

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CICLADOR DE BATERÍAS

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A BATTERY CYCLER

Guido Castillo-Ocaña ^{1*} 

¹ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

Recibido (Received): 22 / 02 / 2021 Aceptado (Accepted): 18 / 06 / 2021

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es diseñar y construir un dispositivo “El Ciclador de Baterías” cuya función es cargar y descargar de forma automática y repetidamente una batería y almacenar los datos del voltaje y la intensidad de corriente de la batería en función del tiempo por cada proceso de carga y descarga; con estos datos se puede determinar el estado de carga, la eficiencia coulombica y la eficiencia energética de la batería. El estado de carga de la batería es un parámetro importante que indica cuanta carga hay disponible en la batería respecto de su capacidad, la estimación precisa del estado de carga de la batería es fundamental en un sistema de gestión de batería, pues permite evitar una sobrecarga o descarga profunda de la batería, condiciones que pueden dañar irreversiblemente la batería.

Palabras clave: Ciclador, Eficiencia Coulombica, Eficiencia Energetica, Estado de Carga

ABSTRACT

The objective of the present work is to design and build a device "The Battery Cyclier" whose function is to automatically and repeatedly charge and discharge a battery and store the data of the battery voltage and current intensity as a function of time for each charging and discharging process; with these data the state of charge, coulombic efficiency and energy efficiency of the battery can be determined. The state of charge of the battery is an important parameter that indicates how much charge is available in the battery with respect to its capacity, the precise estimation of the state of charge of the battery is essential in a battery management system, as it allows to avoid an overcharge or deep discharge of the battery, conditions that can irreversibly damage the battery.

Keywords: Cyclier, Coulombic Efficiency, Energy Efficiency, State of Charge

1. INTRODUCCIÓN

Según Abruna, Kiya, & Henderson [1], la electricidad generada a partir de fuentes renovables, como energía solar y eólica, ofrece un enorme potencial para las futuras demandas de energía. Pero el acceso a la energía solar y eólica es intermitente, mientras que la electricidad debe estar disponible de manera confiable durante 24 horas al día. Por lo tanto, los dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica serán críticos para nivelar eficazmente la naturaleza cíclica de las energías renovables. Actualmente las baterías de iones de litio y otras baterías basadas en litio tienen las más altas densidades de energía siendo las más apropiadas en los sistemas fotovoltaicos. Dado que la durabilidad de la batería depende de muchos factores sería importante evaluarla en el campo y un ciclador de baterías comercial es un equipo muy costoso y poco práctico para su uso en el campo.

En este trabajo se ha diseñado y construido un ciclador de baterías económico y portátil, por lo tanto, este dispositivo puede ser usado en el campo, permitiendo determinar el estado de carga, la eficiencia coulombica y la eficiencia energética de la batería bajo las condiciones a las cuales funciona; estos parámetros son fundamentales para una administración eficiente del sistema fotovoltaico.

El Ciclador de Baterías es un dispositivo cuya función es cargar y descargar repetidamente una batería y almacenar los datos del voltaje y la intensidad de corriente de la batería en función del tiempo por ciclo de carga y descarga.

Así mismo se ha desarrollado un programa que controla todos los procesos del ciclador, como almacenar los datos del voltaje, la intensidad de corriente y el tiempo en una memoria micro SD.

* Corresponding author.:
E-mail: gcastillo@uni.edu.pe

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente trabajo, se eligió la tarjeta Arduino Uno, debido a que presenta muchas ventajas tales como: abundante información para su programación, gran cantidad de periféricos (módulos) y costo reducido. Es el componente principal, encargado de gestionar todos los procesos del ciclador de baterías.

Para el almacenamiento de los datos (voltaje, intensidad de corriente, tiempo), se eligió un módulo micro SD, el cual permite guardar los datos en una memoria micro SD y se hizo las pruebas correspondientes para verificar su funcionalidad.

Para la medición del voltaje y la intensidad de corriente, se optó por usar el módulo ADS1115, el cual es un conversor analógico digital de 16 bits.

