esta pequeña cantidad de energía, elevarla y almacenarla para su uso posterior.

Este proyecto trata del diseño e implementación de un circuito de cosecha, almacenamiento y control de energía producida por las celdas de combustible microbiano. El circuito de cosecha es un circuito de tipo "Joule Thief" en el cual el voltaje es elevado mientras que el circuito de almacenamiento consiste en super capacitores. Finalmente, el circuito de control de la energía es el encargado de entregar la corriente estabilizada al dispositivo final (teléfono inteligente, iPod, etc). El circuito ha sido diseñado y testeado usando una pequeña celda de una sola cámara (300 ml) en las que se obtuvieron las curvas de polarización y potencia, así como las curvas de estabilización. De estos resultados se trabajó en un número de celdas pequeñas para realizar un arreglo para obtener la carga de un iPhone y un iPod.

Este trabajo abre las puertas para aplicaciones más avanzadas, como plantas de tratamiento de aguas residuales, donde la electricidad puede ser extraída mientras se tratan estas aguas residuales.

**Palabras clave:** MFCs, circuito de cosecha, circuito de almacenamiento, "Joule Thief", "Boost Converter", carga de un celular.

## ABSTRACT

One of the challenges of the 21<sup>st</sup> century is the energy challenge: producing a cheap, clean, renewable and nature-friendly electric energy to cover the growing human population. This is especially important with the expected scarcity of fossil fuels. One of the promising candidates for renewable energy is Microbial Fuel Cells (MFCs). Microorganisms oxidize the organic matter producing electric power that can be harnessed and used for practical applications. The problem is that the amount of electricity, while being continuous in time, is small. This requires special devices to harvest this small amount of electricity and store it for later use.

The project deals with the design and implementation of a power harvesting, storage and management circuit for electrical energy produced by microbial fuel cells. The Harvesting circuit is of the joule thief type, where the voltage is boosted, while the storage one is made of super-capacitors. Finally, the power management circuit is the one responsible to deliver the stabilized current to the final device (smartphone, iPod or else). The circuit has been built and tested using a small monochamber MFC (300 ml). Polarization and power curves as well as stabilization curves has been obtained. From the results we worked out the number of small MFCs that would be required to charge an iPhone and an iPod.

This work opens the door to more advanced applications, like for instance in wastewater treatment plants, where electricity could be extracted while treating sewage water.

*Key words:* MFCs, harvesting circuit, storage circuit, Joule Thief, Boost Converter, cell phone charge.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Introducción .....</b>	<b>9</b>
<b>Desarrollo del Tema.....</b>	<b>12</b>
1. Dispositivo de cosecha "Joule Thief" .....	13
Análisis de circuito "Joule Thief" .....	15
Simulación.....	19
Resultados de la simulación.....	19
2. Dispositivo de control de carga.....	21
3. Mediciones.....	23
4. Resultados.....	24
<b>Conclusiones.....</b>	<b>30</b>
<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>31</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>34</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Definición de los parámetros.....	17
Tabla 2. Medidas del núcleo de ferrita.....	20
Tabla 3. Datos de cargas de los capacitores en serie.....	34
Tabla 4. Datos de caracterización de la celda Cerro Brujo.....	35

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diseño de una celda de combustible microbiana de una cámara.....	10
Figura 2. Diseño de una celda de combustible microbiana de dos cámaras.....	10
Figura 3. Circuito de cosecha, almacenamiento y control de carga.....	12
Figura 4. Circuito “Joule Thief” .....	12
Figura 5. Circuito RL.....	14
Figura 6. Simulación en LTspice del Circuito.....	17
Figura 7. Resultados de la simulación.....	17
Figura 8. Circuito “Joule Thief” con Diodos.....	19
Figura 9. Circuito comparador.....	20
Figura 10. Circuito de carga del celular.....	21
Figura 11. Curva de estabilización de voltaje de la celda Cerro Brujo.....	22
Figura 12. Curva de estabilización de corriente de la celda Cerro Brujo.....	23
Figura 13. Curva de polarización de la celda Cerro Brujo.....	23
Figura 14. Curva de Máxima Transferencia de Potencia.....	24
Figura 15. Arreglo de celdas serie-paralelo.....	24
Figura 16. Voltaje de carga de los capacitores en serie.....	25
Figura 17. Corriente de carga de los capacitores en serie.....	26

## INTRODUCCIÓN

Las MFCs (Microbial Fuel Cells), o celdas microbianas, son dispositivos los cuales pueden ser usados para el tratamiento de desechos, y como fuente de energía renovable. (Choi, 2016). En estos dispositivos, los desechos (comúnmente llamado sustrato) son utilizados por los microorganismos anaeróbicos como combustible para producir energía eléctrica limpia y amigable con la naturaleza.

Los microorganismos oxidan la materia orgánica del sustrato, produciendo electrones libres, que se depositaran en un cátodo, mientras que en el ánodo se van a depositar los iones positivos, creando así una diferencia de potencial que va a permitir un flujo de electrones, es decir, una corriente.

Las MFC de doble cámara (dual chamber MFCs) son dispositivos que contienen dos cámaras, una anaeróbica y la otra aeróbica, teniendo entre estas cámaras una membrana de intercambio de protones (PEM). Esta membrana permite que los cationes formados en la cámara anaeróbica pasen a los electrodos correspondientes, es decir, del cátodo (cámara aeróbica) al ánodo (cámara anaeróbica), como se muestra en la figura 1 (Kumar,2015).

Este proceso de intercambio de protones se da gracias a procesos metabólicos de los microorganismos. Estos oxidan la materia orgánica de la cámara catódica y transfieren electrones al ánodo.

Los microorganismos más estudiados en las MFCs son: "*Shewanella*" y "*Geobacter sulfurreduceus*". Estas bacterias son capaces de unir la oxidación de los componentes orgánicos y el H<sub>2</sub> con la reducción de los óxidos de hierro y manganeso, todo esto debido a su actividad metabólica. El proceso que estas bacterias tiene para descomponer la materia orgánica es mediante sus rutas metabólicas para obtener energía en forma de ATP,

necesitando así de una fuente continua de carbono, azufre o fósforo, en condiciones anaeróbicas (Kumar, 2015).

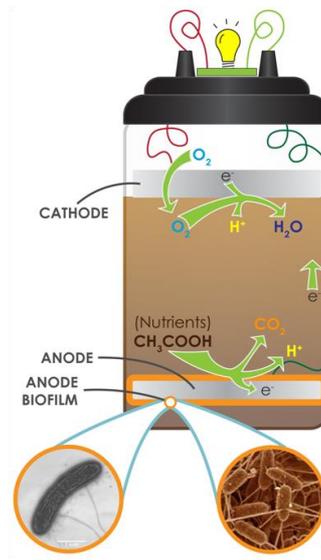


Figura 1. Diseño de una Celda de Combustible Microbiana de una cámara (Lohner, Rowland, 2017)

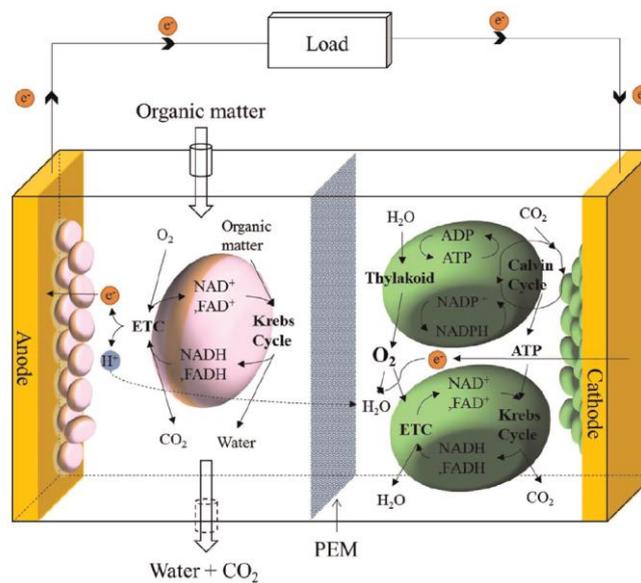


Figura 2. Diseño de una celda de combustible microbiana de dos celdas (Choi, 2016).

En este proyecto se armó una biocelda con sedimentos de lagunas hipersalinas de la isla San Cristóbal en Galápagos. La caracterización preliminar del sedimento indica la presencia de microorganismos oxidadores y reductores de azufre como los principales productores de electricidad.

Gracias a que estos sedimentos producen energía eléctrica, se ha decidido realizar un circuito que coseche esa energía y la almacene en capacitores para luego ser utilizada en cualquier tipo de aplicación.

