



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA



**Construcción de un sistema para caracterizar la eficiencia de la etapa
Light Soaking en el proceso de fabricación de celdas solares**

Tesis para obtener el título de Ingeniero en Electrónica

Presenta

Rodrigo Maximiliano Pérez Remigio

Asesor: **Dr. Javier Salas García**

Co-asesor: **Dr. Eduardo Ángeles Rodríguez**

Toluca, México

Noviembre 2019

“Tanto si piensas que puedes, como si piensas que no puedes, estas en lo cierto”-Henry Ford.

RESUMEN

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 que favorecen el ahorro energético. Una de éstas es la energía solar, cuya explotación depende en gran medida de la eficiencia de conversión fotovoltaica en las celdas solares. En este sentido, el objetivo de esta tesis es construir un sistema en el que se controle la temperatura y la intensidad luminosa durante la etapa de *Light Soaking* de forma automática, de tal modo que se pueda monitorear el voltaje y la corriente en la celda solar durante dicha etapa, y así proveer una herramienta para encontrar los rangos de valores en los que la temperatura y la intensidad luminosa resulten en una mayor eficiencia de transformación fotovoltaica en las celdas solares CdS/CdTe. Para alcanzar dicho objetivo se presenta el diseño y la construcción del *hardware* de dicho sistema. Además de que el sistema permite al usuario programar en una interfaz gráfica valores fijos de la temperatura y de la intensidad luminosa, también es capaz de controlar los valores de ambas variables de acuerdo con curvas arbitrarias en función del tiempo. Esta versatilidad permite 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 resulta en una mayor eficiencia de conversión fotovoltaica de dichas celdas instaladas en el campo. El objetivo planteado se cumplió satisfactoriamente en virtud de su flexibilidad en la aplicación de la temperatura y la intensidad luminosa durante la etapa de *Light Soaking*.

ABSTRACT

Energy saving is currently presented as one of the most important lines of research, considering the population increase and its inherent worldwide energy demand. Also, the development of alternative energy sources that are effective non-polluting agents that favor energy saving represents a priority challenge. One of these is solar energy, whose exploitation depends largely on the efficiency of photovoltaic conversion in solar cells. In this sense, the objective of this thesis is to build a system in which the temperature and light intensity are controlled during the Light Soaking stage automatically, so that the voltage and current in the solar cell can be monitored during this stage, and thus provide a tool to find the ranges of values in which the temperature and light intensity result in a higher efficiency of photovoltaic transformation in the CdS / CdTe solar cells. To achieve this objective, the design and construction of the hardware of the said system are presented. In addition to the system allowing the user to program fixed values of temperature and light intensity on a graphical interface, it is also able to control the values of both variables according to arbitrary curves as a function of time. This versatility allows to determine the parameters that describe both functions (temperature and light intensity) in such a way that it results in a higher efficiency of photovoltaic conversion measured in terms of the current and voltage that a CdS / CdTe solar cell can produce during the process Light Soaking, which in turn results in a higher efficiency of photovoltaic conversion of said cells installed in the field. The stated objective was satisfactorily fulfilled by its flexibility in the application of temperature and light intensity during the Light Soaking stage.

Índice

RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes	2
1.2 Justificación.....	15
1.3 Objetivo.....	16
1.4 Hipótesis.....	16
1.5 Contenido de la Tesis	16
2. ANTECEDENTES DEL TRATAMIENTO DE LA FABRICACIÓN DE CELDAS SOLARES	
2.1 Principios de funcionamiento	18
2.2 Física de celdas solares	20
2.3 Clasificación de celdas solares.....	22
2.3.1 Inorgánica.....	23
2.3.2 Orgánica.....	24
2.4 Fabricación de celdas solares y <i>Light Soaking</i>	27
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA ETAPA LIGHT SOAKING EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CELDAS SOLARES	
3.1 Introducción	31
3.2 Descripción detallada del sistema.....	32
3.3 Soporte físico del sistema (hardware)	43
3.3.1 Temperatura	43
3.3.2 Iluminación	45
3.3.3 Sistema de direccionamiento de aire.....	47
3.3.4 Subsistema de control de iluminación.....	48
4. RESULTADOS	
4.1 Introducción	51
4.2 Implementación del circuito eléctrico para el horno.....	51
4.3 Estructuras de las tablas de interfaz gráfica	76
4.4 Comunicación con la <i>Raspberry Pi 3</i>	85
CONCLUSIONES	90

GLOSARIO	92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
APÉNDICES	98
A. Diagramas eléctricos.....	98
B. Mediciones.....	106
C. Manual de usuarios	113

1. Introducción

Actualmente las energías sustentables representan una medida emergente de salvaguardar al medio ambiente ante el cambio climático, 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 eólica, geotérmica y solar. La humanidad se dispone a acelerar la transición hacia una economía baja en carbono, consciente que los combustibles fósiles no son renovables y de sus efectos perjudiciales para el planeta. La energía solar es capaz de abastecer al planeta durante millones de años; al sol aún le quedan 6.500 millones de años de vida, según apunta la NASA.

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 gran grupo de investigadores trabajando en su diseño con el fin de aumentar sus índices de eficiencia energética, ya que estos sistemas en la actualidad presentan dos problemáticas: la eficiencia comercial inferiores al 25 %, sistemas inversores y de almacenamiento aún muy costosos.

1.1 Antecedentes

Hoy en día existen una gran cantidad de aparatos de simulación solar *Light Soaking* que incluyen una cámara de pruebas en la que se regula la temperatura para distintas variantes de pruebas realizadas en laboratorios para algún tipo de aplicación, como la patente US 2,697,587 de 1951 menciona un intercambiador de calor enfriado por ventilador de temperatura controlada que tiene una pluralidad de celdas interconectadas por conductos a través de los cuales atraviesa un líquido de enfriamiento.

Algunas patentes que se describen a continuación controlan la temperatura de una cámara de pruebas en la que ocurren reacciones químicas, como por ejemplo la patente US 3,229,754 (sistema de control de temperatura de calefacción y refrigeración,1966) el cual es un proceso para controlar la temperatura de corriente de fluido, por una parte, se refiere al control de la temperatura en reacciones químicas, mientras en otro aspecto se refiere al control de la temperatura de las reacciones de polimerización exotérmica y por ultimo un control de polimerización de olefinas en presencia de un disolvente y un catalizador a una temperatura constante, por otro lado se tienen patentes que usan el enfriamiento como controlador de corriente y voltaje como por ejemplo la patente US 5,211,713 (Método de control de temperatura con calentamiento y enfriamiento simultáneos cerca del punto establecido,1993).

Algunos de esos aparatos cubren distintos tipos de aplicaciones. Sin embargo, a medida que pasa el tiempo, se han ido desarrollando aparatos con particularidades más específicas propias del proceso que controlan.

La patente US 6,015,465 (Sistema de control de temperatura para cámara de proceso semiconductor,2000) donde se describe un sistema de control para un proceso realizado en semiconductores donde el distribuidor de fluido en la cámara de vapor aplica una película de fluido sustancialmente continua sobre una cámara empleando vapor como elemento calefactor y un líquido como elemento enfriador.

La patente US 6,015,465 es una cámara en la que se regula la temperatura y con frecuencia tiene integrado un sistema de enfriamiento tales como las patentes (Pat US 6,533,452 y Pat US 6,854,514).

La patente US 6533,452 (Aparato de prueba acelerado de intemperismo con ciclo de inmersión, 2003) suele ser utilizado para exponer especímenes de prueba a radiación solar y algunos efectos de meteorización sobre una base acelerada.

Uno de los aparatos que ayuda a ver el desempeño de una celda solar es la que describe la patente US 7,847,237 (Método y aparato para probar y evaluar el funcionamiento de una célula solar, 2010). Asimismo, tiene la diferencia en el objetivo y método de prueba de la celda solar de la presente invención.

El aparato de la patente US 7,847,237 realiza las pruebas de temperatura y aplicación de radiación luminosa en celdas solares terminadas, en cambio en la presente invención realiza las pruebas de temperatura y aplicación de radiación luminosa en la parte del proceso de manufactura de la celda solar denominada *Light Soaking*, que es el proceso para el que fue diseñado el aparato de la presente invención. En la patente citada no menciona el elemento o elementos que se usarán para elevar la temperatura de la cámara de pruebas o del mecanismo de regulación de temperatura, en cambio se refiere más al método utilizado para hacer mediciones del desempeño de la celda solar sin especificar detalles de la estructura o el funcionamiento de la cámara de pruebas donde se realizan las pruebas para la celda solar.

Se tiene una patente muy similar a el sistema presentado de esta tesis la cual es la patente US 8,773,021 (Sistema de inmersión ligera para módulos fotovoltaicos *Light Soaking*, 2014), que consiste en un aparato para exponer módulos fotovoltaicos a una luz solar simulada para propósitos de prueba que tiene una cámara de pruebas abarcando varias lámparas y un sistema de enfriamiento para mantener la temperatura en el interior de la cámara de pruebas, también cuenta con un reflector que es utilizado para dirigir la luz de las lámparas a un plano objetivo a el sistema de refrigeración y mantener la temperatura de los módulos fotovoltaicos en un valor predeterminado. El aparato de dicha patente muestra varios cambios al sistema presentado en esta tesis. El primero por ejemplo es la temperatura de la cámara de pruebas de la patente citada, esta temperatura se eleva por efecto de las lámparas que se emplean para aplicar la radiación luminosa, mientras que en la cámara de prueba de pruebas de este sistema la fuente de luz se mantiene fuera del mismo y se proyecta hacia la celda solar mediante un espejo que evita la interferencia de la temperatura precedente de la luz.

Otro aspecto que difiere tiene que ver con el elemento calefactor en el sistema presentado, el cual consta de un resistor al que se le puede aplicar un voltaje y una corriente que son independientes de la fuente luminosa, por lo que ambas variables (temperatura e intensidad luminosa) se pueden cambiar de forma independiente.

Una tercera diferencia y la más importante de este sistema es la configuración de las terminales de prueba en las celdas solares ya que no necesariamente la celda solar con la que se esté trabajando debe estar terminada, ya que aún no se ha sometido al proceso de *Light Soaking*. Por lo tanto, esta última diferencia es muy particular de ya que ninguna de las patentes citadas con anterioridad tiene esa peculiaridad.

La Figura 1.1 muestra un intercambiador de calor enfriado por ventilador de temperatura controlada, así como su aplicación de control eléctrico para el proceso de enfriamiento descrito en la patente US 2, 697.

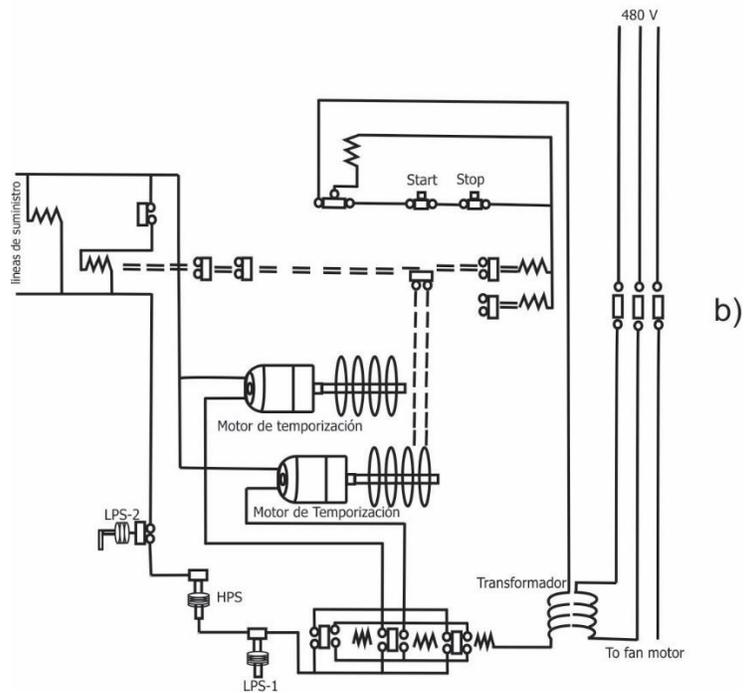
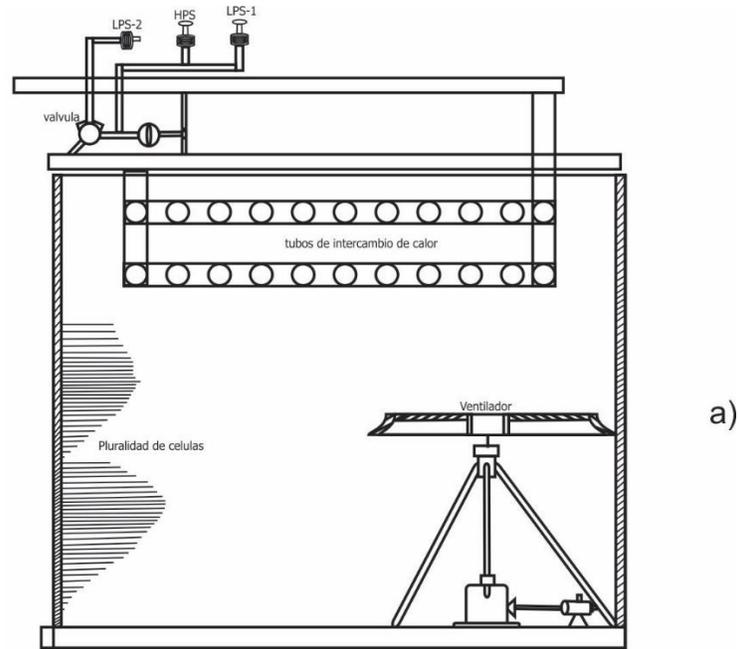


Figura 1.1 (a) Intercambiador de calor enfriado por ventilador de temperatura controlada
 (b) Aplicación de control eléctrico para el funcionamiento de ventiladores de refrigeración.

La siguiente patente (Figura 1.2) se refiere a un proceso para controlar la temperatura de corriente de fluido, por una parte, se refiere al control de la temperatura en reacciones químicas, mientras en otro aspecto se refiere al control de la temperatura de las reacciones de polimerización exotérmica descrito en la patente US 3,229,754.

El sistema presentado tiene el objetivo es controlar la temperatura e intensidad luminosa en función de el voltaje y la corriente que el usuario proporciona al momento de querer mejorar la eficiencia en la celda solar.

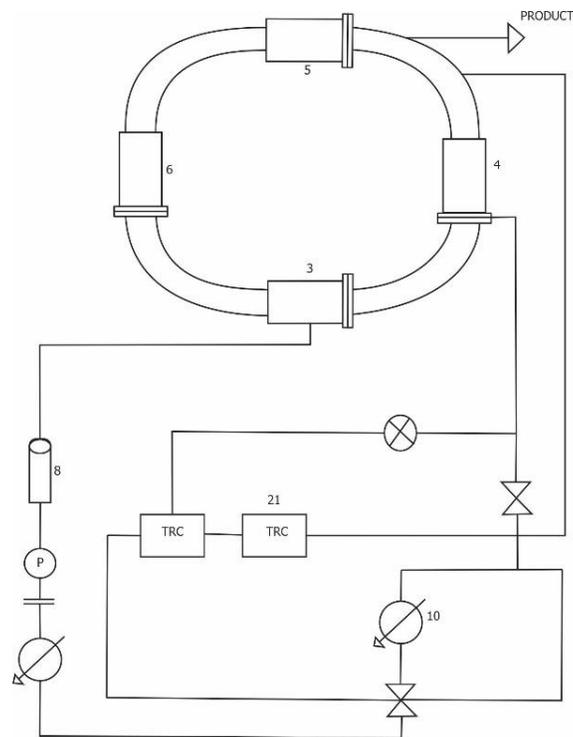


Figura 1.2 *Proceso para controlar la temperatura de corriente de fluido.*

En la Figura 1.3 se puede apreciar la patente US 6,015,465 que se refiere a un sistema de control de temperatura de una superficie de una cámara de pruebas de proceso semiconductor y una vista lateral esquemática de la misma cámara de deposición epitaxial que comprende desde el sistema de control de la temperatura hasta el controlador necesario para realizar esa acción.

En comparación del sistema presentado se distinguen en el aspecto de que al momento de ser calentada la cámara de pruebas el calor provocado se distribuye de forma homogénea y contando con 2 conductos de salida de aire controlados por el criterio del usuario a lo requerido por medio de un dispositivo portátil.

La Figura 1.4 con la patente US 6,533,452 se refiere en general a un aparato de ensayo para exponer especímenes de prueba a radiación solar y otros efectos de meteorización sobre una base acelerada. Teniendo una similitud con este sistema una cámara de pruebas que regula la temperatura y una base de vidrio que expone a la celda solar al proceso de *Light Soaking* con la diferencia de cómo es aplicable las variables de intensidad luminosa y temperatura en tiempo real y medidas en términos de corriente y voltaje en la simulación de luz solar para la mejora de la eficiencia de la celda solar.

La Figura 1.5 se refiere a la vista esquemática de un aparato de acuerdo con una presente realización para evaluar el funcionamiento de una célula solar que comprende una etapa de paso de corriente de paso en dirección hacia adelante, de una corriente continua con respecto a un elemento de célula solar que constituye la célula solar de la patente US 7.847.237.

La presente innovación difiere a esta en el proceso de la manufactura de la celda solar con el proceso *Light Soaking* mientras en la patente citada se enfoca más en el método de prueba aplicada a la celda solar y no exactamente el elemento que se usara para que la celda solar aumente su eficiencia.

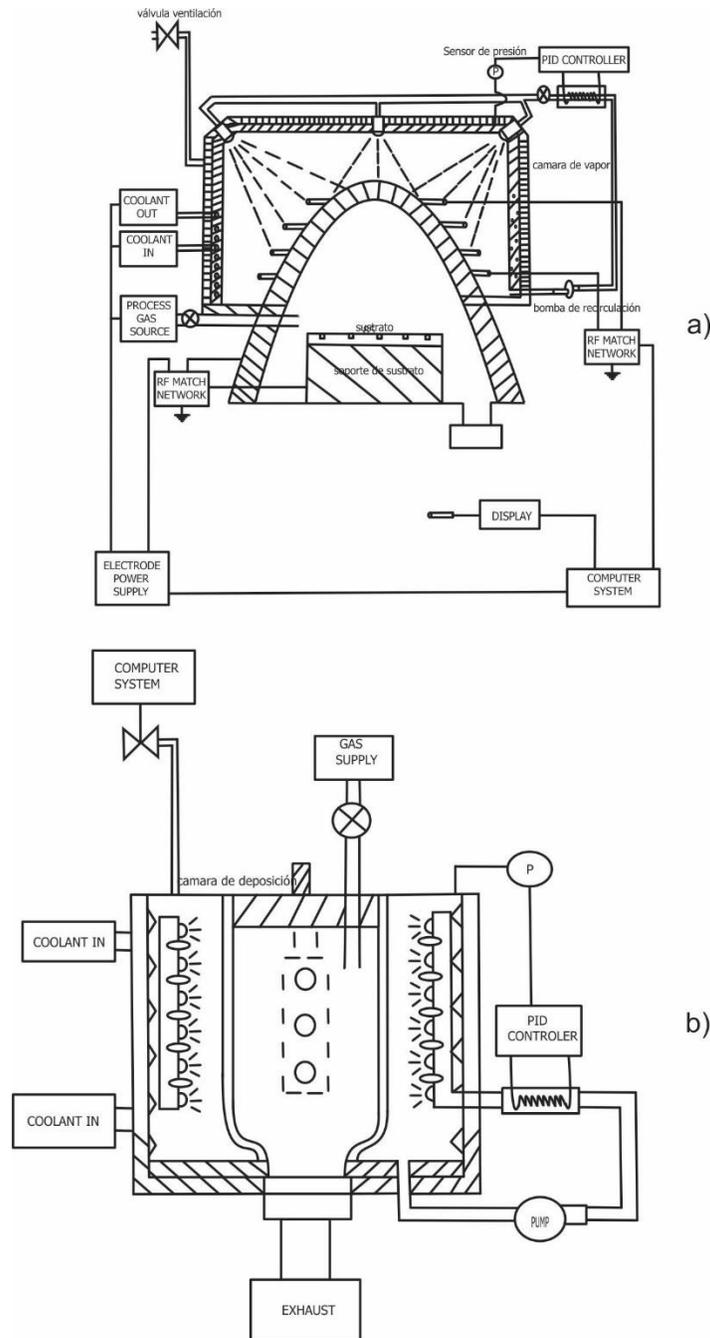


Figura 1.3 (a) Sistema de control de temperatura de una superficie de una cámara de proceso semiconductor. (b) Vista lateral de la cámara de deposición epitaxial.

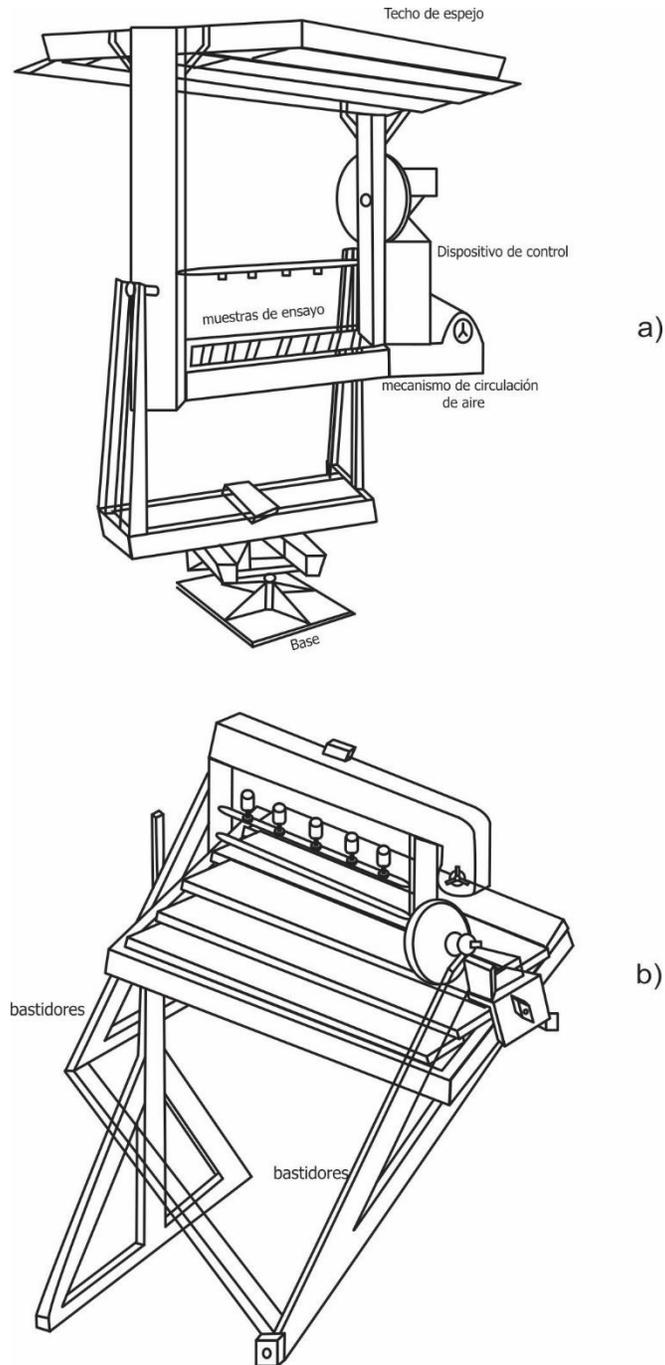


Figura 1.4 (a) Aparato de ensayo para exponer especímenes de prueba a radiación solar y otros efectos de meteorización sobre una base acelerada. (b) Vista perspectiva diferente a la principal.

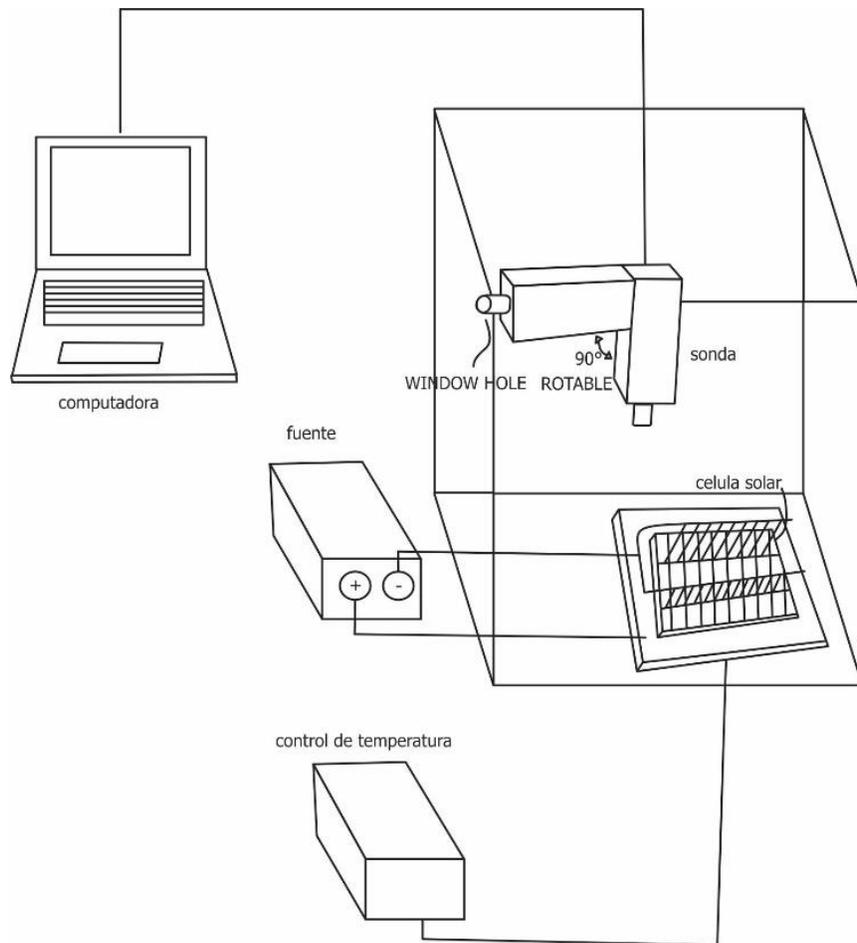


Figura 1.5 Vista esquemática de la patente US 7,847,237.