Para conmutar entre el proceso de carga y descarga de la batería, se diseñó un circuito que es controlado de manera automática por un módulo relay.

Luego de verificar la funcionalidad del programa que controla al ciclador, el circuito ciclador completo se ensambló en una caja de PVC. Finalmente, el ciclador ya ensamblado fue puesto a prueba con una batería de iones de litio LIR 18650.

2.1 PROCESO DE CARGA DE UNA BATERÍA DE IONES DE LITIO

CC-CV: primero se carga la batería a corriente constante (CC), hasta que alcance 4,2 V por celda; luego se mantiene el voltaje constante (CV) a 4,2 V hasta que la corriente de carga alcance un 10% de su valor inicial. Esta es la condición en la cual la batería está completamente cargada.

CV: en este caso el voltaje se mantiene constante a 4,2 V durante todo el proceso de carga, hasta que la corriente disminuye a 100 -120 mA. Este es el método usado en el presente trabajo.

Si la carga de la batería termina cuando el voltaje es de 4,2 V por celda, entonces solo se habrá cargado la batería entre un 40% a 70% de su capacidad total, por esta razón, la batería se debe continuar cargando hasta que la corriente disminuya a su valor de terminación.

Si el voltaje de la batería sobrepasa los 4,2 V entonces hay una sobrecarga lo cual provoca reacciones químicas de deterioro, como una posible metalización de litio y volverse peligrosa, como menciona Power Stream en Lithium Ion Battery Charging [2].

2.2 NIVELES DE VOLTAJE DE LAS BATERÍAS DE LITIO

Las baterías de iones de litio generalmente tienen un voltaje nominal de 3,6 V o 3,7 V; las baterías de LiFePO4 tienen un voltaje nominal de aproximadamente 3,2 V o 3,3 V y las baterías de polímero de litio tienen un voltaje nominal de 3,6 V por celda.

En las baterías de iones de litio y polímero de litio, la zona de seguridad por celda recomendada suele estar entre 3,0 V (totalmente descargada) y 4,2 V (completamente cargada), aunque normalmente pueden descargarse hasta aproximadamente 2,8 V sin ningún problema, como menciona Battery University en Types of Lithium-ion [3].

La descarga debajo de ese nivel puede causar daño irreversible / irreparable. Por lo tanto, estas baterías a menudo cuentan con mecanismos de seguridad incorporados que evitan la sobre descarga.

La sobrecarga provoca reacciones químicas que pueden ser peligrosas

3. CIRCUITO CICLADOR

En la Fig. 1 se muestra el circuito ciclador completo. El Arduino UNO mediante un programa desarrollado para el ciclador, se encarga de gestionar de forma automática, la adquisición de los datos del voltaje de la batería y de la intensidad de corriente que entra y sale de la batería, el control del proceso de carga y proceso de descarga de la batería y el almacenamiento de los datos en una memoria micro SD.

En primer lugar, el programa verifica el voltaje de la batería, si es menor o igual al voltaje mínimo envía un pulso al relay para iniciar el proceso de carga, si el voltaje de la batería es mayor o igual al voltaje máximo envía un pulso al relay para iniciar la descarga; si el voltaje de la batería inicialmente se encuentra en un valor intermedio de su voltaje mínimo y su voltaje máximo entonces la batería se descarga completamente y estos datos no son considerados, debido a que solo son útiles los datos de una carga y descarga completa (un ciclo).

Tanto en el proceso de carga como en el proceso de descarga, el voltaje de la batería y la intensidad de corriente que entra y sale de la batería (voltaje en la resistencia shunt de 0,1 Ω), se mide con el conversor analógico digital ADS1115, los datos se toman cada minuto y se van almacenando en una memoria micro SD, el sistema crea en la memoria micro SD un archivo

con el nombre “cargaXXX” por cada proceso de carga y un archivo con el nombre “descargaXXX” por cada proceso de descarga, XXX representa el número de ciclos.

