



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“DISEÑO DE UN CONTROL DE TEMPERATURA  
PARA EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE  
CELDAS SOLARES”

T E S I S

Para obtener el Título de  
Ingeniero en Electrónica

Presenta:

MAURICIO ALMAZÁN TORRES

Asesora de tesis:

Dra. Laura Luz Valero Conzuelo



Toluca, México. Febrero de 2019

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente doy gracias a Dios por permitirme llegar a la meta deseada.

Por el valioso apoyo que siempre me brindaron durante mi carrera profesional, como un testimonio de gratitud y eterno reconocimiento, por el apoyo que siempre se me han ofrecido y con el cual he logrado terminar mi carrera profesional, siendo para mí, la mejor de las herencias:

A mi madre:

Por darme vida para vivirla lo mejor que puedo, por ser la máxima inspiración de un hombre y por cobijarme con el más grande amor que existe.

A mi padre:

Por apoyarme más allá de lo posible, por dejarlo todo para estar ahí cuando lo necesito, aún sin pedirlo.

A mi hermana:

Por mostrarme el camino, por nunca dejar de creer.

A mi hermano:

Porque allá donde tú estás me observas, me cuidas y me guías.

A la Dra. Laura:

Porque ha sido más que una maestra, por todo su apoyo incondicional, por su paciencia, por si guía y por su fe en mí.

A mis maestros:

Por compartir sus conocimientos, por su tiempo, por ser la luz que me llevó a recorrer este camino.

A mis doctores:

Por mantenerme fuerte hasta este momento.

A mis amigos:

Por ser un sustento de vida, por tener tanta fe en mí.

A la Facultad de Ingeniería:

Por ser mi segunda casa, por dejarme vivir tanto en ella.

## ÍNDICE

Agradecimientos.....	I
ÍNDICE.....	II
INTRODUCCIÓN.....	IV
CAPÍTULO 1 .....	8
Energía Sustentable a nivel mundial y en México.....	8
1.1 La importancia de la energía.....	8
1.2 Generación de la energía eléctrica .....	8
1.3 La energía sustentable.....	11
1.4 La energía solar .....	12
1.5 Sistema de energía solar fotovoltaica .....	12
1.6 La celda solar.....	14
1.7 Estado del arte de la fabricación de celdas solares .....	15
CAPÍTULO 2 .....	21
La celda solar de CdTe/CdS y el proceso de <i>Light Soaking</i> .....	21
2.1 La celda solar de CdTe/CdS .....	21
2.2 Proceso de fabricación de celdas solares basadas en CdS/CdTe.....	22
2.3 Aspectos que intervienen en la eficiencia de la celda solar .....	24
2.3.1 Efectos de la temperatura en la eficiencia de las celdas solares.....	28
2.4 El proceso de <i>Light Soaking</i> .....	29
CAPÍTULO 3 .....	31
Diseño del sistema de control de iluminación y temperatura .....	31
3.1 Propuestas para el diseño de un controlador de iluminación y temperatura 31	
3.1.1 Propuesta de diseño de un controlador de lazo cerrado.....	31
3.1.1.1 El controlador PI.....	32
3.2 Necesidades de diseño.....	32
3.3 Diseño del sistema de control de iluminación y temperatura .....	33
3.3.1 Etapa de hardware.....	33
3.3.1.1 Comunicación PC – Tarjeta de control .....	33
3.3.1.1.1 El PIC18F4550.....	34
3.3.1.1.2 El MM232R.....	35

3.3.1.2 Establecimiento de la temperatura del horno .....	36
3.3.1.2.1 El IRF640 .....	37
3.3.1.2.2 El FAN3225 .....	38
3.3.1.2.3 El termopar tipo J .....	39
3.3.1.2.4 El AD8494 .....	39
3.3.1.2.5 El OPA340.....	40
3.3.1.2.6 El ADS1015.....	41
3.3.1.3 Establecimiento de la iluminación en el horno.....	41
3.3.1.3.1 El transistor 2N2222.....	42
3.3.1.3.2 Relevadores .....	42
<b>3.3.1.4 Adquisición de datos de la celda solar.....</b>	<b>43</b>
<b>3.3.1.4.1 El INA168.....</b>	<b>44</b>
<b>3.4 Etapa de software .....</b>	<b>45</b>
<b>3.4.1 La interface gráfica.....</b>	<b>45</b>
<b>3.4.2 El programa del microcontrolador .....</b>	<b>45</b>
3.5 Integración del sistema Hardware/ Software.....	46
CAPÍTULO 4 .....	47
Pruebas del sistema de control de iluminación y temperatura para el proceso de fabricación de celdas solares .....	47
4.1 Construcción del sistema de control .....	47
4.1.1 Tarjeta de control.....	47
4.1.2 Horno .....	52
4.2 Pruebas del sistema.....	55
4.3 Resultados .....	57
Conclusiones.....	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75
GLOSARIO.....	79
ANEXO 1: Programa del microcontrolador.....	80
ANEXO 2: Programa de la Interface gráfica.....	87

## INTRODUCCIÓN

La dinámica del mundo actual está basada en la tecnología y la interacción de ésta con el ser humano, el consumo de energéticos que satisfagan las necesidades de dicha tecnología es, hoy en día, el problema más grande la humanidad. Los combustibles fósiles como el carbón o los derivados del petróleo han provisto a la humanidad durante muchos años dicha necesidad pero con un costo ambiental muy alto, la generación de gases de efecto invernadero, los derrames petroleros o la fracturación hidráulica tienen un costo ambiental preocupante por lo que es necesario el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan aprovechar las energías sustentables existentes.

Las energías sustentables son aquellas que provienen de los recursos renovables como: el viento, el sol, la fuerza motriz de ríos y mares, etcétera, que, además de ser inagotables, son amigables con el medio ambiente, por lo que la obtención de energía debe estar encaminada al uso de este tipo de recursos. Una de las maneras de energía más importante actualmente es la energía eléctrica, su uso comercial ha sido explotado durante el último siglo pero su generación sigue siendo un problema ambiental grave.

El uso de la energía proveniente del sol, denominada energía solar es una alternativa considerable para resolver este problema. La transformación de la luz solar en energía eléctrica es denominada conversión fotovoltaica y se realiza a través de celdas solares, sin embargo, la eficiencia de estas es limitada; investigadores del Laboratorio de Física Aplicada del Cinvestav unidad Mérida trabajan actualmente en mejorar la eficiencia de las celdas solares, sin embargo, no cuentan con sistema instrumentado electrónicamente que les permita controlar las variables existentes durante el proceso de fabricación de celdas solares y que les otorgue mediciones para el análisis de la eficiencia; viendo esta necesidad de mejora es que surge este proyecto de tesis.

Este proyecto cobra importancia a nivel de investigación, ya que durante el proceso de fabricación de celdas solares en el departamento de Física Aplicada del Cinvestav se investiga la fabricación de celdas solares de alta eficiencia, por lo tanto, se planteó el trabajo conjunto FIUAEM para proporcionar las condiciones de instrumentación electrónica, bajo las cuales el investigador deba realizar el proceso de *Light Soaking* para conseguir mejorar la eficiencia máxima posible en la celda solar.

El *objetivo general* de esta tesis es diseñar un sistema controlado de temperatura e iluminación para la etapa denominada *Light Soaking*, que instrumente la medición de eficiencia al grupo de investigación de celdas solares de CdS/CdTe del Cinvestav Unidad Mérida; con la *hipótesis* de que un sistema controlado de temperatura e iluminación para la etapa de *Light Soaking* mejorará la eficiencia de las celdas solares de CdS/CdTe al grupo de investigación de Física Aplicada del Cinvestav Unidad Mérida.

También se plantearon como *objetivos específicos*: Controlar la temperatura para obtener sus caracterizaciones de voltaje y corriente en la etapa de irradiación luminosa (*Light Soaking*), y determinar el análisis de la eficiencia en celdas solares de CdS/CdTe.

El sistema que se presenta se ha desarrollado en dos etapas: el desarrollo de una tarjeta de control capaz de convertir las indicaciones del usuario en señales eléctricas que, a través de un microcontrolador, controlen diversos periféricos que mantengan las condiciones del proceso de *Light Soaking* bajo las especificaciones establecidas en una interface gráfica, que es la segunda etapa, que le permite al usuario fijar de una manera sencilla y amigable los parámetros bajo los cuales desea que se realice el proceso y, en un trabajo conjunto de software y hardware, permitirle al usuario obtener información relevante sobre el funcionamiento de la celda solar sometida al proceso de *Light Soaking* que le servirá para el análisis de la eficiencia de la celda en cuestión.

La tesis consta de cuatro capítulos. En el primer capítulo se da una introducción a lo que es la energía y la importancia que tiene esta en el desarrollo de la vida diaria, además se habla de la importancia que tiene las energías sustentables en la producción de energía eléctrica y se resalta la importancia de la energía solar sobre todas las mencionadas. Para finalizar se menciona a la celda solar como elemento conversor de energía solar a energía eléctrica y el estado del arte en el que se encuentra la fabricación de celdas solares.

En el capítulo dos, se introduce el proceso de fabricación de la celda solar de CdS/CdTe y la importancia de ésta sobre celdas solares de otros materiales, y se da también algunos aspectos que intervienen en la eficiencia de este tipo de celdas, específicamente de la temperatura. Para finalizar este capítulo, se menciona el proceso de *Light Soaking*, en que consiste y el por qué es vital para mejorar la eficiencia de las celdas solares; finalmente se mencionan los requerimientos para llevar a cabo dicho proceso, dando así paso a lo desarrollado en capítulo tres.

En el capítulo tres se describe la propuesta del sistema de control de iluminación y temperatura; aquí, primero se da una descripción a bloques del funcionamiento de la tarjeta de control, pasando después a un desarrollo específico de cada una de las etapas en la que se divide su funcionamiento y de los componentes principales de dichas etapas. Como se mencionó anteriormente, el proyecto consta de dos partes principales, el desarrollo de la tarjeta de control (el hardware) y la interface gráfica

(software), este capítulo contiene una descripción detallada de la interface gráfica y su funcionamiento. Finalmente, se da una descripción del programa del microcontrolador que también forma parte de la etapa de software y se describe como se entrelazan el hardware y el software que da paso a la conjunción del sistema.

El capítulo cuatro presenta el desarrollo del sistema de control de iluminación y temperatura construido con los elementos y especificaciones mencionadas anteriormente, además, se describen las pruebas realizadas con dicho sistema y se dan los resultados y finalmente se presentan las conclusiones.

## CAPÍTULO 1

### Energía Sustentable a nivel mundial y en México

#### 1.1 La importancia de la energía

Cada día es más demandante e importante la generación de energía ya que el mundo actual maneja una gran cantidad de procesos automatizados, sistemas de telecomunicaciones, etcétera. El concepto “energía” tiene distintas acepciones, en función de la temática en la que nos encontremos:

- En física, se define como la capacidad para realizar un trabajo.
- En tecnología y economía, se refiere a un recurso natural y a la tecnología asociada para explotarlo y hacer un uso industrial o económico del mismo.

Gracias a la energía, podemos utilizar una gran cantidad de aparatos y maquinaria que nos hacen la vida mucho más fácil.

Sin embargo, a medida que la sociedad es más desarrollada, se consume una mayor cantidad de energía pero, generalmente, no de manera más eficiente, desperdiciándose enormes cantidades que podrían ser aprovechadas para otros fines. Esto conllevaría un ahorro de recursos naturales y una reducción de la contaminación emitida en el proceso de producción de la energía.<sup>[1]</sup>

De entre todas las energías conocidas por el hombre se destaca la energía eléctrica. Desde su descubrimiento hasta su uso comercial con el telégrafo eléctrico a finales del siglo XIX la producción de este tipo de energía era más bien sencilla, sin embargo, la segunda revolución industrial (1879 – 1914) transformó una sociedad movida con vapor y aceite a una sociedad movida por electricidad, por lo que la producción de este tipo de energía se volvió vital para el desarrollo de ciudad y países.

#### 1.2 Generación de la energía eléctrica

Actualmente casi cualquier aparato o máquina utilizada por la humanidad funciona con electricidad, de ahí cada vez existan más formas de generarla. En general, la generación de energía eléctrica consiste en transformar alguna clase de energía (química, cinética, térmica, lumínica, nuclear, solar entre otras), en energía eléctrica. Para la generación industrial se recurre a instalaciones denominadas centrales eléctricas, que ejecutan alguna de las transformaciones citadas.

Estas constituyen el primer escalón del sistema de suministro eléctrico. La generación eléctrica se realiza, básicamente, mediante un generador eléctrico; si bien estos no difieren entre sí en cuanto a su principio de funcionamiento, varían en función a la forma en que se accionan.<sup>[2]</sup>

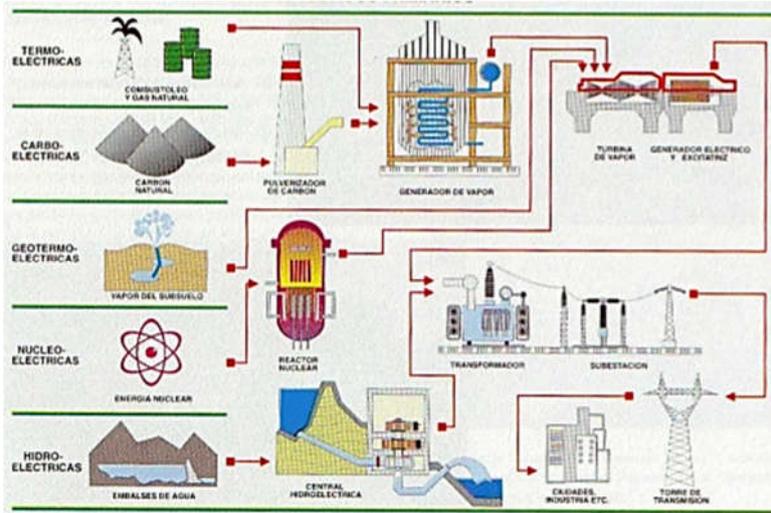


Figura 1: Diagrama simplificado del proceso de producción de energía eléctrica a través de los diversos energéticos primarios. [3]

Actualmente la gran mayoría de la energía eléctrica en el mundo se genera con la quema de combustibles fósiles (derivados del petróleo y carbón) dejando en un segundo plano el uso de energías alternativas.

En México la generación que registró la CFE (ya tomando en cuenta la producción de energía eléctrica de la extinta Luz y Fuerza) en porcentaje de participación por tecnología está distribuida de la siguiente manera.

**a) Generación mediante recursos no renovables:** termoeléctricas, 81.24%, incluyendo hidrocarburos, productores independientes de energía eléctrica (PIE's) y carboeléctricas; nucleoelectrica, 3.58%.

**b) Generación mediante recursos renovables:** hidroeléctricas, 12.84%; geotermoeléctricas, 2.30%; eoloeléctricas, 0.04%.

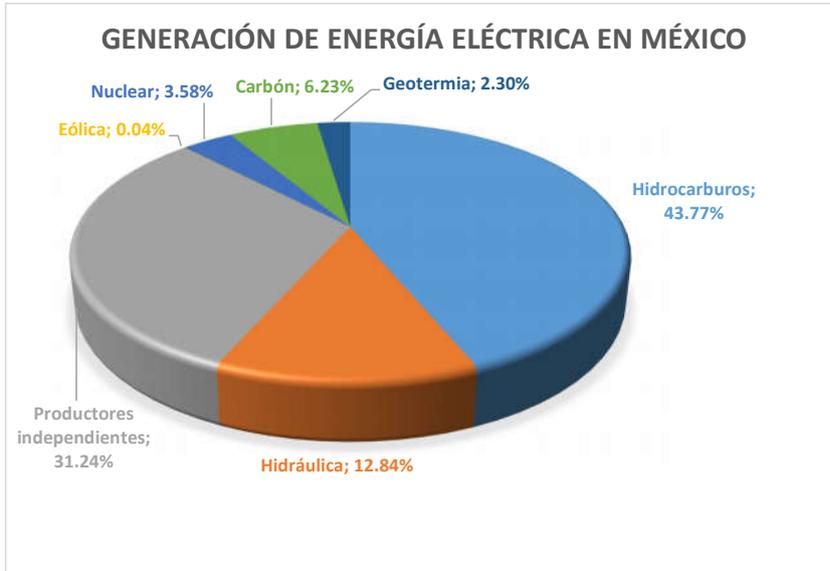


Figura 2: Generación de energía eléctrica en México, diciembre de 2011 [4]

El mundo se mueve prácticamente por combustibles fósiles. En el año 2008 se registró una producción de energía eléctrica de poco más de 20 mil TW, de los cuales el 67.49% se generó mediante tecnologías que producen gases de efecto invernadero, porque sus combustibles son hidrocarburos y carbón. México no es la excepción en la tendencia de generación de energía eléctrica con este tipo de combustibles, por ejemplo, tomando el mismo año referido, se generaron 192 TW por combustibles fósiles (83%), mientras que los recursos renovables sólo generaron 32 TW (14%).

La sustentabilidad en el sector eléctrico mundial y en el mexicano no se va a celebrar a corto plazo debido a la dependencia actual de la industria para generar energía eléctrica con base en combustibles fósiles; cambiar dicha generación por fuentes que utilicen recursos renovables requiere de tiempo, y el abastecimiento de energía no se puede suspender ni el sector industrial cambiar bruscamente; sin embargo, de forma paulatina, los sectores eléctricos mundial y mexicano se pueden ir repotenciando en la búsqueda de dicha sustentabilidad eléctrica.[5]

El siguiente paso en la generación de energía eléctrica en México y el mundo debe ser en dirección de las energías renovables, ya que, además de representar una fuente de energía casi ilimitada la mayoría de ellas son energías limpias, amigables con el ambiente, lo que garantiza un avance en pro de la mejorar la calidad de vida de las personas.

### 1.3 La energía sustentable

La energía sustentable (o renovable) es aquella que, a diferencia de la tradicional, se puede obtener de fuentes naturales prácticamente infinitas como el sol, el aire, la lluvia y el agua cuyo movimiento da fuerza a los ríos y oleaje a los mares y océanos.

De acuerdo con los especialistas, esta energía se puede dividir en dos grandes grupos: la no contaminante o limpia y la contaminante. Entre las primeras, podemos mencionar:

- La energía solar.
- La energía eólica, que se obtiene a partir de la fuerza de las corrientes del viento.
- La energía hidráulica, que se obtiene con el almacenaje de la energía contenida en las corrientes de ríos y presas.
- La energía mareomotriz, que se obtiene al almacenar la energía contenida en mares y océanos.
- La energía geotérmica, que se logra aprovechando el calor de la Tierra.
- Y la undimotriz, que se logra aprovechando la fuerza con que se generan las olas.

Por su parte, el segundo grupo, las energías contaminantes, se obtienen a partir de la materia orgánica (o biomasa) y se pueden utilizar directamente como combustible (madera u otra materia vegetal sólida), ya sea convertido en bioetanol o en biogás, mediante diversos procesos de fermentación orgánica o biodiesel, a través de reacciones de transesterificación y de los residuos urbanos.

Cabe señalar que estas energías tienen el mismo problema que la energía producida por los combustibles fósiles: en la combustión emiten dióxido de carbono, gas de efecto invernadero, y a menudo son más contaminantes puesto que la combustión no es tan limpia, emitiendo hollines y otras partículas sólidas.

Sin embargo se encuadran dentro del grupo de las energías renovables porque el dióxido de carbono emitido, puede ser utilizado, en un segundo momento o generación, a manera de materia orgánica. También se puede obtener energía a partir de los residuos sólidos urbanos, que también es contaminante (que es el principio de los actuales biodigestores).<sup>[6]</sup>

Una de las formas de energía sustentable de mayor importancia y crecimiento por su disponibilidad es la proporcionada por el Sol, es decir, la energía solar.

#### **1.4 La energía solar**

El término energía solar se refiere al aprovechamiento de la energía que proviene del Sol. Se trata de un tipo de energía renovable ya que la energía contenida en el Sol es tan abundante que se considera inagotable. La energía del Sol, además de ser inagotable es abundante: la cantidad de energía que él vierte diariamente sobre la Tierra es diez mil veces mayor a la que se consume al día en todo el planeta. La radiación recibida se distribuye de una manera más o menos uniforme sobre toda la superficie terrestre, lo que dificulta su aprovechamiento.

La energía solar es la energía contenida en la radiación solar que es transformada mediante los dispositivos correspondientes, en forma térmica o eléctrica, para su consumo posterior allá donde se necesite. El elemento encargado de captar la radiación solar y transformarla en energía útil es el panel solar. Actualmente existen básicamente tres formas para aprovechar la energía solar:

- La energía solar pasiva es método más antiguo de aprovechamiento de la energía solar pasiva. Este sistema consiste en aprovechar la radiación solar mediante la adecuada ubicación, diseño y orientación de edificios, empleando correctamente las propiedades de los materiales y los elementos de los mismos.
- La energía solar fotovoltaica aprovecha las propiedades de ciertos materiales para generar una corriente eléctrica, que tratada correctamente, se puede utilizar para proporcionar electricidad en instalaciones autónomas o se puede utilizar para suministrarla a la red eléctrica.
- La energía solar térmica se basa en calentar agua mediante colectores solares que posteriormente se podrá utilizar para agua caliente sanitaria o para la calefacción de una vivienda.

#### **1.5 Sistema de energía solar fotovoltaica**

La energía solar fotovoltaica se basa en el principio de que la energía contenida en las partículas de luz (los fotones) puede ser convertida en electricidad. Esto se logra a través del denominado proceso de conversión fotovoltaica.

La conversión directa de energía solar en electricidad se realiza a través de un material semiconductor. El elemento básico es la celda fotovoltaica: expuesta a la luz, absorbe la energía de los fotones de luz. Estos ponen en movimiento electrones que son atrapados por un campo eléctrico interno. Los electrones recogidos en la superficie de la celda generan una corriente eléctrica continua.

