

# **SISTEMA MECATRÓNICO PARA SUMINISTRO AUTOMÁTICO DE PIGMENTO EN CELDAS SOLARES ORGÁNICAS**

## *MECHATRONIC SYSTEM FOR SUPPLYING NATURAL PIGMENT IN ORGANIC SOLAR CELLS*

***Diego Yair Fernández Jiménez***

Universidad Tecnológica de San Juan del Río, México  
*diegofjimenez0@gmail.com*

***Domingo Rangel Miranda***

Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, México  
*ranged@fata.unam.mx*

***Juan Carlos Gallegos Mendoza***

Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, México  
*gallegosju@hotmail.com*

**Recepción:** 29/octubre/2020

**Aceptación:** 27/noviembre/2020

### **Resumen**

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema mecatrónico de suministro de pigmento natural en celdas solares orgánicas para incrementar su vida útil. Este tipo de celdas se degradan rápidamente principalmente por la exposición de los pigmentos naturales a la radiación solar. Se automatizó el proceso para suministrar pigmento cada vez que éste se ha degradado en la celda y deje de hacer su función como agente sensibilizante a la luz. Este sistema se compone de un sistema mecánico de dosificación, un sistema electrónico para medir la corriente generada por la celda en tiempo real y un programa embebido en Arduino® para automatizar el proceso de recarga. Como resultados, se hicieron pruebas con el sistema mecatrónico de recarga de pigmento orgánico en celdas solares experimentales, una vez que la fotocorriente bajó al 50 y 1% de su valor inicial, permitiendo mejorar el proceso anterior de recarga de pigmento.

**Palabras Clave:** DSSC, mecanismo, orgánico, pigmentos, recarga.

## **Abstract**

*This work presents the development of a mechatronic system for supplying natural pigment in organic solar cells to increase its useful life. These types of cells degrade rapidly, mainly due to the exposure of natural pigments to solar radiation. The process was automated to supply pigment each time it has degraded in the cell and ceases to function as a light sensitizing agent. This system consists of a mechanical dosing system, an electronic system to measure the current generated by the cell in real time and a program embedded in Arduino® to automate the recharge process. As results, tests were made with the organic pigment recharge mechatronic system in experimental solar cells, once the photocurrent dropped to 50 and 1% of its initial value, allowing to improve the previous pigment recharge process.*

**Keywords:** *DSSC, mechanism, organic, pigment, recharge.*

## **1. Introducción**

La gran demanda en el consumo de energía para satisfacer adecuadamente las necesidades básicas para el desarrollo de la humanidad ha atraído la necesidad de desarrollar energías renovables o energías verdes. Además, existe una preocupación que se engloba como sociedad, donde se ha acentuado recientemente debido a la desastrosa contaminación ambiental, causada por los derrames de petróleo frecuentes y las aterradoras consecuencias climáticas del efecto invernadero, causado por el consumo de combustibles fósiles. La energía recibida del sol en la tierra es aproximadamente de  $3 \times 10^{24}$  J, cerca de 104 veces más de lo que la humanidad consume actualmente; lo que significa que si se cubre el 0.1% de la superficie terrestre con celdas solares con una eficiencia del 10% sería suficiente para satisfacer nuestras necesidades actuales [Gra, 2005] [United N., 1998].

Un ejemplo de los desarrollos actuales es reportado en la Universidad Autónoma de Yucatán, donde se han elaborado celdas solares orgánicas a partir de un pigmento extraído de una planta de nombre científico Bixa Orellana (achiote). Dichas celdas prometen ser un dispositivo de bajo costo de producción para la conversión de

energía solar en energía eléctrica. Las celdas solares sensibilizadas por pigmento DSSC (Dye-sensitized Solar Cell por sus iniciales en inglés), se basan en una película de material de algún óxido de metal nanoestructurado y mesoporoso, sensibilizada a luz visible por un colorante molecular adsorbido [Gómez, 2010].

El colorante molecular es un compuesto esencial de las DSSC en el cuál se han logrado mejoras en los últimos 15 años, adaptando las propiedades optoelectrónicas del colorante. Hoy en día algunos de los colorantes más exitosos se basan en compuestos de rutenio bipiridilo, los cuáles están caracterizados por su gran coeficiente de absorción en la parte visible del espectro del sol [Gra, 2005]. La máxima eficiencia reportada es de 11.1% para celdas pequeñas. Sin embargo, los compuestos basados en rutenio, son relativamente caros en comparación de pigmentos orgánicos con características similares y un elevado coeficiente absorción; se han reportado eficiencias de aproximadamente 9% en las DSSC construidas a partir pigmentos orgánicos.

Existe una gran variedad de pigmentos en la naturaleza que pueden funcionar como sensibilizador en las DSSC. En distintos trabajos [Hao, 2006], [Gra, 2005], [Mahmoud, 2014] se han probado distintos pigmentos naturales extraídos de arroz negro, pimienta, flor de erydrina variegata, rosa xanthina, plantas asiáticas de nombre científico: Cordyline fruticosa, Hylocerus polyrhiza. Hasta ahora se han dado a la tarea de investigar una gran variedad de pigmentos orgánicos. Se ha reportado en [Maabong, 2015] por ejemplo, que se han empleado pigmentos provenientes de frutos o plantas conocidas, tales como hojas de limón, flores de bugambilia naranja y roja entre otros. Para este caso, la eficiencia más alta reportada fue en la DSSC elaborada con hojas de limón, presentó una densidad de corriente de corto circuito de 1.08 mA, un voltaje de circuito abierto de 0.592 V, una eficiencia de 0.036% y un factor de llenado (FF) de 0.10.