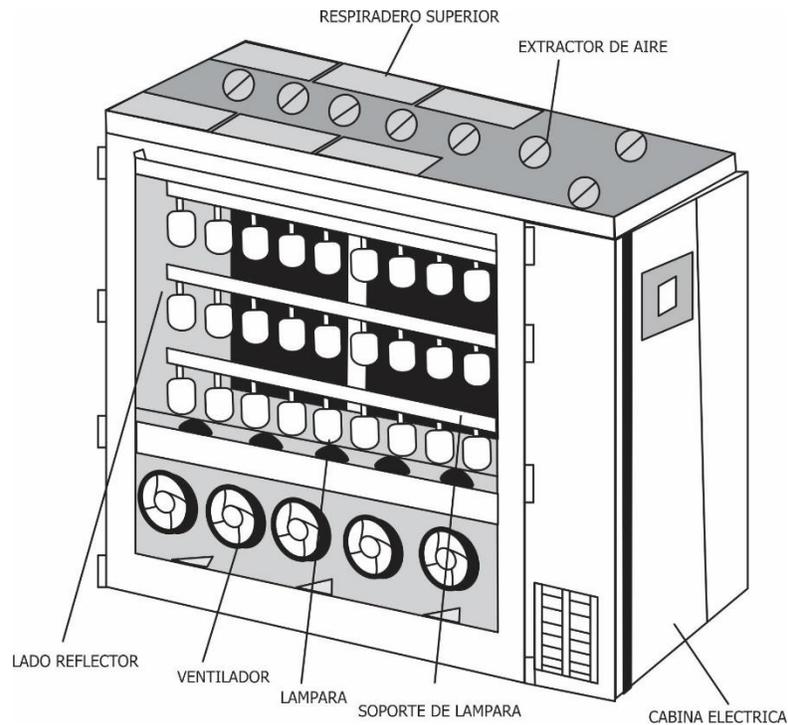


Figura 1.6 Sistema de inmersión ligera para módulos fotovoltaicos (PV) a la luz solar.

El siguiente aparato con la patente US 8,773,021 Figura 1.6 se refiere a un sistema de inmersión ligera para módulos fotovoltaicos (PV) a la luz solar simulada para fines de pruebas que comprende una cámara de pruebas que incluye una pluralidad de lámparas sobre el cual están dispuestos uno o más módulos fotovoltaicos para un reflector y dirigir la luz de las lámparas a un plano objetivo y a un sistema de refrigeración para extraer calor y mantener la temperatura de los módulos fotovoltaicos a un valor predeterminado. Esta patente es similar a al sistema presentado, pero infiriendo en algunos aspectos como la forma en que la luz llega a la celda solar mediante un espejo plano, el resistor al cual se le aplica una corriente y un voltaje independiente de la intensidad luminosa y por último con la diferencia de que en este sistema la configuración de terminales de las pruebas que sean realizadas en la celda solar no debe estar necesariamente terminada ya que no ha sido sometida al proceso *Light Soaking*.

Tabla 1.1 Tabla comparativa de diferentes aparatos comerciales con el proceso *Light Soaking* (continuada)

Modelo	 <p>Solixon A-20</p>	 <p>Light Soaking Chamber MH</p>	 <p>Sunlight Simulating Light Source</p>	 <p>Simulation System Chamber</p>	 <p>Cells tester A-1417</p>
Marca	 SOLARONIX				 SOLARONIX
descripción	<p>El rayo paralelo de la clase ABB al probador de células AAA que combina el simulador solar y <i>Light Soaking</i> de Solaronix, con el motor de luz Lumixo. Alto rendimiento y amplia área activa en un pequeño armario.</p>	<p>Cámara de absorción de luz MH de Greatcell Solar para iluminar células solares con luz solar emulada, acelerar el envejecimiento celular y realizar pruebas de rendimiento y estabilidad a largo plazo de células o baldosas.</p>	<p>Simulador solar pico de área pequeña para proporcionar una iluminación controlable.</p>	<p>Un Sistema que se suministra con cuatro (4) bandejas de módulos fotovoltaicos. Bandejas diseñadas para módulos de película delgada típicos para descansar directamente sobre rieles de soporte sistema de aire refrigerante que fluye por encima y por debajo de los paneles.</p>	<p>Probador de células con matrices de motor ligero Lumixo. Gracias a los motores de luz Lumixo, el área iluminada de estas máquinas se beneficia de una irradiación continua y estable.</p>
Dimensiones	<p>80 x 80 x 210 cm (cajón cerrado); 140 x 80 x 210 cm (cajón abierto)</p>	<p>30 cm x 40 cm x 27 cm (interior de la cámara) 50 cm x 57 cm x 65 cm (exterior de la cámara)</p>	<p>280.2mm largo 89.2mm ancho 87.2mm profundidad.</p>	<p>Cámara del panel fotovoltaico: 3400 mm x 2000 mm x 2415 mm H Bandejas de soporte de panel fotovoltaico: 640 mm x 1220 mm (8 piezas)</p>	<p>-</p>

1. Introducción

Tabla 1.1 *Tabla comparativa de diferentes aparatos comerciales con el proceso Light Soaking (...continuación)*

Tiempo de vida de lampara	Hasta 40'000 horas (20'000 horas de garantía)	10.000 horas	-	Aproximadamente 3.000 horas (calificación de salida y espectro)	Hasta 40'000 horas (20'000 horas de garantía)
Refrigeración de motor	Ventilación de aire forzado	Ventilación de aire forzado	No tiene	Ventiladores de enfriamiento operativos.	Ventilación de aire forzado
Espectro de luz	Clase A	Clase A	Clase A	Clase B	Clase A
Peso	~ 110 kg	~ 40 kg	Cabeza de iluminación 2 kg	Cámara solar: 700 kg. Gabinete de potencia: 500 kg	-
Consumo de energía	± 100V ± 4A	230 VAC, 3,5 A 1050 W	90 VCA-240 VCA, 50Hz-60Hz	208 V, 60 Hz, 3 fase; 30 kVA	± 100V ± 4A
Tipo de unidad	Solar Simulator / <i>Light Soaking</i>	Solar Simulator / <i>Light Soaking</i>	Fuente de luz simuladora de luz solar	Solar Simulator / <i>Light Soaking</i>	Solar Simulator / <i>Light Soaking</i>
Irradiancia	Iluminación no uniforme	72lm/W	9cm ²	2.6mx1.3m	Iluminación no uniforme
Software	Software (Tracer), controla la carga electrónica, permite un trazado simple de corriente-voltaje para una mejor caracterización.	Controlador de <i>Light Soaking</i> (incluido con un costo adicional)	Módulo de espectros variables, EQE y modulo IV (no incluidos)	-	-
Precio	US \$25,00-30,000	US \$17,730	US \$7,000	US \$19,999	US \$15,000-20,000

1.2 Justificación

El departamento de física aplicada del CINVESTAV Unidad Mérida, Yucatán, especializado en la fabricación de celdas solares de alta eficiencia, busca mejorar la eficiencia de conversión fotovoltaica mediante la optimización de dos parámetros empleados en la última fase de construcción de celdas solares de CdS/CdTe, denominada *Light Soaking*. Dicho grupo de investigación ha reportado que es posible incrementar la eficiencia de las celdas solares bajo ciertas condiciones de iluminación y temperatura no especificadas en la literatura. Por lo que los investigadores del Cuerpo Académico (CA) de electrónica y Sistemas se han unido a este proyecto del CINVESTAV mediante el diseño y la construcción de un sistema de instrumentación y control que permita la caracterización de las celdas solares que ellos fabrican en función de las dos variables mencionadas, mediante una interfaz que permita una comunicación intuitiva y agilice el tratamiento experimental de los datos medidos en tiempo real en la etapa de *Light Soaking*.

Lo anterior permite 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*. Esto, a su vez resultará en una mayor eficiencia de conversión fotovoltaica de dichas celdas instaladas en el campo.

Con el tema de estas tesis se propone una herramienta capaz de asistir a los investigadores en las pruebas indicadas para la mayor eficiencia fotovoltaica aplicadas en celdas solares en función de las variables de intensidad luminosa y temperatura en tiempo real, y así tener resultados específicos que sirvan para su caracterización y aporten datos útiles para su producción, en un futuro, a gran escala.

En vista de lo expuesto, se justifica el diseño y construcción de un equipo que aplique luz y temperatura y que mida eficiencia de la celda en términos de dos variables: corriente y voltaje en celdas solares.

Cabe señalar que la presente tesis es parte de un proyecto titulado “Construcción de un sistema para caracterizar la eficiencia de la etapa *Light Soaking* en el proceso de fabricación de celdas solares”.

Para su desarrollo, se ha dividido en varias partes, en las que la interfaz gráfica y el sistema de control serán desarrolladas en las otras tesis.

1.3 Objetivo

Construir un sistema en el que se controle la temperatura y la intensidad luminosa en la etapa de *Light Soaking* de forma automática, de tal modo que se pueda monitorear el voltaje y la corriente en una celda solar durante dicha etapa, y así proveer una herramienta para encontrar los rangos de valores en los que la temperatura y la intensidad luminosa resulten en una mayor eficiencia de transformación fotovoltaica en las celdas solares CdS/CdTe.

1.4 Hipótesis

*Es posible desarrollar un sistema de instrumentación que permita variar los parámetros de temperatura e intensidad luminosa en la etapa *Light Soaking* para que se obtenga una mayor eficiencia de conversión fotovoltaica, en términos de la potencia de salida de celdas solares CdS/CdTe comparado con los valores de potencia de las pruebas manuales que actualmente se llevan a cabo en el CINVESTAV Mérida a un menor costo que sistemas similares.*

1.5 Contenido de la tesis

La tesis está integrada de 4 capítulos. En el primer capítulo se da una breve explicación de los antecedentes de proyectos similares para mejorar la eficiencia en celdas solares. En el capítulo 2 se presentan conceptos de energía solar, el principio de funcionamiento y el concepto de *Light Soaking*. El capítulo 3 muestra un diseño para la construcción del sistema que permitirá regular la temperatura e intensidad luminosa en la etapa *Light Soaking*; incluye sus principales variables y su forma de transmitir la información mediante el uso de una minicomputadora *Raspberry Pi 3*. En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos y de igual manera los contratiempos para la construcción del sistema. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo desarrollado, así como sus posibles temáticas a los que da pie.

2. Antecedentes del tratamiento de la fabricación de celdas solares

Se produce una célula solar partiendo de un disco muy delgado 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. Puesto 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 suministren 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

fuentes 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).

2.1 Principios de funcionamiento

El campo eléctrico en una celda orgánica se puede generar mediante la unión de dos capas, como se observa en la Figura 2.1: 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 solo ocurre en la interfaz se genera una diferencia de potencial, que se puede ver como un dipolo, y que solo 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 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.

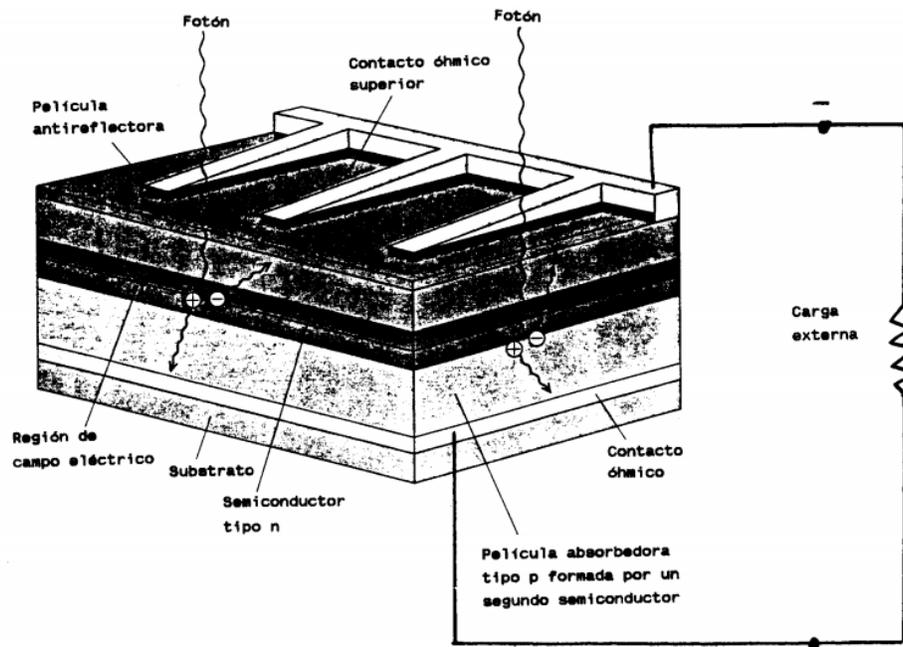


Figura 2.1 Estructura de una celda solar.

La Ecuación 2.1 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:

$$I = I_l - I_s \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{KT} \right] - 1 \right\} - v / R_{sh} I_L = CR \quad (2.1)$$

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 con los consumos que los seres humanos pueden hacer de ellas son consideradas inagotables y su propio consumo no afecta el ambiente.

2.2 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 irradiancia esta entre $10^{-4} \frac{W}{cm}$ y $10^{10} \frac{W}{cm}$, mientras que la irradiancia de los metales varía entre $10^{-4} \frac{W}{cm}$ y $10^{-6} \frac{W}{cm}$. Materiales semiconductores son, por ejemplo, Si, Ge, P, As; compuestos químicos como $CuAlS_2$, etc. A muy bajas temperaturas los semiconductores se comportan como aislantes, mientras que a altas temperaturas se puede llegar a comportar como metales. (A. 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/cm³ 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 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. Está 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 2.1.

Tabla 2.1 *Conductividad de diferentes materiales*

Material	Segmento
<i>Si</i>	1.14
<i>Ge</i>	0.67
GaA	1.4
GaP	2.25
Te	0.33
CdS	2.42
CdTe	1.45
CdSe	1.72
Cu ₂ O	2.1
TiO ₂	3.0
Cu ₂ S	1.2

La radiación proveniente del sol tiene una distribución espectral como se muestra en la Figura 2.2.

Puesto que la energía de los fotones que componen la luz y la longitud de onda de la luz, están relacionadas por la ecuación (2.2) $E = h c / \lambda$ (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:

$$E = 1.24 \left(\frac{\mu m}{\lambda} \right) eV \quad (2.2)$$

Los fotones más energéticos corresponden a las menores longitudes de onda (UV: Ultravioleta y color violeta) y los menos energéticos al infrarrojo y en el visible, al rojo, en la Figura 2.2 se muestra la distribución espectral de la radiación. (Celdas)

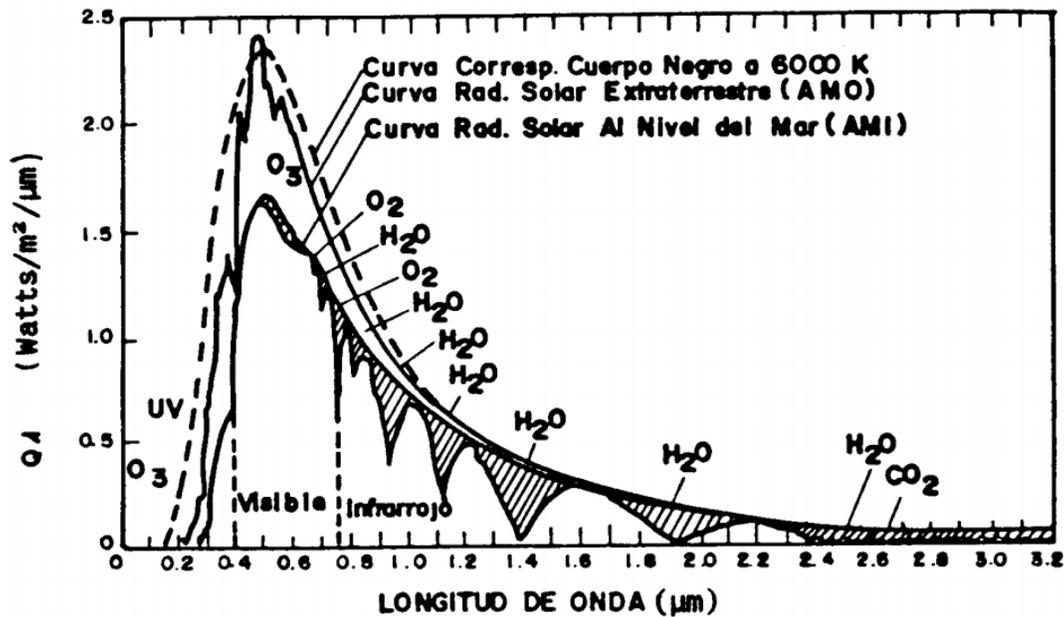


Figura 2.2 Distribución espectral de la radiación solar.

2.3 Clasificación de celdas solares

El mecanismo general del proceso fotovoltaico consta de tres pasos: 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 en 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.

Otra 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 **CuInSe₂**.

2.3.1 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 tres pasos Figura 2.3:

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.

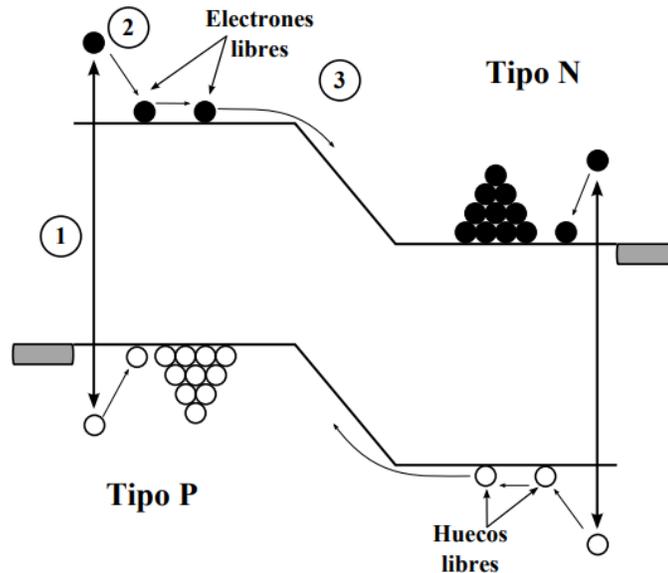


Figura 2.3 Niveles de energía en una celda solar inorgánica 1) Absorción de fotones, 2) Generación par electrón-hueco y 3) Difusión de electrones y huecos generadores.

2.3.2 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 %; .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 por lo 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 (*Organic Light Emitting Diodes*). El proceso inverso a la electroluminiscencia, esto es, 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 2.4, 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)

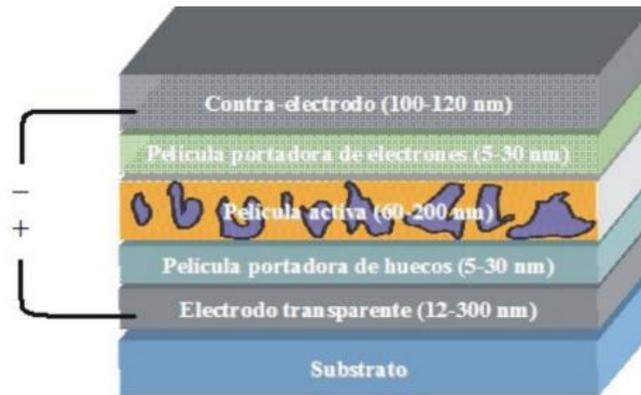


Figura 2.4 Esquema de una celda solar orgánica (celda OPV) multicapa.

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° y que corresponde entre 800 W/m^2 1000 W/m^2 . Los parámetros útiles para lo anterior son:

Tabla 2.2 Parámetros para el cálculo de la eficiencia de conversión fotovoltaica.

Parámetro	Descripción
V_{oc}	Voltaje de circuito abierto
J_{sc}	Densidad de corriente de corto
V_m	Voltaje de máxima potencia
J_m	Densidad de corriente de máxima potencia
FF	Factor de llenado
P_{in}	Intensidad de iluminación incidente

Así como están definidos por las ecuaciones 2.3 y 2.4, Ambas ecuaciones se emplean en la caracterización de celdas solares OPV, ecuación para el cálculo de la eficiencia (2.3) y ecuación para el factor de llenado (2.4)

Para lograr altas eficiencias de conversión eléctrica se requiere tener los máximos valores de V_{oc} , J_{sc} , y FF.

$$n = FF \frac{V_{oc} J_{sc}}{P_{in}} \quad (2.3)$$

$$FF = \frac{V_m J_m}{V_{oc} J_{sc}} = \frac{P_{max}}{V_{oc} J_{sc}} \quad (2.4)$$

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^2 . La lámpara emite luz con un espectro muy similar al del Sol en el visible y cercano infrarrojo. (Barbosa Garcia Oracio, 2012)

2.4 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:

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 (Fosforo).
5. Aislamiento de bordes para evitar derivación.
6. Deposición de recubrimiento antirreflejo (SiNx).
7. Formación del contacto frontal por serigrafía.

8. Formación de contacto posterior por serigrafía.
9. Horneado de contactos metálicos.

(Moncayo, 2015)

Light Soaking

El efecto de *Light Soaking* está relacionado el seleniuro de galio (CIGS) es un semiconductor material compuesto de cobre, indio, galio y selenio Figura 2.5. Se tiene un módulo de este compuesto que contiene una película delgada de un semiconductor llamado Cu (In,Ga) Esta capa absorbente es la tecnología clave del módulo CIGS, y permite su inteligente aspecto, conversión de energía eficiente y alto rendimiento energético En comparación con el **Si** convencional. El efecto *Light Soaking* está relacionado con la capa amortiguadora de la célula solar. En la interfaz entre el CIGS y la capa tampón se crea una barrera para los electrones, que inhibe el transporte de portadores desde el CIGS a la capa de conducción transparente Óxidos y al circuito exterior.

El grado y la dependencia del tiempo del efecto *Light Soaking* dependen principalmente en la dosis de la luz azul que el módulo recibe y el estado inicial de la capa de buffer.

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 ideal, 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.

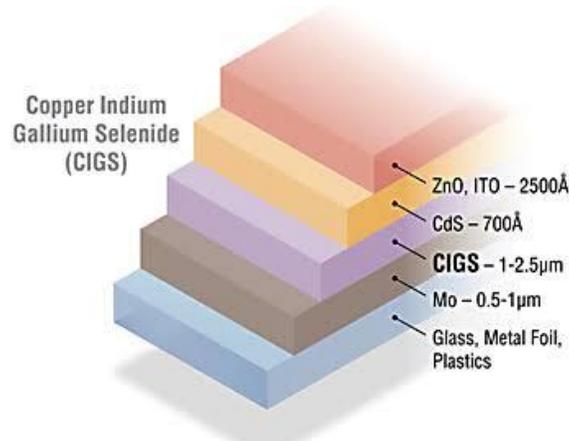


Figura 2.5 CIGS

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

Silicio amorfo

El silicio amorfo (**a-Si**) es una de las primeras tecnologías fotovoltaicas de película delgada y exhibiciones una degradación inducida por la luz bien conocida efecto, 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 de recuperación que 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 buffer 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 puede

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 vías 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. (MR.MANOJ KUMAR SHARMA, 2012)

3. Diseño y construcción de un sistema para caracterizar la eficiencia de la etapa *Light Soaking* en el proceso de fabricación de celdas solares.

3.1 Introducción

Algunos investigadores realizan el efecto *Light Soaking*, después de la exposición al módulo a la luz solar y lo estabilizan después de aproximadamente 50 horas de sol. Las pérdidas de producción que ocurren durante la vida útil de los módulos corresponden a la degradación natural de menos 0.5% por año.

En este capítulo se da a conocer lo necesario para la construcción, el diseño y la implementación del sistema para la caracterización de la eficiencia de la etapa *Light Soaking* en el proceso de fabricación de celdas solares.

Esta etapa consiste en aplicar cierta temperatura e intensidad luminosa a la celda solar. Algunos experimentos han demostrado que la eficiencia en celdas depende de su temperatura, además de que la exposición a la luz puede producir variedad de efectos que influyen en el rendimiento y la estabilidad para lo cual se estableció la siguiente metodología:

Diseño de una cámara de pruebas funcional para medir temperatura e intensidad luminosa.

Construcción física de un sistema para medir temperatura e intensidad luminosa.

Diseño e implementación del circuito PWM para el encendido de la resistencia eléctrica.

Diseño e implementación del circuito de lámparas para el encendido.

Diseño e implementación de circuito controlador de motor a pasos unipolar.

Diseño e implementación del subsistema para el control de iluminación.

Diseño e implementación del sistema de direccionamiento de aire.

Diseño e implementación de circuitos medidores de corriente y voltaje.

También se describe el manejo de cada parámetro utilizado en las diferentes etapas del diseño e implementación del sistema para la caracterización de la eficiencia de la etapa *Light Soaking* n el proceso de fabricación de celdas solares CdS/CdTe.

3.2 Descripción detallada del Sistema

El sistema se ha diseñado principalmente para medir la eficiencia de conversión fotovoltaica de una celda solar en función de dos variables, luz visible y temperatura, las cuales serán analizadas a una cámara de pruebas.

La cámara de pruebas del sistema está constituida por 4 paredes laterales montadas en un primer nivel, un techo, una pequeña cabina y un piso, construidos de tambor de lámina metálica en cuyo interior contiene fibra de vidrio para reducir las pérdidas de calor del interior de la cámara de pruebas hacia el exterior de esta.