El voltaje de salida de una celda fotovoltaica es bajo. Esta es la razón por la cual las células se colocan en series eléctricas, por lo tanto, forman un módulo fotovoltaico. De acuerdo con las tecnologías y el tipo de uso que se hace de él, este módulo tiene un área de superficie de 0.1 m<sup>2</sup> (10 W) a 1 m<sup>2</sup> (100 W), valores indicativos promedio, y declina voltajes de 12 V, 24 V o 48 V dependiendo de la aplicación.

Como resultado de este proceso de conversión fotovoltaica, se obtiene energía a bajas tensiones (entre 380 y 800 V) y en corriente continua. Posteriormente se utiliza un inversor para ser transformarlo en corriente alterna. La electricidad producida está disponible en forma de electricidad directa o almacenada en baterías (energía eléctrica descentralizada) o electricidad inyectada en la red. El rendimiento de una instalación fotovoltaica depende de la orientación de los paneles solares y las áreas de sol en las que se encuentre.

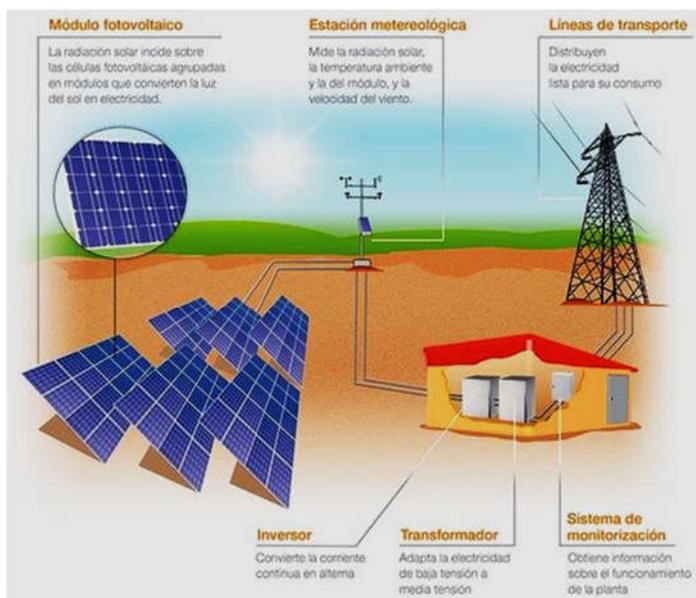


Figura 3: Sistema de energía solar fotovoltaica [7]

La energía solar fotovoltaica, al igual que otras energías renovables, constituye una fuente inagotable, contribuye al autoabastecimiento energético y es menos perjudicial para el medio ambiente, evitando los efectos de su uso directo (contaminación atmosférica, residuos, etc.) y los derivados de su generación. La generación de energía eléctrica directamente a partir de la luz solar no requiere

ningún tipo de combustión, por lo que no se produce contaminación atmosférica. En la fabricación de los paneles fotovoltaicos no se producen alteraciones en las características litológicas, topográficas o estructurales del terreno, al no producirse ni contaminantes, ni vertidos, ni movimientos de tierra, la incidencia sobre las características físico-químicas del suelo o su erosionabilidad es nula. Así mismo no existe una repercusión sobre la vegetación o fauna alguna.

### 1.6 La celda solar

Una celda solar es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía lumínica en energía eléctrica. La forma más común de las celdas solares se basa en el efecto fotovoltaico, en el cual la luz que incide sobre un dispositivo semiconductor de dos capas que produce una diferencia de voltaje o del potencial entre las capas.

Este voltaje es capaz de conducir una corriente a través de un circuito externo. Una celda solar es un arreglo de silicio de tipo N (azul claro) y silicio de tipo P (verde). Se genera electricidad mediante el uso de luz solar para producir electrones que saltan a través de la unión entre los diferentes silicios.

- 1) La luz solar choca con la celda solar, los fotones (partículas de luz) bombardean la superficie superior.
- 2) Los fotones llevan su energía a través de la celda solar.
- 3) Los fotones ceden su energía a los electrones en la capa más baja de tipo P.
- 4) Los electrones utilizan esta energía para saltar a través de la barrera superior de tipo N y escapar hacia el circuito.
- 5) Fluyendo alrededor del circuito, los electrones generan una corriente eléctrica.

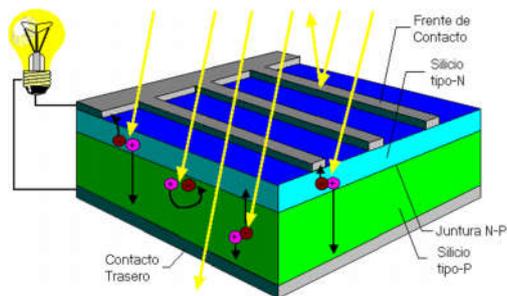


Figura 4: Funcionamiento de una celda solar [8]

## 1.7 Estado del arte de la fabricación de celdas solares

- **Tecnología de fabricación de celdas solares de Silicio**

1. El Silicio se obtiene a partir de elementos como arena o cuarzo.
2. Obtenemos un Silicio con propiedades de semiconductor y así lograr celdas de alta eficiencia el Silicio es el segundo elemento más abundante en la superficie terrestre, luego del oxígeno.
3. Silicio monocristalino: estructura cristalina uniforme
4. Silicio policristalino: estructuras ubicadas arbitrariamente. Estos "granos" hacen que la estructura no sea uniforme y se obtenga una eficiencia menor.
5. Silicio amorfo: presenta todavía bajos niveles de eficiencias



Figura 5: Estructura del silicio <sup>[9]</sup>

### **Producción de Silicio Monocristalino**

#### *Método de crecimiento de Czochralski (CZ)*

El método consiste en la formación de un cristal en forma de varilla de material muy puro, por contacto con un baño de mezcla fundida en un crisol de platino, iridio, cerámica o grafito. La "varilla", cuyo extremo, en el que se coloca una semilla de cristalización, se encuentra en contacto con el baño, se hace girar y ascender lentamente, produciéndose un monocristal en forma de barra y quedando las impurezas en el baño. Se utiliza una atmósfera oxidante.

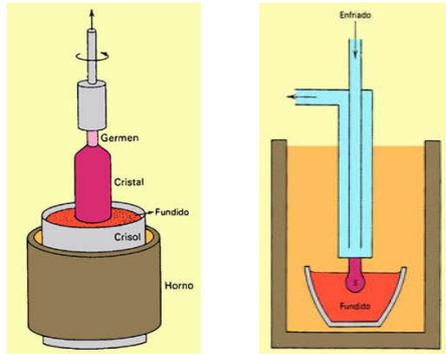


Figura 6: Esquema de los métodos Czoachralski y Kiropoulos [10]

Las velocidades de crecimiento varían de 6 a 25 mm por hora. Por este método, que también admite modificaciones y mejoras, se obtienen corindones muy puros, para su utilización en semiconductores y láseres.

#### *Método Flotante (FZ) (I)*

Sirven para purificar cristales y se conocen desde hace más de 50 años. Se basan en el cambio en la concentración de las impurezas debido a los mecanismos de segregación de la transición sólida a líquida. En 1952 Pfann ideó el método de Zona Fundida donde el lingote se sitúa en horizontal dentro de un crisol o barquilla donde está apoyado para fundirse para realizar una purificación o refinamiento por zonas.

El método que se utiliza en la actualidad es método de la zona flotante:

1. El lingote se sitúa en vertical y la zona fundida se hace suficientemente corta
2. No hay crisol (fuente de impurezas)
3. La zona fundida se mantiene unida por tensión superficial a las partes superior e inferior que están sólidas.

Con este método se realizan los cristales más puros conocidos hasta el momento y es utilizado para aplicaciones optoelectrónicas de Si (fabricación de células solares)

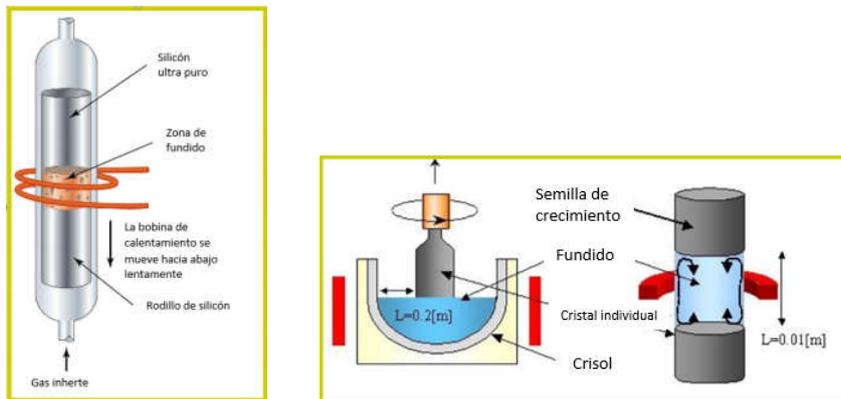


Figura 7: Esquema del método flotante (FZ) (I) [11]

#### Método Flotante (FZ) (II)

Es un método que permite tanto la formación del monocristal como el refinado de un material crecido mediante la técnica CZ (para purificarlo o refinarlo más).

En que consiste FZ:

1. Dentro de una cámara con atmósfera inerte, se coloca una barra de semiconductor policristalino en posición vertical y se rota.
2. Una pequeña zona de la barra se mantiene “fundida” mediante un calentamiento por señales de RF.
3. La zona fundida se mueve a lo largo de la longitud de la muestra las impurezas segregadas de la zona fundida van desplazadas hacia los extremos del lingote.
4. Como  $k_0 = C_S / C_L < 1$ , las impurezas tienden a ir a la zona fundida.
5. Para ayudar a una cristalización inicial se coloca un cristal semilla que sirve de modelo de crecimiento.

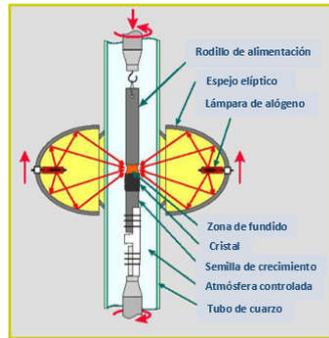


Figura 8: Esquema del método Flotante (FZ) (II) [11]

### **Producción de obleas**

1. Una vez obtenido el cilindro de Silicio Monocristalino, se procede a cortar las obleas o wafers con espesor aproximado de 300um.
2. Las obleas son dopadas con átomos de Fósforo en un horno a temperaturas entre 800°C y 900°C para obtener la capa N.
3. El sustrato tipo P se logra, antes de obtener los lingotes, dopando el Silicio con átomos de Boro, para luego cortar las obleas que serán utilizadas como material tipo P en las celdas.

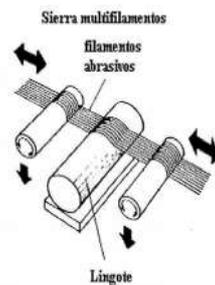


Figura 9: Producción de obleas de silicio. [12]

### **Película antirreflectante**

1. Consiste en un tratamiento o texturizado que se le da al Silicio para disminuir el índice de reflexión
2. Estructura piramidal, que aumenta la absorción de la luz incidente, gracias a reflexión múltiple de ésta.

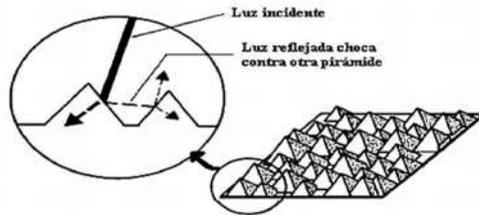


Figura 10: Estructura piramidal del silicio. [13]

### **Contactos**

1. Superior: Debe construirse con unidades lo bastante gruesas, para transportar la corriente eléctrica y lo bastante finas, para no obstaculizar el paso de la luz solar.
2. Inferior: material conductor simple (aluminio)

### **• Fabricación y caracterización de celdas solares tridimensionales basadas en heterojunturas híbridas de silicio cristalino y silicio amorfo**

Entre las técnicas de caracterización a ser utilizadas se pueden agrupar en dos tipos: las caracterizaciones físico - químicas y las que generan las curvas inherentes V- I de la celda solar:

\* **Transmitancia y Reflectancia Óptica:** Las mediciones de transmitancia y reflectancia en función de la longitud de onda permitirán determinar en primer lugar el espesor de las muestras depositadas, con lo cual se calculará la velocidad de deposición. Se obtendrá también el índice de refracción y el coeficiente de absorción en función de la longitud de onda, lo que llevará a poder determinar el gap óptico del material.

\* **Conductividad a oscuras en función de la temperatura:** Estas mediciones brindarán información respecto del mecanismo de transporte de carga en estos materiales. En caso de que sea por activación térmica, se podrá calcular la energía de activación y localizar así la posición del nivel de Fermi dentro del gap del semiconductor.

\* **Fotoconductividad:** A través de esta técnica, y conociendo el coeficiente de absorción de la muestra, se podrá determinar el producto de la movilidad por el tiempo de recombinación para los portadores de carga mayoritarios del semiconductor.

\* **Espectroscopía Infrarroja:** Esta técnica permitirá determinar el contenido total de hidrógeno ligado a la muestra y la estructura en que se liga. Se

obtendrá una indicación de la proporción de mono- y di-hidruros presentes, es decir enlaces Si-H y Si-H<sub>2</sub>.

\* **Red Fotogenerada de Estado Estacionario:** Esta técnica se basa en hacer interferir sobre la superficie de la muestra dos haces de luz coherentes, dando lugar a una distribución periódica de intensidad de iluminación. A partir de esto, es posible determinar la longitud de difusión de los portadores minoritarios, es decir la distancia que recorren antes de recombinarse. Este es un parámetro importante para caracterizar la calidad de los materiales semiconductores.

\* **Espectroscopía Raman:** Esta técnica permite evaluar el grado de cristalinidad de las muestras, y también estimar el tamaño de grano de los cristales.

\* **Espectroscopía de Rayos X:** La técnica de rayos X permite determinar la orientación de los cristales y su tamaño de grano.

\* **Reflectancia en el UV:** Existen trabajos que demuestran que los picos de reflectancia en la zona ultravioleta dan información respecto del grado de orden cristalino de las muestras, por lo tanto se utilizará esta técnica en conjunto con las anteriores para evaluar la calidad cristalina de las muestras.

\* **Característica Corriente-Tensión:** Aplicando distintas tensiones a la juntura, tanto en sentido directo como inverso, y midiendo la corriente que circula, se obtendrán las curvas I-V características del dispositivo. Estas mediciones se realizan tanto a oscuras como bajo iluminación. En este último caso, conociendo la potencia luminosa incidente y la potencia eléctrica que entrega la celda, se puede calcular la eficiencia de conversión fotovoltaica a partir del cociente entre ambas potencias. La curva característica I-V también permite evaluar el factor de llenado del diodo, el voltaje de circuito abierto y la corriente de corto circuito, los cuales da una primera idea de la calidad de la juntura.

\* **Respuesta Espectral:** Esta técnica consiste en medir la corriente de cortocircuito que entrega la celda para diferentes longitudes de onda de la luz incidente. Como las diferentes longitudes de onda son absorbidas en distintas zonas de la celda, de esta manera se obtiene información respecto del comportamiento de las distintas regiones que conforman la celda solar. Asimismo, se ha demostrado que es posible evaluar la longitud de difusión de los portadores minoritarios a partir de las curvas de respuesta espectral.

## CAPÍTULO 2

### La celda solar de CdTe/CdS y el proceso de *Light Soaking*

#### 2.1 La celda solar de CdTe/CdS

El CdTe es un semiconductor compuesto del grupo II<sup>B</sup>-VI<sup>A</sup> con una banda óptica directa que está acoplada de manera óptima al espectro solar para la conversión de energía fotovoltaica. La energía de la banda prohibida del CdTe es  $E_G = 1.5$  eV y su alto coeficiente de absorción es mayor a  $5 \times 10^5/\text{cm}$ ; gracias a ello, el CdTe se comporta como un material de alto rendimiento cuántico en un amplio rango de longitudes de onda del espectro solar, que van desde el ultravioleta hasta una longitud de onda de aproximadamente 825 nm [4], por lo cual el CdTe es un material idóneo para ser utilizado como capa absorbente en las celdas solares de película delgada, ya que los fotones de longitud de onda corta con una energía mayor a la energía de la banda prohibida ( $E_G$ ) del CdTe, serán absorbidos cerca de la superficie del material y desempeñarán un papel importante en el proceso de conversión de energía solar a energía eléctrica.

La energía de la banda prohibida determina que tan bien se encuentra acoplada la celda solar al espectro solar, dado que sólo los fotones con  $h\nu > E_G$  pueden crear pares electrón-hueco y contribuir con la generación de corriente. Las celdas solares en forma de película delgada basadas en el semiconductor de CdTe continúan siendo una importante promesa para la generación de potencia eléctrica en la superficie terrestre.

Las propiedades optoelectrónicas del semiconductor CdTe son ideales para absorber parte del espectro de radiación solar, lo cual podría llevar a altos niveles de eficiencia de conversión. En la Figura 11 se muestra el espectro de radiación solar, y en la que se ha marcado el rango de longitudes de onda en las que el CdTe puede trabajar como convertidor de energía solar a energía fotovoltaica (desde el ultravioleta hasta ~825 nm).

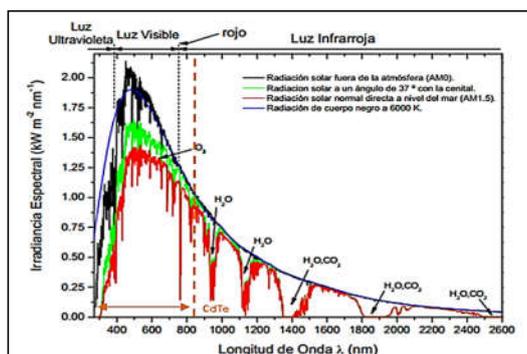


Figura 11: Espectro de radiación solar [14]

Las celdas solares de CdS/CdTe se fabrican en dos diferentes configuraciones, sustrato y superestrato. En ambas configuraciones, la luz entra en la celda a través del óxido conductor transparente (TCO). Sin embargo, en la celda con la configuración de superestrato, las capas TCO, CdS, y CdTe se depositan secuencialmente en un superestrato de vidrio (que también sirve como soporte mecánico para la celda) y la luz debe pasar a través del vidrio de soporte antes de llegar a la juntura CdS/CdTe. Todas las celdas solares de alta eficiencia fabricadas hasta la fecha poseen la misma estructura de superestrato <sup>[4]</sup>, como se muestra en la Figura 12.

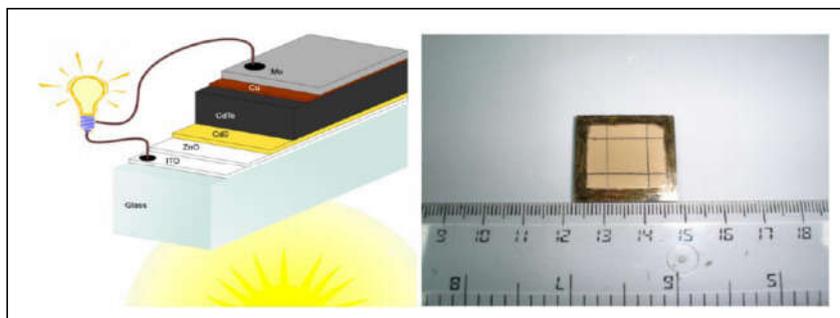


Figura 12: A la izquierda se muestra un esquema de la celda solar Vidrio/ITO/ZnO/CdS/CdTe/Cu/Mo. A la derecha se muestra una celda limitada para formar 1 cm<sup>2</sup>.  
[15]

El futuro de los dispositivos de película delgada de CdTe en la producción de energía está garantizado por las propiedades del material, así como por el rendimiento del dispositivo a escala de laboratorio y su implementación en módulos fotovoltaicos. El aumento de la generación de energía en base a las celdas solares de CdS/CdTe depende de la mejora de su desempeño como convertor de energía, así como de la rentabilidad de los procesos de fabricación de los módulos y la estabilidad tanto de las celdas como de los módulos fotovoltaicos.

Los dispositivos fotovoltaicos de película delgada basados en CdTe no están limitados a la conversión de energía solar a eléctrica, ya que también son usados en otras aplicaciones, como la generación de energía para aplicaciones espaciales, sensores infrarrojos y sensores de radiación gamma <sup>[16]</sup>. En la actualidad, las celdas solares de CdTe son un fuerte contendiente para la generación de energía eléctrica a partir de la energía solar, debido a su reducción en el costo por Watt (actualmente el costo es menor a 1 dólar por Watt <sup>[17]</sup>).

## 2.2 Proceso de fabricación de celdas solares basadas en CdS/CdTe

La fabricación de la celda solar se realiza sobre un sustrato de vidrio comercial que ya contiene la película delgada del contacto frontal de óxido transparente conductor (TCO) de ITO (Indium Tin Oxide) cuya resistividad es de  $7 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ . Utilizando el

método de erosión catódica y en un ambiente compuesto de argón y oxígeno, junto con un cátodo de Zn de 99.99% de pureza, se deposita 100-150 nm de ZnO sobre el ITO. La película delgada de ZnO es una capa semi-aislante cuya función es evitar que, en caso de que el CdS tenga algún micro-hueco, el semiconductor CdTe haga contacto directo con el ITO, y en un caso extremo evitar que los contactos frontal y posterior hagan un corto circuito.

Utilizando la técnica de erosión catódica y un ambiente de 30 mTorr de argón junto con un cátodo de CdS de 99.999% de pureza, sobre la estructura de vidrio/ITO se deposita 150 nm de CdS tipo n. Utilizando el método CSS (Close Space Sublimation, sublimación en espacio cercano) en un ambiente compuesto de argón-oxígeno, siendo la temperatura de 570 °C para el sustrato y de 590 °C para la fuente (el contenedor del semiconductor de CdTe), se deposita la película de CdTe con espesor de 8 - 10  $\mu\text{m}$ .