Para la elaboración de una DSSC empleando como sensibilizadores colorantes orgánicos es necesario extraer el pigmento que contiene las principales moléculas sensibles a la luz. En [Barrozo, 2013] se puede encontrar una técnica basada en procesos mecánicos de bajo costo para la extracción del principal carotenoide "bixin" que se encuentra en las semillas de Bixa Orellana (achiote). Dicho método

está basado principalmente en el desgaste de partículas e impacto; en éste se emplean equipos simples como un molino de boyas o una cama de chorros “ball mil” o “spouted bed”. En el caso de [Barrozo, 2013], se trabajó ampliamente con una cama de chorros ya que puede ser un proceso de mayor control, además se realizó la extracción de bixin agregando un tubo de aspiración a la cama de chorros para canalizar el aire de la región de la boquilla, aumentando tanto la velocidad del aire como las partículas de esta región. Dado que la región de vertido es la región donde se produce la extracción más alta debido a la mayor velocidad de las partículas, un aumento de la velocidad en esta región causada por la presencia del tubo de aspiración puede mejorar la extracción mecánica de bixin a partir de semillas de *Bixa Orellana*. También existen técnicas de extracción química en combinación con otros factores físicos como la temperatura. En [Mahmoud, 2014] se realiza la extracción de colorantes que contienen clorofila betanina y betaxandin de las plantas *Cordyline fruticosa* y *Hylocerus polyrhiza*. El proceso se lleva a cabo mediante solventes como metanol y agua para tratar de conservar una alta absorbancia de los colorantes. También en [Gómez, 2010] se emplea una técnica química para la extracción de colorante de semillas de *Bixa Orellana* (achiote), para obtener “norbixin” y “bixin” uno de los principales carotenoides del colorante. El proceso es por medio de una saponificación; se añadieron 10 g de semillas de *Bixa Orellana* (achiote) a un matraz con 200 ml de NaOH acuoso 0.1 M y se sonificaron durante 30 min, después de filtrado se ajustó el pH a 2 con HCl 0.27 M, después el colorante es analizado mediante pruebas espectroscópicas.

Mediante un estudio realizado por Grätzel y colaboradores [Gra, 2005], [Nazeeruddin, 2011], [Bisquert, 2018] en las DSSC, se ha establecido que en el corazón de la celda DSSC podemos encontrar una película óxido mesoporosa semiconductor sensible por algún colorante, que se pone en contacto con un electrolito redox o un conductor de huecos orgánico. El material elegido en este caso es dióxido de titanio fase anatasa ( $\text{TiO}_2$ ) aunque existen trabajos [Gómez, 2010], [Gra, 2005] en los cuales se han empleado otros óxidos tales como ZnO o bien  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ . Al excitar los electrones del colorante sensibilizador depositado sobre una película de titanio anatasa  $\text{TiO}_2$ , estos son inyectados en la banda de

conducción del óxido. Ya que la absorción de la luz en una monocapa de colorante es débil, debido a que el área ocupada por una molécula es mucho mayor que su sección transversal óptica para la captura de la luz, se emplea una película porosa de TiO<sub>2</sub> anatasa para incrementar la absorción de luz mediante un incremento del área de la sección transversal óptica de las moléculas del pigmento. Cuando la luz penetra en la película semiconductora fotosensibilizada, atraviesa cientos de monocapas de colorante absorbidas.

Las funciones que cumple el pigmento o colorante en la celda DSSC son de vital importancia en su rendimiento eléctrico o generación de fotocorriente, así como de parte del electrolito empleado principalmente. Algunos estudios se han enfocado a estudiar cómo van cambiando las interfaces electroquímicas internas de la celda con el envejecimiento de sus elementos mediante técnicas como la EIS o Impedancia Electroquímica [Bhatt, 2016] y se han cuantificado cambios en su eficiencia y en la generación de fotocorriente a lo largo del tiempo cuando fueron expuestas a un espectro solar tipo AM1.5G. Sin embargo, no hay trabajos reportados donde exista un sistema de recarga de pigmento hacia la celda DSSC cuando ésta ha bajado su rendimiento debido a la degradación de tinte natural expuesto a la luz solar y por ende una baja de fotocorriente generada para incrementar su vida útil.

## **2. Métodos**

Para la parte mecánica se utilizó un mecanismo compuesto por dos engranes o ruedas dentadas de dientes rectos, uno de ellos engrana con una barra dentada conocida como cremallera, de forma que cuando el piñón gira la barra es desplazada. Cabe aclarar que para que el piñón pueda desplazarse sobre la cremallera, estos deben tener el mismo módulo. El funcionamiento de este mecanismo permitirá succionar pigmento para recargar una jeringa hipodérmica e inyectar pigmento a la celda solar orgánica. De forma que cuando la celda llegue a su valor mínimo preestablecido de corriente generada, el mecanismo actuará, haciendo que el engrane se desplace hasta abrir el paso al pigmento. Para los cálculos del juego engranes-cremallera y de acuerdo [Reyes, 2013] al motor a pasos

seleccionado modelo 28byj-48 5v, así como tomando en cuenta la velocidad angular relacionada con la velocidad lineal del émbolo de la jeringa hipodérmica de 20 ml y torque para introducir el émbolo, se utilizaron los siguientes datos para diseñar el primer engrane que está acoplado al eje del motor:  $z=16$  dientes,  $d=16$  mm,  $p=3.14159$  (paso normalizado), además  $m=3.14159/\pi$  (modulo)=1 mm y  $ha=1$  mm,  $hf=1.25$  mm,  $h=2.25$  mm. Por lo que las dimensiones del primer engranen, son:

