



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA



---

**“Metodología para la medición de la eficiencia de celdas solares  
CdS/CdTe mediante curvas de caracterización”**

Tesis que para obtener el título de  
**Ingeniero en Electrónica**

Presenta

**Valdemar Alejandro Apolonio Quintana**

Asesor: **Dra. Laura Luz Valero Conzuelo**

Co-asesor: **Dr. Javier Salas García**

Toluca, México

Noviembre de 2019

Las expectativas del sector energético en México requieren la implementación de acciones estratégicas, para 2019 y en adelante, enfatizan que demandará esfuerzos y sinergia entre las distintas dependencias y sectores involucrados. se busca incrementar la utilización de la capacidad instalada de refinación, mejorar la gestión de los recursos energéticos de México, acelerar los cambios tecnológicos para adoptar energías renovables, mejorar la integración vertical para los suministros de petróleo y gas, así como la legislación existente aplicable al sector, entre otros aspectos.

Para alcanzar los objetivos propuestos, se proponen acciones estratégicas: disminuir la dependencia energética, administrar inteligentemente los declinantes recursos petroleros del país, acelerar la transición hacia las fuentes renovables de energía, democratizar la política energética, respetar las decisiones de las comunidades y propiciar el fortalecimiento del sindicalismo independiente e impulsar la investigación, desarrollo tecnológico y formación de recursos humanos en el sector energético. Punto en el que se incide principalmente en esta tesis para desarrollar tecnología solar propia.

El ahorro energético se presenta actualmente como una de las líneas de investigación más importantes, considerando el incremento poblacional y su inherente demanda energética a nivel mundial. Además, representa un desafío prioritario el desarrollo de fuentes alternativas de energía no contaminantes eficaces y que favorezcan el ahorro energético. México representa el tercer país por su ubicación en el globo terráqueo con la mejor captación de la energía solar, una de las fuentes energéticas alternativas más prometedoras. En consecuencia, el grupo de investigación de “Electrónica y Sistemas” de la FIUAEM en conjunto con el grupo de investigación del CINVESTAV Mérida, plantean el desarrollo de un sistema de instrumentación electrónica mediante el control de la temperatura y luminosidad aplicados en la fase terminal (Light Soaking) de la fabricación de celdas solares de CdS/CdTe con el fin de mejorar su eficiencia. Así, se presenta una propuesta para el diseño y la construcción de un prototipo que permita aplicar una temperatura e intensidad luminosa en el interior de una cámara de pruebas que contiene una celda solar de CdS/CdTe. Además de que permita al usuario programar en una interfaz gráfica valores fijos de la temperatura y de la intensidad

luminosa. El sistema propuesto permitirá controlar los valores de ambas variables de acuerdo a curvas arbitrarias en función del tiempo. Esta versatilidad permitirá determinar los parámetros que describen ambas funciones (temperatura e intensidad luminosa) de tal forma que resulte en una mayor eficiencia de conversión fotovoltaica medida en términos de la corriente y el voltaje que puede producir una celda solar de CdS/CdTe durante el proceso de “Light Soaking”, lo que a su vez resultará en una mayor eficiencia de conversión fotovoltaica de dichas celdas instaladas en el campo.

The expectations of the energy sector in Mexico require the implementation of strategic actions in the energy sector, by 2019 and onwards, emphasize that it will require efforts and synergy between the different agencies and sectors involved. It seeks to increase the use of installed refining capacity, improve the management of Mexico's energy resources, accelerate technological changes to adopt renewable energies, improve vertical integration for oil and gas supplies, as well as the existing legislation applicable to sector, among other aspects.

To achieve the proposed objectives, strategic actions are proposed: Decrease energy dependency, intelligently manage the declining oil resources of the country, Accelerate the transition towards renewable energy sources, democratize energy policy, respect the decisions of communities and promote strengthening of independent trade unionism and promote research, technological development and training of human resources in the energy sector. The point at which this thesis is mainly focused on developing its own solar technology.

Energy saving is currently one of the most important lines of research, considering the population increase and its inherent energy demand worldwide. In addition, the development of alternative sources of effective non-polluting energy that favor energy savings represents a priority challenge. Mexico represents the third country because of its location on the globe with the best capture of solar energy, one of the most promising alternative energy sources, given that it allows different forms of capture and transformation. Consequently, the research group of "Electronics and Systems" of the FIUAEM together with the research group of CINVESTAV Mérida, propose the development of an electronic instrumentation system by controlling the temperature and luminosity applied in the terminal phase (Light Soaking) of the manufacturing of CdS / CdTe solar cells in order to improve their efficiency. Thus, a proposal for the design and construction of a prototype that allows to apply a temperature and luminous intensity inside a test chamber containing a CdS / CdTe solar cell is presented. In addition to allowing the user to program in a graphic interface fixed values of temperature and light intensity. The proposed system will allow controlling the values of both variables

according to arbitrary curves as a function of time. This versatility will allow to determine the parameters that describe both functions (temperature and light intensity) in such a way that it results in a higher photovoltaic conversion efficiency measured in terms of the current and voltage that a solar CdS / CdTe cell can produce during the process of "Light Soaking", which in turn will result in a greater efficiency of photovoltaic conversion of said cells installed in the field.

Resumen.....	iii
Abstract .....	v
Índice .....	vii
Introducción .....	ix
Capítulo I: Energías Sustentables.....	11
1.1    Introducción.....	11
1.2    Clasificación de Energías Renovables.....	12
1.3    Energía solar.....	16
Capítulo II: Energía Solar.....	18
2.1    Introducción.....	18
2.2    Celdas solares.....	18
2.2.1    Clasificación de celdas solares.....	19
2.2.2    Inorgánica.....	20
2.2.3    Orgánica.....	21
2.3    Física de celdas solares.....	24
2.4    Principios de funcionamiento.....	28
2.5    Fabricación de celdas solares y <i>light Soaking</i> .....	30
Capítulo III: Propuesta de medición de celdas solares CdS/CdTe.....	33
3.1    Introducción a la caracterización de dispositivos semiconductores.....	33
3.2    Curvas de caracterización.....	33
3.3    Eficiencias características.....	34
3.4    Curvas de calibración.....	37
3.5    Metodología para la medición de la eficiencia de celdas solares CdS/CdTe mediante curvas de caracterización.....	39
3.5.1    Señales de la celda solar.....	40

3.5.2. Instrumentación.....	42
3.5.3 Subsistema de control de iluminación.....	43
3.5.4 Subsistema de control de temperatura y sensor de temperatura. ....	43
3.6 Propuesta de gráficas de caracterización. ....	44
Capítulo IV: Implementación del modelo para la medición de la eficiencia de celdas solares CdS/CdTe mediante curvas de caracterización.....	
4.1 Introducción.....	45
4.2. Estructura del sistema para el proceso <i>Light Soaking</i> . ....	46
4.3 Estructura de las tablas en la interfaz.....	49
4.4 Implementación de circuito eléctrico para el horno.....	54
4.5 Implementación de la instrumentación.....	60
4.6 Curvas de calibración.....	61
4.6.1 Curvas de calibración de temperatura.....	61
4.6.2 Curvas de calibración para el enfriamiento.....	66
4.6.3 Curva de calibración de Intensidad luminosa.....	68
Conclusiones.....	81
Glosario.....	83
Bibliografía.....	89
Apéndices.....	91
1.4.....	91
1.5    Apéndice A: Diagramas eléctricos.....	91
1.6    Apéndice B: Mediciones.....	93

## Introducción

---

Las energías sustentables, representan ante el cambio climático una medida emergente de salvaguardar al medio ambiente, como causa principal del calentamiento global.

Millones de seres humanos en todo el mundo se abastecen de electricidad por medio de energías renovables como la solar y la Humanidad se dispone a acelerar la transición hacia una economía baja en carbono, consciente de la finitud de los combustibles fósiles y de sus efectos perjudiciales para el planeta. La energía solar, es capaz de autoabastecer al planeta durante millones de años, al Sol aún le quedan 6.500 millones de años de vida, según apunta la NASA. En mucho menos tiempo, la tecnología solar ha evolucionado hasta resultar competitiva con las fuentes convencionales de generación eléctrica en algunos países y en apenas unas décadas más se convertirá en parte sustancial de un sistema energético sostenible a nivel global.

Además, las condiciones para su desarrollo son óptimas: cada hora, el sol arroja sobre la Tierra más energía en forma de luz y calor de la suficiente para colmar las necesidades globales de un año completo. Necesidades energéticas que la radiación solar podría satisfacer 4.000 veces cada año.

De hecho, según Energías Renovables Info, la superficie terrestre recibe 120.000 Terawatios de irradiación solar, “lo que supone 20.000 veces más potencia de la que necesita el planeta al completo” (Entrecanales, 2019)

La energía solar representa un porcentaje de uso como una energía sustentable, por lo cual existen a nivel mundial un amplio grupo de investigadores trabajando en su diseño con el fin de aumentar sus índices de eficiencia energética, estos sistemas en la actualidad presentan 2 problemáticas; eficiencias comerciales inferiores al 25 % y altos costos de producción.

En este trabajo de tesis se enfoca principalmente en la búsqueda de una Metodología para la medición de la eficiencia de celdas solares CdS/CdTe mediante curvas de caracterización. La eficiencia en una celda solar se define como la porción de energía en forma de luz solar que se puede convertir a través de energía fotovoltaica en electricidad.

Actualmente el grupo de investigación del Cinvestav desarrolla procesos para la fabricación de celdas solares, de alta eficiencia, realiza la etapa de *Light Soaking* sin seguir un procedimiento formal, esto ocasiona poca reproducibilidad en las pruebas y los resultados, al menos que esta etapa esté bajo el control de un experto. Al tener un equipo especializado para el control de la temperatura y la iluminación, el cual es parte del proyecto de investigación CA 245, y establecer la metodología de realización de la etapa *light Soaking* apoyará al mencionado grupo de investigación a desarrollar celdas solares con mayores eficiencia y reproducibilidad

El objetivo de esta tesis es proponer una metodología instrumentada electrónicamente para el estudio y determinación de parámetros que mejoren la eficiencia de celdas solares CdS/CdTe, la metodología utilizada está basada en la manipulación de las variables temperatura e intensidad luminosa en la fabricación de celdas solares CdS/CdTe en la etapa de *Light Soaking*.

La tesis está integrada en cuatro capítulos. En el primer capítulo se da una introducción a energías sustentables, en el capítulo II se presentan conceptos de energía solar, el principio de funcionamiento y el concepto de *Light Soaking*, en el capítulo III, la propuesta de medición de celdas solares CdS/CdTe, se da una introducción a la caracterización de dispositivos semiconductores, sus curvas de caracterización, y eficiencias características. En el Capítulo IV, se presenta la implementación del modelo para la medición de la eficiencia de celdas solares CdS/CdTe mediante curvas de caracterización. Finalmente se presentan las conclusiones al trabajo desarrollado en esta tesis.

# Capítulo I: Energías Sustentables.

---

## 1.1 Introducción.

La energía es una parte central de la vida actual y la población la utiliza sin pensar acerca de los recursos y fuentes energéticas y su impacto en el medio ambiente. La realidad es que la mayoría de la energía se genera de la quema de los combustibles de origen fósil, tales como el carbón, el petróleo o el gas. Actualmente, estos combustibles proveen el 66% de la energía eléctrica a nivel global, y a la vez ostentan el 95% de la demanda energética del mundo, incluyendo el calentamiento, el transporte, la generación de la electricidad y otros usos. La acumulación de bióxido de carbón liberado de la quema de los combustibles de origen fósil contribuye al calentamiento global y encadena cambios en el ambiente y por consecuencia, sobre nuestras realidades sociales y económicas (Badii, 2016).

El 99% de la energía que calienta el planeta y nuestros edificios proviene del sol y no cuesta. Sin la energía solar o capital solar, la temperatura promedio del planeta sería cerca de  $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-400^{\circ}\text{F}$ ) y no existiría la vida tal como se conoce. Esta entrada directa de energía solar también produce otras formas indirectas de energía solar renovable, como son el viento, la fuerza hidroeléctrica (el agua que cae y fluye) y la biomasa (la energía solar convertida en energía química y almacenada en los enlaces químicos de los compuestos orgánicos en las plantas). La energía comercial vendida en el mercado conforma el 1% restante de la energía que empleamos para complementar la entrada directa de la energía solar en el planeta. Casi toda la energía solar proviene de la extracción y quema de recursos minerales no renovables obtenidos de la corteza terrestre, sobre todo combustible de origen fósil que contienen carbón, petróleo y gas natural.

Mayoría de la energía renovable se deriva directamente o indirectamente desde el sol, el calor del sol también dinamiza los vientos cuya energía se captura por las turbinas del viento. El viento y el calor del sol ocasionan la evaporación del agua. Cuando este vapor se convierte en la lluvia o la nieve y fluye hacia abajo en los ríos o corrientes del agua y se puede capturar su energía por medio de energía hidroeléctrica. Junto con la lluvia y la nieve, el sol también

causa el crecimiento de las plantas. La materia orgánica de las plantas se denomina biomasa, la cual se puede usar para producir electricidad, combustible para la transportación o productos químicos. El uso de la biomasa para cualquier de estos fines se denomina la bioenergía. El hidrógeno es el elemento más abundante el planeta tierra y se encuentra en muchos compuestos orgánicos y también en el agua, sin embargo, no se ocurre de forma natural como gas y siempre se encuentra en combinación con otros elementos, como por ejemplo el oxígeno para producir el agua. Una vez separado de otros elementos, se puede quemar el hidrógeno como el combustible para generar electricidad.

La eficiencia energética significa hacer más con menos energía lo cual beneficia a la población, la economía y el ambiente de manera global. La eficiencia energética y la conservación energética son consideradas como factores claves para reducir las emisiones de gas de invernadero y alcanzar otros objetivos de la política energética. La eficiencia energética se considera como una solución clave dentro de la política energética para contestar los altos costos energéticos y las amenazas de cambios climáticos. Inversión en los programas de eficiencia energética producen beneficios económicos mucho más que los ahorros directos a los consumidores. Por tanto, dada la relevancia de estos ahorros a los consumidores, las ganancias económicas a nivel macro se deben considerar como puntos claves en cuanto se decide evaluar y emplear políticas energéticas racionales (Badii, 2016).

## **1.2 Clasificación de Energías Renovables**

Se crean en un flujo continuo y se disipan a través de ciclos naturales que se estima son inagotables, ya que su regeneración es incesante. Este tipo de energía es el que se explicará en detalle más adelante, en donde se definían todos sus tipos y por consiguiente sus usos.

- **Solar térmica.**

Un hecho fundamental en la historia de la energía solar térmica la originó en Suiza, Horace de Saussure en el año de (1767) cuando inventó lo que se denominó como Caja Caliente. Saussure era conocedor del efecto invernadero que se produce en todo espacio cerrado que cuenta con una apertura acristalada por donde entra la radiación solar y

decidió potenciar al máximo el efecto para comprobar hasta que temperaturas se lograba alcanzar. Para ello dispuso una caja acristalada con el interior pintado de negro. Todas las caras, excepto la acristalada, contaban con una capa de aislante que retenía el calor producido en su interior. El resultado fue que con su caja caliente logró alcanzar temperaturas de hasta (109 °C). A partir de su invento surgirán todos los desarrollos posteriores de calentadores solares de agua de placa plana que se han proporcionado agua caliente a millones de personas en el mundo.

- **Solar fotovoltaica.**

Alexandre Edmond Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico en el año de (1839), mismo que consisten en la transformación directa de la luz en electricidad utilizando un semiconductor, algunos años más tarde, en (1877), el inglés William Grylls Adams profesor de Filosofía Natural en la King College de Londres, junto con su alumno Richard Evans Day, crearon la primera célula fotovoltaica de selenio. Si bien es cierto, en todos estos descubrimientos la cantidad de electricidad que se obtenía era muy reducida y quedaba descartada cualquier aplicación práctica, ya que se demostraba la posibilidad de transformar la luz solar en electricidad por medio de elementos sólidos sin partes móviles.

- **Eólica.**

Este tipo de energía, es una de las más antiguas usadas por la humanidad. Desde el siglo (II a.C.), en China los hombres utilizaban los molinos de viento para moler granos o bombear agua. Con la llegada de la electricidad, a finales del siglo XIX los primeros aerogeneradores se basaron en la forma y el funcionamiento de los molinos de viento, sin embargo, hasta hace poco tiempo no la generación de electricidad a través de aerogeneradores no ha jugado un papel importante. La primera persona que utilizó el viento para generar electricidad fue Charles F. Brush, en el año de (1888), quien construyó el molino de poste Brush, en Cleveland, Ohio. Parecía un ventilador gigante con una cola que podía hacer girar el rotor con el viento. El molino de poste producía alrededor de (12 KV), cantidad que cargaba las baterías en el sótano de la casa de Brush. Éstas suministraban energía a las lámparas y a 6 pequeños motores eléctricos.

- **Biomasa.**

Es la forma más antigua de energía explotada por la humanidad, básicamente las ramas y troncos de los árboles que al quemarlos producían luz y calor. Desde la prehistoria las personas han utilizado esta energía por medio de combustión directa: quemándola en hogueras a la intemperie, en hornos y cocinas artesanales e incluso en calderas. Esto se usaba para cocinar alimentos, para protegerse de fríos y desde la revolución industrial para la producción de vapor.

- **Geotérmica.**

Es la energía proveniente del calor que existe en el interior de la Tierra. El origen de la palabra es griego, de las raíces geos (tierra) y thermos (calor), otorgando el significado compuesto del calor de la Tierra. Actualmente este término se utiliza para describir los fenómenos térmicos internos de la Tierra como también el conjunto de todos los procesos que se utilizan para extraer esta energía para el uso humano.

El calor que se encuentra en el interior del planeta es una energía duradera, diferencia de las energías eólica y solar, es constante e independiente de las estaciones del año y las condiciones climatológicas. Se le considera energía renovable puesto que el calor del planeta es ilimitado comparado con la estancia de los humanos en la Tierra, la temperatura subterránea del planeta se disminuye (130° C) cada mil millones de años, es por ello que la energía geotérmica estará disponible por muchas generaciones. Es una energía limpia y sustentable, ya que las instalaciones para extraerla no queman combustibles y por lo tanto no contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero.

- **Hidráulica.**

La fuerza del agua fue aprovechada para diversos usos, como moler grano o triturar materiales con alto contenido en celulosa para la producción de papel, hecho que atestiguan los numerosos molinos de agua conservados en diferentes partes del mundo. Pero no sería hasta los inicios de la Revolución Industrial cuando se aprovechó la energía del agua para la producción de energía eléctrica. La creciente industrialización del norte

de Europa provocó una gran demanda de energía que vino a ser suplida en buena parte, gracias a la hidroelectricidad, ya que la extracción de carbón todavía no era lo suficientemente fuerte como para cubrir las necesidades industriales. Se considera que la primera central hidroeléctrica fue la construida en Northumberland, Reino Unido, en el año de 1880 y un año después comenzó a utilizarse la energía procedente de las cataratas del Niágara para alimentar el alumbrado público. A finales de la década ya existían más de 200 centrales tan sólo en Estados Unidos de América y Canadá.

- **Del mar.**

Se denomina energía marina o energía oceánica a toda aquella que es transportada por las olas, mareas, corrientes, salinidad o diferencias de temperatura y que puede aprovecharse a partir de tales recursos. Cualquier movimiento que procede del mar es energía cinética y potencial que se aplica en la vida actual. Desde el año 1581 hasta 1822 en Londres, Reino Unido funcionó sobre el Río Támesis una gran rueda movida por la marea, que permitía bombear el agua hasta el centro de la ciudad, después algo similar fue utilizado por Francia y Rusia. El mar es poseedor de una gran cantidad de energía y puede proporcionar cantidades significativas de energía renovable para la población mundial. Los océanos o mares producen dos tipos básicos de energía: mecánica y térmica. La energía mecánica se produce de acuerdo con la rotación de la Tierra y la gravedad de la Luna, ya que ambas crean fuerzas mecánicas: mientras la primera crea viento en la superficie del océano y en consecuencia se forman las olas, la atracción gravitatoria lunar genera mareas y corrientes costeras. La energía térmica, por su parte, se obtiene cuando el Sol calienta la superficie marina a la vez que las profundidades permanecen frías. Esta diferencia de temperatura permite que la energía se convierta en otro tipo de energía (Oviedo-Salazar, 2015).

### **1.3 Energía solar.**

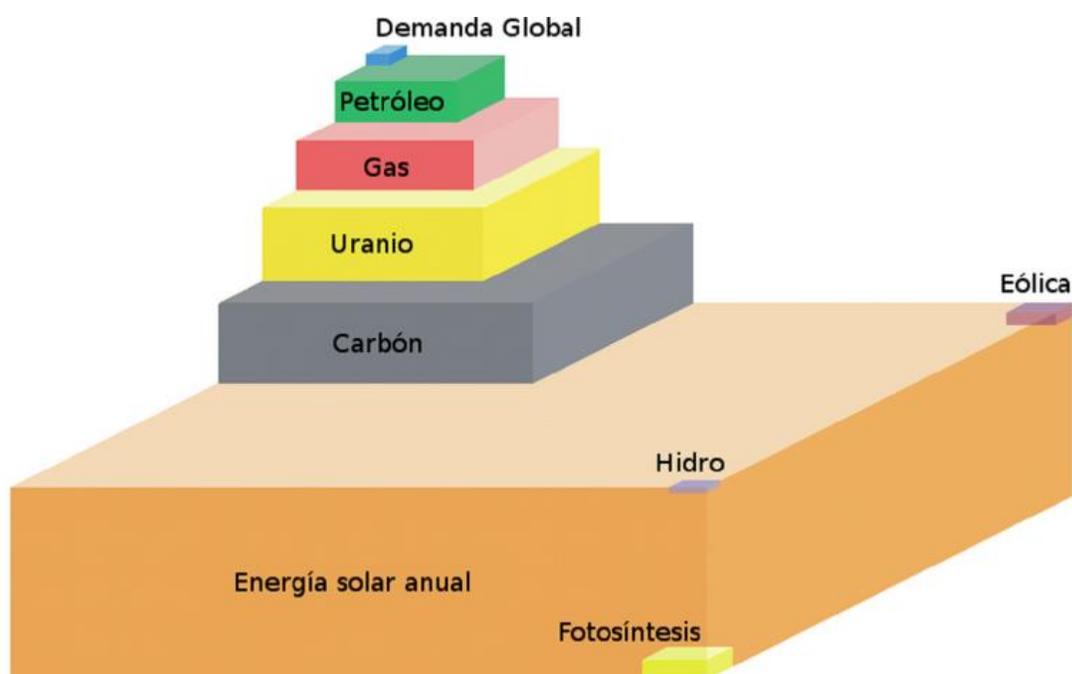
La energía solar es la energía radiante del sol recibida en la tierra es una fuente de energía que tiene varias importantes ventajas sobre otras y que, para su aprovechamiento, también presenta varias dificultades. Entre sus ventajas se destacan principalmente su naturaleza inagotable, renovable y su utilización libre de polución. Pero, para su utilización, es necesario tener en cuenta su naturaleza intermitente, su variabilidad fuera del control del hombre y su baja densidad de potencia. Estas dificultades conllevan entonces la necesidad de transformarla a otra forma de energía para su almacenamiento y posterior uso. La baja densidad de potencia resulta en que es una fuente extensiva: para mayor potencia, mayor extensión de equipos de conversión. La ingeniería solar precisamente se ocupa de asegurar el suministro confiable de energía para el usuario teniendo en cuenta estas características. La energía solar se transforma en la naturaleza en otras formas de energía, como biomasa y energía eólica, pero también se puede transformar a otras formas de energía como calor y electricidad (Murcia, 2009).

La energía solar total anual que alcanza la superficie de la Tierra y su atmósfera es 2,895,000 EJ/año ( 7,000 veces la demanda global en 2004, DG), que representa unas 9 veces el recurso total de todas las demás energías no-renovables, estimado en 325,300 EJ (770 veces la DG); Petróleo: 8,690 EJ ( 20 DG), Gas: 17,280 EJ ( 40 DG), Uranio 114,000 EJ ( 270 DG), Carbón: 185,330 EJ ( 440 DG) (Figura 1.1). La energía solar en sus manifestaciones directa e indirecta junto con la energía geotérmica también se conocen como energías renovables, esto es, fuentes de energía que por su cantidad en relación a los consumos que los seres humanos pueden hacer de ellas son consideradas inagotables y su propio consumo no afecta el medio ambiente.