Posteriormente se realiza el proceso denominado activación de la celda solar, que consiste en realizar un tratamiento térmico de toda la estructura en una atmósfera que contenga cloro, la temperatura apropiada para este paso es de 400 °C <sup>[15]</sup>. Finalmente se realiza el depósito del contacto posterior, para ello el método de erosión catódica es utilizado para depositar 10 nm de Cu y 850 nm de Mo <sup>[18]</sup>. El aspecto de la celda solar se puede observar en la Figura 12.

Es importante mencionar que la transparencia del ITO, ZnO deben ser superior al 90% y para el semiconductor CdS satisfacer un compromiso entre una alta transmitancia y un espesor tal que se minimicen los micro-huecos. Los pasos más relevantes del proceso de fabricación se pueden resumir de la siguiente manera <sup>[15]</sup>:

- 1) Limpieza del sustrato de vidrio.
- 2) Depósito del contacto frontal de ITO sobre el sustrato de vidrio.
- 3) Depósito de 100 nm de ZnO sobre el ITO.
- 4) Depósito de 150 nm CdS sobre ZnO o sobre el ITO.
- 5) Depósito de 8-10  $\mu\text{m}$  CdTe sobre el CdS.
- 6) Activación a 400 °C del CdTe en una atmósfera que contenga cloro.
- 7) Depósito de 5-10 nm de Cu sobre el CdTe activado.
- 8) Depósito de 500-1000 nm de Mo sobre el Cu.
- 9) Recocido de toda estructura a 200 °C por 20 minutos en una atmósfera de Argón.
- 10) Delimitar el área de la celda solar.

11) Caracterización electro-óptica para conocer la eficiencia y otros parámetros.

En la Figura 13 se muestran los sistemas de depósito que se utilizan durante todo el proceso de fabricación de las celdas solares.

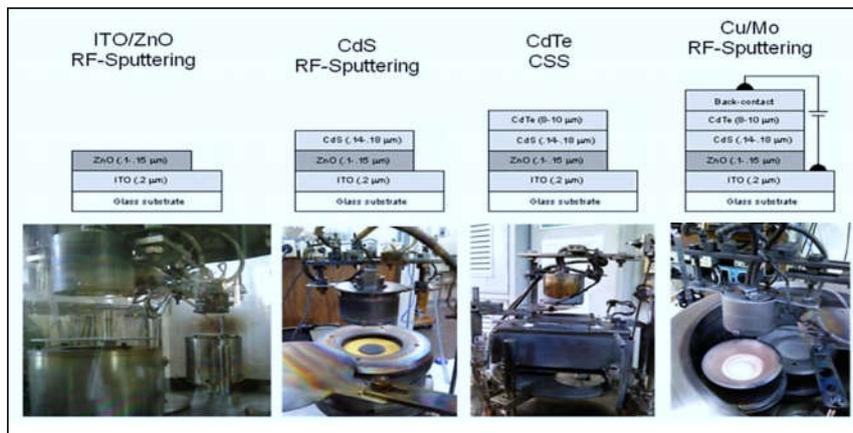


Figura 13: De izquierda a derecha se presenta la secuencia de depósito de las películas delgadas que forman la celda solar de CdS/CdTe [15].

### 2.3 Aspectos que intervienen en la eficiencia de la celda solar

Una celda solar puede ser modelada por el circuito equivalente de la Figura 14. Este modelo consiste de los siguientes elementos:

- Una fuente de corriente que representa a la corriente generada por el efecto fotoeléctrico.
- Un diodo que representa la unión p-n.

Una resistencia en serie ( $R_s$ ), que representa las pérdidas óhmicas ocasionadas por los contactos metálicos de la celda, concentraciones de impurezas y la profundidad de la juntura. Ésta representa un parámetro importante debido a que reduce tanto la corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ) así como la potencia máxima producida por la celda. Idealmente la resistencia en serie debe de tener un valor muy pequeño ( $R_s = 0$ ).

- Una resistencia en paralelo ( $R_{sh}$ ), que representa la pérdida por fugas de corriente o por recombinación de los pares electrón-hueco. Idealmente, esta resistencia debe de tener un valor muy grande ( $R_{sh} = \infty$ ).

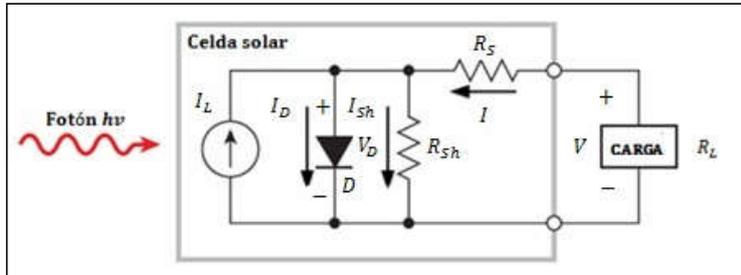


Figura 14: Modelo de una celda solar. [19]

Si se conecta una resistencia de carga ( $R_L$ ) a una celda solar iluminada, la corriente total  $I$  se encontrará dada por la siguiente relación:

$$I = I_D + I_{sh} - I_L \quad (0.1)$$

Donde:

$$I_D = I_s \left( e^{qV_D/nkT} - 1 \right) \quad (0.2)$$

En la ecuación (1.2),  $I_s$  representa la corriente de saturación,  $T$  es la temperatura en  $K$ ,  $k$  es la constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23} \frac{J}{^\circ C}$ ),  $n$  es el factor de idealidad del diodo y  $q$  es la carga del electrón ( $1.6 \times 10^{-18} C$ ).

La corriente de saturación se expresa como sigue:

$$I_s = Aqn_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) \quad (0.3)$$

Dónde:  $A$ , es el área de la unión p-n,  $n_i$  es la concentración de portadores intrínsecos,  $D_p$  es una constante denominada *constante de difusión* o *difusividad de huecos*,  $D_n$  es la constante de *difusividad de electrones*.  $N_D$  es la concentración de átomos donantes,  $N_A$  es la concentración de la impureza aceptante,  $L_p$  se denomina longitud de difusión de huecos en el semiconductor tipo n y el término  $L_n$  le corresponde a la longitud de difusión de electrones en la región p.

El voltaje  $V_D$ , se halla por medio de la ley de voltajes de Kirchhoff y la ley de Ohm como sigue:

$$V_D = V - IR_s \quad (0.4)$$

La corriente  $I_{sh}$ , se halla mediante la ley de Ohm y la ecuación (0.4), con lo que resulta lo siguiente:

$$I_{sh} = \frac{V_D}{R_{sh}} = \frac{V - IR_s}{R_{sh}} \quad (0.5)$$

Finalmente, sustituyendo las ecuaciones (0.2) y (0.5) en la ecuación (0.1), se obtiene:

$$I = I_s \left( e^{q(V-IR_s)/nkT} - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} - I_L \quad (0.6)$$

La característica de corriente-voltaje (I-V) de una celda solar típica se muestra en la Figura 15. En ella se ilustran algunos de los parámetros de las celdas solares: la corriente de corto circuito ( $I_{SC}$ ), el voltaje de circuito abierto ( $V_{OC}$ ), el voltaje a la máxima potencia ( $V_{MP}$ ), la corriente a la máxima potencia ( $I_{MP}$ ) y el punto de máxima potencia ( $P_{MP}$ ).

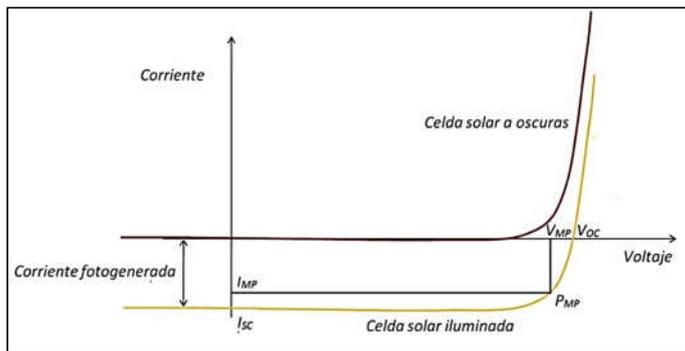


Figura 15: Característica I-V de una celda solar. [20]

Cuando la celda se encuentra en la oscuridad la curva característica I-V es similar a la de un diodo estándar y cuando se encuentra iluminada y se le aplican pequeños voltajes, la corriente del diodo es despreciable, por lo que la corriente que circula, es únicamente la corriente fotogenerada ( $I_L$ ). Esta corriente representa la corriente de corto circuito, como se muestra a continuación:

$$I = I_{SC} = -I_L \quad (0.7)$$

Cuando el voltaje aplicado hace que la corriente del diodo sea significativa, la corriente aumenta rápidamente en la celda solar. A circuito abierto ( $I=0$  en la ecuación 1.6), toda la corriente generada por la luz,  $I_L$ , fluye a través del diodo, por lo que el voltaje a circuito abierto se puede escribir como:

$$V_{OC} = n \frac{kT}{q} \left( \ln \frac{I_L - \frac{V}{R_{sh}}}{I_s} + 1 \right)$$

Si se consideran despreciables los efectos de la resistencia en paralelo  $R_{sh}$  [20] la expresión anterior queda expresada como:

$$V_{OC} \approx n \frac{kT}{q} \left( \ln \frac{I_L}{I_s} + 1 \right) \quad (0.8)$$

Como se observa en la ecuación (0.9), el voltaje de circuito abierto, es aproximadamente proporcional al logaritmo del cociente de la corriente de corto circuito y la corriente de saturación  $I_s$ , por lo que al reducirse la corriente de saturación  $I_s$ , se incrementará el voltaje de circuito abierto, pero un aumento en la corriente de saturación  $I_s$ , provocará una disminución en el  $V_{oc}$ .

De particular interés resulta el punto de la curva I-V en la que la energía producida está en un máximo. Esto se conoce como el punto de potencia máxima y define un rectángulo cuya área, está dada por  $P_{MP} = V_{MP} I_{MP}$ . El rectángulo definido por  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$  proporciona un medio conveniente para caracterizar el punto de potencia máxima.

El factor de llenado ( $FF$ ), es la relación de la potencia máxima ( $P_{MP}$ ) que puede ser entregada por la celda con respecto al producto de su  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$  y es siempre menor que uno; su ecuación está dada por:

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (0.9)$$

Podría decirse que el parámetro más importante para una celda solar es su eficiencia de conversión de energía  $\eta$ , la cual está definida como:

$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{in}} = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{P_{in}} \quad (0.10)$$

La potencia incidente  $P_{in}$ , está determinada por las propiedades de la luz incidente sobre la celda solar, y puede representarse por la siguiente relación:

$$P_{in} = \text{Área de la celda} \times \text{Irradiancia} \quad (0.11)$$

Así, la eficiencia también puede ser vista como:

$$\eta = \frac{P_{MP}}{\text{Área de la celda} \times \text{Irradiancia}} = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{\text{Área de la celda} \times \text{Irradiancia}} \quad (0.12)$$

Una celda solar eficiente debe tener alta corriente de corto circuito,  $I_{SC}$ , un alto voltaje de circuito abierto,  $V_{OC}$ , y un factor de llenado ( $FF$ ), lo más cercano posible a 1.

El diseño y operación de una celda solar eficiente tiene dos objetivos básicos:

- 1) Minimización de la tasa de recombinación a través del dispositivo.
- 2) Maximización de la absorción de fotones con  $E > E_G$ .

Los pares electrón-hueco son creados dentro de la celda solar como un resultado de la absorción de fotones que inciden sobre la celda solar. El objetivo es recoger los portadores minoritarios antes de que se pierdan por recombinación.

### 2.3.1 Efectos de la temperatura en la eficiencia de las celdas solares

La estadística de Maxwell-Boltzmann suministra la siguiente relación para calcular la concentración de portadores intrínsecos un material semiconductor intrínseco:

$$n_i = A_0 T^{3/2} e^{-E_G q / 2kT} \quad (0.13)$$

Dónde:  $E_G$  es la energía de la banda prohibida del semiconductor (1.5 eV para el CdTe),  $A_0$  es una constante dependiente del material, y  $q$  es la carga del electrón ( $1.6 \times 10^{-18}$  C).

La ecuación (0.14) expresa que si la temperatura  $T$  aumenta, la concentración intrínseca de portadores ( $n_i$ ) en el material semiconductor también lo hace, provocando un aumento en la corriente de saturación  $I_s$  (ecuación 0.3), lo que produce una disminución en el voltaje de circuito abierto,  $V_{OC}$  como puede observarse en la ecuación (0.9). La concentración intrínseca ( $n_i$ ) es muy sensible a la temperatura. La corriente de saturación contiene otros términos dependientes de la temperatura pero la dependencia de la temperatura de la concentración de portadores intrínsecos domina (ecuación 0.3).

La energía de la banda prohibida disminuye conforme aumenta la temperatura y tiene como consecuencia un desacople de la misma con el espectro solar. Su dependencia con temperatura esta modelada por:

$$E_G(T) = E_G(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (0.14)$$

Dónde:  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes específicas para cada semiconductor.

Un efecto importante de la temperatura en la eficiencia de las celdas solares de CdTe, es que el contacto posterior de estas celdas forma un diodo con polaridad opuesta a la unión principal que limita el rendimiento, por lo que la adición de Cobre (Cu) reduce la altura de la barrera posterior y mejora el desempeño de la curva I-V. Sin embargo a altas temperaturas, el Cu se pierde de la barrera posterior vía difusión a través del CdTe incrementando la altura de tal barrera, lo que provoca que se reduzca el factor de llenado (FF), y por consiguiente la eficiencia.

## 2.4 El proceso de Light Soaking

El desempeño de los dispositivos fotovoltaicos bajo iluminación prolongada, es una etapa de caracterización esencial para cualquier tecnología fotovoltaica (a-Si, CIS/CIGS, CdTe por ejemplo), ya que su exposición a la luz, puede producir una variedad de efectos que influyen en la determinación tanto del rendimiento inicial del dispositivo como en su estabilidad a largo plazo.

Casi todas las tecnologías fotovoltaicas (a-Si, CdTe, CIS/CIGS, entre otras) muestran cambios su desempeño bajo iluminación prolongada ("*Light Soaking*"), aunque la magnitud de estos cambios es mayor para un tipo de tecnología que para otra. Éstos cambios tienen la propiedad de ser metaestables, es decir tienen la propiedad de exhibir durante un considerable espacio de tiempo, un estado de equilibrio débilmente estable y en el que cualquier perturbación podría volverlo inestable o llevarlo a un estado de estabilidad mínima. Dichos cambios podrían ser o no reversibles ocasionando que el rendimiento del dispositivo fotovoltaico alterne entre diferentes estados dependiendo del historial de la iluminación, la polarización eléctrica y la temperatura.

En general, el proceso de "*Light Soaking*" es un requisito para el pre-condicionamiento de las celdas antes de realizar mediciones de eficiencia.

Las mediciones del desempeño del dispositivo pueden variar en base al procedimiento de pre-acondicionamiento utilizado para la celda solar o el módulo fotovoltaico. Un pre-acondicionamiento apropiado lleva a una precisa determinación de la potencia máxima generada por la celda solar, por lo que resulta importante definir una metodología para el pre-acondicionamiento de las celdas solares y módulos fotovoltaicos.

Sin embargo, la complejidad de los fenómenos y la variabilidad entre los diferentes métodos de fabricación de los dispositivos fotovoltaicos, hacen difícil establecer una técnica universal de pre-acondicionamiento.

Las características deseables que deben poseer los equipos que realicen el tratamiento "*Light Soaking*" son las siguientes:

- Deben de tener integrado las mediciones de Corriente-Voltaje (I-V) para la aplicación de una carga/polarización a los dispositivos bajo prueba.

- Estos equipos deben tener un control de temperatura, que incluya no sólo las temperaturas típicas de operación, sino también las temperaturas altas y bajas que pueden acelerar o retardar los mecanismos de degradación.

## CAPÍTULO 3

### Diseño del sistema de control de iluminación y temperatura

#### 3.1 Propuestas para el diseño de un controlador de iluminación y temperatura

Para conseguir que las variables manejadas durante el proceso de *Light Soaking* se mantengan en los niveles deseables se propone la creación de un sistema de control.

Un sistema de control es un conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados deseados. Existen dos clases comunes de sistemas de control, sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado. En los sistemas de control de lazo abierto la salida se genera dependiendo de la entrada; mientras que en los sistemas de lazo cerrado la salida depende de las consideraciones y correcciones realizadas por la retroalimentación.

Ya que la temperatura y la iluminación no será siempre la misma durante el proceso de *Light Soaking*, se propone la creación de un sistema de lazo cerrado. Los sistemas de control en lazo cerrado son aquellos en los que existe una realimentación de la señal de salida o, dicho de otra forma, aquellos en los que la señal de salida tiene efecto sobre la acción de control. La señal de salida, además de ser la propia salida, es utilizada como una de las entradas del sistema, ya que le aporta información útil.

##### 3.1.1 Propuesta de diseño de un controlador de lazo cerrado

Un sistema de control de lazo cerrado compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (el valor deseado), determina la desviación y produce una señal de control que reducirá la desviación a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se denomina "acción de control". La figura 16 representa un diagrama de bloques de un sistema de control.

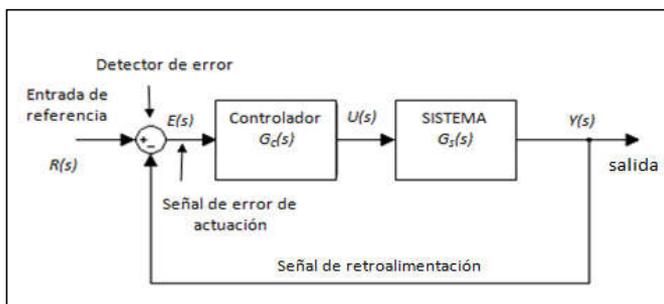


Figura 16: Sistema de control de lazo cerrado [21]

El controlador propuesto para el sistema térmico de ésta tesis es un controlador PI. Una vez elegido el controlador, la tarea siguiente es determinar los valores de los parámetros del controlador. Estos parámetros son típicamente coeficientes de una o más funciones de transferencia que componen al controlador. Una consideración importante del diseño de un controlador, es que se debe de escoger el controlador más simple que cumpla con todas las especificaciones.

### 3.1.1.1 El controlador PI

La acción de control de un controlador Proporcional-Integral (PI) en tiempo continuo se define mediante:

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (0.15)$$

Donde  $k_p$  es la ganancia proporcional y  $T_i$  se denomina tiempo integral. La ganancia  $k_i$  resulta de la siguiente igualdad:

$$k_i = \frac{k_p}{T_i} \quad (0.16)$$

La función de transferencia del controlador PI en tiempo continuo es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (0.17)$$

El control proporcional de un sistema sin un integrador originará un error en estado estacionario frente una entrada, aunque tal offset se elimina si se incluye la acción de control integral en el controlador.

## 3.2 Necesidades de diseño

Ya que se conocen las condiciones deseables que deben tener los equipos que realicen el proceso de *Light Soaking* se propone este proyecto de tesis, este consiste en el diseño e instrumentación de una tarjeta electrónica de control que sea capaz de manipular dichas variables (temperatura e iluminación) para conseguir establecerlas bajo parámetros previamente establecidos.

Para conseguir esto, además de la tarjeta electrónica de control se propone la creación de una interface gráfica que permita al investigador establecer los parámetros bajo los cuales ha de desarrollarse el proceso de *Light Soaking*, esta interface además debe mostrar las mediciones de voltaje y corriente entregadas por

la celda solar durante el proceso y que son necesarias para determinar la eficiencia de la celda.

### **3.3 Diseño del sistema de control de iluminación y temperatura**

Para cumplir con los requerimientos de diseño del sistema, este proyecto ha dividido en dos grandes etapas: una etapa de software que consiste en la creación de una interface gráfica programada en Visual Basic a través de la cual el investigador puede introducir los parámetros bajo los cuales quiere que se realice el proceso de *Light Soaking*, además, esta interface le brinda al usuario la visualización de las medidas de voltaje, corriente que entrega la celda solar durante el proceso y la temperatura en el horno mientras se realiza el proceso.

La segunda etapa del proyecto consiste en la creación de un prototipo de tarjeta de control electrónico que convierte las especificaciones enviadas por el usuario a través de la interface gráfica a señales electrónicas que controlan las variables propias del proceso. A continuación se da una descripción detallada de estas dos etapas.

#### **3.3.1 Etapa de hardware**

Dada la complejidad del prototipo de tarjeta de control electrónico, la etapa de hardware se ha dividido en otras tres sub etapas, cada una con una función específica. Primero nos enfocaremos en la comunicación entre la PC y la tarjeta de control, en la segunda sub etapa nos enfocaremos en el establecimiento de la temperatura en el horno y finalmente se explicará cómo funciona la adquisición de las mediciones de voltaje y corriente en la celda durante el proceso de *Light Soaking*.

##### **3.3.1.1 Comunicación PC – Tarjeta de control**

La primera etapa del proyecto es la comunicación USB entre la computadora de trabajo y la tarjeta de control. En la computadora se ejecuta la interface gráfica programada en Visual Basic en la cual se establecen los parámetros a los cuales será sometido el proceso y se envían los datos vía USB a la tarjeta; además de establecer los parámetros del proceso, la interface gráfica permitirá el monitoreo del proceso y entregará resultados en tiempo real sobre la eficiencia de la celda durante el proceso, esta información también es recibida vía USB.

La información enviada por la computadora llega a la tarjeta a través de MM232R que es un micro módulo de desarrollo cuya función es la conversión de la interface USB que llega de la computadora a una interface UART que es la utilizada por el microcontrolador y viceversa, finalmente, una vez que se ha hecho la conversión de interfaces la información pasa al microcontrolador PIC18F4550 que puede

considerarse una etapa de acoplamiento entre la PC y la tarjeta de control. Las instrucciones enviadas por el usuario a través de la interface gráfica llegan al microcontrolador, éste se encarga de convertir y enviar las instrucciones a todos los periféricos contenidos en la tarjeta de control (que son dispositivos electrónicos con funciones específicas descritas más adelante) que son los encargados del manejo del proceso de *Light Soaking*.