$$d_e = 16 \text{ mm} + 2 * 1 \text{ mm} = 18 \text{ mm}$$

$$d_i = 16 \text{ mm} - 2 * 1.25 \text{ mm} = 13.5 \text{ mm}$$

$$s = 1940 * 3.14159 \text{ mm} = 1.49225525 \text{ mm}$$

$$s' = 2140 * 3.14159 = 1.64933475 \text{ mm}$$

El diseño de las piezas del mecanismo se realizó en SolidWorks®, primeramente se diseñó el engrane mostrado en la figura 1, para ser impreso en 3D con filamento de polímero ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y después en PLA (ácido poliláctico) para una mayor resistencia mecánica y a la humedad, esto con una duración de impresión de 20 minutos. La cremallera mostrada en la figura 2 estará sobre un riel, este riel estará sujeto a una parte fija del chasis para evitar su movimiento. Tiene como función junto con el engrane, desplazar el embolo de la jeringa hacia adentro o hacia afuera.



Figura 1 Engrane diseñado en SolidWorks® para adecuar torque y velocidad.



Figura 2 Cremallera diseñada para mover el émbolo de la jeringa guarda-pigmento.

Se tiene un engranaje de transmisión más, el cual es visualizado en las figuras 3 y 4, fue acoplado a la cremallera para inyectar el pigmento o en su caso cuando el líquido se vació por completo, se acciona el motor a pasos en sentido contrario para succionar más pigmento. Se muestran los diseños de la construcción de la base, figura 5, donde se coloca la celda fotovoltaica para llevar a cabo las pruebas de rendimiento experimental en Laboratorio.



Figura 3 Elementos de suministro de pigmento acoplado el motor a la cremallera.



Figura 4 Posición “adentro” de inyección de pigmento con los elementos mecánicos.



Figura 5 Base de sujeción de la celda para mantenerla fija al momento del suministro.

Se realizó una base en PLA que tiene como función mantener fija la celda solar de prueba, cuyas medidas son de 2.5 cm x 8.5 cm, ya que, si la celda no se mantiene en una posición estable, no recibe la intensidad de la luz directamente sobre su superficie que debe ser de 100 mW/cm<sup>2</sup> y la prueba puede ser errónea.

La base, consta de una sola pieza hecha con filamento para impresión 3D con un tiempo de 2 horas de impresión, esta va sujeta con un tornillo de ¼ pulgada, cabeza hexagonal y 10 cm de largo. Se utiliza una lámpara de halógeno de DC a 24 Vdc y 50 watts, el cual ocupará un adaptador (Soquet para Foco entrada Gu10) para poder alimentar con 127 Vac. Este será la fuente de luz que, junto con un filtro de infrarrojo (para eliminar calor), simularán la luz del sol. Para montar la lámpara se realizó una pieza que se observa en la figura 6, que al igual que la base para el filtro de vidrio (*hot mirror*), se sujetarán con los mismos tornillos y se podrá ajustar la distancia a la cual queremos que esté la celda que son unos 7 cm.



Figura 6 Base para la sujeción de la lámpara de halógeno de 50 Watts.

En la parte electrónica el bloque principal es la medición de corriente generada (in situ) por la celda DSSC. Debido a que la corriente generada en las celdas experimentales utilizadas está del orden de 0 a 250  $\mu$ A, es necesario eliminar ruido electrónico que pueda interferir en esta medición. Para ello, se necesita un convertidor de corriente a voltaje para mandar los datos de corriente generada por la celda solar orgánica al microcontrolador [Reyes, 2013], para indicar el umbral de la celda solar al descargarse o recargarse e inyectar el pigmento cuando sea necesario, realizando la comparación de los voltajes relacionados con el porcentaje de corriente de carga la cual se ha de tomar como corriente mínima al 50 y 1%, para ello se ocupó el circuito LM741 de bajo ruido.

Para realizar una calibración del circuito medidor de corriente fue necesario hacer uso de una fuente de corriente muy estable. Se utilizó una fuente de corriente REF 200 de *BurrBrown* en circuito integrado, que trae consigo 2 fuentes de corriente independientes en espejo cuyo valor de cada una es de  $100\ \mu\text{A}$ . Ya que nuestra corriente de entrada es de  $100\ \mu\text{A}$ , se adecuaron los valores del amplificador convertidor de corriente a voltaje para tener un valor convertido a voltaje de 1 volt de DC, cuyo valor puede ser adecuado para introducirlo al microcontrolador y llevar a cabo el proceso de automatización. El circuito para la medición y calibración de medición de corriente es el que se muestra en la figura 7, al igual que se realizó la comprobación de funcionamiento con la simulación en el programa Proteus®.

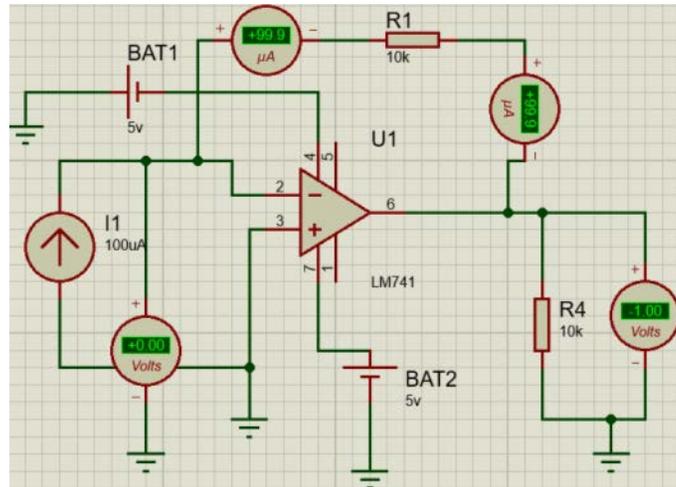


Figura 7 Circuito para la medición del umbral de corriente generada por la DSSC.

