Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias (Óptica)

# Caracterización Puntual de Celdas Solares Orgánicas por LBIC

Autor: Eduardo Nava Palomares. Asesor: Dr. Oracio Cuauhtemoc Barbosa Garcia.



Centro de Investigaciones en Óptica Loma del Bosque No. 115 Col. Loma del Campestre

# Índice general

Ag	grade	cimientos	1				
Re	esume	en	3				
Oł	ojetiv	0	5				
1.	Intro	itroducción					
2.	Celdas Solares						
	2.1.	Conceptos básicos de celdas solares inorgánicas y orgánicas	12				
		2.1.1. Celda solar inorgánica	12				
		2.1.2. Celda solar orgánica	13				
	2.2.	Caracterización de celdas solares	14				
		2.2.1. Densidad de corriente de corto circuito $J_{SC}$	16				
		2.2.2. Voltaje de circuito abierto $V_{OC}$	17				
		2.2.3. Densidad de potencia $P$	17				
		2.2.4. Factor de llenado $FF$ y eficiencia $\eta$	18				
3.	Técnica LBIC 19						
	3.1.	La técnica LBIC y sus variantes	20				
		3.1.1. Ventajas y desventajas de la técnica LBIC con respecto a otras					
		técnicas y sus variantes	22				
	3.2.	Aplicaciones	23				
4.	Des	arrollo experimental	25				
	4.1.	Arreglo LBIC	25				
	4.2.	Programa de control	26				
		4.2.1. Interfaz gráfica de usuario para la manipulación de los motores					
		a pasos	27				
		4.2.2. Interfaz gráfica de usuario para el barrido del área total de la					
		$celda \ solar \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ $	28				
	4.3.	Preparación de muestras	30				
	4.4.	Caracterización del arreglo experimental	33				
		4.4.1. Distancia de Muestreo	33				

	4.4.2.	Tiempo de barrido por distancia punto a punto y número de		
		pixeles	34	
	4.4.3.	Tiempo de integración	35	
	4.4.4.	Potencia del láser	36	
4.5.	Result	ados	39	
	4.5.1.	Celdas orgánicas C1 (ITO; PEDOT:PSS; PTB7:C71BM; PFN y		
		Field's metal)	39	
	4.5.2.	Celdas orgánicas C2 (ITO; PEDOT:PSS; PTB7:C71BM; Floruro		
		de Littio y Aluminio)	48	
4.6.	Anális	is de contorno	51	
5. COI		IONES	55	
5.1.	Traba	io a futuro	56	
-				
A. Apé	ndice		57	
Referencias				
Nomen	clatura		63	

# Agradecimientos

El presente trabajo está dedicado a mis padres, Hugo Nava Jurado y Gabriela I. Palomares García, quienes con su trabajo, esfuerzo y cariño, me enseñaron a seguir adelante. A mi hermano Hugo Nava Palomares y su familia, que siempre ha estado ahí para escucharme y darme consejos. A la familia Meneses Plascencia, que me apoyó en todo a mi llegada a la ciudad de León, Guanajuato.

Agradezco al Grupo de Propiedades Ópticas de la Materia (GPOM), por brindarme su apoyo durante mis estudios de Maestría. Agradecimientos especiales al Dr. Marco Antonio Meneses y Dr. Oració C. Barbosa, por sus valiosos consejos; a Mirna D. Barreiro, Dr. Enrique Perez y Alvaro D. Romero, quienes hicieron las celdas orgánicas analizadas en este trabajo.

Por último, agradezco a mis compañeros y amigos de generación, tanto de la Maestría como del Doctorado en Ciencias (Óptica), con los que he logrado hacer una gran amistad, apoyándonos y aconsejándonos desde un principio.

Agradezco especialmente a Marlen, Jorge y Cesar, quienes me han hecho más agradable mi estancia en León, Guanajuato.

"El ser humano se puede equivocar una y mil veces, siempre y cuando sea sincero" Mario Vázquez Reyna.

# Resumen

Actualmente toda sociedad tiene claro que el tener energía implica una mejora en el nivel de vida. Al mismo tiempo, el deterioro del medio ambiente por el uso de combustibles fósiles y el hecho de que es una fuente de energía no renovable, ha causado que la implementación de fuentes de energías renovables y limpias haya aumentado. La energía solar basada en el efecto fotovoltaico es una alternativa que ha tomado cada vez más fuerza en las últimas décadas. Desde sus inicios se ha caracterizado por el uso de materiales inorgánicos principalmente el Silicio, sin embargo, una alternativa factible es el uso de polímeros para la producción de energía eléctrica utilizando luz solar.

La caracterización de celdas solares y otras tecnologías emergentes basadas en semiconductores orgánicos es de suma importancia, tanto para el área comercial como para el área de investigación, y tiene como finalidad determinar su desempeño. El empleo de distintas técnicas para su caracterización, completa su análisis y brinda la oportunidad de estudiarlas de manera rápida y confiable, sin necesidad de medir su eficiencia. Aquí la técnica de Corriente Inducida por Haz de Luz (LBIC, por sus siglas en inglés), es implementada como un método complementario para el análisis, caracterización y como una prueba no destructiva y rápida para el monitoreo del tiempo de degradación de celdas solares orgánicas. Las celdas empleadas son producidas en el Grupo de Propiedades Ópticas de la Materia (GPOM) en donde recientemente se han logrado fabricar celdas orgánicas con eficiencias superior al 6%. Cabe resaltar que la técnica LBIC, no se limita a este tipo de celdas solares, ya que ha sido ampliamente usada en celdas solares inorgánicas, debido a que la técnica fue diseñada para la caracterización de semiconductores.

La técnica LBIC, consiste en excitar con un haz láser pequeñas áreas de una celda solar para producir su correspondiente corriente eléctrica o voltaje (efecto fotovoltaico). Con las corrientes o voltajes obtenidos por cada área, es generado un mapa de corrientes/voltajes del área total de la celda solar, con el se puede hacer un análisis cualitativo a nivel macroscópico de las celdas.

Empleando la técnica LBIC, con dos láseres de 375 nm y 543 nm, se obtuvieron distintos mapas de voltajes de celdas solares orgánicas, con los que se pudo determinar algunos defectos que a simple vista eran imperceptibles, o bien difíciles de definir. También con esta técnica espectroscópica se pudo determinar la degradación de una celda solar orgánica, mediante la disminución de la intensidad en los mapas de voltaje generados

en diferentes días después de la elaboración de la misma. Con las pruebas realizadas se pudo concluir que el uso de láser sobre la celda orgánica no le causa daño alguno, por lo que esta prueba es no destructiva. En realidad, la degradación de las celdas se debe principalmente a efectos de oxidación, de humedad y otros mecanismos, por lo que se debe de buscar la manera de encapsularlas para incrementar el tiempo de vida. Por otro lado la técnica LBIC permite realizar un análisis espectral selectivo, ya que se pueden emplear distintas longitudes de onda láser para observar la respuesta fotovoltaica de la celda y encontrar defectos no observables a otra longitud de onda.

# Objetivo

En el presente trabajo se propone la implementación de la técnica de Inducción de Corriente con haz Láser (LBIC) para la caracterización de celdas solares orgánicas, como una herramienta adicional para la evaluación y análisis de manera rápida y confiable. Con la técnica LBIC se obtendrán mapas de voltajes con los que se analizará el área activa de la celda solar de forma local.

# 1. Introducción

Los estudios realizados en las últimas décadas, han revelado que los gases emitidos al emplear combustibles fósiles son los causantes del efecto invernadero, principal responsable del calentamiento global. Este factor, y la creciente preocupación de una eminente reducción de las reservas de petroleo, han hecho que el interés por mejorar los sistemas de energías renovables, tanto en su eficiencia como en su costo, sean de los principales temas de investigación.

En México, el 67.3 % del CO<sub>2</sub> emitido proviene de la generación de energía eléctrica, posicionándolo como el país Latino Americano que emite más gases de efecto invernadero [1]. Por tal motivo, es importante aumentar el uso de energías renovables, como lo son: la energía hidráulica, biomasa, energía eólica, energía geotérmica, energía marina, energía solar térmica y energía solar. Estas dos últimas, tienen una gran ventaja dentro del territorio mexicano ya que, por su ubicación geográfica, recibe una radiación promedio de 5kWh/m<sup>2</sup>, con dicha energía es posible mantener un foco de 100 Watts prendido por cinco horas, empleando sistemas con eficiencia del 10 % [2]. Por dichas razones, México es atractivo para el desarrollo, fabricación y empleo de sistemas de energía solar, en específico, celdas solares, con el fin de remplazar los sistemas empleados para la generación de energía eléctrica.

Las celdas solares más empleadas en el mercado son las celdas solares inorgánicas, las cuales fueron utilizadas por primera vez en la industria espacial a medidos de los años 50's, como fuentes de energía para satélites. Debido a que a la industria espacial no le importaba el costo de elaboración, sino más bien una alimentación continua y segura de los dispositivos necesarios en un satélite, la relación entre costo y producción de energía eléctrica no era nada atractiva para el mercado en esa época, sin embargo, el gran potencial para ser una fuente de energía renovable fue lo que impulsó a que se mejorara el proceso de manufacturación y se hicieran más investigación en distintos materiales, lográndose una significativa reducción del costo de producción. Actualmente el uso de celdas solares inorgánicas en dispositivos pequeños ha sido mas común y su empleo en dispositivos más grandes ha ido en aumento en las últimas décadas. A pesar de ello, el empleo de equipos costosos y el alto grado de dificultad para su elaboración, siguen siendo de los principales factores para que no se pueda reducir aun más el costo de producción y por consecuencia ampliar sus aplicaciones.

Las celdas hechas a partir de materiales orgánicos, son las que han llamado la atención de la comunidad científica, ya que, al contrario de las celdas solares inorgánicas, no

es necesario el empleo de equipos costosos para su manufacturación. Por otro lado, gracias a sus propiedades ópticas y eléctricas, es posible hacer celdas solares delgadas y flexibles, ofreciendo nuevas oportunidades de aplicaciones tecnológicas. Por dichas razones, las celdas solares orgánicas prometen ser la mejor opción para lograr reducir aun más los costos de manufacturación y ampliar sus aplicaciones.