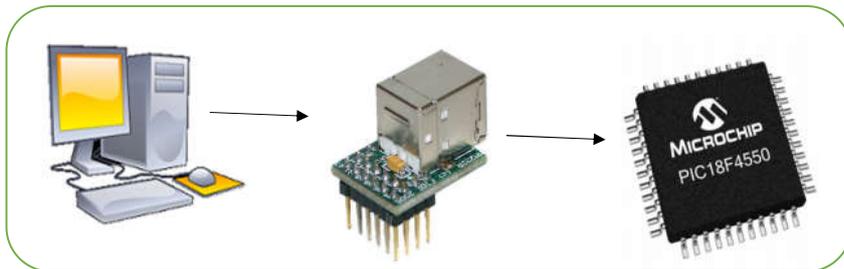


Figura 17: Diagrama a bloques de la etapa de comunicación PC – Tarjeta de control

### 3.3.1.1.1 El PIC18F4550

Los microcontroladores PIC existen en gamas de 8-bits, 16-bits y 32-bits. Dentro de la gama más simple de 8-bits se encuentra el microcontrolador PIC18F4550, el cual pertenece a la familia PIC18 MCU. Sus características de memoria de programa, memoria RAM, número de entradas-salidas, número de canales analógicos y tipo de puertos de comunicación, han hecho de este PIC uno de los más utilizados para diversas aplicaciones.

En la figura 18 se presenta una descripción de los conectores del PIC18f4550:

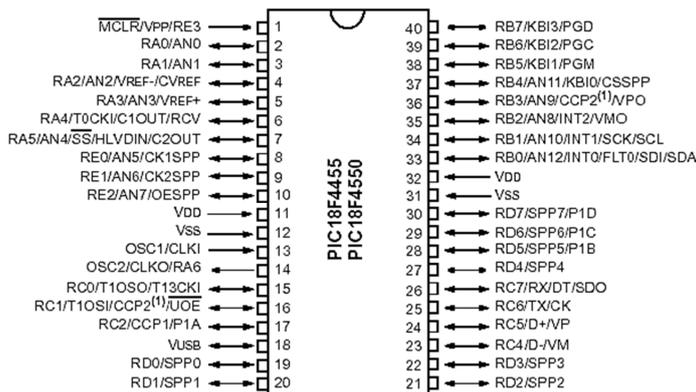


Figura 18: Diagrama de conectores del PIC18F4550 [22]

La elección del microcontrolador para el sistema propuesto se eligió concretamente por su número de canales analógicos, por el manejo de protocolo I2C, el protocolo RS232, su número de salidas y entradas digitales y por su bajo consumo energético, además de que ofrece la ventaja de poder ser programado en lenguaje C lo que facilita la programación, adicionalmente a su bajo costo y alta gama de posibilidades,

### 3.3.1.1.2 El MM232R

El MM232R es un micro módulo de conversión de interface USB a UART (comunicación serial). Este dispositivo es el encargado de la conversión de protocolos USB a RS232 (compatible con el PIC). Algunas de aplicaciones típicas de este dispositivo son:

- Conversión de USB a RS232, RS422 y RS485
- Como interface de diseños MCU, PLD, FPGA basados en USB
- Transferencia de datos de audio de video de bajo ancho de banda.
- Transferencia de datos de PDA a USB
- Instrumentaciones USB

El MM232R también brinda una salida de reloj interna de 6MHz, 12MHz, 24MHz o 48MHz que puede ser utilizada para operar un microcontrolador o una lógica externa. En la Figura 19 se muestra una descripción de los conectores del dispositivo.

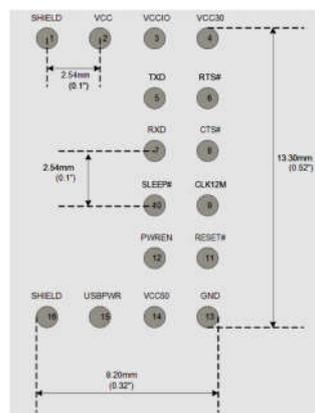


Figura 19: Conectores del MM232R [23]

De entre todas las posibles aplicaciones del MM232R se ha utilizado la de conversor de protocolo USB a RS232 por lo que solo se utilizan los conectores 2 (alimentación), 5 (transmisor), 7 (receptor) y el 16 (tierra). Los conectores 5 y 7 son conectados a los conectores 44 y 1 del PIC18F4550 respectivamente.

### 3.3.1.2 Establecimiento de la temperatura del horno

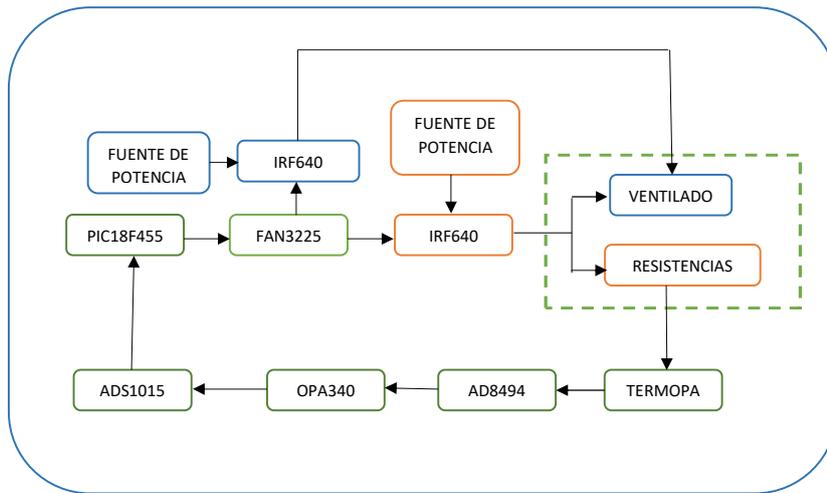


Figura 20: Diagrama a bloques del calentamiento del horno

Una vez que se han sido recibidos los parámetros bajo los cuales se desarrollará el proceso de *Light Soaking* desde la PC, el microcontrolador envía una señal de activación al FAN3225 que es un driver para mosfets de canal N. El FAN3225, a través de una de sus 2 salidas, se encarga de conmutación del IRF640 que se encuentra configurado en conmutación inferior con una fuente de potencia; este arreglo entre el FAN3225 y el IRF640 es el que se encarga de la energización de las resistencias que calientan el horno a la temperatura deseada.

Se ha colocado un termopar como retroalimentación del sistema de lazo cerrado. El termopar envía la señal de retro al microcontrolador para que, una vez que se ha llegado a la temperatura deseada, cese el ciclo de conmutación del IRF640 y se detenga la energización de las resistencias. La salida del termopar pasa por el AD8494 que es un amplificador de pequeña señal para termopares tipo J o tipo K; la función del AD8494 es entonces la amplificación de la señal eléctrica entregada por el termopar.

Una vez que la señal pasa por el AD8494 la señal pasa a un OPA340 que es un amplificador de acoplo entre el AD8494 y el ADS1015. El ADS1015 es un convertidor analógico – digital se encarga de la conversión de la señal analógica recibida del

OPA340 a una señal digital (de salida serial) que ingresa al PIC para el control de la temperatura. La señal analógica entre por el conector 5 del ADS1015.

Una vez que se han sido recibidos los parámetros bajo los cuales se desarrollará el proceso de *Light Soaking* desde la PC, el microcontrolador envía una señal de activación al FAN3225 que es un driver para mosfets de canal N. El Fan3225, a través de una de sus 2 salidas, se encarga de conmutación del IRF640 que se encuentra configurado en conmutación inferior con la fuente de potencia; este arreglo entre el FAN3225 y el IRF640 es el que se encarga de la energización de las resistencias que calientan el horno a la temperatura deseada.

Se ha colocado un termopar como retroalimentación del sistema de lazo cerrado. El termopar envía la señal de retro al microcontrolador para que, una vez que se ha llegado a la temperatura deseada, cese el ciclo de conmutación del IRF640 y se detenga la energización de las resistencias. La salida del termopar pasa por el AD8494 que es un amplificador de pequeña señal para termopares tipo J o tipo K; la función del AD8494 es entonces la amplificación de la señal eléctrica entregada por el termopar.

Una vez que la señal pasa por el AD98494 la señal pasa a un OPA340 que es un amplificador de acoplo entre el AD8494 y el AD1015. El ADS1015 es un convertidor analógico – digital se encarga de la conversión de la señal analógica recibida del OPA340 a una señal digital (de salida serial) que ingresa al PIC para el control de la temperatura. La señal analógica entre por el conector 5 del ADS1015.

Si la temperatura actual del horno es mayor a la establecida por el usuario a través de la interface gráfica, el PIC envía una señal de activación al FAN3225 para que, por medio de la segunda salida que posee, conmute otro IRF640 configurado en conmutación superior con una fuente de potencia y active un ventilador acoplado al horno.

Una vez que se ha establecido la temperatura deseada (monitoreada constantemente por el termopar tipo J instalado en el horno y cuya descripción de funcionamiento se dio anteriormente) el PIC desactiva la salida de FAN 3225 que controla la activación del motor deteniendo así el enfriado del sistema.

Como se observa en el diagrama anterior todo este proceso sigue una configuración de sistema de control de lazo cerrado permitiendo así incrementar la precisión con la que se calienta o enfría la celda.

### **3.3.1.2.1 El IRF640**

El IRF640 es un transistor MOSFET de potencia de canal N de tercera generación que está diseñado para conmutación de alta frecuencia, gracias a su encapsulado (TO-220AB) tiene una disipación de energía de hasta 50W, además puede drenar hasta 10A de corriente continua y tiene una temperatura máxima de funcionamiento de 150°C. En la Figura 21 se da una descripción de conectores del IRF640.

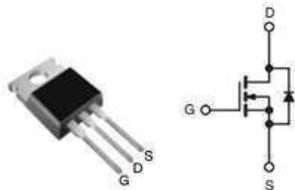


Figura 21: Diagrama de conectores del IRF640 [24]

Para la etapa de calentamiento del horno, el IRF640 es utilizado para conmutar la fuente de potencia que energizará las resistencias encargadas de calentar el horno hasta la temperatura deseada, una vez llegada a esta temperatura, otro IRF640 es el encargado de conmutar una segunda fuente de potencia que enciende un ventilador utilizado para disminuir la temperatura en el horno. Este transistor fue elegido por su bajo costo y su alta corriente de drenado, además de que al ser diseñado para conmutar a alta frecuencia trabaja en los rangos de frecuencia a los que trabaja el PIC18F4550, que es el encargado de suministrar la señal de control a través del FAN3225.

### 3.3.1.2.2 El FAN3225

El FAN3225 es un driver de conmutación para transistores de potencia tipo N (como el IRF640) de salida dual que provee pulsos de corriente que además es compatible con entradas TTL o CMOS, tiene un rango de voltaje de fuente que va de los 4.5V a los 18 V lo que lo hace ideal para circuitos de bajo consumo. En la Figura 22 se muestra el diagrama de conectores del FAN3225:

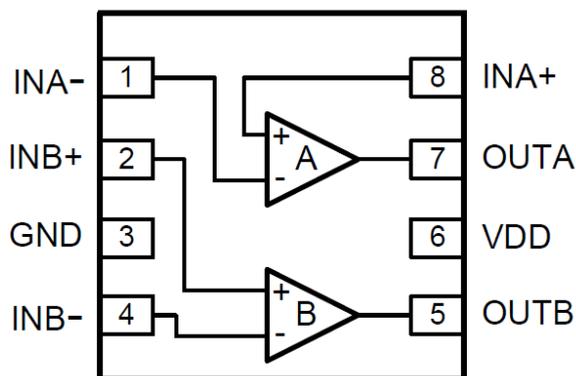


Figura 22: Diagrama de conectores del FAN3225 [25]

El FAN3225 es un dispositivo intermedio entre el PIC18F4550 y el IRF640, su función es, en esencia, la de aumentar el pulso de control de 5V enviado por el

microcontrolador (que es una salida TTL) a un pulso de 12V que es el que requiere el MOSFET para conmutar; al ser un dispositivo de salida dual puede ser utilizado para conmutar dos transistores: uno que energizará las resistencias de calentamiento en el horno, y otro que se encargará de energizar un ventilador cuya función es la de enfriar el horno en caso de que se desee disminuir la temperatura.

### 3.3.1.2.3 El termopar tipo J

Un 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. Las aleaciones de termopar están comúnmente disponibles como alambre.

Los termopares están disponibles en diferentes combinaciones de metales o calibraciones para adaptarse a diferentes aplicaciones. Los tres más comunes son las calibraciones tipo J, K y T. Cada calibración tiene un rango de temperatura y un entorno de trabajo diferente. Aunque la calibración del termopar dicta la gama de temperaturas, el alcance máximo también está limitado por el diámetro del cable del termopar. Es decir, puede ser que un termopar muy delgado no logre alcanzar el rango de temperatura deseado.

El termopar tipo J (hierro/constantán) es un termopar común de uso general con un rango de temperatura de aproximadamente  $-40$  a  $+750$  °C y una sensibilidad de  $55 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .



Figura 23: Termopar tipo J <sup>[26]</sup>

### 3.3.1.2.4 El AD8494

El AD8494 es un amplificador operacional de fácil uso para termopares tipo J y K. Este amplificador convierte la pequeña señal de voltaje generada por un termopar en una señal de voltaje que puede ser leída fácilmente por un conversor analógico – digital o un microcontrolador. La ganancia de salida del termopar al amplificador es de aproximadamente  $5\text{mV}/^\circ\text{C}$ .

EL AD8494 contiene la alta precisión de un amplificador de instrumentación, además, el voltaje correspondiente a 0°C puede ser ajustado aplicando un voltaje en el conector de referencia. En la Figura 24 se muestra un diagrama de conectores de este dispositivo:

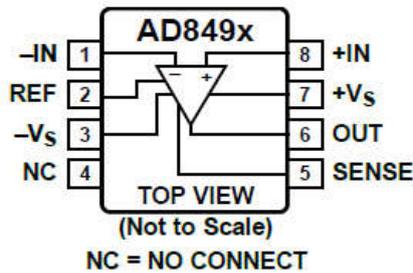


Figura 24: Diagrama de conectores del AD8494 [27]

### 3.3.1.2.5 EI OPA340

EL OPA340 es un amplificador operacional cuya principal característica es que no necesita de una fuente dual para operar, es decir, no necesita dos voltajes (positivo y negativo) para amplificar, además, ofrece un ancho de banda de 5.5MHZ y una alta velocidad lo que lo hace ideal para su uso en conversores analógico – digital. En la Figura 25 se muestra el diagrama de conectores:

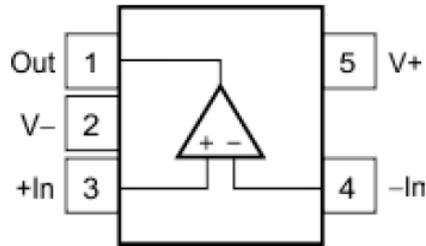


Figura 25: Diagrama de conectores del OPA340 (encapsulado SOT-23) [28]

La señal entregada por el termopar pasa a través del OPA340 que está configurado como amplificador seguidor de tensión ya que solo se utiliza para acoplar impedancias entre el AD8494 y el ADS1015.

### 3.3.1.2.6 El ADS1015

El ADS1015 es un conversor analógico – digital de precisión con 12 bits de resolución de salida serial presentado en un encapsulado ultra pequeño (MSOP-10). Este dispositivo tiene una transferencia de datos compatible con interfaces seriales I2C además de trabajar con una fuente única de 2.2V a 5.5V. Puede realizar conversiones a 3300 muestras por segundo además de ofrecer un rango de entrada de +/- 256mV por lo que ofrece conversiones de alta precisión de una baja señal.

Una de las principales ventajas que ofrece el ADS1015 es que contiene 4 direcciones esclavas seleccionables, por lo que es muy útil para aplicaciones en las que es necesario hacer múltiples conversiones. Para esta etapa del proyecto el ADS1015 es utilizado para convertir la señal de voltaje entregada por el termopar tipo J a una señal digital que será procesada por el microcontrolador para llevar a cabo el control de la temperatura en el horno.

En la Figura 26 se muestra el diagrama de conectores del dispositivo:

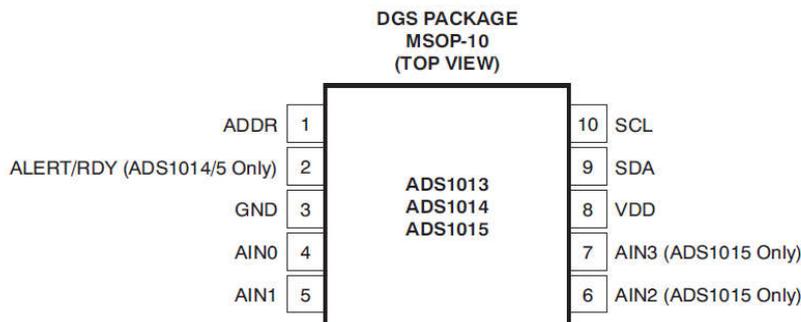


Figura 26: Diagrama de conectores del ADS1015 [29]

### 3.3.1.3 Establecimiento de la iluminación en el horno

Una vez que se ha recibido la información referente a la intensidad luminosa procedente de la PC en el microcontrolador, es activado un PWM cuya salida es enviada a la base de un transistor 2N2222 que funciona como amplificador de corriente para activación de la bobina de un relevador. Este relevador conmuta una fuente de potencia con las lámparas encargadas de suministrar luz en el proceso de *Light Soaking*. La intensidad luminosa entregada por las lámparas es proporcional al ciclo de trabajo del PWM, entre mayor sea el ciclo de trabajo mayor será la intensidad luminosa de las lámparas.

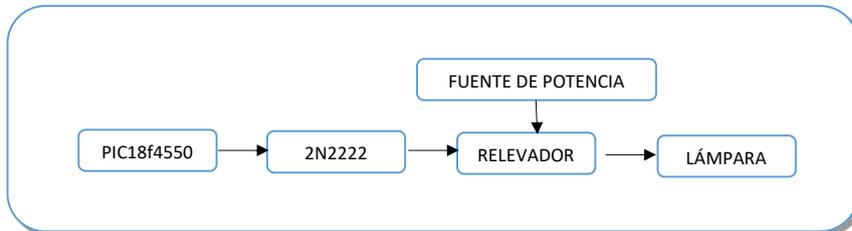


Figura 27: Diagrama a bloques de la etapa de control de iluminación.

### 3.3.1.3.1 El transistor 2N2222

El 2N2222, también identificado como PN2222, es un transistor bipolar NPN de baja potencia de uso general. Sirve tanto para aplicaciones de amplificación como de conmutación. Puede amplificar pequeñas corrientes a tensiones pequeñas o medias; por lo tanto, sólo puede tratar potencias bajas. Puede trabajar a frecuencias medianamente altas.

Las hojas de especificaciones señalan como valores máximos garantizados 500 mA, 50V de tensión de colector, y hasta 500 mV de potencia. La frecuencia de transición es de 250 a 300 MHz, lo que permite utilizarlo en aplicaciones de radio de alta frecuencia (hasta 300 MHz). La beta (factor de amplificación, hFe) del transistor es de por lo menos 100; valores de 150 son típicos. En la Figura 28 se muestra el diagrama de conectores del transistor:

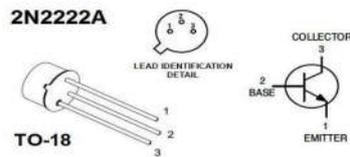


Figura 28: Diagrama de conectores del transistor 2N2222 [30]

### 3.3.1.3.2 Relevadores

Para este proyecto se utilizó un relevador de 5V de DC cuya señal de conmutación viene del transistor 2N2222 y cuya salida conmuta la lámpara con una toma de 120V que actúa como fuente de potencia para encender a lámpara. La señal de conmutación es una señal de PWM que emite el PIC18F4550 y con la cual se controla la intensidad luminosa. En la Figura 29 se muestra un diagrama de conectores de dicho relevador.

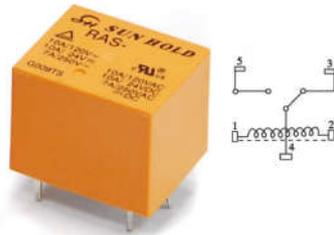


Figura 29: Diagrama de conectores de un relevador de 5V [31]

### 3.3.1.4 Adquisición de datos de la celda solar

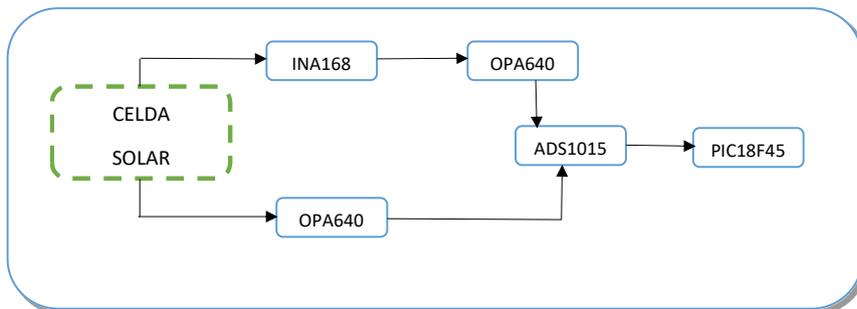


Figura 30: Diagrama de bloques de la adquisición de datos de la celda solar

Una de las etapas más importante de todo el proceso es la medición de la diferencia de potencial y la corriente que entrega la celda durante el proceso de *Light Soaking*. Dentro del horno se ha configurado un arreglo mecánico que permite la instalación de dos terminales de contacto en la celda que permiten la medición de dichos parámetros.