## Programación

El microcontrolador ATTINY84 trabaja con librerías propias para su programación desde el IDE Arduino, es por eso que se debe seguir una serie de pasos para añadir la tarjeta y descargar las librerías. Con el “Gestor de URLs” adicionales de tarjetas”, se agrega el siguiente link:

[http://digistump.com/package\\_digistump\\_index.json](http://digistump.com/package_digistump_index.json)

Una vez instalada la tarjeta se vuelve a la pestaña Herramientas -> Placa, luego ir a la parte debajo de la lista de tarjetas y se elige “Digispark (Default – 16.5 Mhz)”. Una vez hecho esto, es posible cargar programas al microcontrolador ATTINY84.

Se tienen variables del tipo entero donde se guarda el valor leído de corriente de la celda (o voltaje), valor máximo, porcentaje, tiempo etc. Las variables de tipo “unsigned long” ayudan a hacer que el microcontrolador simule una multitarea.

Las de tipo “boolean” actúan como “switch” para hacer que una acción se deje de ejecutar. El uso del “void setup” y el “void loop” en Arduino es de carácter obligatorio, por lo que no será posible escribir un algoritmo en esta plataforma sin contar con dichas funciones. Como inicio del programa en el microcontrolador son definidas las variables a utilizar y se asignan líneas de entrada y salida, como se muestra en figura 8. Se adquieren los datos en el microcontrolador para después almacenarlo en la variable “AnalogValorVariable” como se muestra en la figura 9, una vez hecho esto se procede a convertir el voltaje.

Con un condicional “if” se permite leer o evitar la lectura de los datos de la celda, esto para establecer un valor máximo en la corriente generada medida, el cual es almacenado utilizando un siguiente “if”, en la variable “Valmax”.

Para sacar el porcentaje que se está leyendo de los datos arrojados por la celda, se hace un mapeo, comparando el valor máximo tomado inicialmente y el valor analógico actual que está variando.

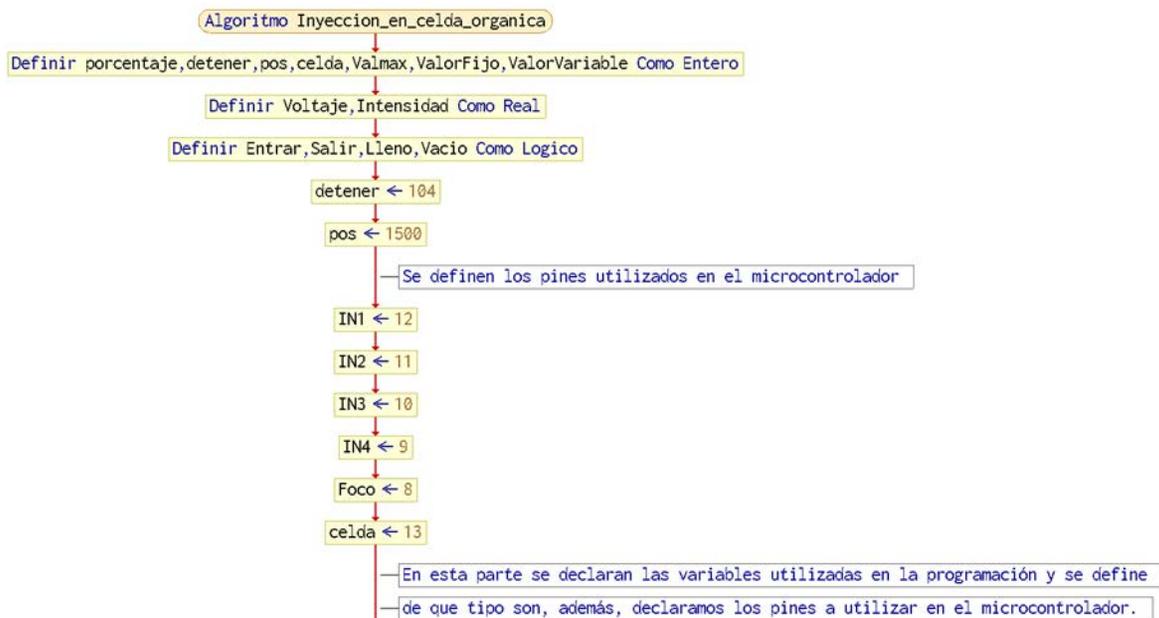


Figura 8 Definición de variables y asignación de pines del microcontrolador.