Puesto que las celdas solares inorgánicas y orgánicas trabajan bajo el mismo principio, su desempeño se determina de la misma forma. La técnica tradicional empleada para medirlo es mediante la curva densidad de corriente (J) contra voltaje (V), con ella se determinan los parámetros necesarios para calcular la eficiencia de la celda solar. Otras técnicas empleadas -que no miden la eficiencia pero si dan una visión general del funcionamiento de la celda- son las técnicas de mapeo; dichas técnicas consisten en hacer un mapa de corrientes/voltajes generado a partir de la excitación de pequeñas áreas de la celda solar empleando un haz de electrones, luz solar o un haz de luz láser. Con la información obtenida, se genera una imagen del área mapeada de la celda, con ella es posible visualizar la uniformidad de la corriente o voltaje entregado por la celda solar. Estas técnicas se han implementado y empleado principalmente para celdas solares con material inorgánico, a continuación se proporciona sus principales características:

- 1. Inducción de corriente por un haz de electrones (EBIC, por sus siglas en inglés), emplea un haz de electrones para excitar una área -del orden de nm- de la celda solar, empleando un microscopio de barrido electrónico (SEM). Ésta técnica es empleada para hacer un mapeo de zonas seleccionadas previamente de la celda solar y no para toda la celda.
- 2. Inducción de corriente con un haz de luz solar (S-LBIC), en ésta técnica la luz de excitación es la solar. La luz solar se hace pasar por un objetivo de microscopio con el objetivo de poder excitar áreas -del orden de  $\mu$ m- de la celda solar, de esta forma se pueden lograr mapas de fotocorriente empleando todo el espectro solar.
- 3. Inducción de corriente con un haz láser (LBIC), es muy parecida a la S-LBIC, la diferencia se encuentra en el tipo de luz empleada. En esta técnica se ocupan láseres a distintas longitudes de onda permitiendo hacer mapas de corriente para distintas longitudes de onda.

El hecho de que durante la manufacturación de una celda solar se puedan generar imperfecciones no visibles para el ojo humano, hace que la implementación de este tipo de técnicas sea importante, ya que con ellas es posible determinar defectos que son desapercibidos a simple vista. Estas imperfecciones pueden afectar o beneficiar al desempeño de la celda [3], por lo que el uso de una de estas técnicas ayuda a tener una rápida caracterización de las celdas solares, o bien de semiconductores.

En el presente trabajo se implementa la técnica LBIC para el análisis de celdas solares orgánicas, en el Capítulo 2, se explica el funcionamiento de las celdas solares inorgáni-

cas y orgánicas, así como los conceptos básicos para su caracterización. El Capítulo 3 se describe la técnica LBIC y en el Capítulo 4, se muestra el arreglo experimental y los resultados obtenidos al emplear la técnica LBIC en celdas solares orgánicas.

# 2. Celdas Solares

El principio fundamental que gobierna el funcionamiento de una celada solar es el efecto fotovoltaico, este efecto fue visto por primera vez por Edmund Bequerel en 1839. Treinta y cuatro años después, en 1873, Willoughby Smith encontró que el selenio mostraba foto-conductividad. Posteriormente en 1876 William Adams y Richard Day observaron que se podía producir foto-corriente en una muestra de selenio cuando se le instalaban dos electrodos de platino, con ello demostraron que un material sólido puede generar energía eléctrica cuando es iluminada sin la necesidad de usar otro dispositivo. En 1894, la primer celda solar fue desarrollada por Charles Fritts con una eficiencia de al rededor del 1%.

A finales de los años 50's e inicios de los 60's, la eficiencia de celdas solares inorgánicas pasó del 4% al 14%, este incremento en la eficiencia se debió gracias a los esfuerzos hechos por los científicos de los laboratorios Bell Telephone y Hoffman Electronics, dicho desarrollo fue impulsado por la industria espacial, la cual no le importaba el costo de la celda sino que fueran una fuente de energía confiable y continua para los satélites. No obstante, en la misma década el Dr. Elliot Berman comenzó a estudiar las celdas solares orgánicas y a mejorar el proceso de manufacturación de las inorgánicas, con el fin de reducir los costos y lograr que en el futuro fueran de las principales fuentes de energía.

No fue hasta el año de 1986 cuando Ching W. Tang publica su trabajo *Two layer* organic photovoltaic cell [4], en donde reporta una celda solar con dos láminas de distintos materiales orgánicos con una eficiencia del 1%. En este mismo trabajo, se hace mención de las ventajas de emplear dos láminas de material orgánico en vez de uno y sobre la dependencia de la función de trabajo en los electrodos. En la actualidad, las celdas solares de mayor éxito y desempeño se hacen no con dos capas sino con una mezcla de dos compuestos, un polímero y un fulereno, conocida como BHJ (bulk heterojunction), y con ella se han logrado eficiencias cercanas al 10%, sin embargo, las celdas solares inorgánicas aun son las que mayor eficiencia tienen, de alrededor del 24%. Pero debido a que las celdas solares orgánicas muestran ser más económicas en su proceso de manufacturación y por tener un coeficiente de excitación -que se correlaciona con la absorción - prometen cumplir con los requisitos buscados desde hace décadas, es decir, bajo costo con una aceptable eficiencia.

En el presente capítulo se describirán el funcionamiento y arquitectura de las celdas solares inorgánicas y orgánicas, con el fin de identificar sus principales diferencias,

asimismo, los conceptos básicos para su caracterización son introducidos.

## 2.1. Conceptos básicos de celdas solares inorgánicas y orgánicas

Una celda solar es un dispositivo por medio del cual se puede obtener energía eléctrica de manera directa, y por sus características, es modelada como un generador de corriente. Como se mencionó anteriormente, el principio que gobierna el funcionamiento de una celda solar es el efecto fotovoltaico, sin embargo, la principal diferencia entre las celdas inorgánicas y orgánicas radica en que en la celdas orgánicas, ante la incidencia de un fotón se genera un excitón el cual consiste en un par hueco-electrón que se encuentran ligados con una energía relativamente alta que va de 0.3 hasta 1 eV. En el caso de una celda inorgánica también se genera un excitón, pero en este caso la energía de amarre entre hueco-electrón es de pocos meV. Esto es, para fines prácticos en una celda inorgánica es más fácil generar cargas libres que en el caso de una celda orgánica. Con el fin de tener claro los procesos involucrados en la obtención de electrones y huecos libres, en celdas solares inorgánicas y orgánicas, en la presente sección se explicarán cada uno de ellos por separado.

### 2.1.1. Celda solar inorgánica

Las celdas solares inorgánicas (CSI) están constituidas principalmente por materiales del tipo **N** (banda de valencia), los cuales conducen muy bien electrones, y tipo **P** (banda de conductividad) que conducen cargas positivas o huecos. Por ejemplo, al dopar un material **P** con fósforo se forma lo que se le conoce como una unión **P-N** en la interfase, dando lugar a una lámina de dos regiones, una del tipo **P** y la otra del tipo **N**. Cuando la celda es iluminada, el material absorbe fotones, cada fotón produce un electrón libre en la banda de conducción (BC) dejando huecos libres en la banda de valencia (BV). Los electrones y huecos generados a partir de la iluminación del material fotosensible, son colectados por electrodos para que estos puedan producir trabajo en un circuito externo, Fig. 2.1. La diferencia entre los niveles de energía, banda de conducción y banda de valencia, determinan el máximo voltaje de circuito abierto  $V_{OC}$  [5, 6, 7]

El funcionamiento de una celda solar inorgánica puede ser dividida en 3 pasos:

- 1. Absorción de fotones por la celda solar.
- 2. Generación de electrones y huecos libres. En este paso se da la termalización de ellos en las banda de conducción y de valencia respectivamente.

3. Los electrones y huecos libres son llevados a la unión **P-N** para ser colectados por los electrodos, que se encuentran en los materiales **N** y **P**.



**Figura 2.1.:** Niveles energía en una celda solar inorgánica.1) Absorción de fotones, 2) Generación par electrón-hueco y 3) difusión de electrones y huecos generados.

### 2.1.2. Celda solar orgánica

En el caso de celdas solares orgánicas (CSO), la generación de electrones y huecos libres no es de forma directa. Cuando una celda solar orgánica es iluminada lo que es generado son excitones. Un excitón está formado por un electrón y un hueco altamente ligados [8], por lo que para poder obtener un electrón y un hueco libre, es necesario que este sea disociado antes de que decaiga al estado base. Para lograr la disociación, la celda solar orgánica debe de estar conformada por dos materiales semiconductores, uno con características electro-donantes  $(\mathbf{D})$ , los cuales tienen bajo potencial de ionización, y el otro con características electro-aceptoras  $(\mathbf{A})$ , estos tienen alta afinidad electrónica. Por otro lado, para describir el funcionamiento de las celdas solares orgánicas se emplean los niveles energéticos **HOMO** (*Highest Occupied Molecular Orbital*) y **LUMO** (*Lowest* Unoccupied Molecular Orbital), las cuales son análogas a las bandas de valencia y de conducción de su homólogo inorgánico. Los materiales **D**, tienen alta energía **HOMO** y los A, tienen baja energía LUMO. La disociación se lleva acabo en la interfase heterounión D/A. Una vez disociados los excitones, los electrones y huecos libres son transportados a través de los dominios de los materiales A y D respectivamente, para luego ser recolectados por los electrodos, Fig. 2.2. Otra diferencia entre celdas

inorgánicas y orgánicas está en que para las últimas existen un gap óptico y un gap eléctrico; el primero esta definido por la diferencia de energía entre los niveles **HOMO-LUMO** del compuesto **D** y el eléctrico es la diferencia de energía entre el **LUMO-HOMO** del compuesto **A** y **D** respectivamente el cual determinan el máximo  $V_{OC}$ [7, 9, 8].

El funcionamiento de una celda solar orgánica puede ser dividido en 4 pasos:

- 1. Iluminación de la celda solar, al igual que su contra parte inorgánica se da la absorción de fotones.
- 2. Generación de excitones.
- 3. Difusión de excitones en el material activo.
- 4. Separación de excitones en la interfase D/A.
- 5. Colección de cargas libres en los electrodos.



**Figura 2.2.:** Niveles de energía celda solar orgánica.1) Absorción de fotones, 2) Formación de excitones, 3) Difusión de excitones y 4) disociación de excitón y formación del par electrón-hueco.

## 2.2. Caracterización de celdas solares

Debido a que las celdas solares inorgánicas y las orgánicas tienen un funcionamiento similar, se caracterizan de la misma manera. La forma en que una celda solar es caracterizada es mediante la curva J - V (densidad de corriente & voltaje), Fig. 2.3, de

donde se determinan los siguientes parámetros:

- 1. Densidad de corriente de corto circuito  $J_{SC}$ .
- 2. Voltaje de circuito abierto  $V_{OC}$ .
- 3. Densidad de potencia  $P_m$ .
- 4. Factor de llenado  ${\cal F}{\cal F}$  .
- 5. Eficiencia de conversión de potencia  $\eta$  .