La energía solar en sus manifestaciones directa e indirecta junto con la energía geotérmica también se conocen como energías renovables, esto es, fuentes de energía que por su cantidad en relación a los consumos que los seres humanos pueden hacer de ellas son consideradas inagotables y su propio consumo no afecta el medio ambiente.

Las tecnologías que aprovechan a las fuentes renovables de energía, en diversos estados de desarrollo, han estado presentes en la historia de los seres humanos desde siempre. Sin

embargo, con el advenimiento de la revolución industrial, cuya pieza fundamental fue la máquina de vapor desarrollada por James Watt en 1774 y que requería para su funcionamiento un combustible de alta densidad energética como el carbón, las energías renovables empezaron a ser sustituidas por los hidrocarburos. En las últimas décadas y debido a las crisis petroleras, la investigación y desarrollo de las tecnologías que aprovechan las fuentes renovables de energía se ha intensificado al punto de generar tecnologías actualmente en estado comercial. Pero más aún, estos mercados han tenido en los últimos años un crecimiento muy importante.



**Figura 1.1** Comparación entre fuentes de energías. (National Petroleum Council, 2007 after Craig, Cunningham and Saigo).

### 2.1 Introducción.

La energía solar en sus manifestaciones directa e indirecta junto con la energía geotérmica también se conocen como energías renovables, esto es, fuentes de energía que por su cantidad en relación a los consumos que los seres humanos pueden hacer de ellas son consideradas inagotables y su propio consumo no afecta el medio ambiente.

### 2.2 Celdas solares.

Partiendo de una oblea de silicio (Si) se produce una célula solar una vez que se ha creado el campo eléctrico interno y después de preparar los contactos eléctricos adecuados. El campo eléctrico debe ser superficial para que la radiación solar llegue fácilmente hasta él, de manera que la unión rectificadora se pone muy próxima a la cara que enfrenta el sol. Por otro lado, los contactos eléctricos que se hacen en ambas caras de la oblea son de geometría y características especiales. La cara que no recibe la radiación se recubre totalmente, mientras que la cara expuesta a los rayos solares sólo se cubre parcialmente mediante un electrodo metálico en forma de red. Esto permite que el electrodo recoja en forma eficiente los portadores de carga eléctrica generados en el interior de la oblea, además de permitir que los rayos solares alcancen un porcentaje alto del área del material semiconductor.

Debido a que una célula solar genera corrientes y tensiones pequeños, éstas no son los elementos que se utilizan en las aplicaciones prácticas, sino que, con objeto de lograr potencias mayores, se acoplan en serie o en paralelo para obtener mayores tensiones y corrientes formando lo que se denomina módulo fotovoltaico, que es el elemento que se comercializa. A la vez, estos módulos se conectan en serie o en paralelo para obtener las tensiones y corrientes que den la potencia deseada. Módulos en serie aumentan el voltaje y conservan la misma corriente, mientras que módulos en paralelo aumentan la corriente, conservando el mismo voltaje. Los módulos generalmente se fabrican para tener una salida de 12 VCD.

Suele llamarse generador fotovoltaico al conjunto de elementos, debidamente acoplados, que permiten utilizar la energía eléctrica obtenida por conversión de la solar mediante las células solares. La estructura de un generador es variable según la aplicación a la que está destinado, aunque algunos elementos tienen que estar presentes necesariamente. Para fines prácticos, se puede decir que hay dos grandes grupos de generadores: los autónomos, que constituyen una fuente de energía eléctrica independiente de la red general de electricidad y que por lo tanto precisan de algún sistema de almacenamiento de energía eléctrica; y los no autónomos, que operan en conjunto con dicha red y que pueden prescindir del sistema de almacenamiento (Mendoza Ramirez Miryam, 1995).

### **2.2.1 Clasificación de celdas solares.**

El mecanismo general del proceso fotovoltaico consta de tres pasos (figura 2.1): el primero de ellos es la absorción, por parte de una molécula orgánica, de un fotón para permitir la generación del excitón.

Un excitón es una cuasipartícula en estado neutral que consiste de un electrón excitado y un hueco o espacio dejado por el electrón. Este excitón tiene por lo general un tiempo de vida del orden de nanosegundos.

El segundo paso es la disociación del excitón en el electrón y su respectivo hueco. Para esto se necesita que la diferencia de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción sea lo más pequeña posible. Este aspecto es uno de los mayores problemas cuando se quiere utilizar compuestos orgánicos en celdas solares, ya que la diferencia de energía entre las bandas en los materiales orgánicos es muy grande, mayor a 2 eV.

El último paso consiste en mover los electrones hacia un electrodo mientras los huecos van hacia el otro, generando corriente eléctrica. Esto se produce porque se genera un gradiente de potencial químico que depende de las bandas de valencia y de conducción entre el electrón y el hueco.

Una clasificación de los tipos de celda solar es:

- Celda solar de Si cristalino
- Celda solar de película delgada (Thin-Film)

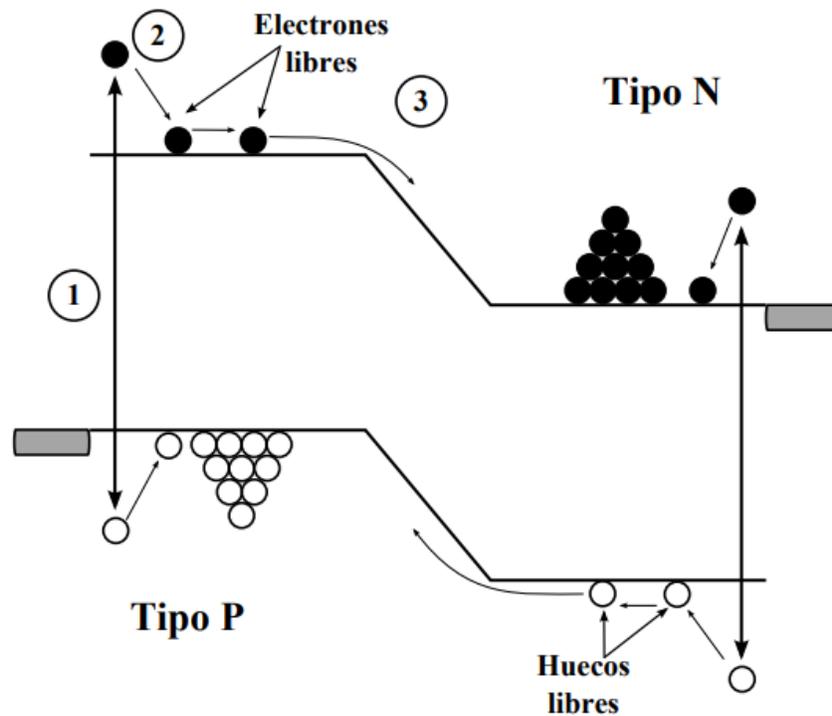
Las anteriores se subdividen en:

- Celda TF basadas en a-Si:H
- Celda TF basadas en CdTe
- Celdas basadas en CuInSe<sub>2</sub>.

### **2.2.2 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. La diferencia entre los niveles de energía, banda de conducción y banda de valencia, determinan el máximo voltaje de circuito abierto VOC. El funcionamiento de una celda solar inorgánica puede ser dividida en 3 pasos N (Figura 2.1):

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 bandas 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 de energía en una celda solar inorgánica 1) Absorción de fotones, 2) Generación por electrón-hueco y 3) Difusión de electrones y huecos generadores.

### 2.2.3 Celda solar Orgánica.

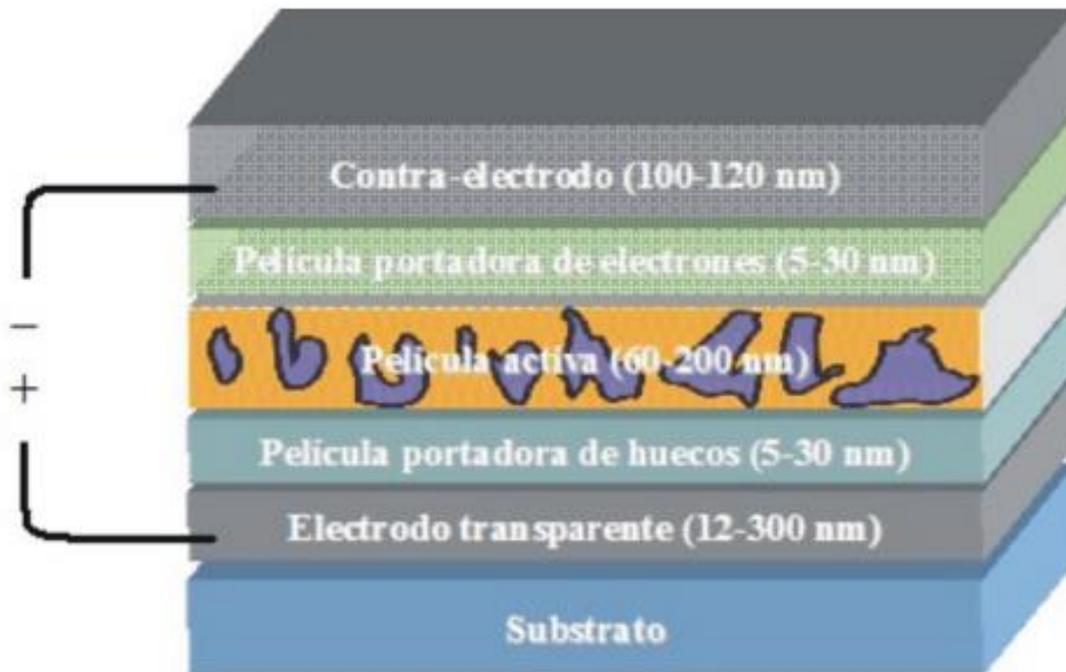
Las celdas OPVs (*Organic Photovoltaics*) presentan actualmente una eficiencia de alrededor de 9 % mientras que las celdas DSSC (*Dye Sensitized Solar Cells*) tienen una eficiencia típica de 11 %; como se mencionó antes, la eficiencia de dispositivos inorgánicos cristalinos (a base de silicio) es arriba del 20 %. Las estructuras de celdas orgánicas están siendo ampliamente estudiadas y de las dos, la más prometedora es la basada en películas delgadas amorfas de estado sólido (celdas OPVs) ya que las DSSC conocidas como “celdas húmedas” tienen importantes limitaciones tecnológicas inherentes a su arquitectura y proceso de fabricación. Es por ello que este artículo se referirá preferentemente a las celdas OPVs. La evolución de la eficiencia de conversión lograda desde la década de los setenta en las celdas OPVs ha sido impactante: en 1975 fue del 0.001 %; en 1986 del 1 %; en 2006 fue del 5.5 %; en 2009 fue del 6.1 % y actualmente (2012-2013) se han reportado eficiencias superiores al 9 % (Barbosa-

García, et al., 2012) (recientemente la compañía Samsung ha reportado eficiencias de conversión del 10 %). Sin embargo, es de importancia señalar que en los grupos de investigación y en la literatura la mayoría de las investigaciones reportan eficiencias típicas entre 3 y 5 %.

La electroluminiscencia es el proceso eléctrico-óptico mediante el cual un material puede producir luz a partir de la aplicación de una corriente eléctrica (electricidad); para el caso de materiales orgánicos los dispositivos emisores de luz se conocen como OLEDs (diodos emisores de luz orgánicos). El proceso inverso a la electroluminiscencia el proceso para producir electricidad a partir de la absorción de luz es el efecto fotovoltaico y el dispositivo que ilustra este proceso con materiales orgánicos es la celda OPV. En los OLEDs la electroluminiscencia se basa en la inyección de huecos libres (cargas eléctricas positivas o tipo p) y electrones (cargas negativas o tipo n) desde los electrodos hacia la película orgánica. Estos huecos y electrones se unen en dicha película para formar un excitón que al recombinarse permite la generación de luz. Un excitón es una pareja electrón-hueco fuertemente unida por la atracción Coulombiana. Por otro lado, cuando una celda OPV se ilumina, la luz es absorbida por el material orgánico produciéndose de igual manera un excitón. El excitón se desplaza entre las moléculas orgánicas ocurriendo una disociación de éste (esto es, la separación de los huecos y electrones) y son los huecos y electrones “libres” quienes migran a sus respectivos electrodos produciendo una corriente y una diferencia de potencial o voltaje.

Dentro de los diversos diseños que se han empleado para incrementar la eficiencia de los OLEDs y OPVs, está el de utilizar capas múltiples de materiales orgánicos. Cada una de estas capas realiza una función específica dentro del dispositivo, por ejemplo, una capa es para inyectar (o extraer en celdas OPVs) cargas eléctricas positivas o negativas, otras que son portadora de cargas y otras más que son emisoras (o absorbentes) de luz. Las capas activas tanto en dispositivos OLEDs y OPVs típicamente son de menos de 100 nanómetros. En la Figura 2.2, para una celda OPV se tiene un esquema multicapa más completo y complejo donde se indican además los espesores típicos. En dicha figura, la generación de carga eléctrica se asegura a través del volumen entero (heterounión de volumen: BHJ por sus siglas

en inglés) de la película foto-activa reduciendo la recombinación de excitones e incrementado la eficiencia de conversión de luz solar (Perez Gutiérrez Enrique, 2013).



**Figura 2.2** Esquema de una celda solar orgánica (celda OPV) multicapa. (Fuente alterna de energía renovable: celdas solares orgánicas, Pérez Gutiérrez Enrique, Maldonado Rivera José Luis)

### Caracterización eléctrica-óptica de celdas OPVs

La caracterización optoelectrónica de una celda solar se realiza al medir la eficiencia de conversión (medida de los fotones de luz incidentes en la celda y que son convertidos en electricidad) bajo la condición de iluminación AM 1.5: estándar de intensidad de iluminación sobre la superficie de la Tierra cuando el ángulo cenit del Sol es de  $48^\circ$  y que corresponde entre 800 y 1000 W/m<sup>2</sup>. Los parámetros útiles para lo anterior son: el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), la densidad de corriente de corto circuito ( $J_{sc}$ ), el voltaje de máxima potencia ( $V_m$ ), la densidad de corriente de máxima potencia ( $J_m$ ) y el factor de llenado (FF). El FF,

así como están definidos por las ecuaciones 1 y 2 (Figura 2.3) donde  $P_{in}$  es la intensidad de iluminación incidente. Para lograr altas eficiencias de conversión eléctrica se requiere tener los máximos valores de  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , y  $FF$ .

$$\eta = FF \frac{V_{oc} J_{sc}}{P_{in}} \quad (1)$$

$$FF = \frac{V_m J_m}{V_{oc} J_{sc}} = \frac{P_{max}}{V_{oc} J_{sc}} \quad (2)$$

**Figura 2.3** Ecuaciones para la caracterización de celdas solares OPV, 1) Ecuación para el cálculo de la eficiencia y 2) ecuación para el factor de llenado.

Las celdas son preliminarmente probadas bajo iluminación solar y posteriormente se obtienen las curvas J-V mediante un medidor-fuente de corriente-voltaje y una lámpara de xenón o halógeno que simula el Sol y que es calibrada con una celda de referencia a 100 mW/cm<sup>2</sup>. La lámpara emite luz con un espectro muy similar al del Sol en el visible y cercano infrarrojo (Barbosa Garcia Oracio, 2012).

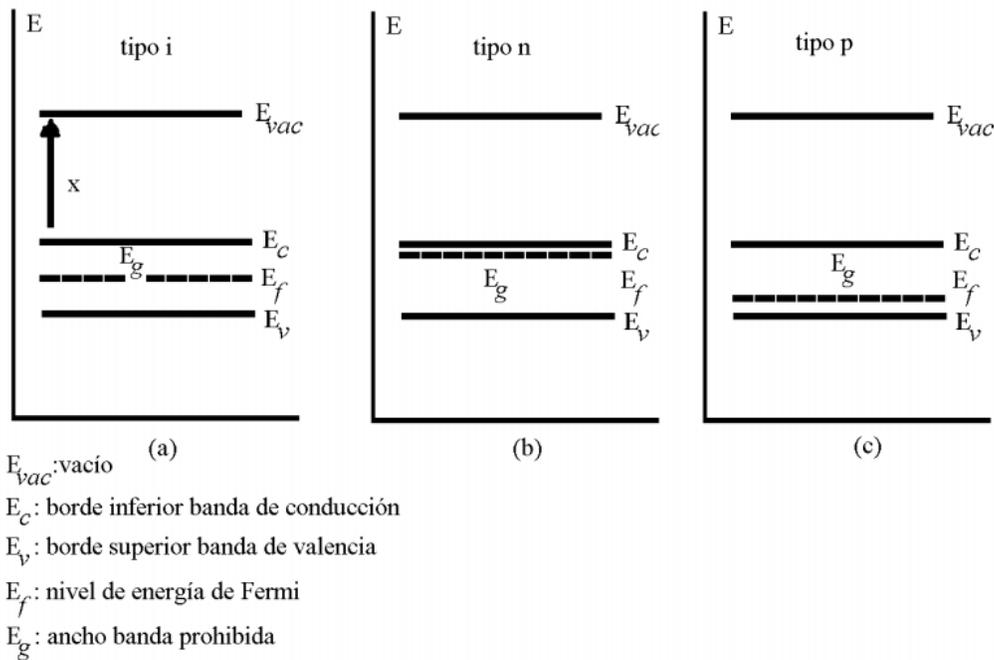
### 2.3 Física de celdas solares.

Las celdas solares son dispositivos de conversión directa que transforman la potencia del sol en potencia eléctrica DC. Puesto que la potencia  $P=IV$ , entonces es necesario comprender como se generan la corriente  $I$  y el voltaje  $V$  en la celda. A su vez,  $I$  es el resultado de cargas en movimiento en una dirección determinada. Bajo la acción de la luz, las cargas se vuelven libres, capaces de formar una corriente. Las cargas son dirigidas en una dirección

determinada para formar una corriente debido a la acción de un campo eléctrico creado en la celda.

Los semiconductores son materiales cuya resistividad eléctrica está entre  $10^{-4}$  y  $10^{10}$  W-cm, mientras que la resistividad de los metales varía entre  $10^{-4}$  y  $10^{-6}$  W-cm. Materiales semiconductores son, por ejemplo, Si, Ge, P, As; compuestos químicos como  $\text{CuAlS}_2$ , etc. A muy bajas temperaturas los semiconductores se comportan como aislantes, mientras que a altas temperaturas se puede llegar a comportar como metales. (S.Grove, 1967)

En los átomos libres, los electrones ocupan niveles discretos de energía. Al formarse el sólido, la densidad de átomos es del orden de  $10^{22}$  átomos/cm<sup>3</sup> y los átomos se aproximan entre sí, debido a la proximidad, los niveles discretos de energía de los átomos individuales se superponen formando zonas en donde los niveles están tan próximos que forman un continuum o banda. La Figura 2.4 muestra la estructura de bandas de energía de tres semiconductores.



**Figura 2.4** Estructura de las bandas de energía de tres semiconductores.

En este diagrama de niveles de energía se observan tres bandas: la banda de valencia cuyo borde superior es  $E_v$ , la banda prohibida entre  $E_v$  y  $E_c$ , y la banda de conducción entre  $E_c$  y  $E_{vac}$ .

La banda prohibida se denomina así porque los electrones no pueden tener energías dentro de los valores de la banda. Los electrones de la banda de valencia pueden hacer transiciones a la banda de conducción y viceversa.

La teoría de bandas explica la conductividad eléctrica de diferentes tipos de materiales. En los semiconductores a temperaturas de 0 K (Kelvin), todos los electrones se encuentran en la banda de valencia y por esta razón no hay conductividad. Esta aumenta a medida que aumenta la temperatura. La razón para ello es la presencia de electrones en la banda de conducción, todos excitados por efecto térmico. La conductividad eléctrica de un semiconductor puede aumentarse por acción de la luz, como se ve en la tabla 1.

**Tabla 1.** Conductividad (Fundamentos de celdas solares, H.Hovel, Solar Cells, Academic Press 1975 New York).

**Eg de Semiconductores**

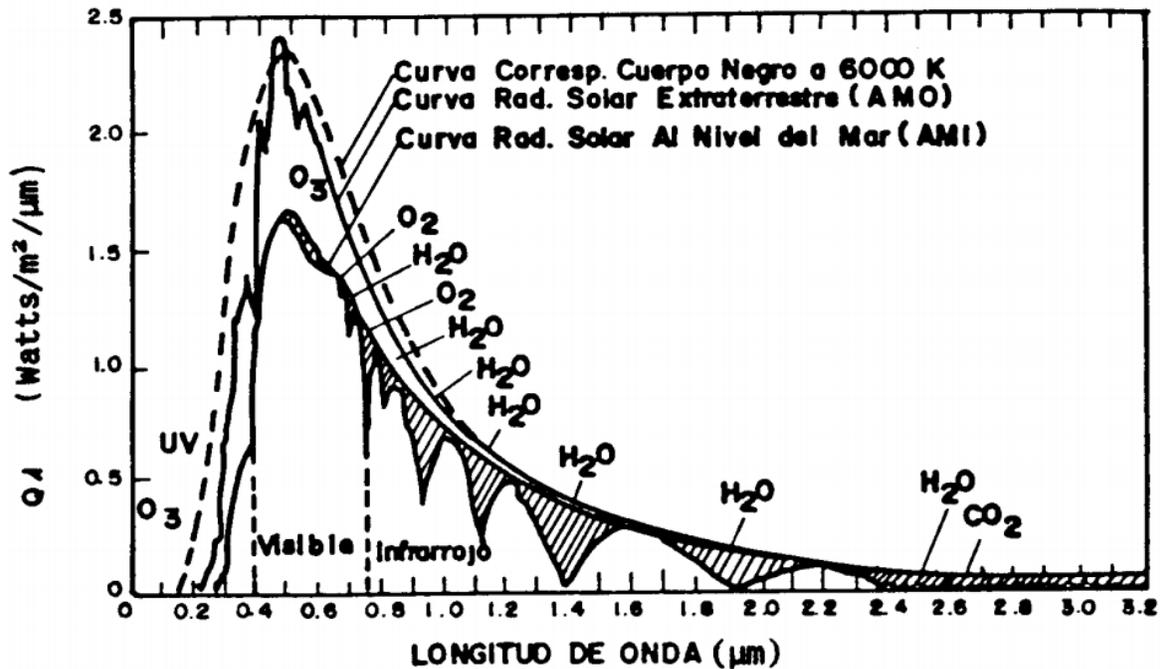
MATERIAL	$E_g$ (eV)
Si	1.14
Ge	0.67
GaA	1.4
GaP	2.25
Te	0.33
CdS	2.42
CdTe	1.45
CdSe	1,72
Cu <sub>2</sub> O	2.1
TiO <sub>2</sub>	3.0
Cu <sub>2</sub> S	1.2

La radiación proveniente del sol tiene una distribución espectral como se muestra en la figura 2.6.

