



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

**TITULACIÓN DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**Construcción experimental de Celdas Solares Sensibilizadas por
Colorante (DSSC) tipo Grätzel.**

TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

AUTORES: Arévalo Calderón, Edison Arturo.
Espinoza Quezada, Freddy David.

DIRECTOR: Jaramillo Pacheco, Jorge Luis, Ing.

LOJA – ECUADOR

2015

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

Ingeniero.

Jorge Luis Jaramillo Pacheco

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de fin de titulación: "Construcción experimental de Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante (DSSC) tipo Grätzel" realizado por Arévalo Calderón Edison Arturo y Espinoza Quezada Freddy David, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, Febrero de 2015

f)

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Nosotros, Arévalo Calderón Edison Arturo y Espinoza Quezada Freddy David, declaramos ser los autores del presente trabajo de fin de Titulación: “Construcción experimental de Celdas Solares Sensibilizadas por Colorantes (DSSC) tipo Grätzel”, de la Titulación de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, siendo Jorge Luis Jaramillo Pacheco, Ing. Director del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaramos conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f.....
Autor: Arévalo Calderón Edison Arturo
Cédula 1104114622

f.....
Autor: Espinoza Quezada Freddy David
Cédula 1105039703

DEDICATORIA

A mi hija, Tiffany Valentina, por ser esa pequeña persona que al llamarte papá genera dicha, lucha y felicidad, a mi lindo canal Claudia por ser mi amiga y compañera quien día a día lucha junto a mí por hacer de este mundo un lugar mejor para vivir, a Elvita mi amada madre quien desde que di mis primeros pasos a estado ahí siempre incondicionalmente para apoyarme, a Carlos mi amado padre quien me ha enseñado a tener la fuerza necesaria para luchar por mis sueños.

A mis hermanas, Jhoanna, Yadira, Karla y Ami quienes siempre me han apoyado durante toda mi vida y me han brindado palabras de aliento en el momento justo y necesario.

A mis amigos, en especial a Franklin, Alex, Roger y Galo, quienes son y siempre serán mis hermanos no de sangre si de vida.

Edison Arturo

A Dios, quien siempre me colmo de inteligencia y valor para seguir adelante y no desfallecer.

A mi madre por haberme apoyado en todo momento, por ser la mejor amiga que tengo en la vida, por sus consejos, por su motivación constante para ser una persona de bien, pero ante todo por su amor incondicional.

A mi padre por ser ejemplo de dedicación y de responsabilidad, por los valores que me ha inculcado siempre, por su valentía y lucha de salir adelante para ser cada día mejor y por todo su amor de padre que me lo ha demostrado en el transcurso de mi vida.

A mis hermanos, Alex y Denisse, por sus palabras de ánimo y mis abuelitos, quienes considero mis segundos padres, siempre listos con un sabio consejo.

Freddy

AGRADECIMIENTO

En primera instancia queremos agradecer a Dios por brindarnos la oportunidad de vivir día a día, y de esta manera permitimos luchar por nuestros sueños y hacerlos realidad.

Queremos dejar en constancia nuestro profundo y más sincero agradecimiento al director de nuestro proyecto de fin de titulación, el Ing. Jorge Luis Jaramillo quien con su apoyo, sabiduría, dedicación e interés hizo que este proyecto se realice de la mejor manera.

Así mismo queremos agradecer a la Universidad Técnica Particular de Loja por financiar este proyecto, a la Ing. Nathaly Solano quien nos brindó sus conocimientos y apoyo en todo lo concerniente al área de Química, a la Ing. Andrea Castillo por la ayuda brindada al realizar los experimentos y por la prestación de las instalaciones y equipos de laboratorio, a los Ingenieros de la titulación de Electrónica y Telecomunicaciones que nos brindaron sus conocimientos durante toda la carrera universitaria, a nuestros compañeros y a todas las personas que aportaron para hacer posible la realización del proyecto.

Edison y Freddy

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABLAS	ix
RESUMEN EJECUTIVO.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVOS	4
CAPÍTULO 1.....	5
1. UNA METODOLOGÍA BÁSICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CELDAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR COLORANTE (DSSC) TIPO GRÄTZEL.....	5
1.1. Introducción	6
1.2. Generalidades de las celdas solares sensibilizadas por colorante	6
1.3. Metodología para la construcción de DSSC.....	8
1.3.1. Preparación del electrodo negativo	8
1.3.2. Preparación del electrodo positivo.....	8
1.3.3. Coloración del electrodo negativo.....	8
1.3.4. Montaje de la DSSC.....	9
1.3.5. Verificación de la operación de la DSSC	9
CAPÍTULO 2.....	10
2. FABRICACIÓN EXPERIMENTAL DE CELDAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR COLORANTE TIPO GRÄTZEL	10
2.1. Introducción	11
2.2. Etapa de selección de proveedores	11
2.2.1. Selección de proveedores de materiales	12
2.2.2. Selección de proveedores de colorantes	12
2.3. Construcción de las celdas tipo Grätzel	13
2.3.1. Metodología de construcción.....	13
2.3.2. Preparación de los materiales	14

2.3.3. Preparación del colorante.....	14
2.3.4. Impregnación del colorante en la placa de TiO ₂	20
2.3.5. Unión de las placas conductoras.....	22
2.3.6. Inyección del electrolito entre las dos placas.....	23
CAPÍTULO 3.....	24
3. EVALUACIÓN DE LA PERFORMANCE DE CELDAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR COLORANTE (DSSC) TIPO GRÄTZEL, CONSTRUIDAS EXPERIMENTALMENTE.....	24
3.1. Introducción.....	25
3.2. Evaluación de la performance de celdas solares fotosensibilizadas tipo Grätzel	25
3.2.1. Sobre el protocolo de validación de la performance.....	25
3.2.2. Registro de data.....	26
3.3. Resultados obtenidos y análisis de resultados.....	30
CONCLUSIONES.....	33
BIBLIOGRAFÍA.....	34
ANEXOS.....	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Estructura de una celda de Grätzel típica.....	7
Figura 2.1. Metodología de trabajo propuesta para el desarrollo del proyecto.	11
Figura 2.2. Flujograma del proceso de fabricación de las celdas.	13
Figura 2.3. Dimensiones del electrodo de óxido de titanio.	14
Figura 2.4. Dimensiones del contra-electrodo de platino.....	14
Figura 2.5. Flujograma del proceso de extracción del colorante.	15
Figura 2.6. Moras a utilizar en la extracción del colorante.....	16
Figura 2.7. Lavado de las moras.....	17
Figura 2.8. Mora aplastada.	17
Figura 2.9. Secado de la mora en la estufa.....	17
Figura 2.10. Triturado de la mora.....	18
Figura 2.11. Pesado de la mora.....	18
Figura 2.12. Proceso de maceración dinámica.	19
Figura 2.13. Filtrado con válvula de vacío.....	20
Figura 2.14. Medición de pH de una de las muestras de colorante.....	20
Figura 2.15. Verificación del lado conductor del electrodo a utilizar.	21
Figura 2.16. Impregnación en el colorante del electrodo.....	21
Figura 2.17. Limpieza de los sectores no conductores del electrodo.	21
Figura 2.18. Secado de la placa.	22
Figura 2.19. Colorante impregnado en el electrodo.	22
Figura 2.20. Unión del electrodo y el contra-electrodo.	22
Figura 2.21. Celda inyectada con electrolito HI-30.....	23
Figura 3.1. Registro de data sobre la performance de las celdas solares tipo Grätzel fabricadas experimentalmente.	26
Figura 3.2. Evolución de la radiación solar mínima y máxima con respecto a la hora del día, durante el experimento.	31
Figura 3.3. Voltaje de circuito abierto en la celda 1, durante el día del experimento.	31
Figura 3.4. Voltaje de circuito abierto en la celda 2, durante el día del experimento.	32
Figura 3.5. Voltaje de circuito abierto en la celda 3, durante el día del experimento.	32

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Tabla comparativa de las cotizaciones entregadas por los proveedores.	12
Tabla 2.2. Detalle de insumos utilizados para la preparación del colorante.	15
Tabla 2.3. Detalle de equipos utilizados para la preparación del colorante.	16
Tabla 3.1. Especificaciones técnicas del multímetro TRUPER MUT 105 [29].	26
Tabla 3.2. Voltaje de circuito abierto en cada una de las celdas solares Grätzel construidas, en función de la hora del día.	27
Tabla 3.3. Voltaje de circuito abierto en cada una de las celdas solares Grätzel construidas, en función de la hora del día. Continuación...	28
Tabla 3.4. Valores máximos y mínimos de radiación directa en la ciudad de Loja, el 20 de noviembre de 2014.	29
Tabla 3.5. Valores máximos y mínimos de radiación directa en la ciudad de Loja, el 20 de noviembre de 2014. Continuación...	30

RESUMEN EJECUTIVO

Se realiza la metodología experimental de la construcción de celdas solares sensibilizadas por colorantes (DSSC) tipo Grätzel. Se parte estableciendo una metodología básica para el diseño y construcción de celdas (DSSC); se construye las celdas experimentalmente en las condiciones de la ciudad de Loja y finalmente se evalúa el performance de las celdas construidas experimentalmente. Al final se puede concluir que las celdas construidas experimentalmente nos dan muy buenos resultados a horas de alta radiación solar.

PALABRAS CLAVES: Celdas Grätzel, Celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC).

ABSTRACT

Experimental methodology for the construction of dye-sensitized solar cells (DSSC) Grätzel type is performed. It starts by establishing a basic methodology for the design and construction of cells (DSSC); cell is constructed experimentally in the conditions of the city of Loja and finally the cell performance is evaluated experimentally constructed. At the end we can conclude that the cells experimentally constructed give us very good results within hours of high solar radiation.

KEYWORDS: Grätzel cells, dye-sensitized solar cells (DSSC).

INTRODUCCIÓN

Cada hora, el Sol proporciona a nuestro planeta, la energía suficiente para cubrir la demanda anual de la humanidad. Se puede afirmar que la energía solar constituye una fuente de energía limpia, abundante y renovable.

En la búsqueda de aprovechar el recurso solar, el hombre ha diseñado y probado 3 generaciones de celdas solares: de silicio (primera generación), de capas delgadas de semiconductor (segunda generación), y, sensibilizadas por colorante o celdas de Grätzel (tercera generación). En cada generación, se ha apostado a mejorar la eficiencia de conversión teórica, y, reducir el coste de producción.

Considerando el potencial para el aprovechamiento de energía solar en la zona sur del Ecuador, y, considerando el impacto y proyección de las celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC por sus siglas en inglés), desde la Sección de Electrónica y Telecomunicaciones del Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica de la Universidad Técnica Particular de Loja, se propuso una experiencia piloto para la construcción de DSSC desde la perspectiva de la ingeniería en electrónica y telecomunicaciones.

En este trabajo, se describe la metodología experimental de la construcción de celdas sensibilizadas por colorante tipo Grätzel desde la perspectiva de la ingeniería de electrónica y telecomunicaciones.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Construir Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante (DSSC) tipo Grätzel desde la perspectiva de la Ingeniería de Electrónica y Telecomunicaciones.

Objetivos específicos

- Establecer una metodología para el diseño y construcción de celdas DSSC de fácil aplicación.
- Construir Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante (DSSC) tipo Grätzel experimentales en las condiciones de la ciudad de Loja.
- Evaluar la performance de las celdas construidas experimentalmente.

CAPÍTULO 1

1. UNA METODOLOGÍA BÁSICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CELDAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR COLORANTE (DSSC) TIPO GRÄTZEL

1.1. Introducción

Cada hora, el Sol proporciona a nuestro planeta, la energía suficiente para cubrir la demanda anual de la humanidad [1]. Se puede afirmar que la energía solar constituye una fuente de energía limpia, abundante y renovable.

En la búsqueda de aprovechar el recurso solar, el hombre ha diseñado y probado 3 generaciones de celdas solares: de silicio (primera generación), de capas delgadas de semiconductor (segunda generación), y, sensibilizadas por colorante o celdas de Grätzel (tercera generación). En cada generación, se ha apostado a mejorar la eficiencia de conversión teórica, y, reducir el coste de producción.

En el presente capítulo, se describe una metodología básica para la construcción de celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC por sus siglas en inglés).

1.2. Generalidades de las celdas solares sensibilizadas por colorante

En 1991, Michael Grätzel diseñó una celda solar capaz de generar energía eléctrica a partir de la luz solar, utilizando un colorante de origen vegetal.

Una celda de Grätzel contiene 2 electrodos: ánodo y cátodo. El ánodo es el terminal negativo de la celda, y, está unido a una cubierta de vidrio conductor sobre la que se deposita un semiconductor (dióxido de titanio TiO_2), impregnado en jugo de clorofila o de algún otro colorante natural para una mayor absorción de luz [2]. El cátodo es el terminal positivo de la celda, y, está unido a un vidrio conductor recubierto por un material catalítico (carbono o platino), que permite transferir una mayor cantidad de electrones.

El espacio entre los electrodos, se llena con un electrolito que contiene un par redox, que ayuda a que el electrón viaje del ánodo al cátodo, generando así la corriente eléctrica [3].

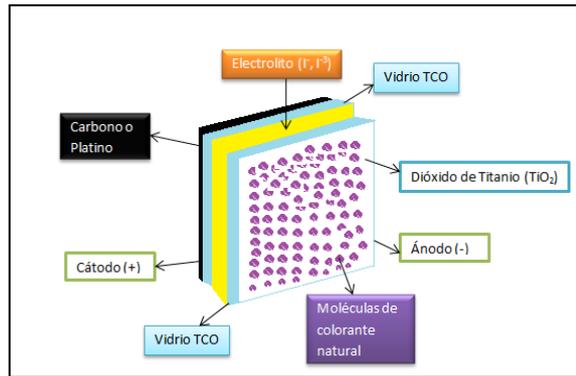


Figura 1.1. Estructura de una celda de Grätzel típica.