**Figura 2.3.:** Curva densidad de corriente contra voltaje y densidad de corriente contra potencia, en ellas se pueden identificar los parámetros necesarios para determinar la eficiencia de una celda solar.  $J_m$ ,  $V_m$  y  $P_m$  son los valores de densidad de corriente máxima, voltaje máximo y potencia máxima, respectivamente.

La curva J - V se debe de adquirir en condiciones estándar, ya que se ha observado que el espectro de la radiación solar en la superficie de la tierra es influenciada por factores tales como: variación de la temperatura sobre el disco solar, la atmósfera, la reflexión sobre la superficie de la tierra, etc. La Sociedad Estadounidense de pruebas y materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) ha establecido que la distribución espectral estándar solar para medir el desempeño de una celda es la AM1.5, también conocida como global o estándar total.

La AM1.5 esta definida para celdas solares que se encuentran inclinadas a  $37^{\circ}$  con respecto a la superficie en donde se encuentran. Las iniciales AM son las siglas en ingles de masa de aire, que es la masa de aire que hay entre la superficie de la celda y el sol, la cual afecta a la distribución espectral y la intensidad de la luz solar. El número AMx, indica la longitud del camino óptico de los rayos solares a través de la atmósfera, la cual está definida como

$$x = \frac{1}{\cos \theta_z},\tag{2.1}$$

donde  $\theta_z$  es el ángulo del sol con respecto al cenit, Fig. 2.4. Para x grandes se tiene un



Figura 2.4.: Forma estándar de medir el desempeño de celdas solares.

camino óptico grande dando lugar a una mayor desviación y absorción de la luz solar. En el caso de la AM1.5 el ángulo con respecto al cenit es  $\theta_z = 48.19^{\circ}$ . Por otro lado, la irradiación del sol sobre la tierra tiene que ser tomada en cuenta, en la superficie de la tierra la irradiación solar es aproximadamente de 1kW/m<sup>2</sup>. Tomando en cuenta los factores anteriores, el desempeño de una celda solar es medido a una irradiación de 1000W/m<sup>2</sup> con una distribución espectral de AM1.5 a una temperatura de 25°C, los cuales son considerados como las condiciones estándar o ideales de laboratorio.

### 2.2.1. Densidad de corriente de corto circuito J<sub>SC</sub>

La corriente generada por la celda solar, se le conoce como la corriente de corto circuito  $I_{SC}$ . Debido a que la corriente es proporcional al área iluminada, la cantidad que se emplea para caracterizar la celda solar es la densidad de corriente J, definida como

$$J_{SC} = \frac{I_{SC}}{A},\tag{2.2}$$

donde A es el área sensible de la ceda solar.  $J_{SC}$  se puede relacionar con el espectro incidente mediante la eficiencia cuántica (QE) con la ecuación

$$J_{SC} = q \int b_s(E) QE(E) dE, \qquad (2.3)$$

donde QE(E) es la probabilidad que un fotón incidente de energía E puede entregar un electrón al circuito externo,  $b_s(E)$  es el flujo de fotones incidente, que es el número de fotones en el rango de E a E + dE que inciden por unidad de área en unidad de tiempo y q es la carga del electrón.

### **2.2.2.** Voltaje de circuito abierto V<sub>OC</sub>

Cuando una carga es conectada a una celda solar, un diferencial de potencial (voltaje) es generado en las terminales de la celda, que a su vez genera una corriente en dirección opuesta a la foto corriente, denominada corriente oscura debido a que su comportamiento es muy parecido al de la corriente que pasa por un diodo cuando se le aplica un voltaje V. El comportamiento de un diodo ideal, en términos de densidad de corriente, puede ser descrito como

$$J_{oscura}(V) = J_0 \left( e^{qV/k_B T} - 1 \right)$$

$$\tag{2.4}$$

donde  $J_0$  es una constante y se define como la densidad de corriente de saturación inversa,  $k_B$  es la constante de Boltzmann y T es la temperatura en grados kelvin . Tomando en cuenta que estos dos fenómenos se presentan en la celda solar al mismo tiempo (la foto corriente y la corriente oscura), la corriente entregada por la celda viene dada de la siguiente manera

$$J(V) = J_{oscura}(V) - J_{SC}, \qquad (2.5)$$

que al emplear la Ec. 2.4 se llega a

$$J(V) = J_0 \left( e^{qV/k_B T} - 1 \right) - J_{SC}.$$
(2.6)

Cuando las terminales están totalmente aisladas, es decir, como si fuera una resistencia de carga infinita, el voltaje alcanza su máximo valor, conocido como voltaje de circuito abierto  $V_{OC}$ . Esto sucede cuando la densidad de corriente entregada por la celda es igual a cero, por lo tanto de la Ec. 2.6 se obtiene

$$V_{OC} = \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{J_{SC}}{J_0} + 1 \right). \tag{2.7}$$

### **2.2.3.** Densidad de potencia *P*

Una celda solar entrega potencia para realizar un trabajo entre 0 a  $V_{OC}$ , al que se le denomina régimen de operación de una celda solar. La densidad de potencia de una

celda solar se calcula con

$$P = JV. (2.8)$$

Al graficar la densidad de potencia contra el voltaje, Fig. 2.3, se puede encontrar la densidad de potencia máxima  $P_m$ 

$$P_m = J_m V_m \tag{2.9}$$

donde  $J_m$  es la densidad de corriente máxima y  $V_m$  el voltaje máximo en el que la celda solar tiene su máxima potencia de operación.

### **2.2.4.** Factor de llenado FF y eficiencia $\eta$

Una vez definidos la  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$  y  $P_m$  es posible calcular el factor de llenado FF y la eficiencia  $\eta$ . FF es definido como

$$FF = \frac{J_m V_m}{J_{SC} V_{OC}},\tag{2.10}$$

y es el que describe la cuadratura de la curva J-V, la Fig. 2.3 muestra los puntos de  $V_{OC},\,J_{SC}$  y  $P_m$ . Al evaluar el desempeño de una celda solar, se desea obtener un valor de  $FF\approx 1$ .

La eficiencia de una celda solar es la razón entre la  $P_m$  y la densidad de potencia de luz incidente  $P_i$ , es decir,

$$\eta = \frac{J_m V_m}{P_i}.$$
(2.11)

De la Ec. 2.10 se puede llegar a que

$$\eta = \frac{FFJ_{SC}V_{OC}}{P_i}.$$
(2.12)

La Ec. 2.12 nos da el desempeño global de una celda solar, y con él, se puede decir si una celda tiene un buen aprovechamiento de la luz incidente.

# 3. Técnica LBIC

Las técnicas de escaneo han sido empleadas para la caracterización y estudio de semiconductores y celdas solares desde finales de los años 70's [3]. Estas consisten en excitar pequeñas áreas del semiconductor o celda solar, empleando haz de electrones o de luz, para generar la corriente/voltaje eléctrico de dicha área. Algunas de las técnicas de mapeo encontradas en la literatura son: análisis diodomesa de celdas solares [10](MASC, por sus siglas en inglés), análisis de la resistencia por mapeo de un potencial [11] (RAMP, por sus siglas en inglés), inducción de corriente por haz de electrones [12](EBIC, por sus siglas en inglés), inducción de corriente por haz de luz [13] (LBIC, por sus siglas en inglés) y sus variantes, entre otras. Estas pueden ser subdividas por: técnicas destructivas y no destructivas [14, 15].

### Técnicas destructivas

Entre las técnicas destructivas se encuentra la MASC, la cual consiste en adquirir el voltaje de circuito abierto y el factor de llenado, de una pequeña área de la celda solar, dichas áreas son grabadas en la superficie frontal de la celda solar empleando técnicas de grabado químico que consiste en esparcir químicos sobre la superficie que se desea grabar con el fin de eliminar el materia que no es parte del grabado, en las celdas solares inorgánicas se desea tener un grabado con profundidades suficientes para llegar a la unión **P-N** [16]. La otra técnica que se encuentra dentro de las técnicas destructivas es la RAMP, esta consiste en medir el potencial entre la parte trasera de la celda solar y su superficie empleando una sonda (electrodo) de tungsteno. La sonda de tungsteno penetra la capa aislada anti reflectora, rayando la superficie de la celda solar durante el mapeo [15].

#### Técnicas no destructivas

Dentro de las técnicas no destructivas se encuentra la técnica EBIC, que consiste en inducir una corriente eléctrica empleando un haz de electrones, con esta técnica se pueden detectar defectos como lo son: granos de frontera y deslocalización del material. Para poder hacer este análisis se emplea un SEM como fuente de haz de electrones. Un inconveniente de esta técnica es que sólo se pueden monitorear áreas del orden de nanómetros de la celda solar, sin embargo, es posible analizar la recombinación del par electrón-hueco de manera superficial y profunda [3].

A pesar de que las celdas solares orgánicas trabajan bajo el mismo principio, es decir también es un semiconductor, no se han empleado muchas de las técnicas de mapeo para su caracterización. Una técnica de mapeo empleada para su caracterización es el barrido de microscopio óptico de campo cercano (NSOM, por sus siglas en inglés), la cual mide la florescencia y la foto-corriente, con una resolución de 200 nm [17]. Otra técnica de mapeo que ha sido empleada en la caracterización de celdas solares orgánicas es el escaneo de microscopia de sonda Kelvin (SKPM, por sus siglas en inglés), que mide el voltaje de circuito abierto local con una resolución de 50-100 nm. También se ha medido la razón de foto-inducción de carga, con una resolución de 50-100 nm empleando microscopia de fuerza electrostática resuelta en el tiempo (trEFM, por sus siglas en inglés), con los datos obtenidos, es posible calcular la eficiencia cuántica local de mezclas de polifluoreno. Por otro lado, se ha usado la foto-corriente de microscopia de fuerza atómica (pcAFM, por sus siglas en inglés) para medir la distribución de la foto-corriente en mezclas fotovoltaicas orgánicas con una resolución de 20 nm [18].

La técnica LBIC, de interés en este trabajo, se encuentra dentro de las técnicas no destructivas, y a sido usada con anterioridad para la caracterización de celdas solares orgánicas [19, 20, 21, 22]. Dicha técnica tiene una diversidad de variantes. En el presente capítulo se explica en que consiste la técnica LBIC así como algunas de sus variantes.

## 3.1. La técnica LBIC y sus variantes

La técnica LBIC usa como fuente de excitación luz focalizada y ha sido utilizada para el estudio de celdas solares inorgánicas y semiconductores. En un principio la técnica el LBIC empleaba luz blanca y monocromadores como fuente de luz para la excitación de la muestra, sin embargo, con el advenimiento del láser la fuente de luz se ha ido remplazando por éste, esto ha ocasionado que la técnica también sea conocida como *inducción de corriente por haz láser*.