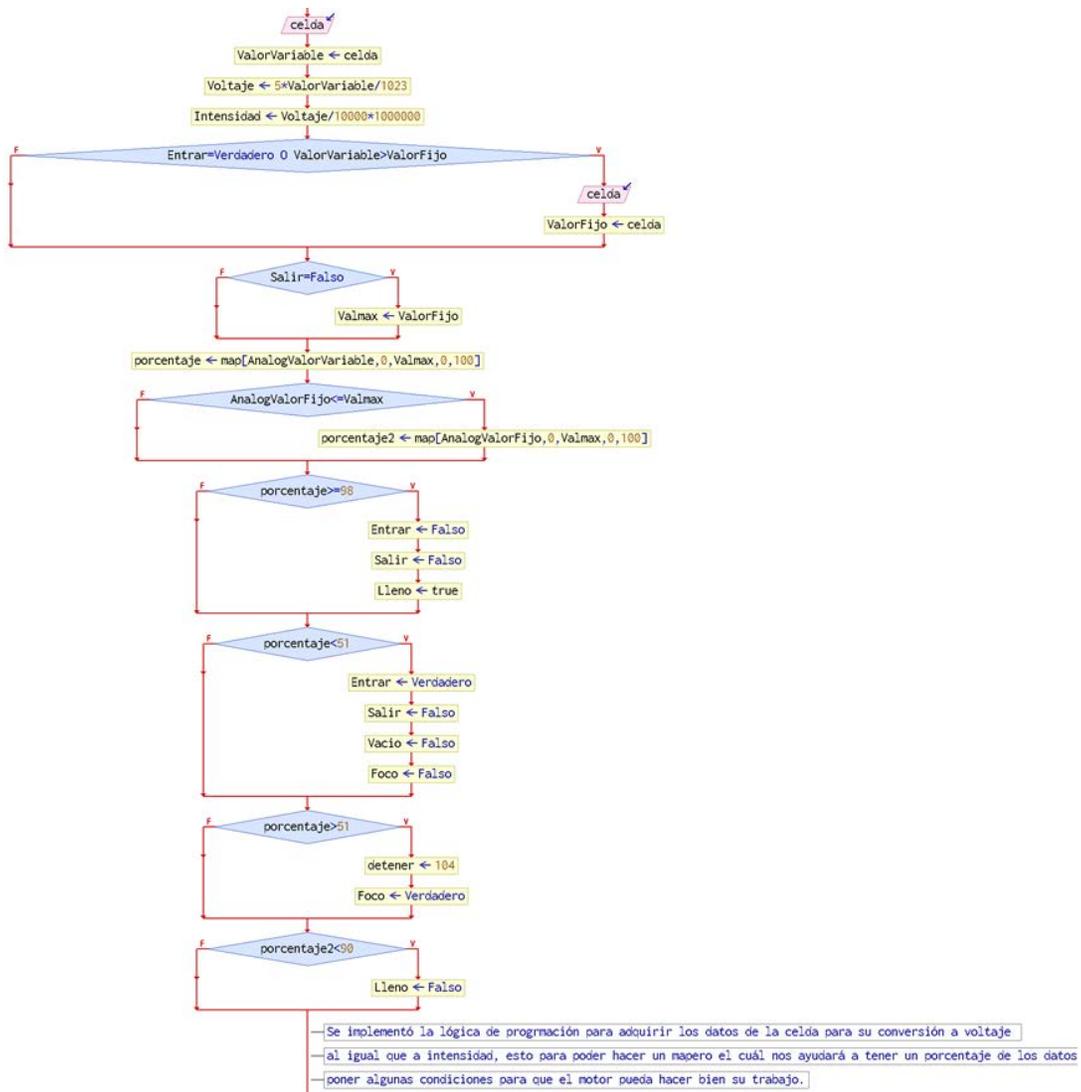


Figura 9 Datos de corriente generada en la celda y asignación de porcentaje.

Se utilizan dos condiciones, una para que al ser mayor o igual a 94%, las variables se pongan en un estado contrario, es decir, para evitar que “AnalogValorFijo” siga leyendo se necesita que la variable “entrar” sea “true”, es aquí donde se cambia el estado de la variable para que no se siga efectuando.

La otra condición es, si el porcentaje es menor al 51%, cambia el estado de las variables dentro del “if” para realizar o no las acciones en las condiciones que contengan esas variables. En el caso contrario con la condición anterior, ésta pone la variable “entrar” en “true”, para así permitir que “AnalogValorFijo” empiece otra vez a leer y actualizar los datos, para que cuando se recargue la celda o se ponga

otra celda, se tome otro valor máximo diferente. En la figura 10 se explica la función del motor a pasos, que es dejar que el pigmento fluya o no, esto con ayuda del mecanismo realizado. Cuando se cumplan algunas condiciones y el porcentaje de la celda sea menor al 51%, se dan pulsos de 3.1 ms al motor a pasos para que se desplace a la posición y permita el paso del pigmento.