## DESARROLLO DEL TEMA

Un circuito de implementación útil para estas celdas es un circuito para cargar la batería de un dispositivo móvil del que se conozca, su voltaje de entrada y la corriente necesaria para la carga del mismo la cual para un iPhone X es de 2716 [mAh] y para un iPod nano de 3ra generación es de 370 [mAh]. Con esto en mente, se puede realizar un sistema parecido al propuesto en (Walter et al, 2016).

El sistema propuesto consiste en dos circuitos conectados en cascada, el primero de ellos es un circuito elevador de voltaje conocido como un circuito "Joule Thief" o ladrón de Julios, el cual es el encargado de cosechar la energía de las celdas, mientras que la siguiente etapa consiste en un circuito el cual controla el suministro de energía eléctrica al celular mediante un circuito comparador como muestra la figura 3. Entre estas dos etapas se conectan dos ultra capacitores Maxwell k2 BCAP3000 en serie de 3000 [F] y un voltaje máximo de 2.7 [V] para cada uno con la función de almacenar la energía eléctrica producida en la primera etapa (Maxwell).

Para lograr este objetivo, se tiene que realizar el cálculo del número necesario de celdas para poder suministrar una corriente adecuada para el correcto funcionamiento del sistema basándose en los parámetros de entrada previamente establecidos. Estos aspectos nos permiten tener un arreglo de celdas en serie y en paralelo con el cual lograremos obtener dichos parámetros.

Para realizar este arreglo de celdas se hizo un estudio de carga de una sola celda. Esta celda después de un tiempo de estabilización entrega un voltaje de 0.805 [V] y una corriente de Norton de 10.65 [mA] como se muestran en los resultados. Para el estudio de carga se realizó las mediciones respectivas para determinar la curva de polarización  $V(I)$  y la curva de

máxima transferencia de potencia  $P(I)$  con la cual se logró determinar que la resistencia interna de una celda. Estas curvas de caracterización se las realizo midiendo el voltaje y la corriente de la fuente conectada en paralelo a una resistencia variable la cual fue desde  $1M [\Omega]$  hasta  $1 [\Omega]$ .

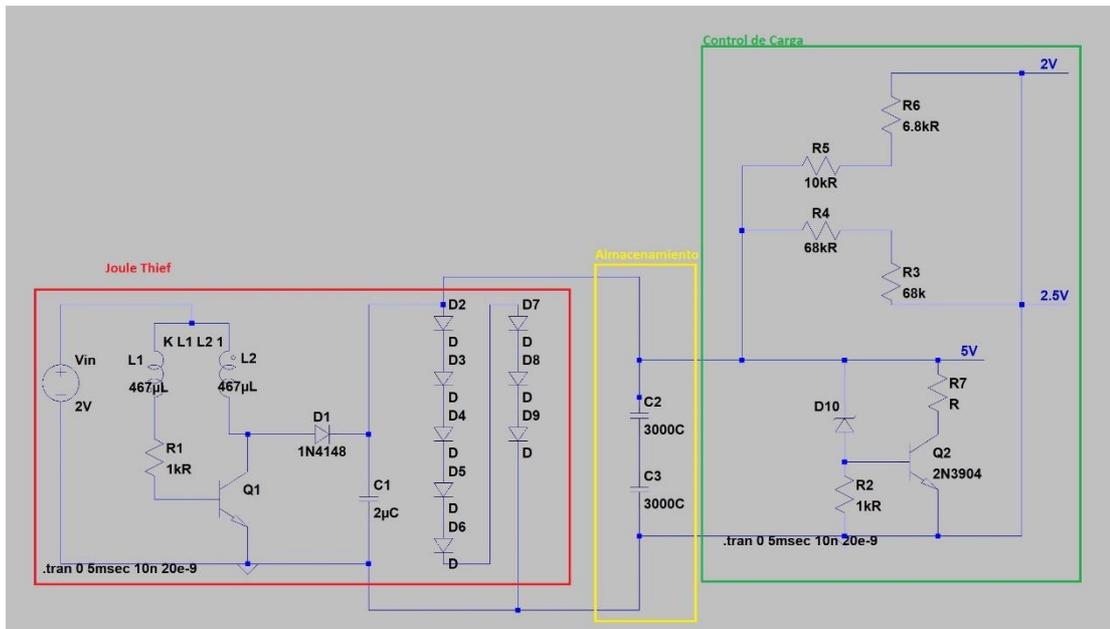


Figura 3. Circuito de cosecha, almacenamiento y control de carga.

## 1. Dispositivo de cosecha “Joule Thief”

Debido a que se debe aumentar el voltaje de salida de las celdas, es necesario implementar un circuito que eleve el voltaje de salida de la celda, para lo cual se usó un circuito oscilador de bloqueo o ‘Joule Thief’. No es recomendable usar un transformador de potencia debido a que la potencia que entrega las celdas es muy baja. Este circuito robador de julios es un circuito tipo “boost converter” el cual usa el campo magnético de las bobinas para generar una frecuencia de empuje de corriente y usa el transistor como un método de conmutación.

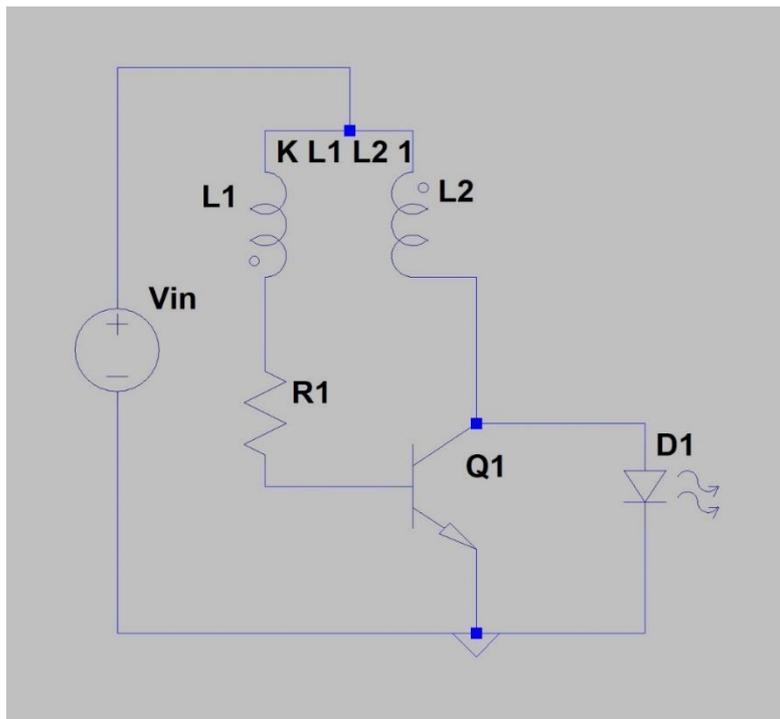


Figura 4. Circuito "Joule Thief"

El circuito "Joule Thief" consiste en dos bobinas que comparten un mismo núcleo y que utilizan el campo magnético del núcleo para oscilar (Navarro, 2014).

Cuando se alimenta el circuito, se tendrá una corriente que pasará por la primera bobina L1 y polarizará al transistor. Una vez que se polariza el transistor, este se activa y permite que la corriente comience a pasar por la segunda bobina L2. Mientras se carga la bobina L2, el campo magnético de esta empieza a ser mayor y contraria al campo magnético de L1, con esto el voltaje colector emisor del transistor también empieza a crecer.

Cuando el campo magnético de la bobina L2 es mayor que el de la bobina L1, este bloquea a la bobina L1 produciendo un voltaje negativo en el transistor y desactivándolo, con lo que la bobina L1 se deja de cargar.

La energía que queda almacenada en la bobina L2 se descarga a través del LED con lo que se asume que el circuito tiene 2 fuentes en serie superando el voltaje del LED para poder encenderlo (Navarro, 2014).

Mientras la bobina L2 se descarga el LED se apagará progresivamente y el campo magnético de la bobina L2 otra vez será menor que la de la bobina L1. Este proceso se lo realiza a altas frecuencias por lo que el titileo del LED es imperceptible y es regulable mediante las bobinas. Es decir, se tiene un voltaje de salida AC.

### **Análisis del Circuito “Joule Thief”.**

Al analizar el circuito “Joule Thief” mediante la ley de mallas de Kirchhoff se tiene 2 mallas, la primera que involucra a la bobina L1 y activa al transistor, y la segunda malla que involucra a la bobina L2 y realiza la función de incrementar el voltaje a la salida. La primera malla la cual corresponde a la activación del transistor se muestra en la figura 5.