La idea principal de la técnica LBIC es hacer un escaneo de la superficie absorbente de la celda solar punto a punto, con un haz de luz focalizada, midiendo la corriente o voltaje inducido como función de la posición del haz incidente. Al incidir el haz de luz focalizado sobre la muestra, son generadas diferentes señales, como lo son: absorción, reflexión, transmisión y emisión de fotones y electrones, Fig. 3.1[23, 24]. La corriente inducida y detectada es la señal LBIC, es debida a la absorción, esta resulta del efecto de la separación de cargas. Las variaciones de corriente/voltaje son causadas por los campos asociados a los defectos e impurezas de la celda solar. Un aspecto fundamental que debe de ser tomado en cuenta, es de que las medidas adquiridas de corriente/voltaje con técnica LBIC son hechas en los electrodos externos de la celda y no en la posición del haz de luz, por lo que la señal LBIC es representativa del área de la celda bajo iluminación.



Figura 3.1.: Señales generadas por el haz de luz al incidir en la muestra.

La realización del escaneo puede ser hecho de dos formas: la muestra fija y el haz movible o haz fijo y la muestra movible. [14, 25]. Las corrientes o voltajes medidos, son usados para producir imágenes de corriente o voltaje del área total de la celda solar. Cuando se mide corriente la técnica es denominada *LBIC*, la corriente medida es cercana la corriente de corto circuito  $(I_{SC})$ , si tiene una resistencia lo suficientemente grande como para no permitir el flujo de electrones entonces la respuesta obtenida será la del voltaje de circuito abierto  $(V_{OC})$ , denominando al método como *LIBV*. Por otro lado, si lo que se detecta es la potencia máxima  $(P_m)$  local, el método se llama *LBIP* [26], Fig. 3.2. Otra variante de la técnica LBIC encontrada en la literatura, es la de



Figura 3.2.: Tipos de técnicas según su posición en la curva corriente-voltaje.

inducción de corriente por haz de luz solar S-LBIC [27](por sus siglas en inglés), dicha técnica trabaja bajo el mismo principio, anteriormente mencionado, con la diferencia de que usa como fuente de excitación luz solar, que de alguna forma es focalizada sobre la celda solar para inducir la corriente o voltaje del área bajo iluminación.

# 3.1.1. Ventajas y desventajas de la técnica LBIC con respecto a otras técnicas y sus variantes

De las distintas técnicas de mapeo y de las variantes de la técnica LBIC halladas, se pudieron encontrar ventajas y desventajas. En la Tab. 3.1 se muestran algunas.

Tabla 3.1.: Ventajas y desventajas de las técnicas de mapeos y las variantes de LIBC.

Técnica	Ventaja	Desventaja
MASC	Caracteriza la unión P-N.	Prueba destructiva, se debe
		de hacer grabado en la
		superficie frontal de la
		celda.
RAMP	Se encuentran pérdidas por	Prueba destructiva, raya la
	desvío de corrientes. Mapea	superficie de la celda solar
	la resistencia del contacto.	
EBIC	Mapas de corrientes de alta	Debido a su resolución sólo
	calidad del orden de	se analizan pequeñas áreas
	nanómetros, se puede hacer	de la celda solar.
	análisis de granos de	
	frontera. Prueba no	
	destructiva	
LBIC	Mapas de corrientes a	Se pierde información de
	diferentes longitudes de	detalles fuera del orden de
	onda del orden de	micrómetros.
	micrómetros. Análisis de la	
	respuesta de la celda solar	
	a diferentes longitudes de	
	onda. Barre áreas grandes	
	en tiempos razonables.	
	Prueba no destructiva.	
LBIV	Mismas ventajas que las de	22
	LBIC mostradas con	
	voltajes.	
LBIP	Mismas ventajas que las de	"
	LBIC mostradas en la	
	potencia máxima.	
S-LBIC	Mapas de corrientes	Enviar la luz solar al lugar
	empleando todo el espectro	donde se tiene el
	solar.	dispositivo S-LBIC.

En el presente trabajo se seleccionó la técnica LBIC, debido a que por sus características es posible adquirir imágenes de corriente/voltaje del área total de la celda solar, también es posible evaluar la respuesta de la celda solar a diferentes longitudes de onda, ya que se usan distintos láseres. Por otra parte, una vez montada la técnica LBIC en el laboratorio, se puede modificar el arreglo para implementar otras técnicas, como lo son: LBIV, LBIP, S-LBIC, RAMP, y con ellas poder hacer un análisis más completo de celdas solares orgánicas, como son el cálculo de la eficiencia cuántica, la dependencia de la temperatura, etc, [28, 29]. Adicionalmente, como las técnicas de mapeo empleadas para el análisis de celdas solares orgánicas son costosas debido a la instrumentación que emplean, la técnica LBIC se puede usar como punto de partida para la evaluación de su implementación y un mejor entendimiento de las mismas.

## 3.2. Aplicaciones

La técnica LBIC, ha sido empleada para detectar lo que se le conoce como frontera de grano (GB, por sus siglas en inglés), en donde se ha detectado bajas eficiencias comparadas con las que no tiene GB. El GB se identifica como zonas oscuras de baja corriente o voltaje.

Debido a que se pueden emplear diferentes longitudes de onda, es posible hacer un análisis a diferentes profundidades del material foto-sensible, esto gracias a que la profundidad de penetración del material foto-sensible depende de la longitud de onda del haz de excitación. Por otro lado, con el sistema LBIC se puede hacer un análisis de la eficiencia cuántica de la celda solar (QE, por sus siglas en inglés). La QE mide que tanto son aprovechados los fotones de la luz incidente para generar corriente eléctrica, a diferentes longitudes de onda.

## 4. Desarrollo experimental

## 4.1. Arreglo LBIC

La técnica LBIC se implementó en el laboratorio de espectroscopia y para ello se emplearon:

- 1. Dos espejos.
- 2. Un divisor de haz de 70 % transmisión y 30 % de reflexión.
- 3. Un láser de 543 nm con potencia de 0.5 mW.
- 4. Un láser de 375 nm con una potencia de 9 mW.
- 5. Cinco filtros de densidad neutra, un objetivo de microscopio de 20 X con apertura numérica de 0.40 y distancia focal de 8.55 mm.
- 6. Una plataforma con movimiento x-y-z controlada con motores a pasos y recorrido de 25 mm.
- 7. Una tarjeta de adquisición NI-6009 con razón de muestreo máximo de 48000 muestras por segundo e impedancia de 195  $\Omega$ .
- 8. Un sistema de cómputo.

La Fig. 4.1 muestra un dibujo esquemático y una fotografía de la disposición experimental. Los láseres son colocados de tal forma que sus caminos ópticos son perpendiculares entre ellos. El divisor de haz es colocado en la intersección de los haces, con el fin de que el haz reflejado de uno de los láseres sea paralelo al haz transmitido del otro, de este modo es posible obstruir uno de los haces mientras se hace el monitoreo de la celda solar orgánica con el otro. Posteriormente se hace pasar el haz láser, seleccionado para el análisis, por el objetivo de microscopio para enfocarlo sobre la muestra. El tamaño del haz focalizado del láser a la distancia focal del objetivo de microscopio es de alrededor de  $10\mu$ m para el láser de 543 nm y de 7  $\mu$ m para el láser de 375 nm.

El módulo de celdas solares es colocado a la distancia focal del objetivo de microscopio sobre la plataforma x-y-z, esta es controlada por el equipo de cómputo mediante dos programas: uno que manipula la plataforma en los ejes x-y-z para ubicar la muestra en la posición deseada y otro para el barrido del área completa de la celda solar. Con el programa para manipular la plataforma en los ejes x-y-z, se ubica el haz focalizado lo



**Figura 4.1.:** Bosquejo disposición experimental y fotografía de parte del Arreglo LBIC.

más próximo al área de la celda solar para evitar barrer áreas no deseadas. El programa de barrido hace mover la plataforma en los ejes x-y en movimientos sucesivos hasta lograr el barrido completo del área de la celda solar, al mismo tiempo, la señal de voltaje es obtenida por la tarjeta de adquisición NI-6009, que a su vez envía la información al sistema de cómputo para su almacenamiento. La tarjeta de adquisición sólo tiene la capacidad de medir voltajes, por lo que para obtener el mapa de corriente a partir del mapa de voltajes, sólo se debe de dividir por la impedancia (195k $\Omega$ ) que tiene la tarjeta de adquisición.

## 4.2. Programa de control

Para el control de la plataforma con movimiento x-y-z, se desarrollaron 2 programas en MATLAB, estos fueron englobados y manejados mediante dos interfaces gráficas de usuario (GUI, por sus siglas en inglés). Una de las interfaces fue diseñada para manipular los motores a pasos y la otra para el barrido del área total de la celda solar.

# 4.2.1. Interfaz gráfica de usuario para la manipulación de los motores a pasos

La interfaz gráfica de usuario para la manipulación de los motores a pasos esta dividida en dos secciones, en la Fig. 4.2 se muestra el diagrama por bloques de la interfaz gráfica. La primera sección manipula los motores de los ejes x-y y esta compuesta por:



Figura 4.2.: Diagrama por bloques de la interfaz gráfica para la manipulación de los motores a pasos.

cuatro botones direccionales, los cuales envían la instrucción al motor de moverse; dos visualizadores, en ellos se pueden ver la posición de los motores x y y; dos botones de paso lento (0.1 mm) y rápido (1 mm), con ellos se le indica a los motores el paso al que se desplazarán, dependiendo del botón que se encuentre activado; un botón Home, este lleva a los motores al origen y, por último, un botón Finalizar que restablece la configuración inicial de los motores a pasos, Fig. 4.3. La segunda sección está compuesta por: dos botones direccionales, visualizador de posición, dos botones indicadores del paso, un botón Home, un visualizador de Voltaje y un botón Calibrar. Cuando el botón

Calibrar es seleccionado se muestra el voltaje que se está midiendo en el visualizador de Voltaje, esto ayuda a hallar la mejor posición en donde se entregue mayor voltaje (distancia focal del objetivo de microscopio). La independencia entre los movimientos de los ejes x-y y z, es debida a que en el primer caso se ubica el haz focalizado lo mas cercano posible al área de la celda solar, mientras que en el caso del eje z, se debe ubicar la distancia focal con respecto a la plataforma en donde es colocada la celda solar orgánica ó inorgánica, por otra parte, se establece una distancia de seguridad para que no haya riesgo de que la muestra impacte con el objetivo de microscopio al estar ubicando la distancia focal.