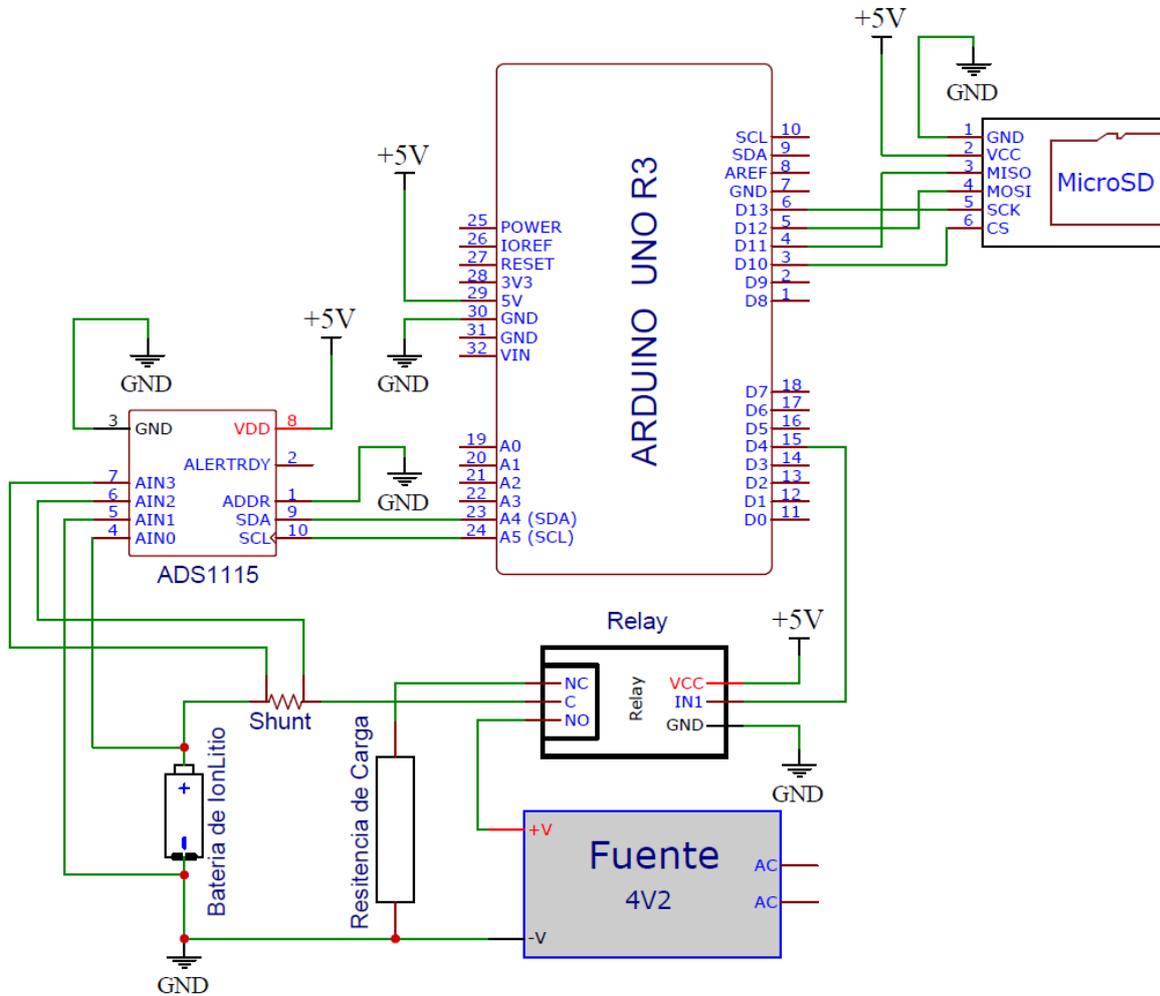


Fig.1. Circuito Ciclador.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para poner a prueba el ciclador, se ha evaluado una batería de iones de litio modelo LIR 18650, cuya capacidad de carga nominal es 2400 mAh, el ciclador estuvo funcionando aproximadamente durante un mes, completando 96 ciclos de carga y descarga.