Fuente: Diseño de autores.

La conductividad de las placas de vidrio utilizadas en la construcción de DSSC, se logra al cubrir uno de los lados, con una película conductora de óxido de estaño (SnO_2). Como resultado se logra baja resistividad (menor a 10Ω), alta transmitancia, y, máxima intensidad de corriente eléctrica [4].

El TiO_2 se utiliza como catalizador. De este semiconductor existen 3 formas cristalinas (fases): anatasa, brookita, y, rutilo. La anatasa es la fase de mejores prestaciones para la fotocatalisis, entendida como la reacción en la cual el catalizador absorbe luz [5], [6].

Debido al band gap elevado, el TiO_2 se excita con radiación ultravioleta. El colorante ayuda a extender el gap hacia la absorción de longitudes de onda mayores, hasta alcanzar la zona visible. Entonces, la radiación solar excita al colorante, y, este inyecta electrones a la banda de conducción del semiconductor, desde donde fluyen al electrodo negativo. En una DSSC, las partículas del semiconductor varían entre 10 y 40 nm de tamaño, de modo tal que la capa sintetizada resultante es altamente porosa.

La antocianina es un colorante de especial interés para la fabricación de DSSC, que se encuentra en la pigmentación de frutas (frambuesas, manzanas, peras, uvas, zarzamoras, ciruelas, y, semillas de granada), de flores (jamaica y rosas), de verduras (col morada y maíz morado), y, de hojas verdes de cítricos. La antocianina posee grupos $-\text{OH}$ que se anclan al TiO_2 [7], [8].

También es posible utilizar colorantes sintéticos como el rutenio, cuyas moléculas están optimizadas para una mejor recolección de luz, con un mejor rendimiento que los tintes naturales. Sin embargo, existe una marcada tendencia a la utilización de colorantes

orgánicos, ya que pueden sintetizarse y modificarse fácilmente, con un coste menor que con el rutenio [9].

El catalizador tiene la función de contra-electrodo para facilitar la transferencia electrónica. Existen dos tipos de catalizadores: platino y carbono. El electrodo de carbono es más sencillo y barato, pero el electrodo de platino ofrece el mejor rendimiento [10].

Frecuentemente, como electrolito se emplea un solvente orgánico con un par redox I-/I³⁻. El electrolito que contiene yoduro (I⁻), transfiere electrones al tinte en contacto con el TiO₂ (convertido en triyoduro I₃⁻), que a su vez acepta electrones para convertirse en yoduro. Esta secuencia de eventos origina una corriente eléctrica. [11], [12].

1.3. Metodología para la construcción de DSSC

1.3.1. Preparación del electrodo negativo.

La construcción inicia con la identificación del lado conductor en la placa de vidrio. Seguidamente, se prepara la solución de dióxido de titanio, mezclando en un mortero, 10 ml de vinagre y 6 g de dióxido de titanio, dejándola reposar al menos 15 minutos. Con ayuda de un gotero, se deposita la solución sobre la placa, en el lado conductor [14]. Al secarse la solución, la placa se lleva a un horno, a una temperatura entre 450°C y 550°C, por 10 min. La solución cambiará de un color blanco a uno marrón, y, regresará a su color original.

1.3.2. Preparación del electrodo positivo.

Después de determinar el lado conductor de la placa, se coloca la lámina de grafito. Esta lámina puede ser pintada con un lápiz, o, quemada con una vela. Este electrodo no necesita cocción.

1.3.3. Coloración del electrodo negativo.

Los tintes se preparan a partir de frutas frescas, en una placa de Petri. Con la cantidad suficiente de tinte, se sumerge la placa con la parte recubierta de dióxido de titanio hacia abajo. De ser necesario, se aplica una leve presión sobre la placa de vidrio para empapar el electrodo en tinte. El electrodo se retira y se limpia cuidadosamente con etanol [13].

1.3.4. Montaje de la DSSC.

Para montar la celda solar, se une los lados activos del ánodo y del cátodo, es decir el dióxido de titanio y la placa de platino o de carbono del contra-electrodo.

La brecha que queda entre las dos placas, se llena de electrolito. Esto se puede realizar, perforando el cátodo e ingresando el electrodo, o, inyectando el electrodo entre las dos placas.

1.3.5. Verificación de la operación de la DSSC.

Para validar el funcionamiento de la DSSC, se conecta un multímetro al extremo negativo del ánodo y al extremo positivo del contra-electrodo. Se mide el voltaje y la corriente de celda con iluminación a pleno sol, o con iluminación artificial.

CAPÍTULO 2

2. FABRICACIÓN EXPERIMENTAL DE CELDAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR COLORANTE TIPO GRÄTZEL

2.1. Introducción

Considerando el potencial para el aprovechamiento de energía solar en la zona sur del Ecuador, y, considerando el impacto y proyección de las celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC por sus siglas en inglés), desde la Sección de Telecomunicaciones y Electrónica del Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica de la Universidad Técnica Particular de Loja, se propuso una experiencia piloto para la construcción de DSSC desde la perspectiva de la ingeniería en electrónica y telecomunicaciones.

Como una primera aproximación, se decidió establecer una metodología básica para la construcción de DSSC, que se describió en un trabajo anterior. Una vez establecida la metodología, se decidió continuar con la iniciativa, estableciendo la secuencia de actividades que se muestra en la Fig. 2.1. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las etapas de selección de proveedores y fabricación de DSSC.



Figura 2.1. Metodología de trabajo propuesta para el desarrollo del proyecto.

Fuente: Diseño de los autores.

2.2. Etapa de selección de proveedores

En el marco de este proyecto, se refirió la solicitud de provisión de materiales y colorantes empleados en la construcción de las DSSC, al Laboratorio de Química Aplicada (LQA) del Departamento de Química de la UTPL, recibiendo una respuesta negativa en el sentido de la no existencia de los insumos requeridos. Ante esta situación se decidió abrir una etapa de selección de proveedores externos, tanto de materiales como de colorantes.

2.2.1. Selección de proveedores de materiales.

Por referencia del personal del LQA, y, de profesionales en formación de la titulación de Ingeniería Química de la UTPL, se conformó una base de potenciales proveedores presentes en el mercado, en la que se incluyó a empresas como MARECI (Loja, Ecuador), ESPECTROCOM (Guayaquil, Ecuador), César Vásconez Importaciones CIA. LTDA (Quito, Ecuador), Austroquimicos (Cuenca, Ecuador), y, Solaronix (Suiza) [13], [17], [18].

A cada una de estas empresas se solicitó la provisión de materiales y colorantes, de acuerdo a las especificaciones descritas en la metodología básica de construcción de DSSC. Una vez obtenidas las cotizaciones respectivas, se analizó cada una de ellas de acuerdo a parámetros preestablecidos como costo, disponibilidad, calidad, eficiencia y tiempo de entrega. La Tabla 2.1 muestra los resultados obtenidos. Como proveedor fue seleccionada la empresa Solaronix.

Tabla 2.1. Tabla comparativa de las cotizaciones entregadas por los proveedores.

Proveedor	Costo, USD	Disponibilidad	Calidad	Eficiencia	Tiempo de entrega
Solaronix	420	Alta	Alta	Alta	30 días
Espectrocom	5610	Normal	Normal	Normal	15 días
César Vásconez Importaciones CIA. LTDA	780	Normal	Normal	Normal	15 días
Austroquimicos	1600	Normal	Normal	Normal	30 días
Mareci	600	Baja	Baja	Baja	30 días

Fuente: Diseño de los autores.

De entre la oferta de Solaronix, se decidió adquirir un kit educacional avanzado (Education Cell Kit Advanced), para la construcción de 4 celdas, que incluye 4 celdas selladas, electrodos de titanio (4), electrodos perforados de platino (4), juntas (5), selladoras (5), y, marcos (10). Adicionalmente, se adquirió a la misma empresa un electrolito redox (reducción y oxidación) [19]. La inversión final fue de alrededor de USD 1000, incluyendo el costo de envío y los impuestos de nacionalización.

2.2.2. Selección de proveedores de colorantes.

Según estudios previos realizados en la Sección de Química Aplicada (SQA) de la UTPL, los DSSCs preparados con tintes naturales obtenidos de la zarzamora (*rubus robustus* C. presl), mortiño (*solanum americanum* mill), escancel (*iresine herbstii* gancho), y, extracto de remolacha (*beta vulgaris*),

alcanzaron una eficiencia de 0,55%, 0.20%, 0.13% y 0,02%, respectivamente; registrando un voltaje de circuito abierto (Voc) de 0.65 V, 0.5 V, 0.45 V, y 0.19 V para cada especie [20].

En este sentido, para esta experiencia piloto, se decidió sensibilizar los DSSC con tinte de mora, preparado por el equipo de trabajo de acuerdo a las especificaciones del equipo de la SQA.

2.3. Construcción de las celdas tipo Grätzel

2.3.1. Metodología de construcción.

Para la construcción experimental se celdas Grätzel, se decidió seguir una secuencia de 5 etapas, tal como lo muestra la Fig.2.2.

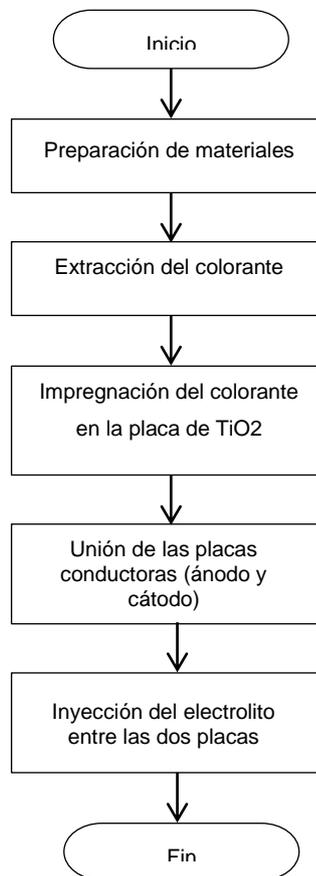


Figura 2.2. Flujograma del proceso de fabricación de las celdas.

Fuente: Diseño de los autores

2.3.2. Preparación de los materiales.

El **electrodo** adquirido contiene una capa de óxido de titanio transparente, impregnada en el vidrio conductor [13], lo que permite omitir la preparación de un electrodo negativo. En la Fig. 2.3 se muestra la geometría del electrodo.

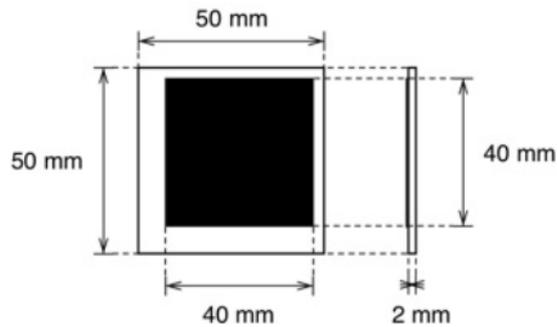


Figura 2.3. Dimensiones del electrodo de óxido de titanio.
Fuente: Imagen obtenida de internet [16].

Para el **contra-electrodo** se adquirió una placa de vidrio conductor, impresa con el platino, lo que permite omitir la preparación de un contra-electrodo. La placa posee dos orificios, a través de los cuales se adiciona el electrolito, tras sellar el electrodo y el contra-electrodo. En la Fig. 2.4 se muestra la geometría del contra-electrodo.

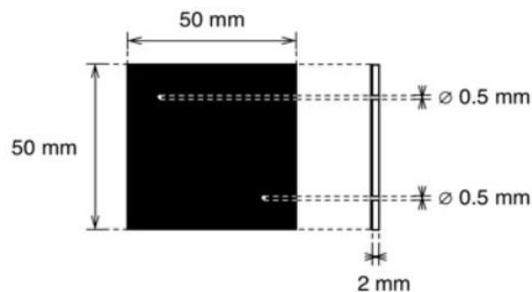


Figura 2.4. Dimensiones del contra-electrodo de platino.
Fuente: Imagen obtenida de internet [16].

Como **electrolito** se utilizó Iodolyte HI-30, una solución electrolítica proporcionada por Solaronix.

2.3.3. Preparación del colorante.

En el proceso de extracción del colorante se busca obtener la mayor cantidad de antocianinas, de forma tal que se aumente el rango de absorción de luz en la celda, y, que una mayor cantidad de electrones sean excitados, generándose una mayor diferencia de potencial eléctrico.

El colorante fue preparado bajo la supervisión del personal del LAQ. La Fig. 2.5 muestra el flujograma del proceso seguido, mientras que las Tablas 2.2 y 2.3 muestran el detalle de los insumos y equipos utilizados.

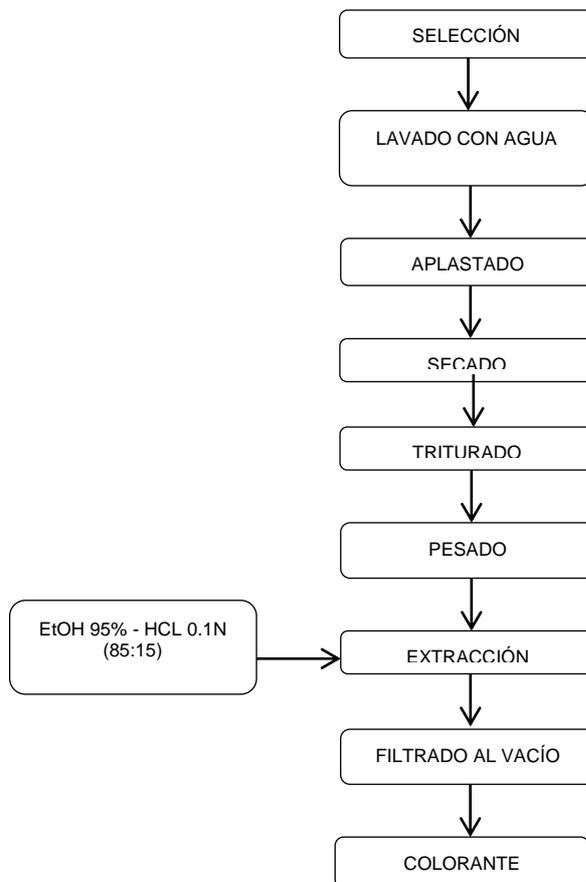


Figura 2.5. Flujograma del proceso de extracción del colorante.
Fuente: Diseño de los autores.