Figura 4.3.: Interfaz con la que se manipula los motores a pasos.

### 4.2.2. Interfaz gráfica de usuario para el barrido del área total de la celda solar

La interfaz del barrido esta dividida en cuatro secciones, en la Fig. 4.4 se muestra el diagrama por bloques de la interfaz; en la primera sección se establecen los parámetros para el muestro y la posición inicial; la segunda sección muestra la imagen del muestro y el voltaje medido en tiempo real; la tercera sección se emplea para establecer la comunicación entre los motores a pasos, la tarjeta de adquisición y la computadora vía puerto USB, así como establecer el número de muestras por segundo; por último, en la cuarta sección se despliega la información del barrido, Fig. 4.5. La secuencia de programación para la adquisición de los datos se realiza en primer lugar desplazando la plataforma a una posición determinada, una vez que esta se detiene, la tarjeta de adquisición captura la señal de voltaje y la envía a la computadora. Este proceso se realiza varias veces hasta cubrir toda el área de la celda. El recorrido del barrido se realiza en forma de onda cuadrada como se ilustra en la Fig. 4.6.



Figura 4.4.: Diagrama por bloques de interfaz para el barrido de la celda solar.



Figura 4.5.: Interfaz gráfica de usuario para el muestro de la celda solar. 1) Primera sección, 2) segunda sección, 3) tercera sección y 4) cuarta sección.



Figura 4.6.: Movimiento que sigue la plataforma en los ejes x-y.

## 4.3. Preparación de muestras

Empleando la técnica LBIC se analizaron un módulo de cuatro celdas inorgánicas (C0) y dos módulos de cuatro celdas solares orgánicas (C1 y C2) de distintas geometrías. Del módulo C0 no se tiene información de la composición y arquitectura de las celdas debido a que formaba parte de una lámpara que se alimentaba con un sistema de celdas fotovoltaicas de material inorgánico, Fig. 4.7, la dimensiones de la celdas inorgánicas de este módulo son de 6 mm de ancho por 30 mm de largo. Los módulos C1 y C2



Figura 4.7.: Celda solar inorgánica comercial.

fueron fabricadas en el laboratorio de Materiales del Grupo de Propiedades Ópticas de la Materia (GPOM), en el Apéndice A se muestra la evolución de las eficiencias dentro del grupo. Las celdas solares del modulo *C1*, Fig. 4.8a, tienen geometría circular con diámetro de 2 mm, constituidas por: ITO (óxido de indio dopado con estaño), el cual hace la función de ánodo y viene depositado en el sustrato; *Capa colectora de huecos*, PEDOT:PSS (Poli-3,4 etilenodioxitiofeno : sulfonato de poliestireno), que es el material en donde los huecos tiene mayor movilidad, el cual se deposita empleando la técnica de recubrimiento por centrifugación (Spin Coating) a una velocidad angular de 5000 RPM obteniéndose una capa con espesor de 40 nm a 50 nm; PTB7(Poli [[4,8bis [(2-etilhexil) oxi] benzo [1,2-b: 4,5b '] ditiofeno-2, 6-diilo] [3-fluoro-2 - [(2-etilhexil) carbonil] tieno [3,4-b] tiofenodiilo]]):PC71BM (Ácido [6,6] fenil-C71-butírico), la razón entre el PTB7 y el PC71BM es de 1:1.5 respectivamente, y es empleado para formar la capa activa con estructura de Heterounión de Bulto (BHJ<sup>1</sup>, por sus siglas en inglés) de la celda solar, en donde se da la absorción de fotones y la generación y disociación de excitones, dicha capa es depositada por la misma técnica que la anterior pero a una velocidad de 2500 RPM obteniéndose un espesor de 100 nm; Capa colectora de electrones PFN (poli [(9.9-bis (3 '- (N, N-dimetilamino) propil) -2,7-fluoreno) -alt-2,7-(9,9-dioctylfluorene)), que es el material en donde los electrones tiene mayor movilidad, este es depositado igualmente por centrifugado a 6500 RPM obteniéndose una capa de aproximadamente 10 nm. Después de la deposición de cada una de las capas se hace un proceso de calentamiento (annealing) a 80°C para evaporar los residuos de solventes que hayan quedado. Una vez depositadas las capas que componen a las celdas solares orgánicas, es colocado el cátodo de Field's metal (aleación de bismuto, indio y estaño) a 90°C de forma manual, Fig. 4.8b.



**Figura 4.8.:** a) Modulo (C1) de celdas solares orgánicas. b) Arquitectura de las celdas solares.

Las celdas solares del módulo C2, Fig. 4.9a, tienen una geometría cuadrada de 2 mm a 3 mm por lado y están constituidos por: ITO; PEDOT:PSS; PTB7:C71BM (se emplea la misma razón que en la celda C1), estas capas son depositadas de igual forma que las celdas del modulo C1, es decir, las capas son depositadas con la misma técnica de centrifugación, haciendo el mismo proceso de calentamiento a 80°C para eliminar el

 $<sup>^{1}\</sup>mathrm{Las}$  capas activas con estructura BHJ son en las que los materiales donador y aceptor no están separadas sino mezcladas entre si, es por esto que se les llama de bulto.

solvente no deseado; sin embargo en este caso, la capa colectora de electrones es de Floruro de Litio, el cual es depositado empleando una evaporadora hasta obtener una capa de 4 nm. Por último, el cátodo de Aluminio, es depositado de igual forma que la capa colectora de electrones, hasta obtener una capa de aproximadamente 60 nm, Fig. 4.9b. En la Fig. 4.10 se muestran las estructuras químicas de los distintos compuestos empleados en la elaboración de las celdas solares orgánicas en el GPOM.



**Figura 4.9.:** a) Modulo de cuatro celdas orgánicas de cátodos de aluminio (CA). b) Arquitectura de las celdas solares.



**Figura 4.10.:** Estructuras químicas de los compuestos empleados en la elaboración de las celdas solares orgánicas.

### 4.4. Caracterización del arreglo experimental

El sistema LBIC fue caracterizado empleando celdas solares inorgánicas (C0) y orgánicas (C1 con una eficiencia de 0.77 % y C2 con eficiencia de 4 %), con la finalidad de determinar los parámetros idóneos con los que se pueden obtener mapas de voltajes que muestren la mayor información del comportamiento de la celda solar. La celda inorgánica sirvió de referencia para la caracterización del sistema, ya que la técnica LBIC ha sido ampliamente empleada para su análisis. Los parámetros caracterizados son: *distancia de muestreo*, muestreo, tiempo de muestreo, así como la potencia ideal para obtener un mapa bien definido.

### 4.4.1. Distancia de Muestreo

En este trabajo definimos como *distancia de muestreo* a la distancia entre dos puntos de medición consecutivos, donde la distancia mínima esta dada por el diámetro del haz láser que incide sobre la celda y un pixel como a cada uno de estos puntos. En la Fig. 4.11 se presentan distintos mapas de voltaje de dos celdas solares inorgánicas pertenecientes al módulo C0, a diferentes *distancias de muestreo*. El color rojo indica zonas que entregan una señal de alto voltaje, el amarillo de mediano voltaje y el azul de voltaje bajo o nulo.

Es evidente que mientras se tiene una distancia de muestreo del mismo orden de magnitud que el de la celda solar (del orden micrómetros), el mapa de voltajes entrega escasa información, es decir, no es posible apreciar ningún detalle de las celdas solares, como lo son: las fronteras con los electrodos y el área de las celdas, Fig. 4.11a. Cuando la distancia de muestreo se encuentra en el orden de  $\mu$ m, es posible apreciar mayor detalle de la celda solar, en el caso de una distancia de muestreo de 250  $\mu$ m, Fig. 4.11b, se puede observar como el área de las celdas solares comienzan a definirse más, sin embargo, dicha distancia de muestreo no es suficiente como para poder mostrar el área de las celdas bien definida. En la Fig. 4.11c, se muestra el mapa de voltajes una distancia de muestreo de 10  $\mu$ m, en esta las áreas de las dos celdas solares se ven bien definidas, los pixeles de color verde-azul, es la zona en donde se encuentran los electrodos.



Figura 4.11.: Generación de mapas de voltaje a distintas distancias de muestreo. a) Distancia de muestreo a 1 mm, b) Distancia de muestreo a 250 μm, c) Distancia de muestreo a 10 μm y d) fotografía del módulo C0 en donde se muestran las celdas que fueron mapeadas y los contactos.

# 4.4.2. Tiempo de barrido por distancia punto a punto y número de pixeles

El tiempo de barrido es el tiempo que tarda en adquirirse el mapa LBIC del área que se desea analizar el cual depende de la *distancia de muestreo*. Se hicieron barridos de dos de las celdas solares del módulo C0 con el fin de determinar el mejor tiempo de adquisición del mapa de voltajes con la mayor información posible. Los barridos fueron hechos a diferentes *distancias de muestreo*. En la Fig. 4.12a se muestra que el tiempo de barrido aumenta conforme se disminuye la *distancia de muestreo*. Este comportamiento es debido a que cuando se reduce la *distancia de muestreo* se aumenta el número de pixeles, Fig. 4.12b. Ambas gráficas son logarítmicas en el eje y para poder

apreciar de mejor manera el comportamiento.



**Figura 4.12.:** Barrido hecho a diferentes *distancia de muestreo*. a) Comportamiento de la *distancia de muestreo* con respecto al tiempo. b) Comportamiento del número de pixeles con respecto a la *distancia de muestreo*.

### 4.4.3. Tiempo de integración

La calidad del mapa de voltaje se mejora al aumentar el tiempo de integración. Este consiste en sumar los voltajes obtenidos de cada muestra tomada por milisegundo. Para ver el efecto del tiempo de integración en la obtención de los mapas de voltajes, se empleó una celda solar orgánica del módulo C1. La Fig. 4.13, muestra como la calidad de la imagen es mejorada al aumentar el tiempo de integración. En la Fig. 4.13a de tiempo de integración de 0.2 ms, se puede observa que el área de la celda solar no se encuentra definida, mientras que la Fig. 4.13b la cual corresponde a un tiempo de integración de 2 ms, es posible identificar el límite de la celda solar. Los pixeles de colores distintos de amarillo y cian, es señal de ruido, que puede ser debido a que en dichas áreas la celda esta altamente degradada.



**Figura 4.13.:** Efecto del tiempo de integración en el mapa LBIC en cedas orgánicas. Tiempo de integración de a) 0.2 ms y b) 2ms. Los mapas fueron adquiridos empleando la misma celda solar orgánica.