La parte superior (2) de la cámara de pruebas (1) tiene una apertura en la parte superior la cual permitirá un flujo de salida de aire caliente del interior de la cámara de pruebas (1).

Se tiene una parrilla (26) ubicada en la parte inferior central de la cámara de pruebas posicionada horizontalmente, cuya función será sostener un soporte de vidrio (12) en donde se ubica una celda solar (61) con una región en su superficie o terminal con polaridad positiva y una región en su superficie o terminal negativa, la cual recibirá un haz luminoso (18) procedente de dos lámparas (13) ubicadas en una de las paredes de la cámara de pruebas (1). Un haz luminoso radiara hacia la celda solar por medio de un espejo parabólico (15), en cuyo foco se encuentra la lámpara de tal forma que en su trayectoria de su eje focal (16) hay un espejo plano (10) con una posición determinada por un medio de sujeción (11) que forma un ángulo (17) entre la vista lateral del espejo plano (10) y el eje focal (16) que dirigirá el haz luminoso hasta la superficie de la celda solar (61). Figura 3.1.

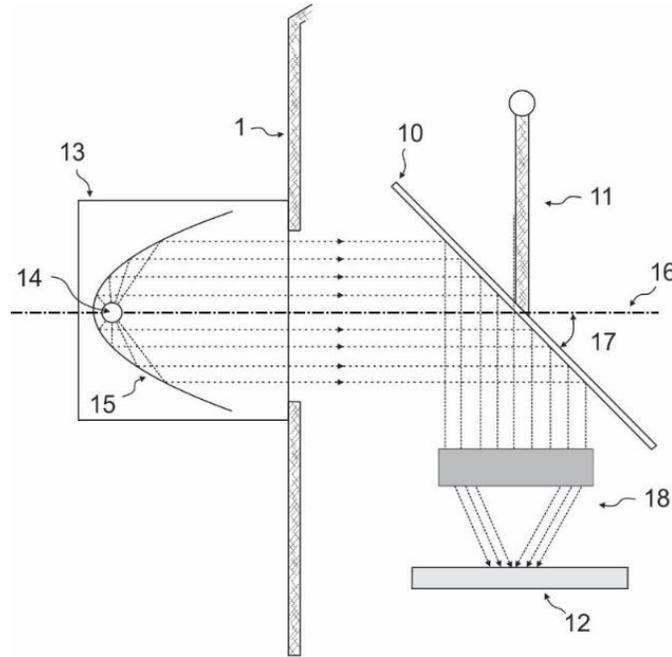


Figura 3.1 Vista perspectiva del haz incidente de luz reflejada a la celda solar.

La cámara de pruebas (1) tiene una puerta (27) de acceso que permite introducir y extraer la celda solar (61), de igual manera que la superficie de vidrio (12). La puerta tiene una manija que ayuda a abrir y cerrar la misma de forma manual.

Para poder controlar la temperatura a los requerimientos necesarios se implementa un resistor eléctrico (19) que eleva la temperatura del aire interior de la cámara de pruebas (1). El modo en que la temperatura del aire se mantiene homogénea es muy similar a los termiteros que se encuentran en la naturaleza donde se mantiene la temperatura de su interior y no escapa a menos que se requiera.

Dentro de la cámara de pruebas del sistema descrito, se tienen unas vías de distribución de aire (81) en forma de cilindro hueco elaborado del mismo material de todo el aparato, un extremo de dicho medio está ubicado en el techo (2) de la cámara de pruebas (1) por una

apertura de aire caliente (3) que permita el flujo de aire caliente hacia el exterior de la cámara de pruebas (1).

En estas vías de distribución de aire (81) se ubica un primer servomotor (4), cuyo eje (23) está unido a un disco echo de aluminio (30) cuyo principal funcionamiento es permitir o impedir el flujo de aire caliente a través de dichas vías de distribución de aire (81) teniendo dos posiciones esenciales para realizar el propósito según se requiera.

Para este proceso de recirculación de aire caliente, entrada de aire del exterior y disminución de la temperatura de la cámara de pruebas (1), la presente invención provee de un espacio extra de circulación de aire (7) que se encuentra rodeando la cámara de pruebas (1) en su parte inferior, de forma que exista una pluralidad de orificios entre el espacio extra de circulación de aire (7) y el interior de la cámara de pruebas (1).

De igual manera se tiene una segunda vía de distribución de aire (21), con un segundo servomotor (20), cuyo eje (24) está unido a una segundo disco (29) posicionado en este medio de conducción para permitir el flujo de aire caliente o evitar la fuga de aire caliente contando nuevamente con dos posiciones esenciales según lo requerido, contando con una nueva función que nos ayudara a la recirculación de aire caliente por convección desde el techo (2) de la cámara de pruebas (1) hasta el espacio extra de circulación de aire (7).

Al momento de querer disminuir la temperatura del interior de la cámara de pruebas (1), un ventilador adsorbe aire del exterior de la cámara de pruebas (1) al espacio extra de circulación de aire (7) a través de una tercera vía de distribución de aire (6) cuyo primer extremo se encuentra el ventilador (5) y el otro extremo acoplado a el espacio extra de circulación de aire (7). Al igual que las otras vías de circulación de aire cuenta con su propio servomotor (22), cuyo eje (25) está unido a un tercer disco (31) teniendo la misma función de permitir y obstruir el flujo de aire caliente a través de esta tercera vía de distribución de aire (6) hacia el interior del espacio extra de circulación de aire (7).

En las figuras 3.2 a y 3.2 b, se colocará un conector en forma “I” (9) para dirigir el aire caliente hacia el exterior o el interior del espacio extra de circulación de aire (7).

Se puede controlar la temperatura del interior de la cámara de pruebas (1) teniendo en cuenta los siguientes pasos a seguir para cumplir eficazmente con el objetivo.

- 1) Si se desea incrementar la temperatura del interior de la cámara de pruebas (1), el primer disco de aluminio (30) debe estar en posición de cerrado para evitar la fuga de aire caliente al exterior; el segundo disco (29) debe estar en posición de abierto para permitir el paso del aire caliente hacia el espacio de circulación de aire (7) y el tercer disco de aluminio (31) debe estar en posición de cerrado para evitar la fuga de aire caliente del espacio extra de circulación de aire (7), asimismo evita un aumento de calor a las aspas del ventilador que se encuentra apagado, mismas que pudieran deformarse por el material de dichas aspas como por ejemplo si son de plástico.
- 2) Si se requiere disminuir la temperatura del interior de la cámara de pruebas (1), el primer disco de aluminio (30) debe estar en posición de abierto para permitir que escape el aire caliente al exterior de la máquina de pruebas ; el segundo disco (29) debe estar en posición de cerrado para bloquear el paso del aire caliente hacia el espacio extra de circulación de aire (7) y el tercer disco (31) debe estar en posición de abierto para permitir el flujo de aire a temperatura ambiente del espacio extra de circulación de aire proveniente del ventilador (7) que se encuentra encendido.

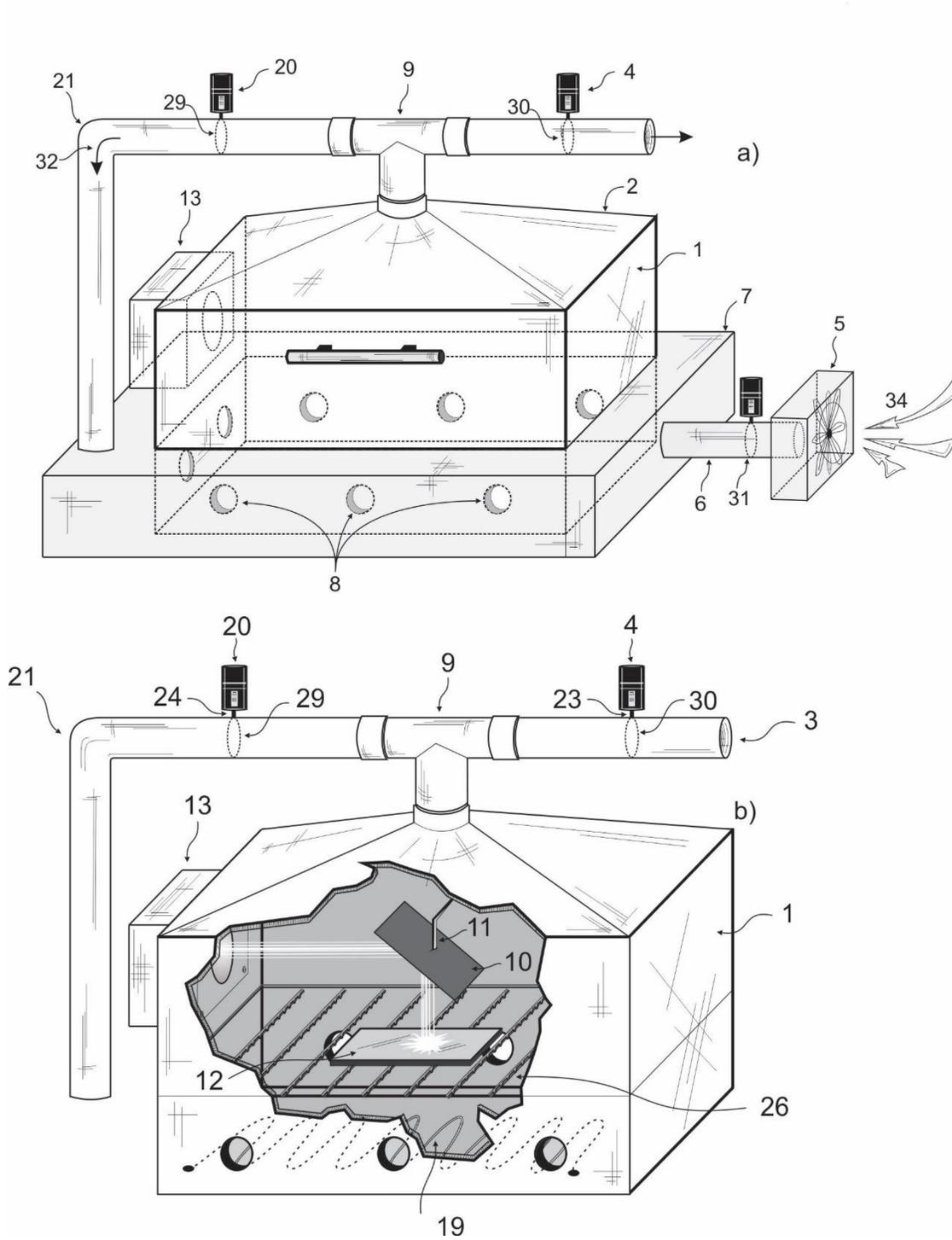


Figura 3.2 (a) Estructura Física del sistema para la etapa Light Soaking. (b) Estructura interna del sistema para la etapa Light Soaking.

En la parte eléctrica de esta invención cuenta con lo que es un primer dispositivo de control (35) de un primer dispositivo de conmutación (54) el cual suministra una corriente eléctrica al resistor calentador (19) que se encuentra por debajo de una parrilla(26) proveniente de una primera fuente de alimentación (5), además un segundo dispositivo de control (50) de un segundo dispositivo de conmutación (52) que otorga una corriente eléctrica a una lámpara (14) proveniente de una segunda fuente de alimentación (57), en donde la lámpara (14) visto en la Figura 3.3 proporciona radiación luminosa a la celda solar (61). Por último, se tiene un tercer dispositivo de control (51) de un tercer dispositivo de conmutación (53) que provee una corriente eléctrica hacia el ventilador (5) proveniente de una tercera fuente de alimentación (56), el ventilador (5) tendrá el objetivo de introducir aire del exterior hacia el espacio extra de circulación de aire (7).

Se encuentra un voltímetro (41) en la entrada positiva del primer contacto de resorte (39) y en la entrada negativa del segundo contacto de resorte (40); también se encuentra un amperímetro (42) conectado a la entrada positiva a través de una resistencia de carga (82) al primer contacto de resorte (39) y conectado a la entrada negativa del segundo contacto de resorte (40) con el fin de que un microcontrolador (34) capture, almacene y transmita los valores de la mediciones de voltaje y corriente obtenidos, donde el voltímetro (41) y el amperímetro (42) tienen en común un circuito de acondicionamiento (43,45) que servirá para transmitir los valores de dichas mediciones por medio de un conversor analógico digital (44,46) unido a un microcontrolador(34). El microcontrolador tiene la función de transmitir los valores medidos de corriente y voltaje donde tendrá que estar conectado a un módulo de comunicación (38), que a su vez se encuentre conectado a una computadora (37). Cuando se desea medir la temperatura de la celda solar (61), un sensor de temperatura (47) en el que se elige si se quiere ser analógico o digital que estará en contacto con el soporte de vidrio en el que se monta la celda solar (61), en donde su salida se encuentra unida eléctricamente al microcontrolador (34) todo esto mostrado en la Figura 3.3.

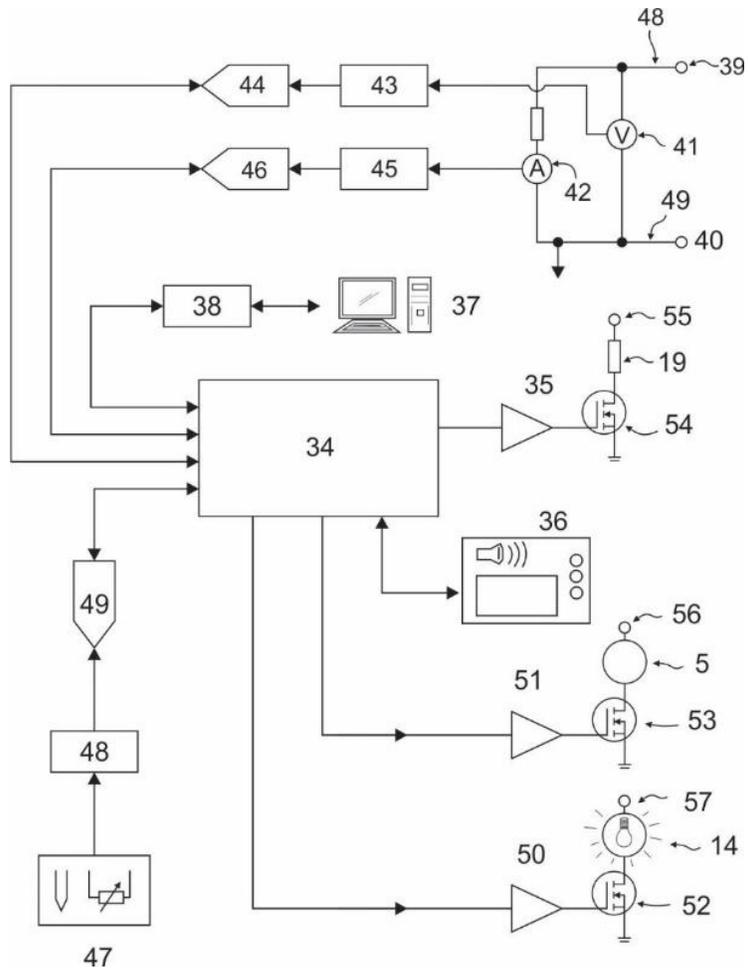


Figura 3.3 Diagrama esquemático para el control de voltaje y corriente.

Por último, la parte mecánica de este sistema tiene el propósito de tener en una determinada posición los dos contactos de resorte (39,40) sobre la celda. En las figuras 3.4 a y 3.4 b se observa observar un primer soporte (67) al que se encuentra sujeto el primer contacto de resorte (39), en donde el primer soporte tiene una forma de escuadra, y se visualiza en una lateral de esta escuadra una ranura(64) la cual ayudara a deslizar un pequeño perno (60) para ajustar la posición del primer contacto de resorte(39) longitudinalmente (izquierda-derecha) sobre la celda solar (61), asimismo otra lateral de esta misma escuadra tendrá otro pequeño perno para el movimiento transversal (adelante-atrás),que se deslizará sobre una ranura (63) de una sección lateral derecha (69) de un marco con un empotramiento (74) y ajuste de altura para estar separada de la parrilla (26) donde se ubica el soporte de vidrio (12) y sobre este la celda solar (61) de tal modo que el primer contacto de resorte (39) y el segundo contacto de resorte (40) tengan la presión suficiente sobre la celda solar (61) para medir el voltaje y la corriente que suministra la celda.

Al momento de las mediciones de voltaje y corriente de la celda solar se tienen dos contactos de resorte (39,40). El primer contacto de resorte (39) se conecta con la región en su superficie con polaridad positiva de la celda solar (61); y otro segundo contacto de resorte (40) con la parte negativa de la misma celda (61).

El soporte para el segundo contacto de resorte (40) tiene la misma estructura que el del primer contacto de resorte (39), con el fin de establecer la temperatura y la intensidad luminosa a la que será sometida la celda solar, y de igual manera observar los valores de corriente eléctrica medidos por el sistema, además se incluirá una interfaz visual(36), o bien varias pantallas alfanuméricas para un mejor análisis de los resultados arrojados por esta invención, no obstante el sistema incluirá una memoria lo suficientemente grande para almacenar los valores de corriente y voltaje medidos de la celda solar(61) en función de la temperatura e intensidad luminosa. Figura 3.4

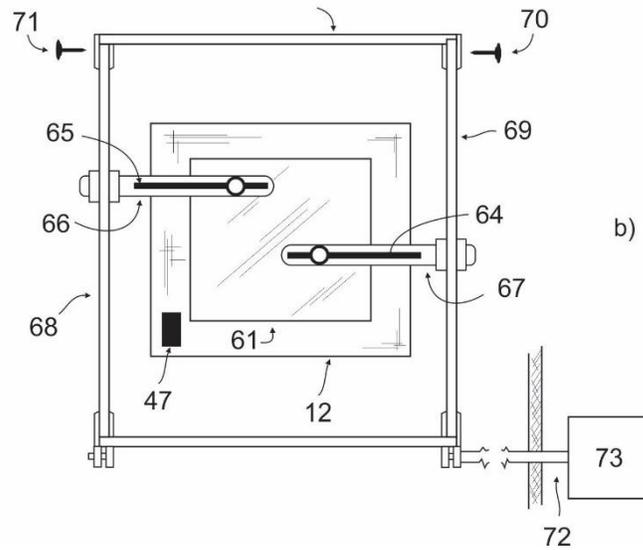
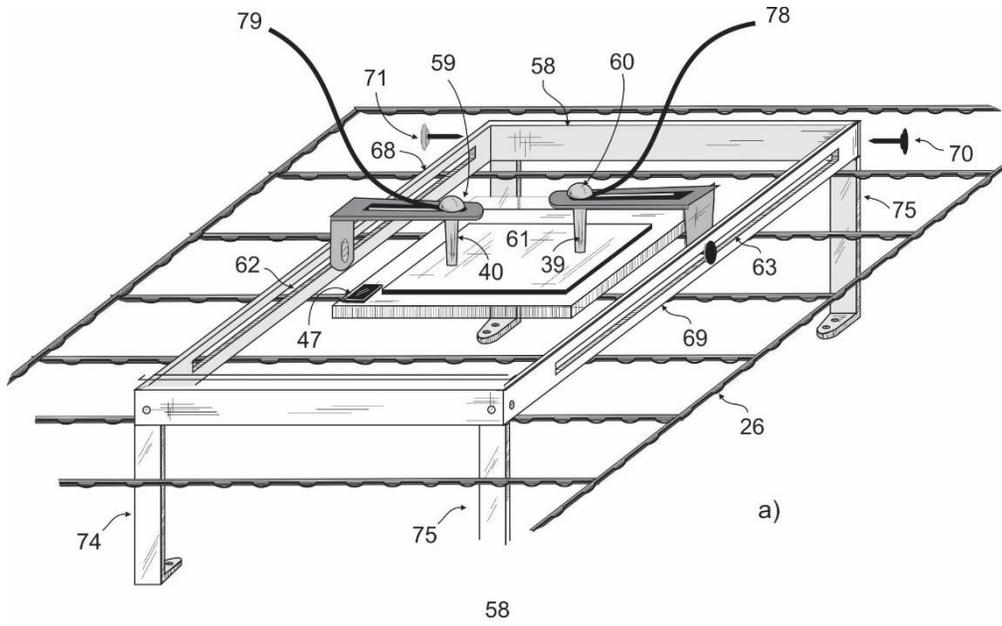


Figura 3.4 (a) Implementación de la celda solar. (b) Implementación de la celda solar vista superficial.

A continuación, se explica el diagrama a bloques de todas las etapas que conlleva el sistema descrito en la Figura 3.5, la etapa de la comunicación hacia los dispositivos y el desdoblamiento de los valores obtenidos de las pruebas relacionadas (a). La etapa de calentamiento y del enfriamiento del sistema para el parámetro de la temperatura (b). La etapa de iluminación donde se controla el rango de luminosidad requerida para dopar a la celda solar y mejorar su eficiencia fotovoltaica (c). La etapa de conversión de unidades de la celda solar hacia los dispositivos de despliegue en forma de lectura y manejo de éstas (d).

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 Pi 3* y esta misma devuelve una señal que llegará a un *Triac* donde este permitirá el flujo de corriente a las lámparas pudiendo en esta la señal modificar su forma recortándola y por consecuente cambia la intensidad luminosa de las lámparas. (Salas Garcia, Laura, & Mireya, 2018)

Posteriormente en la parte de los apéndices se analiza el diseño eléctrico del sistema diseñando en el programa Proteus 8 Profesional proponiendo los componentes adecuados para cada etapa que conlleva el sistema empezando por el controlador *PIC 18F4550* que conecta todas las etapas del sistema al centro del sistema que es la *Raspberry Pi 3* y a su vez a la interfaz gráfica para la interacción con el usuario agregando sus respectivas protecciones para el mismo y para cada etapa (optoacoplador y Red *Snubber*) contra picos de voltaje y sobre impulsos de corriente eléctrica, también se diseñan los circuitos de temperatura y sistema de ventilación del sistema.

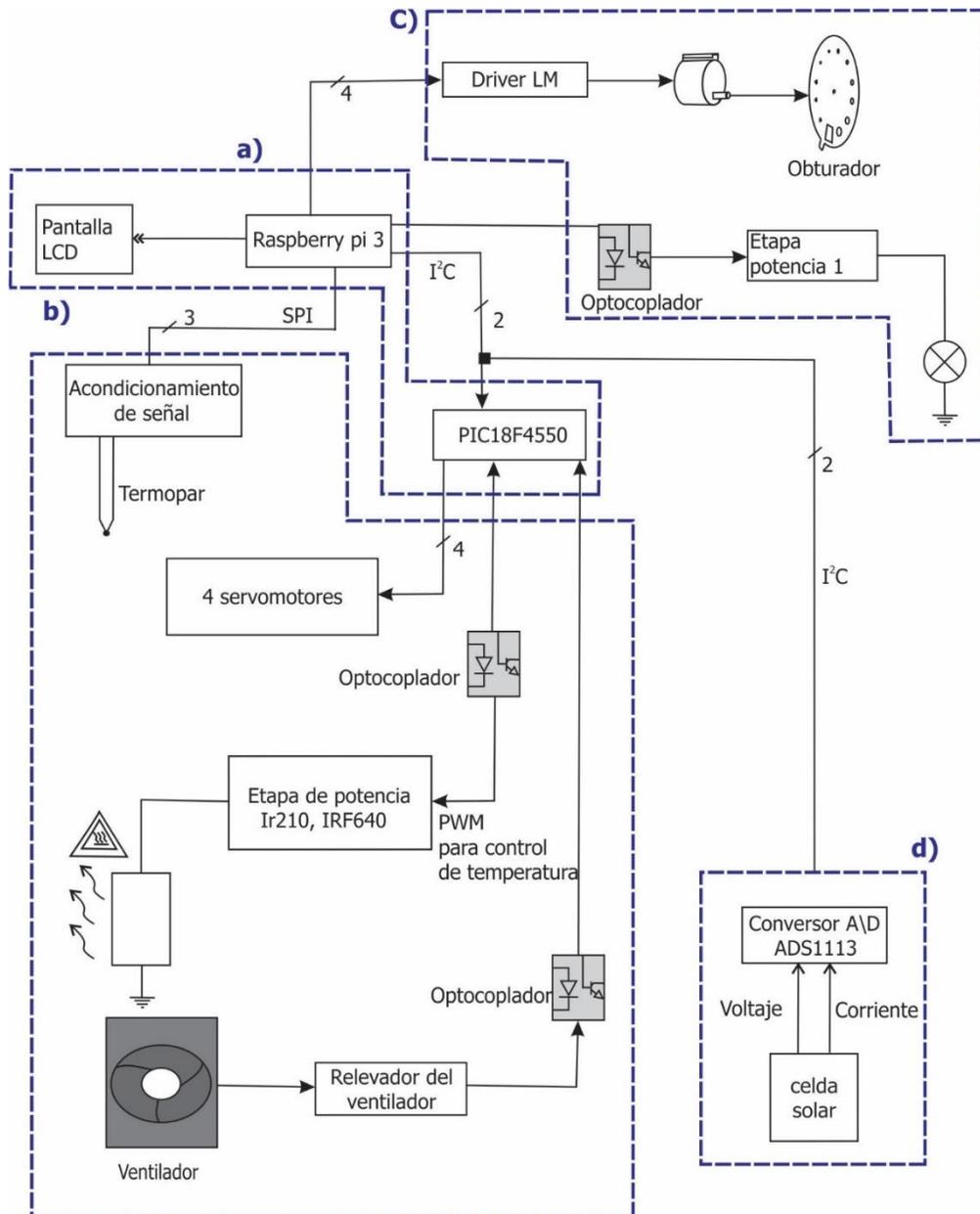


Figura 3.5 Diagrama a bloques general del sistema.