Puesto que la energía de los fotones que componen la luz y la longitud de onda de la luz, están relacionadas por la ecuación  $E = h c / \lambda$  ( $h$ : constante de Planck =  $6.62 \cdot 10^{-34}$  J.s;  $c$  = velocidad de la luz =  $3 \cdot 10^8$  m/s), su energía está dada por

$$E = 1.24 \left( \frac{\mu\text{m}}{\lambda} \right) \text{ eV}$$

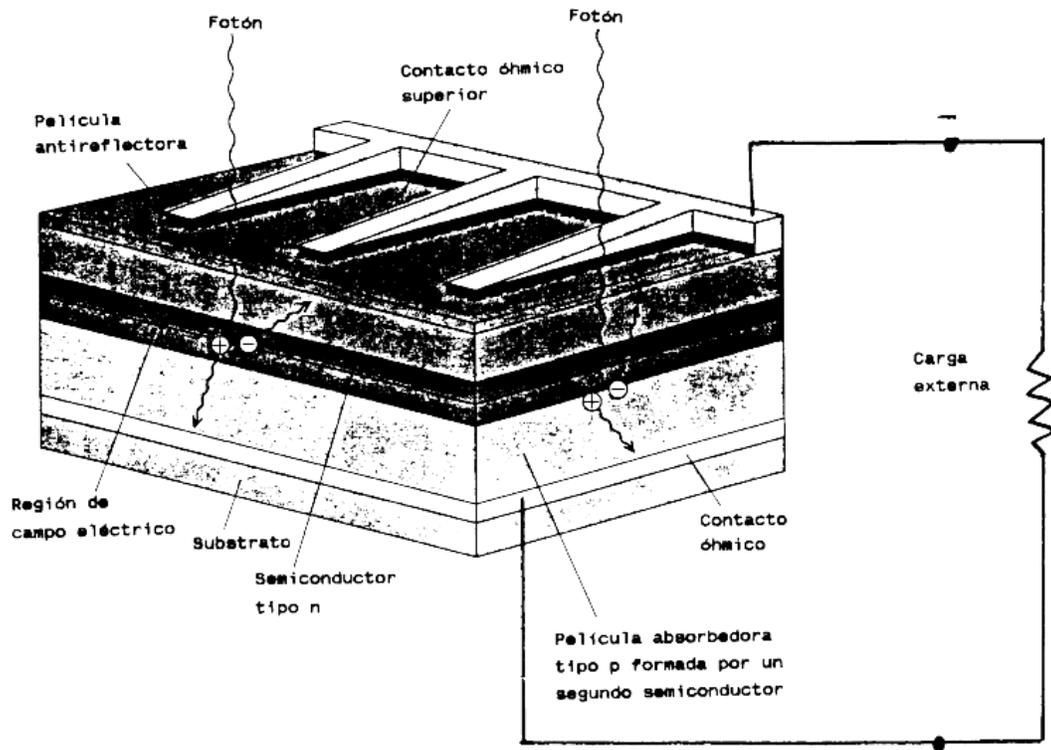
Los fotones más energéticos corresponden a las menores longitudes de onda (UV: Ultra violeta y color violeta) y los menos energéticos al infrarrojo y en el visible, al rojo, en la Figura 2.6 se muestra la distribución espectral de la radiación (Hovel, 1975).



**Figura 2.6** Distribución espectral de la radiación solar (Fundamentos de celdas solares, H.Hovel, Solar Cells, Academic Press 1975 New York).

## 2.4 Principios de funcionamiento.

Este campo eléctrico en una celda orgánica se puede generar mediante la unión de dos capas, como se observa en la Figura 2.7: una con un compuesto aceptor de electrones y otra con un compuesto dador de electrones. Un aceptor es un compuesto que debido a una gran electronegatividad o por resonancia extrae electrones de un sistema químico. Por otro lado, un dador es un compuesto que, por resonancia, dona electrones al sistema. Al poner en contacto las dos capas el proceso sólo ocurre en la interfaz que genera una diferencia de potencial, se puede ver como un dipolo, y sólo permite el flujo de electrones en un sentido. Para que un compuesto orgánico o inorgánico funcione como una celda solar, los materiales deben tener coeficientes de absorción altos (superiores a  $10^5 \text{ cm}^{-1}$ ). Pero además de esto se necesita que la movilidad de cargas y la diferencia de energía entre la banda de valencia y la de conducción cumplan ciertas condiciones. Si la diferencia de energía es muy alta este es el principal problema en la actualidad para compuestos orgánicos, la luz que se necesita entra en el rango ultravioleta, lo cual es un problema, pues este tipo de luz genera otros procesos dentro de la molécula que van a interferir con la eficiencia de la celda solar.



**Figura 2.7** Estructura de una celda solar ( Y. Hamakawa, “Photovoltaic Power”, Scientific American 1987).

La ecuación describe el circuito equivalente ideal de la celda solar anterior. Pero en efecto se presentan resistencias de tal manera que la corriente generada se ve disminuida. La celda solar es un generador de corriente ( $V$  casi constante) cuya corriente  $I_L$  es reducida por la corriente del diodo  $I_s$ . Las caídas de voltaje están representadas por las resistencias en serie y en paralelo  $R_s$  y  $R_{sh}$ . La corriente está dada por:

$$I = I_L - I_s \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + I R_s)}{kT} \right] - 1 \right\} - \frac{V}{R_{sh}} ; I_L = C R$$

## 2.5 Fabricación de celdas solares y *Light Soaking*.

Los pasos para la fabricación de celdas solares de Si cristalino de manera general consiste en lo siguiente (Moncayo, 2015):

1. Corte de oblea.
2. Eliminación de daños causados en aserrado, mediante ataque por agentes químicos húmedos.
3. Creación de la textura de superficie por ataque de solución alcalina.
4. Formación de la unión p-n por difusión de dopantes tipo n (Fósforo).
5. Aislamiento de bordes para evitar derivación.
6. Deposición de recubrimiento antirreflejo (SiNx).
7. Formación del contacto frontal por serigrafía.
8. Formación del contacto posterior por serigrafía.
9. Horneado de contactos metálicos.

### *Light Soaking*

El efecto de *Light Soaking* está relacionado con la capa del buffer (acoplador) de la celda solar. En la interfaz entre el CIGS y la capa de búfer se crea una barrera para los electrones, que impide el transporte de la CIGS a la capa TCO (dirección transparente Óxidos) y al circuito exterior. Esta barrera puede reducirse debido a los fotones entrantes que se absorben en la capa de búfer.

El efecto de la barrera debido a la capa del búfer se manifiesta en un degradado factor de relleno, con una forma de curva similar a la del exceso de resistencia de la serie (menor  $V_{mpp}$  y menor pendiente alrededor de VOC. Con el beneficio efecto de *Light Soaking* de luz conectado a la absorción en la capa de búfer, se conduce por la absorción de la luz en longitudes de onda más cortas.

El grado y la dependencia del tiempo del efecto *Light Soaking* depende principalmente en la dosis de la luz azul que el módulo recibe y el estado inicial de la capa de búfer. Dado que la capa de búfer es defectuosa dopado, en contraposición a la impureza de dopaje utilizado en tecnologías convencionales basadas en obleas,

Hay alguna variación en el dopaje dentro de la ventana de proceso. Esto significa que algunos módulos necesitan más foto dopaje a través de *Light Soaking* para lograr las condiciones de hetero unión ideales, otros están muy dopados desde el principio y responden menos al *Light Soaking*. Las variaciones en la Gap de la banda CIGS y el grosor de la capa de búfer también desempeñan un papel importante en cuánto rápido mejora el efecto de *Light Soaking* el rendimiento del módulo.

### ***Light Soaking* en otros tipos de dispositivos**

#### **Silicio amorfo**

El silicio amorfo (a-Si) es uno de los primeros tecnologías fotovoltaicas de película delgada y una degradación inducida por la luz, en el que las eficiencias se degradan por ~ 10-30% en los primeros varios cientos horas de *Light Soaking*. La degradación es debido al efecto Staebler-Wronski (SWE), primera vez observado como una reducción en la oscura conductividad y la fotoconductividad de a-Si:H después de la exposición a la luz, donde la degradación es reversible por el recocido en altas temperaturas. El SWE se produce debido a la ruptura recombinación-inducida de bonos Si-Si débiles por los portadores ópticamente excitados después de la Termalización, produciendo defectos los centros que reducen la vida útil del portador. Dispositivo recuperación se produce al recocido como defectos se curan.

#### **Telururo de cadmio (CdTe)**

Los dispositivos CdTe PV suelen contener una capa de tipo n en el búfer de CdS seguida de un CdTe tipo p capa de absorción y una metalización de contacto posterior capa para la colección actual. Con exposición a la luz a largo plazo, los dispositivos CdTe suelen mostrar la degradación del rendimiento debido cambios permanentes perjudiciales en el dispositivo. La difusión de los iones de Cu lejos de la metalización del contacto trasero en CdTe pueden

explicar muchos de los productos observados efectos de *Light Soaking* a largo plazo. La parte posterior contacto en CdTe forma una Unión de diodo de polaridad opuesta a la unión principal, limitando el rendimiento. La tasa de degradación aumenta con el aumento de la temperatura y es significativamente más rápido a 85-100 °c que, a temperaturas observadas durante el funcionamiento normal, la degradación del CdTe durante el *Light Soaking* se ve fuertemente afectada por la condición eléctrica de las bias en circuito-abierto los dispositivos que muestran una mayor degradación que los que operan a máxima potencia. Esto se cree que se debe al menos en parte al retraso de la migración de iones de Cu por los campos eléctricos cuando los dispositivos operan cerca de la potencia máxima (Sharma).

## **Capítulo III: Propuesta de medición de celdas solares CdS/CdTe.**

---

### **3.1 Introducción a la caracterización de dispositivos semiconductores.**

Caracterización: se define como “determinar los atributos peculiares de alguien o de algo, de modo que claramente se distinga de los demás”.

Para la caracterización de semiconductores y circuitos integrados se requieren herramientas para medir tensiones y corrientes, en esta tesis se utilizan las variables antes mencionadas y adicionalmente se utilizarán los valores de temperatura, intensidad luminosa y tiempo.

A partir de los datos recabados se concluye con la elaboración de curvas que describen el comportamiento de estas variables en diferentes etapas del proceso.

### **3.2 Curvas de caracterización.**

Las curvas de caracterización eléctrica son gráficas que describen el comportamiento de cierto dispositivo electrónico, con dicha información se puede evaluar el funcionamiento y compararla con los datos que proporciona el fabricante, así como en el proceso de fabricación indica el valor de las variables que modifican el desempeño y/o funcionamiento del dispositivo.

Las variables más comunes que presentan los fabricantes están:

- Voltaje
- Corriente
- Temperatura
- Tiempo

Una de las curvas característica de una celda solar es la curva de intensidad- voltaje, esta gráfica muestra los valores de tensión y corriente medidos a la salida del dispositivo, así

interpolando estos valores es posible obtener una curva característica. De la misma manera se obtienen más curvas a partir de los datos de las variables que están involucradas en el proceso.

Algunos efectos que intervienen en el rendimiento de las celdas solares son:

- Variación de la intensidad radiante.
- Variación de la temperatura.

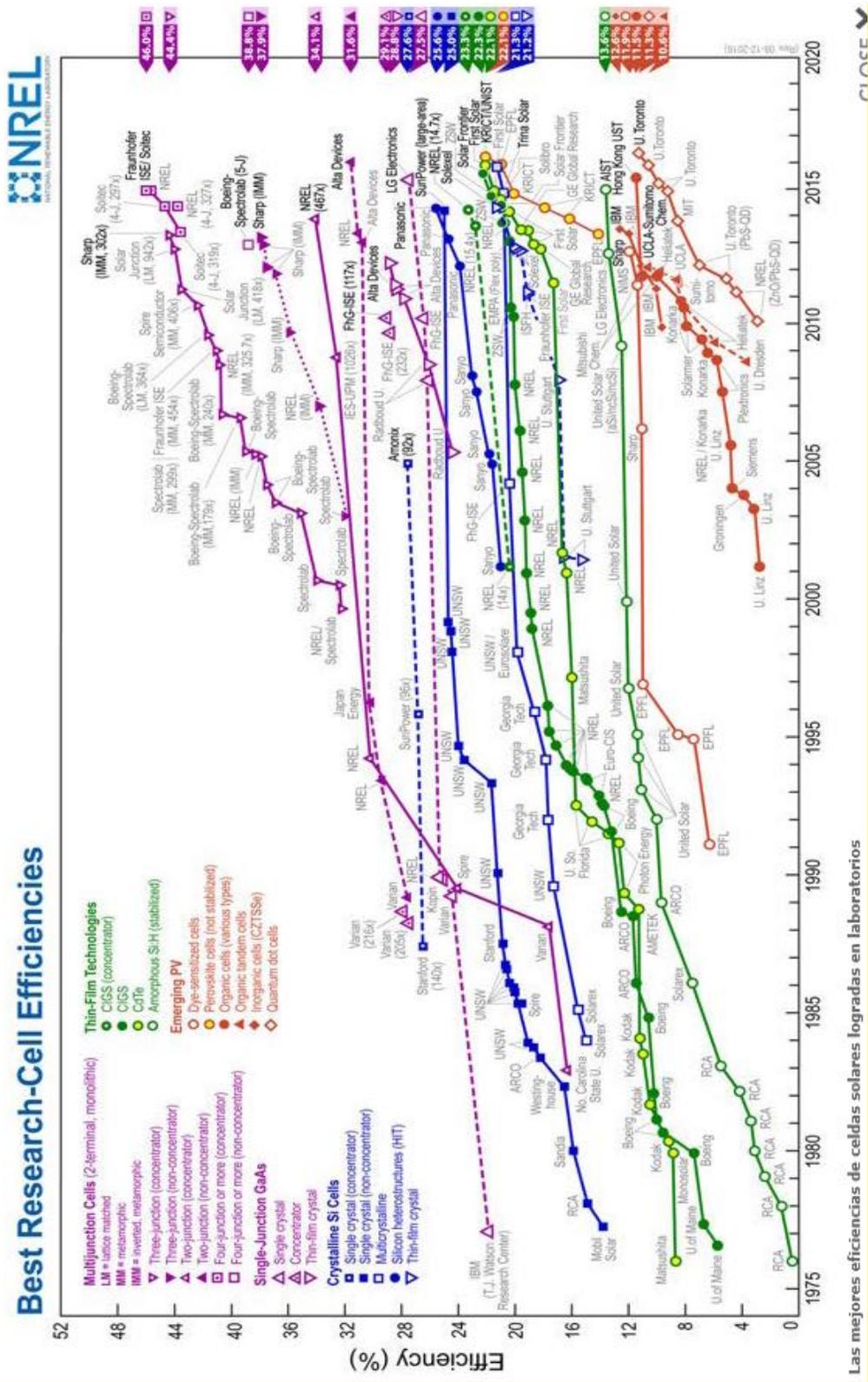
Para la caracterización del desempeño, para dicha gráfica se debe tomar en cuenta los valores de voltaje, corriente y tiempo, lo cual se resume en la gráfica de potencia-tiempo, esta permite valorar el proceso de fabricación y por tanto la eficiencia del módulo.

### **3.3 Eficiencias características.**

Para celdas de un elemento, William Shockley y Hans Queisser determinaron que teóricamente se puede convertir un máximo de 33.7% de la energía solar en electricidad. Para lograr más, hay que usar celdas combinadas de varias capas o de concentración. Para silicio, el elemento más usado, este límite es de 29% (Figura 3.1).

Para el uso común se usan paneles de silicio por su alta fiabilidad a precios razonables. Paneles de celdas monocristalinas son las más eficientes, seguidas por las policristalinas. Mientras los mejores paneles monocristalinos superan ligeramente el 20%, la mayoría de los paneles en producción hoy captan alrededor del 16% de la energía disponible de la luz. Los paneles amorfos y otros de capa fina pocas veces superan el 10%.

Para usos especiales (por ejemplo, satélites y el Mars Rover) se producen módulos de arseniuro de galio (GaAs) que alcanzan una eficiencia de 30% o unir varios elementos en células fotovoltaicas multifunción, superando 45% en laboratorios (Delta Volt, 2015).



**Figura 3.1** Eficiencias de conversión fotovoltaica de celdas solares  
 (<http://omicro.com/2015/10/solarcity-paneles-solares-mas-eficientes-del-mundo/>).

La radiación solar del sol es  $3 \times 10^{24}$  por año que es diez veces más grande que la demanda de energía actual. Utilizando la tecnología de unión de silicio difundido p-n, los laboratorios Bell diseñaron la primera célula fotovoltaica práctica en 1954 que tiene una eficiencia del 6%. Aunque la eficacia de la conversión de la luz a la electricidad de células solares basadas en silicio se ha alcanzado al 15%-20%. La necesidad de silicio altamente purificado, el uso de productos químicos tóxicos en su fabricación y el alto costo ha restringido su uso en todo el mundo.

Estas limitaciones alentaron la búsqueda de células solares ecológicas y de bajo costo. La historia del DSSC comenzó en 1972 con un electrodo sensibilizado. En los años siguientes se realizó una gran cantidad de investigaciones fundamentales sobre los cristales de óxido de zinc-single, pero la eficiencia de estos dispositivos fue deficiente.

También en 1991 las células solares de la eficacia del 7% fueron introducidas. Antes de DSSC, los RU-complejos fueron utilizados, que son incomparables con eficacia y estabilidad.

La Universidad Toin de Yokohama (Japón) ha logrado más de 6% de eficiencia de conversión en células solares flexibles completas basadas en tecnología de preparación de electrodos de  $\text{TiO}_2$  a baja temperatura. Peccell Technologies (Japón) han tenido éxito en el desarrollo del substrato flexible completo DSC con el tamaño de  $12\text{cm} \times 12\text{cm}$ , voltaje más de 4 V, 0.1 A actual y la eficacia de 4.3% ~ 5.2%. En China, los módulos DSC del  $15\text{cm} \times 20\text{cm}$  fueron preparados y montados al panel de  $45\text{cm} \times 80\text{cm}$  DSC, y la eficacia de los módulos y de los paneles de DSC es más el de 5%. En 2004, una vitrina DSSC 500W fue fundada y generó electricidad sin degradación del rendimiento hasta hoy. (Blessy Mathew, 2015)

Las celdas solares policristalinas del tipo CdS/CdTe han sido estudiadas por más de 30 años, de forma que se han obtenido incrementos continuos de la eficiencia de conversión de estos dispositivos. Teóricamente, para este tipo de celdas solares, en condiciones de iluminación AM1.5, se pueden obtener densidades de corriente de corto circuito ( $J_{sc}$ ) de 27 a 28  $\text{mA}/\text{cm}^2$  y voltajes de circuito abierto (VOC) mayores a 880 mV con eficiencias de más de 19 % ; sin

embargo, en la práctica solo se han podido llegar hasta el 16.5 % de eficiencia a nivel de celdas de laboratorio con sofisticados procesos tecnológicos (O. Vigil-Galan, 2003).

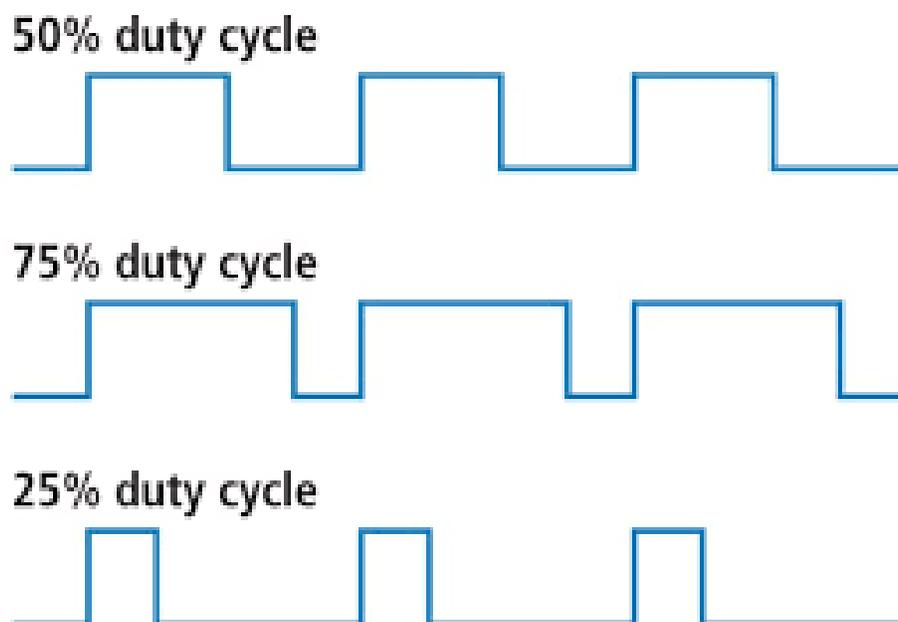
### 3.4 Curvas de calibración.

Las curvas de calibración son gráficas que representan el funcionamiento de un elemento del sistema, mediante el empleo de estas gráficas es posible calcular los tiempos en los cuales cada una de las variables llegará a su valor final.

Dentro de las curvas de calibración se tiene:

- Temperatura
- Intensidad luminosa
- Temperatura emitida por la lámpara
- Enfriamiento

La gráfica de calibración de temperatura muestra respuesta de la resistencia a diferente ciclo de trabajo (Duty Cycle) del PWM (Modulación por Ancho de Pulso) como consecuente modifica el tiempo en el cual alcanza su máximo valor y por ende la cantidad de calor disipada por la misma (Figura 3.2).



**Figura 3.2** Señal PWM a diferentes ciclos de trabajo.

De igual manera la curva de calibración para la intensidad luminosa representa la respuesta de la lámpara, dicha lámpara al ser un foco de descarga su control no permite variar la intensidad de la misma, la variación en la intensidad se produce mediante la implementación de un disco perforado en círculos el cual varía su tamaño con la finalidad de variar el área de flujo de luminosidad.

La curva de calibración propuesta con base en la temperatura emitida por la luz al interior del horno, dicha gráfica depende de la posición en la cual se encuentra el disco, misma que permite observar y determinar la cantidad de calor emitida por la lámpara y sus efectos como lo son:

- Ruido térmico
- Afectaciones a la temperatura emitida por la resistencia eléctrica

### **3.5 Metodología para la medición de la eficiencia de celdas solares CdS/CdTe mediante curvas de caracterización.**

Los subsistemas que se emplean son: control de iluminación, control de temperatura y sensor de temperatura, así como la instrumentación a utilizar. Es importante explicar que para la obtención de los datos se emplea dentro de la instrumentación sensores en cada uno de los subsistemas correspondientes.

Se define como metodología a los procedimientos y/o mecanismos empleados para un fin u objetivo que dirige una investigación, tareas, conocimientos o cuidados específicos.

En esta tesis se plantea como metodología el estudio del arte energía solar y celdas solares en específico a las celdas fabricadas en CdS/CdTe en el CINVESTAV Unidad Mérida el cual emplea una etapa llamada *Light Soaking* que consiste en la aplicación de temperatura e intensidad luminosa a la celda, se ha demostrado que la eficiencia en las celdas solares depende de su temperatura y que además la exposición influye en el rendimiento y la estabilidad.

Esta tesis plantea los requerimientos para instrumentar el proceso *Light Soaking*, mediante las variables de entrada/salida medidas propuestas para la caracterización de las celdas solares, se emplean curvas características que describen el funcionamiento de las mismas, todo esto es medido a través de pruebas integrales de funcionamiento y medidas de eficiencia a cada corrida o prueba hecha por el usuario, mismo que valora los resultados para de esta manera tener un registro de cada prueba y cada eficiencia obtenida, esto representa la creación de un manual de procedimiento de medición de eficiencia de celdas solares CdS/CdTe en la etapa *Light Soaking*.

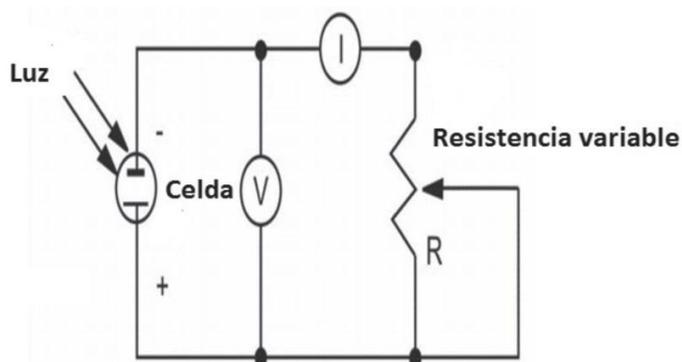
La metodología empleada en el modelo se describe en dos partes:

- Señales de la celda solar
- Instrumentación

En términos generales se describe los componentes o etapas que conforman a cada una.

### 3.5.1 Señales de la celda solar.

En la Figura 3.3 se muestra el diagrama de un circuito equivalente de una celda solar para un proceso de evaluación donde se ve la incidencia de la luz a la celda dependiendo de la intensidad de incidencia la resistencia es variable.