Tabla 2.2. Detalle de insumos utilizados para la preparación del colorante.

Insumo	Cantidad
Etanol	500 ml
Mora	100 g
Ácido clorhídrico	50 ml
Agua destilada	100 ml

Fuente: Diseño de los autores.

Tabla 2.3. Detalle de equipos utilizados para la preparación del colorante.

Equipos	Cantidad
Estufa	1
Matraz de Erlenmeyer de 500 ml	1
Mortero con pistilo	1
Balanza	1
Bandeja de aluminio	1
Balón de Aforo de 500 ml	1
Balón de Aforo de 250 ml	1
Vaso de precipitación	1
Probeta de 100 ml	1
Pipeta de 100 ml	1
Pizeta	1
Magneto	1
Plato agitador	1
Papel aluminio	1
Embudo Büchner	1
Papel Filtro	1

Fuente: Diseño de los autores.

En la etapa de **selección**, se inspecciona visualmente la mora, a fin de garantizar buenas condiciones de sanidad y de color (ver Fig. 2.6).



Figura 2.6. Moras a utilizar en la extracción del colorante.

Fuente: Fotografía de los autores.

En la etapa de **lavado** con agua, se eliminan las impurezas y otros materiales extraños, incluyendo las hojas verdes de la mora (ver Fig. 2.7).



Figura 2.7. Lavado de las moras.
Fuente: Fotografía de los autores.

La mora se **aplasta** con la intención de reducir su tamaño y acelerar el tiempo de secado (ver Fig. 2.8).



Figura 2.8. Mora aplastada.
Fuente: Fotografía de los autores.

Para extraer la humedad, la mora aplastada se **secó** en una estufa, durante 2 días, a 40 °C de temperatura (ver Fig. 2.9).



Figura 2.9. Secado de la mora en la estufa.
Fuente: Fotografía de los autores.

La mora seca se **tritura** para facilitar la extracción del colorante (ver Fig. 2.10).



Figura 2.10. Triturado de la mora.
Fuente: Fotografía de los autores.

De acuerdo a los parámetros de la solución a emplear en la extracción del colorante [21], utilizando una balanza METTLER semianalítica de 0.5 g de precisión y 3.100 g. de capacidad, se **pesó** 100 g de mora para mezclar, en la etapa de extracción, con el disolvente en una relación 85% EtOH y 15% HCL (ver Fig. 2.11).



Figura 2.11. Pesado de la mora.
Fuente: Fotografía de los autores.

La elección del método de **extracción** del colorante apunta a maximizar la recuperación de pigmentos, con la utilización de una mínima cantidad de solventes, y, una mínima degradación o alteración del estado natural de las propiedades de la mora [22].

La extracción de antocianinas comúnmente se realiza con metanol o etanol, conteniendo una pequeña cantidad de ácidos tales como ácido clorhídrico, acético y fórmico; y, buscando obtener la forma del catión flavilio, estable en un medio altamente ácido. Aunque no hay diferencia significativa en lecturas de absorbancia o eficiencia de extracción entre el etanol y metanol, es preferible usar etanol debido a su menor toxicidad [23].

En el marco de esta experiencia, como disolvente en la extracción de antocianina se utilizó una mezcla de etanol al 95% y de ácido clorhídrico (HCL) 0.1 Normal, en una relación 85% Etanol y 15 % Ácido clorhídrico (85:15). Este disolvente es el usado para extracción de este tipo de colorante [20]. El grado de pureza del Etanol influye en la extracción del concentrado, ya que mientras mayor sea el grado de pureza mayor será la concentración del colorante [24].

Para la preparación del etanol (EtOH) al 95%, se utilizó un balón de aforo de 500 ml, en el cual se colocó 475 ml de EtOH, y 25ml de agua destilada (H₂O).

Para la preparación del ácido clorhídrico (HCL) 0.1 Normal, se aforó con agua destilada (H₂O), mezclando 2.07 ml de HCL y 247.93 de H₂O.

La extracción del colorante se realizó utilizando el proceso de maceración, en el que el producto sólido (materia prima) presenta una serie de compuestos solubles en el líquido extractante. Para este proceso, se utilizó una plancha de agitación, un matraz Erlenmeyer que contiene en su interior la solución del solvente a utilizar, la mora, y, un imán. Además, fue necesario cubrir con papel aluminio al matraz, ya que la luz afecta a la eficiencia en la extracción del colorante. Para acelerar el proceso de maceración es necesario agitar continuamente la solución. Este proceso se automatiza con ayuda de un imán que, al moverse dentro del matraz, genera un campo magnético rotatorio, cuya acción aumenta la velocidad del proceso de disolución (ver Fig. 2.12).

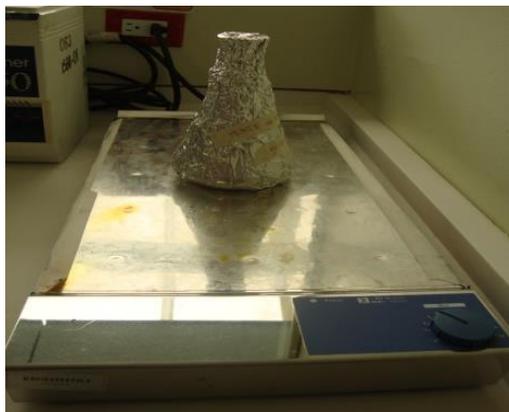


Figura 2.12. Proceso de maceración dinámica.
Fuente: Fotografía de los autores.

En la etapa de filtrado al vacío, se separó el componente sólido de la solución, empleando una bomba de succión, un embudo Büchner, y papel filtro. La bomba de succión se conectó a un kitasato para filtrar con mayor rapidez (ver Fig. 2.13).



Figura 2.13. Filtrado con válvula de vacío.
Fuente: Fotografía de los autores.

Como resultado final del proceso, se obtuvo el colorante. En esta experiencia se repitió el proceso 3 veces, obteniendo muestras diferentes de colorante, que fueron sometidas a la validación de su pH (ver Fig. 2.14). El pH tiene efecto en la estructura y la estabilidad de las antocianinas. La acidez tiene un efecto protector sobre la molécula [25]. Para la primera muestra, el pH fue de 3.5, mientras que en la segunda y tercera fue de 3.3. En este sentido se consideró que el mejor colorante era el obtenido en la segunda y tercera muestra.



Figura 2.14. Medición de pH de una de las muestras de colorante.
Fuente: Fotografía de los autores

2.3.4. Impregnación del colorante en la placa de TiO₂

Como paso previo a la impregnación del colorante, se determinó que el lado de la placa, a utilizar como electrodo, está cubierto por óxido de titanio. Para esto se empleó un ohmímetro para medir la resistencia eléctrica a cada lado de la placa. De acuerdo a la bibliografía, el lado conductor tiene una resistencia eléctrica entre 10 a 40 Ω , mientras que la medición efectuada mostró que el electrodo a utilizar tiene una resistencia de 29.6 Ω (Fig. 2.15).



Figura 2.15. Verificación del lado conductor del electrodo a utilizar.

Fuente: Fotografía de los autores

Durante la impregnación, el colorante se vierte sobre el lado conductor del electrodo, y se deja la placa sumergida en el colorante, durante 24 horas (ver Fig. 2.16). Pasado este tiempo, se limpió todos los sectores no conductores del electrodo con algodón y etanol (ver Fig. 2.17), y se secó la placa con ayuda de una secadora de cabello (ver Fig. 2.18). El resultado final se muestra en la Fig. 2.19.

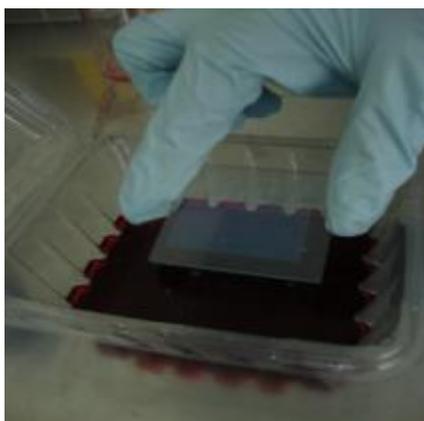


Figura 2.16. Impregnación en el colorante del electrodo

Fuente: Fotografía de los autores



Figura 2.17. Limpieza de los sectores no conductores del electrodo.

Fuente: Fotografía de los autores



Figura 2.18. Secado de la placa.
Fuente: Fotografía de los autores



Figura 2.19. Colorante impregnado en el electrodo.
Fuente: Fotografía de los autores

2.3.5. Unión de las placas conductoras.

Una vez impregnado el colorante en el electrodo, se procedió unir este al contra-electrodo, empleando pinzas de papel (ver Fig. 2.20).



Figura 2.20. Unión del electrodo y el contra-electrodo.
Fuente: Fotografía de los autores

2.3.6. Inyección del electrolito entre las dos placas.

En esta etapa, a través de los dos orificios de la placa del contra-electrodo, se inyectó el electrolito, utilizando una jeringa (ver Fig. 2.21).

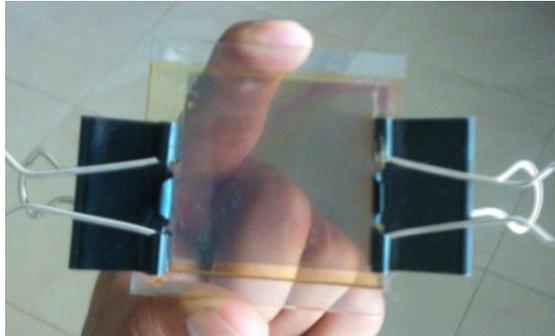


Figura 2.21. Celda inyectada con electrolito HI-30
Fuente: Fotografía de los autores

CAPÍTULO 3

3. EVALUACIÓN DE LA PERFORMANCE DE CELDAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR COLORANTE (DSSC) TIPO GRÄTZEL, CONSTRUIDAS EXPERIMENTALMENTE

3.1. Introducción

La producción de energía eléctrica a partir del sol está basada en el fenómeno físico denominado efecto fotovoltaico, que básicamente consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica mediante celdas fotovoltaicas. Estas celdas pueden ser construidas a base de silicio o celdas basadas en colorantes naturales como es el caso de las celdas Grätzel. Las celdas Grätzel en la actualidad poseen una alta eficiencia en generación de energía eléctrica a partir del sol.

En este capítulo, se describe la evaluación de la performance de celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC) tipo Grätzel, construidas experimentalmente.

3.2. Evaluación de la performance de celdas solares fotosensibilizadas tipo Grätzel

3.2.1. Sobre el protocolo de validación de la performance.

La capacidad de aprovechar la energía solar, depende de la radiación solar incidente sobre la superficie de las celdas solares [26].

En la evaluación de la performance de celdas Grätzel se tiene que tomar en cuenta la curva característica de corriente-voltaje. Esta curva representa las posibles combinaciones de I y V en una celda solar, bajo condiciones de radiación solar incidente [27].

Considerando la imposibilidad de acceder a una lámpara certificada de espectro de luz de día, así como a equipos de medición calibrados, se decidió adoptar un protocolo básico de evaluación, consistente en determinar el voltaje de circuito abierto de la celda, bajo radiación solar directa medida por una estación hidrometeorológica cercana.

El mayor rendimiento de una celda solar se consigue cuando se forma un ángulo recto entre la lámina y el rayo de luz solar. Para lograr esto, considerando la ubicación de la ciudad de Loja, la bibliografía [28] recomienda ubicar las celdas solares a 15° norte respecto a la horizontal.

El registro del voltaje de circuito abierto se realizará utilizando un voltímetro digital TRUPER MUT-105 categoría II y III (ver Tabla 3.1), entre las 8h00 y las 18h00. En el intervalo de una hora se registrará una lectura cada 10 minutos.

Tabla 3.1. Especificaciones técnicas del multímetro TRUPER MUT 105 [29].

Rango	Resolución	Precisión	Protección de sobrecarga
200 mV	0.1 mV	± (0.5% + 5) (a% de lectura + b dígitos)	230 V de CA.
2 V	1 mV		1000 V de CD. 750 de CA
20 V	10 mV		
200 V	100 mV		
1000 V	1 V	± (0.8% + 5)	

Fuente: Elaborado por los autores.

Durante el experimento se evaluará el desempeño de 3 celdas construidas experimentalmente, con un área aproximada de 1600 mm² cada una. La celda denominada “1” fue la primera en ser construida, mientras que la “3” fue la última. La diferencia fundamental entre las celdas a evaluar es la experiencia existente en la fabricación de celdas.

3.2.2. Registro de data.

En función de las condiciones climatológicas óptimas, el registro de data se realizó el día 20 de noviembre del 2014, ubicando las celdas solares construidas en los patios del Edificio del Instituto de Química Aplicada de UTPL, observando la orientación e inclinación requerida, y, evitando la proyección de sombras sobre las celdas (ver Fig. 3.1).