3.3 Soporte Físico del sistema (*hardware*)

3.3.1 Temperatura

En este apartado se desarrolla lo que es la comprobación de la temperatura generada en la cámara de pruebas con ayuda de la cámara infrarroja FLIR E5 que determina la temperatura que alcanza el sistema al momento de someterlo al proceso *Light Soaking*, encontrando posibles detalles que afecten a algún circuito y poder dar un mantenimiento predictivo antes de que pase alguna falla grave o bien un mantenimiento correctivo al momento de detectar alguna fuga de aire caliente en el sistema que afecte severamente a las mediciones y al resultado que se requiere obtener. En esta tesis. Figura 3.6



Figura 3.6 Cámara termográfica profesional FLIR E5.

También se implementa el uso de un vernier analógico con dos terminales soldadas en sus puntas para la sujeción de cables de calibre grueso capaz de soportar temperaturas mayores de 100°C sujeto a una base de vidrio con la finalidad de conectar estas terminales a la celda solar y tener un mayor precisión y manejo de esta.

EL funcionamiento del vernier analógico de la Figura 3.7 es ajustar la medida de la celda solar que se llega a tener al momento de realizar cualquier tipo de prueba y posicionarla a un costado de un termopar tipo K que ayuda a conocer el estado de la temperatura en tiempo real que la celda solar este experimentando.

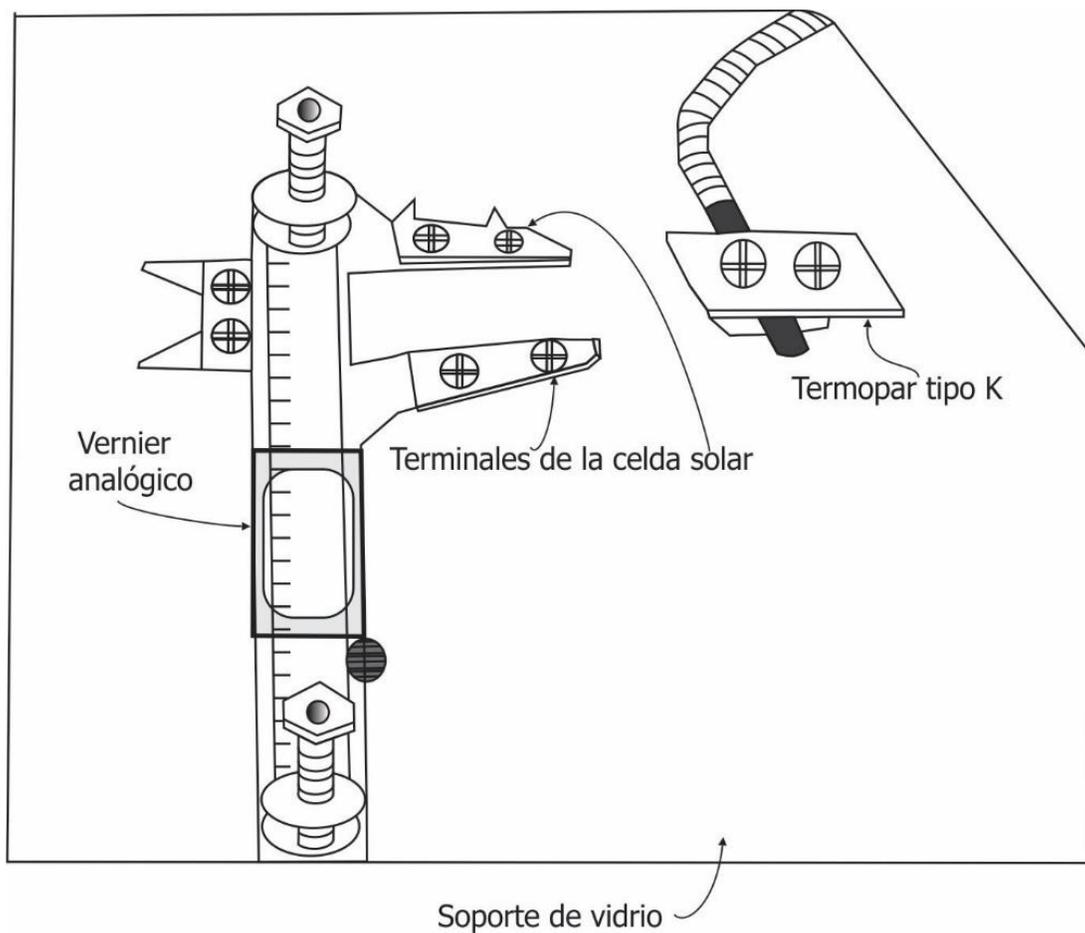


Figura 3.7 Vernier Analógico y termopar tipo K.

3.3.2 Iluminación

Este apartado describe la etapa de iluminación desarrollada para el control de la etapa *Light Soaking* donde se propone la instrumentación de dos lámparas tipo led para refractar su haz luminoso y enfocarlo a un punto específico donde la celda solar se encontrará por medio de un espejo plano y una lupa posicionado milimétricamente con el uso de un instrumento de medición Vernier y así tener la iluminación requerida para realizar la prueba en nuestra etapa de *Light Soaking*.

En la Figura 3.8 se observa el interior de la cámara de pruebas con la implementación de los elementos mecánicos para dirigir el haz luminoso a un punto específico.

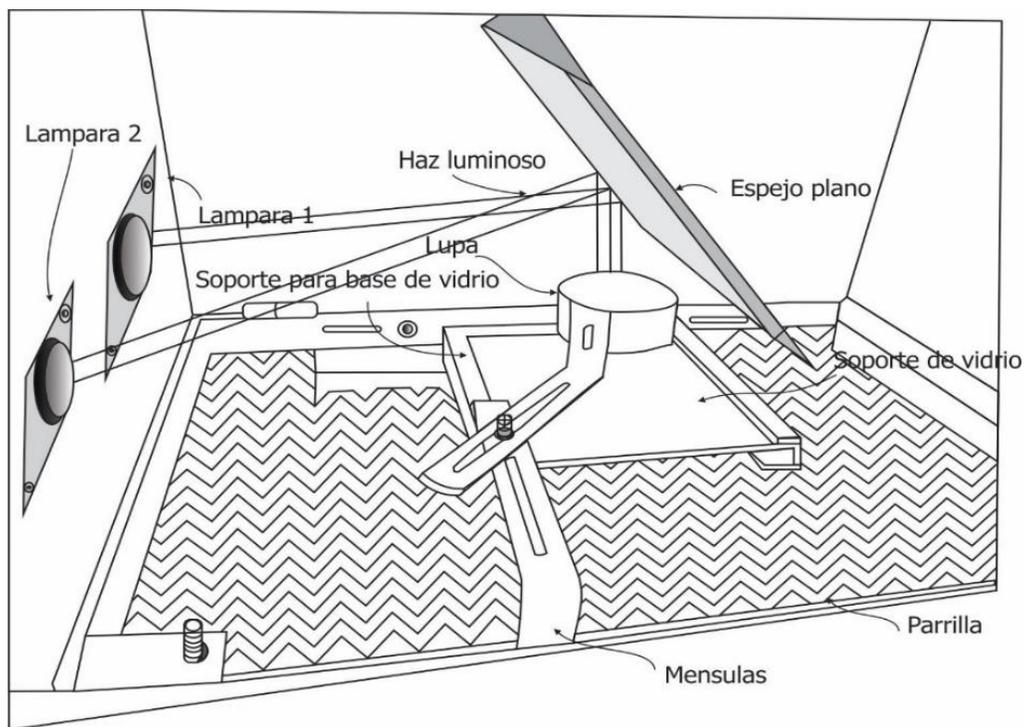


Figura 3.8 Vista Interna de la estructura principal del sistema.

Para lograr este efecto de direccionamiento de luz enfocado a un área específica fue requerido la implementación de una ménsula en forma de escuadra la cual tiene un movimiento lateral y longitudinal dentro de la cámara de pruebas del sistema para ajustar en la posición ideal una lupa que se encarga de enfocar el haz luminoso a una determinada área figuras 3.9 y 3.10.

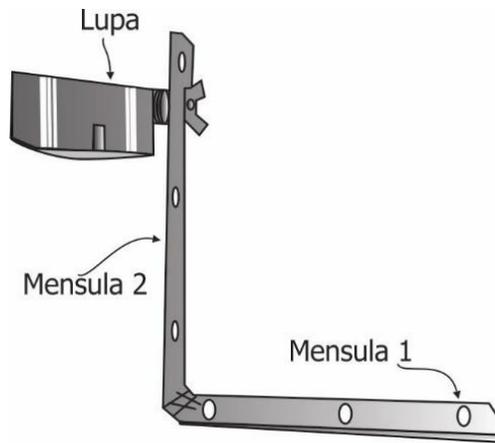


Figura 3.9 Vista lateral de ménsulas acopladas en forma de escuadra con lupa.

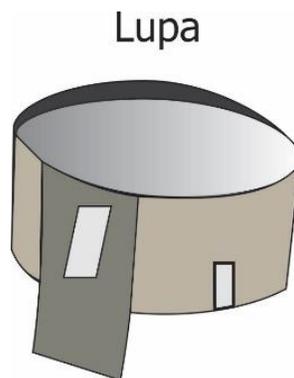


Figura 3.10 Lupa.

3.3.3 Sistema de direccionamiento de Aire.

En este sistema describe el proceso de distribución de aire caliente generado por la resistencia eléctrica dentro de la cámara de pruebas y así mismo el control que se usa para direccionar el aire caliente dentro del mismo.

Se cuenta con 3 servomotores posicionados en dos salidas de aire diferentes , dos servomotores en la parte superior y uno en la parte inferior, la función de cada servomotor es impedir o dejar fluir aire caliente a la cámara de pruebas del medio ambiente mandando una señal al microcontrolador *PIC 18F4550* y controlar estos servomotores a una posición de 0° a 90° con un eje conectado a un obturador echo de aluminio con el diámetro exacto de la salida de aire así mismo con un engrane en un extremo y otro engrane al servomotor. Se tendrán ocho diferentes combinaciones para escoger la posición de los servomotores y poder distribuir el aire caliente con la finalidad de tener la temperatura lo más alta posible o la más baja posible para la máxima temperatura a la cámara de pruebas o el mejor rendimiento en el caso de enfriamiento de la cámara de pruebas respectivamente. Adicionalmente para el caso de enfriamiento del sistema se cuenta con un extractor de aire que facilitan y reducen el tiempo de espera para enfriar la cámara de pruebas en cada salida de aire sin tomar en cuenta el principal medio de escape de aire del aparato.

Tabla 3.1 *Combinaciones para el flujo de aire caliente dentro de la cámara de pruebas.*

Opción	Servomotor 1	Servomotor 2	Servomotor 3
1	Abierto	Abierto	Abierto
2	Abierto	Cerrado	Cerrado
3	Abierto	Abierto	Cerrado
4	Abierto	Cerrado	Abierto
5	Cerrado	Cerrado	Cerrado
6	Cerrado	Abierto	Abierto
7	Cerrado	Cerrado	Abierto
8	Cerrado	Abierto	Cerrado

La Tabla 3.1 muestra las ocho diferentes posiciones que se pueden llegar a escoger al momento de que el usuario proponga al realizar las pruebas de medición de la celda solar en la fase final *Light Soaking*. Opción uno deja escapar el aire por todos los medios de salida que se tiene sin restricción de quedar guardado en el espacio extra de circulación de aire con el que cuenta el sistema, opción dos solo deja escapar aire caliente del espacio extra de circulación de aire mientras los otros servomotores obstruyen el paso de aire y conlleva a que el sistema se enfríe menos rápido, opción 3 deja pasar el aire en el espacio extra de circulación de aire y a la primer vía de distribución de aire horizontal pero bloqueando la retro circulación de aire caliente a la cámara de pruebas, opción 4 deja fluir aire en el espacio extra de circulación de aire y la vía principal de distribución de aire vertical bloqueando un medio de salida de aire ideal conllevando a solo tener una salida ideal de escape de aire, opción 5 obstruye por completo la circulación de aire hacia el medio ambiente provocando una temperatura homogénea dentro de sistema , opción 6 bloquea por completo la salida de aire en el espacio extra de circulación de aire y deja abierta completamente la otra salida, opción 7 solamente deja sin obstruir la retroalimentación de aire en la cámara de pruebas con la única salida de aire la puerta principal, opción 8 deja abierto una salida de aire ideal mientras las otras dos son obstruidas con la posibilidad de solo tener dos vías de escape de aire. Tener estas combinaciones ayudan a tener una temperatura estable dentro de la cámara de pruebas del sistema y en sus alrededores o disipar el aire caliente lo más rápido posible para seguir realizando las pruebas en el proceso de *Light Soaking*.

3.3.4 Subsistema de control de iluminación.

El subsistema para el control de iluminación Figura 3.11 consta de un disco simulando el iris del ojo humano el cual consiste en controlar la cantidad de luz que puede entrar al sistema con el fin de facilitar el enfoque del objeto al que se requiere apreciar, en este caso para efectuar el funcionamiento de contracción y expansión del iris del ojo se maquinan orificios de distintos tamaños desde la ausencia total de luz hasta un enfoque directo de luz alrededor del disco pensando los posibles casos al cual será requerida la iluminación , con esta similitud el rayo de luz emitido por una lampara será gradualmente distribuido para cada caso específico en la medición de la celda solar, con la implementación de un motor a pasos unipolar el problema de la posición en forma manual se optimiza y ayuda a posicionar en el

segmento de luminosidad requerida, el controlador de este motor conectado a un eje y a su vez al disco hace girarlo tomando en cuenta el número de pasos que le toma al motor dar una vuelta completa, con esto se hace una relación de la intensidad luminosa respecto a cada posición que el disco se encuentre Figura 3.11

Adicionalmente al disco obturador se le ha sido adicionado una pestaña sobresaliente de su diámetro para poder efectuar el cambio de señal del sensor de ranura y así obtener una iluminación adecuada al propósito de medición que el usuario proponga en la interfaz gráfica de la *Raspberry Pi 3*.

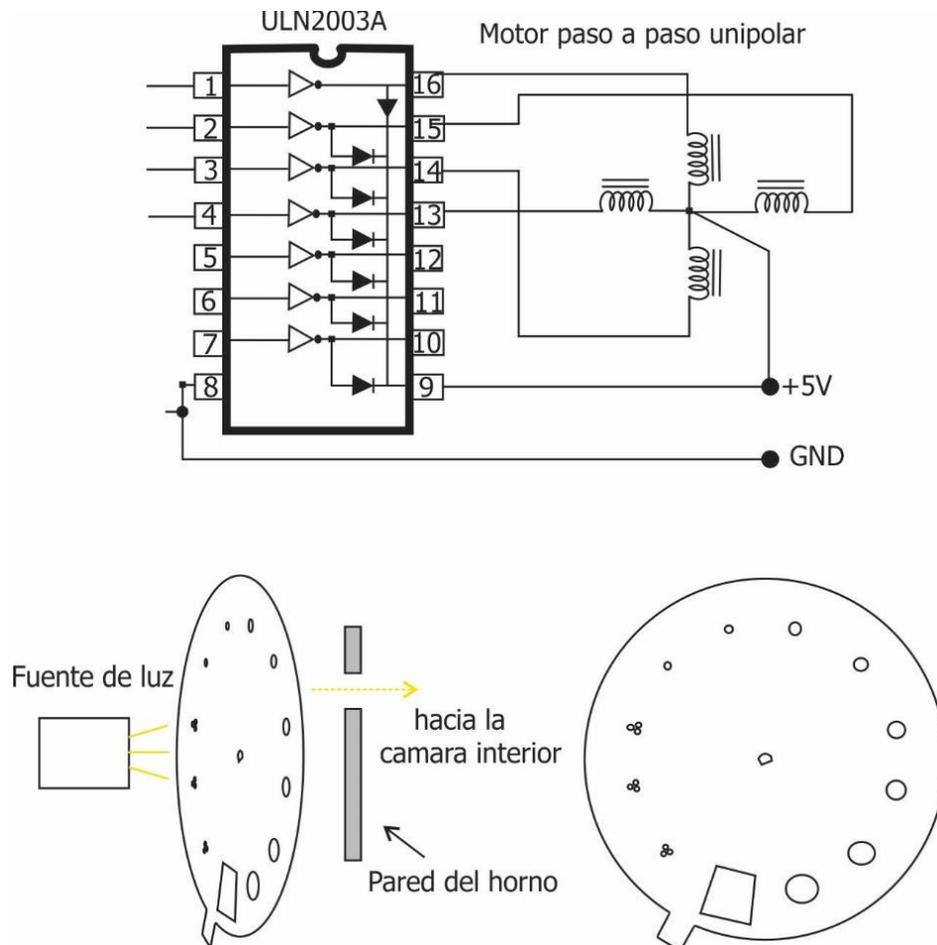


Figura 3.11 Diagrama del subsistema de iluminación con controlador de motor a pasos.

El siguiente diagrama muestra la relación que existe para lograr acabo el objetivo de la parte de Iluminación del sistema Figura 3.12

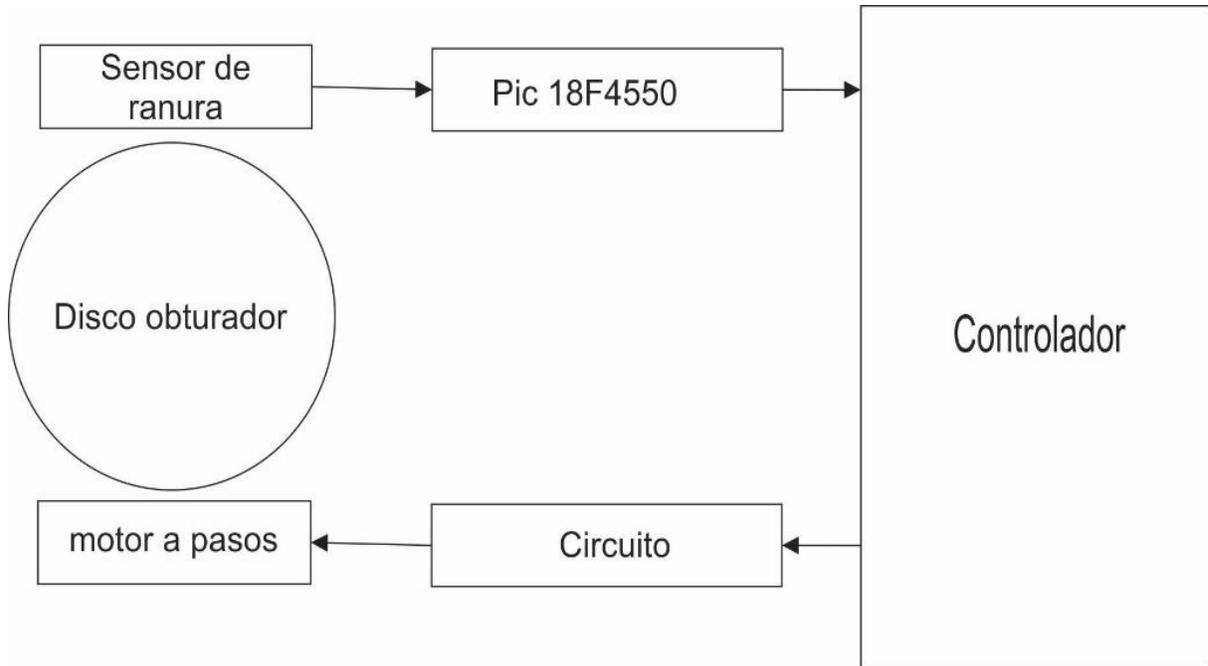


Figura 3.12 Diagrama general para el control de iluminación.

4. Resultados

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas que se realizaron con los circuitos implementados en este sistema, así como los diferentes sensores para los parámetros a controlar y la interfaz con el usuario.

Se muestran los resultados de las pruebas; así como la descripción del acondicionamiento y calibración de los circuitos. Al final la lógica utilizada para una interfaz gráfica que establece la comunicación entre los circuitos y el usuario. Como se ha indicado para la salida de los valores la salida de ambos sistemas se dirige a un *PIC*, que a su vez está conectado a una *Raspberry Pi 3*, la cual despliega en su interfaz un informe al usuario acerca del estado del sistema. Así mismo, se monitorean los diferentes parámetros propuestos, como la temperatura y la luminosidad. Esto permite informar al usuario el estado del sistema en todo momento. A continuación, se presentan los detalles de cada una de las etapas mencionadas.

4.2 Implementación de circuito eléctrico para el horno.

En este capítulo se describe la implementación de cada una de las etapas que conlleva todo el sistema. Con el diagrama a bloques de la Figura 4.1 se observa cada etapa y su correspondiente relación con las demás, las etapas más destacadas para este sistema son la del calentamiento de la cámara de pruebas, la etapa de la luminosidad y la comunicación con *Raspberry Pi 3* para manejar los parámetros de Temperatura y luminosidad.

El principal elemento que cabe destacar de este diagrama a bloques es el Microcontrolador (*PIC 18F4550*) el cual se encargara de transmitir todas las señales de las diferentes etapas de esta tesis hacia el dispositivo *Raspberry Pi 3* que será con la que el usuario pueda interactuar

al momento de realizar pruebas de la celda solar en el proceso *Light Soaking*. Estas señales para controlar son la del circuito *PWM* encargada del calentamiento de la cámara de prueba del sistema, balastro encargado del encendido, apagado y control de iluminación de la lampara, convertidor D.C encargada de controlar las variables de voltaje y corriente y mandarlas al microcontrolador para poder manipularlas, así como la señal de temperatura por parte de un termopar tipo k y un fotodiodo con sus respectivos acondicionamientos de señal para cada uno de estos elementos.

Por último, la etapa de la comunicación entre la *Raspberry Pi 3* con el microcontrolador y su respectivo sistema de enfriamiento.

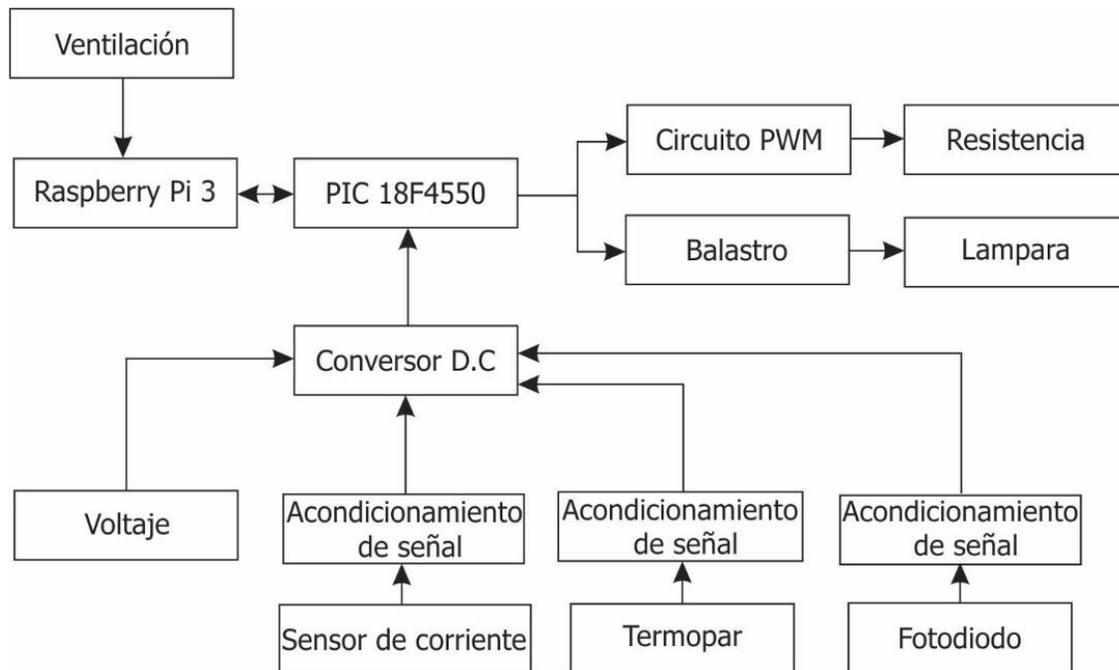


Figura 4.1 Diagrama general a bloques de todos los elementos.

La Figura 4.2 muestra la interconexión de cada elemento para la etapa del calentamiento donde el principal elemento es nuestro microcontrolador PIC 18F4550 el cual recibirá todas las señales de los circuitos correspondientes a cada elemento para esta etapa. Para el acondicionamiento de la etapa de calentamiento de la cámara de pruebas se comienza por el Mosfet IR2110 configurado en conmutación superior conectado a su vez con un transistor IRF640 mismo que será aislado por una base de metal como disipador de calor por las altas temperaturas que suele llegar a tener y proteger al transistor de alcanzar su temperatura máxima especificada en su hoja de datos de fabricante y llegue a fallar o sobrecargarse y explotar al momento de activar los diferentes ciclos de trabajos del PWM) incluyendo una red de protección (Red Snubber) y mandándolo finalmente a un puente de diodos rectifica la señal de los pulsos mandados por nuestro dispositivo que proveerá la temperatura a una resistencia eléctrica que es la encargada de emanar el calor correspondiente al ciclo de trabajo que el usuario haya introducido al principio de realizar las prueba.

Este PIC tendrá un circuito de protección (opto acoplador) para cualquier variación de voltaje no deseada por la parte de la generación PWM (Modulación por ancho de pulso) y un respectivo sistema de ventilación.