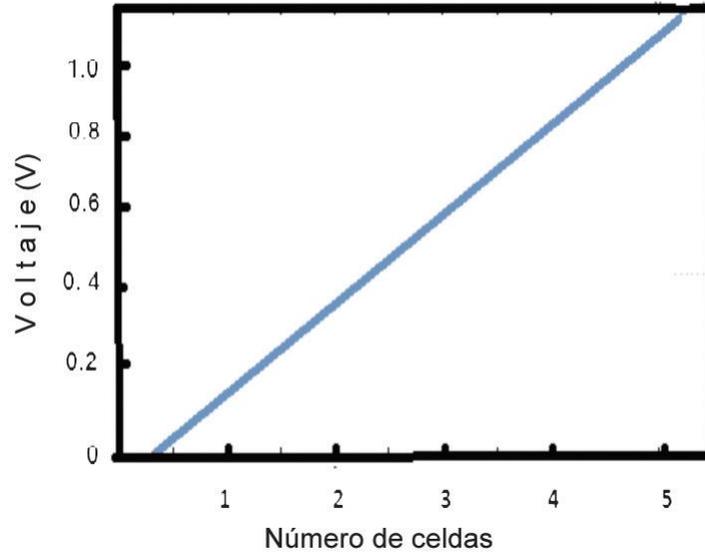


**Figura 3.3** Diagrama del circuito para la evaluación de la celda solar DSSC (SEKAR, 2010)

Una vez construida la celda, se procedió hacer las conexiones debidas para observar las características fotoelectroquímicas, tales como el voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ ), la corriente en corto circuito ( $I_{sc}$ ) y la potencia ( $P_m$ ). (Carbo Vela. P. C, 2012)

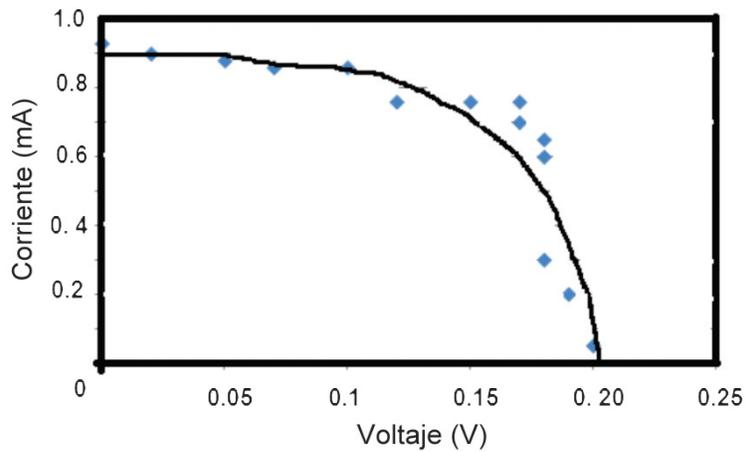
De la cita anterior el autor propone incrementar los valores de la resistencia de manera gradual por medio de un potenciómetro de 500 ohms.

La gráfica de la Figura 3.4, muestra el voltaje obtenido a partir de la conexión de varias celdas solares en serie, para dichas gráficas el autor realizó 11 pruebas.



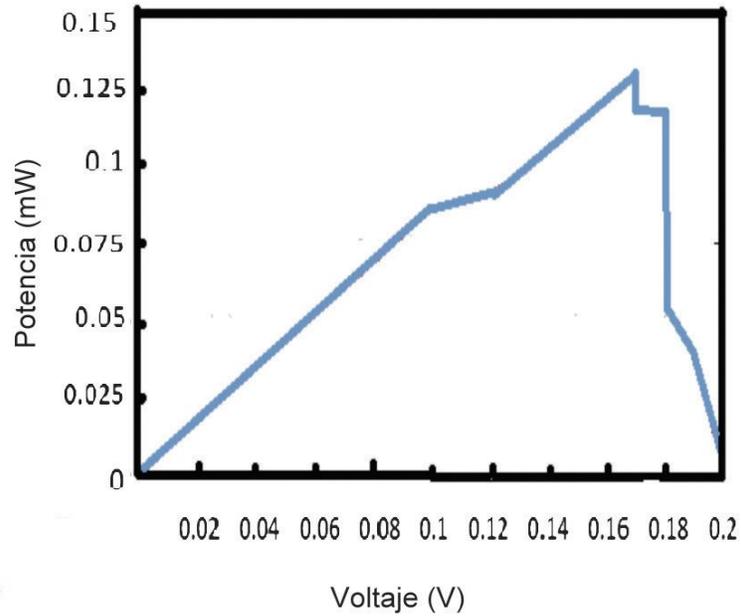
**Figura 3.4** Gráfica de la relación entre voltaje y el número de celdas conectadas en serie.

La Figura 3.5 muestra la gráfica de corriente vs voltaje de la cual se puede observar la relación que existe entre ellas, los datos obtenidos son mostrados en los puntos azules, la gráfica azul es la caracterización de la respuesta.



**Figura 3.5** Gráfica de la curva V-I de la celda DSSC con luz artificial.

En la Figura 3.6 se observa la gráfica de la potencia vs el voltaje obtenido donde se puede observar que hasta cierto voltaje la potencia cae de manera abrupta.



**Figura 3.6** Curva P-V de la celda DSSC con luz artificial.

### 3.5.2. Instrumentación.

La instrumentación electrónica se define como la técnica que se ocupa de la medición de cualquier tipo de magnitud física, de su conversión a magnitudes eléctricas y de su acondicionamiento para convertir los datos para un sistema de control o una persona.

La instrumentación para el prototipo está diseñada en tres partes las cuales permiten una valoración e informe del funcionamiento del sistema, el cual consiste en:

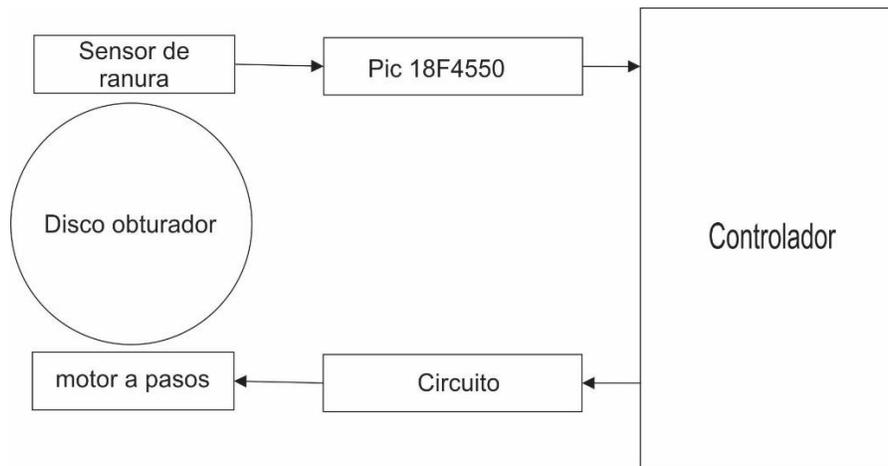
- Temperatura
- Iluminación
- Medición

La etapa que influye directamente en el modelo para la determinación de la eficiencia es la etapa de medición ya que mediante los datos obtenidos indica las características eléctricas de la celda solar como lo es:

- Voltaje
- Corriente

### 3.5.3 Subsistema de control de iluminación

El sistema general para el control de iluminación (Figura 3.7) consta de un disco el cual tiene orificios circulares de diferentes diámetros simulando el iris del ojo humano, de esta manera gradualmente deja pasar el rayo de luz emitido por la lámpara, mediante la implementación de un motor a pasos se hace girar este disco tomando en cuenta el número de pasos que le toma al motor dar una vuelta completa de esta manera se hace la relación de la intensidad luminosa respecto a la posición del disco.

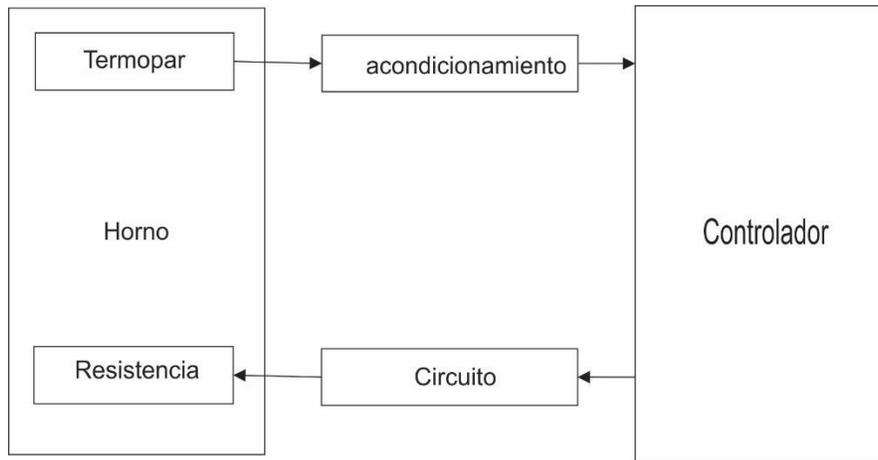


**Figura 3.7** Diagrama general para el control de iluminación.

La curva de respuesta determina la relación que existe entre la posición del disco y su correspondiente intensidad luminosa, de acuerdo a los requerimientos de luminosidad de los investigadores se ajusta el valor de la posición del disco en la interfaz.

### 3.5.4 Subsistema de control de temperatura y sensor de temperatura.

El diagrama general utilizado en el prototipo se muestra en la Figura 3.8 el cual consiste en un termopar tipo K que toma la lectura de la temperatura al interior del horno, se emplea un circuito para acondicionar la señal misma que es enviada al PIC18f4550, dependiendo de la cantidad de luminosidad deseada se posiciona el disco.



**Figura 3.8** Diagrama general para el control de temperatura.

### **3.6 Propuesta de gráficas de caracterización.**

Con base en el Capítulo II y a los requerimientos del grupo investigador del Cinvestav especialista en celdas solares, se procedió a proponer y trabajar una metodología para la caracterización de la celda solar con el fin de obtener las curvas características dependiendo de los factores de iluminación o temperatura. Debido a que el grupo de investigación no acudió a las instalaciones de la Facultad se realiza la metodología de calibración, la cual se describe en el Capítulo IV.

## **Capítulo IV: Implementación del modelo para la medición de la eficiencia de celdas solares CdS/CdTe mediante curvas de caracterización.**

---

### **4.1 Introducción**

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas que se realizaron con los circuitos de PWM, encendido de la lámpara, driver de motor a pasos, obturadores, medidores de corriente, voltaje y temperatura. Se describen los resultados de las pruebas; así como la calibración del circuito y las curvas obtenidas, mismas que sirven de metodología para el ingreso de los parámetros de funcionamiento con la finalidad de incrementar la eficiencia energética de las celdas solares. Al final se presenta la interfaz del sistema y la comunicación entre los circuitos mismos que están conectados al PIC 18F4550 y este a su vez a una Raspberry Pi3, esta última despliega una interfaz con la cual el usuario interactúa y permite la adquisición de datos o valores de las variables en tiempo real, así como un informe detallado del proceso, además que contiene los datos del operador y tiempo en el cual fue hecha la prueba.

El presente proyecto tiene como objetivo la creación de una metodología a seguir para la obtención de la caracterización de celdas solares CdS/CdTe, la cual permite al operador modificar los parámetros de funcionamiento del prototipo, los cuales influyen en las características eléctricas de la celda.

La razón por la cual se desarrolla esta metodología es para la obtención de curvas de caracterización de celdas solares fabricadas mediante el método *Light Soaking* mismas que ayudan a la determinación de la eficiencia eléctrica de las mismas. Estos son relevantes para la investigación las celdas de alta eficiencia ya que mediante los datos obtenidos se crea una gráfica la cual permite determinar los valores óptimos para una mayor eficiencia.

Partiendo de lo anterior se crea un manual de procedimiento de medición de eficiencia de las celdas solares.

## 4.2. Estructura del sistema para el proceso *Light Soaking*.

El prototipo (Figura 4.1) está diseñado para ayudar en la medición de la eficiencia de conversión fotovoltaica de una celda solar en función de la luz visible y la temperatura aplicada a una cámara de pruebas (1), los números entre paréntesis indican la ubicación de la pieza y/o parte de la estructura en la figura 4.1.

La cámara de pruebas está construida a partir de cuatro paredes (1), un piso y un techo (2) hechos de un tambor de lámina metálica en cuyo interior contiene fibra de vidrio para reducir las pérdidas de calor al interior de la cámara de pruebas, el techo de la cámara tiene una apertura en la parte superior de tal forma que permita la salida de aire procedente de la cámara de pruebas.

En la parte central inferior dentro de la cámara de pruebas se encuentra una parrilla (26) colocada horizontalmente (1). Sobre la parrilla se encuentra un soporte de vidrio, sobre el cual se encuentra la celda solar (61) la cual tiene una superficie o terminal positiva y otra negativa en donde se aplica el haz luminoso (18) mediante un par de lámparas (14) cuyo haz se dirige mediante un espejo (15).

La cámara de pruebas (1) tiene una puerta (27) que permite introducir y extraer la celda solar, dicha cámara carece de una ventana que permita el paso de luz ambiental al interior ya que esta radiación alteraría la radiación producida por las lámparas al interior.

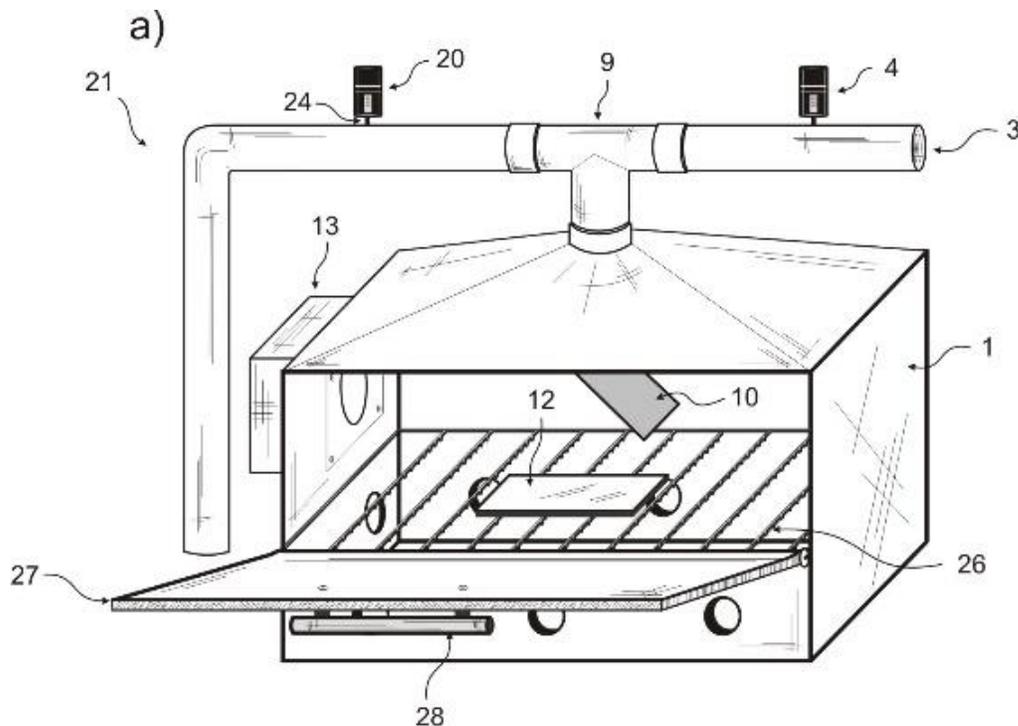
Dicha cámara tiene una apertura de aire caliente (3) la cual permite el flujo de aire al exterior de la cámara. Existe un medio de conducción (81) el cual contiene un servomotor (4) cuyo eje está unido a un obturador (30) el cual tiene 2 posiciones una permite el flujo de aire y la otra obstruye el flujo del mismo.

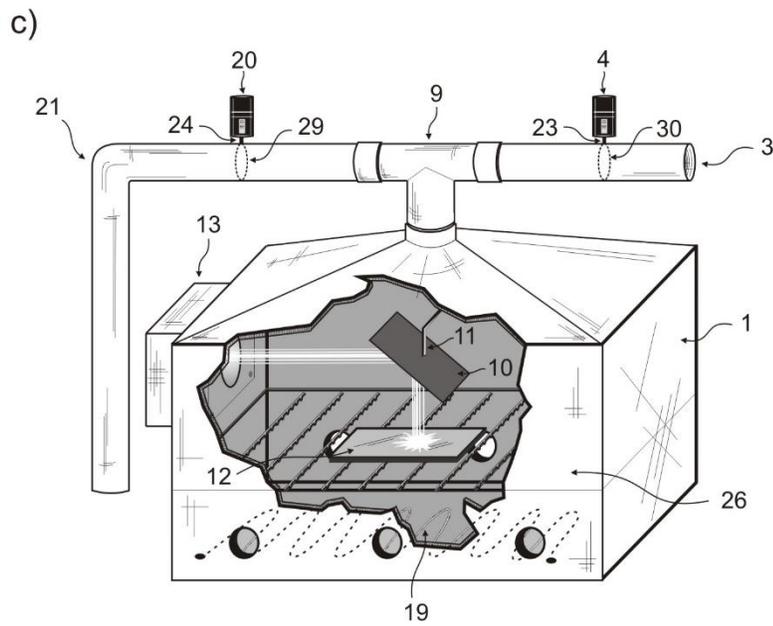
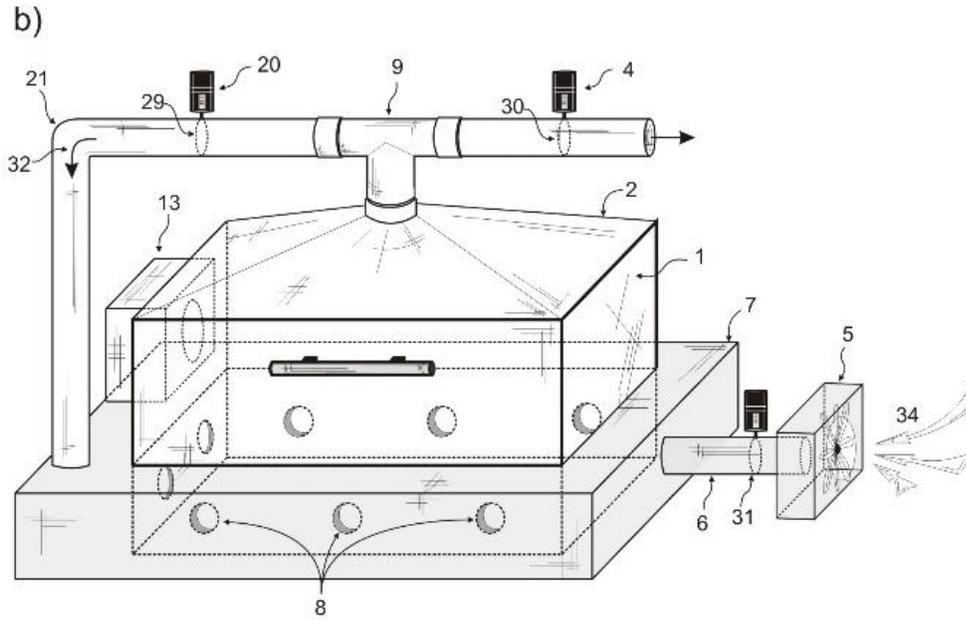
El sistema que permite la regulación de la temperatura consiste en la aplicación de calor proveniente de un resistor eléctrico (19) que eleva la temperatura al interior de la cámara de pruebas, cuando se requiere disminuir la temperatura al interior de la misma un ventilador (5) introduce aire proveniente de la atmosfera (80) a la cámara de circulación de aire (7) a través de un tercer medio de circulación (6) situado en la parte derecha inferior en el exterior de la cámara teniendo en su extremo el ventilador (5), en (6) se tiene el tercer servomotor

(22) el cual en una primera posición el disco obturador permite el flujo de aire , mientras una segunda posición de dicho obturador impide el flujo de aire.

El circuito que controla la temperatura se basa en un resistor eléctrico al cual se le aplica una señal PWM (modulación por ancho de pulso), dicha señal se conecta a través de un manejador del mosfet IRF640 en configuración conmutación inferior. Para el control de la intensidad luminosa se utiliza un circuito de detección de cruce por cero el cual servirá como señal de sincronía a un PIC18F4550, mismo que envía la señal a la Raspberry y esta misma devuelve una señal que llegará a un triac donde éste permitirá el flujo de corriente a las lámparas pudiendo en ésta la señal modificar su forma recortándola y por consiguiente cambia la intensidad luminosa de las lámparas (Javier, Laura, & Mireya, 2018).

Figura 4.1 se muestra la estructura del sistema abierto y cerrado para el proceso *Light Soaking*.





**Figura 4.1** Estructura del sistema. (a) Estructura abierta; (b) Estructura cerrada; (c) visualización interior-exterior (Javier, Laura, & Mireya, 2018).

### 4.3 Estructura de las tablas en la interfaz.

La interfaz es una base de datos la cual indica el estado en tiempo real de las variables de medición, así como los parámetros de funcionamiento, dicha interfaz facilita al usuario la operación del horno permitiendo elegir los parámetros de funcionamiento tanto para intensidad luminosa como para temperatura, dichos valores pueden ser distintos, en cualquiera de los casos permite modificar la pendiente ascendente, la pendiente de ascenso, el valor final o meta, así como la pendiente de descenso y su correspondiente tiempo de descenso.

Dicha interfaz está compuesta por cinco tablas, las cuales contienen los datos tanto del operador como el valor de las variables físicas a medir, estas cinco tablas son:

- Corrida
- Estados
- Parámetros
- Sesiones
- Usuarios

Dentro de la tabla “*Corrida*” encontramos 6 campos de lectura, los cuales son:

**Tabla 2** “Corrida”.

<b>Campo</b>
Id_Corrida
Tiempo
Luz
Temperatura
Corriente
Voltaje

*Id\_corrida* es un índice auto incremental y el mismo nombre indica en cuál de las 5 tablas nos encontramos, el campo *Tiempo* contiene un registro llamado fecha y hora dichas variables se registran al momento de realizar la prueba y estas se escriben de acuerdo a la

fecha y hora de mismo, el campo **luz** describe la intensidad luminosa al interior del horno medida en lúmenes, **Temperatura** describe la cantidad de energía disipada por la resistencia al interior del horno medida en grados centígrados, **Corriente** es un parámetro el cual indica la cantidad en miliamperes medido en la celda solar este parámetro es medido mediante un sensor de corriente conectado a la misma celda, **Voltaje** es la diferencia de potencial medida en la celda solar a través de un voltímetro colocado fuera del horno.

Una segunda tabla llamada “Estados” contiene 4 campos los cuales son:

- Id\_variable (índice auto incremental)
- Variable (despliega la Tabla 3 Variable)
- Valor
- Leer (contiene solo valores de 1 ó 0; 1 para actualización de valores y 0 cuando los valores se han actualizado)

**Tabla 3** “Variable”.

<b>Variable</b>
Hora
Temperatura
Luz
Servo1
Servo2
Servo3
Vent1
Corriente
Voltaje
SPTemperatura
SPLuz

Contiene los parámetros siguientes; **Hora** la cual despliega la hora y fecha de la última actualización de los estados, **Temperatura** indica la temperatura ambiente al interior del

horno (mas no en la resistencia) en grados centígrados, **Luz** indica la intensidad luminosa al interior del horno medida en lúmenes (esta intensidad varía dependiendo de donde este colocado el sensor), **Servo1**, **Servo2** y **Servo3** indica el estado de cada uno de ellos donde; “1” es abierto y “0” es cerrado, esto es susceptible de modificarse, **Vent1** medido en porcentaje donde “0” es apagado y “100” es pleno funcionamiento esta variable modifica las revoluciones del ventilador de enfriamiento colocado en la parte inferior derecha del horno, **Corriente** despliega el valor medido en miliamperes en la celda solar, **Voltaje** es el valor medido en la celda solar en unidades de volts, **SPTemperatura** es el set point instantáneo el cual establece el valor de 0 a 100 (porcentaje) el cual determina el ciclo de trabajo del PWM aplicado a la resistencia que calienta el horno en su interior, **SPLuz** es un porcentaje que determina la intensidad de luz de la lampara, este valor modifica la posición del disco que permite el paso de la luz, este contiene una malla perforada con diferentes diámetros de perforación que permiten/obstruyen el paso de la luz.