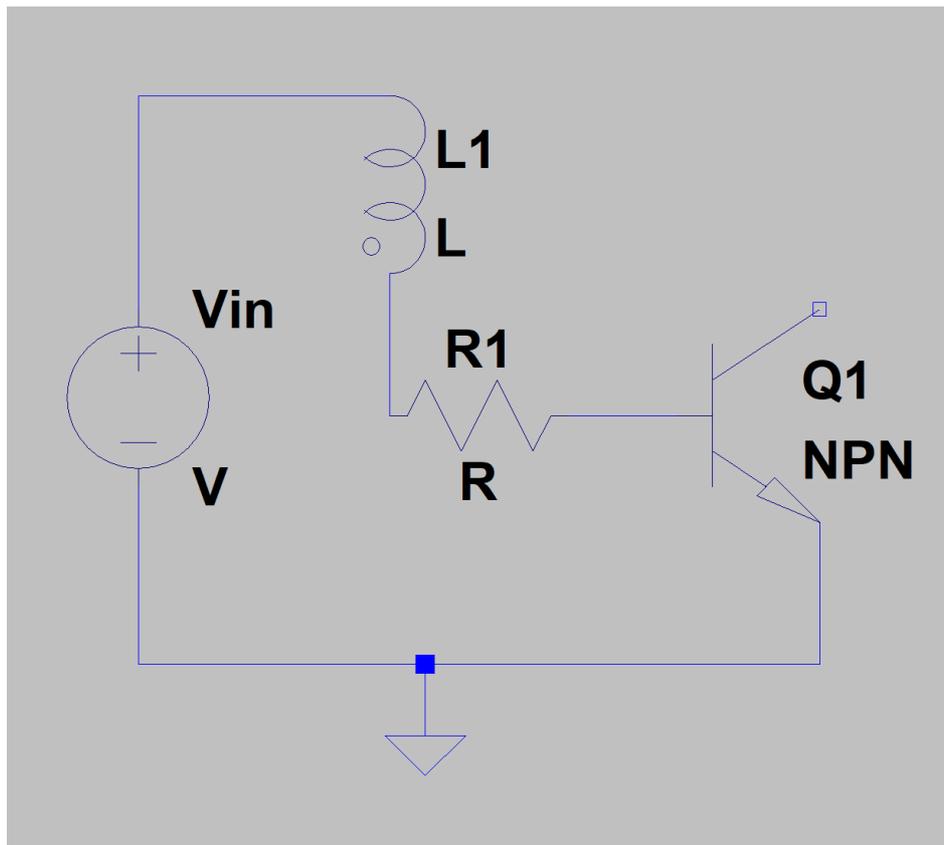


Figura 5. Circuito RL

En esta malla se tiene una corriente que pasa por el inductor  $L1$ , la resistencia  $R1$  y la base del transistor. Esta corriente es denominada  $I_b$  ya que pasa por la base del transistor y activa al mismo.

$$V_1 = L_1 \frac{dI_b}{dt} + R_1 I_b + V_{BE}$$

Resolviendo la ecuación diferencial se tiene que:

$$I_b = A - Ae^{-\frac{R_1 t}{L_1}}$$

Donde

$$A = \frac{V_1 - V_{BE}}{R_1}$$

$V_{BE}$  es el voltaje de la base al emisor del transistor el cual para transistores de silicio es 0.7V.

Debido al efecto de oscilación del circuito, esta corriente fluye solo cuando el transistor está activo, es decir, mientras se carga la bobina L2. Una vez que se cargue la bobina L2 y el campo magnético sea mayor que el de la bobina L1, el transistor se desactiva, por lo que la energía almacenada en la bobina L2 comienza a descargarse por el led del circuito en la figura 4.

Cuando el transistor esta desactivado se tiene un circuito “boost converter”, el cual nos amplificara el voltaje en función de la corriente y el inductor L2. En este caso se puede diseñar el circuito con los parámetros necesarios y las siguientes formulas (Hart, 2011).

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}$$

$$I_L = \frac{V_{out} * I_{out}}{V_{in}}$$

$$\Delta i_L = \%ri * I_L$$

$$L = \frac{V_{in} D}{\Delta i_L * f}$$

$$C = \frac{D}{\frac{V_{out}}{I_{out}} * \%rv * f}$$

Donde

Parámetros	Definición
D	Duty Ratio

$I_L$	Corriente del inductor
$\Delta i_L$	Variación de la corriente del inductor

Tabla 2. Definición de los parámetros

Con estas fórmulas podemos diseñar el circuito “Boost Converter” con los parámetros necesarios para elevar el voltaje al requerido. Los parámetros necesarios son los siguientes:

$$V_{in} = 2 V$$

$$V_{out} = 5 V$$

$$I_{out} = 50 mA$$

$$f = 150 kHz$$

Gracias a estos parámetros se puede comenzar a diseñar el circuito de tal manera que:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 - \frac{2}{5} = 0.6$$

$$I_L = \frac{V_{out} * I_{out}}{V_{in}} = \frac{5 * 50 \times 10^{-3}}{2} = 125 mA$$

Para el diseño también se debe de tomar en cuenta parámetros como la variación de la corriente en el inductor  $L_2$  y el rizado de salida, por lo que estos parámetros se han escogidos de la siguiente manera:

$$\%ri = 20\%$$

$$\%rv = 2\%$$

$$\Delta i_L = \%ri * I_L = 0.2 * 125 \times 10^{-3} = 25 mA$$

$$L = \frac{V_{in} D}{\Delta i_L * f} = \frac{2 * 0.6}{25 \times 10^{-3} * 150 \times 10^3} = 320 \mu H$$

$$C = \frac{D}{\frac{V_{out}}{I_{out}} * \%rv * f} = \frac{0.6}{\frac{5}{50 \times 10^{-3}} * 0.02 * 150 \times 10^3} = 2 \mu F$$

Simulación:

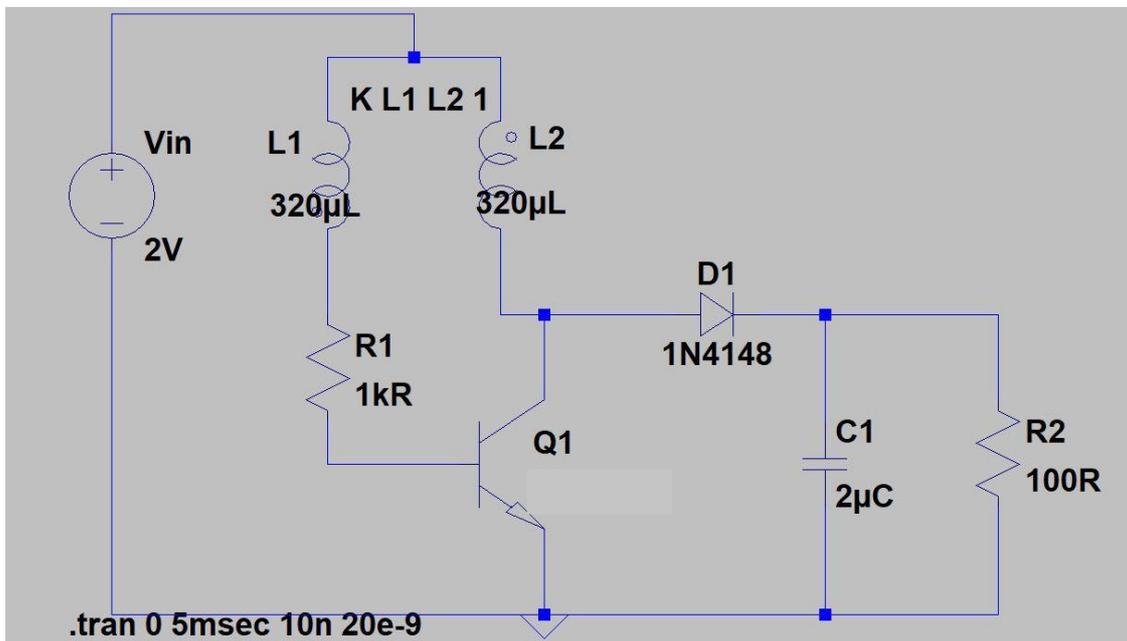


Figura 6. Simulación en LTspice del Circuito con parámetros de 5 [ms] de tiempo de simulación, tiempo de guarda de datos de 10 [ns] y  $20e-9$  [s] de tiempo de paso.

Resultados de la simulación.