### 4.4.4. Potencia del láser

La densidad de corriente  $J_{SC}$  es directamente proporcional al flujo luminoso por unidad de área, Ec. 2.3, por lo tanto, la respuesta de la celda solar es diferente a distintas potencias. Para observar dicha diferencia se empleó una celda solar orgánica del módulo C1 que no entregaba voltaje al ser iluminada por luz blanca, 3 filtros de densidad neutra y el láser a 375 nm. Los filtros de densidad neutra reducen la potencia de 7 mW (176 MW/m<sup>2</sup>) a 5 mW (88 MW/m<sup>2</sup>), 3 (53 MW/m<sup>2</sup>)mW y 0.5 mW (8 MW/m<sup>2</sup>). Ya que la celda solar no entregaba voltaje al ser iluminada con luz blanca, se esperaba que no entregara voltaje al iluminarse con cualquiera de los láseres y por consiguiente señal LBIC.

Al emplear el láser de 375 nm a 7 mW se logró generar señal LBIC obteniéndose mapa voltajes del área sensible de la celda solar. Al ir disminuyendo la potencia del láser de 375 nm, el mapa de voltajes del área sensible fue reduciendo su tamaño, Fig. 4.14. En la imagen, Fig. 4.14d, no es posible apreciar el área sensible de la celda solar ya que el flujo de electrones generado por el haz láser a la potencia de 0.5 mW no es capaz de general señal LBIC. Este fenómeno, de cambio aparente del área sensible en el mapa LBIC, puede ser debido al esparcimiento de luz generado por defectos o los bordes de la celda y/o por la difusión de electrones [15], generando señal de voltaje en zonas en donde el haz láser no está incidiendo, este fenómeno se observó durante la adquisición de los mapas de voltajes, ya que se entregaba señal LBIC a pesar de que no se estuviera incidiendo el haz láser en el área de la celda solar. Esto sugiere

que a 7 mW, se obtienen mapas LBIC que no son representativos de la celda solar. Por dicha razón la potencia del láser de 375 nm es reducida a 0.5 mW. De este punto en adelante la potencia empleada en el láser de 375 nm es de 0.5 mW. El láser de 543 nm no se sometió a éste análisis ya que su potencia es de 0.5 mW. Al barrer la celda solar con el láser de 543 nm, no se pudo obtener mapa de voltajes debido a que la potencia de 0.5 mW no fue suficiente para generar señal LBIC. Esto entra en concordancia con la hipótesis de que no se obtendría señal LBIC al emplear cualquiera de los dos láseres.



**Figura 4.14.:** Respuesta celda solar orgánica barrida con el láser de 375 nm a diferentes potencias, a) 7 mW, b) 5 mW, c) 3 mW y d) 0.5 mW. La Fig. 4.14a muestra un área sensible mayor comparado con las Fig. 4.14b, 4.14c y 4.14d, esto puede ser debido a la difusión electrones y/o fenómeno de esparcimiento.

#### 4.4.4.1. Efecto de longitud de onda del láser en la celda solar

Se analizó el efecto que se obtiene al cambiar la longitud de onda del haz láser de excitación. Para la realización de esta caracterización se empleó una celda solar orgánica del módulo C2. Los mapas de voltajes obtenidos al variar la longitud de onda mostraron notables diferencias, esto corresponde a que los materiales foto-sensibles tienen una dependencia con la longitud de onda, es decir, su respuesta es diferente al variar la longitud de onda. La Fig. 4.15a, muestra mayores áreas de alto voltaje a 543 nm, debido a que las celdas solares están diseñadas para tener una mejor respuesta fotovoltaica en el espectro visible (450 nm a 780 nm), por otro lado, el área de alto voltaje podría corresponder la superficie inferior del material fotosensible, ya que la mezcla PTB7:C71BM tiene menor absorción a 543 nm, es decir se tiene mayor penetración a dicha longitud de onda. Para el láser de 375 nm, Fig. 4.15b, se observa un mapa con menores áreas de altos voltajes de la celda solar, esto es debido a que en dicha longitud de onda el PTB7:C71BM tiene menor generación de electrones y huecos libres, por otra parte, el mapa de voltajes obtenido podría corresponde a la superficie superior del material foto sensible, ya que tiene mayor absorción a dicha longitud de onda, es decir, tiene menor profundidad de penetración. La Fig. 4.16 muestra el espectro de absorción del PTB7:C71BM.



Figura 4.15.: Diferencia en el mapa LBIC al cambiar la longitud de onda de excitación, a) 543 nm y b) 375 nm.

Al comparar ambas imágenes de la Fig. 4.15, se puede apreciar que las áreas de voltajes que muestran mayor uniformidad a 543 nm son las mismas áreas en donde se entrega una mejor señal LBIC a 375 nm, sugiriendo una deposición no uniforme del material foto-sensible (PTB7:C71BM) o del contacto de Aluminio.

En celdas solares inorgánicas se ha logrado concluir que al variar la longitud de onda



**Figura 4.16.:** Espectro de PTB7:C71BM, tomado en el Laboratorio de Materiales, se observa mayor absorción a 375 nm que a 543 nm. El espectro fue adquirido en película.

se puede hacer un análisis a distintas profundides del material foto sensible, ya que la longitud de penetración varía con la longitud de onda, con esto se han podido mostrando defectos a distintos fondos [25, 26, 30, 31], cabe resaltar que el espesor de la capa sensible en las celdas solares inorgánicas es del orden de micrómetros. En el caso de las celdas solares orgánicas el espesor de la capa sensible es del orden de nanómetros, por lo que no queda claro si los voltajes obtenidos corresponden a diferentes profundidades. Para concluir que los mapas de voltajes es la señal LBIC a diferentes profundidades, es necesario hacer más estudios en esta dirección.

## 4.5. Resultados

Una vez caracterizado el sistema, se muestrearon celdas orgánicas del tipo C1 y C2. Ya que de las celdas del tipo C1 son circulares y las del tipo C2 son rectangulares, los parámetros para el tamaño de la celda en los ejes x y y así como la resolución se modificaron para cada tipo de celda solar. Los parámetros del diámetro del haz, tiempo de integración, promedio y razón de muestreo se conservaron, en ambas muestras.

# 4.5.1. Celdas orgánicas C1 (ITO; PEDOT:PSS; PTB7:C71BM; PFN y Field's metal)

Las eficiencias de las celdas orgánicas que componen el módulo, fueron calculadas. El diámetro de las celdas solares del tipo C1 es de 2 mm. La celda con mayor eficiencia

fue monitoreada por un periodo 15 días, en dicho periodo, se midieron las curvas J-V y se adquirieron sus respectivos mapas de voltajes. El láser empleado para los barridos fue el de 543 nm. La Tab. 4.1 muestra los parámetros establecidos para los barridos.

Diámetro	Tamaño	Tamaño	Tiempo de	Promedio	Resolución	Razón de
de haz	celda $\boldsymbol{x}$	celda $y$	integración			muestreo
$(\mu m)$	(mm)	(mm)	(ms)			(mues./s)
10	2.5	2.5	10	1	3	48000

Tabla 4.1.: Parámetros establecidos en el GUI para los barridos.

De la primera adquisición a la segunda, se tiene una diferencia de once días, en dicho periodo el módulo de celdas solares fue almacenado a temperatura ambiente en un lugar obscuro y resguardado del polvo del ambiente. Los barridos posteriores al onceavo día tienen una diferencia de un día. La Fig. 4.17 muestra la evolución temporal de la señal del mapa de LBIC de la celda solar orgánica.



**Figura 4.17.:** Evolución temporal del mapa de corrientes de la celda solar orgánica del tipo C1 de mayor eficiencia ( $\eta$ =0.77%); a) día 1 , b) día 11, c) día 12, d) día 13, e) día 14 y f) día 15.

Luego, fueron calculados los histogramas de cada mapa de voltajes obtenidos emplean-

do funciones de MATLAB. El histograma sólo corresponde al área sensible de la celda solar, los puntos que no forman parte a dicha área no fueron considerados para el histograma. El área, considerada por mapa, es la misma.

Los histogramas y mapas de voltajes mostrados en la Fig. 4.18 corresponden al monitoreo realizados el primer y el onceavo día, en ellos se puede apreciar que en el primer día no se registraban pixeles entre 0 y 0.1 V, mientras que en el onceavo día, gran parte de los pixeles se encontraron en dicho intervalo. En la Fig. 4.19, se muestran los histogramas y mapas de corrientes más representativos del monitoreo, en ellos se observa como el número de pixeles con mayor voltaje va disminuyendo entretanto el número de pixeles de menor voltaje aumenta hasta que la totalidad de los pixeles dentro del área sensible se encuentra en el intervalo de 0 a 0.1 V volts.



**Figura 4.18.:** Mapa de voltajes a) día 1 y b) día 11 de celda solar orgánica monitoreada por 15 días, con su respectivos histogramas c) y d).



**Figura 4.19.:** Mapas de voltajes del monitoreo de 15 días; a) Día 1, c) día 13 y e) día 15. b), d) y f) histogramas correspondientes a cada mapa de voltajes.

Las imágenes de los mapas de voltajes de los diferentes días, fueron comparadas con una fotografía de la celda solar, la cual fue obtenida empleando un microscopio de reflexión, Fig. 4.20. Se puede observar que las zonas con mayor voltaje son en las que no se aprecia una acumulación de PTB7:C71BM, mientras que las zonas en donde se ve una acumulación del material foto-sensible, son las que tienen menor voltaje. La conglomeración del PTB7:C71BM, puede ser debida a la forma en que es depositado el Field's metal, este se deposita de forma manual a una temperatura de 90°C, lo que hace suponer que al contacto con la capa foto-sensible, en ciertos puntos, ocasione su contracción.



Figura 4.20.: Fotografía de celda solar orgánica con contacto de Field's metal.

### 4.5.1.1. Análisis temporal de los parámetros de caracterización e histogramas del área activa

De las curvas **J-V** obtenidas durante el periodo de monitoreo, en la sec. 4.5.1, se hizo un análisis temporal de los parámetros empleados para la caracterización de celdas solares, tales como: densidad de corriente de corto circuito, voltaje de circuito abierto, factor de llenado, potencia máxima, y eficiencia, Fig. 4.21.



**Figura 4.21.:** Gráficas temporales de los parámetros con los que se caracteriza la celda solar: a) densidad de corriente de corto circuito, b) voltaje de circuito abierto, c) factor de llenado, d) potencia máxima, y e) eficiencia. Todas la gráficas son logarítmicas en el eje y para una mejor apreciación de su comportamiento.