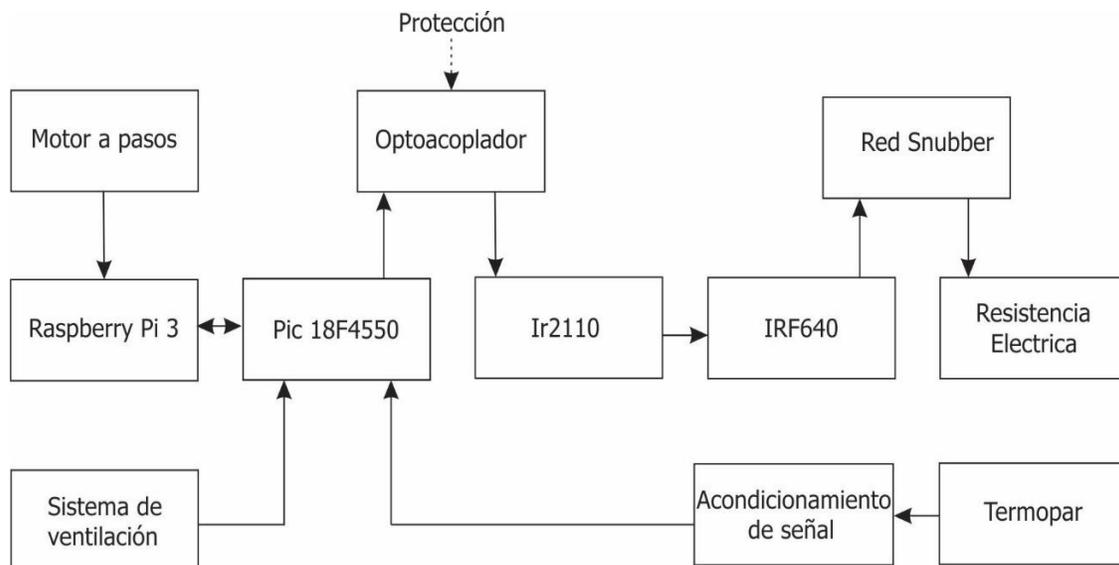


Figura 4.2 Diagrama a bloques para la etapa de encendido de resistencia eléctrica.

En la Figura 4.3 se muestra el circuito del microprocesador encargado de controlar y mandar las señales correspondientes a cada parte que conlleva este sistema y también se observa en la Figura 4.4 el circuito principal de la etapa del encendido de la resistencia eléctrica.

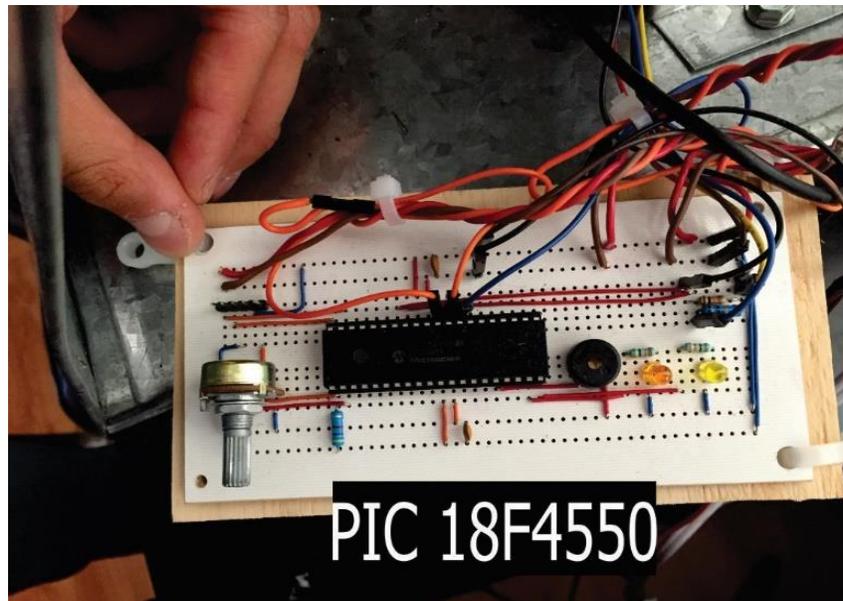


Figura 4.3 Circuito del microcontrolador PIC 18F4550.

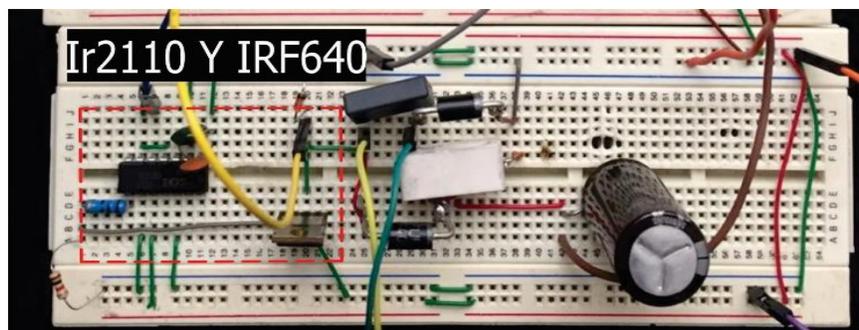


Figura 4.4 Circuito de potencia IR2120 y IRF640

Siguiendo con la descripción de los circuitos de la etapa de potencia relacionada con el funcionamiento de la resistencia eléctrica se proponen ciertas medidas de seguridad para la protección de los circuitos para cada etapa del sistema aislando completamente uno de otro y asegurando una efectividad al 100% de este sin error de falla, para esto en la figuras 4.5 y 4.6 se observan dos circuitos de protección (optoacoplador y red Snubber) contra impulsos y sobre impulsos no esperados atacando al problema de algún corto circuito para cualquier dispositivo encontrado dentro del circuito físico del sistema.

Entrando en más detalle al funcionamiento del circuito de protección denominado Red Snubber mostrado en la consiste en un arreglo de componentes conectados entre sí para proteger el circuito en la etapa de potencia de “amortiguar” los picos de voltaje al momento de estar conmutando la línea de voltaje rectificadora que va hacia la resistencia, una línea de entrada con valor de 130 V y 170 V una línea ya rectificadora, normalmente el sobre impulso suele tener una diferencia hasta de 70 V.

La red Snubber ayuda a eliminar el sobre impulso para así obtener una conmutación con forma de onda cuadrada.

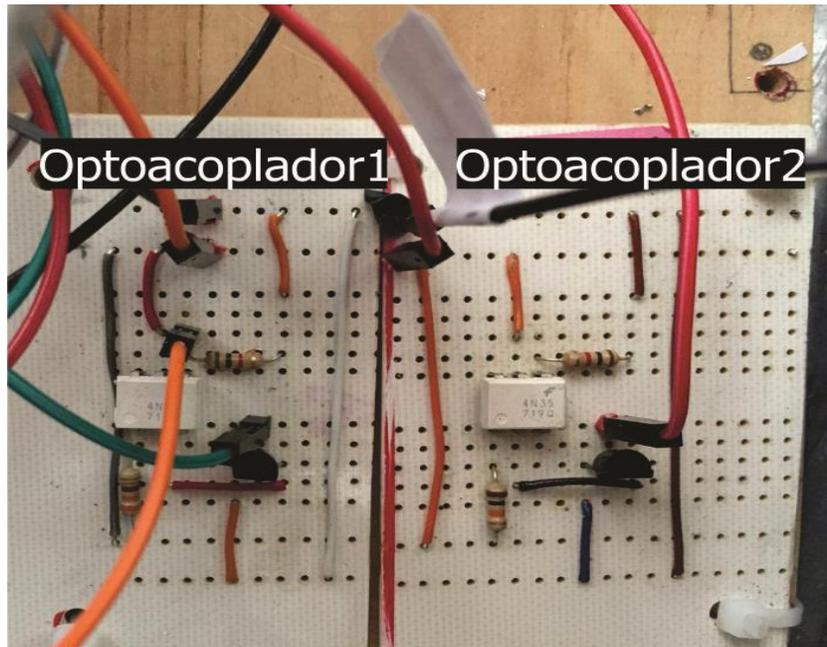


Figura 4.5 Circuito de Optoacoplador implementado a la etapa de potencia.

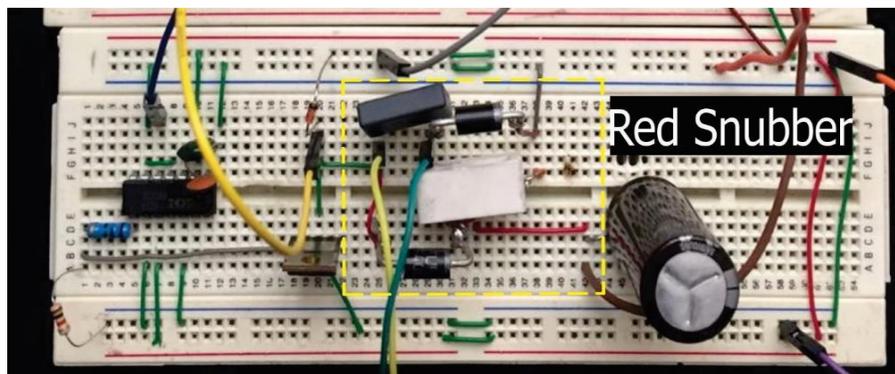


Figura 4.6 Circuito de Red Snubber del Sistema.

A continuación, se presenta los cálculos requeridos para la elaboración de la red Snubber mencionada de acuerdo con los parámetros de nuestro Mosfet utilizado (IRF640) cuyas especificaciones técnicas se encuentran en su hoja de datos de fabricante.

Se diseña la Red Snubber partiendo de los datos a continuación presentados para la protección del Mosfet IRF640.

$$V_{DS} = 12V, V_S = 170V, F_s = 40 \text{ KHz}$$

Primeramente, las siguientes ecuaciones son necesarias para el cálculo de la red Snubber.

$$I_{gt} = (I_1 + I_2) \quad (4.1)$$

$$I_1 = C_{iss} \left(\frac{V_{DS}}{t_r} \right) \quad (4.2)$$

$$I_2 = C_{rss} \left(\frac{V_{DS} + V_S}{t_r} \right) \quad (4.3)$$

Los siguientes datos son encontrados en las hojas de especificaciones para el Mosfet IRF640.

$$C_{iss} = 1160 \text{ pF}$$

$$C_{rss} = 53 \text{ pF}$$

$$t_r = 19 \text{ ns}$$

$$t_f = 5.5 \text{ ns}$$

Se sustituyen los valores encontrados en las ecuaciones (4.2) y (4.3).

$$I_1 = 1160 \text{ pF} \left(\frac{12V}{19 \text{ ns}} \right) = 0.73 \text{ A} \quad (4.4)$$

$$I_2 = 53 \text{ pF} \left(\frac{12V + 170V}{19 \text{ ns}} \right) = 0.5 \text{ A} \quad (4.5)$$

Sustituyendo ecuaciones (4.4) y (4.5) en ecuación (4.1).

$$I_{gt} = 0.73A + 0.5A = 1.23A \quad (4.6)$$

Ahora se procede con el cálculo de encendido para los parámetros t_s y C_s , conociendo sus respectivas ecuaciones.

$$t_s = \frac{V_{DS}}{I_L} (t_r) \quad (4.7)$$

$$C_s = \frac{I_L}{V_{DS}} (t_f) \quad (4.8)$$

Sustituyendo los valores de la hoja de especificaciones en la ecuación (4.7) y (4.8).

$$t_s = \frac{12}{6} (19ns) = 38nH \quad (4.9)$$

$$C_s = \frac{6}{12} (5.5ns) = 2.75nf \quad (4.10)$$

Calculando la resistencia adecuada para la Red Snubber.

$$R_s = \frac{1}{3(F_s)(C_s)} \quad (4.11)$$

Sustituyendo los valores encontrados en ecuación (4.11).

$$R_s = \frac{1}{3(40KHz)(2.7nF)} = 3.086K\Omega \approx 3.3K\Omega \quad (4.12)$$

Señal obtenida en osciloscopio sin dispositivos de protección y con dispositivos de protección mostrados en las figuras 4.7 y 4.8.

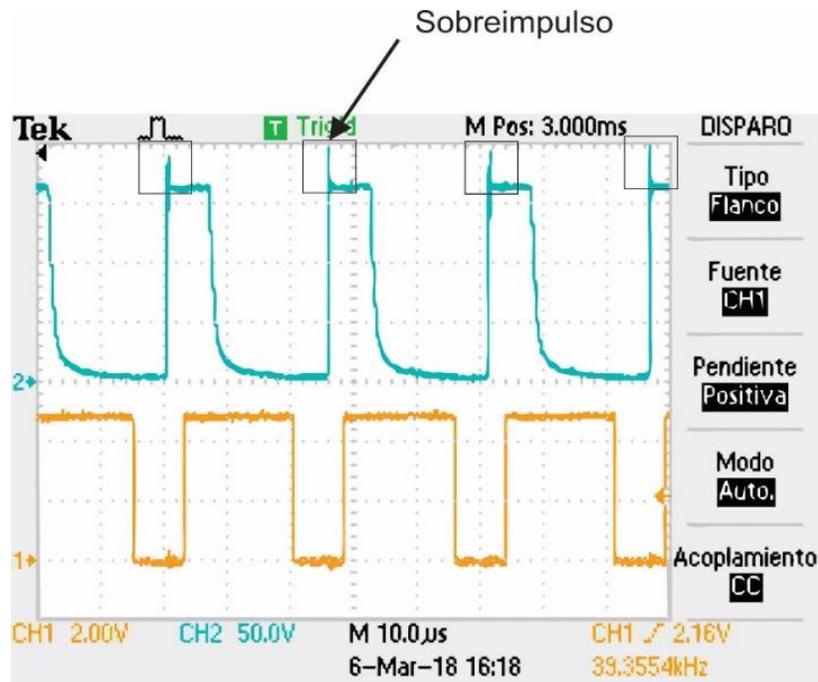


Figura 4.7 Sobre impulso al momento de la conmutación sin red Snubber

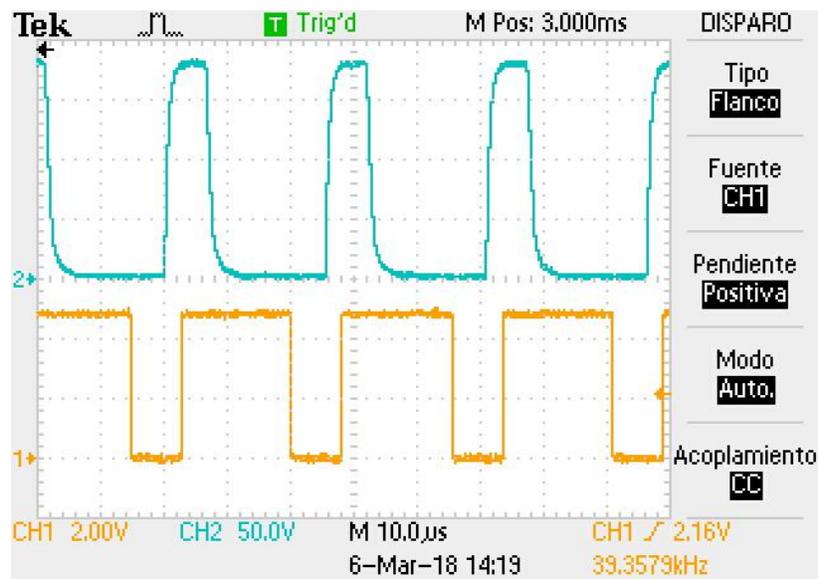


Figura 4.8 Sobre impulso al momento de la conmutación con red Snubber.

Para la parte final de la etapa del calentamiento de este sistema se implementaron 3 resistencias conectadas en serie en forma de zigzag para lograr una mayor concentración de aire caliente a toda la cámara de pruebas montadas en una simulación de parrilla con tubos de varillas de vidrio Figura 4.9 empotradas a las paredes inferiores del espacio extra de circulación de aire al principio y al final de la resistencia se les fue soldadas cable de calibre grueso resistente a temperaturas mayores de 200^a C y permitir el flujo de corriente que se transmitía del circuito de la etapa del funcionamiento de la resistencia eléctrica.

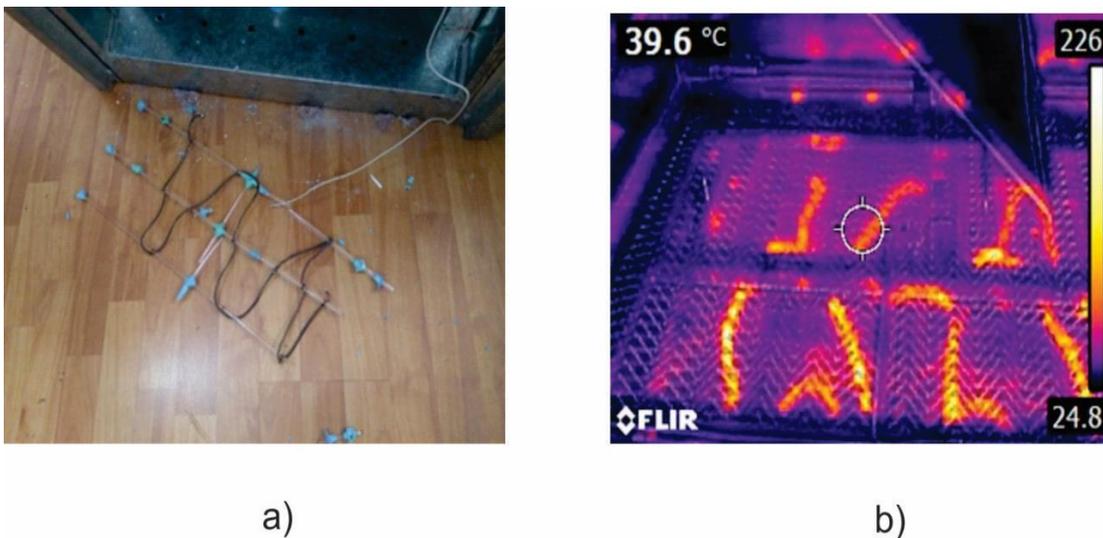


Figura 4.9 (a) Parrilla de varillas de vidrio con 3 resistencias en serie. (b) Resistencias en serie funcionando al interior del horno

Al realizar las primeras pruebas sin protección adecuada del Mosfet IRF640 pero sin implementada la red Snubber correcta se sometió la etapa de calentamiento a una frecuencia de conmutación de 20KHz la cual fue favorable los primeros cinco segundos posteriores al encendido, se observó un cambio en la temperatura utilizando la cámara FLIR E5 en el Mosfet IR640 y en su controlador IR2110 el cual termino explotando de manera abrupta y haciendo corto circuito en la primera prueba de esta etapa, en la Figura 4.10 se observa la

imagen del IR2110 quemado y del Mosfet sin forma física ya que se destruyó casi completamente.

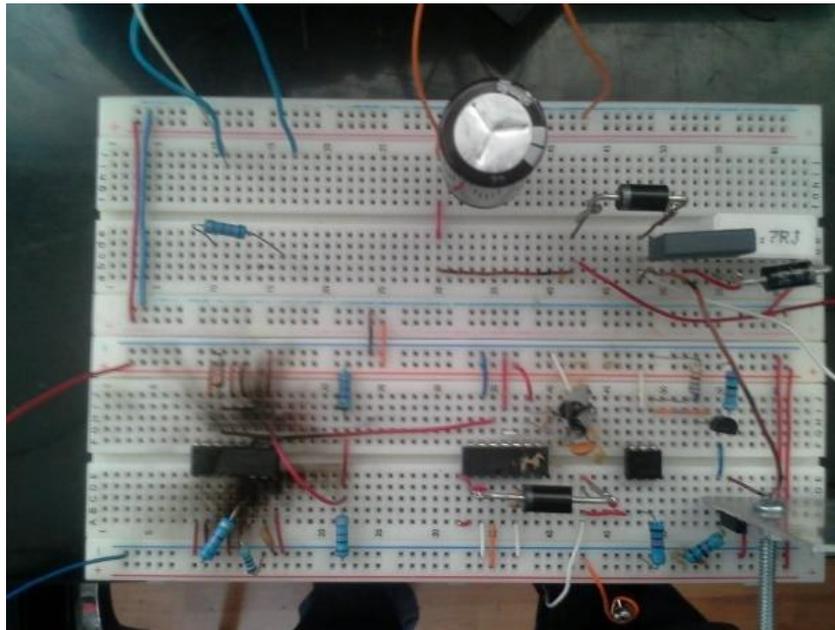


Figura 4.10 Prueba del circuito en la etapa de calentamiento fallida.

Analizando este comportamiento se mejoró el primer inconveniente presentado el cual es la temperatura alcanzada en el Mosfet IR640 se concluyó que este elemento necesitaba un disipador de calor para soportar los pulsos mandados desde el microcontrolador PIC 18F4550.

Primeramente, se implementa una hoja de aluminio como disipador de calor al Mosfet IR640 Figura 4.11 y posteriormente analizando y teniendo una visión del circuito final se opta por cambiar este diseño por una más versátil el cual consta de una pieza de aluminio grueso con medidas de 15cm x 7cm con la misma funcionalidad que la hoja de aluminio propuesta al principio y mejorando la distribución de calor hacia sus alrededores. Figura 4.12

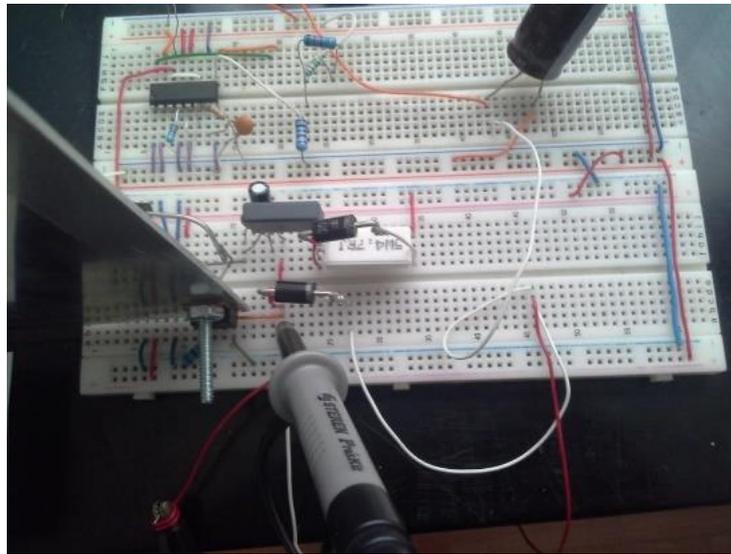
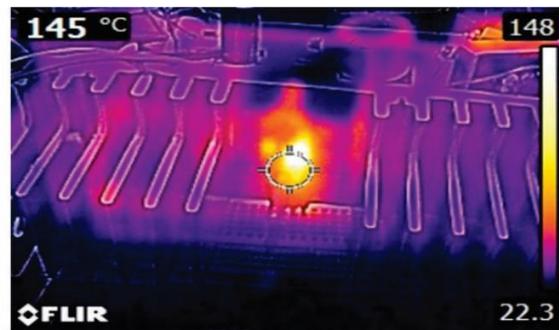


Figura 4.11 Prueba del circuito en la etapa de calentamiento con pieza de aluminio vista lateral.



a)



b)

Figura 4.12 (a) Implementación de un Disipador de calor de aluminio grueso acoplado al transistor IRF640. (b) Temperatura con el 80% duty cycle en el transistor IRF640.

En pruebas posteriores se optó por cambiar el arreglo de las resistencias ya que al momento del traslado del sistema el soporte de las varillas de vidrio son muy frágiles y susceptibles a quebrarse, considerando este inconveniente se implementó una resistencia eléctrica de forma tubular de acero inoxidable mostrada en la Figura 4.13, 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.

Estas características no afectan de manera significativa ya al funcionamiento ya que la resistencia no trabaja al 100% y no se requiere una alta temperatura que exija toda su potencia.

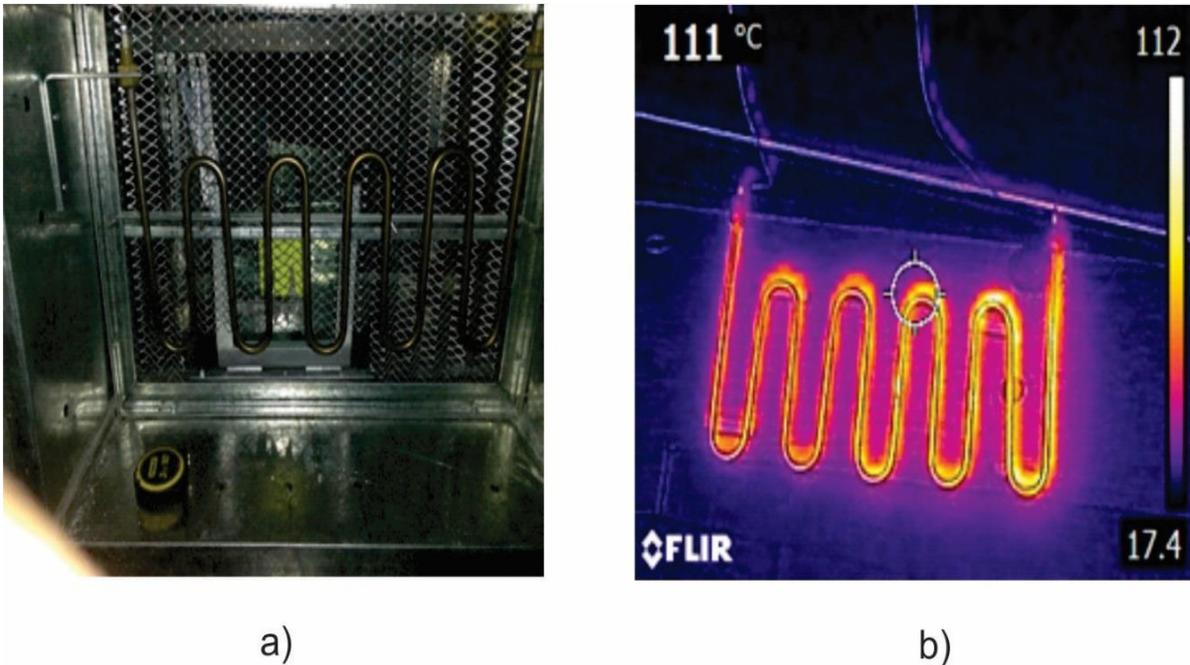


Figura 4.13 (a) Resistencia tubular empotrada en el espacio extra de circulación de aire. (b) Resistencias en serie funcionando al interior del horno

Empleando el circuito de PWM a la resistencia se observa que la respuesta fue favorable sin embargo este 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 4.14

Después de la implementación de la etapa de calentamiento se realizaron pruebas para cerciorar de que el sistema era optimo y no se sobrecargara y tuviera el error de fundirse algún componente o no soportar demasiado tiempo la carga a la que se le es sometida al circuito, se comprueba la temperatura en tiempo real de este sistema con la cámara térmica FLIR E5 y así obtener imágenes con resolución térmica observando fallas de sobrecalentamiento de algún elemento dentro del circuito o fugas de aire caliente en el sistema físico del aparato.