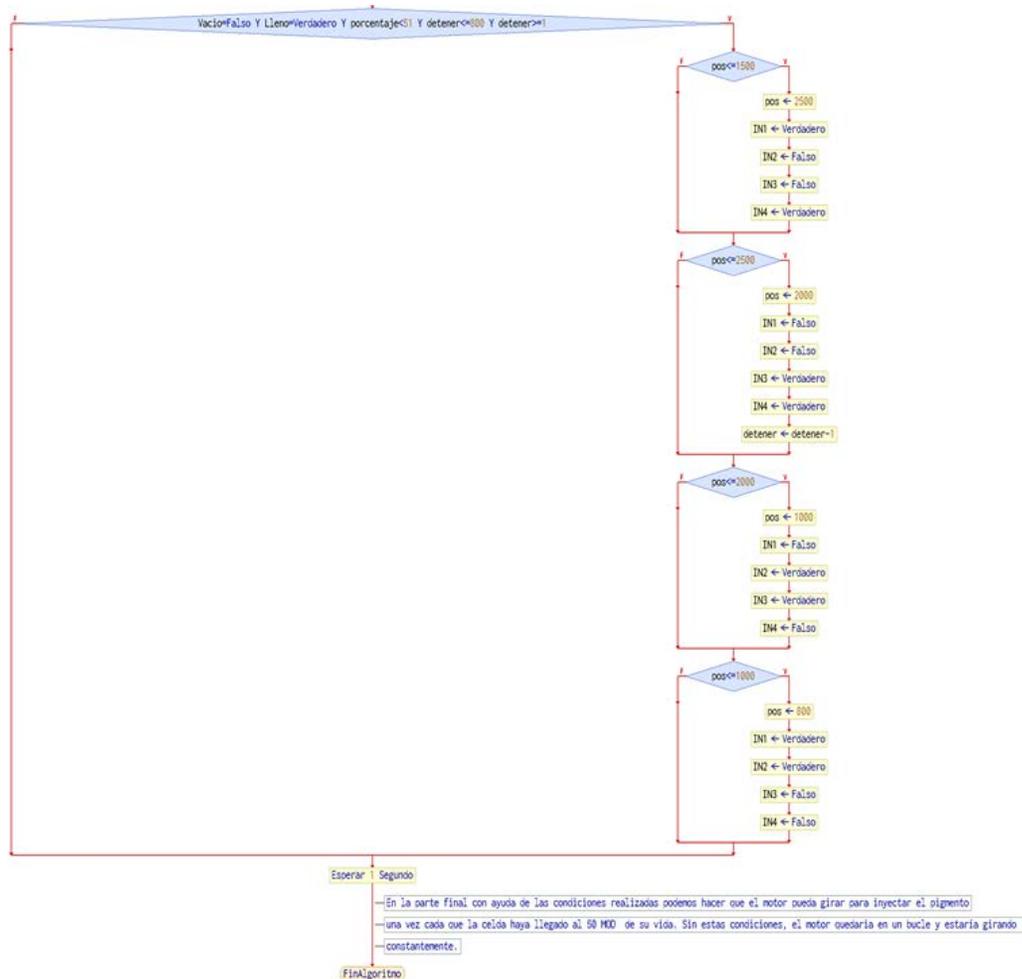


Figura 10 Pasos para que el motor lleve a cabo la recarga de la celda.

Así mismo, apagar la lámpara de halógeno para que la celda se pueda cargar; transcurrido el tiempo se detiene el motor a pasos un total de 6.2 ms (en la programación se pusieron dos instrucciones iguales para evitar el uso de “delays”), para después regresar a su posición de inicio y cerrar el flujo del pigmento, además encender el foco de halógeno, para seguir haciendo lecturas.

### 3. Resultados

Para verificar que el programa esté funcionando correctamente en la lectura de porcentaje de corriente generada y mapeo de esta, se utilizó una celda de silicio estándar iluminada con luz de halógeno y cuya salida es de 2 Vdc, como observamos en la figura 11, ya que su salida es estable. También se hizo una prueba con la misma celda inorgánica en oscuridad (8 segundos en iluminación y 7 segundos en oscuridad) para observar el cambio en las lecturas, las cuales se pudieron verificar de forma correcta. Esto se muestra en la figura 12.

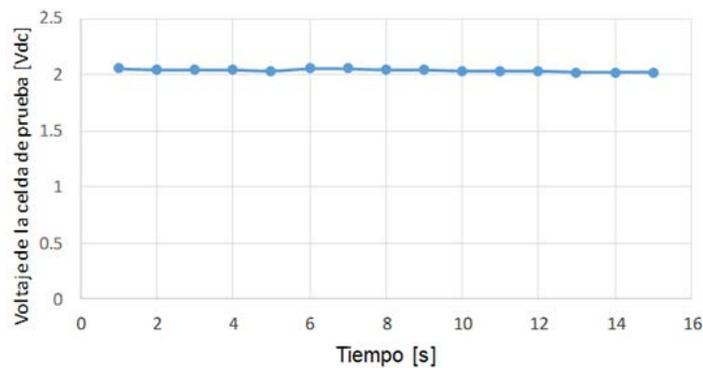


Figura 11 Datos de una celda de calibración para una salida de voltaje de 2 VDC.

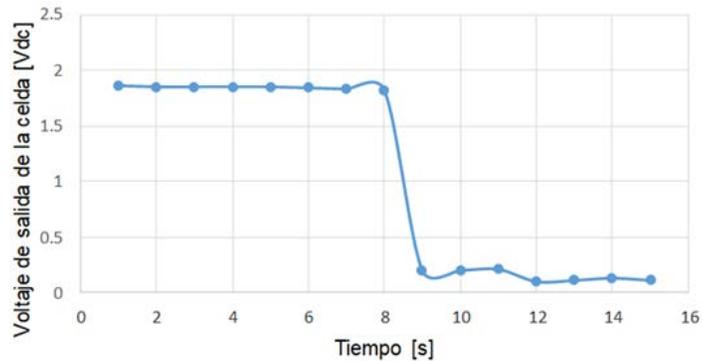


Figura 12 Gráfica que muestra cuando la celda pasa de 1.83 a 0.11 Volts (90 a 10%).

Se muestran los datos de voltaje calibrado en la figura 13. Al sumar la corriente en paralelo, se obtiene una corriente similar a la proporcionada por celdas orgánicas que es de 200  $\mu$ A. Al convertir esta corriente obtenemos un voltaje de 2 V en su salida y así, comprobando que el convertor corriente a voltaje funciona para corrientes muy pequeñas manteniendo una salida lineal.