4.1 CAPACIDAD DE CARGA ELÉCTRICA Y ENERGÍA

La carga eléctrica (Q) que se almacena en la batería durante la carga o la que se obtiene de la batería durante la descarga, se puede obtener integrando la intensidad de corriente (I) en función del tiempo (t); ecuación (1).

$$Q = \int Idt \tag{1}$$

En el Sistema Internacional (SI), la unidad de carga eléctrica es el coulomb (C), entonces (1 C = 1 A.s). En el caso de las baterías es más usual expresar su capacidad de carga eléctrica en amper hora (Ah), 1 Ah representa la cantidad de carga que entra o sale de la batería a razón de 1 A durante 1 h (3600 s), es decir 1 Ah = 3600 A.s = 3600 C, por lo tanto, 1mAh = 3,6 C.

La energía eléctrica (U) que se almacena en la batería durante la carga o la que se obtiene de la batería

durante la descarga, se obtiene integrando la potencia (P) en función del tiempo (t); ecuación (2).

$$dU = Pdt \rightarrow U = \int Pdt \quad (2)$$

En el SI, la unidad de energía es el joule (J). En el caso de las baterías es usual expresar la energía en watt hora (Wh), 1 Wh representa la cantidad de energía que entra o sale de la batería a razón de 1 W durante 1 h (3600 s), es decir 1 Wh = 3600 J, por lo tanto 1 mWh = 3,6 J.

Según Sauer [4], la eficiencia coulombica de la batería (CE) es la relación entre la carga eléctrica total que se extrae de la batería durante la descarga (Q_descarga) entre la carga eléctrica total que recibe la batería durante la carga (Q_carga), un ciclo completo; ecuación (3).

$$CE = \frac{Q_{descarga}}{Q_{carga}} \times 100 \quad (3)$$

La eficiencia energética de la batería (EE) es la relación entre la energía eléctrica total que se extrae de la batería durante la descarga (U_descarga) entre la energía eléctrica total que recibe la batería durante la carga (U_carga), un ciclo completo; ecuación (4)

$$EE = \frac{U_{descarga}}{U_{carga}} \times 100 \quad (4)$$

La TABLA I muestra los resultados obtenidos de la carga eléctrica y la energía que se almacena en la batería durante la carga y la que se obtiene de la batería durante la descarga, con los cuales se calcula la eficiencia coulombica (CE) y la eficiencia energética (EE) de la batería.

En la Fig. 2 se puede observar que la Eficiencia Coulombica es cercana al 100% y la Eficiencia Energética es del orden del 90%.

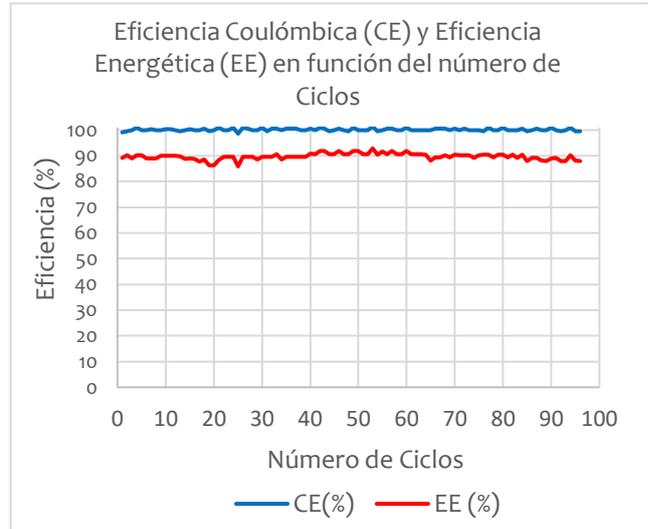


Fig. 2. Eficiencia Coulombica y Eficiencia Energética en función del número de ciclos.