Para la medición de la diferencia de potencial entregada por la celda, la señal captada por las terminales de contacto instaladas en la celda pasa por un OPA340 que amplifica dicha señal y cuya salida va a una de las entradas analógicas del ADS1015 (conector 6) para su conversión de señal analógica a digital;

posteriormente, ya convertida, la señal es enviada al PIC18f4550 para que pueda ser enviada vía USB a la computadora de trabajo.

Para la medición de la corriente en la celda, la señal de corriente captada por las terminales de contacto instaladas en la celda pasa por una resistencia *shunt* de valor conocido y posteriormente pasa al INA168 que convierte la corriente proveniente de la celda a un voltaje proporcional; esta señal pasa a un OPA640 configurado como amplificador no inversor que sirve como acoplo entre el INA168 y una de las entradas analógicas del ADS1015 (conector 4) en donde se convierte en una señal digital que finalmente es enviada al PIC para que sea enviada a la PC de trabajo.

#### 3.3.1.4.1 El INA168

El INA168 es un monitor de corriente de derivación de zona alta unipolar. Provee un amplio rango de voltaje de entrada, una baja corriente de reposo y su diminuto empaquetado facilitan su uso en diversas aplicaciones. El modo común de entrada y la fuente de voltaje son independientes lo que le permite operar desde los 2.7V hasta los 60V, la corriente de reposo es solo de 25uA lo que permite conectar la fuente de voltaje a ambos lados de la derivación de la corriente de medición con errores mínimos.

El dispositivo convierte un voltaje de entrada diferencial en una salida de corriente, este voltaje se convierte nuevamente en una tensión con una resistencia de carga externa que establece una ganancia de 1 a más de 100. Para este proyecto se utiliza en INA168 como un convertidor de corriente (que proporciona la celda solar) a una señal de voltaje proporcional que después es enviada al ADS1015 para su conversión a una señal digital y pueda ser procesada por el PIC18F4550.

En la Figura 31 se muestra el diagrama de conectores del dispositivo.

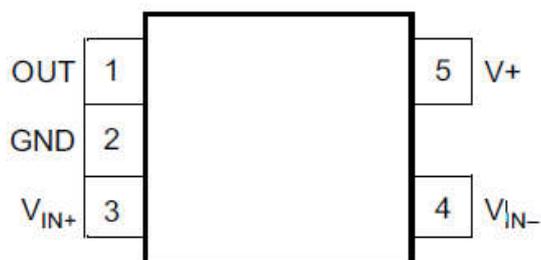


Figura 31: Diagrama de conectores del INA168. [32]

### **3.4 Etapa de software**

La etapa de software engloba la interface gráfica (necesaria para el ingreso de parámetros bajo los cuales se ha de desarrollar el proceso de *Light Soaking*) y el programa del microcontrolador PIC18F4550.

#### **3.4.1 La interface gráfica**

La interface gráfica es un programa desarrollado en Visual Studio 2010 y ha sido desarrollado con la finalidad de que el usuario pueda ingresar los parámetros requeridos para el proceso de "*Light Soaking*" con el horno y la tarjeta de control creados para este proyecto.

La interface gráfica consta de tres ventanas principales, la primera de ellas, o ventana de inicio, es la primera que se muestra cuando se ejecuta el programa y muestra dos opciones, la primera de ella le permite al usuario probar individualmente cada una de las etapas del proceso individualmente y la segunda le permite ingresar los parámetros bajo los cuales se desarrollará el proceso.

La segunda ventana, denominada "Prueba del sistema" muestra cada una de las etapas del proceso para su prueba individual, si bien la mayoría de las funciones de cada una de las ventanas están programadas en el código que el usuario "no ve", lo que se muestra en la ventana ha sido creado para que sea intuitivo para el usuario, maximizando así la interacción hombre - máquina.

La tercer ventana del programa llamada "Ingreso de parámetros" le permite al usuario proveer a la tarjeta de control de la información necesaria para que se pueda desarrollar el proceso, el código dentro de esta ventana está programado "a prueba de errores" colocando trabas para que el proceso no pueda ser iniciado a no ser que se hayan ingresado todos los parámetros requeridos para el proceso.

Como medida de seguridad se ha incluido un botón para detener el proceso en caso de que se produzca algún accidente y se ha incluido también una etiqueta de monitoreo de proceso que le indica al usuario si el proceso ha iniciado o no, permitiéndole así evitar que cometa algún error al revisar el horno y se produzca algún accidente.

#### **3.4.2 El programa del microcontrolador**

Una vez que se han establecido las bases sobre las cuales se ha de desarrollar el proyecto se optó por crear una tarjeta de control que permitiera hacer la conversión de los parámetros fijados por el usuario a través de la interface gráfica a un conjunto de señales eléctricas manipulables que controlen las variables fijadas. Si bien la función de la tarjeta ha sido descrita anteriormente es importante señalar que el componente más importante de la tarjeta es el PIC18F4550.

El microcontrolador se encuentra programado con una serie de instrucciones precisas en lenguaje C que le permiten al PIC el manejo de señales analógicas y digitales además del control de los periféricos encargados de la recepción de las señales enviadas por la celda solar y por la interface gráfica.

### **3.5 Integración del sistema Hardware/ Software**

La unión de la interface gráfica, el programa del microcontrolador y la tarjeta electrónica de control conforman el sistema de control de temperatura e iluminación para el proceso de fabricación de celdas solares.

En el capítulo 4 se presentan los resultados al sistema, obtenidos durante las pruebas y se muestran las evidencias recabadas, enfatizando que dichas pruebas se realizaron en un modelo preliminar para probar la etapa *Light Soaking*.

## CAPÍTULO 4

### Pruebas del sistema de control de iluminación y temperatura para el proceso de fabricación de celdas solares

#### 4.1 Construcción del sistema de control

El sistema de control de iluminación y temperatura manipula las variables establecidas previamente en el capítulo tres a través de una tarjeta electrónica de control que permite las pruebas del proceso de *Light Soaking* dentro de un horno convencional (de uso doméstico) modificado para dichos fines; a continuación se describe el proceso de construcción de dichos elementos.

##### 4.1.1 Tarjeta de control

La tarjeta de control fue diseñada en el programa tipo CAD Proteus versión 8.1. Este programa tiene una herramienta de diseño de circuitos eléctricos en la cual primero fue necesario elaborar el diagrama de conectores de todos los elementos que componen la tarjeta. En la Figura 32 se muestra dicho diagrama:

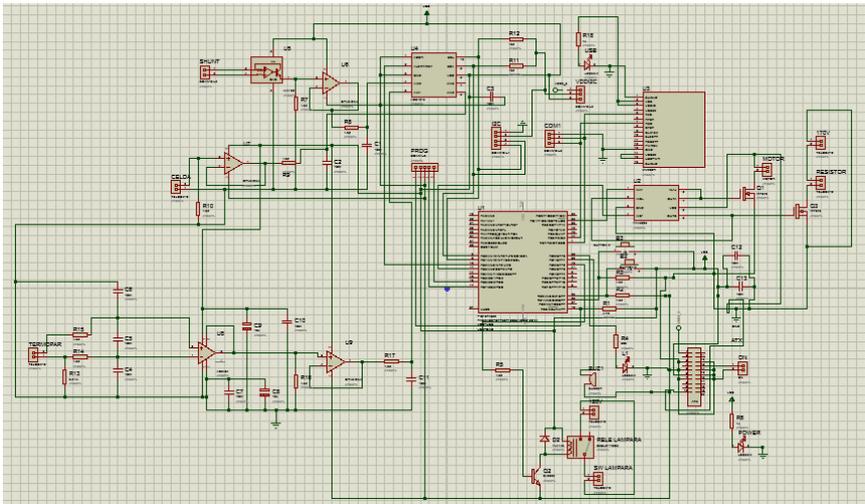


Figura 32: Diagrama conectores de la tarjeta de control

Una vez elaborado el diagrama conectores de la tarjeta se utilizó otra herramienta de diseño de PCB's de Proteus llamada ARES en la cual se colocan virtualmente todos los componentes de la tarjeta y se crea el PCB que ha de formar la tarjeta físicamente. EL programa brinda la opción de colocar de manera "manual" los componentes y las pistas o puede hacerse de manera "automática"; para este proyecto se utilizó la opción automática" de diseño ya que la complejidad de la tarjeta el haberlo hecho de manera "manual" habría propiciado errores en el diseño.

En la Figura 33 se muestra una imagen del diseño obtenido en ARES del PCB de la tarjeta:

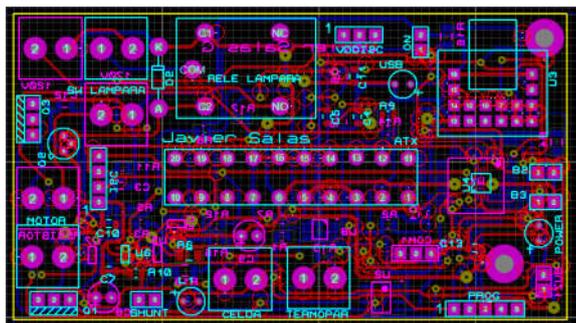


Figura 33: Diseño del PCB de la tarjeta de control

Una vez elaborado el diseño del PCB de la tarjeta se crea un archivo PDF que contiene el ATWORK del diseño, es decir, una impresión de las pistas y perforaciones que son necesarias para la creación de la tarjeta. Al ser un diseño de doble cara se crean dos archivos, uno del "top" de la tarjeta (es decir, las pistas y perforaciones del anverso de la tarjeta) y uno del "bottom" de la tarjeta (es decir, las pistas y perforaciones del reverso de la tarjeta). En las Figuras 34 y 34 se muestran los diagramas generados por el programa Proteus 8.1:

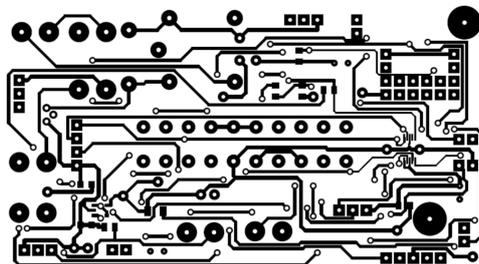


Figura 34: Pistas y perforaciones del anverso de la tarjeta de control

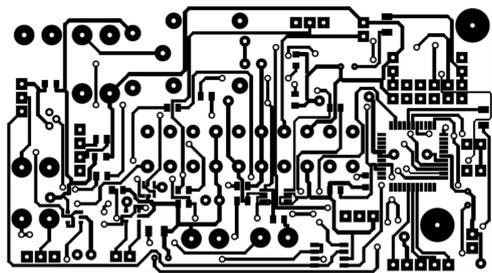


Figura 35: Pistas y perforaciones del reverso de la tarjeta de control

Finalmente se crea un archivo "Gerber" que es un archivo que contiene las coordenadas de los ejes "x", "y" y "z" que se utilizan para la elaboración de la tarjeta es una máquina de CNC. Este último archivo es de creación opcional ya que si la tarjeta no se elabora en una máquina de CNC no es necesario, sin embargo, se optó por no elaborar la tarjeta de control a mano fue necesario la creación de dicho archivo.

Ya que se tenían los archivos PDF de las pistas y perforaciones, y el archivo gerber del diseño de la tarjeta se utilizó una empresa externa que elaboró el PCB de la tarjeta, se tomó esta decisión ya que, al utilizar componentes de montaje superficial para reducir el tamaño y el costo de la tarjeta, era complicada la sincronización de las impresiones "top" y "botton" en el planchado necesario en la elaboración de la tarjeta.

La tarjeta prototipo final consiste entonces una baquelita doble cara de 9cm X 5cm con acabado verde. Cabe mencionar que además de los componentes descritos en el capítulo tres de este trabajo de tesis se agregó un conector para fuente ATX de 24 conectores que se utiliza para alimentar toda la tarjeta de control, además de algunos conectores tipo "block" en los cuales se conectan las señales de entrada provenientes de la celda solar, el termopar, el ventilador, la lámpara y una toma de 125V. Además se agregó una serie de espadines para la conexión de un programador para el PIC.



Figura 36: Acabado final del anverso de la tarjeta de control



Figura 37: Acabado final del reverso de la tarjeta de control

Una vez que se elaboró el PCB de la tarjeta se procedió a colocar los componentes, la tarjeta con los componentes ya colocados se muestra en la siguiente imagen, donde se puede observar la distribución de los componentes más importantes:

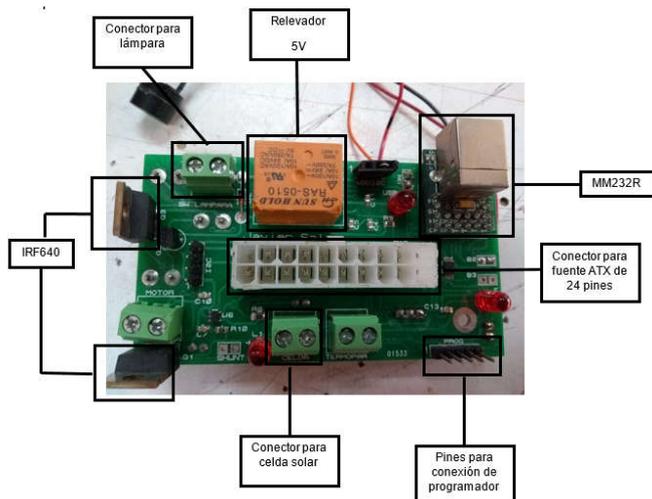


Figura 38: Anverso de la tarjeta de control con componentes. Parte 1.

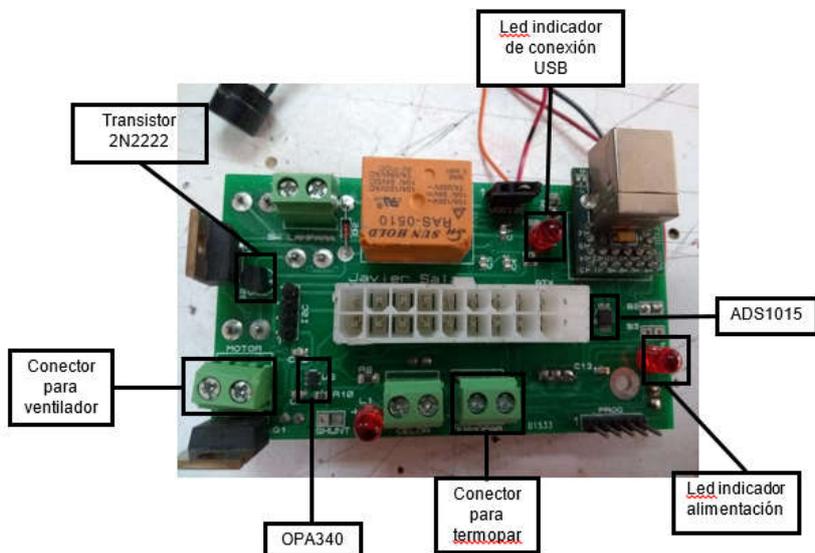


Figura 39: Anverso de la tarjeta de control con componentes. Parte 2

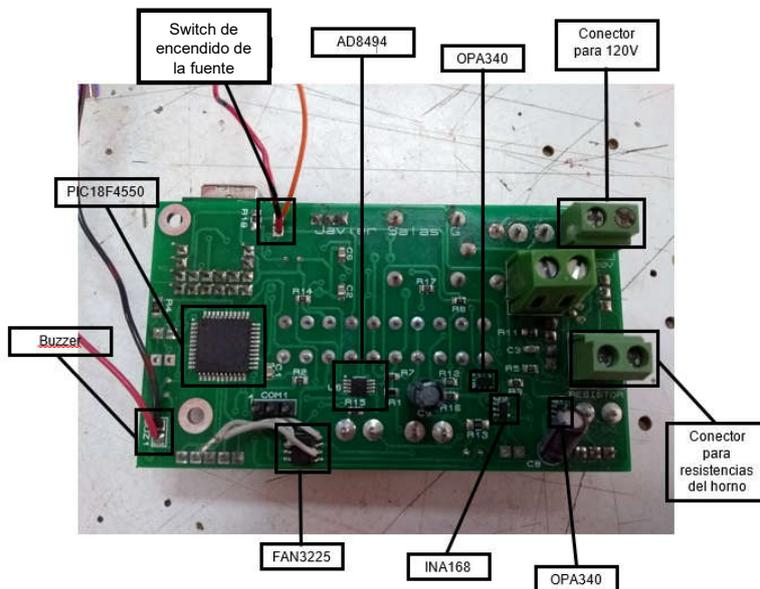


Figura 40: Reverso de la tarjeta de control con componentes.

Los componentes que aparecen en las imágenes y que no son mencionados son elementos pasivos como resistencias y capacitores, además de un diodo zener que se observa en las Figuras 39 y 40 que pertenece al arreglo electrónico utilizado para la activación del relevador.

La serie de espadines macho que se observan en la figura 40 denominados “COM1” son conectores utilizados durante pruebas de conexión USB, el conector 1 es el conector de tierra, el conector 2 es para la revisión de transmisión de datos y el conector 3 es para la revisión de recepción de datos, además, el led denominado L1 que se observa en las Figuras 39 y 40 parpadea cada vez que hay comunicación entre la tarjeta y la PC.

Además, en el diseño de la tarjeta se incluye la conexión de un switch de encendido de la fuente de poder ya que, al ser una fuente ATX es necesario que se realice un puente entre los conectores para que a fuente encienda. Este switch funciona como interruptor de encendido y apagado de todo el sistema, ya que, los componentes como el ventilador, la resistencia y el PWM que enciende la lámpara están alimentados a través de la tarjeta, si este switch está abierto, ningún componente esta energizado.

#### 4.1.2 Horno

Una vez elaborada la tarjeta el siguiente paso de este proyecto fue la adaptación de un modelo preliminar de horno (horno eléctrico convencional) dentro del cual se realizaron las pruebas en el proceso de *Light Soaking*. El primer paso fue desmontar la circuitería propia del horno, solo se conservaron las resistencias ya que estas son las que se utilizan para el calentamiento.

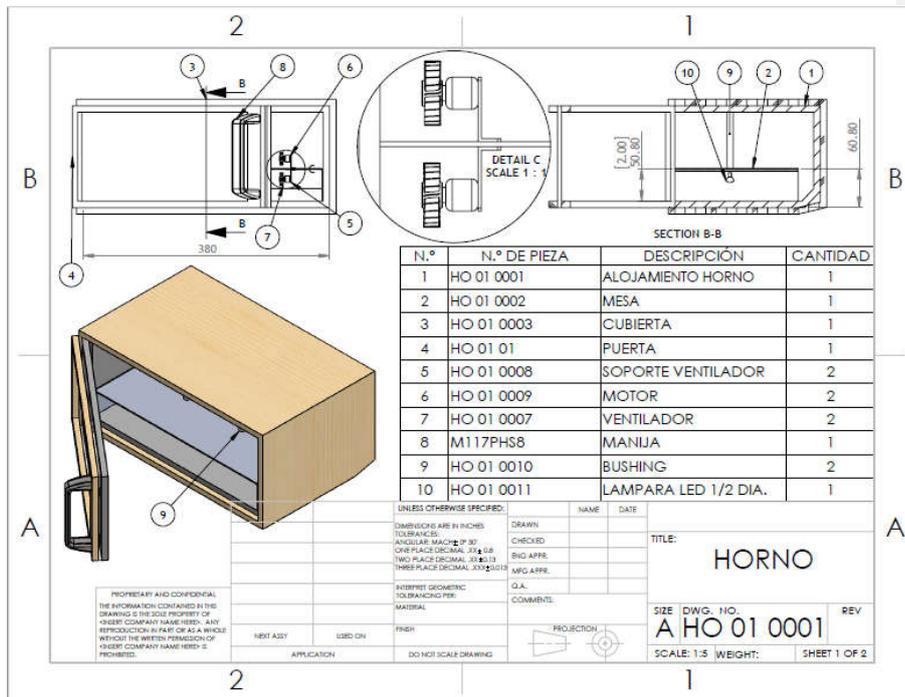


Figura 41: Diagrama del prototipo del horno

A continuación se describe cada una de las partes del horno prototipo y su función:

1) Alojamiento del horno: el espacio en el cual se lleva a cabo el proceso de *Light Soaking*, tiene las dimensiones de 13.8cm de altura, 20cm de ancho y 20cm de largo.

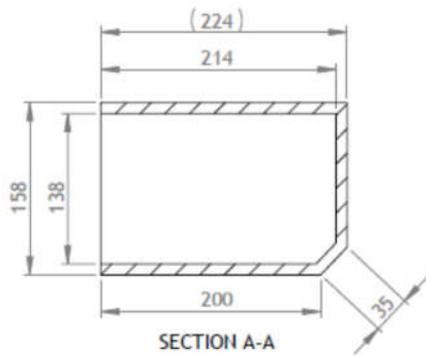


Figura 42: Vista frontal del alojamiento del horno.

2) Mesa: Es la base sobre la cual se coloca la celda solar y se encuentra dentro del alojamiento del horno. Se usó un material transparente para la luz incida por debajo. Este soporte se encuentra a 6.8cm de la base del alojamiento.

3) Cubierta: Es el recubrimiento metálico del horno, se encuentra sobre la protección térmica interior del horno y tiene un grosor de 2cm, ésta cubierta determina las dimensiones exteriores del horno las cuales son de 15.8cm de alto, 22.4cm de ancho y 22.4cm de largo.

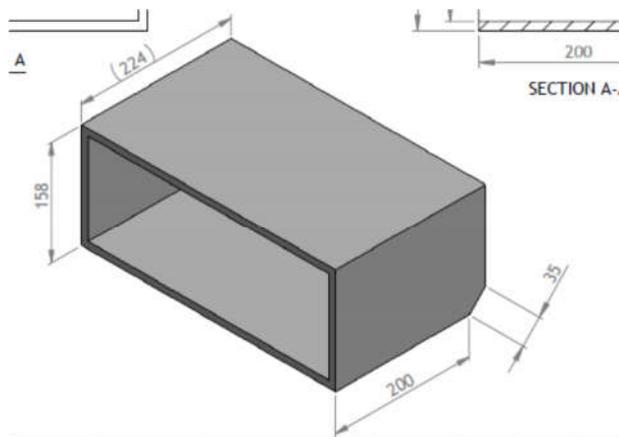


Figura 43: Diagrama de la cubierta del horno

4) Puerta: Es el elemento que permite abrir y cerrar el horno. Es un elemento con marco metálico y centro de cristal, sin embargo, para que la luz exterior que pudiera entrar por el centro de cristal transparente no afecte el proceso de *Light Soaking* se optó por cubrir dicho cristal con pintura de aerosol negra.