En pruebas con una DSSC experimental podemos ver en la figura 14, la corriente que proporcionó la celda solar orgánica aplicando energía radiante en su superficie, ésta oscila entre 220  $\mu\text{A}$  y 230  $\mu\text{A}$ . A los 10 segundos de funcionar se recargó pigmento, entonces la corriente generada incrementó, en un lapso de 18 segundos subió a 18  $\mu\text{A}$ , llegando hasta los 238  $\mu\text{A}$ , por lo que se tomó este valor máximo como el 100%.

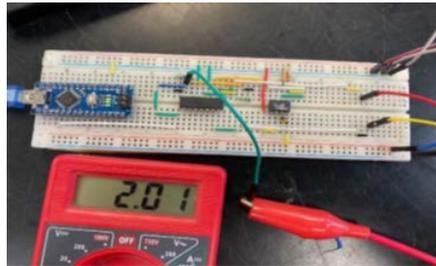


Figura 13 Pruebas con fuentes de corriente estables convertidas a voltaje.

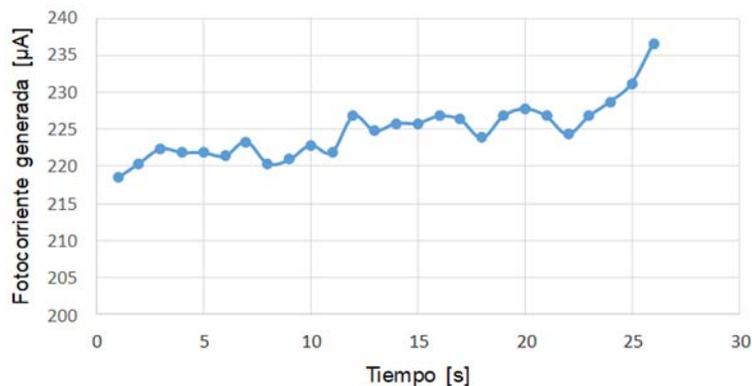


Figura 14 Datos obtenidos de una DSSC durante el proceso de recarga de pigmento.

Así mismo en la figura 15 se graficaron 2 intervalos durante la descarga de la misma celda, 15 segundos cuando la corriente bajó al 50% y 18 segundos cuando la corriente de la celda llega al 1%, en ella se observa la forma en que disminuyó la corriente generada en función del tiempo hasta llegar prácticamente al 0%, que indica que la celda está totalmente descargada. Lo que es importante es que la corriente de salida no baje más del 50%, pues tendríamos disponible solo el 50% de la potencia que podría proporcionar la celda. En el caso graficado es cuando la corriente es de 120  $\mu\text{A}$ , por lo que al llegar al 50% el motor a pasos empezará a

trabajar y empujará el embolo de la jeringa para poder recargar la celda. Esta celda solar orgánica tuvo un tiempo de vida útil de 55 minutos, pero se pudo volver a recargar con pigmento orgánico e incrementar su vida útil.

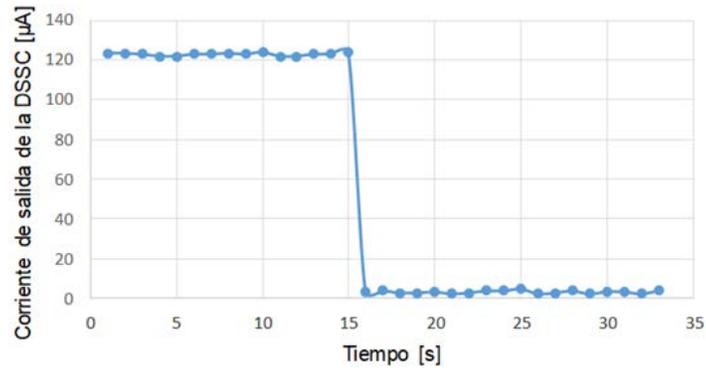


Figura 15 Datos de recarga de una celda orgánica para aumentar su vida útil.

#### 4. Discusión

El método utilizado antes del sistema propuesto aquí no permitía que se tuviera una evaluación del tiempo de vida útil del pigmento o colorante orgánico, pues como se observa en la figura 16 la corriente cayó de 24 a 12  $\mu\text{A}$  en tan solo 20 minutos y no fue posible la reinyección de pigmento automáticamente para aumentar su vida útil. En el desensamble para la recarga de colorante orgánico, la celda sufrió alteraciones en su construcción y bajó su rendimiento.

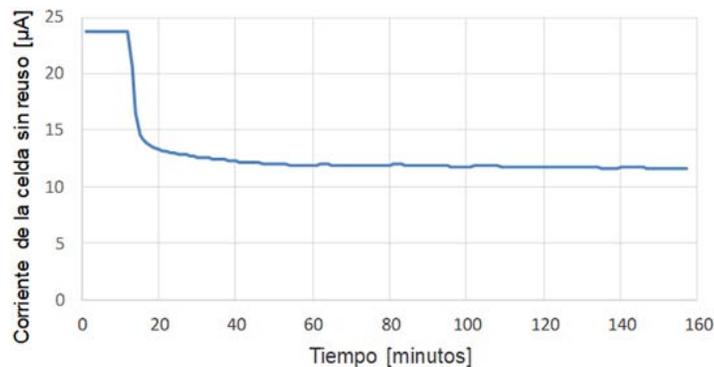


Figura 16 Celda solar DSSC no optimizada y sin recarga de pigmento.