La tercera tabla despliega 3 campos:

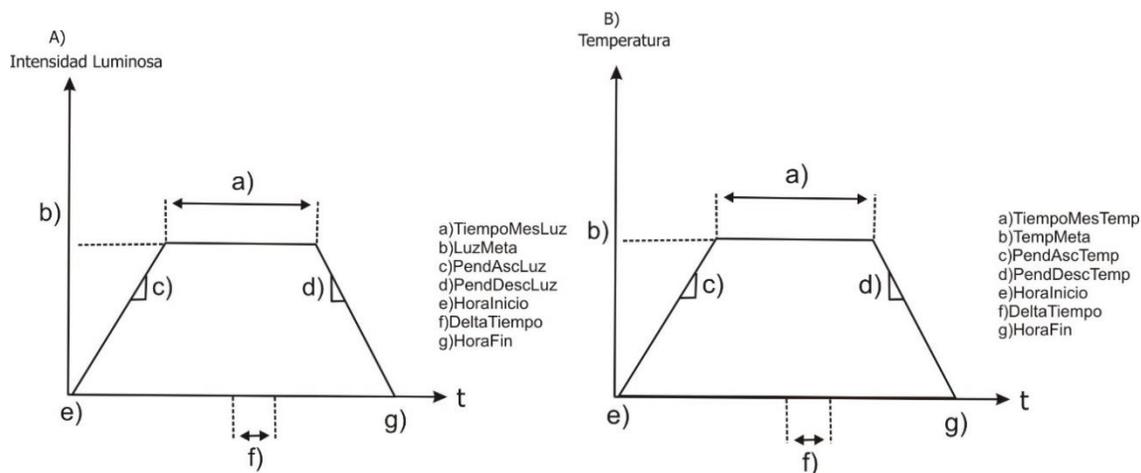
- Id\_param (índice auto incremental)
- Parámetro (despliega la tabla 4 Parametro.)
- Valor (valor del parámetro de operación)

**Tabla 4** “Parámetro”.

<b>Parámetro</b>
TempMeta
LuzMeta
DeltaTiempo
HoraInicio
HoraFin
PendAscLuz
PendDescLuz
TiempoMesLuz
PendAscTemp
PendDescTemp

TiempoMesTemp
ContorIPTemp
ControllTemp
ControlDTempo

Para entender mejor la tabla anterior se muestra en la Figura 4.2 algunos de los parámetros de operación.



**Figura 4.2** Modelo de operación del horno. (A) Modelo ideal de la intensidad luminosa; (B) Modelo ideal de la temperatura.

De la figura 4.2 A) y B) se observa que *PendAscluz* y *PendAscTemp* son pendientes de ascenso de luz y temperatura respectivamente, estos valores pueden ser ingresados por el operador, *LuzMeta* y *TempMeta* son aquel valor que debe alcanzar al interior del horno respectivamente para intensidad luminosa como para temperatura, *PendDescLuz* y *PendDesTemp* es la razón de descenso de intensidad luminosa y temperatura respectivamente, estos valores tienen la característica que pueden ser ingresados por el operador o calculados a partir de otros valores. *DeltaTiempo* indica el intervalo de muestreo tanto para temperatura como para intensidad luminosa, al momento de iniciar la corrida el

existe un registro que indica la hora en la cual se inició la corrida “**HoraInicio**” y por correspondiente al final de la corrida la hora queda registrada el campo “**HoraFin**”.

La cuarta tabla despliega 6 campos:

- Id\_sesiones (índice auto incremental)
- Usuario
- FechaInicio
- Param\_resum
- Corriente
- Voltaje

El campo **usuario** indica el nombre de la persona que realizo la corrida, **fechaInicio** indica la fecha y hora al momento de realizar la corrida, **Param\_resum** es una cadena que contiene los valores de los parámetros de operación en el orden de la tabla **parámetros**, **Corriente** muestra la corriente medida en la celda solar, **Voltaje** muestra el valor medido en la celda solar.

La quinta tabla despliega 4 campos:

- User\_id (índice auto incremental)
- Nombre (nombre del usuario)
- Password (contraseña del usuario)
- Permiso

Permiso tiene dos posibles acciones:

- 1=lectura/ escritura
- 0= solo lectura

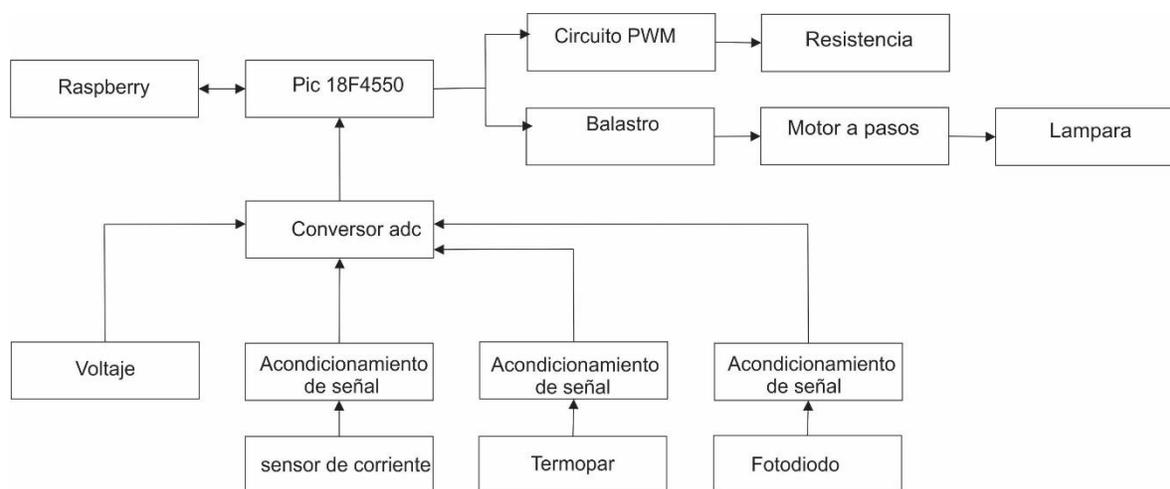
Lo anterior permite al usuario modificar los *Parámetros* en caso que campo *Permiso* tenga un “1”, y para sólo obtener los valores el campo *permiso* tendrá el valor “0”

#### 4.4 Implementación de circuito eléctrico para el horno.

El presente capítulo presenta las etapas de control y potencia para cada una de las variables que intervienen en la operación del horno. Mediante el diagrama a bloques es más visible cada etapa de esta, donde las principales etapas para encender la lampara y calentar el horno contienen una etapa de retroalimentación que regresa al Pic, esto con la finalidad de mantener la estabilidad en cada una de las variables ya que esto puede afectar al rendimiento y eficiencia de las celdas solares.

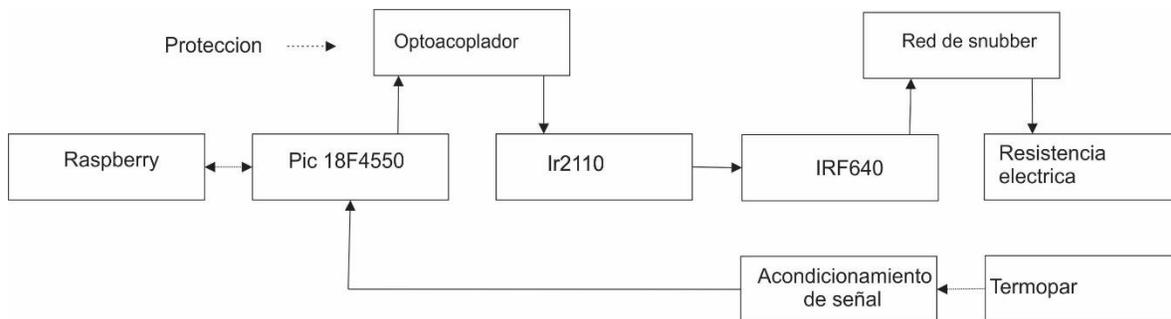
El acondicionamiento de los sensores se describe en el presente capítulo, es decir el acondicionamiento electrónico o mecánico.

La Figura 4.3 muestra el diagrama a bloques de los diferentes elementos que intervienen en el funcionamiento del horno:



**Figura 4.3** Diagrama general a bloques de todos los elementos.

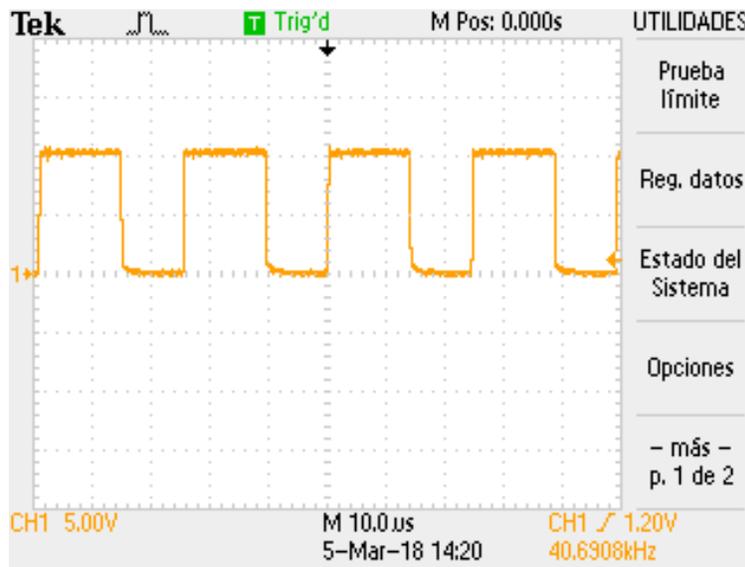
La etapa de calentamiento se compone de un circuito que por medio de un circuito IR2110 genera un PWM (Modulación por ancho de pulso), éste a su vez está conectado a un transistor IRF640 configurado en conmutación superior con una resistencia eléctrica misma que calienta el interior del horno como se muestra en la Figura 4.4.



**Figura 4.4** Diagrama a bloques para la etapa de calentamiento.

La primera prueba de instalación de la resistencia eléctrica consistió en una parrilla hecha a base de varillas de vidrio (Figura 4.6) empotradas a las paredes inferiores del horno, sobre esta estaba colocada tres resistencias eléctricas conectadas en serie y puestas en zigzag para lograr una mayor disipación de la temperatura sobre toda el área, de esta forma se pretendió homogenizar la temperatura al interior del mismo.

Aplicando el circuito de PWM a la resistencia se observó que la respuesta fue favorable sin embargo éste emitía un ruido debido a la frecuencia de conmutación la cual era de 20 kHz misma que aún es perceptible al oído humano (algunos casos), debido a esta observación se decidió aumentar la frecuencia de conmutación al doble 40 kHz (Figura 4.5).



**Figura 4.5** Frecuencia de conmutación en el osciloscopio (Pruebas obtenidas en el laboratorio de la facultad de ingeniería de la UAEMex)

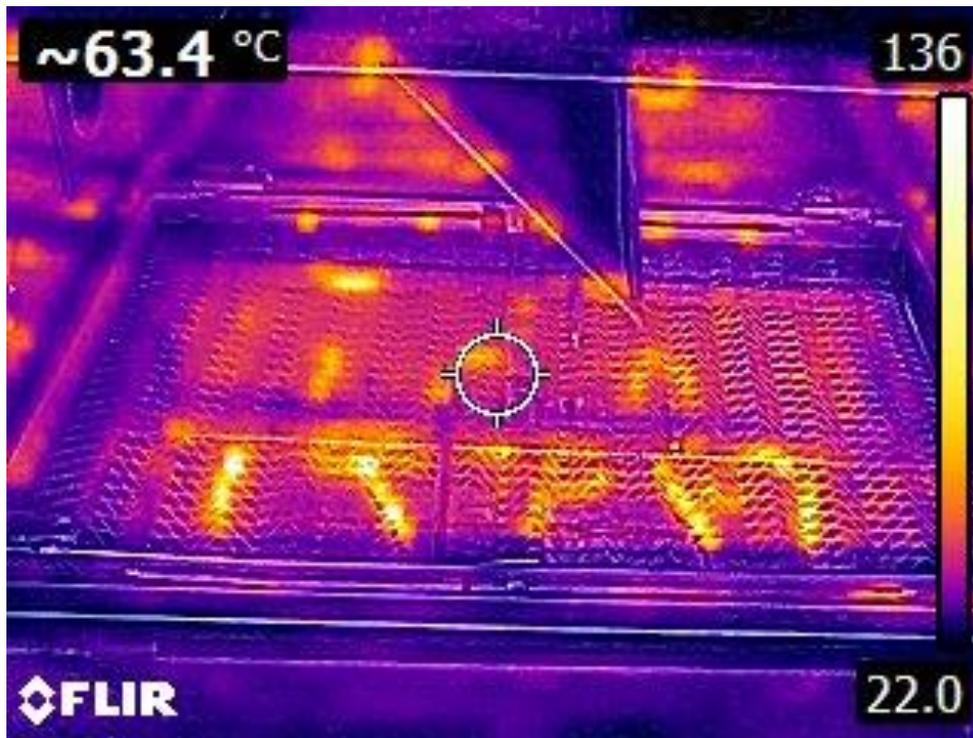
En la Figura 4.6 se muestra las resistencias eléctricas en serie, las resistencias fueron soldadas entre sí, de igual manera en los extremos se soldó cable de calibre grueso para permitir el flujo de corriente y facilitar el funcionamiento del circuito.

Para las pruebas hechas funcionó perfectamente sin embargo presentó una desventaja, la cual era que la base era muy frágil y propensa a romperse, debido a las propiedades y características del vidrio este comienza a deformarse perdiendo su rigidez.



**Figura 4.6** Parrilla de varillas de vidrio con las resistencias en serie.

En la Figura 4.7 se muestra el funcionamiento de las resistencias puestas en marcha dentro del horno.

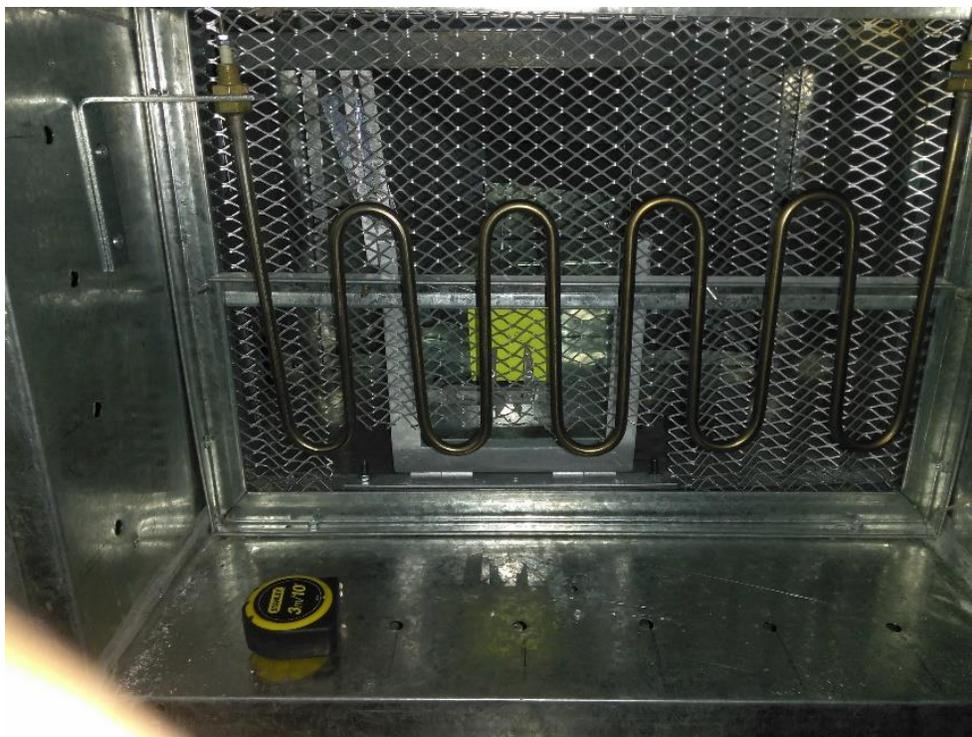


**Figura 4.7** Resistencias en serie funcionando al interior del horno.

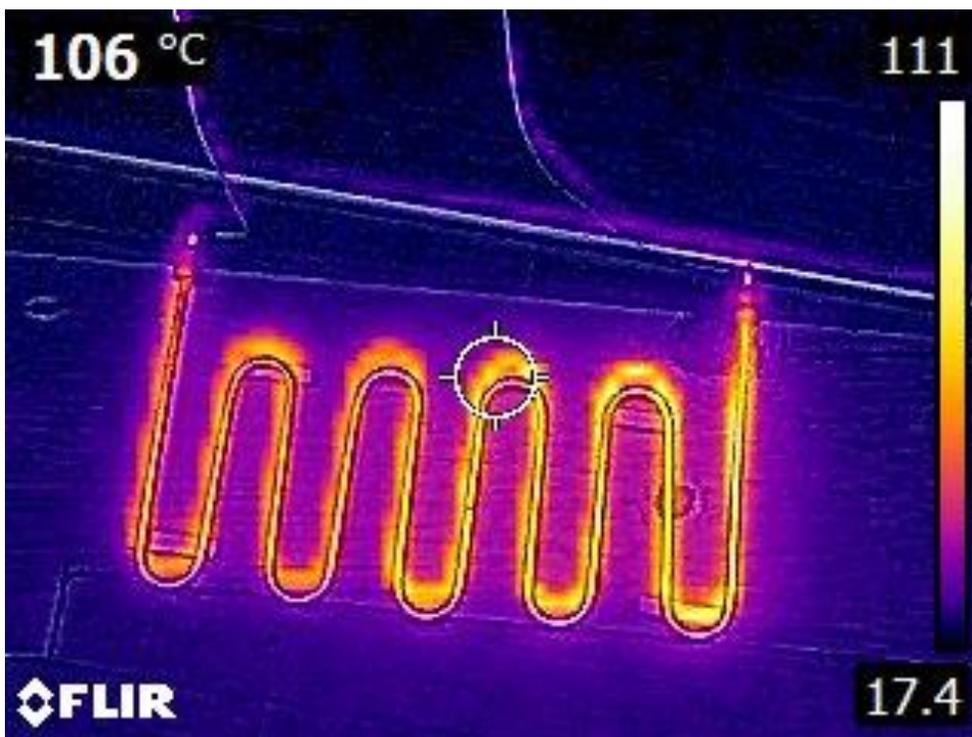
En una segunda prueba se utilizó una resistencia eléctrica de forma tubular de acero inoxidable mostrada en la Figura 4.8, se observa una sola pieza con bornes en los extremos donde llega los pulsos PWM provenientes del circuito, esta resistencia está hecha para trabajar con un voltaje 220v y una potencia aproximada a los 3000 watts.

Las características de fabricación no afectan de manera significativa al funcionamiento ya que la resistencia no trabaja al 100% y se requiere temperatura relativamente baja.

a)



b)

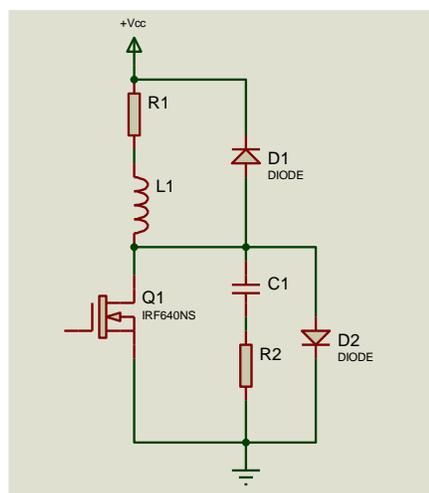


**Figura 4.8** Resistencia tubular; a) resistencia montada en la parte inferior del horno, b) prueba de funcionamiento de la resistencia fuera de la estructura.

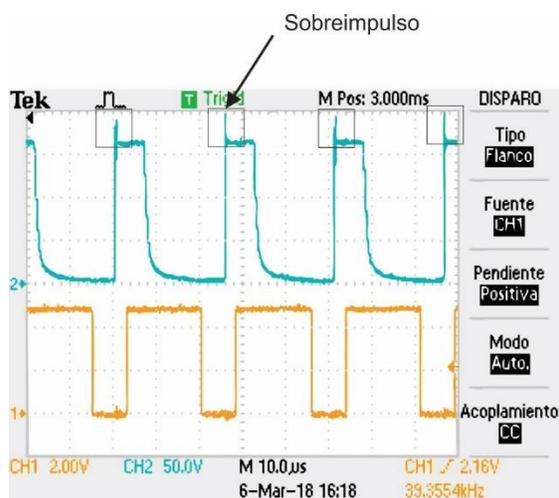
La segunda etapa de construcción consiste en una red de snubber (Figura 4.9) la cual se encarga de “amortiguar” los picos de voltaje (Figura 4.9) al momento de estar conmutando la línea de voltaje rectificada que va hacia la resistencia, la línea de entrada es de 130v y ya rectificadas son 170v, el sobre impulso llega a tener una diferencia de voltaje de 70v, la red de snubber elimina este sobreimpulso para tener una conmutación con forma de onda cuadrada con voltaje constante.

La red de snubber está calculada de acuerdo a los parámetros del IRF640 cuyas características están en la hoja de datos proporcionada por el fabricante, adicionalmente se incluyen los datos de la resistencia, como lo son la inductancia, la potencia y la corriente consumida.

a)



b)

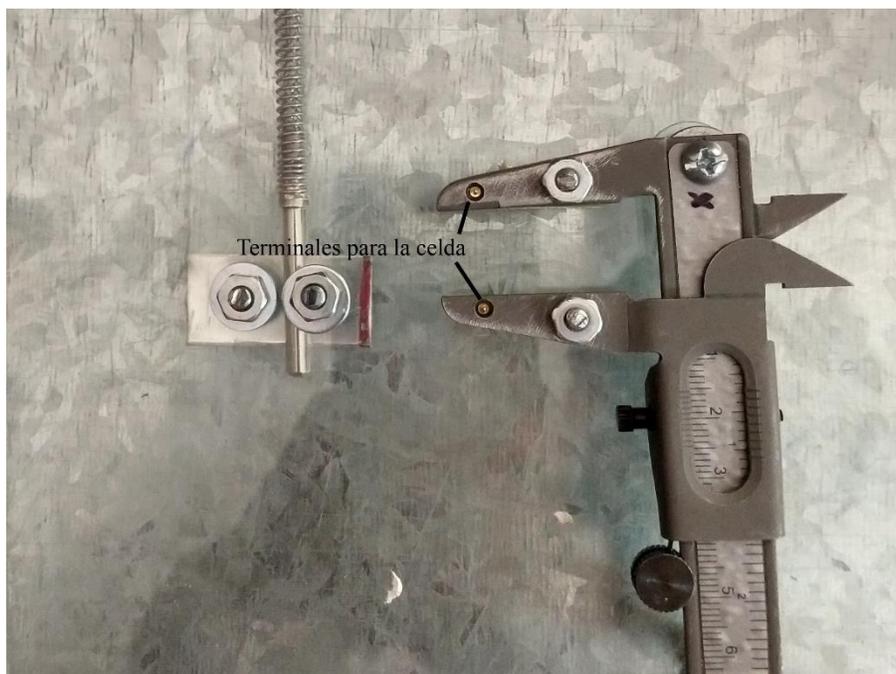


**Figura 4.9** Protección para IRF640; a) red de snubber; b) sobreimpulso al momento de la conmutación.

## 4.5 Implementación de la instrumentación

Con base en los requerimientos para las gráficas de caracterización se emplean los instrumentos de medición en cada etapa

En el caso de la medición de temperatura se empleó un termopar tipo k debido a las características que presenta en la Figura 4.10 muestra la implementación del termopar, se colocó cerca de la celda solar para de esta forma medir la temperatura más aproximada a la celda solar.