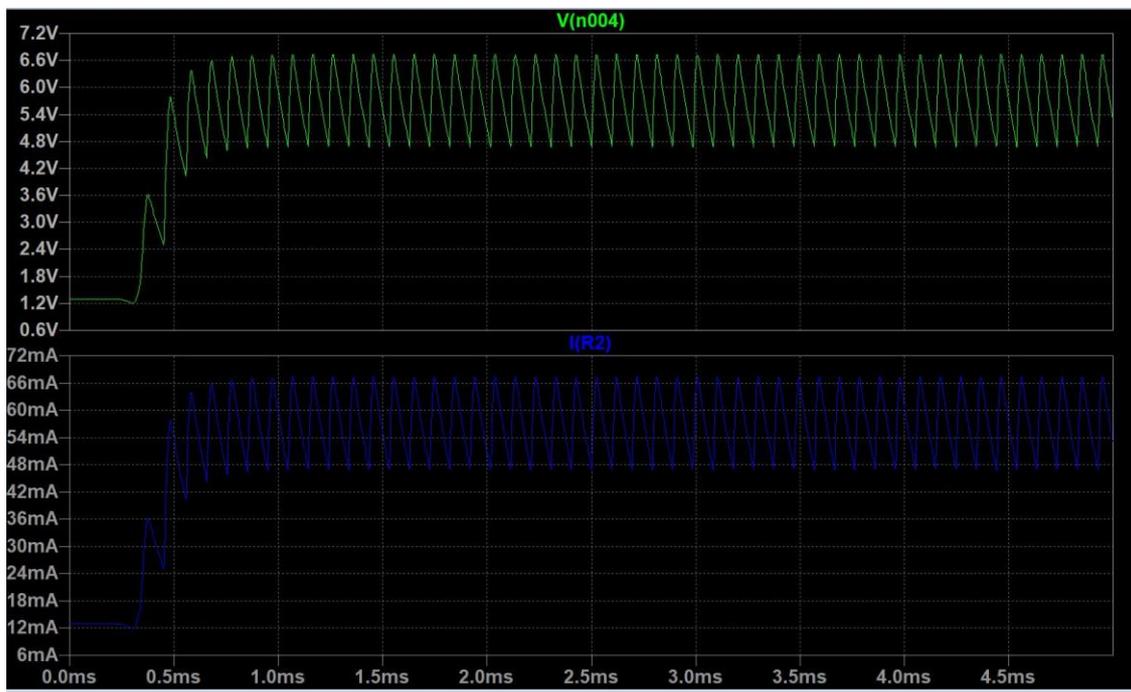


Figura 7. Resultados de la simulación con parámetros de 5 [ms] de tiempo de simulación, tiempo de guarda de datos de 10 [ns] y  $20e-9$  [s] de tiempo de paso.

Como se puede observar en la figura 7 el resultado en color verde es el voltaje de salida en la resistencia R2 el cual muestra un voltaje medio de 5.7 [V], mientras que el resultado en color azul es la corriente que pasa por la carga R2 la cual muestra una corriente media de 57 [mA]. Estos resultados concuerdan con los datos deseados en el diseño del circuito "Boost Converter".

En el circuito "Joule Thief" el embobinado es el que se encarga de la conmutación del circuito por lo que el acoplamiento debe de ser de 1 para que este no afecte el diseño del "Boost Converter". El embobinado se lo realizo con un cable de cobre esmaltado de tamaño AWG 22, envuelto en un núcleo de ferrita con las dimensiones que se especifican en la tabla 2, con 14 vueltas y con 467 [ $\mu$ H] para cada inductor.

Parámetro	Medida
Ancho del Núcleo	12.12 [mm]
Diámetro Interno	18.28 [mm]
Diámetro Externo	9.68 [mm]

Tabla 2. Medidas del núcleo de ferrita.

A los capacitores de 3000 [F] se los conecto en serie de manera que se tiene en total una capacitancia de 1500 [F] y un voltaje máximo de 5.4 [V], para lograr cargar los capacitores se varió de cierta manera el circuito como muestra la figura 8.

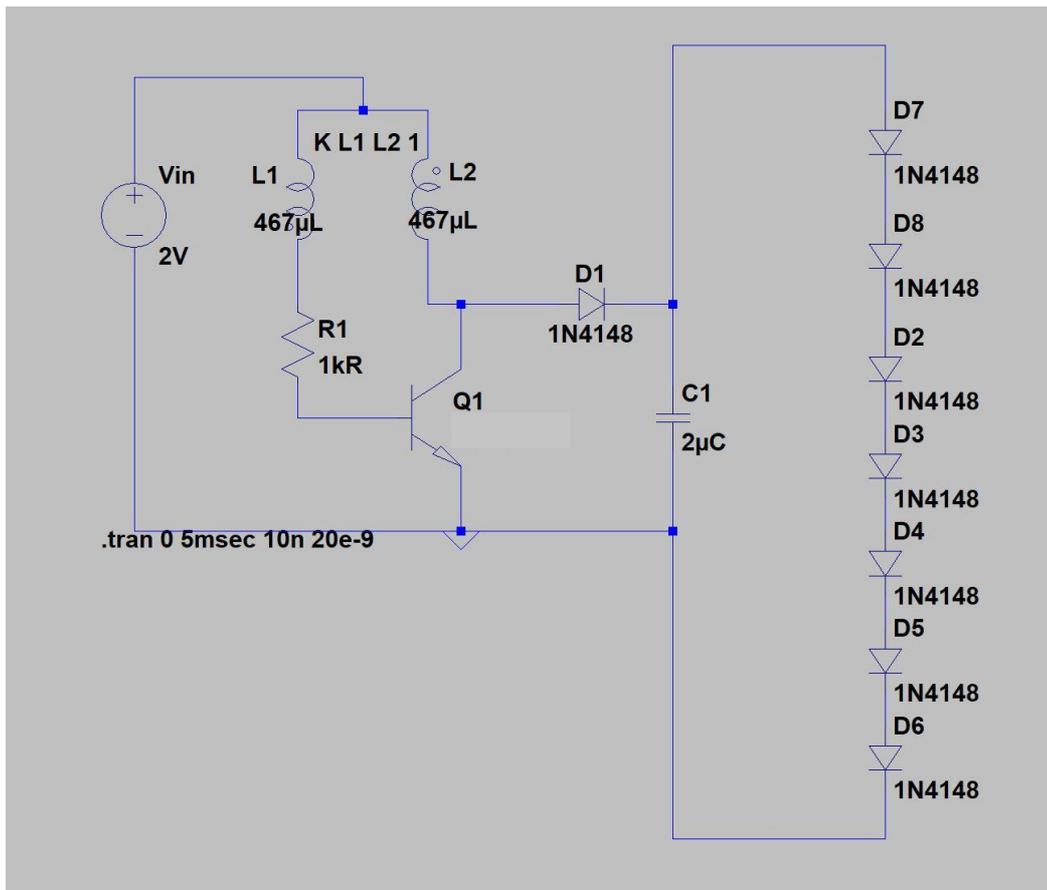


Figura 8. Circuito “Joule Thief” con Diodos con parámetros de 5[ms] de tiempo de simulación, tiempo de guarda de datos de 10 [ns] y 20e-9 [s] de tiempo de paso.

Con esta nueva configuración se asegura que la salida del circuito “Joule Thief” sea de 5 [V], ya que el sumatorio de los voltajes umbrales de los diodos forman una protección para que el voltaje no sea mayor al voltaje máximo que soportan los dos capacitores conectados en serie que es de 5.4 [V].

## 2. Dispositivo de control de carga

El siguiente dispositivo va conectado en cascada a los capacitores, este básicamente es un circuito comparador el cual gracias al diodo Zener de 4.3 [V], 1N4731a, este diseño permite pasar voltajes entre 5 [V] que es lo máximo que suministran los capacitores y 4.5 [V] que es el voltaje con el que se activa el diodo Zener.