La figura 17 muestra una curva de degradación del pigmento “Palo de Brasil”, la cual permite evaluar, con el sistema mecatrónico propuesto, los tiempos de recarga

y conocer cuándo la celda ha reducido su corriente de descarga al 50% y volver a inyectar pigmento. Las celdas experimentales estudiadas con el sistema propuesto pueden ser ahora optimizadas ya que se mejoró su rendimiento, debido a que ahora la celda tarda más tiempo en descargarse con tiempos mejorados hasta de 90 minutos cuando antes era de solo 20 minutos.

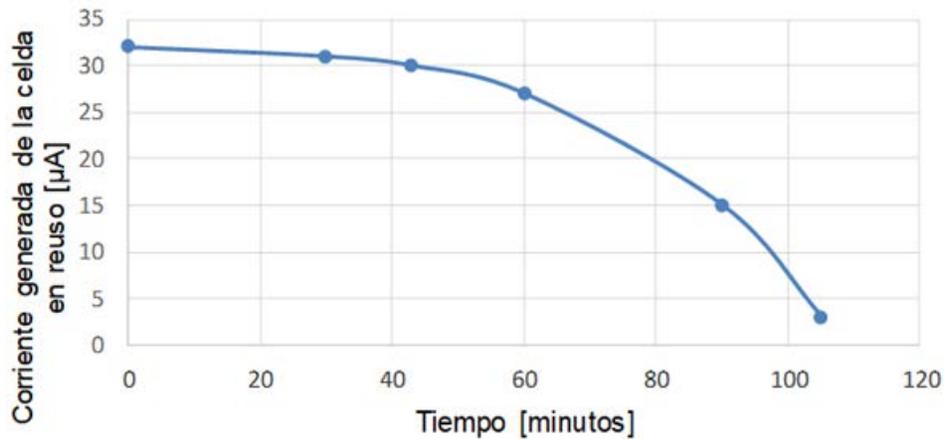


Figura 17 Evaluación de la recarga de pigmento en una celda orgánica.

## 5. Conclusiones

El sistema mecatrónico propuesto fue probado, dando una precisión de  $\pm 1$  ml en el volumen de pigmento en la recarga, lo cual puede considerarse como un sistema mecatrónico de precisión y puede ser utilizado para incrementar la vida útil de las celdas tipo DSSC experimentales, haciendo reuso de la celda solar base, por lo que estas tendrán una mejor factibilidad ecológica que las de tipo inorgánico que son desechables. Anteriormente las celdas tenían que ser desensambladas para la reinyección de colorante y no se evaluaba el uso de los materiales reciclables en las mismas, pues no se sabía en qué momento recargar el pigmento orgánico. Ahora, las ventajas que proporciona el sistema propuesto es que ya se puede medir la corriente de descarga de las celdas en tiempo real y se puede acoplar a cualquier DSSC trabajando con cualquier pigmento orgánico, pues se mide con precisión los porcentajes de fotocorriente generada y por lo tanto permite optimizar el uso de materiales reutilizables en la celda.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Barrozo M., Santos K., and Cunha F., Mechanical extraction of natural dye extract from *Bixa orellana* seeds in spouted bed, *Industrial Crops and Products*, vol. 45, pp. 279–282, 2013.
- [2] Bhatt P., Pandey K., Yadav P., Tripathi B. and Kumar M., Impedance Spectroscopy Investigation of the Degraded Dye- Sensitized Solar Cell due to Ageing, *International Journal of Photoenergy*, ID8523150, 2, 0-9, 2016.
- [3] Bisquert J., *The physics of solar cells, Perovskites, Organics and Photovoltaic Fundamentals*, CRC Press, Taylor and Francis Group, Broken Sound Parkway NW Suite 300 USA, 2018.
- [4] Gómez-Ortíz N. M., Vázquez-Maldonado I. A., Pérez-Espadas A. R., Mena-Rejón G. J., Azamar-Barrios J. A., and Oskam G., Dye-sensitized solar cells with natural dyes extracted from achiote seeds, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 94, no. 1, pp. 40–44, 2010.
- [5] Gra M. and Grätzel M., Solar energy conversion by dye-sensitized photovoltaic cells., *Inorganic Chemistry*, vol. 44, no. 20, pp. 6841–51, 2005.
- [6] Hao S., Wu J., Huang Y., and Lin J., Natural dyes as photosensitizers for dye-sensitized solar cell, *Solar Energy*, vol. 80, no. 2, pp. 209–216, 2006.
- [7] Maabong K., Muiva C. M., Monowe P., Sathiaraj S. T., Hopkins M., Nguyen L., Malungwa K., and Thobega M., Natural Pigments as Photosensitizers for Dye-Sensitized Solar Cells With TiO<sub>2</sub> Thin Films, *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 5, no. 1, pp. 54–60, 2015.
- [8] Mahmoud A. A. H. K., Al-alwani A.M. and Bakar M. A., Effect of Solvents on Extraction and Adsorption of Natural Dyes Extracted from *Cordyline fruticosa* and *Hylo- cereus polyrhizus*, vol. 26, no. 11, pp. 3139–3143, 2014.
- [9] Naciones Unidas, Protocolo de kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático, Protocolo de Kyoto, vol. 61702, p. 20, 1998.
- [10] Nazeeruddin K., Baranoff E., and Gra M., Dye-sensitized solar cells: A brief overview, vol. 85, pp. 1172–1178, 2011.
- [11] Reyes F., Cid J., Vargas E., *Mecatrónica: Control y Automatización*, Editorial Alfaomega, Primera edición, pp. 614, 2013.