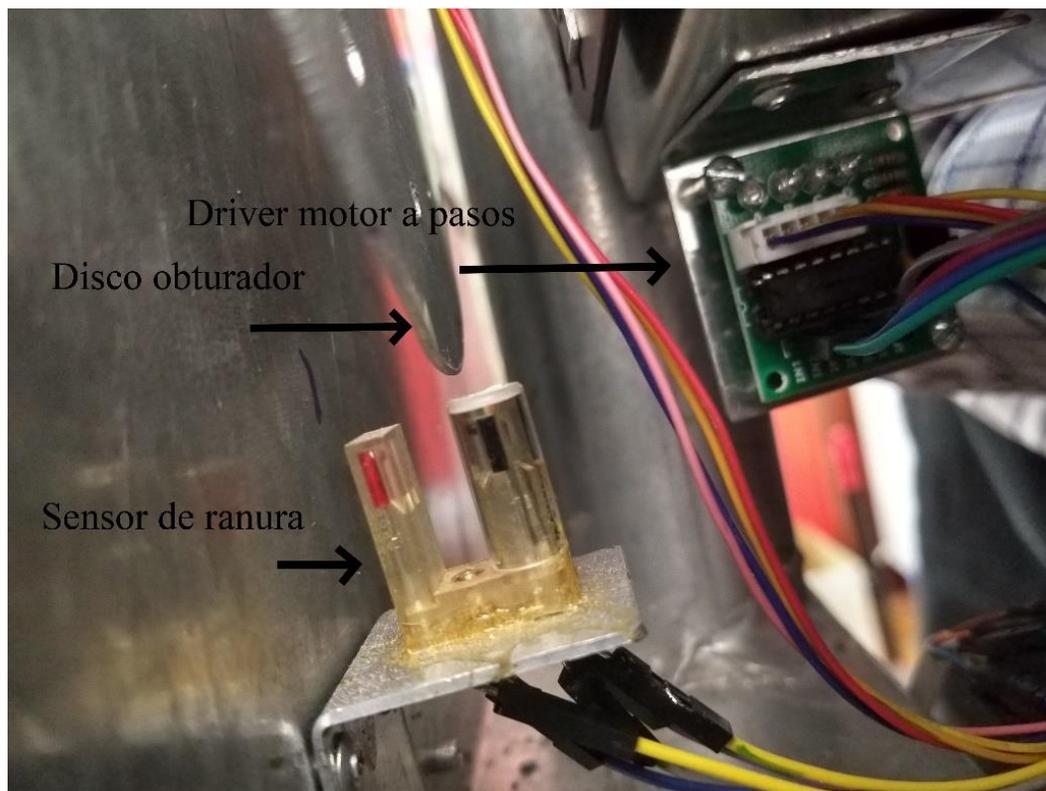
**Figura 4.10** Ubicación del Termopar Tipo K.

El control de iluminación está instrumentado a partir de la graficas de respuesta del disco obturador medidas independientemente, dichas gráficas son dependientes de la posición del disco obturador.

La parte de instrumentación y control del disco está dada por un driver de motor a pasos el cual controla la posición del disco, misma que se controla por el número de pasos que

requiere el disco para dar un giro completo, la manera de identificar cuando el disco ha dado un giro completo es a través de un sensor de ranura que envía un pulso al PIC 18F4550 al momento que éste se ve obstruido por una ceja propia del disco.

En la figura 4.11 se muestra parte de la instrumentación al sistema de control de iluminación.



**Figura 4.11** Ubicación del driver para el motor a pasos y el sensor de ranura.

## 4.6 Curvas de calibración

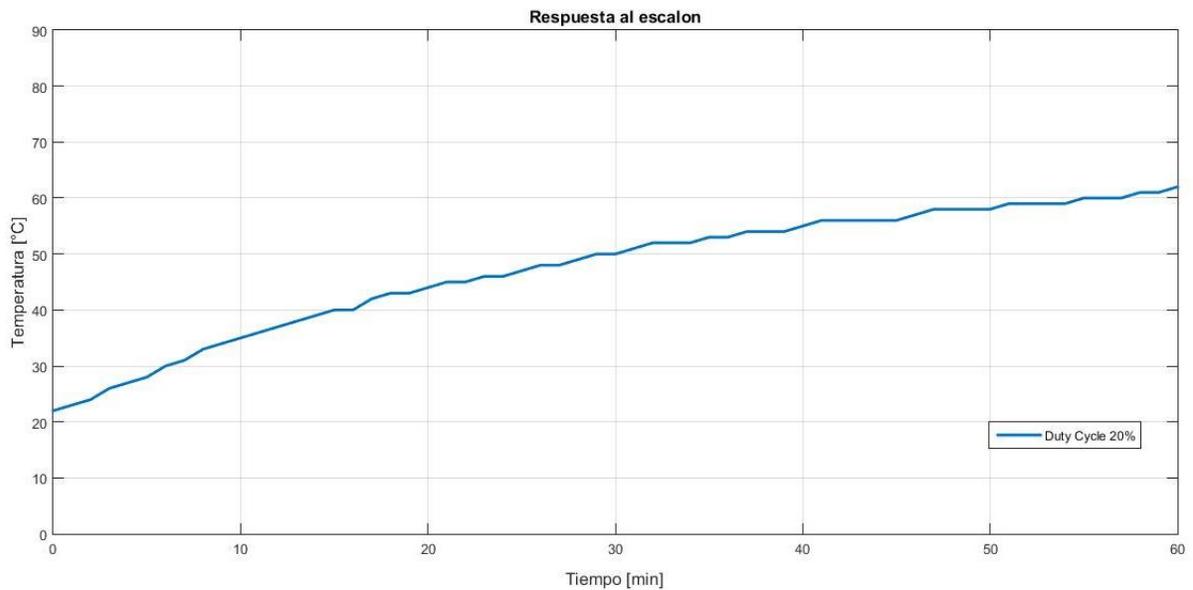
### 4.6.1 Curvas de calibración de temperatura

La curva de calibración de temperatura permite observar la respuesta que tiene la resistencia implementando el circuito de PWM (modulación por ancho de pulso) a diferentes ciclos de trabajo (Duty Cycle).

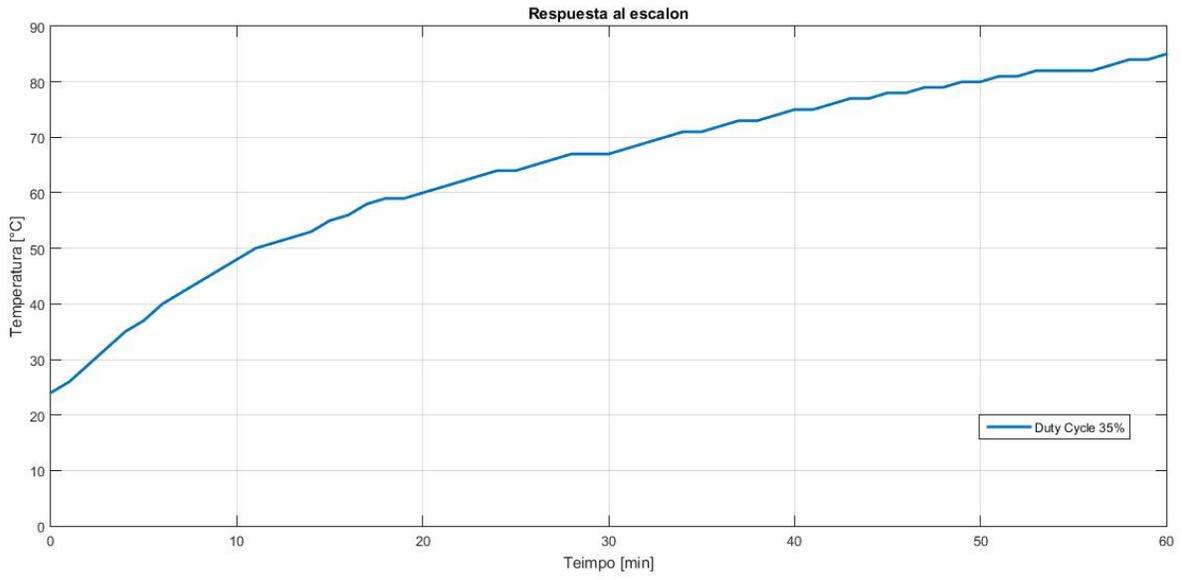
Un circuito PWM modifica el ancho del pulso, proporcionando una fracción del voltaje de alimentación, este circuito permite controlar la temperatura de la resistencia basándonos en su ciclo de trabajo.

La curva obtenida a partir de la respuesta al escalón permite anticipar su comportamiento para pruebas posteriores, así como obtener un modelo matemático para el control del PWM empleado y así mejorar la respuesta.

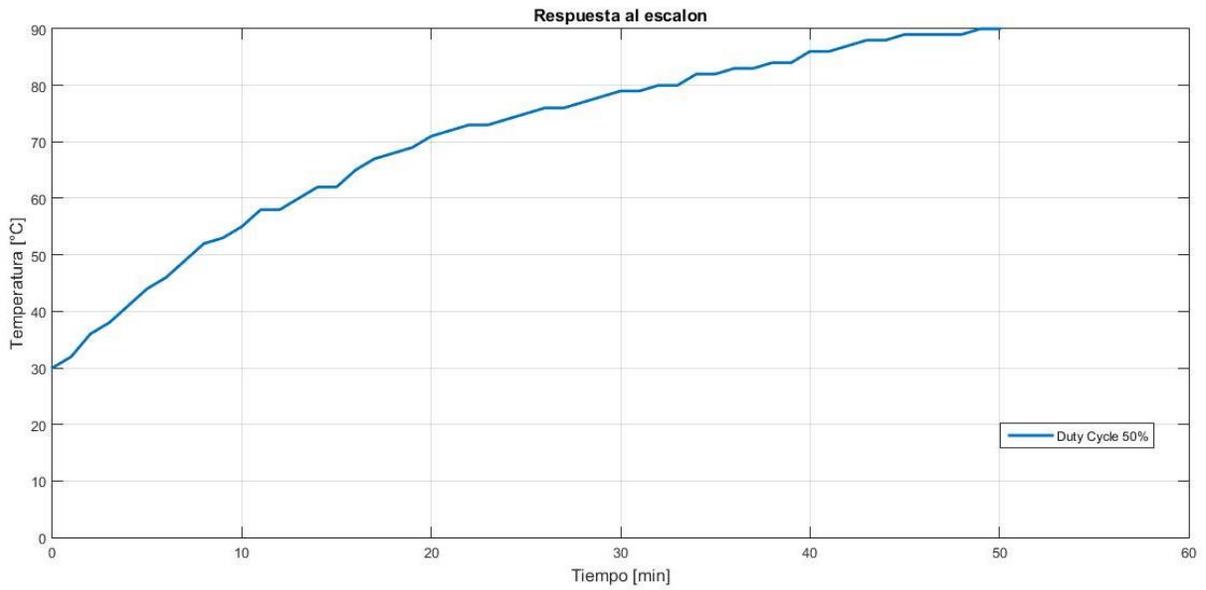
De la Figura 4.12 a la 4.16 muestra el comportamiento o respuesta de la resistencia variando en ciclo de trabajo.



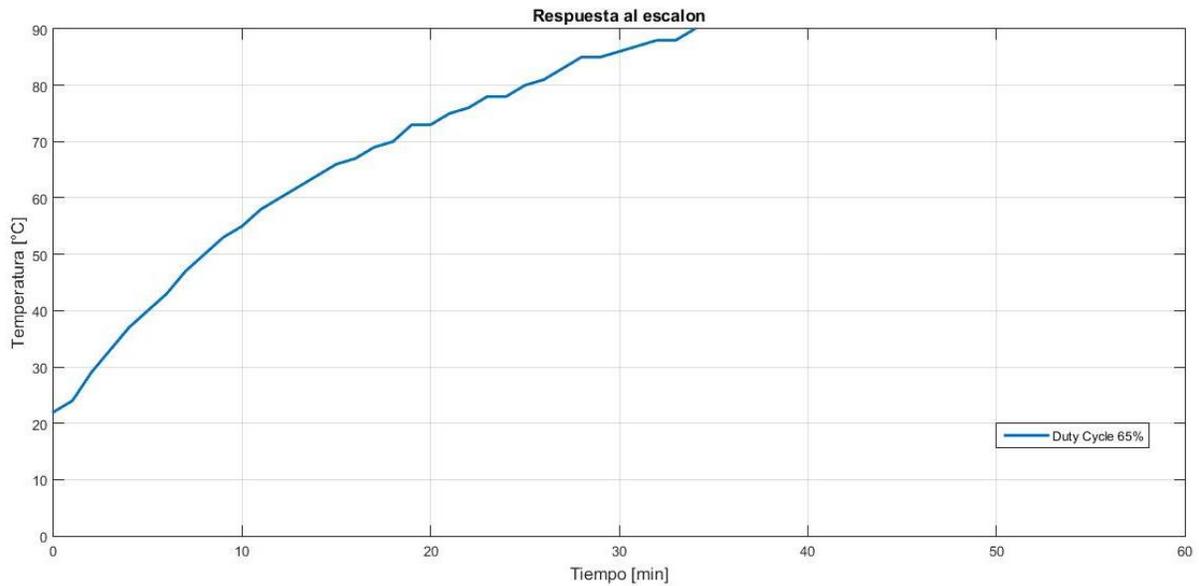
**Figura 4.12** Respuesta de la resistencia con el ciclo al 20%.



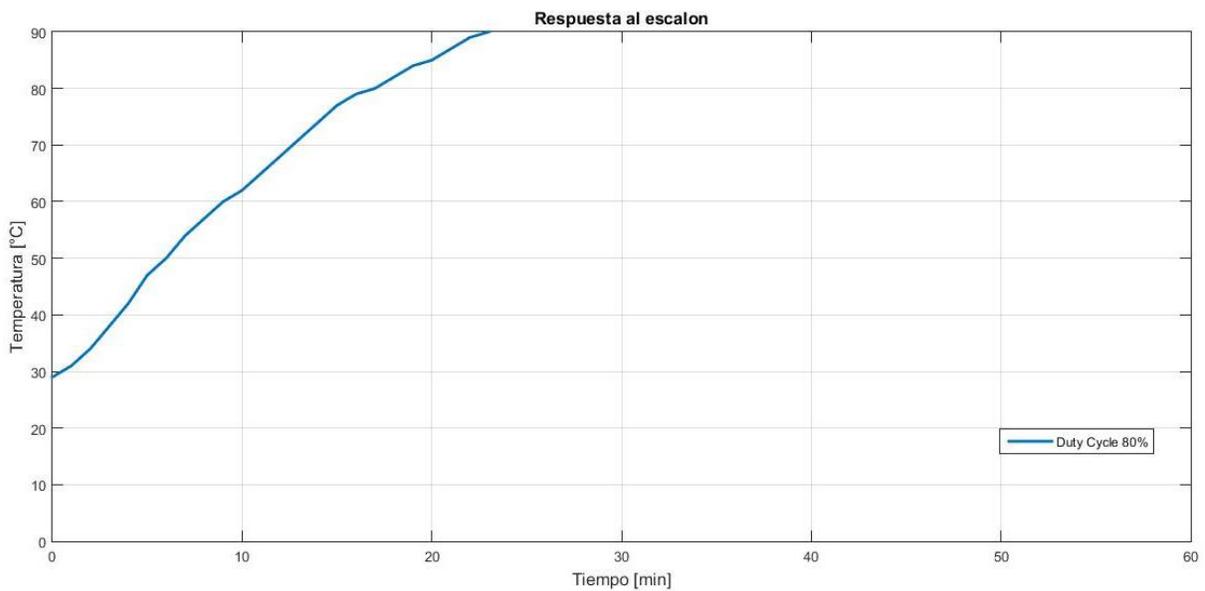
**Figura 4.13** Respuesta de la resistencia con el ciclo al 35%.



**Figura 4.14** Respuesta de la resistencia con el ciclo al 50%.

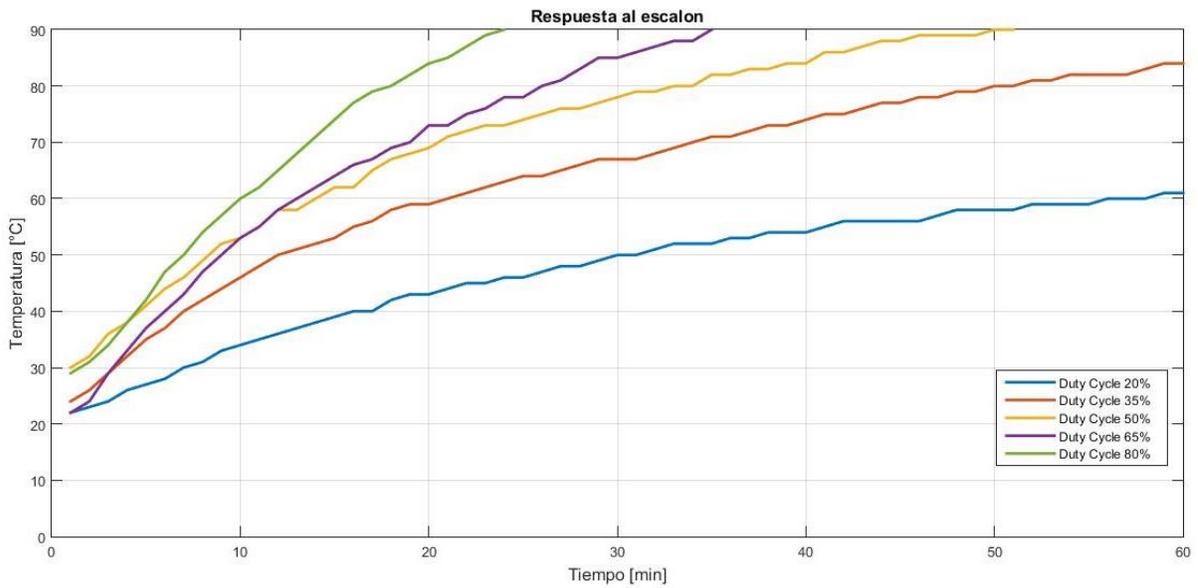


**Figura 4.15** Respuesta de la resistencia con el ciclo al 65%.



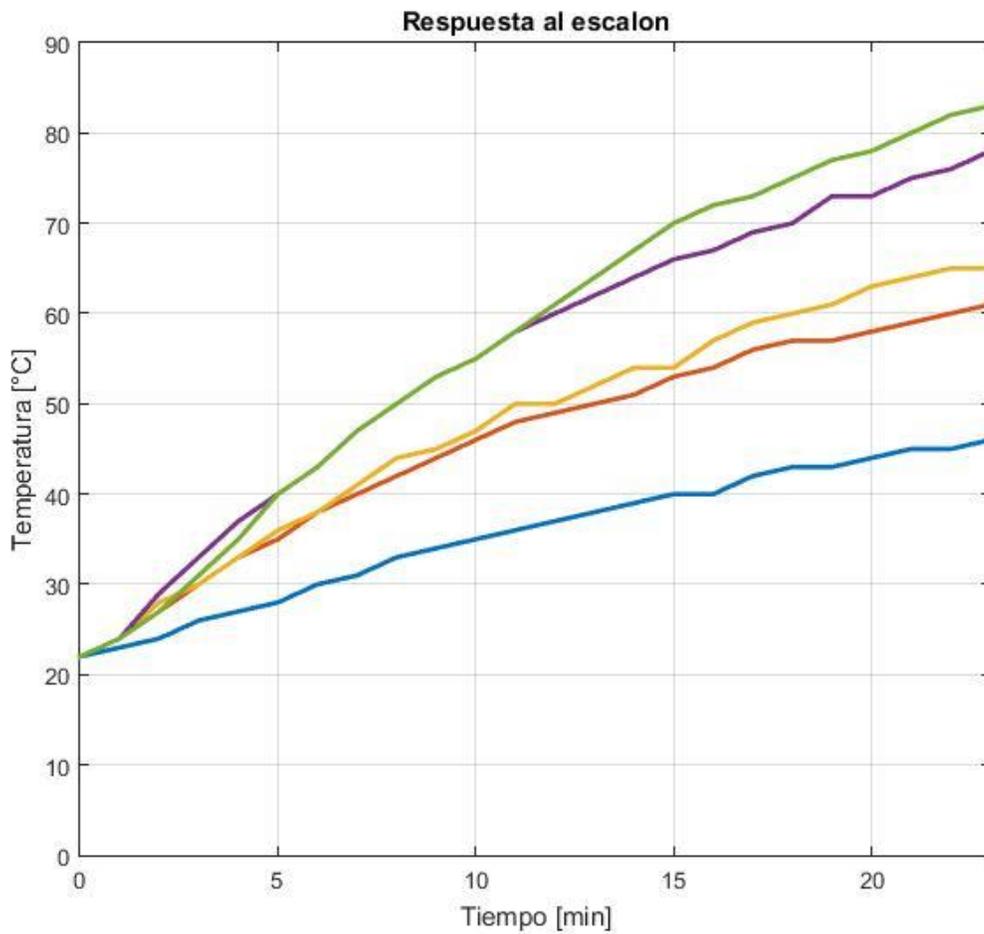
**Figura 4.16** Respuesta de la resistencia con el ciclo al 80%.

En la Figura 4.17 se muestran las respuestas obtenidas a partir de los diferentes ciclos de trabajo, se observa el tiempo en el cual alcanza la temperatura de 90°C y en el caso de un par de ella se corta el tiempo a una hora.



**Figura 4.17** Respuesta al escalón.

La Figura 4.18 muestra la respuesta al escalón con pruebas hechas con diferentes anchos de pulso comenzando en un valor inicial de temperatura y parando la prueba a un tiempo de 30 minutos.



**Figura 4.18** Respuesta al escalón.

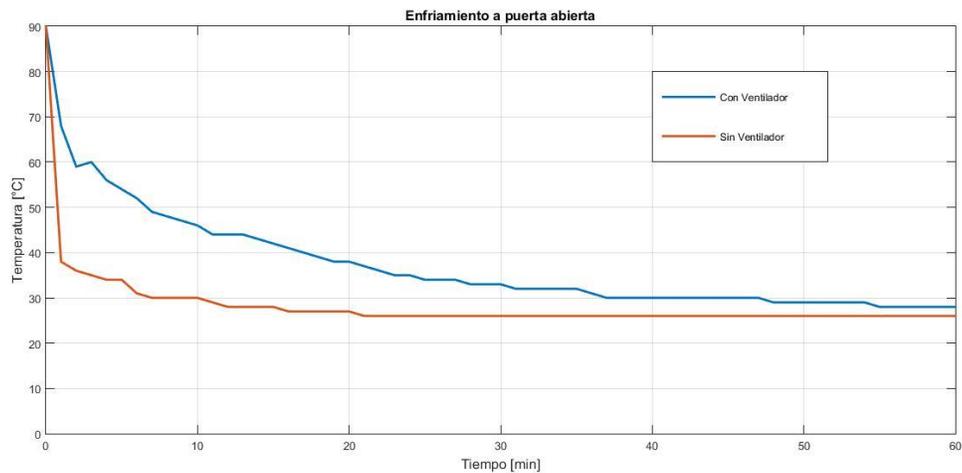
#### 4.6.2 Curvas de calibración para el enfriamiento

La Figura 4.19 se obtiene a partir de los datos de temperatura que envía el termopar colocado al interior del horno el cual, para la obtención de esta grafica se comenzó a una temperatura al interior de 90°C, se observa el grafica una caída de temperatura durante el intervalo de los

primeros minutos lo cual corresponde al instante en el cual la puerta es abierta. En los siguientes minutos se muestra como la temperatura desciende gradualmente hasta alcanzar el tiempo de 60 minutos.

La grafica mostrada en color azul (ubicada en la parte superior) muestra el enfriamiento con el ventilador encendido y la gráfica de color rojo (ubicada en la parte inferior) muestra el enfriamiento sin ventilador. Sin embargo, se puede observar que aun con empleando un ventilador la temperatura no desciende con mayor rapidez si no que tarda más en llegar a temperatura ambiente.

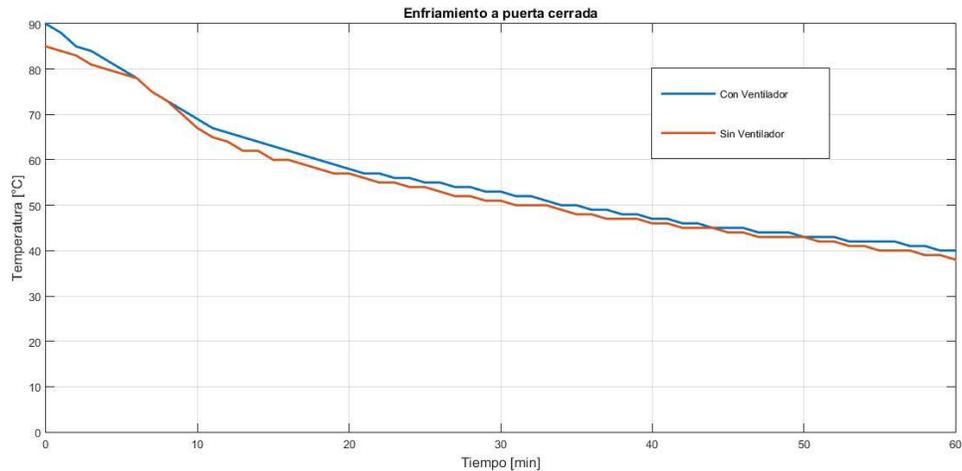
Debido a este resultado se llega a la conclusión que el enfriamiento es más rápido sin ventilador a causa del diseño del prototipo y más aún porque el aire caliente asciende y sale por el tubo colocado en la parte superior, para el caso en el cual el ventilador este encendido se concluye que esta mezcla el aire del interior con el introducido por el mismo y no lo expulsa inmediatamente fuera del horno.