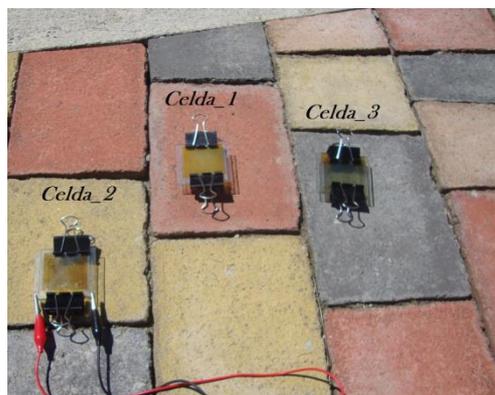


Figura 3.1. Registro de data sobre la performance de las celdas solares tipo Grätzel fabricadas experimentalmente.

Fuente: Fotografía de los autores

La Tabla 3.2 muestra los resultados obtenidos al registrar el voltaje de circuito abierto en cada una de las celdas construidas, en función de la hora del día.

Tabla 3.2. Voltaje de circuito abierto en cada una de las celdas solares Grätzel construidas, en función de la hora del día.

Hora	Vca celda 1, (V)	Vca celda 2, (V)	Vca celda 3, (V)
8:00	0,35	0,41	0,45
8:10	0,35	0,39	0,45
8:20	0,35	0,4	0,4
8:30	0,35	0,41	0,41
8:40	0,33	0,47	0,47
8:50	0,34	0,45	0,44
9:00	0,35	0,48	0,45
9:10	0,34	0,48	0,42
9:20	0,33	0,46	0,45
9:30	0,33	0,48	0,46
9:40	0,33	0,46	0,45
9:50	0,31	0,48	0,45
10:00	0,32	0,47	0,47
10:10	0,31	0,48	0,46
10:20	0,31	0,48	0,47
10:30	0,3	0,48	0,47
10:40	0,31	0,45	0,48
10:50	0,3	0,46	0,46
11:00	0,32	0,46	0,47
11:10	0,3	0,48	0,48
11:20	0,3	0,48	0,47
11:30	0,31	0,46	0,47
11:40	0,3	0,46	0,48
11:50	0,29	0,46	0,47
12:00	0,3	0,46	0,48
12:10	0,3	0,47	0,46
12:20	0,3	0,46	0,49
12:30	0,3	0,46	0,48
12:40	0,3	0,47	0,49
12:50	0,31	0,47	0,49

Fuente: Elaborado por los autores.

Tabla 3.3. Voltaje de circuito abierto en cada una de las celdas solares Grätzel construidas, en función de la hora del día. Continuación...

Hora	Vca celda 1, V	Vca celda 2, V	Vca celda 3, V
13:00	0,31	0,46	0,49
13:10	0,29	0,46	0,48
13:20	0,3	0,46	0,48
13:30	0,3	0,46	0,47
13:40	0,3	0,46	0,45
13:50	0,29	0,45	0,43
14:00	0,29	0,46	0,46
14:10	0,29	0,46	0,47
14:20	0,29	0,45	0,45
14:30	0,29	0,45	0,46
14:40	0,28	0,43	0,48
14:50	0,28	0,44	0,47
15:00	0,3	0,44	0,46
15:10	0,29	0,45	0,44
15:20	0,3	0,44	0,45
15:30	0,27	0,43	0,47
15:40	0,28	0,44	0,43
15:50	0,27	0,44	0,43
16:00	0,27	0,44	0,43
16:10	0,26	0,44	0,43
16:20	0,26	0,44	0,44
16:30	0,25	0,41	0,43
16:40	0,24	0,42	0,41
16:50	0,2	0,42	0,42
17:00	0,23	0,36	0,4
17:10	0,17	0,36	0,38
17:20	0,11	0,34	0,35
17:30	0,07	0,32	0,33
17:40	0,03	0,31	0,29
17:50	0,03	0,3	0,29
18:00	0,02	0,31	0,28

Fuente: Elaborado por los autores.

La Tabla 3.3 muestra los niveles mínimos y máximos de radiación registrados por una estación de monitoreo tipo Vantage Pro2 Plus, ubicada en las faldas del cerro Villonaco, al oeste de la ciudad de Loja, en las coordenadas UTMX 694294, UTM Y 9558872, y, UTM Z 2377, en el DATUM WGS84.

Tabla 3.4. Valores máximos y mínimos de radiación directa en la ciudad de Loja, el 20 de noviembre de 2014.

Hora	Radiación solar mínima, W/m²	Radiación solar máxima, W/m²
8:00	407	448
8:10	475	517
8:20	535	548
8:30	561	589
8:40	583	640
8:50	655	680
9:00	699	717
9:10	729	744
9:20	769	784
9:30	779	823
9:40	736	819
9:50	793	916
10:00	761	891
10:10	852	935
10:20	931	944
10:30	948	958
10:40	960	979
10:50	985	995
11:00	995	1018
11:10	1005	1030
11:20	930	1002
11:30	900	1039
11:40	986	1035
11:50	1032	1034
12:00	1037	1039
12:10	1039	1046
12:20	1034	1039
12:30	1023	1035
12:40	1016	1020
12:50	1005	1013
13:00	994	998
13:10	988	993
13:20	969	981
13:30	948	963

Fuente: Elaborado por los autores.

Tabla 3.5. Valores máximos y mínimos de radiación directa en la ciudad de Loja, el 20 de noviembre de 2014. Continuación...

Hora	Radiación solar mínima, W/m²	Radiación solar máxima, W/m²
13:40	929	942
13:50	912	921
14:00	887	895
14:10	862	870
14:20	838	854
14:30	801	819
14:40	774	788
14:50	756	766
15:00	256	788
15:10	246	742
15:20	457	680
15:30	442	626
15:40	402	608
15:50	521	531
16:00	393	496
16:10	287	473
16:20	352	415
16:30	85	160
16:40	65	79
16:50	56	67
17:00	54	62
17:10	45	51
17:20	37	42
17:30	33	35
17:40	32	35
17:50	26	32
18:00	16	21

Fuente: Elaborado por los autores.

3.3. Resultados obtenidos y análisis de resultados

La Fig. 3.2 muestra la evolución de la radiación solar mínima y máxima el día en que se realizó el experimento. La radiación solar sobre la ciudad de Loja alcanzó un pico cercano a 1040 W/m², y, pasadas las 15h00, registró una baja significativa debido a que la ciudad fue cubierta por una capa densa de nubes.

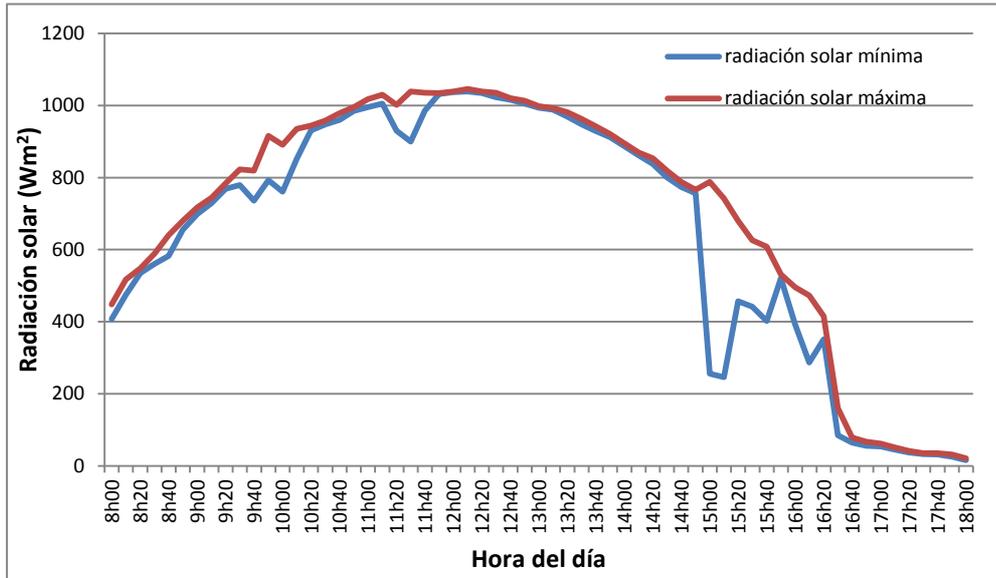


Figura 3.2. Evolución de la radiación solar mínima y máxima con respecto a la hora del día, durante el experimento.
Fuente: Diseño de los autores.

Las Fig. 3.3 a la 3.5 muestran la evolución del voltaje de circuito abierto de las celdas, en función de la hora del día.

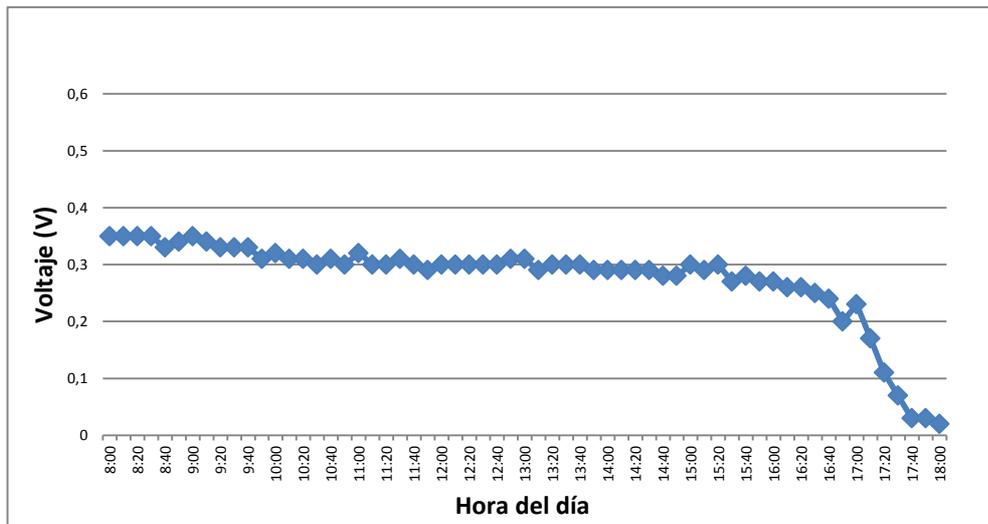


Figura 3.3. Voltaje de circuito abierto en la celda 1, durante el día del experimento.
Fuente: Diseño de los autores.

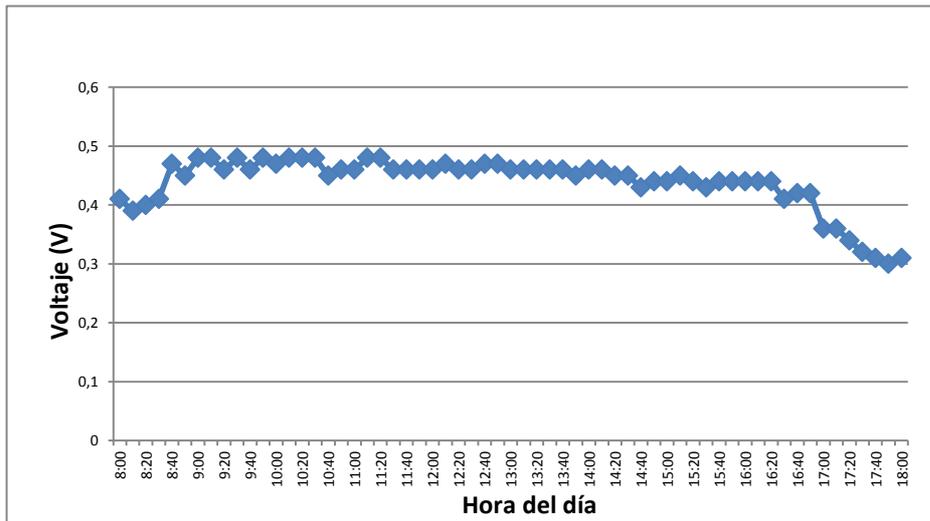


Figura 3.4. Voltaje de circuito abierto en la celda 2, durante el día del experimento.

Fuente: Diseño de los autores.

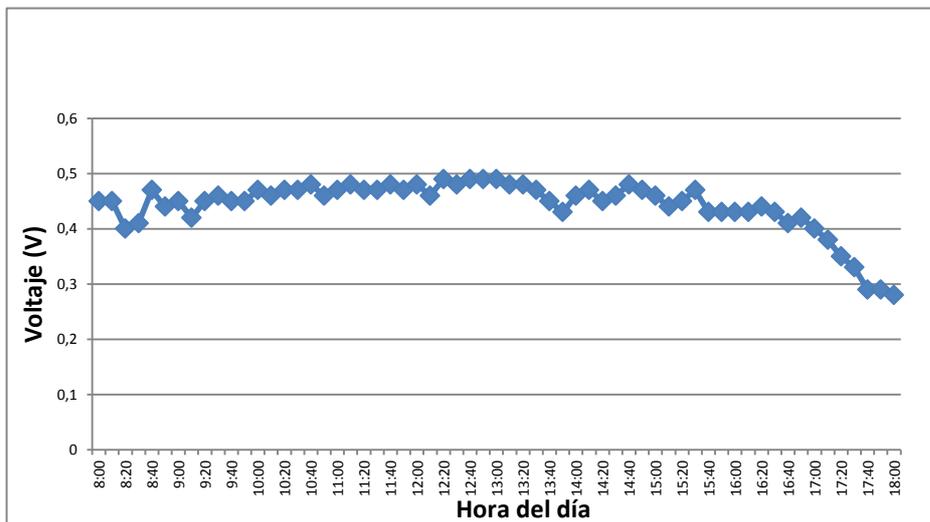


Figura 3.5. Voltaje de circuito abierto en la celda 3, durante el día del experimento.

Fuente: Diseño de los autores.

Los resultados obtenidos muestran que los valores más altos de voltaje de circuito abierto se obtienen para niveles de radiación sobre los 600 W/m². En la celda 1, el valor promedio de voltaje de circuito abierto, en el intervalo entre las 8h00 y las 16h00, es de 0,3V. En la celda 2, en ese mismo intervalo, el valor promedio alcanza los 0,45V; y, en la celda 3, se logran valores cercanos a los 0,5V. Como referencia, la bibliografía [30] muestra que celdas de características similares, construidas con silicio, el voltaje de circuito abierto oscila entre 0,46 y 0,48 V, en las horas de mayor radiación solar.