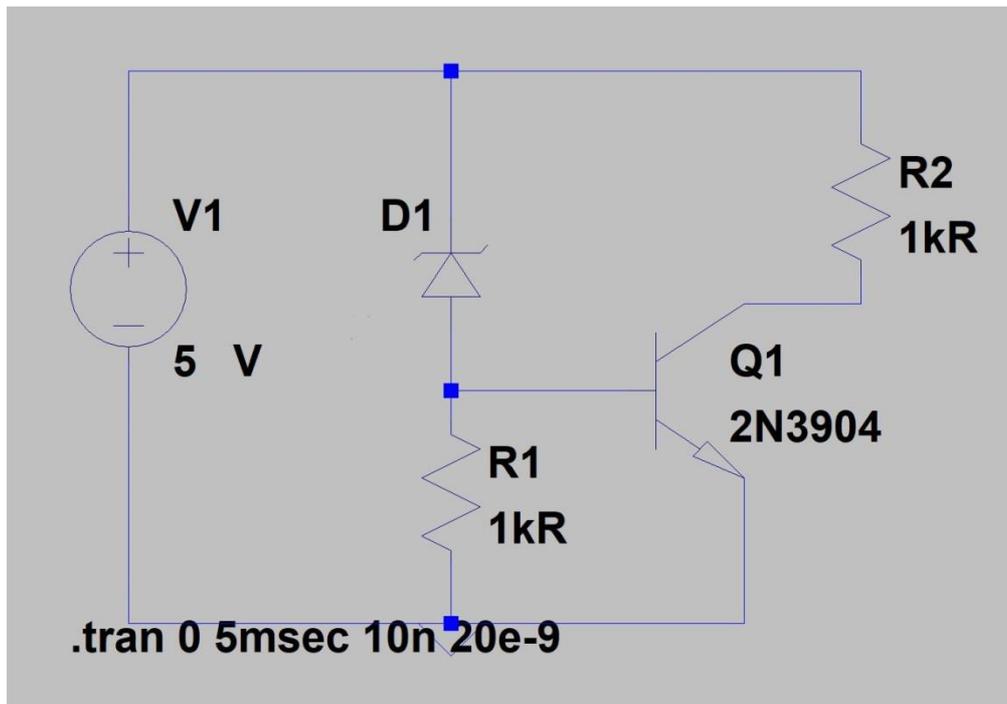


Figura 9. Circuito Comparador con parámetros de 5 [ms] de tiempo de simulación, tiempo de guarda de datos de 10 [ns] y  $20 \times 10^{-9}$  [s] de tiempo de paso.

En este circuito la resistencia R2 representa la carga del sistema es decir en este caso el celular conectado al sistema de carga. Debido a que el celular se carga mediante USB, se requiere dos voltajes extras de 2.5V y 2V, los cuales fueron obtenidos desde la salida de los capacitores con circuitos puentes divisores de tensión como lo muestra la figura 10.

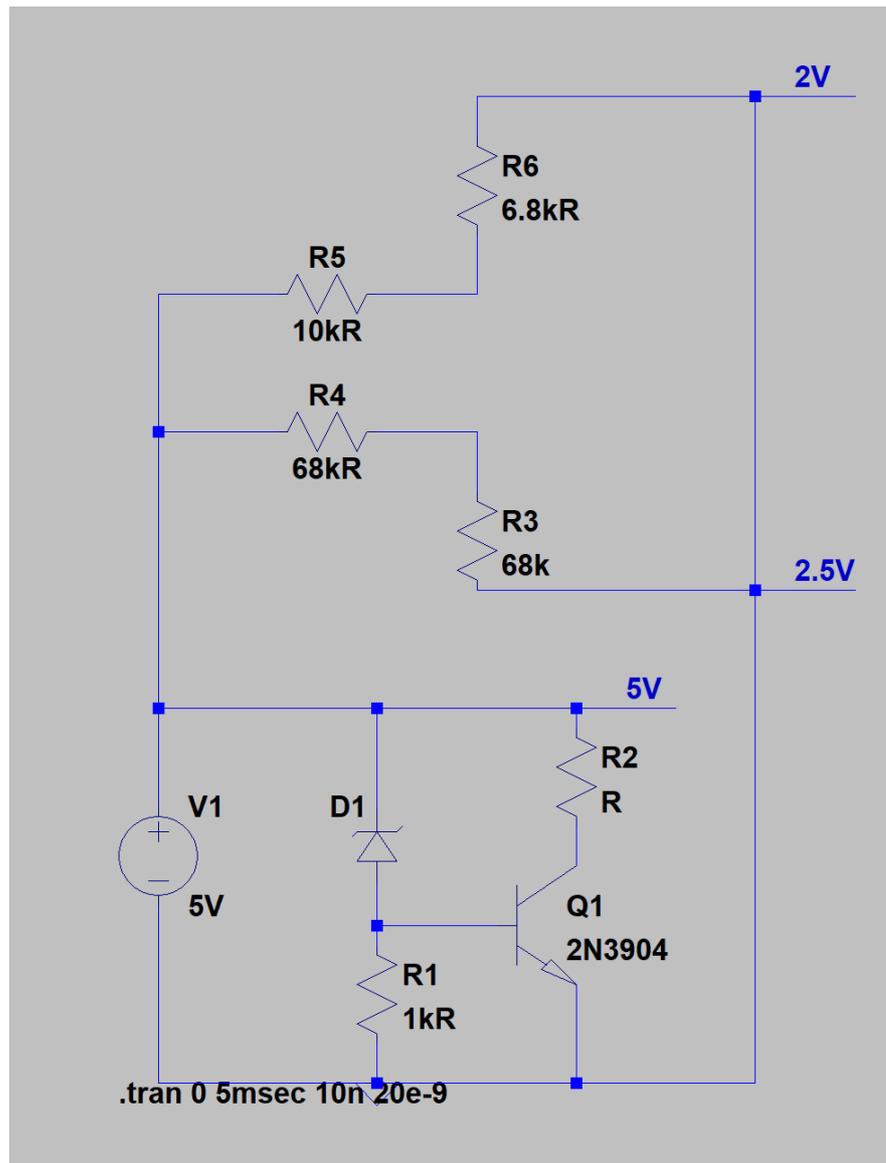


Figura 10. Circuito de carga del celular con parámetros de 5 [ms] de tiempo de simulación, tiempo de guarda de datos de 10 [ns] y  $20e-9$  [s] de tiempo de paso.

### 3. Mediciones

Para realizar las mediciones de estabilización de la celda se utilizó el convertor análogo digital “High Precision AD/DA Board” y un “Raspberry Pi 3”, gracias a estos se logró obtener los datos de voltaje de la celda y subirlos a una base de datos web el mismo que fue programado con el “Raspberry Pi”. La programación fue realizada gracias a un tutorial web en el cual se muestra las conexiones y códigos para diferentes dispositivos en el cual nos muestra como

conectar sensores al mismo (Maclean, 2016). Esta base de datos fue hecha en PHP y el código esta escrito en Python como lo muestra el anexo A.

#### 4. Resultados

Los resultados nos muestran que la celda se estabiliza en 0.805 [V] como muestra la figura 11, esto se realizó mediante la medición del voltaje de la celda cada 30 segundos, con lo que se obtuvieron 4563 datos. De igual manera se pueden ver las curvas de caracterización de la celda: Curva de polarización  $V(I)$  y curva de máxima transferencia de potencia  $P(I)$ , con la cual se logra determinar que la resistencia interna de la celda es de 98 [ $\Omega$ ] con un error de  $\pm 1[\Omega]$  y una corriente de Norton de 10.65 [mA] la cual también fue medida con el “Raspberry Pi 3” en el cual se obtuvieron 2750 datos medidos cada 30 segundos como muestra la figura 12.