5) Soporte de ventilador: Es la base sobre la cual se colocarán los ventiladores de enfriamiento. Esta base está colocada dentro del espacio en el cual se encontraba la circuitería original del horno.

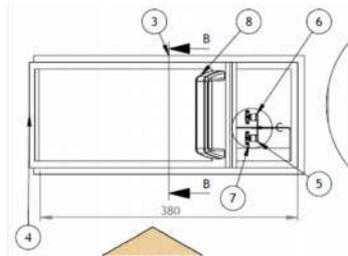


Figura 44: Adaptación de la base del ventilador

6) Motor: Consiste en la máquina eléctrica que mueve las aspas del ventilador. Para el sistema se considera la colocación de 2 pequeños motores eléctricos de 12V de DC que se montan sobre la base del ventilador.

7) Ventilador: Son las aspas que direccionaran el aire caliente contenido dentro del alojamiento (producto del calentamiento de las resistencias) hacia el exterior del horno. Es un juego de dos aspas que fueron acopladas a los motores de DC.

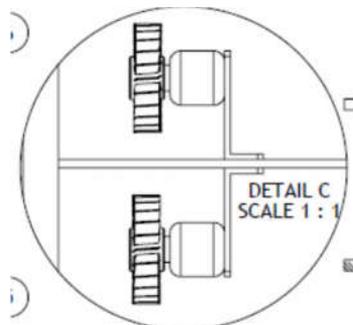


Figura 45: Diagrama del montaje de los motores y las aspas sobre la base del ventilador.

8) Manija: Es un montaje plástico que sobre el marco de la puerta y que permite sujetarla para abrir y cerrar el horno.

9) Cojinete (bushing): Es el cojinete que mantiene cerrada la puerta. En el interior del marco metálico de la puerta se encuentran dos ganchos que se acoplan a los cojinetes y que mantienen cerrada la puerta del horno.

10) Lámpara led: Es la lámpara que se utiliza para la iluminación durante el proceso de *Light Soaking*. Se encuentra montada en la base del alojamiento del

horno, justo debajo del soporte de la celda solar y con el emisor de luz hacia arriba, en línea de vista con el soporte de la celda.

Cabe mencionar que las paredes del alojamiento del horno tienen una protección térmica que separa el interior del horno de la circuitería. Para acoplar los elementos añadidos (ventiladores, puntas para la medición de los parámetros de la celda, cables de alimentación de la lámpara) fue necesario perforar el alojamiento del horno.

Las mediciones de voltaje y corriente de la celda se efectuaron a través de dos puntas conectadas a las terminales de la celda y que se colocaron por encima de la base y se ajustaron con un presador de resorte, esto asegura el contacto de las terminales con la celda y evita que la misma se mueva durante el proceso.

Además de los elementos anteriormente mencionados, al exterior de la cubierta del horno se adaptó una base para colocar la tarjeta electrónica de control. Finalmente, cabe mencionar que el equipo elaborado para este proyecto cuenta con una fuente ATX de 600 W. Se escogió este tipo de fuente ya que al contar con diferentes voltajes permite alimentar los diversos componentes de la tarjeta electrónica de control, además, alimenta los motores de 12V de los ventiladores. Cabe mencionar que la lámpara led se alimenta con una toma de 120V que contiene la tarjeta.

#### **4.2 Pruebas del sistema**

Una vez terminado el montaje de los componentes en la tarjeta, la primera prueba que se realizó fue la prueba de conexión. Antes de probar la conexión de la tarjeta con la PC de control, se utilizó un emulador de terminal serial – USB llamado Hyper Terminal. Este programa permite, entre otras cosas, establecimiento de los parámetros necesarios para realizar una conexión USB y visualizar el estado de la conexión en todo momento, además permite detener la comunicación en cualquier momento para hacer ajustes al programa del PIC o de la interface gráfica.

En la Figura 46 se puede observar la tarjeta electrónica de control prototipo conectada a la fuente de poder ATXP y a la PC de control. Se observa también que los leds indicadores de conexión USB y de poder están encendidos, sin embargo el led L1 (que indica la comunicación entre la tarjeta y la PC) no parpadea ya que aún no se configura la conexión del puerto USB.

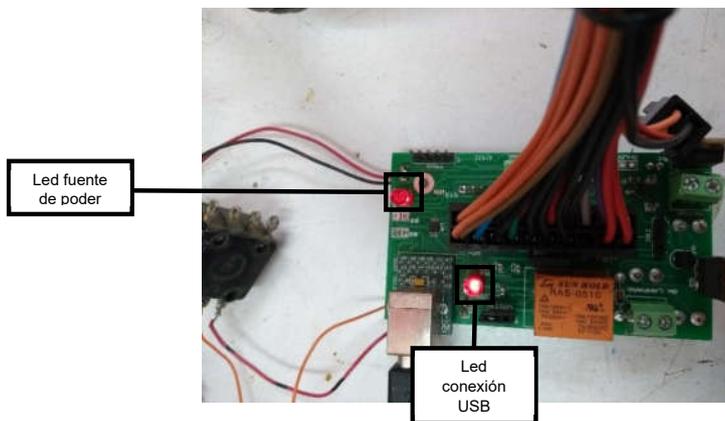


Figura 46: Tarjeta electrónica de control conectada.

Para configurar la conexión en el programa Hyper Terminal es necesario que esté conectada y encendida la tarjeta de control, una vez hecho esto, el programa inicia pidiendo un nombre para la conexión, y, ya que se le asigna un nombre a la conexión es necesario seleccionar el puerto con el que se trabajará. Después de seleccionar el puerto de trabajo, hay que configurar los bits por segundo, el número de bits de datos que se envían y reciben, la paridad, los bits de parada y el control de flujo.

Para la configuración de la prueba de conexión se trabajó con una velocidad de 9600 baudios, 8 bits de datos, un bit de parada y sin control de paridad y flujo. Cabe mencionar que, si bien estos valores pueden ser cambiados en las pruebas de conexión con el programa Hyper Terminal, estos son valores fijos ya programados en la interface gráfica para simplificar el procedimiento de conexión con la tarjeta, por lo que, la única variable modificable por el usuario dentro de la interface gráfica es el de la selección de puerto.

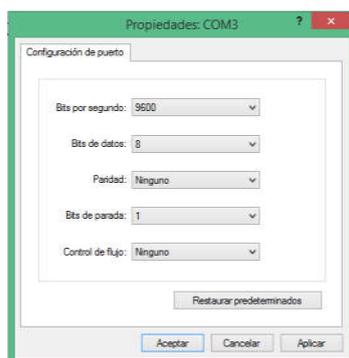


Figura 47: Configuración del puerto COM3 USB en Hyper Terminal

A través de Hyper Terminal es posible no solo probar la conexión de la tarjeta, sino también controlar el encendido y apagado de algunos de los elementos del proceso de *Light Soaking*, como el beep del buzzer (el cual suena cuando se ha logrado una conexión exitosa de la tarjeta), el encendido del ventilador o la activación del relevador que cierra y abre el circuito de alimentación de la lámpara; para conseguir esto es necesario enviar el valor de la variable *comn* para el directamente al PIC, es decir, si se desea encender el beep del buzzer por ejemplo es necesario escribir, dentro de la interface de Hyper Terminal *B1* y para apagarlo *B0*. Dentro de interface gráfica esto se hace a través que botones que tienen programados los valores necesarios para activación o apagado de todos los elementos del proceso.

El proceso de conexión de la tarjeta es más simple con la interface gráfica ya que, para que esto suceda solo es necesario presionar el botón para que el programa busque los puertos disponibles, seleccionar el puerto deseado y presionar otro botón para que la conexión se realice.

En la Figura 48 se puede observar este proceso, ya se ha presionado el botón "Determinar conexión" para que el programa busque los puertos disponibles, en la imagen, el programa espere que se seleccione el puerto de trabajo para después, presionando el botón "Conectar" el programa realice la conexión. Una vez hecho esto el boto "Conectar" camia a ""Desconectar" para que se pueda interrumpir la conexión de una forma segura.

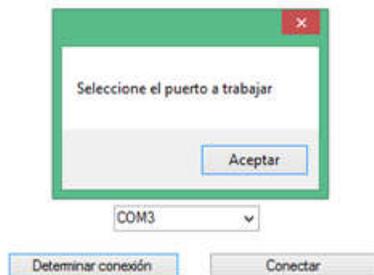


Figura 48: Selección del puerto de trabajo con la interface gráfica.

### 4.3 Resultados

Ya elaboradas las pruebas de conexión de la tarjeta se reportan los siguientes resultados del funcionamiento de la interface gráfica y el desarrollo de las funciones que fueron desarrolladas en ella. A continuación se muestran y cada una de las ventanas de las que consta el programa y se describen detalladamente cada una de ellas y sus partes, su función y los posibles mensajes de error que despliega el programa para ayudar al usuario al operar adecuadamente la interface gráfica.

### Ventana de inicio:

Esta es la ventana de bienvenida, en ella el usuario puede elegir entre hacer una prueba general del sistema o puede empezar el proceso.



Figura 49: Ventana de inicio, interface gráfica.

#### 1) Etiqueta “Prueba del sistema”:

Al pulsar sobre la etiqueta se despliega una ventana en la que el usuario puede iniciar individualmente cada una de las partes del proceso.

#### 2) Etiqueta “Inicio de proceso”:

Al pulsar sobre esta etiqueta se despliega una ventana en la que se pueden ingresar los parámetros bajo los cuales funcionará el proceso, además se hace la conexión USB entre la tarjeta y la computadora en la cual se está trabajando.

#### 3) Botón “Salir”:

Al pulsar sobre este botón se despliega un mensaje de confirmación para salir del programa.

#### Mensaje de despedida:

Cada vez que el usuario pulsa el botón “Salir” se despliega esta ventana. Esta ventana es la misma para las diferentes ventanas que contienen el mensaje salir.

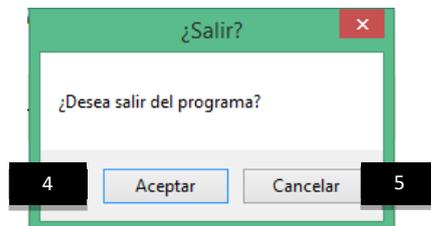


Figura 50: Ventana de salida

**4) Botón “Aceptar”:**

Al pulsar sobre este botón el usuario confirma que desea salir del programa. Se cierra el mensaje de despedida, la ventana activa y finaliza el programa.

**5) Botón “Cancelar”:**

Al pulsar sobre este botón el usuario confirma que desea permanecer en el programa. Cierra la ventana del mensaje y permanece en la ventana actual.

**Ventana de prueba de sistema:**

Esta ventana se despliega al pulsar sobre la etiqueta “Prueba del sistema” en la ventana principal. En esta ventana el usuario puede encender o apagar individualmente cada una de las etapas del proceso para verificar su correcto funcionamiento, además, se incluyen dos botones que le brindan al usuario la posibilidad de salir del programa o regresar a la ventana principal.



Figura 51: Ventana de prueba del sistema

#### **6) Etiqueta “Encender lámpara”:**

Al pulsar sobre esta etiqueta el programa se encarga de verificar que el usuario haya seleccionado un valor de temperatura válido, en caso de ser así, se envía una señal a la tarjeta electrónica que controla el sistema para que se enciendan las lámparas colocadas en el horno y despliega un mensaje de confirmación; si no se ha seleccionado una temperatura válida se despliega una ventana en la que se solicita ingresar un valor válido.

#### **7) Barra de desplazamiento “Intensidad luminosa”:**

En esta barra se establece el porcentaje del ciclo de trabajo del PWM con el que se controla la intensidad luminosa de la lámpara de alógeno. Va de 1 a 99 y es necesario tener un valor dentro de este rango para que la lámpara pueda encender.

#### **8) Etiqueta “Calentar horno”:**

Al pulsar sobre esta etiqueta el programa envía una señal a la tarjeta electrónica encargada de controlar el sistema para que encienda las resistencias colocadas al interior del horno y que serán las encargadas de calentar la celda, además despliega una ventana de confirmación.

#### **9) Etiqueta “Encender ventilador”:**

Al pulsar sobre esta etiqueta el programa envía una señal a la tarjeta de control del proceso para que encienda el ventilador encargado de enfriar el horno. Una vez que se ha encendido el ventilador se despliega un mensaje de confirmación.

#### **10) Etiqueta “Abrir Ventilas”:**

Cuando el usuario pulsa sobre esta etiqueta el programa envía una señal a la tarjeta de control del proceso para que se abran las ventilas que permiten la salida del aire caliente en el horno. Se despliega un mensaje de confirmación.

#### **11) Etiqueta “Cerrar Ventilas”:**

Cuando el usuario pulsa esta etiqueta el programa envía una señal a la tarjeta de control del proceso para que se cierren las ventilas que permiten la salida del aire caliente en el horno. Se despliega un mensaje de confirmación.

#### **12) Etiqueta “Prueba de conexión”:**

Al pulsar esta etiqueta el programa busca si la tarjeta de control está conectada a la computadora en la que se está trabajando, de ser así, muestra los puertos disponibles en la caja inferior, y realiza la conexión. En caso de que el programa no detecte conexión se despliega un mensaje de error.

**13) Etiqueta “Enviar dato”:**

Al pulsar esta etiqueta el programa genera un dato aleatorio que después es enviado vía USB a la tarjeta.

**14) Etiqueta “Leer dato”:**

Al pulsar esta etiqueta el programa revisa los datos enviados por la tarjeta al usuario.

**15) Botón “Regresar”:**

Al pulsar este botón se cierra la ventana actual y se despliega la ventana de inicio.

**Mensaje de error “Falta intensidad luminosa”:**

Este mensaje se despliega al pulsar la etiqueta “Encender lámpara” sin haber fijado un parámetro de intensidad luminosa válido previamente a través de la barra de desplazamiento “Intensidad luminosa”. Para cerrar el mensaje hay que pulsar en “Aceptar”; al pulsar, se mantiene en ejecución la ventana actual.

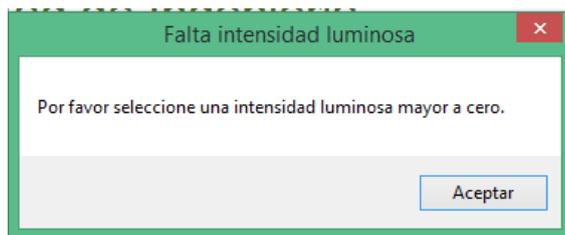


Figura 52: Ventana de error “Falta intensidad luminosa”

**Mensaje “Prueba de iluminación”:**

Este mensaje se despliega al pulsar la etiqueta “Encender lámparas” y una vez que se ha seleccionado una intensidad luminosa válida a través de la barra de desplazamiento “Intensidad luminosa”. Al pulsar en “Aceptar” las lámparas se apagan y se mantiene en ejecución la ventana actual.

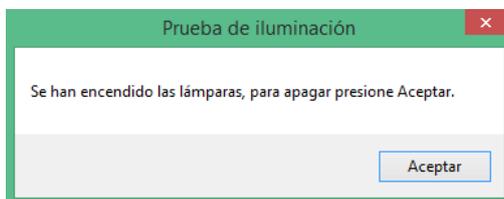


Figura 53: Ventana de prueba de iluminación.

### Mensaje “Prueba de calentamiento”:

Este mensaje se despliega cuando el usuario ha pulsado la etiqueta calentar horno. Cuando se pulsa el botón “Aceptar” las resistencias encargadas del calentamiento “se apagan” y se cierra el mensaje; la ventana actual sigue en ejecución.

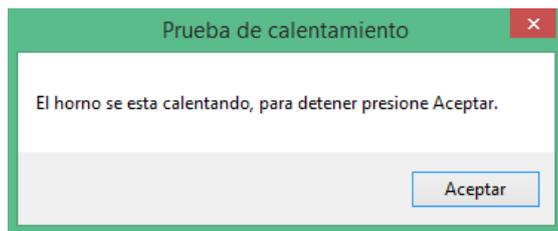


Figura 54: Ventana de prueba de calentamiento

### Mensaje “Prueba de sistema de enfriado”:

Este mensaje de confirmación se muestra cuando se ha pulsado la etiqueta “Encender ventilador”. Al pulsar en “Aceptar” se cierra el mensaje y los ventiladores se apagan; la ventana actual sigue en ejecución.

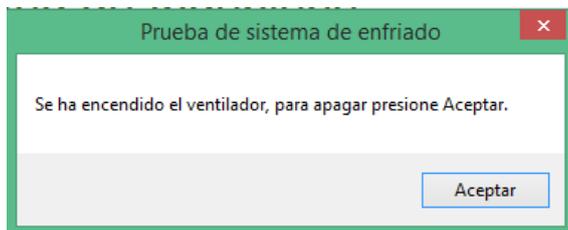


Figura 55: Ventana de prueba de sistema de enfriamiento

### Mensaje de error de conexión:

Este mensaje se despliega al pulsar la etiqueta “Prueba de conexión” y el programa no ha detectado la tarjeta de control. Para cerrar el mensaje se pulsa “Aceptar” y la ventana actual sigue en ejecución.

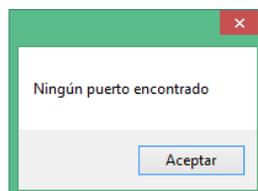


Figura 56: Mensaje de error “Ningún puerto encontrado”

### Mensaje “Prueba de envío de datos”:

Este mensaje se despliega cuando se pulsa la etiqueta “Enviar dato”; el número mostrado es el dato generado aleatoriamente, al pulsar “Aceptar” se cierra el mensaje y continúa en ejecución la ventana actual.

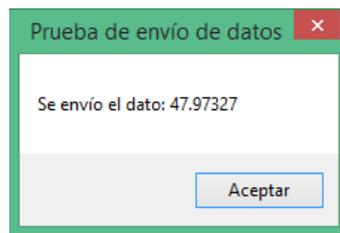


Figura 57: Mensaje “Prueba de envío de datos”

### Mensaje “Prueba de lectura de datos”:

Este mensaje se despliega al pulsar la etiqueta “Leer datos”; en este mensaje se muestra el estado del puerto de comunicación USB entre la tarjeta de control y el programa; al pulsar “Aceptar” se cierra el mensaje y continúa la ejecución de la ventana actual.

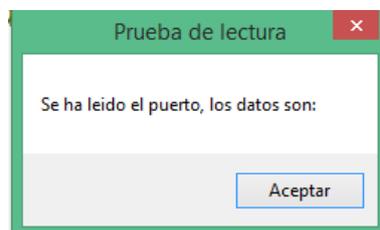


Figura 58: Mensaje “Prueba de lectura”

### Ventana de Inicio de Proceso:

Esta ventana se despliega al pulsar sobre la etiqueta “Inicio de Proceso” en la ventana de inicio. En esta ventana el usuario ingresa los parámetros requeridos para que el proceso pueda desarrollarse, además, se hace la conexión con la tarjeta de control y se tiene una etiqueta de monitoreo del proceso.

La ventana cuenta además de los botones necesarios para el ingreso de parámetros con dos botones, uno para regresar a la ventana de inicio y otro para salir del programa.



Figura 59: Ventana de inicio de proceso

**16) Botón “Empezar proceso”:**

Este botón es con que se da inicio al proceso de “*Light Soaking*” para el cual se ha diseñado este programa. Por default el botón se encuentra desactivado, para activarse es necesario que se haya establecido conexión con la tarjeta, si se pulsa este botón sin haber ingresado parámetros primero se envía un mensaje de error y, en caso de que se pulse el botón faltando aún por ingresar un parámetro se despliega un mensaje de error indicando el parámetro faltante.

**17) Botón “Detener proceso”:**

Con este botón se detiene el proceso pero no se interrumpe la conexión con la tarjeta, este botón no pausa el proceso, lo detiene permitiendo así el ingreso de nuevos parámetros.

**18) Caja de texto “Temperatura deseada”:**

En esta caja de texto el usuario puede fijar la temperatura a la que desea que sea calentado el horno durante el proceso. La temperatura debe estar dentro de un rango preestablecido (entre 1°C y 100°C) o de lo contrario, al presionar el botón “Empezar proceso” el programa generará un mensaje de error.

**19) Caja de texto “Intensidad luminosa deseada”:**

En esta caja de texto aparecerá el porcentaje de ciclo de trabajo del PWM encargado del encendido de las lámparas y que, además, es un equivalente de la intensidad a la que el usuario desea que sea irradiada la celda durante el proceso. En caso de que se presione el botón “Empezar proceso” y esta caja está en blanco el programa generará un mensaje de error.

**21) Barra de desplazamiento “Intensidad luminosa”:**

Esta barra de desplazamiento es utilizada por el usuario para fijar el porcentaje de ciclo de trabajo del PWM encargado del encendido de las lámparas y que, además, es un equivalente de la intensidad a la que el usuario desea que sea irradiada la celda durante el proceso.

**21) Caja de texto “Tiempo de proceso”:**

En esta caja de texto el usuario debe ingresar el tiempo que desea que dure el proceso en segundos, en caso de que este recuadro esté en blanco o el usuario haya ingresado “0” como valor de tiempo el programa generará un mensaje de error solicitando un tiempo válido.

**22) Botón “Determinar conexión”:**

Al pulsar este botón el programa se encarga de buscar si la tarjeta de control ha sido conectada al computador en el que se está trabajando, en caso de que así sea, generará un mensaje pidiendo que se seleccione un puerto y escribirá en el caja superior el nombre de los puertos disponibles para conexión, en caso de que no se haya encontrado conexión alguna el programa generará un mensaje de error indicando que no se han encontrado puertos disponibles.