CONCLUSIONES

- Como resultado general de este trabajo, se obtuvo una buena aproximación del proceso de fabricación de DSSC, lo que permitirá explorar la manufactura de celdas experimentales.
- La búsqueda de proveedores de materiales y colorantes no permitió identificar proveedores en el mercado local, capaces de atender todos los requerimientos, razón por la cual se optó por importar los materiales requeridos, mientras que para la provisión de colorantes se decidió utilizar una metodología proveniente establecida por el equipo de trabajo del Laboratorio de Química Aplicada de la UTPL, obteniendo un colorante potencialmente aplicable a partir de la mora.
- Considerando la imposibilidad de acceder a una lámpara certificada de espectro de luz de día, así como a equipos de medición calibrados, se decidió adoptar un protocolo básico de evaluación, consistente en determinar el voltaje de circuito abierto de la celda, bajo radiación solar directa medida por una estación hidrometeorológica cercana. Por lo tanto, los resultados obtenidos tienen sólo el carácter de referencial.
- Los resultados obtenidos muestran que los valores más altos de voltaje de circuito abierto se obtienen para niveles de radiación sobre los 600 W/m², con un registro promedio de 0,4V.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. Morton, "Solar energy: A new day dawning?: Silicon Valley Sunrise", *Nature*, 2006, 443, 19- 22. [Online]: Disponible en: <<http://www.nature.com/nature/journal/v443/n7107/full/443019a.html>> [Consulta: Abril 2014]
- [2] Nuevos materiales fotovoltaicos avanzados. [Online]: Disponible en: <<http://blogs.creamoselfuturo.com/nano-tecnologia/2011/11/04/nuevos-materiales-fotovoltaicos-avanzados/>> [Consulta: Abril 2014]
- [3] Desarrollo de nuevos electrolitos con potencial uso en celdas solares nanocristalinas [Online]: <<http://eprints.uanl.mx/479/1/ELECTROLITOSCONPOTENCIAL.pdf>> [Consulta: Abril 2014]
- [4] Vidrio solar TCO [Online]: Disponible en: <<http://www.etwinternational.es/137912-product-3-4-tco-solar-glass-es-31575.html>> [Consulta: Abril 2014]
- [5] Preparación y caracterización de capas delgadas y estructuras de óxido de titanio para aplicaciones fotocatalíticas activadas mediante radiación UV o visible [Online]: Disponible en: <<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/96886/gs1de1.pdf?sequence=1>> [Consulta: Abril 2014]
- [6] P25 TiO₂ Nanoparticle [Online]: Disponible en: <<http://www.etwinternational.es/137912-product-3-4-tco-solar-glass-es-31575.html>> [Consulta: Abril 2014]
- [7] Proceso electroquímico en celdas solares sensibilizadas con un colorante natural [Online]: Disponible en: <<http://www.uaa.mx/investigacion/revista/Hemeroteca/REVISTA%2056.pdf>> [Consulta: Abril 2014]
- [8] Soluciones solares Celda solar casera Grätzel (proyecto de ciencias) [Online]: Disponible en: <<http://solucionessolares.blogspot.com/2012/06/celda-solar-casera-gratzel-proyecto-de.html>> [Consulta: Abril 2014]
- [9] SIMULACIÓN DE LA ACTIVIDAD DEL COLORANTE EN EL PROCESO DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA EN CELDAS SOLARES SENSIBILIZADAS [Online]: Disponible en: <http://grupo.us.es/gfqm132/Tesis_rocio.pdf> [Consulta: Abril 2014]
- [10] Celdas solares a partir de colorantes de vegetales [Online]: Disponible en: <<http://quimica.ugto.mx/revista/12/celda.htm>> [Consulta: Abril 2014]
- [11] Celdas solares de óxido de titanio comercial sensibilizado por colorante. [Online]: Disponible en: <<http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2012/02/6.CELDAS-SOLARES-DE-OXIDO-DE-TITANIO-COMERCIAL.pdf>> [Consulta: Abril 2014]
- [12] Módulo: Cómo construir una celda solar de TiO₂ sensibilizada por tinte [Online]: Disponible en: <http://www.arborosci.com/Data_Sheets/P6-2110-spanish_datasheet.pdf> [Consulta: Abril 2014]
- [13] DYE SOLAR CELLS FOR REAL [Online]: Disponible en: <www.solaronix.com> [Consulta: Abril 2014]
- [14] Celdas solares [Online]: Disponible en: <<http://www.slideshare.net/iesMola/fabricacin-celdas-solare-sweb>> [Consulta: Abril 2014]
- [15] Ultrafast Electron Injection: Implications for a Photoelectrochemical Cell Utilizing an Anthocyanin Dye-Sensitized TiO₂ Nanocrystalline Electrode [Online]: Disponible en: <<http://www.solideas.com/papers/JPhysChemB.pdf>> [Consulta: Abril 2014]
- [16] Demonstrating electron transfer and nanotechnology: A natural Dye-sensitized nanocrystalline energy converter [Online]: Disponible en: <<http://www.solideas.com/papers/JCE98.pdf>> [Consulta: Abril 2014]
- [17] César Vásquez Importaciones y Representaciones [Online]: Disponible en: <<http://www.cesarvasquez.com>> [Consulta: Abril 2014]
- [18] Espectrocrom [Online]: Disponible en: <<http://www.espectrocrom.com>> [Consulta: Abril 2014]

- [19] PRODUCTS [Online]: Disponible en: <<http://www.solaronix.com/materials/products/iodolyte>> [Consulta: Abril 2014]
- [20] Estudio de colorantes fotosensibles obtenidos de tres plantas de la región sur del Ecuador para ser aplicadas en celdas solares mediante espectrometría UV-Visible [Online]: Disponible en: <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/10724/1/Cabrera_Bejarano_Marcela_Victoria.pdf> [Consulta: Diciembre 2014]
- [21] ANÁLISIS QUÍMICO DE ANTOCIANINAS EN FRUTOS SILVESTRES COLOMBIANOS [Online]: Disponible en: <<http://www.bdigital.unal.edu.co/5351/1/197518.2011.pdf>> [Consulta: septiembre 2014]
- [22] PROPIEDADES FUNCIONALES DE LAS ANTOCIANINAS [Online]: Disponible en: <<http://www.biocetnia.uson.mx/revistas/articulos/16-BIO-11-DPA-06.pdf>> [Consulta: septiembre 2014]
- [23] EXTRACCIÓN Y USO DE TRES PIGMENTOS NATURALES A PARTIR DE TOMATE DE ÁRBOL (*Solanum betaceum* Cav.), MORTIÑO (*Vaccinium myrtillus* L.) Y MORA DE CASTILLA (*Rubus glaucus*) COMO ALTERNATIVA COLORANTE NATURAL PARA ALIMENTOS [Online]: Disponible en: <<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/4929/1/T-ESPE-IASA%20I-004583.pdf>> [Consulta: septiembre 2014]
- [24] Extracción y secado por atomización del colorante de mora castilla (*Rubus glaucus*) [Online]: Disponible en: <<http://www.bdigital.unal.edu.co/3330/1/mariaolgamderobayo.2000.pdf>> [Consulta: septiembre 2014]
- [25] Menéndez G, Walter V, Obtención De Colorante Para Su Uso En Yogurt A Partir De La Flor De Jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) y Del Mortiño (*Vaccinium myrtillus* L.) GUAYAQUIL – ECUADOR, 2008 [Consulta: septiembre 2014]
- [26] “Característica de Corriente-Voltaje de un Módulo Fotovoltaico”. [Online]: Disponible en: <http://www.uprag.edu/uploads/ELEC/Caracteristica__Corriente.pdf> [Consulta: Diciembre 2014]
- [27] Fernandez Ferichola, J. “Caracterización de Módulos Fotovoltaicos con Dispositivo Portatil”, [Online]: Disponible en: <http://earchivo.uc3m.es/bitstream/10016/6037/1/PFC_Julio_Fernandez_Ferichola.pdf> [Consulta: Diciembre 2014]
- [28] Instalación de un sistema fotovoltaico. [Online]: <<http://antusol.webcindario.com/instalacion.html>> [Consulta: Diciembre 2014]
- [29] Multímetro digital profesional, [Online]: Disponible en: <<https://www.truper.com/pdf/manuales/10403.pdf>> [Consulta: Diciembre 2014]
- [30] Descubre la energía, Que es energía fotovoltaica, [Online]: Disponible en: <<https://descubrelaenergia.fundaciondescubre.es/2013/09/11/que-es-el-efecto-fotovoltaico/>> [Consulta: Diciembre 2014]

ANEXOS

Construcción experimental de Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante (DSSC) tipo Grätzel.

Edison Arévalo^{#1}, Freddy Espinoza^{#2}, Jorge Luis Jaramillo^{#3}

^{#1-2} Profesionales en formación, IET, Universidad Técnica Particular de Loja.

^{#3} Docente del DCCE, Universidad Técnica Particular de Loja.
Loja, Ecuador 2015.

¹eaarevalo1@utpl.edu.ec, ²fdespinoza@utpl.edu.ec, ³jorgeluis@utpl.edu.ec

Resumen—Se describe los resultados obtenidos de la construcción experimental de celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC) tipo Grätzel.

Palabras claves— celdas solares, celdas solares sensibilizadas por colorante.

INTRODUCCIÓN

La producción de energía eléctrica a partir del sol está basada en el fenómeno físico denominado efecto fotovoltaico, que básicamente consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica mediante celdas fotovoltaicas. Estas celdas pueden ser construidas a base de silicio o celdas basadas en colorantes naturales como es el caso de las celdas Grätzel. Las celdas Grätzel en la actualidad poseen una alta eficiencia en generación de energía eléctrica a partir del sol.

Cada hora, el Sol proporciona a nuestro planeta, la energía suficiente para cubrir la demanda anual de la humanidad. Se puede afirmar que la energía solar constituye una fuente de energía limpia, abundante y renovable.

En la búsqueda de aprovechar el recurso solar, el hombre ha diseñado y probado 3 generaciones de celdas solares: de silicio (primera generación), de capas delgadas de semiconductor (segunda generación), y, sensibilizadas por colorante o celdas de Grätzel (tercera generación). En cada generación, se ha apostado a mejorar la eficiencia de conversión teórica, y, reducir el coste de producción.

Considerando el potencial para el aprovechamiento de energía solar en la zona sur del Ecuador, y, considerando el impacto y proyección de las celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC por sus siglas en inglés), desde la Sección de Telecomunicaciones y Electrónica del Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica de la Universidad Técnica Particular de Loja, se propuso una experiencia piloto para la construcción de DSSC desde la perspectiva de la ingeniería en electrónica y telecomunicaciones.

En este trabajo, se describe la metodología experimental de la construcción de celdas sensibilizadas por colorante tipo Grätzel desde la perspectiva de la ingeniería de electrónica y telecomunicaciones.

METODOLOGÍA BÁSICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CELDAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR COLORANTE (DSSC) TIPO GRÄTZEL

A. Generalidades de las celdas solares sensibilizadas por colorante

En 1991, Michael Grätzel diseñó una celda solar capaz de generar energía eléctrica a partir de la luz solar, utilizando un colorante de origen vegetal.

Una celda de Grätzel contiene 2 electrodos: ánodo y cátodo. El ánodo es el terminal negativo de la celda, y, está unido a una cubierta de vidrio conductor sobre la que se deposita un semiconductor (dióxido de titanio TiO_2), impregnado en jugo de clorofila o de algún otro colorante natural para una mayor absorción de luz [2]. El cátodo es el terminal positivo de la celda, y, está unido a un vidrio conductor recubierto por un material catalítico (carbono o platino), que permite transferir una mayor cantidad de electrones.

El espacio entre los electrodos, se llena con un electrolito que contiene un par redox, que ayuda a que el electrón viaje del ánodo al cátodo, generando así la corriente eléctrica [3].

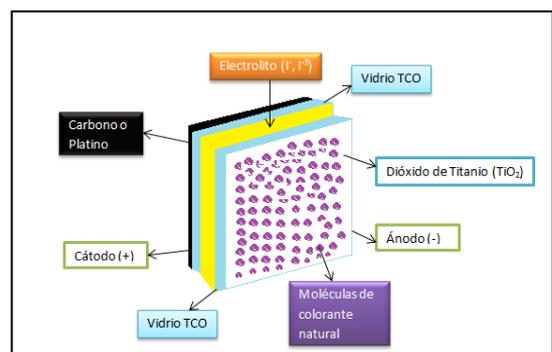


Fig. 1. Estructura de una celda de Grätzel típica. Diseño de los autores.

El TiO_2 se utiliza como catalizador. De este semiconductor existen 3 formas cristalinas (fases): anatasa, brookita, y, rutilo. La anatasa es la fase de mejores prestaciones para la *fotocatalisis*, entendida como la reacción en la cual el catalizador absorbe luz [5], [6].

Debido al band gap elevado, el TiO_2 se excita con radiación ultravioleta. El colorante ayuda a extender el gap hacia la absorción de longitudes de onda mayores, hasta alcanzar la zona visible. Entonces, la radiación solar excita al colorante, y, este inyecta electrones a la banda de conducción del semiconductor, desde donde fluyen al electrodo negativo. En una DSSC, las partículas del semiconductor varían entre 10 y 40 nm de tamaño, de modo tal que la capa sintetizada resultante es altamente porosa.

La antocianina es un colorante de especial interés para la fabricación de DSSC, que se encuentra en la pigmentación de frutas (frambuesas, manzanas, peras, uvas, zarzamoras, ciruelas, y, semillas de granada), de flores (jamaica y rosas), de verduras (col morada y maíz morado), y, de hojas verdes de cítricos. La antocianina posee grupos $-\text{OH}$ que se anclan al TiO_2 [7], [8].