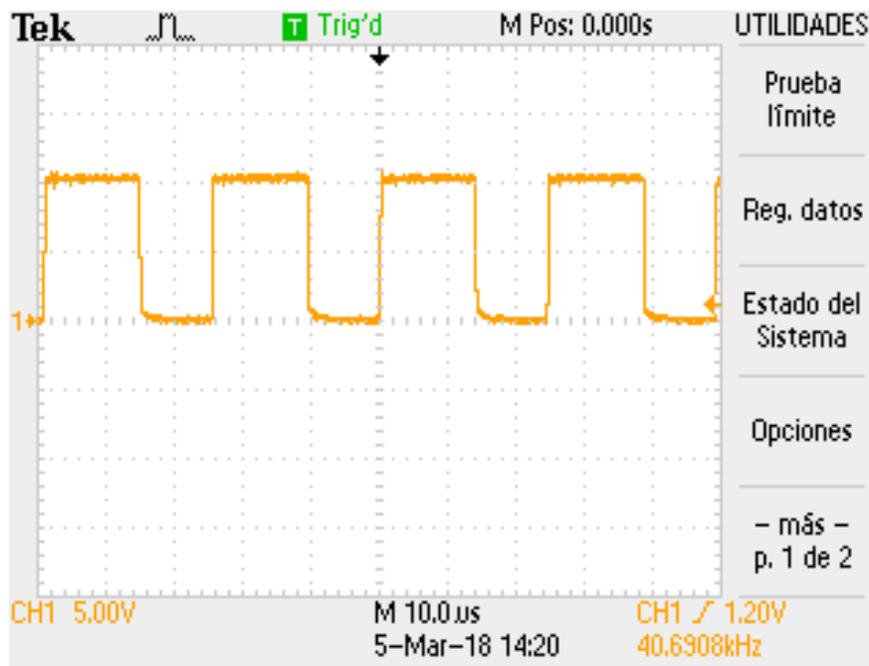


Figura 4.14 Frecuencia de conmutación en osciloscopio.

En la Figura 4.15 se observa las pequeñas fugas de aire caliente que escapan de la cámara de pruebas que afecta mínimamente al estado de las pruebas para la celda solar ya que esta temperatura perdida se puede compensar aumentando el ciclo de trabajo en el circuito principal y controlar la temperatura que deseamos adentro de la cámara de pruebas menos la perdida observada, Estas imperfecciones fueron causadas por un mal soldado en el momento de unir la puerta de la cámara de pruebas con el espacio extra de circulación de aire y el sellado hermético de la puerta en general. Estas imperfecciones no fueron modificadas por la cuestión de tiempo y economía en la entrega del proyecto. Por otra parte, se observa el flujo de aire caliente distribuido por todo el sistema como se tenía planeado desde un principio.

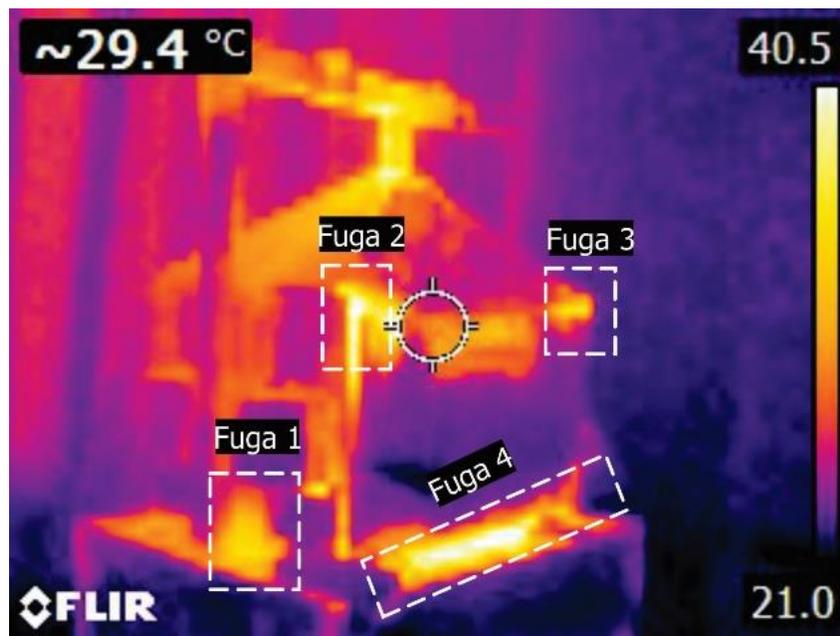


Figura 4.15 Circuito de la etapa de potencia del sistema.

En la Figura 4.16 se presenta la temperatura resultante en el interior del horno en función de diferentes ciclos de trabajo de la señal PWM aplicada al resistor eléctrico. Se puede apreciar que para un ciclo de trabajo del 80 % se alcanza alrededor de 90 °C en tan solo 20 minutos, mientras que para un ciclo de trabajo del 20% en ese mismo tiempo se alcanzan alrededor de 45 °C. También se puede apreciar que la temperatura no es lineal en función del tiempo, sino que más bien tiene un comportamiento que puede ser modelado como una función exponencial. El modelo de esa función está más allá del alcance de esta tesis por lo cual sólo se presentan los resultados para tener una idea del rango de valores de temperatura que es capaz de desarrollar el *hardware*. Estas curvas sirven para generar la función de transferencia e implementar un control adecuado para este sistema. En el marco de esta tesis, sólo se presenta el sistema de calentamiento y el de la aplicación de una intensidad luminosa en una celda solar, así como las mediciones de corriente y voltaje en dicha celda. En el apéndice B se presentan los datos tabulados a partir de los cuales se generó la Figura 4.16.

En la figura 4. 17 se muestra la variación de la temperatura en función del tiempo una vez apagado el resistor eléctrico. El objetivo de hacer las mediciones presentadas en esta figura fue determinar la velocidad máxima de enfriamiento que podía alcanzar el sistema. Contrario a lo que intuitivamente se podría esperar, cuando se abre la puerta y se usa el ventilador la temperatura no decrece tan rápidamente, con respecto a abrir la puerta y dejar que el sistema se enfríe por convección. Esto se debe a que al aplicarse una corriente de aire con el ventilador se genera un flujo dentro de la cámara de pruebas y entonces el aire que sale es una mezcla del aire frío y caliente. Cuando se permite que el aire caliente suba sin una corriente generada por el ventilador, entonces el aire que sale es el que tiene la mayor temperatura de tal forma la temperatura de todo el interior de la cámara decrece con mayor rapidez. Por tal motivo, en el diseño final del sistema no se usa un ventilador para enfriar la cámara interior de pruebas. De acuerdo con estos resultados el uso que podría tener aplicar una corriente de aire proveniente de un ventilador es homogeneizar la temperatura dentro de la cámara de pruebas de tal forma que no exista un gradiente de temperatura entre la parte inferior y superior del interior de la cámara.

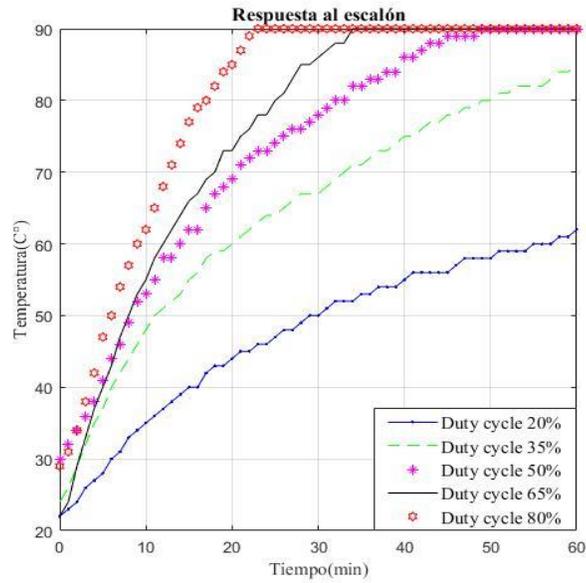


Figura 4.16 Respuesta al calentamiento del aparato con diferentes ciclos de trabajo.

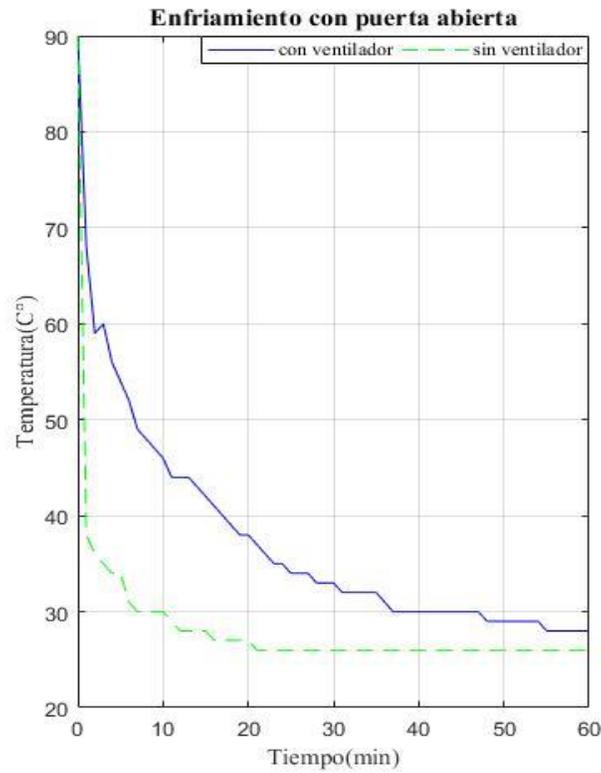


Figura 4.17 Respuesta al enfriamiento del aparato con puerta abierta.

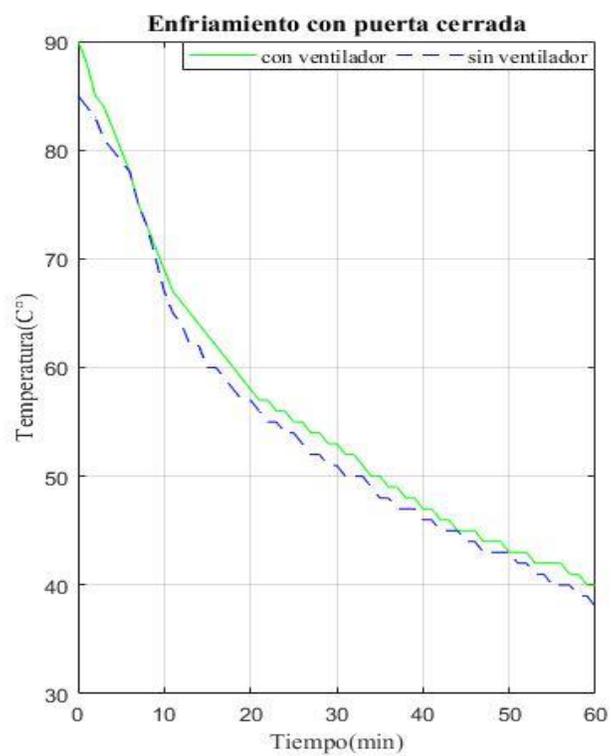


Figura 4.18 Respuesta al enfriamiento del aparato con puerta cerrada.

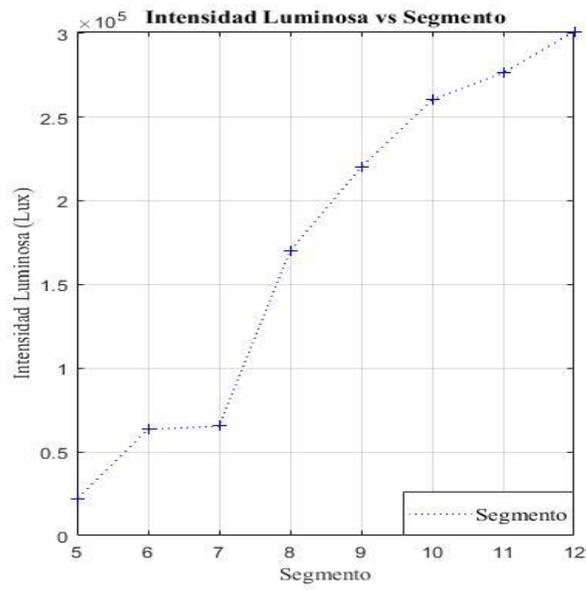


Figura 4.19 Intensidad Luminosa en cada segmento.

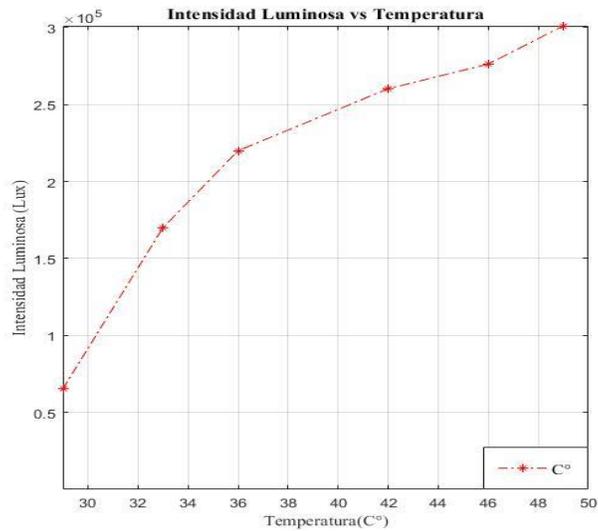


Figura 4.20 Respuesta de la Intensidad Luminosa con diferentes temperaturas.

La siguiente etapa del sistema fue la implementación de la parte de iluminación a la celda solar para el proceso de Light Soaking en el que se realizaron las pruebas de someter a la celda solar a una luminosidad de 100,000 lux equivalente a un sol y garantizar el aumento de la eficiencia en este proceso.

En la Figura 4.21 se observa la estructura física de la cámara de pruebas con dos lámparas de Led funcionando al proyectar el haz luminoso al espejo plano y reflejándolo a la lupa para concentrar la energía necesaria para el remojo de la celda solar, sin embargo al efectuar dicha prueba se obtuvieron datos que no llegaban a la luminosidad deseada y por ello se tuvieron que hacer modificaciones a la estructura física del sistema he implementar una lampara capaz de proveer la luminosidad necesaria para el correcto funcionamiento de esta etapa.



Figura 4.21 Estructura principal de la fase de iluminación con dos lámparas.

Se rediseña el interior de la cámara de pruebas para tener una estructura más eficaz sustrayendo las dos lámparas Led de la pared izquierda de esta recubriendo los espacios vacíos que se tuvieron rellenándolo con fibra de vidrio y volviendo hacer un nuevo espacio para implementar una lampara 7 R de cabeza robótica que al probarla por separado otorga una luminosidad máxima de 519,900,00 lux equivalente a cinco soles y con esto asegura que la luminosidad sobra con esta nueva implementación y no tener un problema en esta etapa como se ve en las figuras 4.22 y 4.23

Al momento de implementar esta nueva lampara se agregaron más modificaciones para poder controlar su luminosidad de forma electrónica y su potencia, fue necesario colocar un circuito adicional para controlar el encendido y el apagado de la lampara y posteriormente mandarla al microcontrolador e interfaz gráfica para controlarlo digitalmente, se agregó lo que es un balastro con una fuente de poder en la parte trasera exterior de la cámara de pruebas del sistema protegiendo el balastro con una caja echa de aluminio por cualquier tipo de anomalía ambiental y protección física y una caja echa de aluminio de igual manera para la protección de la estructura física donde va montado el foco 7R de cabeza robótica con 2 ventiladores que se usaran para el enfriamiento constante de esta foco.



Figura 4.22 *Medición de luxes que se tiene con las primeras dos lámparas.*

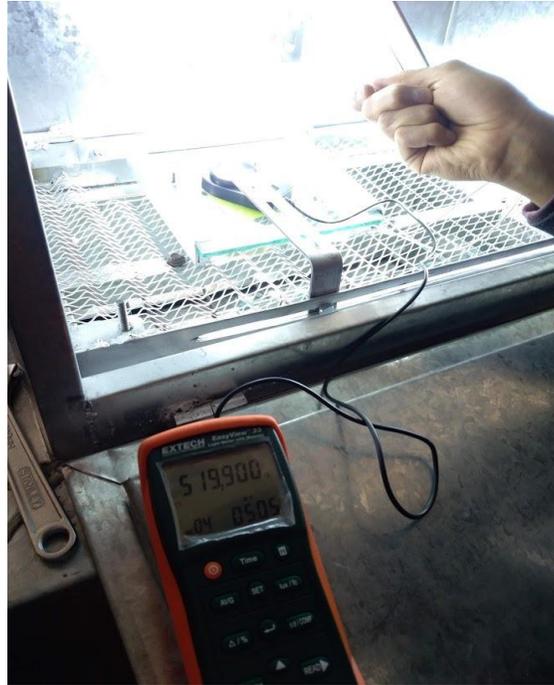


Figura 4.23 *Medición de luxes que se tiene con la implementación con foco 7R de cabeza robótica.*

A continuación se muestra la implementación y el cambio de la parte de colocación de la celda solar la cual consta únicamente de un Vernier analógico cortado a 15 cm de su largo total atornillado a una base de vidrio en la cual la celda solar ira adicionalmente se tienen soldadas las terminales donde la celda solar será conectada para tener un mayor control de ella, adicionalmente se propone el uso de un termopar tipo K para medir la temperatura que está sometida la celda solar en tiempo real al momento de hacer cualquier medición y poder establecer con certeza la eficiencia alcanzada y caracterizando la etapa Light Soaking en el proceso de fabricación de celdas solaras de CdS/CdTe Figura 4.24.

Concluyendo esta implementación mencionada se muestra el interior de la cámara de pruebas del sistema operando a un ciclo de trabajo del 80% y una intensidad luminosa del 100%. Figura 4.25.

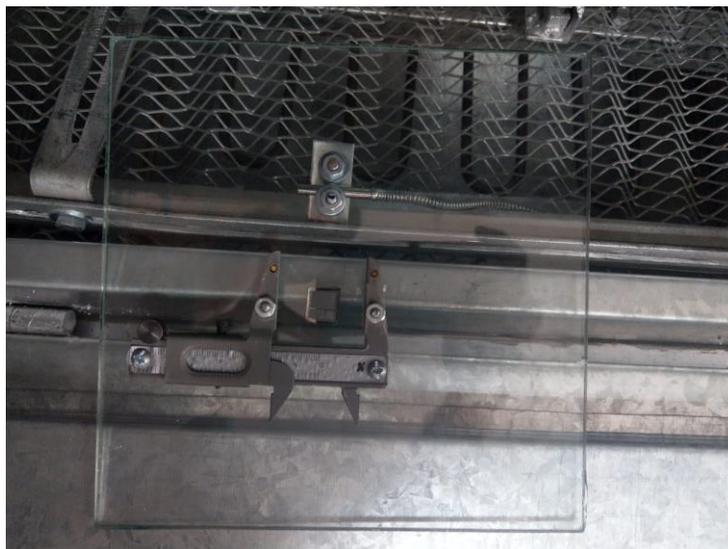


Figura 4.24 *Ubicación del Termopar Tipo K con Vernier analógico.*

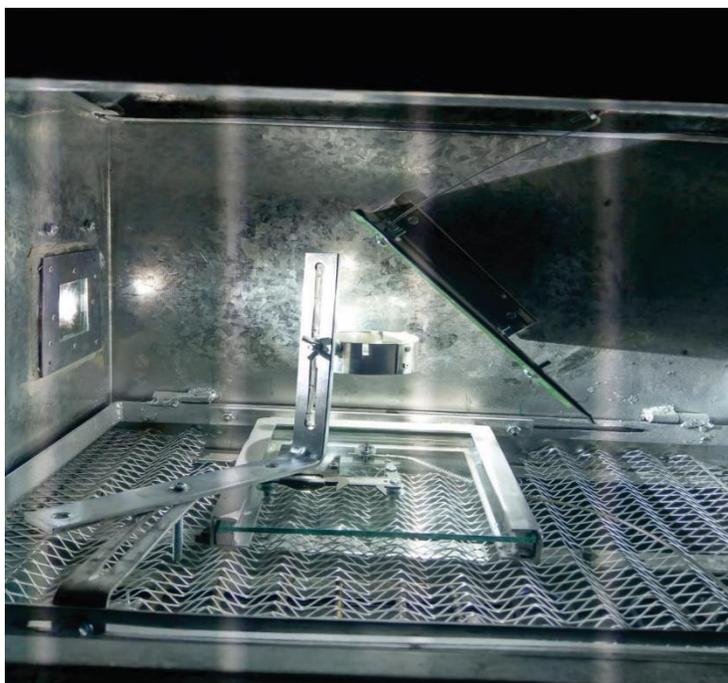


Figura 4.25 *Ubicación del Termopar Tipo K con Vernier analógico.*

Al tener concluida la parte de la temperatura y la luminosidad se concluyó como satisfactoria esta etapa porque es posible controlar la temperatura e intensidad luminosa dentro de la cámara de pruebas del sistema con todo lo implementado descrito anteriormente y evidenciado por las figuras que se encontraran en la parte del apéndice A.

Después avanzando a otra etapa de del sistema el cual era el direccionamiento del flujo del aire dentro del sistema se implementó el uso de servomotores en las salidas de aire para dejar salir el aire caliente o bien mantenerlo dentro en la cámara de pruebas y continuar con otra medición o dejar el sistema corriendo para asegurar una medición correcta. Estos servomotores obstruyen o dejar pasar el aire caliente al medio ambiente con extractores de aire para mayor rapidez colocados en el techo de la cámara de pruebas y otro en la salida de aire del espacio extra de circulación de aire que tiene la cámara de pruebas controlados por servomotores conectados a un eje que hará girar una oblea de aluminio dentro del medio de conducción de las salidas de aire para obstruir y dejar un flujo de aire caliente al exterior del sistema activados por el microcontrolador PIC 18F4550 y el módulo Rasberry PI 3 como se puede observar en las figuras 4.26 y 4.27.

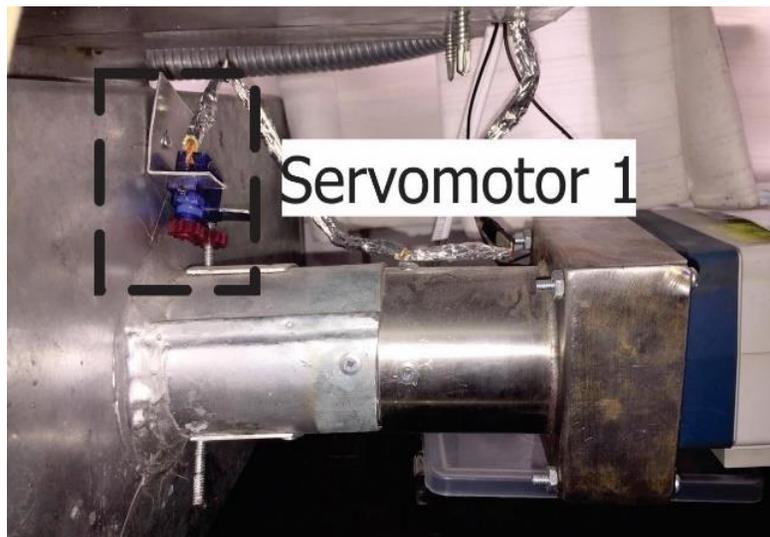


Figura 4.26 *Servomotor número 1.*

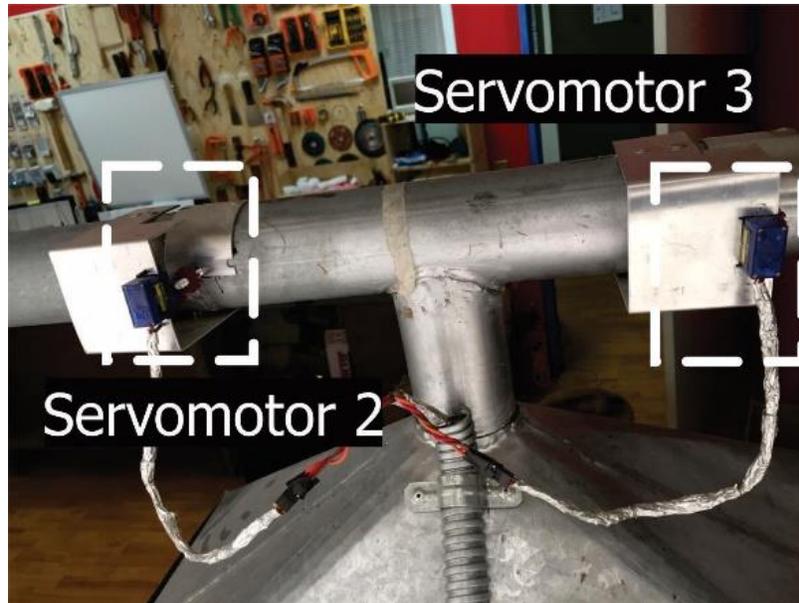


Figura 4.27 *Servomotor número dos y servomotor número 3.*

Se implementó posteriormente un subsistema de iluminación a este sistema con el objetivo de poder controlar la luminosidad que nos arroja la nueva lampara R7 de cabeza robótica ya que si no se puede controlar esta luminosidad, las pruebas en la celda solar no tendrían muchos valores diferentes que arrojar al usuario y con esta innovación al sistema se asegura que existan más variaciones en las mediciones y así poder incrementar las posibilidades de una eficiencia aun mayor a la establecida al planteamiento de esta tesis.