**23) Botón “Conectar”:**

Este botón se encuentra deshabilitado a no ser que el programa haya detectado la tarjeta de control conectada, una vez que se ha pulsado éste botón el programa se encargará de establecer comunicación USB entre la tarjeta de control y la computadora para el envío de parámetros y la recepción de datos.

Una vez que se ha establecido la conexión, la etiqueta del botón cambiará a “Desconectar”. Cuando se pulsa el botón cuando la etiqueta es “Desconectar” el programa se encargará de finalizar correctamente la comunicación USB con la tarjeta pero no finalizará la ejecución del programa. La etiqueta del botón cambia nuevamente a “Conectar”.

**24) Etiqueta de estado del proceso:**

Esta etiqueta es una ayuda visual para el usuario que le indica si el proceso ha sido detenido o si está en ejecución. Si el proceso ha sido detenido la etiqueta presentará

un color rojo, en caso de que el proceso haya sido iniciado, el color de la etiqueta cambiará a verde y el letrero en el cambiará a: "Ha comenzado el proceso".

#### Mensaje de selección de puerto:

Este mensaje es desplegado cuando se ha pulsado el botón "Determinar conexión" y el programa ha reconocido que la tarjeta de control está conectada. En la imagen también se aprecia que el la superior a los botones ha aparecido el puerto que está disponible para establecer la conexión.

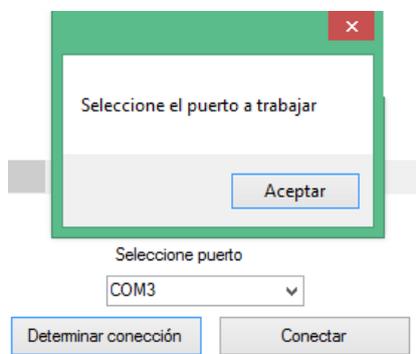


Figura 60: Mensaje de selección de puerto

#### Mensaje "Error de temperatura":

Este mensaje se muestra cuando se ha pulsado el botón "Empezar proceso" y se ha ingresado una temperatura que no está dentro del rango establecido. Al pulsar "Aceptar" se cierra el mensaje y el foco del cursor se posa dentro de la caja de texto "Temperatura deseada".



Figura 61: Mensaje de error "Error de temperatura"

#### Mensaje "Error de tiempo":

Este mensaje se muestra cuando se ha pulsado el botón "Empezar proceso" y se ha ingresado un tiempo menor o igual a cero o se ha dejado vacía la caja de texto

“Tiempo deseado”. Al pulsar “Aceptar” se cierra el mensaje y el foco del cursor se posa dentro de la caja de texto “Tiempo deseado.”

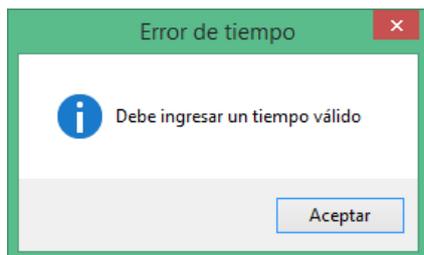


Figura 62: Mensaje de error “Error de tiempo”

**Mensaje “Error en intensidad luminosa”:**

Este mensaje se muestra cuando se ha pulsado el botón “Empezar proceso” y no se ha ingresado un valor para la intensidad luminosa mayor a cero con la barra de desplazamiento “Intensidad luminosa”. Al pulsar “Aceptar” se cierra el mensaje permitiendo al usuario que seleccione una intensidad luminosa válida.

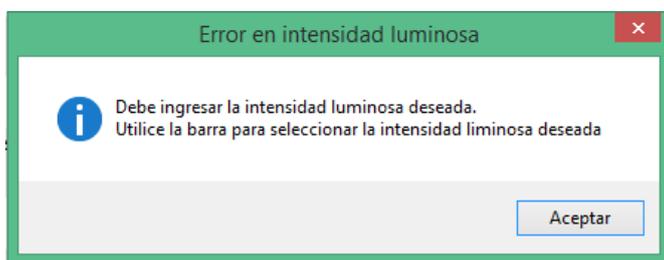


Figura 63: Mensaje de error “Error en intensidad luminosa”

En la Figura 64 se muestra el cambio en la etiqueta de estado del proceso una vez que se ha iniciado el proceso:



Figura 64: Ventana de inicio de proceso, en esta figura se muestra el cambio en la ventana una vez que ha iniciado el proceso.

Ya que la interface gráfica cumple con su objetivo, se revisó el funcionamiento del programa del microcontrolador, a continuación se hace una descripción de cada una de las partes del programa y un panorama general de la función de cada una de esas partes.

#### **Declaración de librerías:**

En un programa ANSI C para sistemas de microcontrol, existen 2 tipos de archivos .h: el archivo del microcontrolador particular que se esté utilizando y las librerías del programa. Ambos llevan la terminación ".h"

El archivo *header* del microcontrolador contiene las equivalencias que usa el compilador entre los nombres de los puertos, registros, bits y señales con su dirección física en el microcontrolador. Los archivos ".h" del programa también se conocen como "*librerías*" o "*bibliotecas*". Las que están siempre integradas se conocen como "*librerías estándar*". En este programa la declaración de librerías se hace de las líneas 1 a 6.

### **Definición de macros:**

Las macros son de alguna forma similares a las subrutinas ya que son conjuntos de instrucciones que se ejecutan de manera secuencial mediante una llamada a una orden de ejecución, sin embargo tiene diferencias muy significativas. Mientras que una subrutina aparece una sola vez en el código, cada vez que se "invoca" una macro se inserta el código de esta en el programa. Otra diferencia es que a una macro se le pueden especificar parámetros de entrada y a una subrutina no.

En el programa la definición de la macro debe aparecer antes de la línea en la que se llama la macro. Cuando mientras se ejecuta el programa se encuentra una macro esta es reemplazada por el conjunto de instrucciones que aparecen en la definición de la macro.

Para este programa las macros se declaran de la línea 7 a la línea 18 y se utilizan para las asignaciones de los puertos para el hardware del sistema (diodo led, buzzer relevador, ventilador) se definen entre otras cosas los conectores para trabajar y, por ejemplo, en la línea ocho, la velocidad del oscilador.

### **Declaración de subrutinas:**

Las subrutinas o funciones son porciones de código con una función específica que suelen utilizarse cuando una serie de instrucciones deben ser ejecutadas múltiples veces en un mismo programa, por lo que se programan una sola vez y cuando se requiere son "llamadas" las veces que sean necesarias para cumplir su función.

Las pueden o no devolver valores, así mismo, pueden o no necesitar valores de entrada, es decir, puede ser necesario que, para su ejecución sea necesario asignar valores a variables antes de poder llamar a la subrutina. Es complicado enumerar todas las subrutinas que contiene el programa, sin embargo a continuación se mencionan algunas de ellas.

- Línea 25: Esta función asigna valores iniciales a diferentes registros del PIC además de fijar los conectores RC6 y RC7 para uso de señales analógicas.
- Línea 35: Esta función recibe como único argumento la variable en la que debe almacenarse una entrada de usuario que va a ser considerada como una cadena de caracteres.
- Línea 40: La función anterior se encarga del llenado del vector *Output* con el valor que tiene la función *getch*.
- Línea 46: Esta subrutina se encarga de controlar el encendido y apagado de la adquisición de datos de la tarjeta.

- Línea 63: Esta subrutina es la encargada del control de un *Buzzer*. La activación del *buzzer* es controlada a través de una variable llamada *aux* y se maneja como un ciclo de encendido/apagado con un retardo de un milisegundo.
- Línea 74: En este bloque de código se declaran algunos mensajes como variables de tipo carácter y variables que serán utilizadas en la comunicación I2C de la tarjeta.

#### **Función principal:**

Una vez que se han declarado las bibliotecas, los macros y las subrutinas se da paso la función principal, dentro de la cual se ha de establecer el orden en que se se ejecutaran las instrucciones que permiten el manejo de las señales que entran y salen del PIC.

La función principal de cualquier programa en lenguaje C es la función *main*, dentro de la función principal *main* se hace la declaración de las variables principales que serán utilizadas durante la ejecución del programa, además se puede llamar a las subrutinas anteriormente declaradas, cambiar sus valores iniciales etcetera. En general, en la función *main* se le dice al PIC que debe hacer con la información que recibe; en este programa la función *main* es llamada en la línea 79 y todas las instrucciones siguientes pertenecen a lo que ha de ejecutarse en ella, terminando en la línea 323. A continuación se hace una descripción del funcionamiento del programa.

Dentro de programa principal se declara un vector de tipo carácter llamado "Comando recibido" de tamaño indefinido en el cual se van a guardar las instrucciones enviadas por el usuario a través de la interface gráfica; es decir, el valor que va a recibir el vector "comando recibido" será una variable de tipo carácter que será enviada por la interface gráfica a la tarjeta de control.

Para discernir la instrucción a ejecutar se declararon 6 variables de tipo carácter con el prefijo "comn" (con n de 1 a 6) de tal manera que com1 (con valor *L1*) enciende o apaga el led indicador de estado, com2 (con valor *R1*) enciende o apaga las resistencias encargadas del calentamiento del horno, com3 (con valor *B1*) enciende o apaga el beep del buzzer, com4 (con valor *ADC*) se encarga de la medición de parámetros eléctricos en la celda solar, com5 (con valor *La*) enciende o apaga la lámpara de alógeno y com6 (con valor *Ve*) enciende o apaga el ventilador.

El programa principal se encuentra anidado dentro de un bucle *while* que siempre es verdadero, dentro de este bucle se llama a la función "LeerComando" y cuyo argumento es el valor de "ComandoRecibido". Dentro de la función "LeerComando" se le asigna un valor entero a la variable *ret* que depende del resultado de la función

“strncmp” cuyo trabajo es de comparar la cadena de caracteres *comn* con la entregada por “ComandoRecibido”. A continuación se describen los posibles resultados de dicha comparación dependiendo de la variable *comn* (con *n* que va de 1 a 6)

- *com1*:
  - o Se comparan los 2 primeros caracteres de las cadenas *com1* (cuyo valor asignado es *L1*) con los de “ComandoRecibido”, si son iguales el valor de la variable *ret* es 0. Si el valor de *ret* es 0 se compara el valor de la posición 2 del vector “ComandoRecibido”, si es 1 se enciende el led de estado, si el valor es 0 el led se apaga. Lo anterior se hace con 2 instrucciones *if*.
- *com2*:
  - o Se comparan los 2 primeros caracteres de la cadena *com2* (cuyo valor asignado es *R1*) con los de “ComandoRecibido” Si son iguales el valor de la variable *ret* es 0. Si el valor de *ret* es 0 se analiza el valor de la posición 2 del vector “ComandoRecibido”, si el valor es 1 se activa el relevador que conmuta la fuente de potencia con las resistencias que calientan el horno energizando las mismas, si el valor es 0 se desactiva el relevador y las resistencias se apagan. Lo anterior se hace con 2 instrucciones *if*.
- *com3*:
  - o Se comparan los 2 primeros caracteres de la cadena *com3* (cuyo valor asignado es *B1*) con los de “ComandoRecibido” Si son iguales el valor de la variable *ret* es 0. Si el valor de *ret* es 0 se analiza el valor de la posición 2 del vector “ComandoRecibido” si el valor 1 se activa el beep del buzzer, si el valor es 0 el beep del buzzer se desactiva. Lo anterior se hace con 2 instrucciones *if*.
- *com4*:
  - o Se comparan los 3 primeros caracteres de la cadena *com4* (cuyo valor asignado es *ADC*) con los de “ComandoRecibido” Si son iguales el valor de la variable *ret* es 0. Si el valor de *ret* es 0 se analiza el valor de la posición 3 del vector “ComandoRecibido”, si el valor es 0 se inicia el protocolo I2C, se recibe la información referente a la corriente en la celda solar y se finaliza el protocolo I2C.

Si el valor de la posición 3 de “ComandoRecibido” es 1 la información recibida corresponde a la temperatura medida y si el valor de la

posición 3 del vector "ComandoRecibido" es 2 la información recibida corresponde al voltaje entregado por la celda solar. Lo anterior se hace con 3 instrucciones *if*.

- com5:

- Se comparan los 2 primeros caracteres de la cadena *com5* (cuyo valor asignado es *La*) con los de "ComandoRecibido" Si son iguales el valor de la variable *ret* es 0. Si el valor de *ret* es 0 se analiza el valor de la posición 2 del vector "ComandoRecibido" si el valor es 1 se la lámpara de alógeno instalada en horno, si el valor es 0 la lámpara se apaga. Lo anterior se hace con 2 instrucciones *if*.

- com6:

- Se comparan los 2 primeros caracteres de la cadena *com6* (cuyo valor asignado es *Ve*) con los de "ComandoRecibido" Si son iguales el valor de la variable *ret* es 0. Si el valor de *ret* es 0 se analiza el valor de la posición 2 del vector "ComandoRecibido", si el valor es 1 se enciende el ventilador de enfriamiento instalado en el horno, si el valor es 0 el ventilador se apaga. Lo anterior se hace con 2 instrucciones *if*.

El programa completo del microcontrolador se muestra en la sección de anexos de este trabajo de tesis. Esta interface fue realizada de acuerdo a los requerimientos del grupo de investigación responsable del Cinvestav merida bla bla cubriendo las expectativas solicitadas proporcionando un sistema amigable con el investigador responsable de la etapa de *Light Soaking*.

## Conclusiones

Una vez terminado este trabajo de tesis, se concluye que se cumplió el objetivo de diseñar un sistema controlado de temperatura e iluminación para la etapa denominada *Light Soaking*, que instrumenta la medición de eficiencia de celdas solares al grupo de investigación especializado en celdas solares de CdS/CdTe del Cinvestav Unidad Mérida, departamento de Física Aplicada.

El sistema diseñado logra tener la capacidad de controlar la temperatura y de obtener mediciones de voltaje y corriente. El sistema que controla el proceso de irradiación luminosa (*Light Soaking*) que sirve para el análisis de la eficiencia en celdas solares de CdS/CdTe a través de un microcontrolador PIC18F4550 proporciona las respuestas requeridas por los investigadores.

El sistema presenta la ventaja de que puede ser programado el tiempo que dura el proceso de *Light Soaking* entregando los resultados en tiempo real de las mediciones obtenidas.

Para la realización de las pruebas integradoras, una problemática encontrada fue el manejo del sistema de iluminación (luxes/aria) ya que los investigadores requerían mayores niveles de iluminación a mediano y largo plazo, a los inicialmente solicitados ya que el tamaño del horno limitó el poder escalarlo, así como los recursos otorgados al proyecto.

La interface gráfica desarrollada resultó ser amigable para el investigador usuario del proceso de *Light Soaking*; ya que le permite el establecimiento de los parámetros de una manera sencilla y clara, además, el programa del microcontrolador está elaborado de tal forma que con mínimas modificaciones puede escalarse para añadir funciones que permitan un mejor control de las variables y sub-procesos inherentes al sistema de control de acuerdo a los requerimientos futuros de la propia investigación del grupo desarrollador del Cinvestav unidad Mérida.

Este trabajo formo parte integral del proyecto de investigación 3788/2014/CID titulado: "Diseño de un control de Temperatura en el Proceso de Fabricación de Celdas Solares" el cual fue aprobado tanto por el Cinvestav unidad Mérida y la Secretaría de Investigación y estudios avanzados de la UAEMEx.

Dado que este ha sido un sistema de investigación de desarrollo para mejorar la eficiencia en la fabricación de celdas solares CdS/CdT y este un proyecto de investigación del grupo de investigación de celdas solares del Cinvestav Unidad Mérida sentó las bases como un sistema pionero óptimo para el desarrollo de un prototipo que mejore los parámetros de manejo de iluminación y temperatura por lo cual dio lugar su continuidad con el proyecto de investigación PRDEP CA 245.

Comentado [U1]: Salto de pagina, dado=

Comentado [U2]: Redaccion...

Comentado [U3]: Redacción.. Una problemática encontrada.....

La experiencia de trabajo en el planteamiento del sistema del sistema de control de iluminación y temperatura en el proceso de fabricación de celdas solares con un grupo disciplinario me dio la satisfacción de poder integrar los conocimientos adquiridos en el programa educativo de Ingeniería en Electrónica y me motiva a seguir trabajando en el área de investigación aplicada.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.lineaverdetorrelavega.com/lv/guias-buenas-practicas-ambientales/energia/por-que-es-importante-la-energia.asp>
- [2] [https://es.wikipedia.org/wiki/Generaci%C3%B3n\\_de\\_energ%C3%ADa\\_el%C3%A9ctrica](https://es.wikipedia.org/wiki/Generaci%C3%B3n_de_energ%C3%ADa_el%C3%A9ctrica)
- [3] [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222012000400012](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000400012)
- [4] <https://www.entrepreneur.com/article/263218>
- [5] [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222012000400012](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000400012)
- [6] <https://www.entrepreneur.com/article/263218>
- [7] <http://www.areatecnologia.com/energia-solar-fotovoltaica.htm>
- [8] <https://users.dcc.uchile.cl/~rosequel/celdasolar.html>
- [9] <https://www.pag.org.mx/index.php/PAG/article/viewFile/616/703>
- [10] <https://www2.uned.es/cristamine/gemas/sintesis/chojral.htm>
- [11] [http://ocw.usal.es/enseñanzas-tecnicas/materiales-electronicos/contenido/MaterialesElectronicos/Tema\\_2\\_CrecimObl.pdf](http://ocw.usal.es/enseñanzas-tecnicas/materiales-electronicos/contenido/MaterialesElectronicos/Tema_2_CrecimObl.pdf)
- [12] <http://ingenieroandreoitti.blogspot.com/2013/01/plan-solar-san-juan-fabricacion-de.html>
- [13] <https://www.monografias.com/trabajos104/placas-solares-ii/placas-solares-ii.shtml>
- [14] <https://edu.phineal.com/lessons/la-radiacion-solar/>
- [15] REJÓN V., PEÑA J.L., ARÉS O., CAMACHO J., RIOS-FLORES A. 2011., *Fabricación de celdas solares basadas en el semiconductor CdTe*. En: Congreso Nacional de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Mayab (XI, 2011, Mérida, Yucatán, México). Departamento de Física Aplicada, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Pp. 514-519.
- [16] McCANDLESS B., SITES J., *Cadmium Telluride Solar Cells*. En: LUQUE Antonio y HEGEDUS Steven. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley & Sons Ltd. Inglaterra, 2003. Pp. 617-657.

[17] FIRST SOLAR., Q1 2012 Earning Call & five Year Plan. May 3, 2012. [En línea] Disponible en: <http://investor.firstsolar.com/results.cfm>

[18] PEÑA J.L., A detailed study of the series resistance effect on CdS/CdTe solar cells with Cu/Mo back contact, in press, Thin Solid Films, Mayo 2011.

[19] [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-18-Circuito-electrico-equivalente-de-la-celda-solar-2\\_fig6\\_277849521](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-18-Circuito-electrico-equivalente-de-la-celda-solar-2_fig6_277849521)

[20] <http://www.energetika.com.ar/Curva%20I-V.html>

[21] <http://eet602ei.blogspot.com/2012/05/sistemas-de-control-lazo-abiertocerrado.html>

[22] <https://www.carrod.mx/products/microcontrolador-microchip-pic18f4550-i-p>

[23] [https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Modules/DS\\_MM232R.pdf](https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Modules/DS_MM232R.pdf)

[24] <https://www.electronicoscaldas.com/transistores-mosfet/965-mosfet-irf640.html>

[25] <http://www.mouser.com/ds/2/149/FAN3225T-336021.pdf>

[26] [http://radiosurtidora.com/index.php?route=product/product&product\\_id=775](http://radiosurtidora.com/index.php?route=product/product&product_id=775)

[27] <https://www.analog.com/en/products/ad8494.html>

[28] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa4340.pdf>

[29] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1015.pdf>

[30] <https://picclick.com/10PCS-NEW-Transistor-ST-MOTOROLA-TO-18CAN-3-2N2222A-2N2222-152381261966.html>

[31] <https://www.carrod.mx/products/relevador-6-vcd-10-a-spdt-1-polo-2-tiros-5-pines>

[32] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina138.pdf>

[33] BALDERAS J., ZAPATA M., PERAZA H., Automatización del control térmico de un sistema de evaporación de películas delgadas utilizando LabVIEW. Ingeniería, Revista Académicas de la FI-UADY, 12-1, pp. 41-50, ISSN: 1665-529x.

[34] BAPAT Y.N., Dispositivos y circuitos electrónicos. México, McGraw-Hill, 1978. 465p.

- [34] DELINE C., DEL CUETO J., ALBIN D.S., Transient Reponse of Cadmium Telluride Modules to Light Exposure. National Renewable Energy Laboratory and Arizona State University. Presented at the 37<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conference. Seattle, Washington. June 19-24, 2011.
- [35] FIRST SOLAR. Q1 2012 Earning Call & five Year Plan. May 3, 2012. [En línea] Disponible en: <http://investor.firstsolar.com/results.cfm>
- [36] GOSTEIN M., DUNN L., Light Soaking Effects on Photovoltaic Modules: Overview and Literature Review, Seattle, Washington, 2011 IEEE. [Consulta: 16 de Diciembre de 2011].
- [37] GRAY J., The Physics of the Solar Cell. En: LUQUE Antonio y HEGEDUS Steven. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons Ltd. Inglaterra, 2003. Pp. 61-111.
- [38] KEITHLEY INSTRUMENTS INC., Making I-V and C-V Measurements on Solar/Photovoltaic Cells Using the model 4200-SCS semiconductor Characterization System. Application note series, Number 2876, 2007.
- [39] KULAKOWSKI B., GARDNER J., SHEARER J., Dynamic modeling and control of Engineering Systems. United States of America. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2007, Third edition, 485p.
- [40] KUO B., Sistemas de control Automático. México, PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA, 1996, 7<sup>a</sup> edición. 896p.
- [41] McCANDLESS B., SITES J., Cadmium Telluride Solar Cells. En: LUQUE Antonio y HEGEDUS Steven. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons Ltd. Inglaterra, 2003. Pp. 617-657.
- [42] NATIONAL INSTRUMENTS., Photovoltaic Cell I-V Characterization Theory and LabVIEW Analysis Code, "Toolkit for I-V Characterization Photovoltaic Cells". Disponible en: [<http://www.ni.com/white-paper/7230/en>]
- [43] OGATA K., Sistemas de control en tiempo discreto. México, PEARSON EDUCACIÓN, 1996, 2<sup>a</sup> edición.
- [44] PEÑA J.L., A detailed study of the series resistance effect on CdS/CdTe solar cells with Cu/Mo back contact, in press, Thin Solid Films, Mayo 2011.
- [45] PROPST M., GOSHIA K., HEVELONE J., Effects of Various Module Preconditioning procedures on CdTe Pmax Measurements in NREL PV Reliability Workshop. Golden, Colorado. February 18-19, 2010.