También es posible utilizar colorantes sintéticos como el rutenio, cuyas moléculas están optimizadas para una mejor recolección de luz, con un mejor rendimiento que los tintes naturales. Sin embargo, existe una marcada tendencia a la utilización de colorantes orgánicos, ya que pueden sintetizarse y modificarse fácilmente, con un coste menor que con el rutenio [9].

El catalizador tiene la función de contra-electrodo para facilitar la transferencia electrónica. Existen dos tipos de catalizadores: platino y carbono. El electrodo de carbono es más sencillo y barato, pero el electrodo de platino ofrece el mejor rendimiento [10].

Frecuentemente, como electrolito se emplea un solvente orgánico con un par redox I^-/I_3^- . El electrolito que contiene yoduro (I^-), transfiere electrones al tinte en contacto con el TiO_2 (convertido en triyoduro I_3^-), que a su vez acepta electrones para convertirse en yoduro. Esta secuencia de eventos origina una corriente eléctrica. [11]. [12].

B. Metodología para la construcción de DSSC

Preparación del electrodo negativo

La construcción inicia con la identificación del lado conductor en la placa de vidrio. Seguidamente, se prepara la solución de dióxido de titanio, mezclando en un mortero, 10 ml de vinagre y 6 g de dióxido de titanio, dejándola reposar al menos 15 minutos. Con ayuda de un gotero, se deposita la solución sobre la placa, en el lado conductor [14]. Al secarse la solución, la placa se lleva a un horno, a una temperatura entre 450°C y 550°C , por 10 min. La solución cambiará de un color blanco a uno marrón, y, regresará a su color original.

Preparación del electrodo positivo

Después de determinar el lado conductor de la placa, se coloca la lámina de grafito. Esta lámina puede ser pintada con un lápiz, o, quemada con una vela. Este electrodo no necesita cocción.

Coloración del electrodo negativo

Los tintes se preparan a partir de frutas frescas, en una placa de Petri. Con la cantidad suficiente de tinte, se sumerge la placa con la parte recubierta de dióxido de titanio hacia abajo. De ser necesario, se aplica una leve presión sobre la placa de vidrio para empapar el electrodo en tinte. El electrodo se retira y se limpia cuidadosamente con etanol [13].

Montaje de la DSSC

Para montar la celda solar, se une los lados activos del ánodo y del cátodo, es decir el dióxido de titanio y la placa de platino o de carbono del contra-electrodo.

La brecha que queda entre las dos placas, se llena de electrolito. Esto se puede realizar, perforando el cátodo e ingresando el electrodo, o, inyectando el electrodo entre las dos placas.

Verificación de la operación de la DSSC

Para validar el funcionamiento de la DSSC, se conecta un multímetro al extremo negativo del ánodo y al extremo positivo del contra-electrodo. Se mide el voltaje y la corriente de celda con iluminación a pleno sol, o con iluminación artificial.

FABRICACIÓN EXPERIMENTAL DE CELDAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR COLORANTE TIPO GRÄTZEL

Una vez establecida la metodología, se decidió continuar con la iniciativa, estableciendo la secuencia de actividades que se muestra en la Fig.2.



Fig. 2. Metodología de trabajo propuesta para el desarrollo del proyecto. Diseño de los autores.

Selección de proveedores de materiales

Por referencia del personal del LQA, y, de profesionales en formación de la titulación de Ingeniería Química de la UTPL, se conformó una base de potenciales proveedores presentes en el mercado, en la que se incluyó a empresas como MARECI (Loja, Ecuador), ESPECTROCOM (Guayaquil, Ecuador), César Vásconez Importaciones CIA. LTDA (Quito, Ecuador), Austroquimicos (Cuenca, Ecuador), y, Solaronix (Suiza) [13], [17], [18].

Una vez obtenidas las cotizaciones respectivas, se analizó cada una de ellas de acuerdo a parámetros preestablecidos como costo, disponibilidad, calidad, eficiencia y tiempo de entrega. La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos. Como proveedor fue seleccionada la empresa Solaronix.

De entre la oferta de Solaronix, se decidió adquirir un kit educacional avanzado (Education Cell Kit Advanced), para la construcción de 4 celdas, que incluye 4 celdas selladas, electrodos de titanio (4), electrodos perforados de platino (4), juntas (5), selladoras (5), y, marcos (10). Adicionalmente, se adquirió a la misma empresa un electrolito redox (reducción y oxidación) [19]. La inversión final fue de alrededor de USD 1000, incluyendo el costo de envío y los impuestos de nacionalización.

Selección de proveedores de colorantes

Según estudios previos realizados en la Sección de Química Aplicada (SQA) de la UTPL, los DSSCs preparados con tintes naturales obtenidos de la zarzamora (*rubus robustus*C pres), mortiño (*solanum americanum* mill), escancel (*iresine herbstii* gancho), y, extracto de remolacha (*beta vulgaris*), alcanzaron una eficiencia de 0,55%, 0,20%, 0,13% y 0,02%, respectivamente; registrando un voltaje de circuito abierto (Voc) de 0.65 V, 0.5 V, 0.45 V, y 0.19 V para cada especie [20].

En este sentido, para esta experiencia piloto, se decidió sensibilizar los DSSC con tinte de mora, preparado por el equipo de trabajo de acuerdo a las especificaciones del equipo de la SQA.

C. Construcción de las celdas tipo Grätzel

Para la construcción experimental se celdas Grätzel, se decidió seguir una secuencia de 5 etapas, tal como lo muestra la Fig.2

Preparación de los materiales

El *electrodo* adquirido contiene una capa de óxido de titanio transparente, impregnada en el vidrio conductor [13], lo que permite omitir la preparación de un electrodo negativo.

Para el *contra-electrodo* se adquirió una placa de vidrio conductor, impresa con el platino, lo que permite omitir la preparación de un contra-electrodo. La placa posee dos orificios, a través de los cuales se adiciona el electrolito, tras

sellar el electrodo y el contra-electrodo.

Como *electrolito* se utilizó Iodolyte HI-30, una solución electrolítica proporcionada por Solaronix.

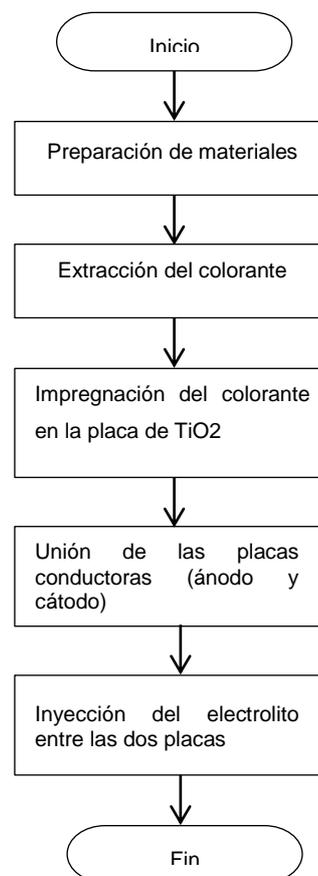


Fig. 3. Flujograma del proceso de fabricación de las celdas. Diseño de los autores.

Preparación del colorante

El colorante fue preparado bajo la supervisión del personal del LAQ. La Fig. 4 muestra el flujograma del proceso seguido, mientras que las Tabla 1 y 2 muestran el detalle de los insumos y equipos utilizados.

Tabla 1. Detalle de insumos utilizados para la preparación del colorante. Diseño de los autores

Insumo	Cantidad
Etanol	500 ml
Mora	100 g
Ácido clorhídrico	50 ml
Agua destilada	100 ml

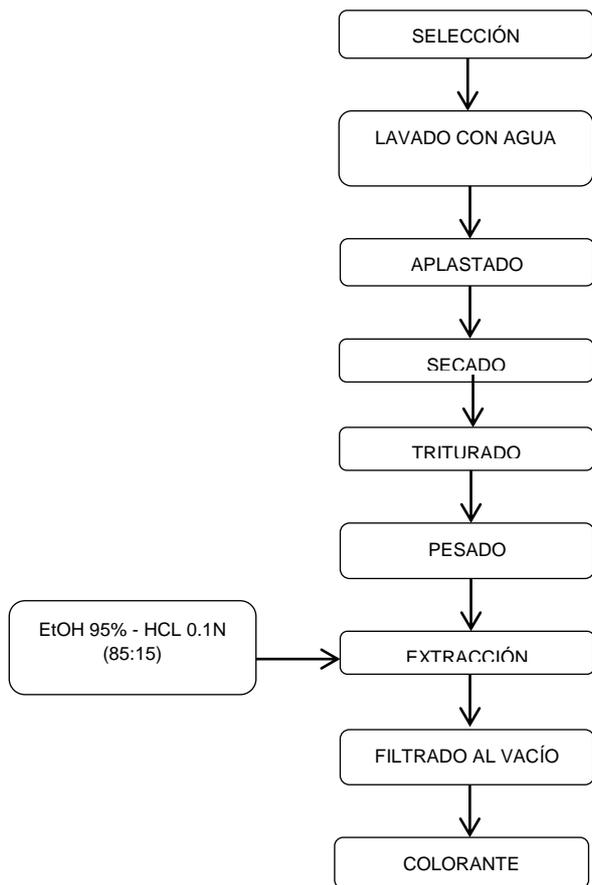


Fig. 4. Flujograma del proceso de extracción del colorante. Diseño de los autores.

Tabla 2.

Detalle de equipos utilizados para la preparación del colorante. Diseño de los autores

Equipos	Cantidad
Estufa	1
Matraz de Erlenmeyer de 500 ml	1
Mortero con pistilo	1
Balanza	1
Bandeja de aluminio	1
Balón de Aforo de 500 ml	1
Balón de Aforo de 250 ml	1
Vaso de precipitación	1
Probeta de 100 ml	1
Pipeta de 100 ml	1
Pizeta	1
Magneto	1
Plato agitador	1

Papel aluminio	1
Embudo Büchner	1
Papel Filtro	1

En la etapa de *selección*, se inspecciona visualmente la mora, a fin de garantizar buenas condiciones de sanidad y de color (ver Fig. 5).



Fig. 5. Moras a utilizar en la extracción del colorante. Fotografía de los autores.

En la etapa de *lavado con agua*, se eliminan las impurezas y otros materiales extraños, incluyendo las hojas verdes de la mora (ver Fig. 6).



Fig. 6. Lavado de las moras. Fotografía de los autores.

La mora se *aplasta* con la intención de reducir su tamaño y acelerar el tiempo de secado (ver Fig. 7).



Fig. 7. Mora aplastada. Fotografía de los autores.

Para extraer la humedad, la mora aplastada se *secó* en una estufa, durante 2 días, a 40°C de temperatura (ver Fig. 8).



Fig. 8. Secado de la mora en la estufa. Fotografía de los autores.

La mora seca se *tritura* para facilitar la extracción del colorante (ver Fig. 9).

De acuerdo a los parámetros de la solución a emplear en la extracción del colorante [21], utilizando una balanza METTLER semianalítica de 0.5 g de precisión y 3.100 g. de capacidad, se *pesó* 100 g de mora para mezclar, en la etapa de extracción, con el disolvente en una relación 85% EtOH y 15% HCL (ver Fig.10).



Fig. 9. Triturado de la mora. Fotografía de los autores.

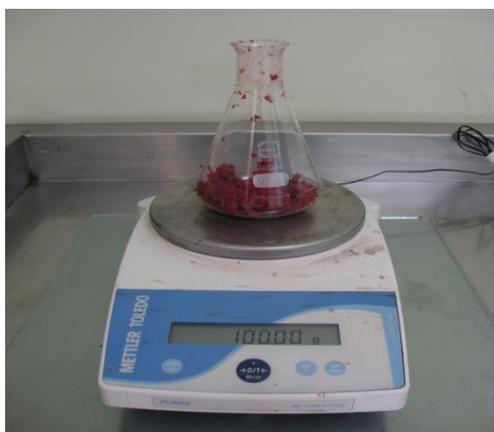


Fig. 10. Pesado de la mora. Fotografía de los autores.

La elección del método de *extracción* del colorante apunta a maximizar la recuperación de pigmentos, con la utilización de una mínima cantidad de solventes, y, una mínima degradación o alteración del estado natural de las propiedades de la mora [22].

La extracción del colorante se realizó utilizando el proceso de maceración, en el que el producto sólido (materia prima) presenta una serie de compuestos solubles en el líquido extractante. Para este proceso, se utilizó una plancha de agitación, un matraz Erlenmeyer que contiene en su interior la solución del solvente a utilizar, la mora, y, un magneto. Además, fue necesario cubrir con papel aluminio al matraz, ya que la luz afecta a la eficiencia en la extracción del colorante. Para acelerar el proceso de maceración es necesario agitar continuamente la solución. Este proceso se automatiza con ayuda de un magneto que, al moverse dentro del matraz, genera un campo magnético rotatorio, cuya acción aumenta la velocidad del proceso de disolución (ver Fig.11).

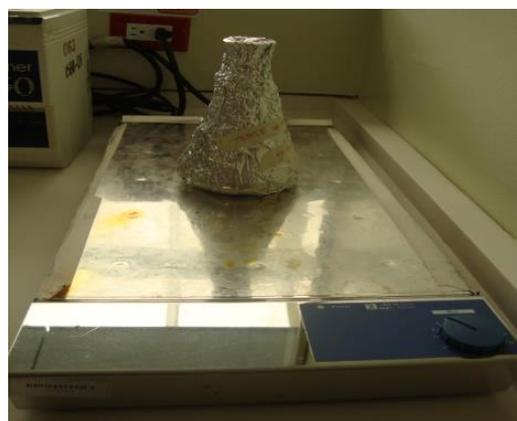


Fig. 11. Proceso de maceración dinámica. Fotografía de los autores.