Se instrumentó como primera prueba un disco con numerosos orificios en distintos segmentos del mismo disco con el fin de tener más posibilidades de control de luminosidad, pero se corroboró que con este disco la luz en diferentes segmentos era la misma o muy parecida y esto no servía como prueba para un buen resultado.

Las gráficas de las curvas entre temperatura e intensidad luminosa fueron erróneas ya que es necesario ver un incremento de estas variables en un tiempo específico y no fue de esa manera así que se optó en una nueva construcción del disco pero cambiando las características del

primer disco las cuales se describen como un número menor de segmentos con orificios reducidos para un mayor control de la luminosidad reflejada por la lámpara R7 de cabeza robótica, este cambio se también incluye una pestaña que sobresale a la circunferencia del disco que sirve para la activación de un sensor de ranura que activa un sistema de motor a pasos para poder controlar el disco de manera electrónica desde el dispositivo de control Raspberry Pi 3.

Con este nuevo disco se ve una mejora significativa desde su estética hasta su funcionalidad ya que permite tener un rango de valores desde 0% de luminosidad hasta un 100% de luminosidad en las mediciones que se esperan sin afectar la temperatura que pueda irradiar la luz a su 100% de capacidad. Figura 4.28.

La parte de instrumentación y control del disco está dada por un driver ULN2003 A de motor a pasos unipolar el cual controla la posición del disco, misma que está dada 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 este se ve obstruido por una pestaña propia del disco. Figura 4.29.

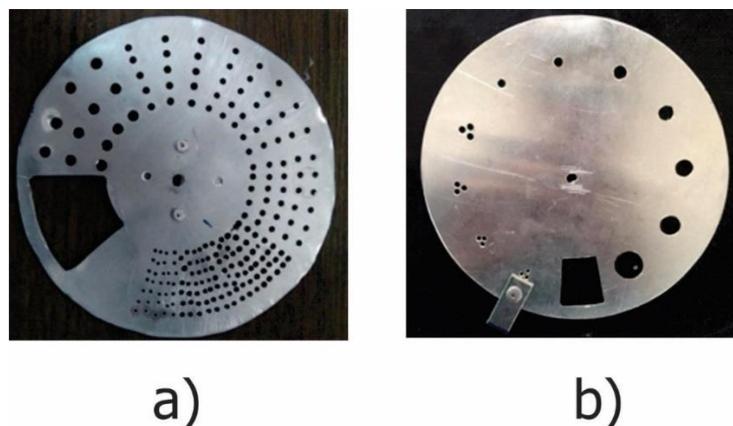


Figura 4.28 Disco obturador para pruebas de intensidad luminosa; a) primer disco obturador b) disco obturador actual.

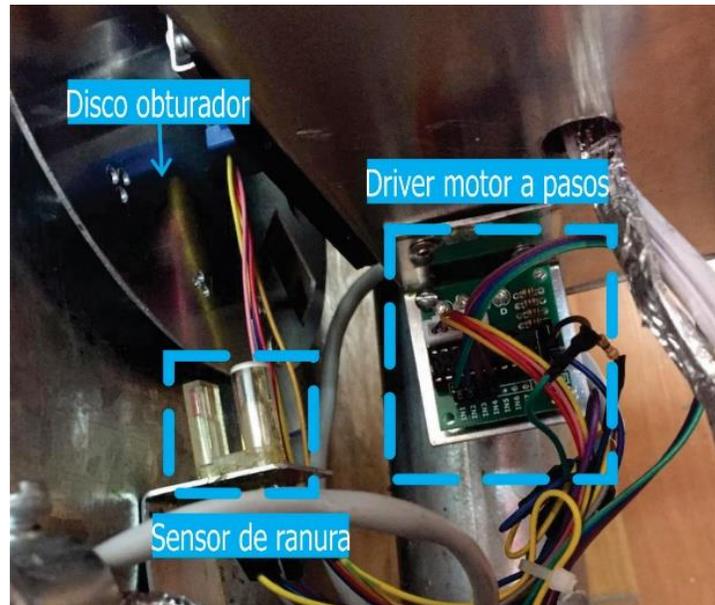


Figura 4.29 Controlador para el motor a pasos y el sensor de ranura.

4.3 Estructuras 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 sistema 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 (Tabla 4.1 a 4.5) son:

- Corrida
- Estados
- Parámetros
- Sesiones
- Usuarios

Tabla “**Corrida**” se encuentran seis campos de lectura, los cuales son:

Tabla 4.1 *Campos de la tabla corrida*

Corrida
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 se encuentra, 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 cuatro campos los cuales son:

- Id_variable (índice auto incremental)
- Variable (despliega otra tabla)

- Valor
- Leer

En la Tabla “**Variable**” se encuentran 11 campos de lectura, los cuales son:

Tabla 4.2 *Campos de la tabla Variable.*

Variable
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 otra tabla)
- Valor (valor del parámetro de operación)

En la Tabla “**Parámetro**” se encuentran 14 campos de lectura, los cuales son:

Tabla 4.3 Campos de la tabla *Parámetro*

Parámetro
TempMeta
LuzMeta
DeltaTiempo
HoraInicio
HoraFin
PendAscLuz
PendDescLuz
TiempoMesLuz
PendAscTemp
PendDescTemp
TiempoMesTemp
ContorIPTemp
ControlITemp
ControlDTempo

Para entender mejor la tabla anterior se muestra en la Figura 4.34 algunos de los parámetros de operación.

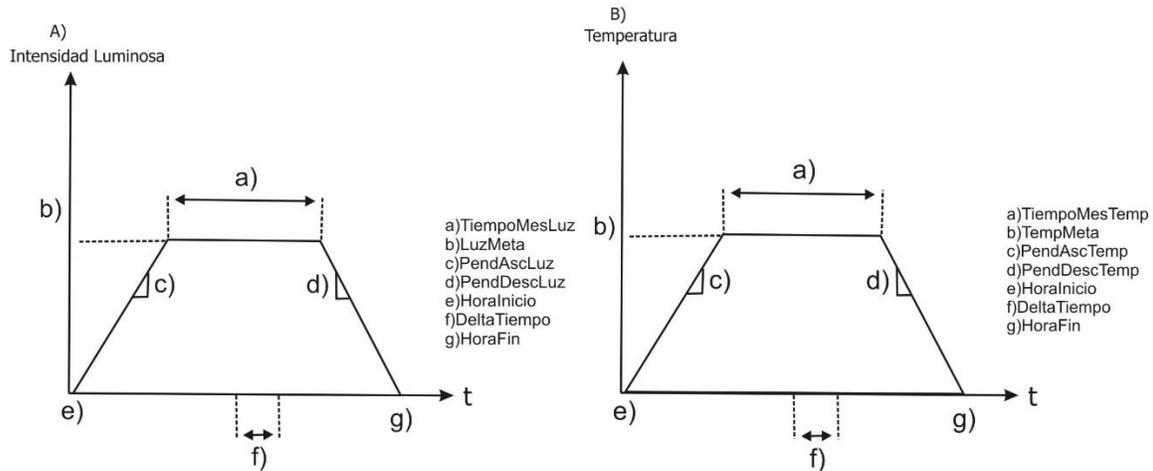


Figura 4.30 Modelo de operación del sistema. (a) Modelo ideal de la intensidad luminosa; (b) Modelo ideal de la temperatura.

De la Figura 4.25 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 seis campos:

- Id_sesiones (índice auto incremental)

- Usuario
- FechaInicio
- Param_resum
- Corriente
- Voltaje

Tabla “**Sesiones**” se tienen seis campos de lectura, los cuales son:

Tabla 4.4 *Campos de la tabla Sesiones*

Sesiones
Id_sesiones
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 cuatro 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

•
 Tabla “**Usuarios**” se tienen cuatro campos de lectura, los cuales son:

Tabla 4.5 Campos de la tabla *Usuarios*

Usuarios
User-id
Nombre
Password
Permiso

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

La Tabla 4.6 muestra la lista de comandos a utilizar para el ingreso de las acciones que realiza el aparato, en los casos específicos 12 y 13 se usa para especificar el ciclo de trabajo del *PWM* en el que el primer dígito especifica el envío de datos de la parte alta del ciclo de trabajo y el segundo dígito la parte baja del ciclo de trabajo, específicamente los comandos mostrados son para un 80% y 50% de ciclo de trabajo respectivamente de los casos, asignando un número hexadecimal calculado por una regla de 3 tomando el 100% como el total del ciclo de trabajo y 255 como máximo de bits a utilizar y como resultado el número en hexadecimal a utilizar como comando.

Tabla 4.6 Tabla de comandos para generar acciones del sistema. (Continuada)

Caso	Comando	Recurso	Descripción
CASO 1	0x0A	SERVO 1	Abrir camino a la circulación de aire en servomotor 1
	0x0B	SERVO1	Cerrar camino de circulación de aire en servomotor 1

Tabla 4.6 Comandos para generar acciones del sistema. (...Continuación)

CASO 2	0X0C	SERVO2	Abrir camino a la circulación de aire en servomotor dos
	0X0D	SERVO2	Cerrar camino de circulación de aire en servomotor 2
CASO 3	0X0E	SERVO3	Abrir camino a la circulación de aire en servomotor 3
	0X0F	SERVO3	Cerrar camino de circulación de aire en servomotor 3
CASO 4	0X1A	PendAscLuz	Encender lampara
	0X1B	PendDesLuz	Apagar lampara
CASO 6	0X1C	VENT1	Encender ventilador
	0X1D	VENT1	Apagar ventilador
CASO 7	0XA1	Permiso	Leer temperatura
CASO 8	0XA2	Permiso	Leer la corriente de la celda
CASO 9	0XA3	Permiso	Leer el voltaje de la celda
CASO 10	0XB1	SPLuz	Posición del subsistema del control de iluminación baja 1
	0XB2	SPLuz	Posición del subsistema del control de iluminación baja 2
	0XB3	SPLuz	Posición del subsistema del control de iluminación baja 3
	0XB4	SPLuz	Posición del subsistema del control de iluminación baja 4
	0XB5	SPLuz	Posición del subsistema del control de iluminación normal 1
	0XB6	SPLuz	Posición del subsistema del control iluminación 2

Tabla 4.6 Comandos para generar acciones del sistema. (...Continuación)

	0XB7	SPLuz	Posición del subsistema del control de iluminación normal 3
	0XB8	SPLuz	Posición del subsistema del control de iluminación normal 4
	0XB9	SPLuz	Posición del subsistema del control de iluminación alta 1
	0XBA	SPLuz	Posición del subsistema del control de iluminación alta 2
	0XBB	SPLuz	Posición del subsistema del control de iluminación alta 3
	0XBC	SPLuz	Posición del subsistema del control de iluminación alta 4
CASO 11	0X2A	PenAscTemp	Encender PWM de la resistencia
	0X2B	PenDesTemp	Apagar PWM de la resistencia
CASO 12	0X8C	SPTemperatura	Parte baja de ciclo de trabajo
	0X9C	SPTemperatura	Parte alta del ciclo de trabajo
CASO 13	0X6f	SPTemperatura	Parte baja de ciclo de trabajo
	0X78	SPTemperatura	Parte alta del ciclo de trabajo

4.4 Comunicación con la *Raspberry Pi 3*

Para la comunicación entre el *PIC* y la tarjeta *Raspberry Pi 3*. Se utilizó el protocolo I^2C para facilitar el envío de diferentes cadenas de comandos compuestos por dieciséis bits de los cuales los primeros ocho bits representan la dirección (addr) del *PIC* que se quiera utilizar y los siguientes ocho bits representan el comando de la instrucción que se quiera ejecutar. Los pines que se utilizaron para la transferencia de datos son *Serial clock* (SCL) y *Serial data* (SDA) del *PIC*.

En la tarjeta que se diseñó se colocaron 3 alternativas de variar el ancho de pulso, una es digital y dos analógicas, con el objetivo de realizar diferentes pruebas y saber cuál es la frecuencia en la que mejor trabaja el sistema y la cual hace óptimo al sistema. La primera forma es generar un *PWM* digital a través del DS1050 con la señal de salida que pasa por una bornera y a través de un jumper se conecta al IR3551, lo que hace este integrado es dar ganancia a la señal *PWM* en corriente. Otra manera usando el DS1050 es que la señal de salida pasa por una bornera y a través de un jumper se conecta al ISL99140 y este amplifica también la señal *PWM* en corriente. La segunda forma de obtener la señal de *PWM* es de manera analógica a través de un generador de señales comercial, la señal de salida pasa al integrado SG3524 (modulador) que recibe una señal excitadora del generador y la modula para obtener a la salida un *PWM*. Y la tercera forma es también de forma analógica con el integrado AD9837 que a su vez depende del cristal que tiene conectado y que también pasa por el SG3524, y a la salida se tiene el *PWM*.

Un ejemplo de cómo obtener una señal *PWM* de manera digital, se muestra en las figuras 4.31 y 4.32, en donde se muestran los voltajes medidos con el osciloscopio obtenidos al enviar distintos comandos al DS1050.

A continuación, se muestran tres ejemplos de graficas tomadas con un osciloscopio para observar la comunicación. En la Figura 4.33 observa el comando completo para alimentar las celdas del proceso de Ef, así como el bit de reconocimiento Acknowledge (α) que se encuentra entre el bit 8 y 9 de la dirección, esto representa una correcta transferencia de datos y una buena comunicación

En la Figura 4.34 se muestra la cadena de datos que se manda a través de los comandos para activar los sensores de nivel. En la Figura 4.35 se muestra la cadena de datos que se mandan a través de un comando para desactivar la alimentación de la celda.

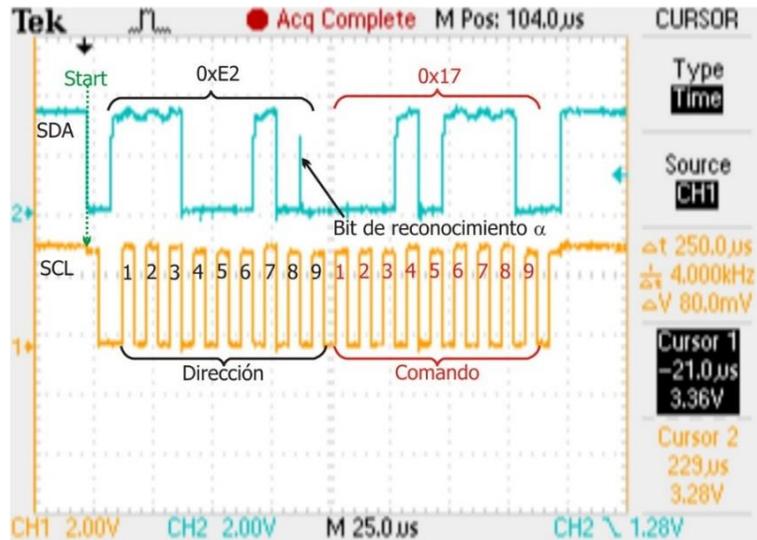


Figura 4.32 Comando para energizar la celda.

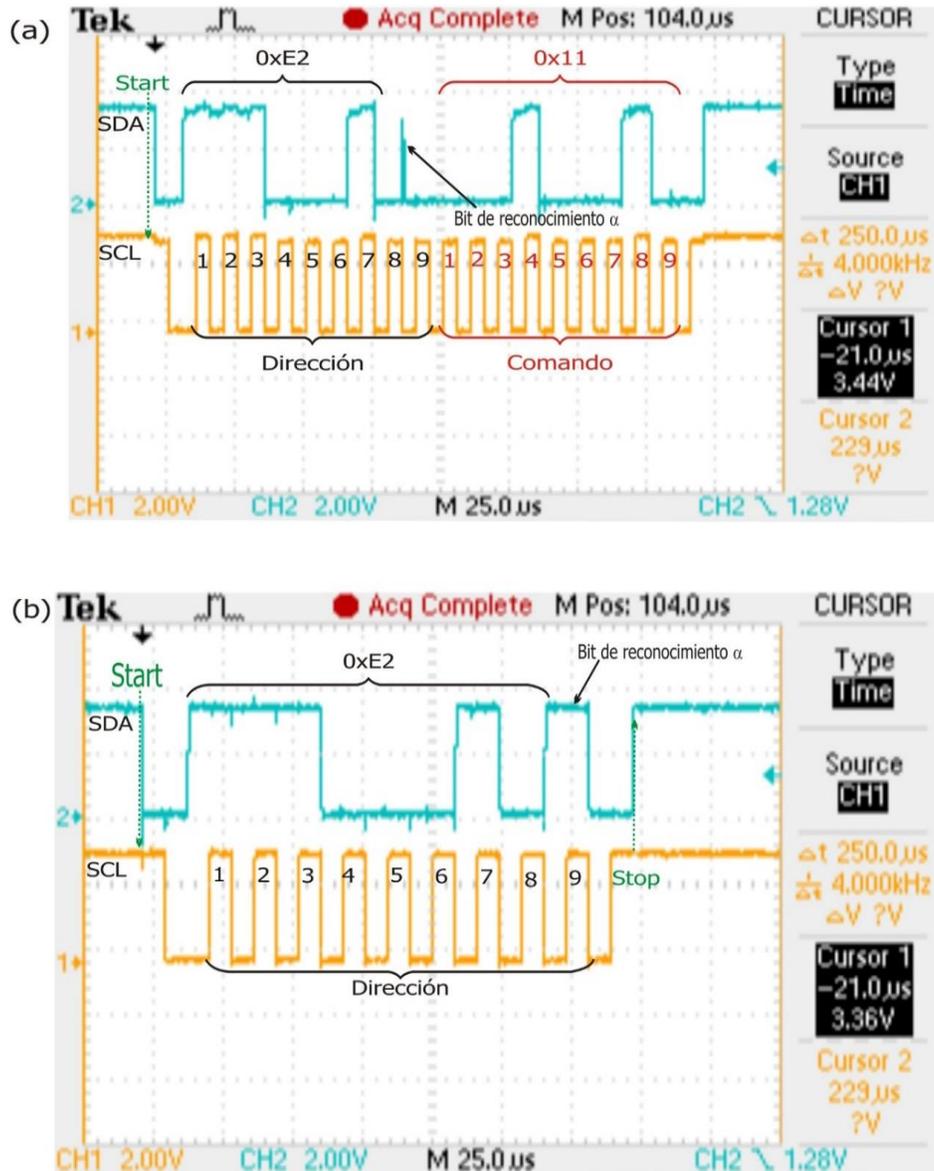


Figura 4.34 Comando para activar Nivel1. La cadena de datos mostrada en (a) representa los dieciséis bits, cuando se tiene la comunicación correcta, mientras que en (b) se aprecia un error, porque no está el esclavo conectado, se interrumpe la transmisión después del bit de reconocimiento □□ esto hace que la Raspberry Pi 3 envíe un “Stop” provocando que no se envíen los otros ocho bits del comando siguiente.

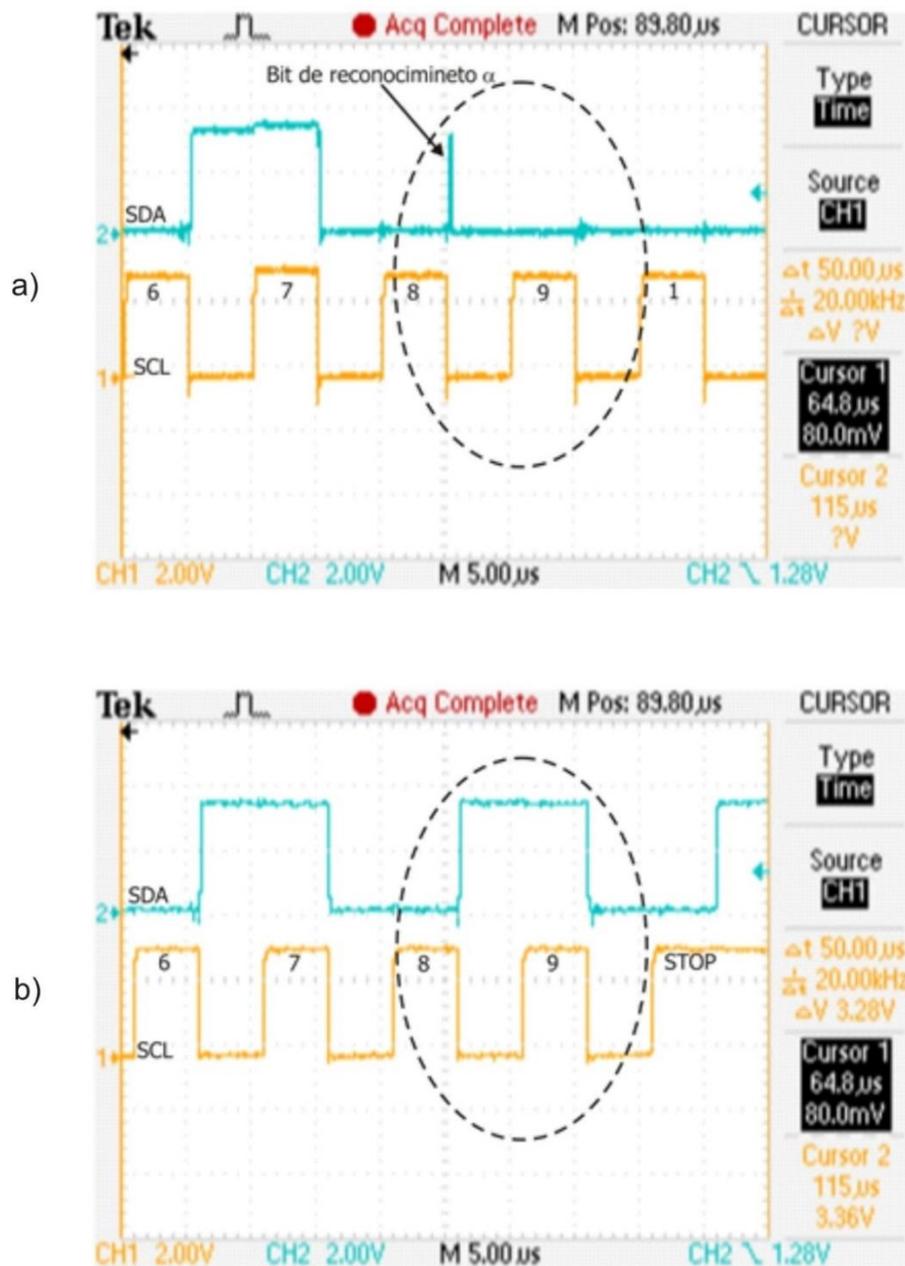


Figura 4.35 Comando para desactivar la alimentación de celda. El círculo punteado mostrado en (a) representa la correcta comunicación ya que aparece el bit de reconocimiento y el comando están en cero, mientras que en (b) se aprecia un error porque no aparece y la Raspberry Pi 3 envía un “Stop” provocando que no se envíen los otros ocho bits del comando siguiente.

Conclusiones

El objetivo de este proyecto fue el de diseñar y construir un sistema para caracterizar la eficiencia de la etapa *Light Soaking* en el proceso de fabricación de celdas solares. Una vez finalizado el diseño y la construcción del proyecto se concluye que fue satisfactoria y que alcanzo los objetivos deseados para futuras mediciones de la eficiencia de las celdas solares CdS/CdTe. Este proyecto también consistió en un sistema electrónico capaz de poder controlar dos variables de entrada las cuales fueron la de temperatura e intensidad luminosa en la celda solar en la etapa *Light Soaking*.

Con respecto a la hipótesis planteada se demuestra que es posible desarrollar un sistema que permita variar los parámetros de temperatura e intensidad luminosa en la etapa *Light Soaking* y así posteriormente determinar la eficiencia en celdas solares CdS/CdTe comparando las pruebas realizadas manualmente por el CINVESTAV unidad Mérida.

Con el diseño y construcción planteados, se pudieron realizar las pruebas necesarias para la obtención de las curvas de caracterización que permiten identificar los cálculos para aumentar la eficiencia de la celda solar y también tener la opción de manipular los parámetros planteados para realizar diversas pruebas en diferentes condiciones y así tener un rango de resultados más amplios determinar la mejor que ayude a incrementar la eficiencia de la celda solar. Para el caso de la instrumentación implementada se divide en 3 partes: control de iluminación, control de temperatura y mediciones. En estas partes del sistema se tiene un circuito electrónico capaz de cumplir con los requerimientos de la medición de temperatura e intensidad luminosa mandando estos valores a una interfaz gráfica para un uso fácil y entendible para el usuario.

Especialmente con la innovación de la instrumentación para las variables de temperatura e intensidad luminosa ayudó favorablemente a su control y caracterización, de igual manera el diseño de estas implementaciones hace ver al aparato más estético versátil y funcional para el objetivo de esta tesis.

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, permitiendo y reduciendo así el problema de generar nuevas aplicaciones, simplemente a programar la interacción con una base de datos, otorgando así una flexibilidad mayor al sistema.

Por último y no menos importante cabe mencionar que en la elaboración de este proyecto se desarrollaron habilidades que enriquecieron la formación académica y de investigación del tesista.

Glosario

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.

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".

Caracterización. Se define como "determinar los atributos peculiares de alguien o 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 telurio 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 p-n. 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.

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.

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.

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

Excitón. Es una cuasipartícula en estado neutral que consiste en 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.

Generador fotovoltaico. Es el 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.

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

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.

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.

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.

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 con determinados factores, el semiconductor actúa a modo de aislante o como conductor.

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.

Csi. Celdas solares inorgánicas.

Opvs. *organic photovoltaics* (orgánica fotovoltaica).

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

Oleds. *Organic light emitting diodes* (diodos emisores de luz orgánicos).