TABLA I
Resultados de la carga eléctrica, energía eléctrica, EC y EE para los 96 ciclos.

Ciclo	Carga de la Batería		Descarga de la Batería		Eficiencia Coulombica CE (%)	Eficiencia Energética EE (%)
	Q(mAh)	U(mWh)	Q(mAh)	U(mWh)		
1	2300	9200	2280	8200	99,1	89
2	2280	9100	2270	8200	99,6	90
3	2260	9100	2260	8100	100,0	89
4	2260	9100	2260	8200	100,0	90
5	2270	9100	2270	8200	100,0	90
6	2260	9100	2260	8100	100,0	89
7	2250	9100	2250	8100	100,0	89
.
.
.
90	2060	8200	2060	7300	100,0	89
91	2080	8300	2080	7400	100,0	89
92	2080	8300	2070	7300	99,5	88

93	2070	8300	2070	7300	100,0	88
94	2070	8200	2070	7400	100,0	90
95	2100	8400	2090	7400	99,5	88
96	2080	8300	2070	7300	99,5	88

En la Fig. 3 se puede observar que la capacidad de carga de la batería disminuye aproximadamente de forma lineal con el número de ciclos, ajustando por mínimos cuadrados los datos de la TABLA I, se puede calcular la carga que almacena la batería (Q) en función del número de ciclos (n); ecuación (5).

$$Q = (-1,8791n + 2241,3)mAh \quad (5)$$

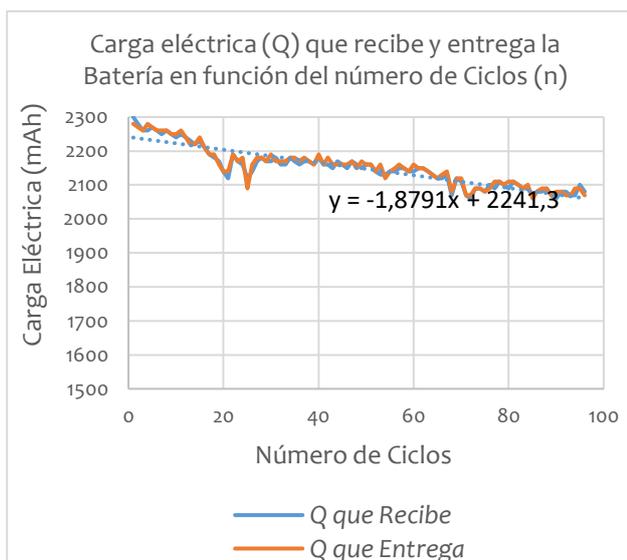


Fig. 3. Carga eléctrica que recibe y entrega la Batería en función del número de Ciclos.

4.2 ESTADO DE CARGA DE LA BATERÍA (SOC)

El Estado de Carga (SOC), es un parámetro importante, que permite conocer, cuál es la capacidad actual de carga (Q_{actual}) de la batería, por lo tanto, el SOC es más útil durante la descarga de la batería, pues permite estimar la cantidad de energía (U) disponible en la batería ($U = Q_{actual}V$).

El SOC es un indicador de la capacidad de carga actual de la batería como porcentaje de su capacidad de carga máxima; se calcula como el cociente de la capacidad de carga en el estado actual (Q_{actual}) entre la capacidad máxima ($Q_{máxima}$) de la batería; ecuación (6).

$$SOC = \left(\frac{Q_{actual}}{Q_{máxima}} \right) \times 100\% \quad (6)$$

En la Fig. 4 se puede observar cómo cambia el voltaje de la batería en función del SOC durante la descarga, en esta gráfica se muestran simultáneamente, el Ciclo 1, el Ciclo 48 y el Ciclo 96, claramente se puede ver que éstas coinciden muy bien. Por lo tanto, para las condiciones en las que se ha evaluado la batería, serán suficientes los datos del ciclo 1, para determinar el SOC de cualquier ciclo.