En la etapa de *filtrado al vacío*, se separó el componente sólido de la solución, empleando una bomba de succión, un embudo Büchner, y papel filtro. La bomba de succión se conectó a un kitasato para filtrar con mayor rapidez (ver Fig. 12).



Fig. 12. Filtrado con válvula de vacío. Fotografía de los autores.

Como resultado final del proceso, se obtuvo el colorante. En esta experiencia se repitió el proceso 3 veces, obteniendo muestras diferentes de colorante, que fueron sometidas a la validación de su pH (ver Fig.13). El pH tiene efecto en la estructura y la estabilidad de las antocianinas. La acidez tiene un efecto protector sobre la molécula [25]. Para la primera muestra, el pH fue de 3.5, mientras que en la segunda y tercera fue de 3.3. En este sentido se consideró que el mejor colorante era el obtenido en la segunda y tercera muestra.



Fig. 13. Medición del pH de una de las muestras de colorante. Fotografía de los autores.

D. Impregnación del colorante en la placa de TiO₂

Como paso previo a la impregnación del colorante, se determinó que lado de la placa, a utilizar como electrodo, está cubierto por óxido de titanio. Para esto se empleó un ohmímetro para medir la resistencia eléctrica a cada lado de la placa. De acuerdo a la bibliografía, el lado conductor tiene una resistencia eléctrica entre 10 a 40Ω, mientras que la medición efectuada mostró que el electrodo a utilizar tiene una resistencia de 29.6 Ω (Fig. 14).



Fig. 14. Verificación del lado conductor del electrodo a utilizar. Fotografía de los autores.

Durante la impregnación, el colorante se vierte sobre el lado conductor del electrodo, y, se deja la placa sumergida en el colorante, durante 24 horas (ver Fig.15). Pasado este tiempo, se limpió todos los sectores no conductores del

electrodo con algodón y etanol (ver Fig. 16), y, se secó la placa con ayuda de una secadora de cabello (ver Fig.17). El resultado final se muestra en la Fig.18.

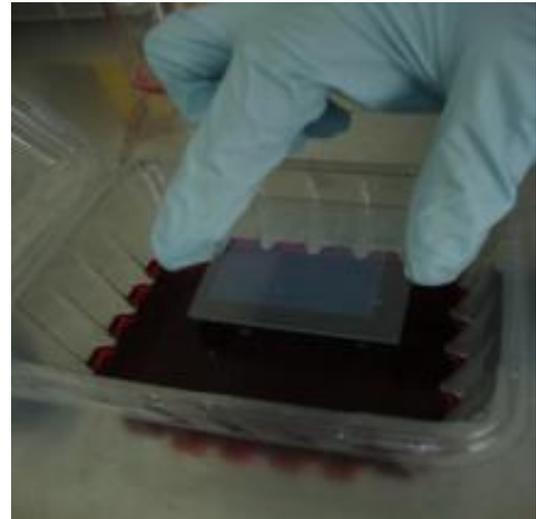


Fig. 15. Impregnación del colorante en el electrodo. Fotografía de los autores.



Fig. 16. Limpieza de los sectores no conductores del electrodo. Fotografía de los autores.



Fig. 17. Secado de la placa. Fotografía de los autores.



Fig. 18. Colorante impregnado en el electrodo. Fotografía de los autores.

E. Unión de las placas conductoras

Una vez impregnado el colorante en el electrodo, se procedió unir este al contra-electrodo, empleando pinzas de papel (ver Fig. 19).



Fig. 19. Unión del electrodo y del contra - electrodo. Fotografía de los autores.

F. Inyección del electrolito entre las dos placas

En esta etapa, a través de los dos orificios de la placa del contra - electrodo, se inyectó el electrolito, utilizando una jeringa (ver Fig. 20).

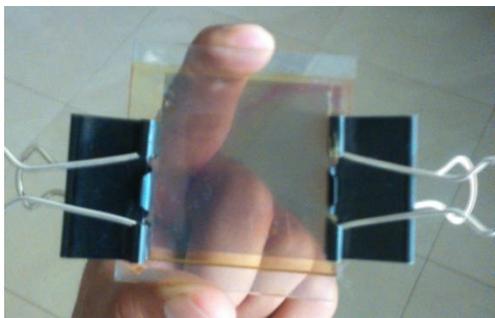


Fig. 20. Celda inyectada con electrolito HI-30. Fotografía de los autores.

EVALUACIÓN DE LA PERFORMANCE DE CELDAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR COLORANTE (DSSC) TIPO GRÄTZEL, CONSTRUIDAS EXPERIMENTALMENTE

Considerando la imposibilidad de acceder a una lámpara

certificada de espectro de luz de día, así como a equipos de medición calibrados, se decidió adoptar un protocolo básico de evaluación, consistente en determinar el voltaje de circuito abierto de la celda, bajo radiación solar directa medida por una estación hidrometeorológica cercana.

El mayor rendimiento de una celda solar se consigue cuando se forma un ángulo recto entre la lámina y el rayo de luz solar. Para lograr esto, considerando la ubicación de la ciudad de Loja, la bibliografía [28] recomienda ubicar las celdas solares a 15° norte respecto a la horizontal.

El registro del voltaje de circuito abierto se realizará utilizando un voltímetro digital TRUPER MUT-105 categoría II y III (ver Tabla 3), entre las 8h00 y las 18h00. En el intervalo de una hora se registrará una lectura cada 10 minutos.

Tabla 3.

Especificaciones técnicas del multímetro TRUPER MUT 105 [4].

Rango	Resolución	Precisión	Protección de sobrecarga
200 mV	0.1 mV	$\pm (0.5\% + 5)$	230 V de CA.
2 V	1 mV		1000 V de CD. 750 de CA
20 V	10 mV		
200 V	100 mV		
1000 V	1 V	$\pm (0.8\% + 5)$	

Durante el experimento se evaluará el desempeño de 3 celdas construidas experimentalmente, con un área aproximada de 1600 mm² cada una. La celda denominada “1” fue la primera en ser construida, mientras que la “3” fue la última.

G. Registro de data

En función de las condiciones climatológicas óptimas, el registro de data se realizó el día 20 de noviembre del 2014, ubicando las celdas solares construidas en los patios del Edificio del Instituto de Química Aplicada de UTPL, observando la orientación e inclinación requerida, y, evitando la proyección de sombras sobre las celdas (ver Fig. 21).

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos al registrar el voltaje de circuito abierto en cada una de las celdas construidas, en función de la hora del día.

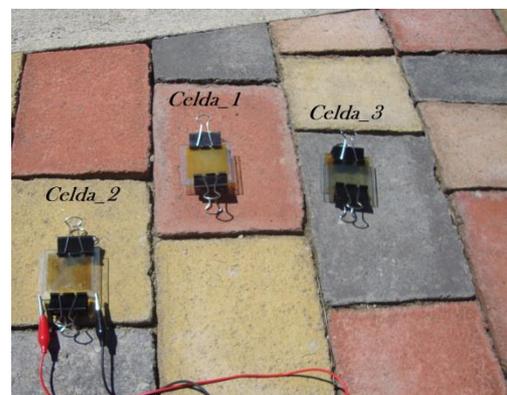


Fig.21. Registro de data sobre la performance de las celdas solares tipo Grätzel fabricadas experimentalmente. Fotografía de los autores.

Tabla 4.

Voltaje de circuito abierto en cada una de las celdas solares Grätzel construidas, en función de la hora del día. Elaborado por autores.

Hora	Vca celda 1, V	Vca celda 2, V	Vca celda 3, V
8:00	0,35	0,41	0,45
8:10	0,35	0,39	0,45
8:20	0,35	0,4	0,4
8:30	0,35	0,41	0,41
8:40	0,33	0,47	0,47
8:50	0,34	0,45	0,44
9:00	0,35	0,48	0,45
9:10	0,34	0,48	0,42
9:20	0,33	0,46	0,45
9:30	0,33	0,48	0,46
9:40	0,33	0,46	0,45
9:50	0,31	0,48	0,45
10:00	0,32	0,47	0,47
10:10	0,31	0,48	0,46
10:20	0,31	0,48	0,47
10:30	0,3	0,48	0,47
10:40	0,31	0,45	0,48
10:50	0,3	0,46	0,46
11:00	0,32	0,46	0,47
11:10	0,3	0,48	0,48
11:20	0,3	0,48	0,47
11:30	0,31	0,46	0,47
11:40	0,3	0,46	0,48
11:50	0,29	0,46	0,47
12:00	0,3	0,46	0,48
12:10	0,3	0,47	0,46
12:20	0,3	0,46	0,49
12:30	0,3	0,46	0,48
12:40	0,3	0,47	0,49
12:50	0,31	0,47	0,49

Tabla 4.

Voltaje de circuito abierto en cada una de las celdas solares Grätzel construidas, en función de la hora del día. Elaborado por autores. Continuación...

Hora	Vca celda 1, V	Vca celda 2, V	Vca celda 3, V
13:00	0,31	0,46	0,49
13:10	0,29	0,46	0,48
13:20	0,3	0,46	0,48
13:30	0,3	0,46	0,47
13:40	0,3	0,46	0,45
13:50	0,29	0,45	0,43
14:00	0,29	0,46	0,46

14:10	0,29	0,46	0,47
14:20	0,29	0,45	0,45
14:30	0,29	0,45	0,46
14:40	0,28	0,43	0,48
14:50	0,28	0,44	0,47
15:00	0,3	0,44	0,46
15:10	0,29	0,45	0,44
15:20	0,3	0,44	0,45
15:30	0,27	0,43	0,47
15:40	0,28	0,44	0,43
15:50	0,27	0,44	0,43
16:00	0,27	0,44	0,43
16:10	0,26	0,44	0,43
16:20	0,26	0,44	0,44
16:30	0,25	0,41	0,43
16:40	0,24	0,42	0,41
16:50	0,2	0,42	0,42
17:00	0,23	0,36	0,4
17:10	0,17	0,36	0,38
17:20	0,11	0,34	0,35
17:30	0,07	0,32	0,33
17:40	0,03	0,31	0,29
17:50	0,03	0,3	0,29
18:00	0,02	0,31	0,28

La Tabla 5 muestra los niveles mínimos y máximos de radiación registrados por una estación de monitoreo tipo Vantage Pro2 Plus, ubicada en las faldas del cerro Villonaco, al oeste de la ciudad de Loja, en las coordenadas UTMX 694294, UTM Y 9558872, y, UTM Z 2377, en el DATUM WGS84.

Tabla 5.

Valores máximos y mínimos de radiación directa en la ciudad de Loja, el 20 de noviembre del 2014. Elaboración de autores

Hora	Radiación solar mínima, W/m ²	Radiación solar máxima, W/m ²
8:00	407	448
8:10	475	517
8:20	535	548
8:30	561	589
8:40	583	640
8:50	655	680
9:00	699	717
9:10	729	744
9:20	769	784
9:30	779	823

9:40	736	819
9:50	793	916
10:00	761	891
10:10	852	935
10:20	931	944
10:30	948	958
10:40	960	979
10:50	985	995
11:00	995	1018
11:10	1005	1030
11:20	930	1002
11:30	900	1039
11:40	986	1035
11:50	1032	1034
12:00	1037	1039
12:10	1039	1046
12:20	1034	1039
12:30	1023	1035
12:40	1016	1020
12:50	1005	1013
13:00	994	998
13:10	988	993
13:20	969	981
13:30	948	963
13:40	929	942
13:50	912	921
14:00	887	895
14:10	862	870
14:20	838	854
14:30	801	819

Tabla 5.

Valores máximos y mínimos de radiación directa en la ciudad de Loja, el 20 de noviembre del 2014. Elaboración de autores. Continuación

Hora	Radiación solar mínima, W/m ²	Radiación solar máxima, W/m ²
14:40	774	788
14:50	756	766
15:00	256	788
15:10	246	742
15:20	457	680
15:30	442	626
15:40	402	608
15:50	521	531
16:00	393	496
16:10	287	473
16:20	352	415
16:30	85	160
16:40	65	79
16:50	56	67
17:00	54	62
17:10	45	51
17:20	37	42
17:30	33	35
17:40	32	35
17:50	26	32
18:00	16	21

H. Resultados obtenidos y análisis de resultados

La Fig.22 muestra la evolución de la radiación solar mínima y máxima el día en que se realizó el experimento. La radiación solar sobre la ciudad de Loja alcanzó un pico cercano a 1040 W/m², y, pasadas las 15h00, registró una baja significativa debido a que la ciudad fue cubierta por una capa densa de nubes.

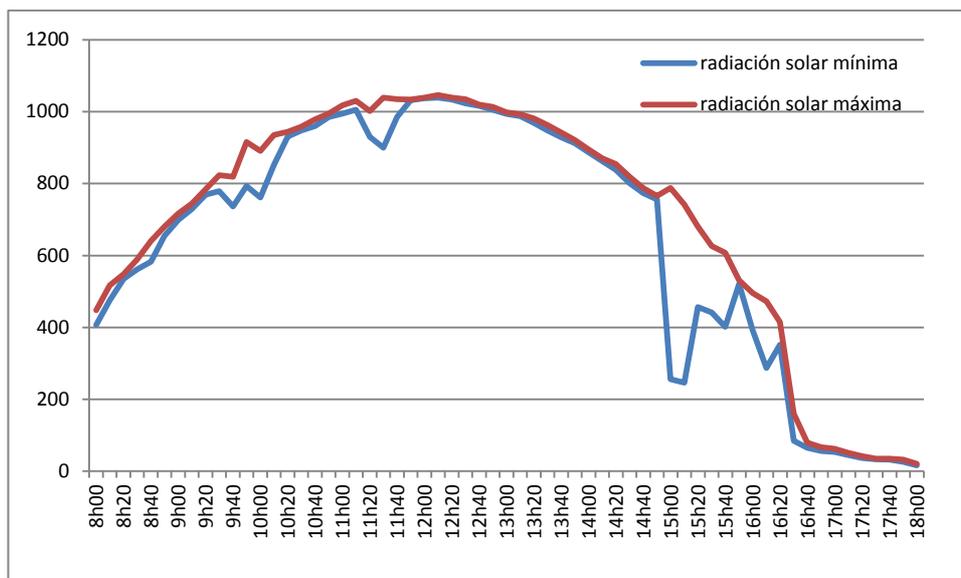


Fig.22. Evolución de la radiación solar mínima y máxima con respecto a la hora del día, durante el experimento. Diseño de los autores.