**Figura 4.19** *Enfriamiento a puerta abierta.*

La Figura 4.20 muestra los datos obtenidos de la respuesta del enfriamiento a puerta cerrada, en ella podemos observar don condiciones: con ventilador y sin ventilador.

Se observa que al igual que la figura 4.19 la temperatura al interior desciende ligeramente más rápido sin el empleo del ventilador, a diferencia de la figura 4.19 se observa que este enfriamiento llevado a cabo con la puerta abierta reduciendo el tiempo de este proceso.



**Figura 4.20** *Enfriamiento a puerta cerrada.*

### 4.6.3 Curva de calibración de Intensidad luminosa

La curva para calibración de temperatura es la curva de respuesta de la lámpara, esta curva se basa en la cantidad de intensidad luminosa que pasa por el disco obturador, el valor de cada medida es tomado en la posición que se encuentra el orificio y en el caso de la temperatura se esperó a que el valor se estabilizará.

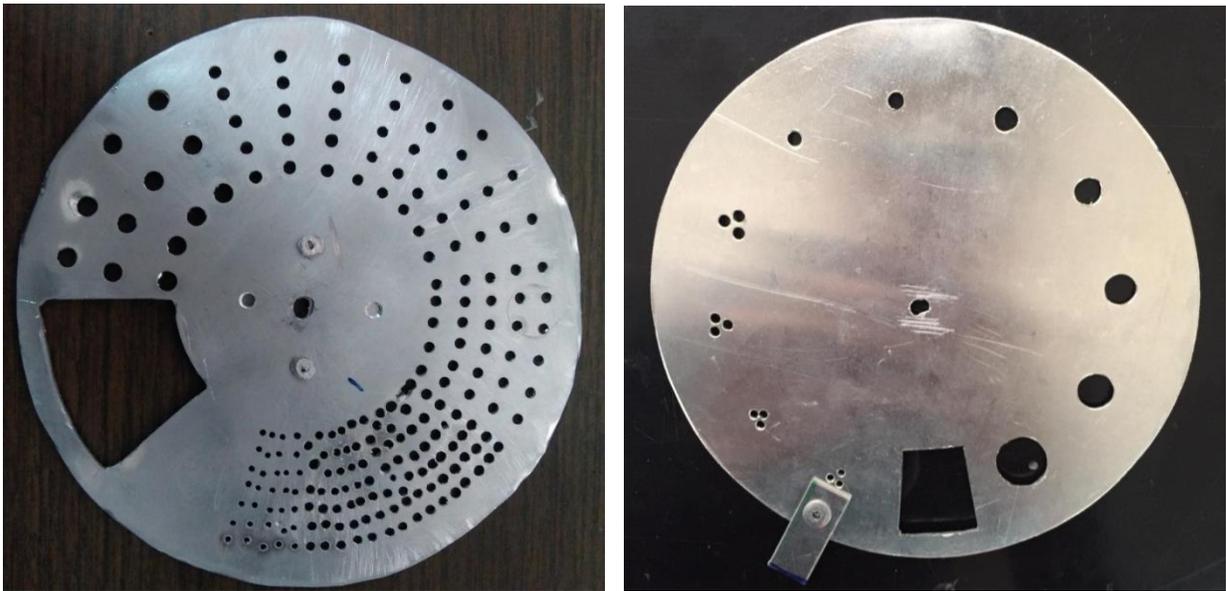
Para este caso se toman en cuenta las variables de segmento (posición en la cual se tomó la lectura), temperatura e intensidad luminosa, estas variables se plasman en dos gráficas que muestran la relación que existe entre ellas.

La primera prueba fue hecha con un disco el cual contenía conjunto de perforaciones hechas en diferentes áreas en un círculo y con distintos diámetros de orificio.

Las curvas obtenidas a partir de este primer disco no fueron satisfactorias ya que no tenían una respuesta donde el valor de temperatura e intensidad luminosa fueran cada vez mayor.

Como parte de este primer prueba se observó que la luz emitida por la lámpara se enfoca en un área específica del disco y no se dispersaba uniformemente.

La Figura 4.21a muestra el disco obturador para las primeras pruebas y la Figura 4.21b muestra el segundo diseño del disco actualmente colocado.

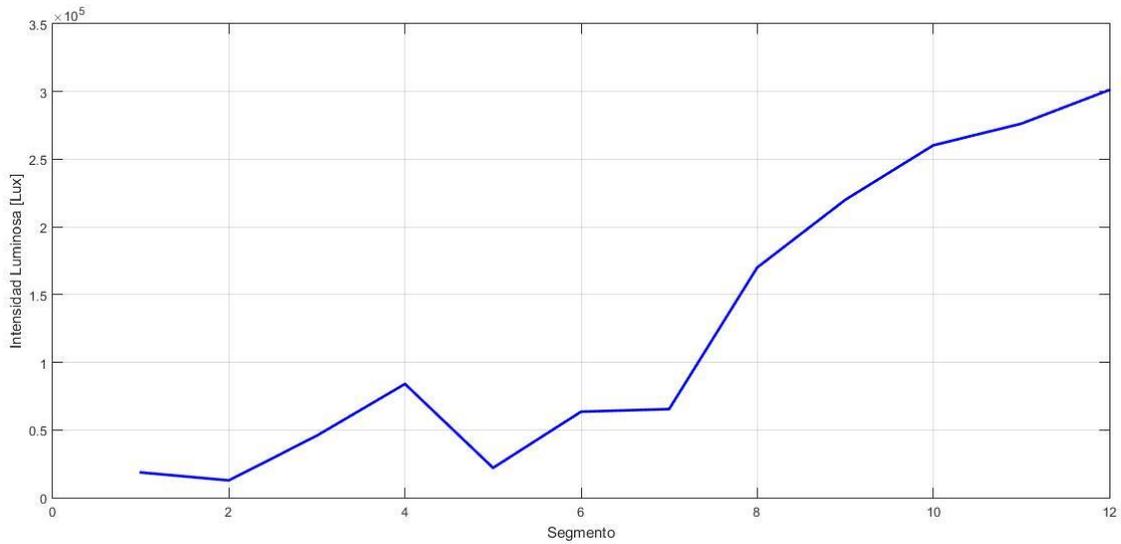


a)

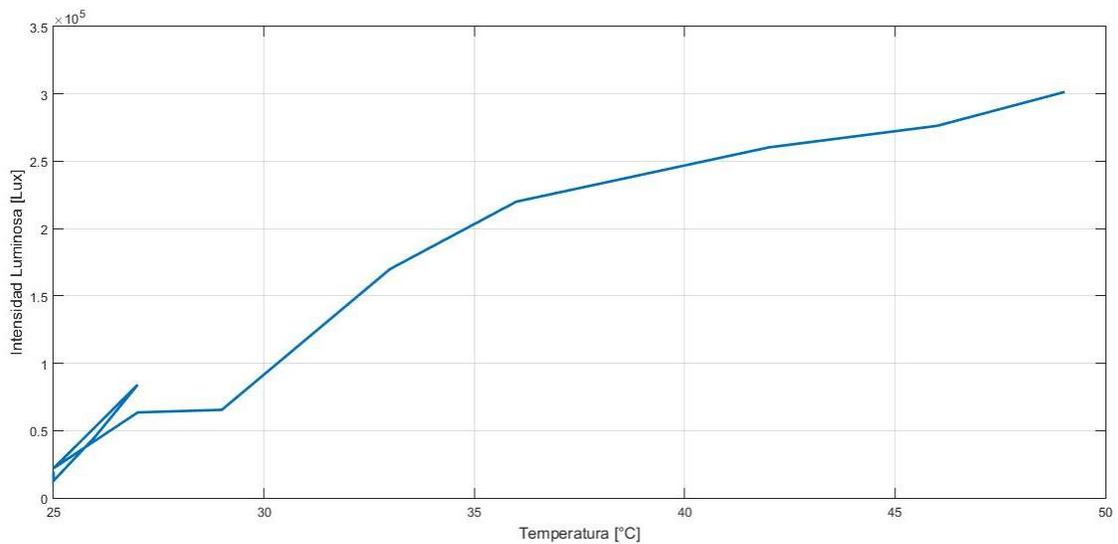
b)

**Figura 4.21** Disco obturador para pruebas de intensidad luminosa; a) primer disco obturador b) disco obturador actual.

Las Figuras 4.22 y 4.23 al inicio de la gráfica reveló un error en el diseño del disco obturador para el cual se determinó que los orificios no van aumentando su diámetro de forma ascendente lo cual ocasiona valores indeseados en el paso del flujo luminoso y por tanto no es factible utilizar las primeras cuatro posiciones del disco. Se puede observar con mayor facilidad el error obtenido a causa del disco obturador.

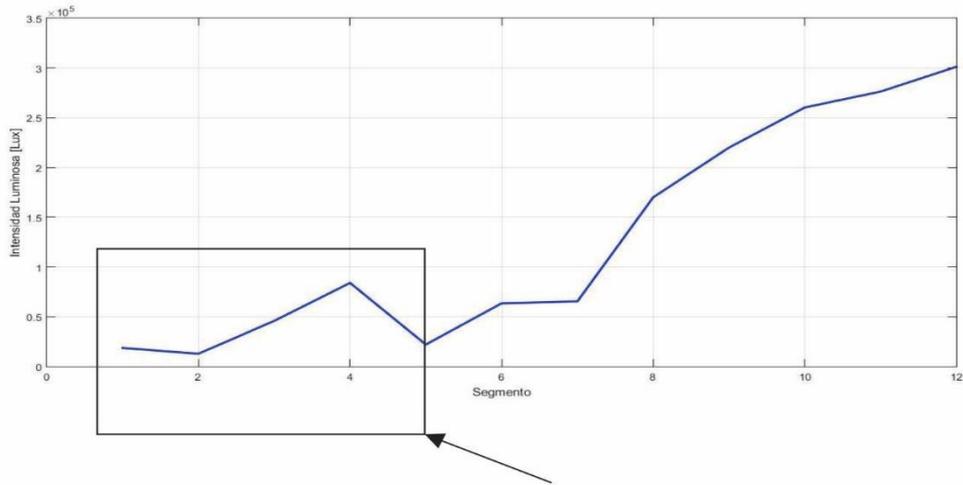


**Figura 4.22** Intensidad luminosa vs segmento.



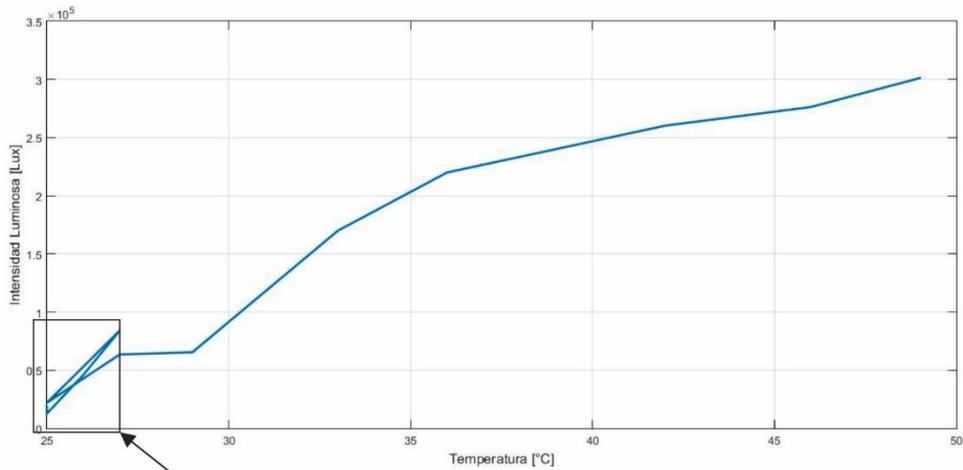
**Figura 4.23** Intensidad luminosa vs temperatura.

Las Figuras 4.24 y 4.25 muestran con mayor detalle los datos inesperados en la gráfica, se acordó continuar con el uso del este disco solo restringiendo esta parte del disco ya que de acuerdo a los requerimientos el flujo de intensidad luminosa no se ve afectado por estos y las siguientes posiciones ayudan a cumplir con el objetivo planteado.



Parte del obturador que sera omitida

**Figura 4.24** Datos indeseados en el obturador; muestra lecturas altas de intensidad luminosa.

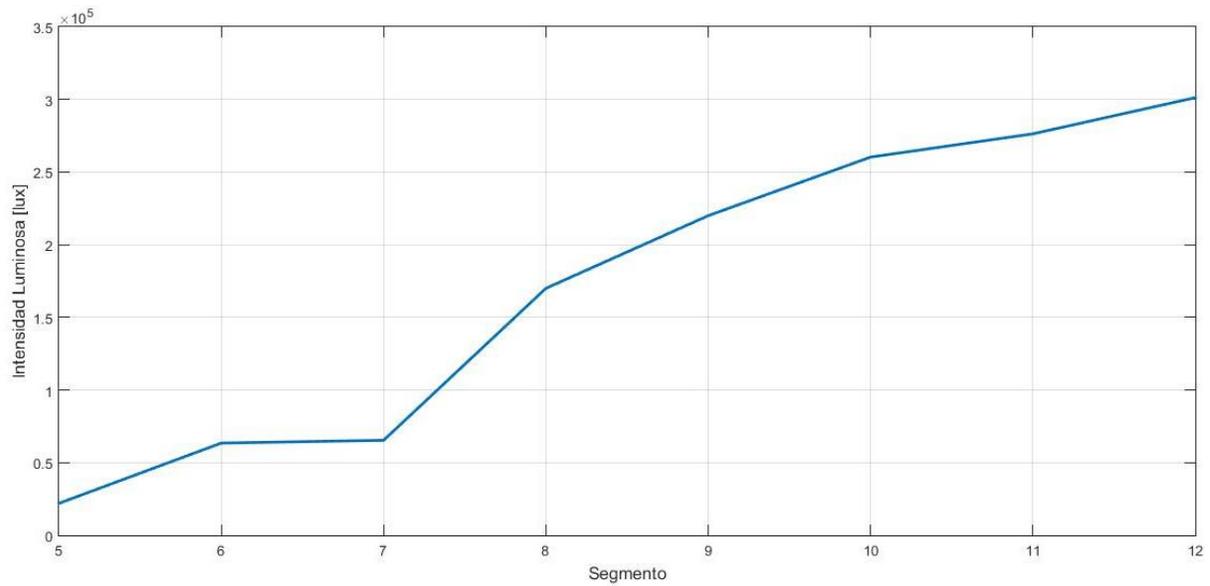


parte del obturador que sera omitida

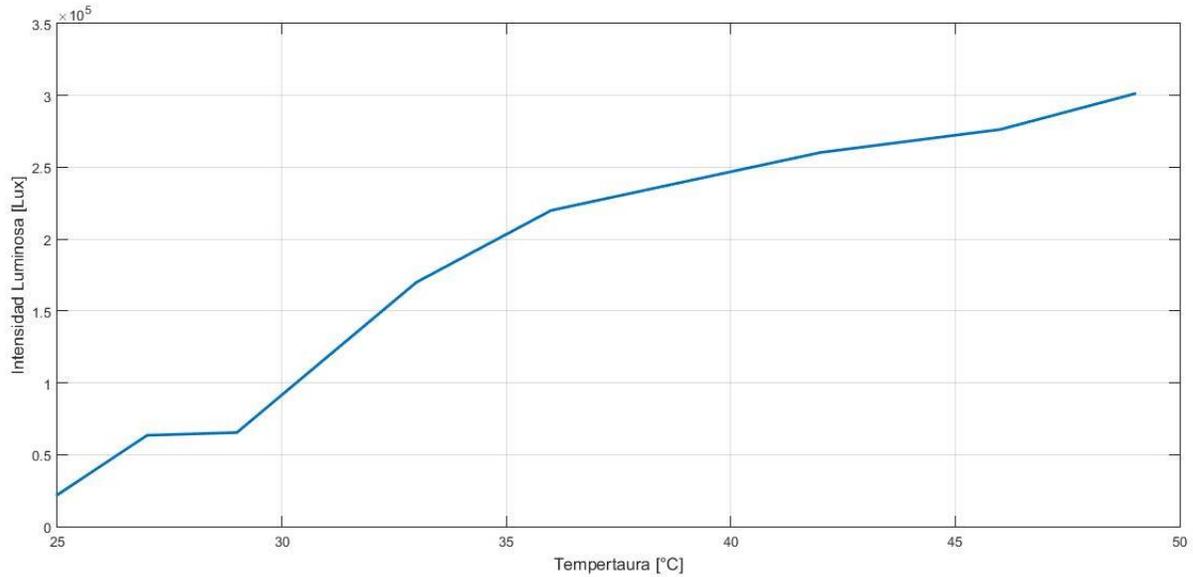
**Figura 4.25** Datos indeseados en el obturador; muestra variación en las lecturas de temperatura y su dependencia en la intensidad luminosa.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente la curva de calibración para intensidad luminosa utilizada en las pruebas posteriores quedara de la siguiente manera: La figura 4.26 corresponde a la curva de caracterización de intensidad luminosa donde se observa la relación

que existe entre la ubicación del disco y el flujo de intensidad luminosa que pasa por el disco; La figura 4.27 muestra la temperatura introducida al interior a causa de la intensidad luminosa, lo anterior permite anticipar el ruido térmico al interior del horno y saber de qué manera esto afecta al proceso de *Light Soaking*.



**Figura 4.26** Respuesta del obturador omitiendo los cuatro primeros segmentos.



**Figura 4.27** *Respuesta del obturador omitiendo los cuatro primeros segmentos.*

### **Manual de operación para la obtención de las curvas características a partir de los datos obtenidos**

A continuación se presenta a manera de manual los pasos a seguir para la obtención de los datos de operación de los cuales se obtienen las curva de caracterización, mismos que se obtuvieron directamente de los pines de la tarjeta mediante la implementación de dispositivos externos como lo es el uso del multímetro, esta condición se emplea debido a que los investigadores plantean el uso de un software creado por los mismos para lo cual al realizar las pruebas no se tiene un software el cual nos cree una base de datos y de la cual podamos importar los datos de operación.

# **Manual de usuario**

## **Procedimientos**

<http://fingenieria.uaemex.mx/portal/inicio/home.php>



# Información sobre seguridad

---

Los siguientes símbolos de precauciones, advertencias e instrucciones de seguridad no cubren todas las posibles condiciones y situaciones que puedan ocurrir. Es su responsabilidad actuar con sentido común, precaución y cuidado cuando instale, ajuste, de mantenimiento o ponga en función el sistema *Light Soaking*. UAEMex no se hace responsable por los daños ocasionados por el uso

## Símbolos y precauciones de seguridad importantes

---

<b>Significado de los iconos y señales de este manual de usuarios.</b>	
 Advertencia	Peligros o practicas inseguras que pueden causar lesiones físicas graves o la muerte
 Precaución	Peligros o practicas inseguras que pueden causar lesiones físicas leves o daños materiales
 Precaución	Para reducir el riesgo de incendio, explosión, descargas eléctricas o lesiones físicas cuando se use este sistema. Siga las instrucciones de seguridad.
	No tocar
	Desenchufe el cable de alimentación del tomacorriente
	No repare ni reemplace

## Especificaciones del *sistema Light Soaking*

---

Modelo	<i>Horno Light Soaking</i>
Marca	UAEMex
Descripción	Un sistema que permite aplicar las variables de temperatura e intensidad luminosa en forma constante y estable a celdas solares de telurio de cadmio realizando pruebas para una caracterización de la eficiencia en la etapa <i>Light Soaking</i> .
Dimensiones	63cm x 60cm x 40cm (interior de la estructura metálica) 87cm x 100cm x 60cm (Exterior de la estructura metálica).
Tiempo de vida de la lámpara	2000 horas
Refrigeración del sistema	Ventilador de aire operativo
Espectro de luz	Clase A
Peso	40 kg aprox
Consumo de energía	127 VAC
Tipo de unidad	Solar Simulator / <i>Light Soaking</i>
Irradiancia	Iluminación uniforme
Software	<i>Raspberry Pi 3</i>

## Instrucciones de seguridad

---

No corte y pele el cable de alimentación,

No coloque objetos pesados sobre el cable.

No toque el cable de alimentación con las manos mojadas.

No toque la estructura metálica al momento de realizar las pruebas.

No intente abrir ningún compartimiento del sistema al momento de su activación.

No intente reprogramar el código principal de la interfaz gráfica.

No toque la lampara cuando este activada

No obstruya los ventiladores del sistema

Conectar únicamente a 127v AC

No perfore el sistema

## Precauciones

---

El sistema contiene partes frágiles que pueden romperse y dañar el sistema

Manéjese con cuidado para su transportación.

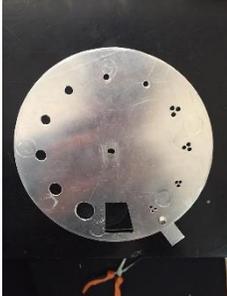
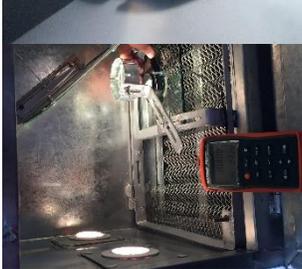
No perfore el sistema



## Procedimientos del sistema

---

<p>Encendido del equipo</p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Conectar la clavija del equipo a la toma eléctrica.</li><li>2. Ubicar el interruptor de la fuente situado en la parte trasera del equipo, comprobar que el botón se encuentre en la posición de encendido.</li></ol> <p>Nota: Se debe esperar 2 minutos después de conectar al equipo antes de realizar alguna operación.</p>	
<p>Ubicación de la celda</p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Abrir el compartimento central tirando de la manija central.</li><li>2. Colocar la celda en el porta muestras.</li><li>3. Ajustar los bornes para tomar las lecturas de la celda.</li><li>4. Asegurar que el espejo plano tenga una inclinación de 45° con respecto al techo del interior del horno</li></ol>	

		
<p><b>Intensidad luminosa</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Buscar la intensidad requerida en la curva de caracterización de intensidad luminosa.</li> <li>2. Situar la posición del disco de acuerdo a la intensidad requerida</li> <li>3. Ajustar con la lupa el haz de luz para una distribución uniforme en toda el área de la celda.</li> <li>4. Elija la opción encender lampara en la interfaz</li> <li>5. Al final de la prueba elija la opción apagar lampara.</li> </ol> <p>Advertencia: Proteja su vista, no mire directamente la luz emitida por la lampara.</p> <p>Advertencia: No toque la lampara durante y después de la prueba, riesgo de quemaduras.</p> <p>Nota: Se debe esperar 1 minuto entre cada encendido y apagado de la lampara</p> <p>Nota: Para la obtención de datos se empleó un luxómetro, producto de esto se caracterizó la curva de intensidad luminosa respecto a la posición del disco.</p>	  

<p>Temperatura</p>	<p>1. Colocar en la interfaz la temperatura deseada o el ciclo de trabajo</p> <p>Advertencia: no toque la resistencia al final de cada prueba (riesgo de quemaduras)</p> <p>Advertencia: al final de cada prueba algunas superficies del horno continúan calientes.</p>	
<p>Mediciones</p>	<p>1. Seleccionar en la interfaz la opción mediciones.</p> <p>2. La tabla “corrida” muestra los datos al momento de estar efectuándose la prueba y una tabla con el historial de los datos obtenidos.</p>	
<p>Mediciones externas (temperatura)</p>	<p>Precaución: Solo personal capacitado</p> <p>El módulo MAX6657 acondiciona la señal recibida por el termopar esta es una forma alterna de obtener la temperatura al interior del horno</p> <p>1. Conectar el módulo MAX6675 a un microprocesador ya programado para la lectura digital de temperatura.</p>	

## Conclusiones

---

La necesidad de fabricar celdas solares con una mayor eficiencia requiere el control de la temperatura e intensidad luminosa en la etapa de *Light Soaking*. En tal sentido, en esta tesis se desarrolló satisfactoriamente una metodología para la medición de la eficiencia de celdas solares CdS/CdTe mediante curvas de caracterización, cumpliéndose el objetivo de la tesis. Dicha propuesta consistió en desarrollar una metodología a seguir para la obtención de curvas características que ayudan a obtener los parámetros que influyen en la determinación de la eficiencia en la conversión fotovoltaica mediante un sistema electrónico capaz de controlar la temperatura e intensidad luminosa como parámetros de entrada y la medición de la corriente eléctrica y el voltaje en las celdas solares sometidas a la etapa de *Light Soaking*.