De las Figuras 4.21a y 4.21b, se puede observar que la densidad de corriente de corto circuito es más afectada que el voltaje de circuito abierto, al pasar doce días, por lo que la eficiencia (Ec.2.12) se ve afectada mayormente por la reducción de la densidad de corriente de corto circuito. La potencia máxima, Fig. 4.21d, muestra una notable baja, del 98.43 % lo que origina que el factor de llenado, Fig. 4.21c, también tenga una baja del 97.73 %. Por dichas causas, la eficiencia se ve notablemente afectada. El comportamiento de las gráficas del la potencia máxima y de la eficiencia, Figuras 4.21d y 4.21e, tiene el mismo comportamiento y los mismos valores debido a que la eficiencia es proporcional al factor de llenado, ecuaciones 2.10 y 2.12.

De los histogramas obtenidos durante los 15 días se calcularon: voltaje máximo, voltaje promedio y el número de pixeles con voltajes por arriba del voltaje promedio, Fig. 4.22, dichos valores fueron obtenidos sólo del área activa de la celda solar, la cual es la misma para todos los casos.

Las Figuras 4.22a y 4.22b muestran un comportamiento similar, en ambas, se puede apreciar que para el día 15 hay una baja abrupta del voltaje máximo y promedio. La Fig. 4.22 muestra el número de pixeles que se encuentran por arriba del promedio de voltaje del primer día, es decir, a 317.53 mV. Este último gráfico nos muestra como el número de pixeles disminuyó drásticamente del primer al treceavo día, en los días subsiguientes el número de pixeles por arriba del voltaje medio del primer día fue cero. Del análisis de datos y tomando en cuenta que la celda solar orgánica fue almacenada en un lugar oscuro a temperatura ambiente, se puede suponer que la degradación de la celda, del primer día al onceavo fue debida a diversos mecanismos tales como: la humedad, oxidación y algunos otros [21]; y no por el empleo de los láseres para la adquisición de los mapas de voltajes. Con esto se puede concluir que la técnica LBIC sigue siendo una prueba no destructiva para celdas solares orgánicas.



**Figura 4.22.:** Valores calculados de los histogramas: a) voltaje máximo, b) voltaje promedio y c) el número de pixeles por arriba del voltaje promedio. Todas la gráficas son logarítmicas en el eje y para una mejor apreciación de su comportamiento.

#### 4.5.1.2. Efecto en el mapa de voltajes originado por grasa en las muestras

Al analizar las muestras con la técnica LBIC, se detectó que al estar sucia, se da un efecto que no permite adquirir un mapa de voltajes que sea característico de la celda solar, Fig. 4.23a, cuando esta es limpiada, el mapa de voltajes obtenido exhibe una mejor señal LBIC, Fig. 4.23b.



Figura 4.23.: Mapas de voltajes adquiridos con la técnica LBIC a) muestra con suciedad y b) muestra limpia.

Para determinar la causa por la cual se debe dicho efecto fueron tomadas fotografías de la celda utilizando un microscopio de reflexión. En la Fig. 4.24a, se puede ver claramente lo que parecieran ser gotas de alguna sustancia. Al observar detenidamente el módulo de celdas solares, se determinó que dichas gotas son grasa de huellas dactilares depositada de manera superficial al manipular el módulo. La Fig. 4.24b, muestra la misma muestra después de ser limpiada con alcohol isopropílico, en donde se puede ver que la muestra no exhibe ningún residuo de grasa. Por lo anterior, se determinó que es necesario limpiar el modulo de celdas solares antes de la adquisición del mapa de voltajes y usar guantes de latex para su manipulación, con el fin de obtener el mapa representativo de la celda solar orgánica.



**Figura 4.24.:** Fotografía celda solar a) sin limpiar y b) después de realizar una limpieza.

## 4.5.2. Celdas orgánicas C2 (ITO; PEDOT:PSS; PTB7:C71BM; Floruro de Littio y Aluminio)

Para el análisis de la celdas solares con cátodo de aluminio, se calcularon las eficiencias de cada una de las celdas que compone el módulo. De ellas, se tomó la celda solar con mayor eficiencia para su análisis con ambas longitudes de onda, 543 nm y 375 nm. La Tab. 4.2 muestra los parámetros establecidos para el barrido.

Del mapa de voltajes obtenido con el láser 543 nm, Fig. 4.25a, es posible verificar el área total de la celda solar, en este caso, el área con que se calcularon las eficiencias fue de un cuadrado 3 mm por 3 mm, sin embargo, del mapa de voltajes se puede observar que en realidad el área de la celda solar orgánica es de aproximadamente 2 mm a 2.5 mm por lado.

Diámetro	Tamaño	Tamaño	Tiempo de	Promedio	Resolución	Razón de
de haz	celda $x$	celda $y$	integración			muestreo
$(\mu m)$	(mm)	(mm)	(ms)			(mues./s)
10	3.5	3.5	10	1	4	48000

Tabla 4.2.: Parámetros establecidos en el GUI para los barridos.

Al comparar los mapas de voltajes obtenidos a 543 nm y 375 nm, se pueden apreciar varias diferencias, Fig. 4.25, las cuales pueden ser debidas a que las capas que componen la celda no fueron depositadas de manera uniforme, en específico la capa de PTB7:C71BM. Otra posible causa puede ser la deposición de la capa colectora de electrones y del cátodo, estas fueron depositadas por evaporación. En dicha técnica se tiene el riesgo de que las partículas evaporadas lleguen con suficiente energía cinética capaz de atravesar todas las capas antes depositadas, ocasionando daños en la estructura de la celda solar. La Fig. 4.25c muestra una fotografía de la celda solar orgánica con cátodo de Aluminio.



Figura 4.25.: Mapas de voltajes de celda solar orgánica con geometría cuadrada a longitudes de onda de excitación de a) 543 nm, b) 375 nm y c) fotografía celda solar tipo C2. El nivel de voltajes entre los dos mapas no fue normalizado entre ellos.

#### 4.5.2.1. Análisis área activa celda solar orgánicas con cátodo de aluminio

Al igual que en la sec. 4.5.1, los mapas de voltajes obtenidos fueron analizados con un programa de computo en donde sólo se tomo en cuenta el área sensible de la celda solar, el área fue la misma para ambos mapas de voltajes. Una vez seleccionada el área, los colores entre los mapas de voltajes fueron normalizados, estableciéndose como máximo y mínimo los calculados en el mapa de voltajes en donde se empleó el láser de 543 nm. Con estos criterio fueron calculados: los voltajes máximos y voltaje promedio por mapa de voltaje, y el número de pixeles por arriba del voltaje promedio del mapa de 543 nm, Tab. 4.3.

Longitud	Voltaje	Voltaje	Número de
de onda máximo		prome-	pixeles por
(nm)	(mV)	dio	arriba del
		(mV)	voltaje
			promedio a 543
			nm
543	292.76	204.39	1313
375	158.28	54.11	0

Tabla 4.3.: Parámetros calculados a partir del área sensible de la celda solar.



**Figura 4.26.:** Análisis de celdas solares orgánicas con cátodo de aluminio. Mapa de voltajes a) 543 nm y b) 375 nm. Histogramas c) del mapa a 543 nm y d) del mapa a 375 nm.

De los mapas y parámetros obtenidos se puede decir que la celda solar tiene mejor respuesta en la longitud de 543 nm comparado con la de 375 nm, esto puede ser debido a que se tiene una mejor eficiencia cuántica a 543 nm, la Fig. 4.27 muestra la eficiencia cuántica externa (EQE, por sus siglas en ingles) del PTB7:C71BM, en donde se puede apreciar que se tiene mayor EQE a 543 nm, la gráfica se tomo del artículo [32]. Por otra parte, dicho efecto también se puede deber a que, como se mencionó en la sec. 4.4.4.1, al tener mayor penetración a 543 nm se pueden generar electrones que son atrapados más fácilmente por la capa colectora de electrones (Floruro de Litio) ya que esta se encuentra a mayor profundidad.



**Figura 4.27.:** Eficiencia cuántica extenerna (EQE), del PTB7:C71BM. Se observa menor EQE a 375 nm y mayor EQE a 543 nm.

### 4.6. Análisis de contorno

Otra forma de analizar el mapa de voltajes es empleando análisis de contornos, este consiste en poner el mapa de voltajes a un número determinado de contornos para obtener una imagen topográfica del desempeño de la celda solar. Al igual que en el mapa de voltajes los contornos de color rojo representan voltajes altos, los de color amarillo voltajes medios y los de color azul voltajes bajos o nulos.

El número de niveles de contorno es seleccionado de tal forma que se puedan observar detalles que no se hayan podido ver con el mapa de voltajes, esto puede deberse a que la diferencia entre colores de los mapas de voltajes no es lo suficiente como para poder apreciar dichos detalles. En la Fig. 4.28 se observa la celda solar del tipo C1 y su correspondiente mapa de contornos a siete niveles, en donde se aprecian detalles físicos del área activa de la celda que no se logran apreciar con el mapa LBIC. En el caso de la celda solar orgánica del tipo C2 no se alcanzan a ver detalles físicos con el mapa de contornos, esto se puede deber a la forma en la que fue depositado el cátodo, en la campana de evaporación, sin embargo, es posible ver que las áreas de menor voltaje (azul) en el mapa de contornos de 375 nm corresponden a áreas de bajos voltajes en el mapa de 543 nm, por otro lado, las áreas de mayor voltaje en el mapa de contornos de 375 nm corresponden a las de mayor voltaje en el mapa de 375 nm corresponden, en algunos casos, a áreas de voltajes altos en el mapa de 543 nm, Fig. 4.29.

Los detalles físicos apreciados en la celda del tipo C1, pueden ser debido a la forma en la que se depositó el cátodo, en este caso es depositado de forma manual, mientras que en la celda del tipo C2 no se observan ese tipo de imperfección, ya que el cátodo fue depositado por evaporación. Sin embargo, los detalles observados en el mapa de contornos del la celda del tipo C2 pueden ser debidos a que no se tuvo una deposición uniforme del PTB7:C71BM o por partículas de aluminio que hayan atravesado la capa sensible de la celda solar. Esto sugiere que es necesario hacer más pruebas para encontrar las causas que dan origen a las imperfecciones físicas observadas en las celdas del tipo C1 y determinar porque no se obtienen mapas de voltajes uniformes tanto en las celdas del tipo C1 como en las del tipo C2, con el fin de lograr establecer las condiciones ideales para tener una mejor deposición de la capa PTB7:C71BM y los cátodos.