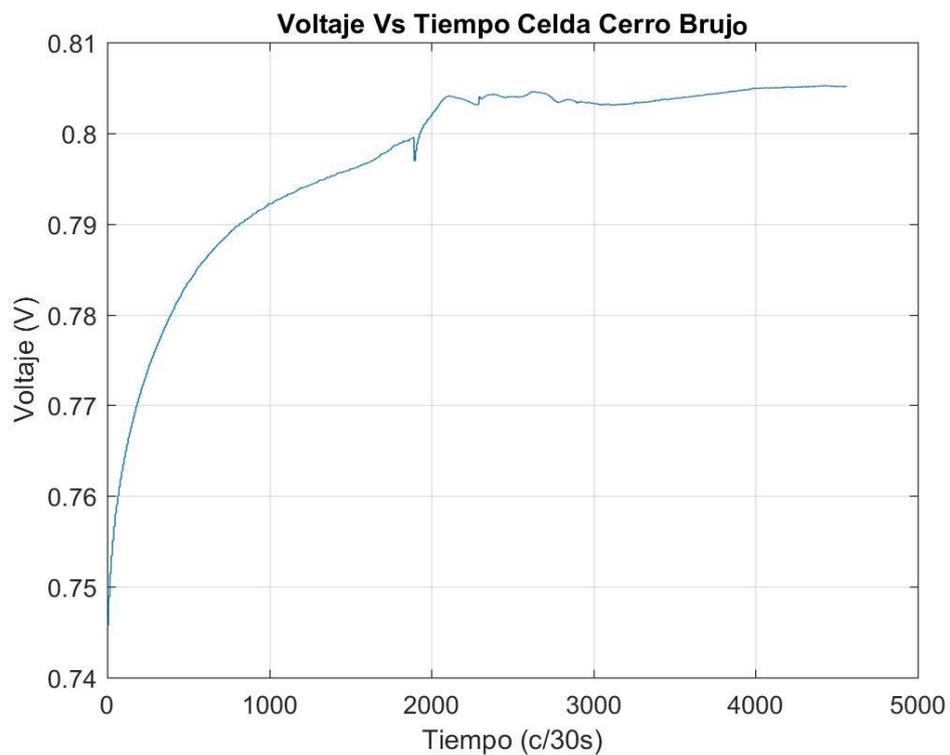


Figura 11. Curva de estabilización de voltaje de la celda Cerro Brujo

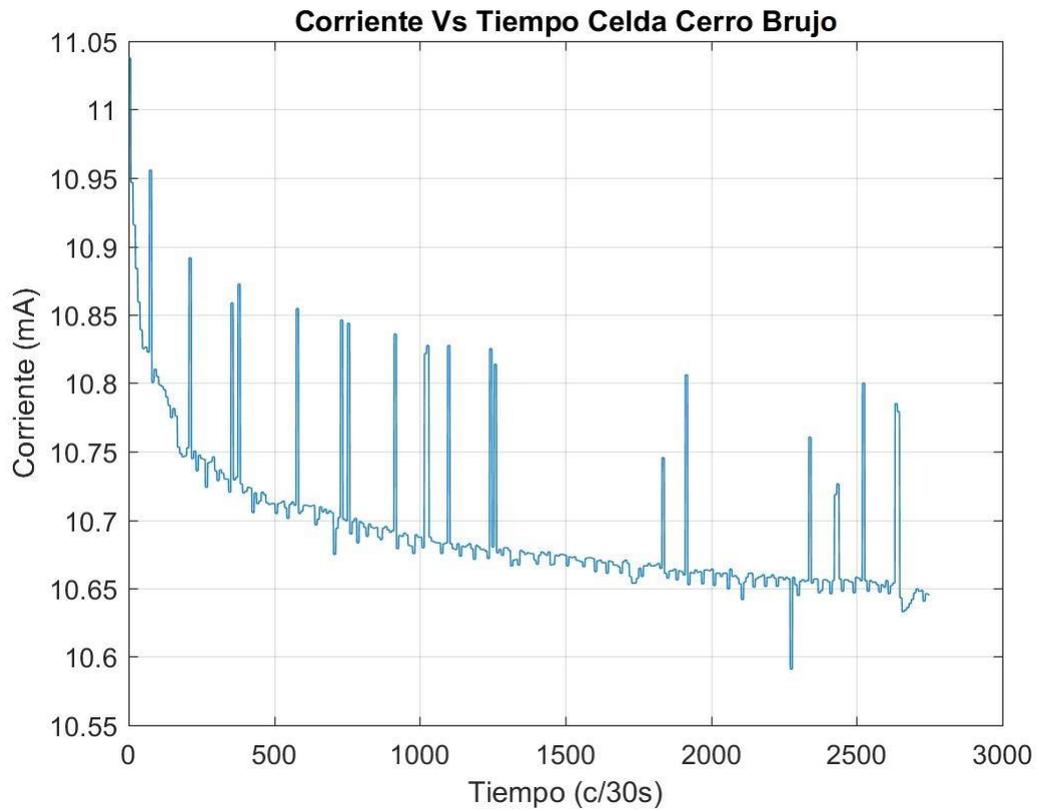


Figura 12. Curva de estabilización de corriente de la celda Cerro Brujo

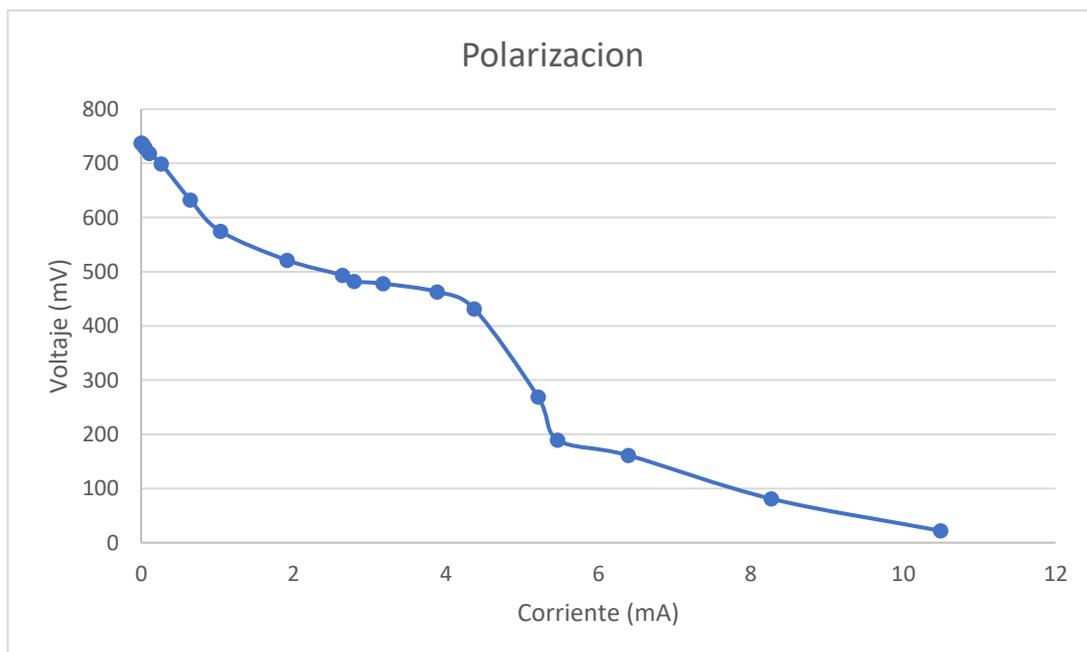


Figura 13. Curva de Polarización de la celda Cerro Brujo

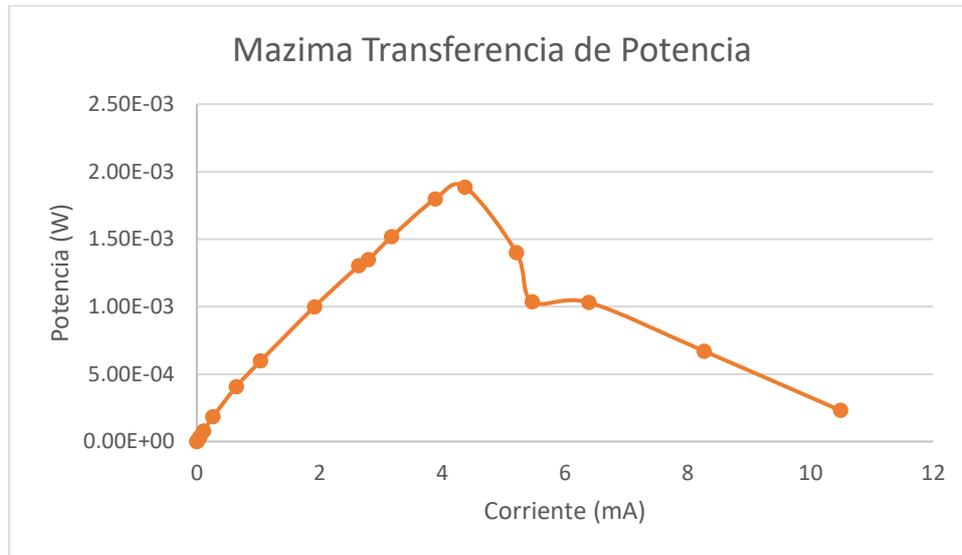


Figura 14. Curva de Máxima Transferencia de Potencia

Una vez que se realizó el estudio de caracterización de la celda y sabiendo cuanto producen, se calcula que se necesita alrededor de 45 celdas que produzcan la misma cantidad de energía, en una configuración serie-paralelo de las cuales se tienen 15 columnas de 3 filas, con la cual se logra los parámetros establecidos para el circuito “Joule Thief”.

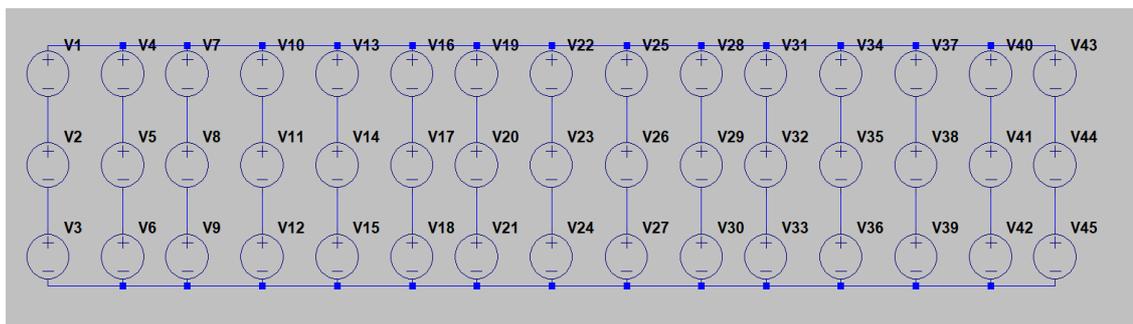


Figura 15. Arreglo de celdas serie-paralelo

En la figura 15 se puede observar cómo se realiza la conexión en serie-paralelo, este arreglo suma 2 [V] en serie, mientras que las celdas en paralelo suman 150 [mA], lo cual

representan los parámetros de base para el circuito de implementación de cosecha y almacenamiento.