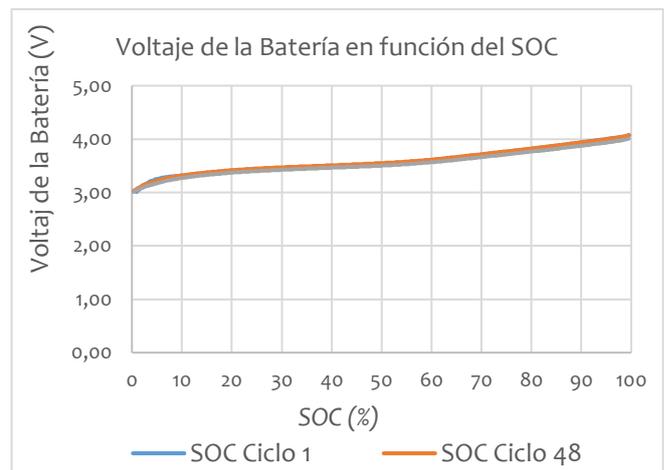


Fig. 4. Voltaje de la Batería en función del Estado de Carga.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La carga almacenada en la batería durante el primer ciclo de carga, TABLA I, es 2300 mAh, ésta diferencia respecto de su valor nominal de 2400 mAh, se debe principalmente a la pérdida irreversible de su capacidad de carga cuando la batería se guarda sin usar, ésta batería estuvo guardada por aproximadamente un año desde las pruebas iniciales, Ecker y otros [5], muestran que una batería de iones de litio guardada con una carga del 10% de su capacidad, a una temperatura de 50°C; al cabo de 400 días pierde aproximadamente un 6% de capacidad; además ésta misma batería fue sometida a unos 15 ciclos durante las pruebas iniciales del ciclador.

La Eficiencia Coulómbica (CE) de esta batería es de 100% aproximadamente, TABLA I; este valor coincide muy bien con lo que indica la bibliografía, Battery University [6], la CE de una batería de iones de litio es típicamente mayor al 99%. Esto se debe a que la capacidad de carga de la batería es prácticamente la misma durante la carga y descarga.

La capacidad de carga de la batería, disminuye aproximadamente de forma lineal con el número de ciclos, Fig. 3; por lo tanto, la ecuación obtenida por el método de mínimos cuadrados, ecuación (5), permite estimar la capacidad de carga de la batería para cualquier ciclo. Según Narayan y otros [7], se considera que una batería llega al final de su vida útil cuando su capacidad de carga es menor que el 80% de su valor nominal; en este caso $80\% (2400 \text{ mAh}) = 1920 \text{ mAh}$; la ecuación (5) nos permite estimar que al cabo de 180 ciclos la capacidad de carga de la batería será de 1900 mAh, por lo tanto, la vida útil de ésta batería es de 180 ciclos, este valor es menor que el tiempo de vida útil que indica la hoja de datos de la batería >300 ciclos; este resultado se debe a que la batería al haber estado guardada por aproximadamente un año perdió parte de su capacidad de carga.

La Eficiencia Energética (EE) de esta batería es 90% aproximadamente, TABLA I; este valor depende de las condiciones en la que opera la batería, pues durante la carga y descarga, hay pérdidas de energía principalmente en forma de calor.

La CE y la EE de la batería evaluada, prácticamente se han mantenido constantes durante los 96 ciclos que se completó durante el periodo de prueba del ciclador, sin embargo, esto no garantiza que se mantenga constante durante el ciclo de vida de la batería.

El estado de carga (SOC) de la batería, es tal vez uno de los parámetros más importantes, en la Fig. 4, se puede ver que, la relación que hay entre el voltaje de la batería durante la descarga y el SOC, es prácticamente la misma para cualquier ciclo; por lo tanto, con los datos correspondiente al ciclo 1, se puede determinar el estado de carga para cualquier ciclo.