Referencias

- A. Grove, J. W. (1967). *Physics of Semiconductor Devices*.
- badii, M. A. (2016). Renewable Energies and Energy Conservation . *Daena: International Journal of Good Conscience*, 15.
- Barbosa Garcia Oracio, M. J. (2012). Celdas organicas como fuente de energia 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., & Rocha Rangel, E. (2012). Proceso electroquimico en celdas solares sensibilizadas con un colorante natural. *Investigacion y ciencia de la universidad autonoma de aguascalientes*, 9.
- Celdas, S.-F. (s.f.). SFV-Fundamentos Celdas.
- 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/>
- Mendoza Ramirez Miryam, G. A. (1995). energia solar. *Notas sobre el curso*, 158.
- Moncayo, L. (Dirección). (2015). *Celdas Solares Inorganicas* [Película].
- MR.MANOJ KUMAR SHARMA, M.-S. Q. (s.f.). The Light Soaking Effect - Additional Power. *SOLARPOWER*, 2.
- Murcia, H. R. (2009). Desarrollo de la energia solar en Colombia y sus perspectivas. *revista de ingenieria*, 8.

- O. Vigil-Galan, G. S.-R.-L.-P. (2003). influencia del tratamiento termico con CdCl₂ 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 energia renovable: celdas solares organicas. *Entreciencias:dialogos en la sociedad del conocimiento.*, 29.
- Salas Garcia, J., 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*.
- SEKAR, N. G. (2010). Metal Complex Dyes for Die-sensitized Solar Cells: Recent Developments, India. *Institute of Chemical Technology* .
- wikipedia* . (8 de noviembre de 2017). Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/PuTTY>
- wikipedia*. (17 de noviembre de 2018). Obtenido de metodologia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Metodolog%C3%ADa>

Apéndice A

DIAGRAMAS ELÉCTRICOS

En el apéndice A se presenta el diagrama eléctrico general y los diagramas de cada etapa utilizada en el sistema 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 Pi 3* 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 P i3* 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 *Snubber*.

Por último, se agregan algunas imágenes de partes mecánicas de las etapas de iluminación y temperatura que conlleva este sistema para su buen funcionamiento.

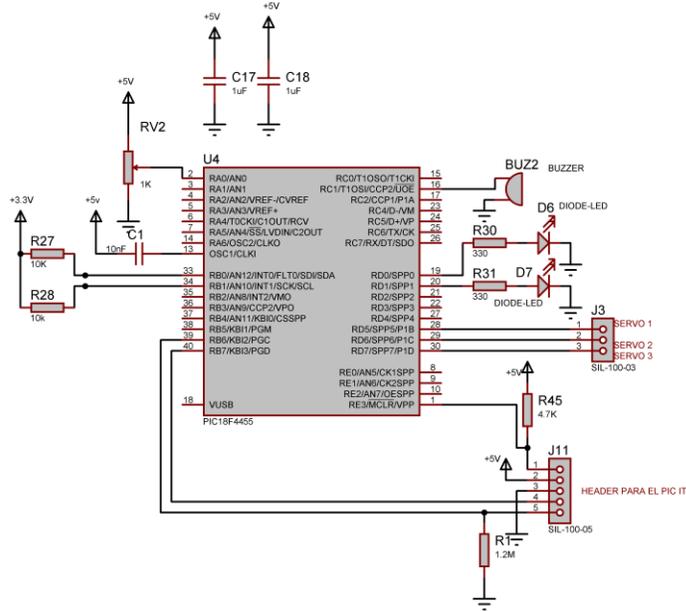


Figura A-2 Diseño en Proteus Professional 8 del microcontrolador PIC 18F4550.

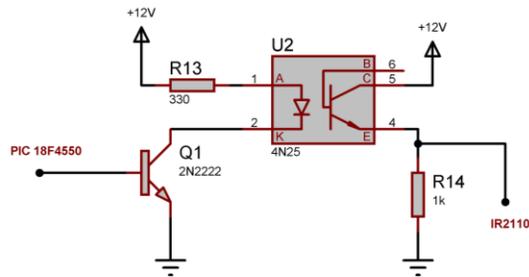


Figura A-3 Diseño en Proteus Professional 8 del circuito Optoacoplador.

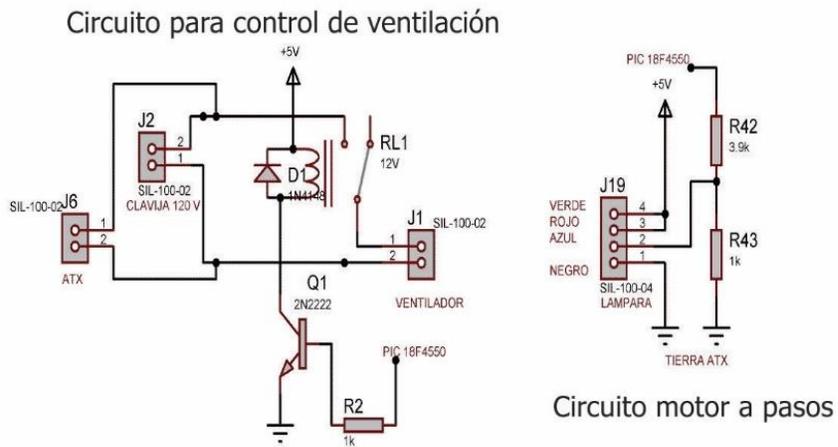


Figura A-6 Circuitos de acondicionamiento para el control de ventilación y subsistema de iluminación.

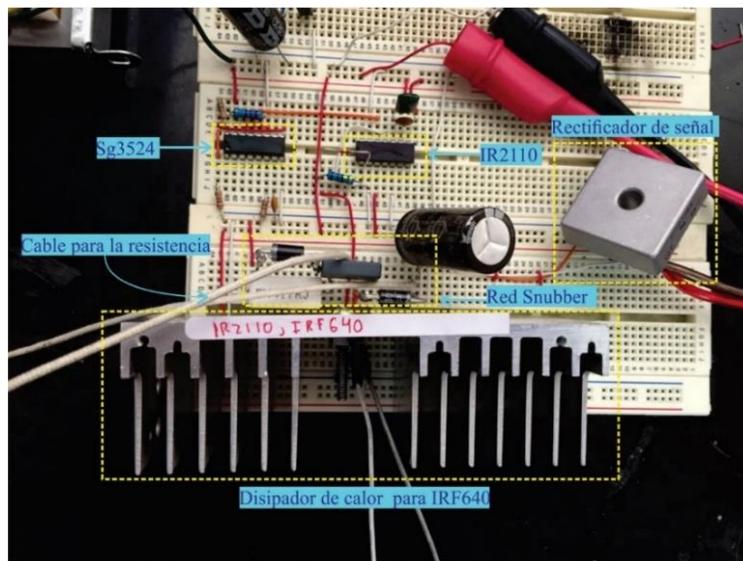


Figura A-7 Circuito de la etapa de potencia del sistema.

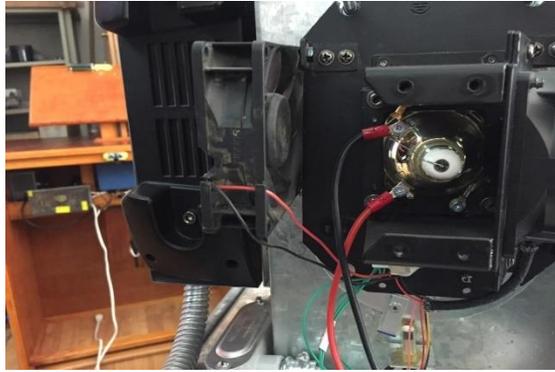


Figura A-8 *Posición de la lampara a un costado del horno con sistema de ventilación.*



Figura A-9 *Estructura física para el control de la lampara final.*



Figura A-10 *Protección para la lampara.*



Figura A-11 *Carcasa de protección de control de la lámpara.*



Figura A-12 *Foco implementado en la cámara de pruebas.*



Foco Litetek 7R

Figura A-13 *Foco de lampara de cabeza robótica.*



Figura A-14 *Vista lateral de lupa acoplada con escuadra.*



Figura A-15 *Lupa para enfoque de haz de luz.*

Apéndice B

MEDICIONES

Las mediciones realizadas en esta tesis fueron en base a el caso de calentamiento y enfriamiento del horno, para el primero caso se tomó en cuenta el ciclo de trabajo o ancho de Pulso del *PWM*, el tiempo y el valor de la temperatura en ese instante. La segunda tabla muestra la respuesta al enfriamiento del horno con dos variantes: enfriamiento con puerta abierta y enfriamiento con puerta cerrada adicionalmente usando un ventilador o sin usarlo.

La tabla de calentamiento muestra 5 valores diferentes de ciclo de trabajo comenzando con un 20% e incrementando cada 15% para cada prueba hasta llegar a un ciclo de trabajo del 80%.

Con estas tablas se muestra la respuesta en tiempo de la temperatura al interior del horno restringiendo un tiempo con duración máxima de 60 minutos y una temperatura máxima de 90°C.

Por último, una tercera tabla con los datos obtenidos a partir del disco obturador el cual se toma en cuenta las siguientes variables: segmento (posición del disco), temperatura (enfocada en el área de la celda solar), intensidad luminosa (en el área de enfoque de la luz), como resultante se obtuvieron las curvas de caracterización para la intensidad luminosa, lo cual permite establecer las condiciones de posición del disco para los requerimientos deseados.

Tabla B-1 Mediciones de la etapa de calentamiento del aparato. (Continuada)

Calentamiento					
	Duty Cycle 20%	Duty Cycle 35%	Duty Cycle 50%	Duty Cycle 65%	Duty Cycle 80%
Tiempo (min)	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	

Tabla B-1 *Mediciones de la etapa de calentamiento del aparato (...Continuación)*

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	90	
52	59	81	90	
53	59	82	90	
54	59	82	90	
55	60	82	90	
56	60	82	90	
57	60	83	90	
58	61	84	90	
59	61	84	90	
60	62	85	90	

Tabla B-2 Mediciones de la etapa de enfriamiento del aparato. (Continuada)

Enfriamiento				
Tiempo (min)	Puerta abierta con ventilador	Puerta abierta sin ventilador	Puerta cerrada con ventilador	Puerta cerrada sin ventilador
	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

Tabla B-2 *Mediciones de la etapa de enfriamiento del aparato. (...Continuación)*

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	44	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

Tabla B-3 *Mediciones de la etapa de Intensidad Luminosa del aparato.*

Temperatura (C°)		
Grados (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

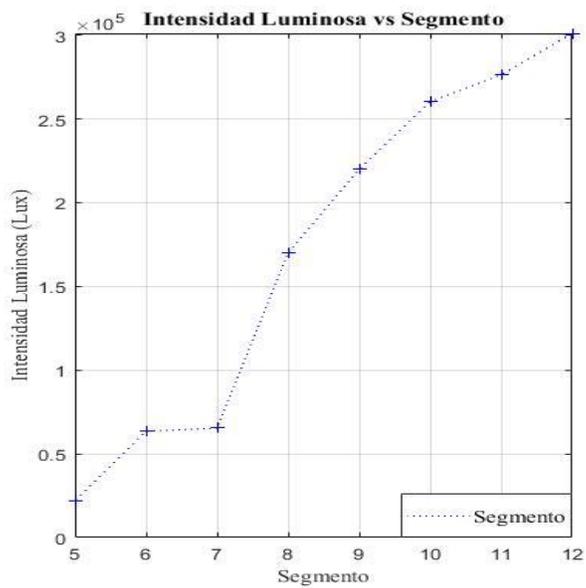


Figura B-1 Intensidad Luminosa en cada segmento.

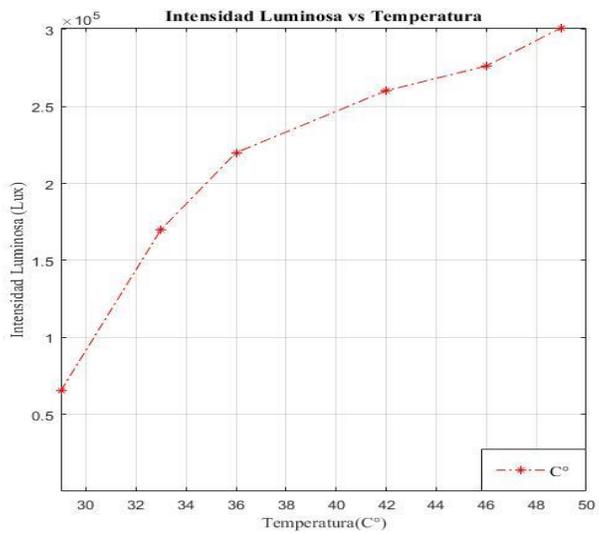


Figura B-2 Respuesta de la Intensidad Luminosa con diferentes temperaturas.

Sistema *LIGHT SOAKING*

Manual de usuarios

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



Características del sistema

1. Etapa de potencia IRF640, IR2110.
2. Termopar
3. Sistema de direccionamiento de aire
4. Subsistema de control de Iluminación

Este manual contiene información importante acerca de la instalación, el uso y el cuidado del sistema *Light Soaking*. Remítase al mismo para obtener descripciones del control de temperatura y luminosidad en la etapa *Light Soaking*. Siga las instrucciones sobre cómo usar el sistema y sugerencias para aprovechar al máximo sus características y funciones de vanguardia.

Información sobre seguridad

Las siguientes 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, realice el mantenimiento y 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

Significado de los iconos y señales de este manual de usuarios.

 Advertencia	Peligros o prácticas inseguras que pueden causar lesiones físicas graves o la muerte
 Precaución	Peligros o prácticas 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 toque
	Desenchufe el cable de alimentación del tomacorriente
	No repare ni reemplace

Estas señales de advertencia están aquí para evitar que usted u otras personas sufran daños.

Siga las instrucciones completamente.

Después de leer esta sección, guarde este manual para futuras consultas.



Lee las instrucciones antes de usar este sistema.

Al igual que con cualquier equipo que usa electricidad y piezas móviles, existen riesgos potenciales. Para usarlo de forma segura familiarícese con su funcionamiento y manéjelo con cuidado cuando lo use.

Instale y guarde el sistema en un lugar cerrado, alejado a la exposición de factores climáticos que pueden alterar los resultados.

Instale y nivele la estructura metálica sobre una superficie que pueda soportar su peso.

En caso de alguna fuga de aire no permitida apague el sistema y deje que llegue a una temperatura adecuada para operar.

Instrucciones de seguridad

No refuerza el cable de alimentación energéticamente ni 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.

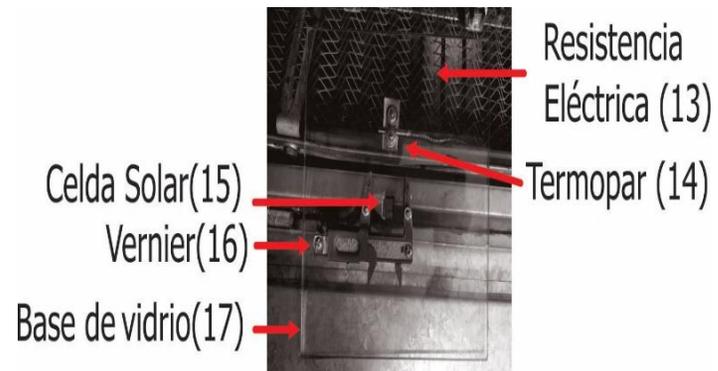
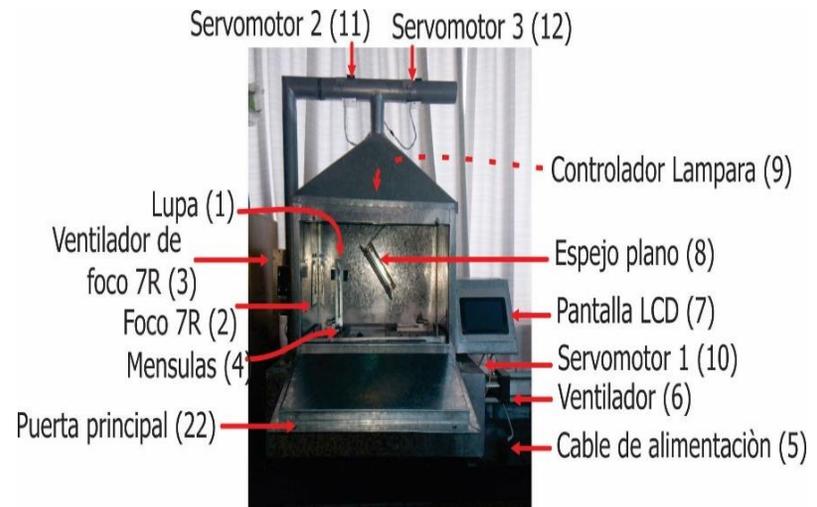
Conecte directamente al tomacorriente 127V.

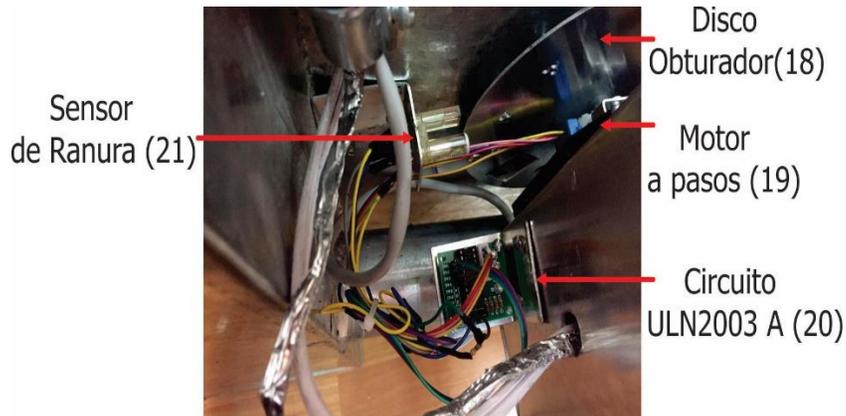
Verificación de las piezas del sistema

Verifique que el sistema tenga las siguientes piezas mencionadas que se muestran a continuación.



Controlador
Lampara (9)





Descripción y funcionamiento de piezas del sistema

Lupa (1): Estructura de metal pequeña en forma cilíndrica con un espejo en si interior para enfocar luz a un determinado sector.

Foco 7R (2): Foco de cabeza robótica de 230W encargada de suministrar luz al interior del sistema.

Ventilador de foco 7R (3): Sistema de enfriamiento para foco 7R.

Ménsulas (4): Estructura metálica en forma de L para posicionar la lupa en una posición específica.

Cable de Alimentación (5): Cable blanco con clavija color negro usado para alimentar el sistema a la toma de corriente.

Ventilador (6): Ventilador de plástico de 12V encargado de ingresar aire frío al interior del sistema.

Pantalla LCD (7): Interfaz gráfica destinada para la interacción del usuario.

Espejo Plano (8): Espejo de 25 centímetros x 35 centímetros encargada de reflejar el haz de luz del foco 7R.

Controlador Lampara (9): Circuito electrónico del foco 7R de cabeza robótica para su funcionamiento.

Servomotor 1 (10): Dispositivo de control con un eje acoplado a una oblea de aluminio que impedirá o permitirá el flujo de corriente de aire en el interior del sistema.

Servomotor 2 (11): Dispositivo de control con un eje acoplado a una oblea de aluminio que impedirá o permitirá el flujo de corriente de aire en el interior del sistema.

Servomotor 3 (12): Dispositivo de control con un eje acoplado a una oblea de aluminio que impedirá o permitirá el flujo de corriente de aire en el interior del sistema.

Resistencia eléctrica (13): Resistencia de cobre encargada de calentar el aire caliente al interior del sistema.

Termopar (14): Termopar tipo K situada en base de vidrio al interior del horno encargado de tomar la temperatura de la celda solar en tiempo real al momento de las mediciones.

Celda Solar (15): Celda solar de Telurio de cadmio (no necesariamente incluida) a la cual será aplicada la etapa *Light Soaking*.

Vernier (16): Instrumento de medición que se usara para ajustar a la celda a una medida específica y conectada a dos terminales ubicadas en cada punta del vernier del lado interior del sistema.

Base de vidrio (17): Base de vidrio sobrepuesta a una base metálica dentro del horno para sostener la celda solar, el vernier y el termopar tipo K.

Disco Obturador (18): Disco de aluminio con 12 perforaciones encargada de regular la intensidad luminosa emitida por el foco de cabeza robótica de 230W.

Motor a pasos (19): Dispositivo que controla el movimiento del disco obturador a la posición deseada del usuario.

Circuito ULN2003 A (20): Circuito integrado que da ganancia de corriente a la señal que procede del PIC 18F4550.

Sensor de Ranura (**21**): Dispositivo encargado de indicar al microprocesador el omento de inicio del disco obturador para regular la intensidad luminosa del foco 7R.

Puerta Principal (**22**): Puerta metálica de acceso al interior del sistema donde se realizarán las pruebas de la etapa *Light Soaking* a la celda solar.

Instrucciones para el control del sistema

1. Encendido del sistema	Conecte el sistema por medio del cable de alimentación (5) a la toma de corriente.
2. Tiempo de espera	Espere 2:00 minutos después de conectarlo para la activación ideal del sistema.
3. Posición base de vidrio	Abra la puerta principal (22) del horno y retirar la base de vidrio (17) a 25 centímetros por fuera de su base metálica.
4. Posición de celda solar	Colocar celda solar (15) entre las puntas del vernier (16) del lado interior al horno y posteriormente ajustarla a la medida requerida cerrando estas puntas hasta ajustar la celda solar (15).
5. Posición base de vidrio	Colocar la base de vidrio (17) nuevamente en su lugar por debajo del espejo plano (8) y ajustar la base metálica a la pared posterior del sistema por medio de su respectiva tuerca.

6. Ajuste de espejo plano	Asegurarse de que el espejo plano (8) se encuentre con una inclinación de 45° con respecto al techo del interior del sistema.
7. Ajuste de lupa	Ajustar la lupa (1) a 10 centímetros de la ménsula vertical (4) atornillando hasta su límite y posicionando esta misma en forma horizontal.
8. Ajuste de ménsulas	Posicionar las ménsulas (4) perpendicularmente con la base del vidrio (17) y el espejo plano (8) atornillando fijamente a su soporte metálico hasta su límite.
9. Ajuste de servomotores	Asegúrese de abrir o cerrar todos los bloqueos de los conductos de aire del horno situados en cada servomotor (10) (11) (12).
10. Ajuste de PWM	Escoja el ciclo de trabajo con el que quiera trabajar, elija el rango de (20% ,40%,50%, 80%) o proponga uno en específico a una frecuencia de 40KHz.
11. Encendido de lampara	Escoja la opción de encender lampara.
12. Subsistema de iluminación	Escoja entre 12 posiciones diferentes del disco obturador (18) la intensidad de luz con la que quiera trabajar.
13. Cerrado del sistema	Cierre la tapa principal (22) del horno y atornille la tapa con sus dos tuercas tipo mariposa.
14. Activación PWM	Escoja la opción de encender la resistencia eléctrica (13).
15. Estado activo	Observar el incremento de temperatura y realice las mediciones correspondientes.

16. Desactivación	Escoja la opción apagar la resistencia eléctrica (13) y apagado de lampara.
17. Enfriamiento del sistema	Abra los servomotores 1 (10) y servomotor 3 (12) y cierre el servomotor 2 (11), abra la puerta principal (22), encienda el ventilador (6) y espere de 20 a 30 minutos para enfriar el horno.
18. Quitar celda	Retire la celda solar (15) de las puntas del vernier (16) retirando la base de vidrio (17) a 25 centímetros de su base metálica y colocando la base de vidrio ((17) en su lugar.
19. Apagado del sistema	Desconecte el cable de alimentación del sistema de la toma de corriente.

Opciones de flujo de aire dentro del sistema

Siguiendo estas combinaciones se puede llegar a tener diferentes formas de mantener el flujo de aire caliente en el interior de la cámara de pruebas del sistema o diferentes formas de enfriar el sistema para posteriores mediciones.

Opción	Servomotor 1	Servomotor 2	Servomotor 3
1	Abierto	Abierto	Abierto
2	Abierto	Cerrado	Cerrado
3	Abierto	Abierto	Cerrado
4	Abierto	Cerrado	Abierto
5	Cerrado	Cerrado	Cerrado
6	Cerrado	Abierto	Abierto
7	Cerrado	Cerrado	Abierto
8	Cerrado	Abierto	Cerrado

Opción 1 deja escapar el aire por todos los medios de salida que se tiene sin restricción de quedar guardado en el espacio extra de circulación de aire con el que cuenta el aparato, opción dos solo deja escapar aire caliente del espacio extra de circulación de aire mientras los otros servomotores obstruyen el paso de aire y conlleva a que el aparato se enfríe más rápido, opción 3 deja pasar el aire en el espacio extra de circulación de aire y a la primer vía de distribución de aire horizontal pero bloqueando la retro circulación de aire caliente a la cámara de pruebas, opción 4 deja fluir aire en el espacio extra de circulación de aire y la vía principal de distribución de aire vertical bloqueando un medio de salida de aire ideal conllevando a solo tener una salida ideal de escape de aire, opción 5 obstruye por completo la circulación de aire hacia el medio ambiente provocando una temperatura homogénea dentro de su cámara de pruebas, opción 6 bloquea por completo la salida de aire en el espacio extra de circulación de aire y deja abierta completamente la otra salida, opción 7 solamente deja sin obstruir la retroalimentación de aire en la cámara de pruebas con la única salida de aire la puerta principal, opción 8 deja abierto una salida de aire ideal mientras las otras dos son obstruidas con la posibilidad de solo tener dos vías de escape de aire.

Especificaciones del *sistema Light Soaking*

A continuación, se muestra las características físicas de este sistema.

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
Consumo de energía	127 VAC – 30-40KHz
Tipo de unidad	Solar Simulator / <i>Light Soaking</i>
Irradiancia	Iluminación uniforme
Software	<i>Raspberry Pi 3</i>
Precio	\$ 1000 USD

Diagrama Eléctrico