Con estos parámetros establecidos y gracias al diseño de la figura 12 se logró cargar los capacitores en aproximadamente 3 días, esto se muestra en la figura 16 y 17 en la que se muestra el voltaje y la corriente de carga.

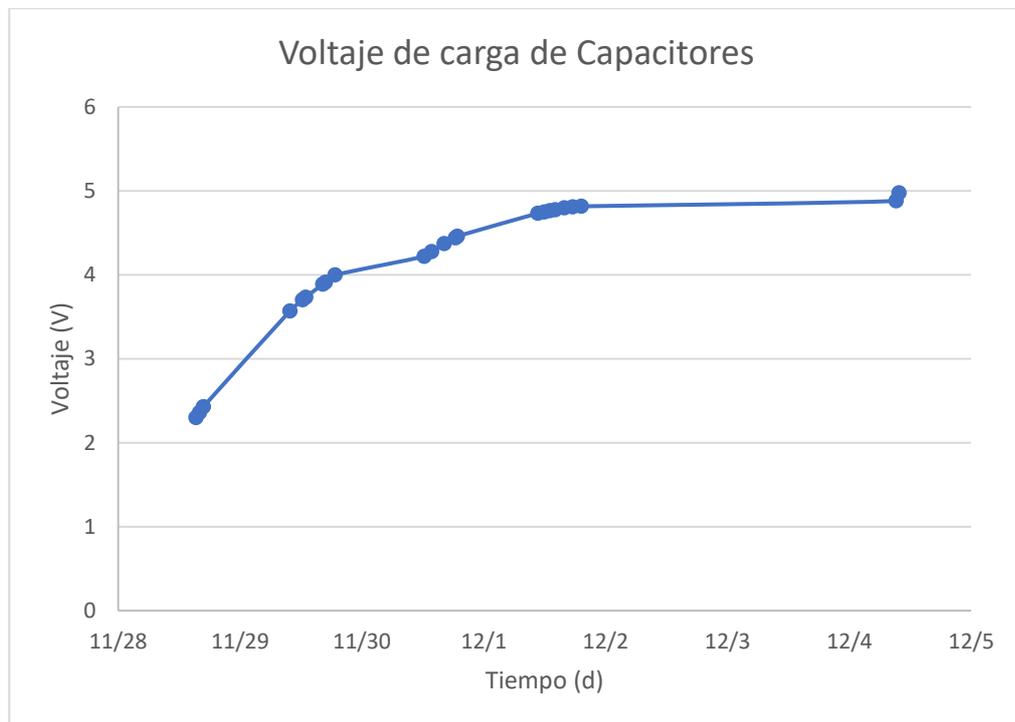


Figura 16. Voltaje de carga de los capacitores en serie.

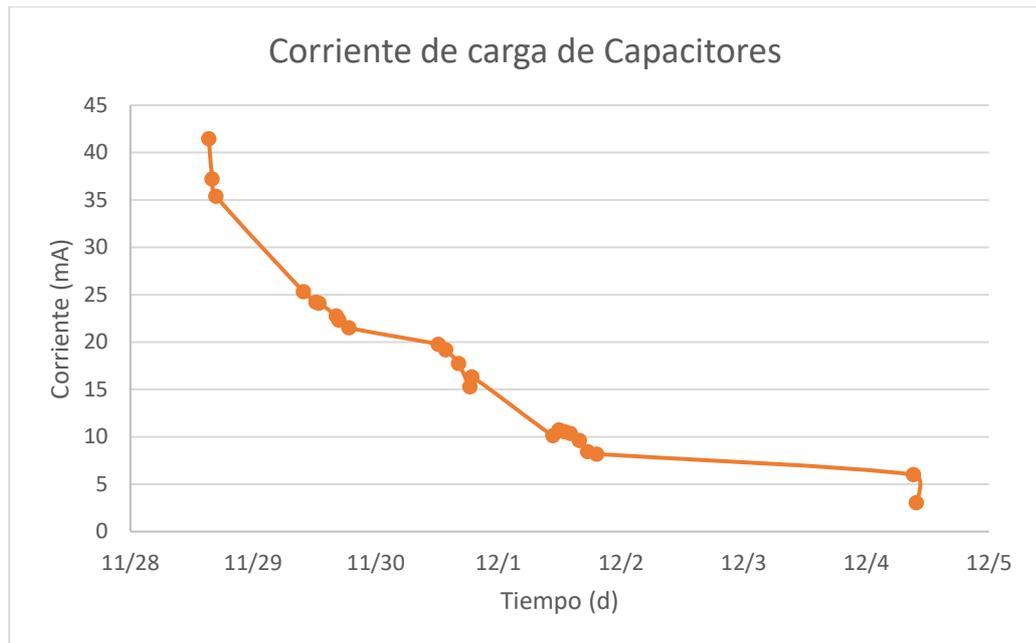


Figura 17. Corriente de carga de los capacitores en serie.

Con este circuito tenemos que la potencia de entrada al sistema es de 260 [mW] mientras se puede calcular la energía almacenada de la siguiente forma.

$$U_c = \frac{1}{2} CV^2 = 21.067kJ$$

Con lo que tenemos que el total de energía almacenada es de 21.067 [kJ] lo cual es bastante alto debido a que la capacitancia de los condensadores también es alta.

Una vez cargados los capacitores se conectó el circuito de control de carga del celular el mismo que es energizado por un voltaje de 4.97 [V] y una corriente de 13.05 [mA], lo que es igual 64.85 [mW]. Este mismo circuito de carga por su parte suministra para el puente divisor de tensión de 2.5 [V] una corriente de 0.61 [mA], para el puente divisor de tensión de 2 [V] una corriente de 0.34 [mA] y para el circuito comparador una corriente de 1.06 m[A]. Esto nos da una potencia total de salida de 7.47 [mW] teniendo de carga un iPod nano de 3ra generación. La batería de este modelo de iPod es de 370 [mAh], por lo que el iPod debe de estar en un estado apagado todo el tiempo se demoraría aproximadamente 14 días en

cargarse. Por otro lado, si se tiene un iPhone actual, la batería es de 2716 [mAh] por lo que el celular se tardaría en carga aproximadamente 107 días en estado apagado todo el tiempo.

Estos tiempos de carga se pueden mejorar con un mejor circuito de control de energía hacia el dispositivo móvil, debido a que este no consume la suficiente corriente como para cargar de manera más rápida el celular. Otra opción, pero menos ideal es modificar el dispositivo para que la carga de la batería sea directa y no pase por el suministro de carga interno del dispositivo.

Este estudio nos ayuda para que en el futuro se desarrollen centrales de tratamiento de aguas residuales de las cuales en las primeras etapas se obtenga la energía de las bacterias tal cual lo hacen estas celdas y después pasarlas al proceso de tratamiento. Estas centrales de tratamiento de aguas residuales serían una buena fuente de energía renovable, amigable con el planeta, barata y limpia.

## CONCLUSIONES

Una vez que se ha realizado el estudio de las celdas se ha podido concluir que se necesitan aproximadamente 45 celdas en un arreglo serie-paralelo en el que se conectan 3 celdas en paralelo como un solo bloque y se conectan 15 bloques en serie, todo esto para obtener los parámetros establecidos de 5 [V] y 150 [mA].

Debido a la alta capacidad de los condensadores estos tardan aproximadamente 3 días en cargarse hasta los 5 [V].

Igualmente debido a que la corriente es muy baja un celular tardaría aproximadamente 107 días en cargarse por completo.

El circuito "Boost Converter" es muy útil ya que tiene una eficacia de 0.9, el principal problema es el circuito de conmutación que en este caso es el resto del circuito "Joule Thief", ya que no es muy eficaz al tener que activar y desactivar un transistor. Esta conmutación nos afecta ya que genera pérdidas de alrededor de 30 [mW].

En este caso se puede concluir que el circuito "Joule Thief" no es lo más recomendable, por lo que lo ideal sería realizar un circuito "Boost Converter" con un circuito de conmutación que no afecte al desempeño del sistema. También se puede mandar a hacer el circuito con componentes integrados que consuman menos energía y sean más eficaces.