La Hipótesis de esta tesis consistió en que a través del diseño de un sistema instrumentado se puede establecer una metodología para la manipulación de las variables temperatura e intensidad luminosa en la fabricación de celdas solares CdS/CdTe, en la etapa de *Light Soaking* se lograría mejorar la eficiencia de celdas solares fabricadas en esta etapa. Dicha hipótesis se verificó como verdadera, puesto que la temperatura e intensidad luminosa son dos de los parámetros determinantes en la eficiencia de la celda.

La revisión del estado de la técnica y de los conceptos de los capítulos I a III permitió entender la relevancia del trabajo, así como sentar las bases para el tratamiento de los datos obtenidos a partir de las mediciones realizadas en el sistema instrumentado.

Con la metodología planteada se han obtenido las curvas de caracterización para cada subsistema, dicho sistema al tener la opción de modificar los parámetros admite realizar diversas pruebas y obtener los datos que ayudan a los cálculos de la eficiencia y así obtener los parámetros adecuados para lograr una mayor eficiencia y potencia. La instrumentación que forma parte del sistema se dividió en tres partes: Control de iluminación, Control de temperatura y Mediciones. En cada una de estas partes se implementó un circuito con base en las especificaciones y requerimientos de operación. Entre las curvas obtenidas a partir de la instrumentación esta la respuesta de temperatura a diferentes ciclos de trabajo, la curva de iluminación, dichas curvas permiten predecir su comportamiento y obtener los datos como

el tiempo en el que alcanza el valor deseado, así como el tiempo para el cual la variable regresa a su valor inicial (enfriamiento).

La descripción de las variables de la base de datos permite desarrollar aplicaciones en otros lenguajes de programación a fin de establecer los parámetros de operación del sistema, así como leer los resultados de las mediciones, aún sin tener conocimiento de los protocolos de comunicación y transferencia de datos que tienen lugar entre los circuitos y la base de datos,.

La experiencia del trabajo en equipo en un proyecto de investigación aplicada interinstitucional, me permitió la aplicación de los conocimientos obtenidos en el aula, sentando las bases para que un futuro, pueda plantear el desarrollo de otros proyectos de desarrollo electrónico aplicada.

**As.** Arsenico

**a-Si:H.** Silicio amorfo.

**BC.** Banda de conducción.

**BHJ.** Heterounion de volumen.

**Biomasa.** Es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente. Las plantas transforman la energía radiante del sol en energía química a través de la fotosíntesis, y parte de esta energía queda almacenada en forma de materia orgánica.

**BV.** Banda de valencia.

**Calibración.** Es el proceso de comparar los valores obtenidos por un instrumento de medición con la medida correspondiente de un patrón de referencia.

**Caracterización.** Se define como "determinar los atributos peculiares de alguien o de algo, de modo que claramente se distinga de los demás".

**CdS.** Sulfuro de cadmio es un compuesto inorgánico compuesto de azufre y cadmio cuya fórmula es CdS. Se presenta en la forma de un sólido amarillo. Se encuentra en la naturaleza con dos estructuras cristalinas diferentes en los minerales raros: greenockita y hawleyita.

**CdTe.** El telururo de cadmio (CdTe) es compuesto cristalino formado por cadmio y telurio. Se utiliza como ventana óptica de infrarrojos y como material de célula solar. Por lo general se intercala con sulfuro de cadmio para formar una célula fotovoltaica de unión pn. Normalmente, las células de CdTe utilizan una estructura n-i-p.

**Celda solar.** Las celdas solares o fotovoltaicas son las unidades estructurales de los paneles. Sirven para captar y convertir la energía solar en energía eléctrica.

**CIGS.** Es un material semiconductor compuesto de Cobre, Indio, Galio y Selenio. Es utilizado sobre todo por su alta eficiencia fotovoltaica para construir paneles solares, y por su menor coste con respecto del Silicio Metalúrgico.

**Cinvestav.** El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN es una institución pública mexicana dedicada al desarrollo de ciencia, tecnología e investigación.

**Conductividad eléctrica.** Es la capacidad de los cuerpos que permiten el paso de la corriente a través de sí mismos. Esta propiedad natural está vinculada a la facilidad con la que los electrones pueden atravesarlos y resulta inversa a la resistividad.

**Csi.** Celdas solares inorgánicas.

**CSI.** Celdas solares inorgánicas.

**CuLnSe<sub>2</sub>.** Una célula solar de selenio de cobre, indio y galio (o celda CIGS, a veces celda CI (G) S o CIS) es una celda solar de película delgada que se utiliza para convertir la luz solar en energía eléctrica. Se fabrica depositando una capa delgada de cobre, indio, galio y selenio en el respaldo de vidrio o plástico, junto con electrodos en la parte delantera y trasera para recoger la corriente

**DG.** Demanda Global.

**DSSC.** Celda solar sensibilizada por colorante.

**Dssc.** Dye sensitized solar cells (celdas solares sensibilizadas).

**Efecto fotovoltaico.** Es el efecto fotoeléctrico caracterizado por la producción de una corriente eléctrica entre dos piezas de material diferente que están en contacto y expuestas a la luz o, en general, a una radiación electromagnética.

**Eficiencia energética.** Es una actividad que tiene por objeto mejorar el uso de fuentes de energía. Es utilizar la energía de manera eficiente para obtener un cierto resultado. Por definición, la eficiencia energética es la relación entre la cantidad de energía utilizada en una actividad y la prevista para su realización.

**Electrodo.** Es un conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito, por ejemplo, un semiconductor, un electrolito, el vacío (en una válvula termoiónica), un gas (en una lámpara de neón), etc.

**Energía solar.** Es aquella que llega a la tierra en forma de radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta principalmente) procedente del sol, donde ha sido generada por un proceso de fusión nuclear.

**Energías sustentables.** Es aquella que, a diferencia de la tradicional se puede obtener de fuentes naturales prácticamente infinitas como el sol, el aire, la lluvia y el agua.

**Espectro electromagnético.** Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas.

**eV.** Electronvolt, es una unidad de energía que representa la variación de energía cinética que experimenta un electrón al moverse desde un punto de potencial  $V_a$  hasta un punto de potencial  $V_b$  cuando la diferencia  $V_{ba} = V_b - V_a = 1 \text{ V}$ , es decir, cuando la diferencia de potencial del campo eléctrico es de 1 voltio. Su valor es  $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19} \text{ J}$

**Excitón.** Es una cuasipartícula en estado neutral que consiste de un electrón excitado y un hueco o espacio dejado por el electrón. Este excitón tiene por lo general un tiempo de vida del orden de nanosegundos.

**FF.** Factor de llenado.

**Ge.** Germanio

**Generador fotovoltaico.** Suele llamarse generador fotovoltaico al conjunto de elementos, debidamente acoplados, que permiten utilizar la energía eléctrica obtenida por conversión de la solar mediante las células solares.

**Heterounión.** Es una unión entre dos Semiconductores, cuya banda (banda prohibida) es diferente. Las heterouniones tienen una importancia considerable en la física de semiconductores y en óptica.

**Instrumentación.** Se conoce como instrumentación industrial, por último, al conjunto de herramientas que permiten realizar la medición, la conversión, el control o la transmisión de las variables de un cierto proceso. Esto permite lograr la optimización de los recursos que se emplean.

**Intensidad luminosa.** Se define como la cantidad de flujo luminoso que emite una fuente por unidad de ángulo sólido.

**IR2110.** Un controlador de puerta es un amplificador de potencia que acepta una entrada de baja potencia de un controlador IC y produce una entrada de unidad de alta corriente para la puerta de un transistor de alta potencia, como un IGBT o MOSFET de potencia

**IRF640.** Es un tipo específico de MOSFET (transistor de efecto de campo de semiconductor de óxido de metal) diseñado para manejar niveles de potencia significativos.

**Jm.** Densidad de corriente de máxima potencia.

**kHz.** Medida de frecuencia que es igual a 1000 Hertz.

**Kv.** Unidad de tensión eléctrica, equivalente a mil volts.

**Metodología.** Puede entenderse a la metodología como el conjunto de procedimientos que determinan una investigación de tipo científico o marcan el rumbo de una exposición doctrinal.

**Módulo.** Elemento con función propia concebido para poder ser agrupado de distintas maneras con otros elementos constituyendo una unidad mayor.

**Oleds.** Organic Light Emitting Diodes (diodos emisores de luz orgánicos).

**Opvs.** Organic Photovoltaics (orgánica fotovoltaica).

**P.** Fósforo

**Pin.** Intensidad de iluminacion incidente.

**Potencia.** Es la proporción por unidad de tiempo, o ritmo, con la cual la energía eléctrica es transferida por un circuito eléctrico. Es decir, la cantidad de energía eléctrica entregada o absorbida por un elemento en un momento determinado.

**PWM.** Modulación por ancho de pulso (por sus siglas en inglés: pulse-width modulation).

**Radiación.** Es la emisión, propagación y transferencia de energía en cualquier medio en forma de ondas electromagnéticas o partículas.

**Raspberry pi 3.** Es un ordenador de placa reducida, ordenador de placa única u ordenador de placa simple (SBC) de bajo coste desarrollado en el Reino Unido por la Raspberry Pi Foundation.

**Semiconductor.** Un semiconductor es un material aislante que, cuando se le añaden ciertas sustancias o en un determinado contexto, se vuelve conductor. Esto quiere decir que, de acuerdo a determinados factores, el semiconductor actúa a modo de aislante o como conductor.

**Si.** Silicio.

**SP.** Set point.

**SWE.** Efecto Staebler-Wronski, se refiere a la luz inducida metaestables cambios en las propiedades de hidrogenado de silicio amorfo.

**TCO.** Dirección transparente de óxidos.

**Temperatura.** Es una magnitud física que refleja la cantidad de calor ya sea de un cuerpo, de un objeto o del ambiente.

**Termopar.** Es un sensor para medir la temperatura. Se compone de dos metales diferentes, unidos en un extremo. Cuando la unión de los dos metales se calienta o enfría, se produce una tensión que es proporcional a la temperatura.

**TiO<sub>2</sub>.** Dióxido de titanio.

**uS.** Medida de tiempo que es igual a la millonésima parte de un segundo.

**VCD.** Voltaje en corriente directa.

**Vm.** Voltaje máximo.

**VOC.** Voltaje de circuito abierto.

- Badii, M. A. (2016). Renewable Energies and Energy Conservation. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 15.
- Barbosa Garcia Oracio, M. J. (2012). Celdas orgánicas como fuente de energía sustentable. *Acta universitaria, Universidad de Guanajuato*, 48.
- Blessy Mathew, N. R. (2015). Dye Sensitized Solar Cells: The Emerging Technology. *Energy and Power Engineering Science*.
- Carbo Vela. P. C, R. R. (2012). Proceso electroquímico en celdas solares sensibilizadas con un colorante natural. *Investigacion y ciencia de la universidad autonoma de aguascalientes*, 9.
- Delta Volt*. (noviembre de 2015). Obtenido de Delta Volt: <https://deltavolt.pe/energia-renovable/energia-solar/paneles-solares>
- Entrecanales, J. M. (2019). *acciona*. Obtenido de business an unusual: <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/>
- Hovel, H. W. (1975). *Semiconductors and semimetals*. New York: Academic Press.
- Javier, S. G., Laura, V. C., & Mireya, S. G. (2018). Programmable automatic system for the application of thermal and light radiations in the manufacturing process of CdS/CdTe solar cells. *IEEE international Autumn meeting on power*, 4.
- Mendoza Ramirez Miryam, G. A. (1995). energía solar. *Notas sobre el curso*, 158.
- Moncayo, L. (Dirección). (2015). *Celdas Solares Inorganicas* [Película].
- Murcia, H. R. (2009). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. *revista de ingeniería*, 8.
- Nagaiyan, S., & Vishal, G. (2010). Metal complex dyes for dye-sensitized. *ResearchGate*, 819-831.
- O. Vigil-Galan, G. S.-R.-L.-P. (2003). influencia del tratamiento termico con CdCl<sub>2</sub> sobre las características finales de la celdas solares CdS/CdTe procesadas por transporte de vapor en espacio cercano. *Revista Mexicana de Fisica*, 5.
- Oviedo-Salazar, J. M. (2015). History and Use of Renewable Energies. *Daena: International Journal of Good Conscience* , 18.
- Perez Gutiérrez Enrique, M. R. (2013). Fuente alterna de energía renovable: celdas solares orgánicas. *Entreciencias:dialogos en la sociedad del conocimiento.*, 29.
- S.Grove, A. (1967). *Physics and Technology of Semiconductor Devices*. New York: John Wiley and Sons.

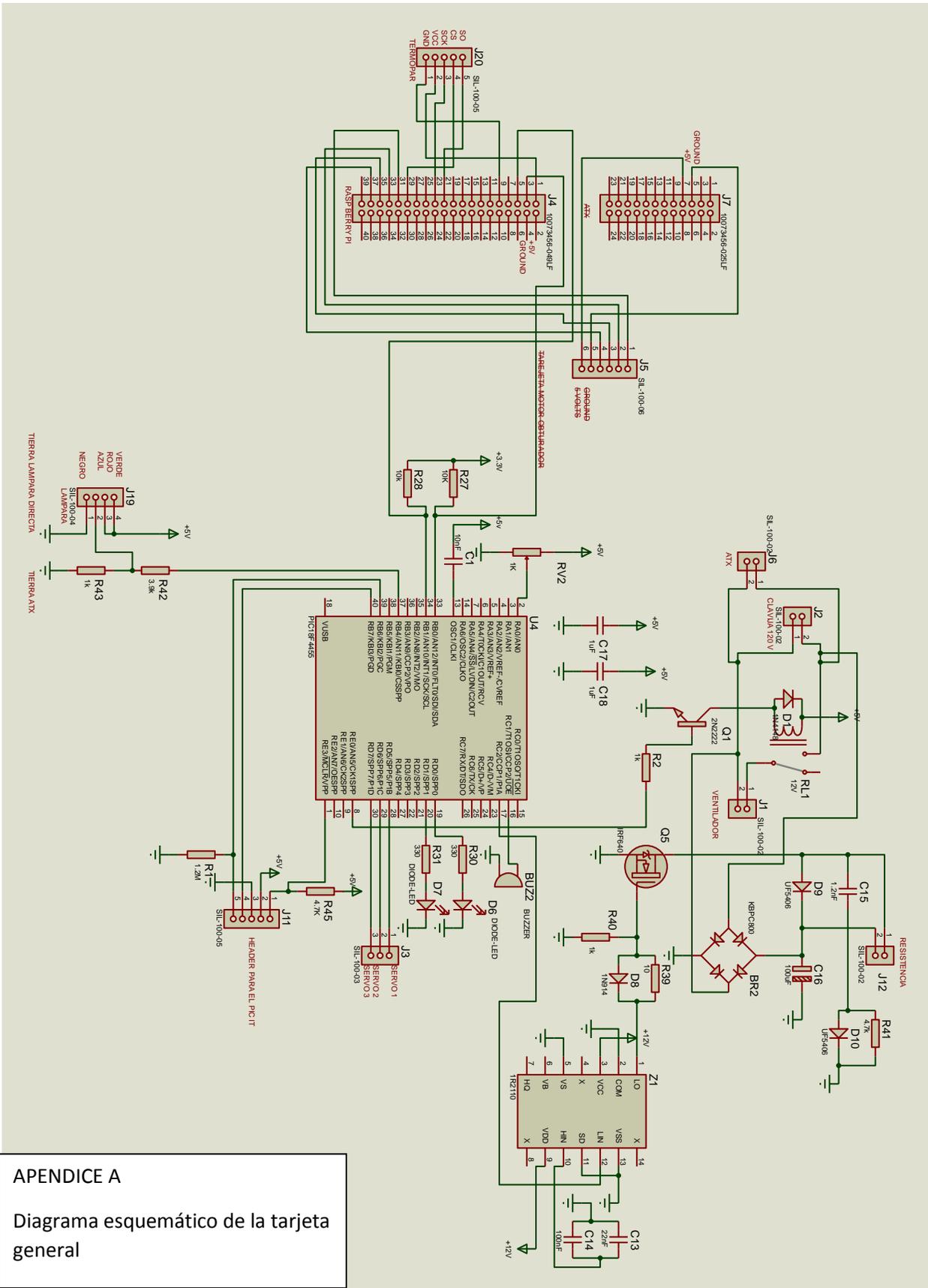
SEKAR, N. G. (2010). Metal Complex Dyes for Die-sensitized Solar Cells: Recent Developments, India. *Institute of Chemical Technology* .

Sharma, M. M. (s.f.). The Light Soaking Effect - Additional Power Boost in Thin Film CIGS PV Module. *SOLARPOWER*, 2.

### 1.4 Apéndice A: Diagramas eléctricos

En el apéndice A se presenta el diagrama eléctrico general que se utiliza para el funcionamiento del prototipo, mismo que este compuesto por diferentes etapas las cuales son: la etapa de control, instrumentación, potencia y comunicación. La etapa de control está compuesta por el PIC18f4550 el cual es el encargado de recibir los datos de operación, así mismo este controla la operación o corrida encendiendo o apagando los diversos elementos que intervienen en el mismo. Una parte importante de esta etapa es la Raspberry Pi3 que es la encargada de recibir los datos de entrada y salida del PIC18f4550, además de que esta misma está programada para ser la interfaz de interacción con el usuario y del almacenamiento de los datos (historial de corridas), la etapa de potencia está dividida en dos partes importantes: calentamiento de la resistencia y encendido de la lámpara.

El circuito empleado para el calentamiento de la resistencia eléctrica se basa en una modulación por ancho de pulso (PWM) el ancho de pulso es asignado y/o controlado por el usuario, aunque también la Raspberry pi3 puede modificarlo según los requerimientos del usuario, este consta de un circuito IR2110 configurado para realizar conmutación superior, al ser una carga meramente inductiva presenta un pico en cada conmutación la cual reduce la vida útil del IRF640, mismo que se corrige al colocar una red de snubber.



APENDICE A  
 Diagrama esquemático de la tarjeta general

## 1.5 Apéndice B: Mediciones

Dentro de las mediciones para la elaboración de las curvas de caracterización se realizaron diversas corridas en las cuales para el caso del calentamiento de tomo en cuenta el ciclo de trabajo o ancho de pulso del PWM, el tiempo y valor de la temperatura en ese instante.

La tabla de calentamiento muestra cinco valores distintos de ciclos de trabajo comenzando en 20% y aumentando en 15% cada prueba hasta llegar a un ciclo de trabajo del 80%.

Con la finalidad de observar e identificar la respuesta en tiempo de la temperatura al interior del prototipo se obtuvieron los datos de la segunda columna los cuales al momento de ser graficados en un programa de computo (MATLAB) se observa la respuesta o comportamiento, para cada prueba realizada se tomaron los datos restringiendo en tiempo a una duración máxima de 60 minutos y la temperatura a 90°C.

La segunda tabla muestra la respuesta al enfriamiento del prototipo con dos variantes: puerta abierta y puerta cerrada, además de realizarlas con ventilador y sin ventilador.

Así mismo se presenta la tercera tabla con los datos obtenidos a partir del disco obturador el cual se tomo en cuenta las variables: segmento (posición del disco), temperatura (en el área de enfoque de la luz), Intensidad luminosa (en el área de enfoque de la luz), como resultado se obtuvieron las curvas de caracterización para la intensidad luminosa, lo cual permite establecer las condiciones de posición del disco para los requerimientos de corrida o prueba.

Calentamiento					
Tiempo (min)	Duty Cycle 20%	Duty Cycle 35%	Duty Cycle 50%	Duty Cycle 65%	Duty Cycle 80%
	Temp (°C)	Temp (°C)	Temp(°C)	Temp (°C)	Temp (°C)
0	22	24	30	22	29
1	23	26	32	24	31
2	24	29	36	29	34
3	26	32	38	33	38
4	27	35	41	37	42
5	28	37	44	40	47
6	30	40	46	43	50
7	31	42	49	47	54
8	33	44	52	50	57
9	34	46	53	53	60
10	35	48	55	55	62
11	36	50	58	58	65
12	37	51	58	60	68
13	38	52	60	62	71
14	39	53	62	64	74
15	40	55	62	66	77
16	40	56	65	67	79
17	42	58	67	69	80
18	43	59	68	70	82
19	43	59	69	73	84
20	44	60	71	73	85
21	45	61	72	75	87
22	45	62	73	76	89
23	46	63	73	78	90
24	46	64	74	78	
25	47	64	75	80	
26	48	65	76	81	
27	48	66	76	83	
28	49	67	77	85	
29	50	67	78	85	
30	50	67	79	86	
31	51	68	79	87	
32	52	69	80	88	
33	52	70	80	88	
34	52	71	82	90	
35	53	71	82		
36	53	72	83		

37	54	73	83
38	54	73	84
39	54	74	84
40	55	75	86
41	56	75	86
42	56	76	87
43	56	77	88
44	56	77	88
45	56	78	89
46	57	78	89
47	58	79	89
48	58	79	89
49	58	80	90
50	58	80	90
51	59	81	
52	59	81	
53	59	82	
54	59	82	
55	60	82	
56	60	82	
57	60	83	
58	61	84	
59	61	84	
60	62	85	

APENDICE B  
Tabla de mediciones para el calentamiento

Enfriamiento				
	Puerta abierta con ventilador	Puerta abierta sin ventilador	Puerta cerrada con ventilador	Puerta cerrada sin ventilador
Tiempo (min)	Temp (°C)	Temp (°C)	Temp (°C)	Temp (°C)
0	90	90	90	85
1	68	38	88	84
2	59	36	85	83
3	60	35	84	81
4	56	34	82	80
5	54	34	80	79
6	52	31	78	78
7	49	30	75	75
8	48	30	73	73
9	47	30	71	70
10	46	30	69	67
11	44	29	67	65
12	44	28	66	64
13	44	28	65	62
14	43	28	64	62
15	42	28	63	60
16	41	27	62	60
17	40	27	61	59
18	39	27	60	58
19	38	27	59	57
20	38	27	58	57
21	37	26	57	56
22	36	26	57	55
23	35	26	56	55
24	35	26	56	54
25	34	26	55	54
26	34	26	55	53
27	34	26	54	52
28	33	26	54	52
29	33	26	53	51
30	33	26	53	51
31	32	26	52	50
32	32	26	52	50
33	32	26	51	50
34	32	26	50	49
35	32	26	50	48
36	31	26	49	48
37	30	26	49	47

38	30	26	48	47
39	30	26	48	47
40	30	26	47	46
41	30	26	47	46
42	30	26	46	45
43	30	26	46	45
44	30	26	45	45
45	30	26	45	44
46	30	26	45	44
47	30	26	44	43
48	29	26	44	43
49	29	26	44	43
50	29	26	43	43
51	29	26	43	42
52	29	26	43	42
53	29	26	42	41
54	29	26	42	41
55	28	26	42	40
56	28	26	42	40
57	28	26	41	40
58	28	26	41	39
59	28	26	40	39
60	28	26	40	38

APENDICE B  
 Tabla de mediciones para el  
 enfriamiento

Temperatura (°C)	Intensidad Luminosa (Lux)	Segmento
25	18600	1
25	12740	2
26	45830	3
27	84000	4
25	22000	5
27	63480	6
29	65400	7
33	170000	8
36	220000	9
42	260300	10
46	276300	11
49	301200	12

APENDICE B

Tabla de mediciones de intensidad  
luminosa