CONCLUSIONES

Se ha logrado diseñar, implementar y probar satisfactoriamente el ciclador de baterías, Fig. 5; cuya función es cargar y descargar de forma automática repetidamente una batería e ir almacenando los datos de voltaje e intensidad de corriente de la batería en función del tiempo en una memoria micro SD; se ha evaluado una batería de iones de litio modelo LIR 18650.

Se ha determinado que la capacidad de carga de la batería disminuye aproximadamente de forma lineal con el número de ciclos, esto permite estimar el tiempo de vida de la batería, se ha estimado que el tiempo de vida de la batería evaluada es 180 ciclos; también se ha observado que la capacidad de carga disminuye cuando la batería está guardada sin usar.

Se ha determinado la Eficiencia Coulómbica (CE) y la Eficiencia Energética (EE) de la batería evaluada, obteniendo, $CE = 100\%$ y $EE = 90\%$; durante el periodo de prueba (96 ciclos), estos valores han permanecido prácticamente constantes.

Se ha determinado que la relación que hay entre el voltaje de la batería durante la descarga y el estado de carga (SOC) no depende del número de ciclo; por lo tanto, al evaluar una batería, bajo las condiciones de operación, con los datos que se obtenga para el primer ciclo, se podrá estimar el SOC de cualquier ciclo.

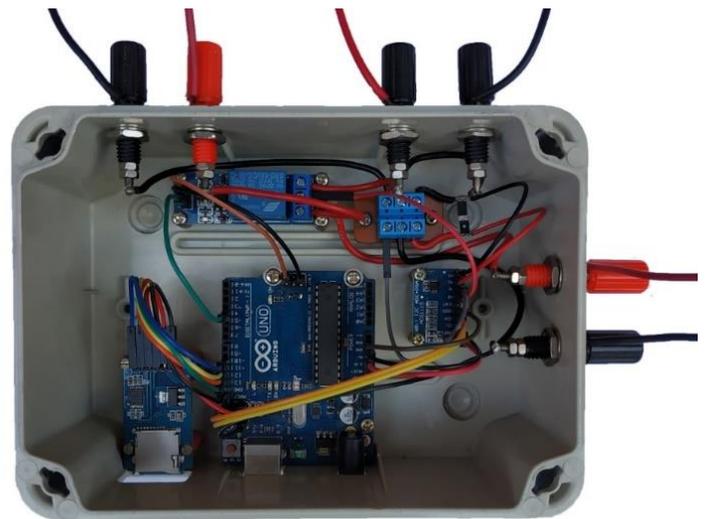


Fig. 5. Ciclador ensamblado.

REFERENCIAS

- [1] H. Abruna, Y. Kiya, y J. Henderson J, "Batteries and electrochemical capacitors", *Phys. Today*, vol. 61, no. 12, pp. 43–47, dic. 2008.
- [2] Power Stream Technology (2021, April 23). Lithium-ion Battery and Lithium Iron Phosphate Battery Charging Basics [Online]. Available: <https://www.powerstream.com/li.htm>
- [3] I. Buchmann (2019, July 10). BU-205: Types of Lithium-ion [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- [4] D. Sauer, "Batteries | Charge–Discharge Curves", en *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, Ed. Garche, Netherlands: Elsevier, 2009, pp. 443–451.
- [5] M. Ecker et al., "Calendar and cycle life study of Li(NiMnCo)O₂-based 18650 lithium-ion batteries", *J. Power Sources*, vol. 248, pp. 839–851, feb. 2014.
- [6] I. Buchmann (2017, October 2017). BU-808c: Coulombic and Energy Efficiency with the Battery [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-808c-coulombic-and-energy-efficiency-with-the-battery>
- [7] N. Narayan et al., "Estimating battery lifetimes in Solar Home System design using a practical modelling methodology", *Appl. Energy*, vol. 228, pp. 1629–1639, oct. 2018.



Los artículos publicados por TECNIA pueden ser compartidos a través de la licencia Creative Commons: CC BY 4.0. Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo revistas@uni.edu.pe