Se debe de también mejorar el circuito de control de carga ya que este también nos genera pérdidas debido a los puentes divisores de tensión y el transistor que se utiliza en el circuito comparador. Esto incluye realizar un estudio del sistema de administración de carga interno que utilizan los celulares para desarrollar de mejor manera el sistema de control de carga.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Walter, X, et al. (2016). *Applied Energy, Urine transduction to usable energy: A modular MFC approach for smartphone and remote system charging*. Obtenido el 20 de junio 2017 de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916307814?via%3Dihub>
- Lee, D, et al. (2015). *Bioresource Technology, Microalgae-microbial fuel cell: A mini review*. Obtenido el 28 de junio 2017 de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852415013401?via%3Dihub>
- Hart, D. (2011). *Power Electronics, DC-DC Converters*. Capítulo 6. New York, Estados Unidos: McGraw-Hill
- Navarro, R. (2014). *Nomadas Electronicos. Oscilador de bloqueo (Joule Thief)*. Obtenido el 20 de junio 2017 de <https://nomadaselectronicos.wordpress.com/2014/06/11/oscilador-de-bloqueo-joule-thief/>
- Maclean, M. (2016). *Measure Record Explore. Connecting Analog Sensors to the Raspberry Pi*. Obtenido el 7 de septiembre 2017 de <https://leanpub.com/RPiMRE/read#leanpub-auto-connecting-analog-sensors-to-the-raspberry-pi>
- Imets, T. *Instructables. Cheap Voltage Regulated Joule Thief Power Supply/charger*. Obtenido el 10 de septiembre 2017 de <http://www.instructables.com/id/Cheap-Voltage-Regulated-Joule-Thief-power-supplych/>
- Editronikx. (30 de octubre de 2016). *Funcionamiento de oscilador de bloqueo o ladrón de julios editronikx*. [Archivo de video]. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=rCdnYRf4nmU&vl=es-419>
- Kurmal, R. (2015). *Renewable and Sustainable Energy Reviews. Exoelectrogens: Recent advances in molecular drivers involved in extracellular electron transfer and strategies used to improve it for microbial fuel cell applications*. Obtenido el 20 de junio 2017 de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115014124?via%3Dihub>
- Lohner, S & Rowland, T. (2017). *Science Buddies. Turn Mud into Energy With a microbial Fuel Cell*. Obtenido el 10 de septiembre 2017 de [https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project-ideas/Energy\\_p042/energy-power/microbial-fuel-cell-mud#background](https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project-ideas/Energy_p042/energy-power/microbial-fuel-cell-mud#background)
- Maxwell. *Datasheet. K2 Ultracapacitors*. Obtenido el 10 de septiembre 2017 de [http://www.maxwell.com/images/documents/k2series\\_ds\\_10153704.pdf](http://www.maxwell.com/images/documents/k2series_ds_10153704.pdf)
- Choi, S. (2016). *Biosensors and Bioelectronics. Microscale microbial fuel cells: Advances and challenges*. Obtenido el 10 de septiembre 2017 de <http://dx.doi.org/10.1016/j.bios.2015.02.021>

## ANEXO A: CODIGO EN PYTHON PARA LA LECTURA DE VOLTAJES DE LA CELDA

El código está escrito en lenguaje Python, con el cual se logra obtener los valores de voltaje de la celda y subirlos a una base de datos web hecha en PHP.

**# Se importan los datos del conversor ads1256 y también el tiempo desde el 'Raspberry Pi'.**

```
import ads1256
import time
from datetime import datetime
```

**# Se inicia sesión en la cuenta de PHP y se guardan los datos obtenidos del conversor ads1256 dentro de la base de datos.**

```
def insertDB(level):
    try:
        conn = mdb.connect('localhost','root','','Mediciones');
        cursor = conn.cursor()
        sql = "insert into Voltaje(voltaje) values ('%s')" % \
            (level)
        cursor.execute(sql)
        sql = []
        conn.commit()
        con.close()
    except mdb.Error as e:
        print(e)
    except:
        print ("Error desconocido")
```

**# Se impone la ganancia y los muestreos por segundo del conversor.**

```
gain = 1
sps = "25"

chv = [0,0,0,0,0,0,0,0,0]
ch = [0,0,0,0,0,0,0,0,0]
```

**# Se enciende el conversor ads1256.**

```
ads1256.start(str(gain), str(sps))

timest = str(datetime.now ())
timest = timest.replace(":", "_")
```

```
timest = timest.replace(" ", "-")
timest = timest.replace(".", "-")
timest = timest[:7]
filename = "ads1256-log-"+str(timest)+".csv"
```

**# Se crean las columnas dentro del archivo .CSV.**

```
header = []
header.extend(["Row_id", "Channel 7", "Timestamp"]) # Define a CSV
header
```

**# Se crea el archivo .CSV donde se van a guardar los datos obtenidos del conversor ads1256.**

```
with open(filename, "w") as file:
```

```
    file.write(",".join(str(value) for value in header)+ "\n")
```

```
i = 0
```

```
print ("ADS1256 Voltage Data Logger" + "\n" + "GAIN: " + str(gain) +
"      SPS: " + str(sps) + "      FILENAME: " + filename + "\n")
```

```
with open(filename, "a") as file:
```

**# Se comienzan a tomar los datos de voltaje, se los transforma y se los guarda en la base de datos en PHP**

```
while True:
```

```
    row_id = i
```

```
    ch = ads1256.read_channel (7)
```

```
    chv = ((ch * 100) /167.0)/int(gain)/1000000.0
```

```
    print chv
```

```
    insertDB(str(chv))
```

**# Registra efectivamente en el archivo .CSV.**

```
    file.write(str(row_id)
+ ", " + str(chv) + ", " + str(datetime.now()) +
"\r\n")
```

**# Se impone el tiempo de los intervalos entre mediciones**

```
    time.sleep(30)
```

```
    i = i + 1
```

**# Se apaga el conversor**

```
ads1256.stop()
```

## ANEXO B: TABLAS DE MEDICIONES

Datos Carga Capacitores en Serie			
Fecha y Hora	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)
11/28/2017 15:21	2.299	41.46	95.31654
11/28/2017 16:01	2.361	37.21	87.85281
11/28/2017 16:46	2.428	35.4	85.9512
11/29/2017 9:52	3.571	25.33	90.45343
11/29/2017 12:21	3.702	24.2	89.5884
11/29/2017 12:56	3.732	24.12	90.01584
11/29/2017 16:19	3.89	22.77	88.5753
11/29/2017 16:50	3.913	22.34	87.41642
11/29/2017 18:45	3.998	21.51	85.99698
11/30/2017 12:17	4.219	19.77	83.40963
11/30/2017 13:44	4.276	19.18	82.01368
11/30/2017 16:14	4.372	17.74	77.55928
11/30/2017 18:26	4.44	15.27	67.7988
11/30/2017 18:50	4.46	16.341	72.88086
12/1/2017 10:40	4.733	10.13	47.94529
12/1/2017 11:55	4.748	10.73	50.94604
12/1/2017 13:01	4.763	10.548	50.240124
12/1/2017 14:04	4.775	10.372	49.5263
12/1/2017 15:52	4.796	9.636	46.214256
12/1/2017 17:30	4.81	8.45	40.6445
12/1/2017 19:14	4.816	8.19	39.44304
12/4/2017 9:13	4.88	6	29.28
12/4/2017 9:50	4.976	3.068	15.266368

Tabla 2. Datos de carga de los capacitores en serie

Resistencia ( $\Omega$ )	Voltaje (mV)	Corriente (mA)	Potencia (mW)
<b>1000000</b>	737.4	0.0008	0.00058992
<b>270000</b>	737.3	0.0028	0.00206444
<b>33000</b>	734.8	0.0227	0.01667996
<b>15000</b>	728.9	0.0489	0.03564321
<b>6800</b>	718.7	0.1076	0.07733212
<b>2700</b>	698.9	0.2629	0.18374081
<b>1000</b>	632.6	0.6445	0.4077107
<b>560</b>	574.8	1.0393	0.59738964
<b>240</b>	521.1	1.9168	0.99884448

<b>200</b>	493.5	2.64	1.30284
<b>180</b>	482.5	2.794	1.348105
<b>150</b>	478	3.175	1.51765
<b>120</b>	463	3.884	1.798292
<b>100</b>	431.6	4.371	1.8865236
<b>51</b>	269.1	5.208	1.4014728
<b>33</b>	189.7	5.465	1.0367105
<b>24</b>	161.2	6.392	1.0303904
<b>10</b>	81.03	8.269	0.67003707
<b>1</b>	21.99	10.49	0.2306751

Tabla 3. Datos de caracterización de la celda Cerro Brujo