**Figura 4.28.:** Comparación del mapa de contornos con fotografía de la celda solar. a) Fotografía celda solar, b) mapa de contornos y c) mapa LBIC. Las marcas rojas muestras los detalles que se pueden apreciar con el mapa de contornos.



**Figura 4.29.:** Mapas de contornos y fotografía celda solar tipo C2. a) Mapa de contornos a 375 nm, b) Mapa de contornos a 543 nm y c) fotografía celda solar.

# 5. CONCLUSIONES

Se logró implementar la técnica LBIC para el análisis de celdas solares orgánicas, lográndose obtener respuesta de las mismas. Los mapas de voltajes obtenidos permiten un análisis macroscópico y cualitativo de las celdas solares. Se consiguió registrar la degradación de una celda solar orgánica manifestándose en la disminución de la señal LBIC, es decir, a mayor degradación menor señal LBIC, la degradación puede ser debida por la oxidación del PTB7:C71BM que posiblemente contribuye a la reducción de la generación o disociación del los excitones. Se verificó que la técnica LBIC es no destructiva, ya que la degradación no es debida al láser sino a otros factores como: la humedad, la exposición prolongada al medio, etc.

La técnica LBIC es capaz de mostrar distintas respuestas del la celda solar al ser excitada a diferentes longitudes de onda. Debido a las características del PTB7:C71BM, el mapa de voltajes muestra que la celda solar orgánica tiene mayor sensibilidad para el láser de 543 nm, mientras que para el mapa de voltajes empleando el láser de 375 nm se observa una menor sensibilidad. Los mapas de voltajes obtenidos mostraron diferentes detalles que pueden ser debidos a distintos mecanismos, como los son: inhomogeneidad de la mezcla PTB7:C71BM, mala deposición de la capa activa (PTB7:C71BM), deposición del cátodo, etc.

## 5.1. Trabajo a futuro

Se deja como trabajo a futuro: reducir el tiempo de barrido, este consiste en optimizar el programa empleado para la adquisición del mapa de voltajes; hacer mapa de eficiencias, en donde se mide de forma local la curva J - V; implementar la técnica IPCE, con la cual es posible medir la eficiencia cuántica del material activo PTB<sub>7</sub>:C<sub>71</sub>BM y por último generar imágenes de alta resolución empleando técnicas de sobre muestreo y procesamiento digital de imágenes.





**Figura A.1.:** a)Evolución de las eficiencias de las celdas solares orgánicas dentro del GPOM. b) y c) eficiencias obtenidas en el mes se septiembre de 2014.

# Referencias

- J. R. E. Quesada, México Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2012.
- [2] O. de Buen Rodríguez, "Alternativas energéticas para combatir el cambio ambiental global."
- [3] N. M. Thantsha, "Spatially resolved opto-electric measurements of photovoltaic materials and devices," Ph.D. dissertation, Nelson Mandela Metropolitan University, January 2010.
- [4] C. W. Tang, "Two-ayer organic photovoltaic cell," Applied Physics Letters, vol. 48, no. 2, pp. 183–185, 1986. [Online]. Available: http://scitation.aip.org/ content/aip/journal/apl/48/2/10.1063/1.96937
- [5] J. Nelson, The Physics of Solar Cells. Imperial College Press, 2003.
- [6] G. P. Smestad, Optoelectronics of Solar Cells. SPIE, 2002.
- [7] B. Kippelen and J.-L. Brédas, "Organic photovoltaics," Energy & Environmental Science, vol. 2, no. 3, pp. 251–261, March 2009.
- [8] W. Y. Liang, "Excitons," *Physics Education*, vol. 5, no. 4, p. 226, 1970. [Online]. Available: http://stacks.iop.org/0031-9120/5/i=4/a=003
- [9] J. C. Jean-Luc Brédasuc, Joseph E. Norton and V. Coropceanu, "Molecular understanding of organic solar cells: The challenges," Accounts of Chemical Research, vol. 42, no. 11, pp. 1691–1699, November 2009.
- [10] W. K. D. K. G. P. C.HäBler, S. Thurm, Proceedings of the 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, p. 1364, 1995.
- [11] G. W. W. S. A.S.H. van der Heide, A. Sch.onecker, "Mapping of contact resistance and locating shunts on solar cells using resistance analysis by mapping of potential (ramp) technique," *Proceedings of the 16th European Photovoltaic Solar Energy Conversion Conference*, 2000.
- [12] J. Chen, D. Yang, Z. Xi, and T. Sekiguchi, "Electron-beam-induced current study of hydrogen passivation on grain boundaries in multicrystalline silicon:

Influence of  $\{GB\}$  character and impurity contamination," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 364, no. 364, pp. 162 – 169, 2005. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921452605006824

- [13] M. H. J. Rinio, M. and M. Werner, "Lbic investigations of lifetime degradation by extended defects in multicrystalline solar silicon," *Solid State Phenomena*, vol. 63-64, pp. 115–122, 1999.
- [14] F. J. Vorster, "On the characterization of photovoltaic devices for concentrator purposes," Ph.D. dissertation, Nelson Mandela Metropolitan University, January 2007.
- [15] J. Carstensen, G. Popkirov, J. Bahr, and H. Föll, "Cello: an advanced {LBIC} measurement technique for solar cell local characterization," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 76, no. 4, pp. 599 – 611, 2003, photovoltaics and photoactive materials - properties, technology and applications. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024802002702
- [16] R. B. S. T. Heikenwalder J., Matthees J. R., "Dicing solar cells efficiently: Evaluation of beam technologies for cutting contours in silicon," *Dicing Processes*, p. 89, 1999.
- [17] C. R. McNeill, H. Frohne, J. L. Holdsworth, J. E. Furst, B. V. King, and P. C. Dastoor, "Direct photocurrent mapping of organic solar cells using a near-field scanning optical microscope," *Nano Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 219–223, 2004. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1021/nl0349496
- [18] D. C. Coffey, O. G. Reid, D. B. Rodovsky, G. P. Bartholomew, and D. S. Ginger, "Mapping local photocurrents in polymer/fullerene solar cells with photoconductive atomic force microscopy," *Nano Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 738–744, 2007, pMID: 17295549. [Online]. Available: http: //dx.doi.org/10.1021/nl062989e
- [19] K. Feron, T. J. Nagle, L. J. Rozanski, B. B. Gong, and C. J. Fell, "Spatially resolved photocurrent measurements of organic solar cells: Tracking water ingress at edges and pinholes," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 109, no. 0, pp. 169 – 177, 2013. [Online]. Available: http: //www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024812005107
- [20] F. C. Krebs, R. Sondergaard, and M. Jorgensen, "Printed metal back electrodes for {R2R} fabricated polymer solar cells studied using the {LBIC} technique," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, no. 5, pp. 1348 – 1353, 2011, special Issue : 3rd International Summit on {OPV} Stability. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024810006501
- [21] T. Jeranko, H. Tributsch, N. Sariciftci, and J. Hummelen, "Patterns of efficiency and degradation of composite polymer solar cells," *Solar Energy*

*Materials and Solar Cells*, vol. 83, no. 2-3, pp. 247 – 262, 2004, the development of organic and polymer photovoltaics. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024804000984

- [22] G. A. Riviere, J.-J. Simon, L. Escoubas, W. Vervisch, and M. Pasquinelli, "Photo-electrical characterizations of plastic solar modules," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 102, no. 0, pp. 19 – 25, 2012, organic, Dye sensitized and Innovative approaches for Photovoltaic Applications. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024812000463
- [23] J. Domaradzki, "Light-beam-induced current (lbic) technique for semiconductors and ics testing," pp. 269–274, 2003. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10. 1117/12.501534
- [24] A. R. Gxasheka, E. E. van Dyk, and F. J. Vorster, "Local photo-response measurements of photovoltaic devices," *physica status solidi* (c), vol. 5, no. 2, pp. 645–648, 2008. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1002/pssc.200776836
- [25] J. Bajaj, L. O. Bubulac, P. R. Newman, and W. E. Tennant, "Spatial characterization of semiconductors using 'laser beam induced current (lbic)'," pp. 136–141, 1987. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1117/12.940904
- [26] J. Vanek and K. Jandova, Solar Cells Silicon Wafer-Based Technologies, 2011, ch. Possibilities of Usage LBIC Method for Characterisation of Solar Cells, pp. 111–124.
- [27] V. D. E. E. Voster F.J, Review of Scientific Instruments, vol. 1, p. 78, 2007.
- [28] Technology and Applications Center Newport Corporation, ch. Photoresponse Mapping of Photovoltaic Cells.
- [29] Y. Chen, W. Hu, X. Chen, Z. Ye, J. Wang, X. Wang, C. Yu, and W. Lu, "Temperature dependence on photosensitive area extension in mercury cadmium telluride photodiodes using laser beam induced current," *Optical Engineering*, vol. 51, no. 3, pp. 036401–1–036401–5, 2012. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1117/1.OE.51.3.036401
- [30] C. Javier F.-L. Navas, Rodrigo Alcántara J. Martín-Calleja, and Solar Cells SiliconWafer-Based Technologies. InTech, 2011,ch. Trichromatic High Resolution-LBIC: А System Micromefor the tric Characterization of Solar Cells, pp. 67 - 92.[Online]. Available: http://www.intechopen.com/books/solar-cells-silicon-wafer-based-technologies/ trichromatic-high-resolution-lbic-a-system-for-the-micrometric-characterization-of-solar-cells
- [31] Z. M. Jan Salinger, Vitezslav Benda, "Optimal resolution of lbiv/lbic methods for diagnostics of solar cell homogeneity," *PROC. 26th INTERNATIONAL CONFE-RENCE ON MICROELECTRONICS* (, pp. 11–14, May 2008.

[32] S. S.-M. X. H. W. Zhicai He, Chengmei Zhong and Y. Cao, "Enhanced powerconversion efficiency in polymer solar cells using an inverted device structure," *Nature Photonics*, vol. 6, pp. 591–595, September 2012.

# Nomenclatura

$\eta$	Eficiencia
E	Energia
FF	Factor de llenado
J	Densidad de corriente
$J_m$	Densidad de corriente máximo de operación
$J_{SC}$	Densidad de corriente de corto circuito
$k_B$	Constante de Boltzmann
$P_i$	Densidad de potencia de luz incidente
$P_m$	Densidad de potencia máxima
$P_m$	Potencia máxima de operación
QE	Eficiencia cuántica
Т	Temperatura
V	Voltaje
$V_m$	Voltaje máximo de operación
$V_{OC}$	Voltaje de circuito abierto
AM1.5	Distribución espectral solar estandar