Las Fig. 3 a la 5 muestran la evolución del voltaje de circuito abierto de las celdas, en función de la hora del día.

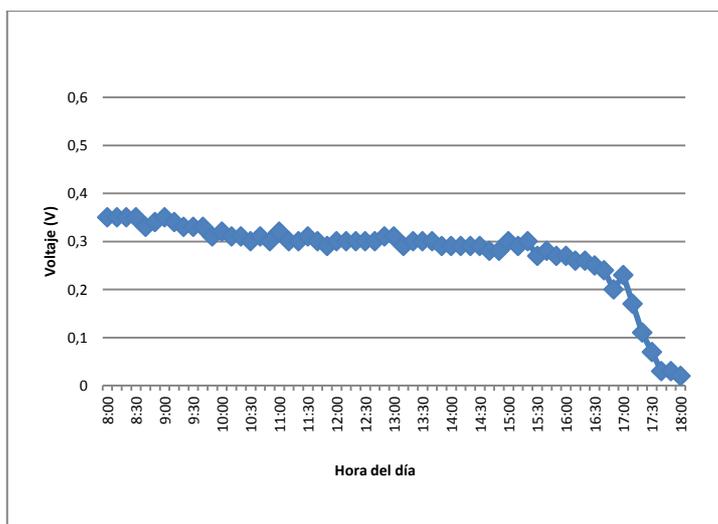


Fig.23. Voltaje de circuito abierto en la celda 1, durante el día del experimento. Diseño de los autores.

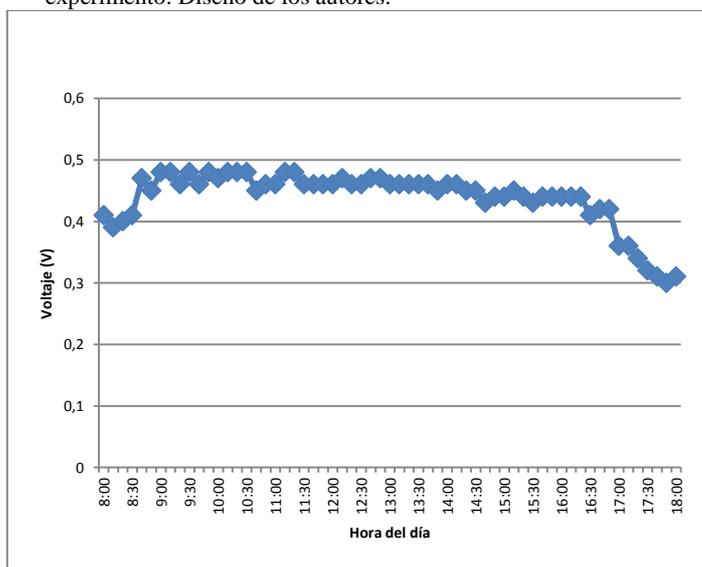


Fig.24. Voltaje de circuito abierto en la celda 2, durante el día del experimento. Diseño de los autores.

experimento. Diseño de los autores.

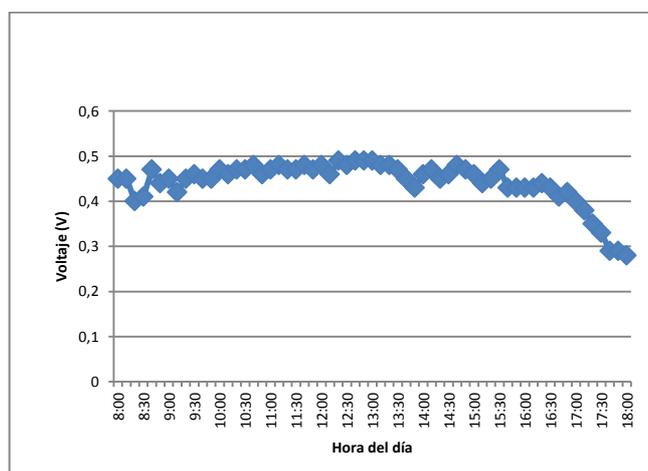


Fig.25. Voltaje de circuito abierto en la celda 3, durante el día del experimento. Diseño de los autores.

Los resultados obtenidos muestran que los valores más altos de voltaje de circuito abierto se obtienen para niveles de radiación sobre los 600 W/m^2 . En la celda 1, el valor promedio de voltaje de circuito abierto, en el intervalo entre las 8h00 y las 16h00, es de 0,3V. En la celda 2, en ese mismo intervalo, el valor promedio alcanza los 0,45V; y, en la celda 3, se logran valores cercanos a los 0,5V. Como referencia, la bibliografía [30] muestra que el celdas de características similares, construidas con silicio, el voltaje de circuito abierto oscila entre 0,46 y 0,48 V, en las horas de mayor radiación solar.

CONCLUSIONES

- La búsqueda de proveedores de materiales y colorantes no permitió identificar proveedores en el mercado local, capaces de atender todos los requerimientos, razón por la cual se optó por importar los materiales requeridos, mientras que para la provisión de colorantes se decidió utilizar

una metodología proveniente establecida por el equipo de trabajo del Laboratorio de Química Aplicada de la UTPL, obteniendo un colorante potencialmente aplicable a partir de la mora.

- Considerando la imposibilidad de acceder a una lámpara certificada de espectro de luz de día, así como a equipos de medición calibrados, se decidió adoptar un protocolo básico de evaluación, consistente en determinar el voltaje de circuito abierto de la celda, bajo radiación solar directa medida por una estación hidrometeorológica cercana. Por lo tanto, los resultados obtenidos tienen sólo el carácter de referencial.
- Los resultados obtenidos muestran que los valores más altos de voltaje de circuito abierto se obtienen para niveles de radiación sobre los 400 W/m², con un registro promedio de 0,4V.

REFERENCIAS

- [1] O. Morton, "Solar energy: A new day dawning?: Silicon Valley Sunrise", *Nature*, 2006, 443, 19- 22. [Online]: Disponible en: <<http://www.nature.com/nature/journal/v443/n7107/full/443019a.html>> [Consulta: Abril 2014]
- [2] Nuevos materiales fotovoltaicos avanzados. [Online]: Disponible en: <<http://blogs.creamoselfuturo.com/nano-tecnologia/2011/11/04/nuevos-materiales-fotovoltaicos-avanzados/>> [Consulta: Abril 2014]
- [3] Desarrollo de nuevos electrolitos con potencial uso en celdas solares nanocristalinas [Online]: <<http://eprints.uanl.mx/479/1/ELECTROLITOSCONPOTENCIAL.pdf>> [Consulta: Abril 2014]
- [4] Vidrio solar TCO [Online]: Disponible en: <<http://www.etwinternational.es/137912-product-3-4-tco-solar-glass-es-31575.html>> [Consulta: Abril 2014]
- [5] Preparación y caracterización de capas delgadas y estructuras de óxido de titanio para aplicaciones fotocatalíticas activadas mediante radiación UV o visible [Online]: Disponible en: <<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/96886/1de1.pdf?sequence=1>> [Consulta: Abril 2014]
- [6] P25 TiO₂ Nanoparticle [Online]: Disponible en: <<http://www.etwinternational.es/137912-product-3-4-tco-solar-glass-es-31575.html>> [Consulta: Abril 2014]
- [7] Proceso electroquímico en celdas solares sensibilizadas con un colorante natural [Online]: Disponible en: <<http://www.uaa.mx/investigacion/revista/Hemeroteca/REVISTA%2056.pdf>> [Consulta: Abril 2014]
- [8] Soluciones solares Celda solar casera Grätzel (proyecto de ciencias) [Online]: Disponible en: <<http://solucionesolares.blogspot.com/2012/06/celda-solar-casera-gratzel-proyecto-de.html>> [Consulta: Abril 2014]
- [9] SIMULACIÓN DE LA ACTIVIDAD DEL COLORANTE EN EL PROCESO DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA EN CELDAS SOLARES SENSIBILIZADAS [Online]: Disponible en: <http://grupo.us.es/gfqm132/Tesis_rocio.pdf> [Consulta: Abril 2014]
- [10] Celdas solares a partir de colorantes de vegetales [Online]: Disponible en: <<http://quimica.ugto.mx/revista/12/celda.htm>> [Consulta: Abril 2014]
- [11] Celdas solares de óxido de titanio comercial sensibilizado por colorante. [Online]: Disponible en: <<http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2012/02/6.CELDAS-SOLARES-DE-OXIDO-DE-TITANIO-COMERCIAL.pdf>> [Consulta: Abril 2014]
- [12] Módulo: Cómo construir una celda solar de TiO₂ sensibilizada por tinte [Online]: Disponible en: <http://www.arborsci.com/Data_Sheets/P6-2110-spanish_datasheet.pdf> [Consulta: Abril 2014]
- [13] DYE SOLAR CELLS FOR REAL [Online]: Disponible en: <www.solaronix.com> [Consulta: Abril 2014]
- [14] Celdas solares [Online]: Disponible en: <<http://www.slideshare.net/iesMola/fabricacin-celdas-solare-sweb>> [Consulta: Abril 2014]
- [15] Ultrafast Electron Injection: Implications for a Photoelectrochemical Cell Utilizing an Anthocyanin Dye-Sensitized TiO₂ Nanocrystalline Electrode [Online]: Disponible en: <<http://www.solideas.com/papers/JPhysChemB.pdf>> [Consulta: Abril 2014]
- [16] Demonstrating electron transfer and nanotechnology: A natural Dye-sensitized nanocrystalline energy converter [Online]: Disponible en: <<http://www.solideas.com/papers/JCE98.pdf>> [Consulta: Abril 2014]
- [17] César Vásquez Importaciones y Representaciones [Online]: Disponible en: <<http://www.cesarvasquez.com>> [Consulta: Abril 2014]
- [18] Espectrocrom [Online]: Disponible en: <<http://www.espectrocrom.com>> [Consulta: Abril 2014]
- [19] PRODUCTS [Online]: Disponible en: <<http://www.solaronix.com/materials/products/iodolyte>> [Consulta: Abril 2014]
- [20] Estudio de colorantes fotosensibles obtenidos de tres plantas de la región sur del Ecuador para ser aplicadas en celdas solares mediante espectrometría UV-Visible [Online]: Disponible en: <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/10724/1/Cabrera_Bejarano_Marcela_Victoria.pdf> [Consulta: Diciembre 2014]
- [21] ANÁLISIS QUÍMICO DE ANTOCIANINAS EN FRUTOS SILVESTRES COLOMBIANOS [Online]: Disponible en: <<http://www.bdigital.unal.edu.co/5351/1/197518.2011.pdf>> [Consulta: septiembre 2014]
- [22] PROPIEDADES FUNCIONALES DE LAS ANTOCIANINAS [Online]: Disponible en: <<http://www.biotecnia.uson.mx/revistas/articulos/16-BIO-11-DPA-06.pdf>> [Consulta: septiembre 2014]
- [23] EXTRACCIÓN Y USO DE TRES PIGMENTOS NATURALES A PARTIR DE TOMATE DE ÁRBOL (*Solanum betaceum* Cav.), MORTIÑO (*Vaccinium myrtillus* L.) Y MORA DE CASTILLA (*Rubus glaucus*) COMO ALTERNATIVA COLORANTE NATURAL PARA ALIMENTOS [Online]: Disponible en: <<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/4929/1/T-ESPE-IASA%20I-004583.pdf>> [Consulta: septiembre 2014]
- [24] Extracción y secado por atomización del colorante de mora castilla (*Rubus glaucus*) [Online]: Disponible en: <<http://www.bdigital.unal.edu.co/3330/1/mariaolgamderobayo.2000.pdf>> [Consulta: septiembre 2014]
- [25] Menéndez G, Walter V, Obtención De Colorante Para Su Uso En Yogurt A Partir De La Flor De Jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) y Del Mortiño (*Vaccinium myrtillus* L.) GUAYAQUIL – ECUADOR, 2008 [Consulta: septiembre 2014]
- [26] "Característica de Corriente-Voltaje de un Módulo Fotovoltaico". [Online]: Disponible en: <http://www.uprag.edu/uploads/ELEC/Caracteristica__Corriente.pdf> [Consulta: Diciembre 2014]
- [27] Fernandez Ferichola, J. "Caracterización de Módulos Fotovoltaicos con Dispositivo Portátil", [Online]: Disponible en: <http://earchivo.uc3m.es/bitstream/10016/6037/1/PFC_Julio_Fernandez_Ferichola.pdf> [Consulta: Diciembre 2014]
- [28] Instalación de un sistema fotovoltaico. [Online]: <<http://antusol.webcindario.com/instalacion.html>> [Consulta: Diciembre 2014]
- [29] Multímetro digital profesional, [Online]: Disponible en: <<https://www.truper.com/pdf/manuales/10403.pdf>> [Consulta: Diciembre 2014]
- [30] Descubre la energía, Que es energía fotovoltaica, [Online]: Disponible en: <<https://descubrelaenergia.fundaciondescubre.es/2013/09/11/que-es-el-efecto-fotovoltaico/>> [Consulta: Diciembre 2014]