[46] REJÓN V., Comunicación personal. Auxiliar de Investigación en el departamento de Física del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida. [Consulta: 16 de Diciembre de 2011].

[47] REJÓN V., Control lineal implícito para el proceso: transporte de vapor en espacio cerrado. Tesis (Maestría en Ciencias, mención en ingeniería eléctrica). México, D.F. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección de Control Automático, 1996, 63p.

[48] REJÓN V., PEÑA J.L., ARÉS O., CAMACHO J., RIOS-FLORES A. 2011., Fabricación de celdas solares basadas en el semiconductor CdTe. En: Congreso Nacional de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Mayab (XI, 2011, Mérida, Yucatán, México). Departamento de Física Aplicada, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Pp. 514-519.

[49] SASTRÉ J., influencia de los parámetros de crecimiento por sublimación en las propiedades ópticas y morfológicas de películas delgadas de CdS y su uso como material ventana en celdas solares. Tesis (Maestría en Ciencias, mención en física). México, D.F. Instituto Politécnico Nacional, Escuela superior de Física y Matemáticas, 2009. 114p.

## GLOSARIO

**CINVESTAV:** Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

**LIGHT SOAKING:** Irradiación luminosa.

**CdS/CdT:** Sulfuro de Cadmio, Telurio de Cadmio

**INTERFACE GRÁFICA:** Es un programa informático que actúa de interface de usuario, utilizando un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles en la interface. Su principal uso consiste en proporcionar un entorno visual sencillo para permitir la comunicación con el sistema operativo de una máquina o computador.

**SOFTWARE:** Es el soporte lógico de un sistema informático, que comprende el conjunto de los componentes lógicos necesarios que hacen posible la realización de tareas específicas.

**HARDWARE:** Son las partes físicas tangibles de un sistema informático, sus componentes eléctricos, electrónicos, electromecánicos y mecánicos.

**EFICIENCIA:** Capacidad para realizar o cumplir adecuadamente una función, En celdas solares, eficiencia hace referencia a la relación existente entre la cantidad de energía solar que recibe y cuanta de esa energía es capaz de transformar en energía eléctrica.

**ESTADO DEL ARTE:** Todos aquellos desarrollos de última tecnología realizados a un producto, se refiere incluso al límite del conocimiento humano sobre la materia.

**PIE's:** Productores Independientes de Energía

**Strncmp:** Es una función del lenguaje C de computadoras que compara  $n$  caracteres entre dos cadenas de caracteres. Retorna un valor entero mayor, igual o menor a cero dependiendo de si la primer cadena de caracteres el mayor, igual o menor que la segunda cadena.

**TRANSESTERIFICACIÓN:** Es el proceso por el cual se intercambia el grupo de un alcohol, mediante una reacción, catalizadas con la adición de un ácido o una base.

**TW:** Tera Watts

## ANEXO 1: Programa del microcontrolador

```
- 1. #include <xc.h>
- 2. #include <pic18f4550.h>
- 3. #include <stdio.h>
- 4. #include <stdarg.h>
- 5. #include <string.h>
- 6. #include "i2c.h"
- 7.
- 8. #define _XTAL_FREQ 8000000
- 9. #define Led1 LATDbits.LATD0
- 10. #define Buzz1 LATDbits.LATD1
- 11. #define Rel1 LATDbits.LATD2
- 12. #define Ve LATCbits.LATC1
- 13. #define Sw1 PORTBbits.RB0
- 14. #define Tris_Led1 TRISDbits.TRISD0
- 15. #define Tris_Buzzer1 TRISDbits.TRISD1
- 16. #define Tris_Rel1 TRISDbits.TRISD2
- 17. #define TrisSw1 TRISBbits.TRISB0
- 18. #define Tris_Ve TRISCbits.TRISC1
- 19. void putch(char data)
- 20. {
- 21. while( ! TXIF)
- 22. continue;
- 23. TXREG = data;
- 24. }
- 25. void init_uart(void)
- 26. {
- 27. SPBRG = 51;
- 28. TXEN = 1;
- 29. BRGH = 1;
- 30. SPEN = 1;
- 31. CREN = 1;
- 32. TRISCbits.RC6=1;
- 33. TRISCbits.RC7=1;
- 34. }
- 35. unsigned char getch() {
- 36. while(!RCIF)
- 37. continue;
- 38. return RCREG;
- 39. }
- 40. void UART_Read_Text(char *Output, unsigned int length)
- 41. {
- 42. unsigned int i;
- 43. for(int i=0;i<length;i++)
- 44. Output[i] = getch();
```

```

- 45. }
- 46. void LeerComando(char *Output)
- 47. {
- 48.   unsigned char sigue;
- 49.   unsigned int i;
- 50.   sigue = 1;
- 51.   i=-1;
- 52.   while (sigue==1)
- 53.   {
- 54.     Output[i] = getch();
- 55.     if (Output[i]==13)
- 56.     {
- 57.       Output[i]=0;
- 58.       sigue = 0;
- 59.     }
- 60.     i++;
- 61.   }
- 62. }
- 63. void Beep(void)
- 64. {
- 65.   unsigned char aux;
- 66.   for (aux=1;aux<200;aux++)
- 67.   {
- 68.     Buzz1=1;
- 69.     __delay_ms(1);
- 70.     Buzz1=0;
- 71.     __delay_ms(1);
- 72.   }
- 73. }
- 74. long size;
- 75. char CaracterRx;
- 76. char MensajeTx[] = "Por favor digite una tecla: ";
- 77. unsigned char I2C_Send[21] = "" ;
- 78. unsigned char I2C_Recv[21];
79. void main (void)
80. {
81.   unsigned char Retardos;
82.   unsigned char my_byte;
83.   unsigned char input;
84.   unsigned char ComandoRecibido[":.");
85.   unsigned char sync_mode=0, slew=0, add1,w,data,status,length;
86.   char *com1 = "L1";
87.   char *com2 = "R1";
88.   char *com3 = "B1";
89.   char *com4 = "ADC";
90.   char *com5 = "La";
91.   char *com6 = "Ve";

```

```

95.  int ret;
96.  size = 0x12345678;
97.  OSCCON = 0X7A;
98.  TMR1ON=0;
99.  TMR3ON=0;
100.  UCFGbits.UOEMON=1;
101.  Tris_Led1 = 0;
102.  TrisSw1 = 1;
103.  Led1 = 0;
104.  Tris_Buzzer1 =0;
105.  Buzz1=0;
106.  Tris_Rel1 = 0;
107.  Rel1=0;
108.  Tris_Ve=0;
109.  Ve = 0;
110.  TRISCbits.RC1=0;
111.  TRISCbits.RC2=0;
112.  TRISBbits.RB3=0;
113.  ADCON1 = 0x0E;
114.  ADCON0 = 0;
115.  ADCON2 = 0;
116.  Rel1=0;
117.  PR2 = 100 ;
121.  CCP2L = 50;
122.  CCP2CON = 0x0C;
125.  T2CON = 0x06;
126.  TMR2 = 0;
127.  init_uart();
128.  INTCONbits.GIE=0;
129.  PIE1bits.RCIE=1;
130.  for(w=0;w<20;w++)
131.  I2C_Recv[w]=0;
132.  add1=0x90;
133.  CloseI2C();
135.  sync_mode = MASTER;
136.  slew = SLEW_OFF;
137.  OpenI2C(sync_mode,slew);
138.  SSPADD=0x0A;
144.  printf("\n\rCargando sistema.....\n\r");
145.  printf("Sistema JSalas v1.0. Control de light soaking para celdas solar
es\n\r");
146.  printf("Int%crprete de comandos listo\n\r", 130);
147.  printf("Presione Enter para comenzar");
148.  NOP();
149.  ADCON1 = 0x0E;
150.  ADCON0 = 0;
151.  ADCON2 = 0;

```

```

152.     Led1 = 1;
153.     __delay_ms(80);
154.     Led1 = 0;
155.     while (1)
156.     {
157.         while(1)
158.         {
159.             for(;;){
160.                 LeerComando(ComandoRecibido);
161.                 ret = strncmp(com1, ComandoRecibido, 2);
162.                 if (ret ==0)
163.                 {
164.                     if (ComandoRecibido[2]=='1')
165.                     {
166.                         Led1 = 1;
167.                         printf("\rLed1 encendido");
168.                     }
169.                     if (ComandoRecibido[2]=='0')
170.                     {
171.                         Led1 = 0;
172.                         printf("\rLed1 apagado ");
173.                     }
174.                 }
175.                 ret = strncmp(com2, ComandoRecibido, 2);
176.                 if (ret ==0)
177.                 {
178.                     if (ComandoRecibido[2]=='1')
179.                     {
180.                         Rel1 = 1;
181.                         printf("\rRel1 encendido");
182.                     }
183.                     if (ComandoRecibido[2]=='0')
184.                     {
185.                         Rel1 = 0;
186.                         printf("\rRel1 apagado ");
187.                     }
188.                 }
189.                 ret = strncmp(com3, ComandoRecibido, 2);
190.                 if (ret ==0)
191.                 {
192.                     if (ComandoRecibido[2]=='1')
193.                     {
194.                         Led1 = 1;
195.                         printf("\rBuzzer1 encendido");
196.                         Beep();
197.                     }
198.                     if (ComandoRecibido[2]=='0')

```

```

215.         {
216.             Led1 = 0;
217.             printf("\rBuzzer1 apagado ");
218.         }
219.     }
220.     ret = strncmp(com4, ComandoRecibido, 3);
221.     if (ret ==0)
222.     {
223.         if (ComandoRecibido[3]=='0')
224.         {
226.             StartI2C();
227.             status = Writel2C(add1 | 0x00);
228.             IdleI2C();
229.             status = Writel2C(0x01);
230.             IdleI2C();
231.             status = Writel2C(0xC4);
232.             IdleI2C();
233.             status = Writel2C(0x03);
234.             IdleI2C();
235.             StopI2C();
237.             printf("\rLectura de la corriente medida en la celda
solar: ");
238.         }
239.         if (ComandoRecibido[3]=='1')
240.         {
241.             printf("\rLectura de temperatura medida en el interi
or del horno: ");
242.         }
243.         if (ComandoRecibido[3]=='2')
244.         {
245.             printf("\rLectura del voltaje de la celda solar: ");
246.         }
252.     if (ret ==0)
253.     {
254.         if (ComandoRecibido[2]=='1')
255.         {
256.             Ve = 1;
257.             printf("\rVentilador encendido");
258.         }
259.         if (ComandoRecibido[2]=='0')
260.         {
261.             Ve = 0;
262.             printf("\rVentilador apagado ");
263.         }
264.     }
265.     if (ComandoRecibido[0]==0)
266.     {

```

```

267.             printf("\n\r>>");
268.         }
269.         else
270.         {
271.             printf(" (Comando recibido: [%s])\n\r>>", ComandoRec
ibido);
272.         }
273.     }
274.     for(;;) {
275.         printf("\rPresiona una tecla y la mando de regreso\r\n >>");

276.         input = getch();
277.         printf("\rPresionaste la tecla [%c]\n", input);
278.     }
279. }
280. while (1)
281. {
282.     while(PIR1bits.RCIF==0)
283.     {
284.         Led1 = 1;
285.         __delay_ms(80);
286.         Led1 = 0;
287.         __delay_ms(80);
288.     }
289.     my_byte = RCREG;
290.     CREN=1;
291.     Led1 = 1;
292.     __delay_ms(80);
293.     __delay_ms(80);
294.     printf("tecla pulsada detectada\n\r", 130);
295.     Led1 = 0;
296. }
297. if (Sw1 == 0)
298. {
299.     T2CON = 0x06;
300.     TMR2 = 0;
301.     CCP1CON = 0x0C;
302.     PR2 = 100 ;
303.     while (1)
304.     {
305.         ADCON0bits.ADON = 1;
306.         __delay_us(100);
307.         ADCON0bits.GO_DONE = 1;
308.         while (ADCON0bits.GO_DONE != 0);
309.         CCPR1L = ADRESH/8;
310.         ADCON0bits.ADON = 0;
311.     }

```

```
312.     }
313.     else
314.     {
315.         while (1)
316.         {
317.             ADCON0bits.ADON = 0;
318.             Led1 = 1;
319.             __delay_ms(50);
320.         }
321.     }
322. }
323. }
```

## ANEXO 2: Programa de la Interface gráfica

### - Ventana Principal:

Public Class Form1

```
Private Sub Form1_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles MyBase.Load
    lblEncabezado.Text = "Facultad de Ingeniería"
    lblEncabezado.TextAlign = ContentAlignment.MiddleCenter
    lblEncabezado.Font = New Font("Arial Unicode Ms", 24, FontStyle.Regular)
    Me.Text = "Interface gráfica"
    lblPrueba.Text = "- Click para empezar prueba del sistema"
    lblControl.Text = "- Click para empezar el proceso"
    lblPrueba.TextAlign = ContentAlignment.MiddleCenter
    lblControl.TextAlign = ContentAlignment.MiddleCenter
    lblControl.Font = New Font("Times New Roman", 12, FontStyle.Regular)
    lblPrueba.Font = New Font("Times New Roman", 12, FontStyle.Regular)
    btnSalir.Text = "Salir"
    lblControl.Cursor = Cursors.Hand
    lblPrueba.Cursor = Cursors.Hand
End Sub
```

```
Private Sub btnSalir_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnSalir.Click
    Dim eleccion As Integer
    eleccion = CInt(MsgBox("¿Desea salir del programa?",
MsgBoxStyle.OkCancel, "¿Salir?"))
    If eleccion = 1 Then
        Me.Close()
    End If
End Sub
```

```
Private Sub lblPrueba_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles lblPrueba.Click
    Dim Form2 As New Form2
    Me.Finalize()
    Form2.Show()
End Sub
```

```
Private Sub lblControl_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles lblControl.Click
    Dim Form3 As New Form3
    Me.Finalize()
    Form3.Show()
End Sub
```

```
Private Sub lblEncabezado_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles lblEncabezado.Click
```

```
End Sub  
End Class
```

### - Ventana de prueba del sistema

```
Imports System.Threading  
Public Class Form2  
    Dim StrBufferOut As String  
    Dim var As String  
    Private Sub Form2_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles MyBase.Load  
        lblEncabezado.Text = "Facultad de Ingeniería"  
        lblEncabezado.TextAlign = ContentAlignment.MiddleCenter  
        lblEncabezado.Font = New Font("Arial Unicode Ms", 24, FontStyle.Regular)  
        Me.Text = "Prueba del sistema"  
        btnRegresar.Text = "Regresar"  
        btnSalir.Text = "Salir"  
        lblLámpara.Text = "- Encender lámpara"  
        lblCloseVen.Text = "- Encender buzzer"  
        lblConexion.Text = "- Prueba de conexión"  
        lblVoltaje.Text = "- Leer voltaje en la celda"  
        lblCorriente.Text = "- Leer corriente en la celda"  
        lblTemperatura.Text = "- Leer temperatura en el horno"  
        lblMotor.Text = "- Encender ventilador"  
        lblOpenVen.Text = "- Encender led"  
        lblTemperaturaLeida.Text = ""  
        lblCorrienteLeida.Text = " "  
        lblVoltajeLeido.Text = ""  
        lblResistencias.Text = "- Calentar horno"  
        lblCloseVen.Font = New Font("Times New Roman", 12, FontStyle.Bold)  
        lblConexion.Font = New Font("Times New Roman", 12, FontStyle.Bold)  
        lblVoltaje.Font = New Font("Times New Roman", 12, FontStyle.Bold)  
        lblLámpara.Font = New Font("Times New Roman", 12, FontStyle.Bold)  
        lblCorriente.Font = New Font("Times New Roman", 12, FontStyle.Bold)  
        lblMotor.Font = New Font("Times New Roman", 12, FontStyle.Bold)  
        lblOpenVen.Font = New Font("Times New Roman", 12, FontStyle.Bold)  
        lblResistencias.Font = New Font("Times New Roman", 12, FontStyle.Bold)  
        lblTemperatura.Font = New Font("Times New Roman", 12, FontStyle.Bold)  
        lblTemperatura.TextAlign = 2  
        lblCorriente.TextAlign = 2  
        lblVoltaje.TextAlign = 2  
        lblCloseVen.Cursor = Cursors.Hand  
        lblVoltaje.Cursor = Cursors.Hand
```

```

IblLámpara.Cursor = Cursors.Hand
IblCorriente.Cursor = Cursors.Hand
IblMotor.Cursor = Cursors.Hand
IblOpenVen.Cursor = Cursors.Hand
IblResistencias.Cursor = Cursors.Hand
Ibl1.Text = "Intensidad luminosa"
Ibl1.TextAlign = ContentAlignment.MiddleCenter
hsbLuminosidad.Minimum = 0
hsbLuminosidad.Maximum = 99
hsbLuminosidad.Cursor = Cursors.Hand
btnConectar.Text = "Conectar"
btnConexion.Text = "Determinar conexión"
End Sub

Private Sub btnRegresar_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnRegresar.Click
    Dim Form1 As New Form1
    Me.Finalize()
    Form1.Show()
End Sub

Private Sub btnSalir_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnSalir.Click
    Dim eleccion As Integer
    eleccion = 0
    If btnConectar.Text = "Desconectar" Then
        MessageBox.Show("Debe desconectar la tarjeta primero")
    Else
        eleccion = CInt(MessageBox("¿Desea salir?", MsgBoxStyle.OkCancel,
"¿Salir?"))
        If eleccion = 1 Then
            Me.Close()
            End
        End If
    End If
End Sub

Private Sub hsbLuminosidad_Scroll(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.Windows.Forms.ScrollEventArgs) Handles hsbLuminosidad.Scroll
    IblLuz.Text = hsbLuminosidad.Value
End Sub

Private Sub IblLámpara_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles IblLámpara.Click
    Dim luminosidad, eleccion As Integer
    Dim instruccion As String
    eleccion = 0
    luminosidad = hsbLuminosidad.Value

```

```

instruccion = "La" & luminosidad
If luminosidad = 0 Then
    eleccion = CInt(MsgBox("Por favor seleccione una intensidad luminosa
mayor a cero.", 0, "Falta intensidad luminosa"))
Else
    StrBufferOut = " "
    If btnConectar.Text = "Conectar" Then
        MsgBox.Show("La tarjeta debe estar conectada")
    Else
        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = instruccion
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        var = Chr(13)
        var &= Chr(10)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = var
        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        eleccion = CInt(MsgBox("Se han encendido las lámparas, para apagar
presione Aceptar.", 0, "Prueba de iluminación"))
    End If
    If eleccion = 1 Then
        instruccion = "La00"
        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = instruccion
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        var = Chr(13)
        var &= Chr(10)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = var
        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
    End If
End If
End Sub

Private Sub IblResistencias_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles IblResistencias.Click
    Dim eleccion As Integer
    eleccion = 0
    StrBufferOut = " "
    If btnConectar.Text = "Conectar" Then
        MsgBox.Show("La tarjeta debe estar conectada")

```

```

Else
  Thread.Sleep(500)
  spPuertos.DiscardOutBuffer()
  StrBufferOut = "R11"
  spPuertos.Write(StrBufferOut)
  spPuertos.Write(StrBufferOut)
  var = Chr(13)
  var &= Chr(10)
  spPuertos.DiscardOutBuffer()
  StrBufferOut = var
  Thread.Sleep(500)
  spPuertos.Write(StrBufferOut)
  eleccion = CInt(MsgBox("El horno se esta calentando, para detener
presione Aceptar.", 0, "Prueba de calentamiento"))
  End If
  If eleccion = 1 Then
    Thread.Sleep(500)
    spPuertos.DiscardOutBuffer()
    StrBufferOut = "R10"
    spPuertos.Write(StrBufferOut)
    spPuertos.Write(StrBufferOut)
    var = Chr(13)
    var &= Chr(10)
    spPuertos.DiscardOutBuffer()
    StrBufferOut = var
    Thread.Sleep(500)
    spPuertos.Write(StrBufferOut)
  End If
End Sub

```

```

Private Sub lblMotor_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles lblMotor.Click
  Dim eleccion As Integer
  eleccion = 0
  StrBufferOut = " "
  If btnConectar.Text = "Conectar" Then
    MessageBox.Show("La tarjeta debe estar conectada")
  Else
    Thread.Sleep(500)
    spPuertos.DiscardOutBuffer()
    StrBufferOut = "Ve1"
    spPuertos.Write(StrBufferOut)
    spPuertos.Write(StrBufferOut)
    var = Chr(13)
    var &= Chr(10)
    spPuertos.DiscardOutBuffer()
    StrBufferOut = var
  End If
End Sub

```

```

        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        eleccion = CInt(MsgBox("Se ha encendido el ventilador, para apagar
presione Aceptar.", 0, "Prueba de sistema de enfriado"))
    End If
    If eleccion = 1 Then
        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = "Ve0"
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        var = Chr(13)
        var &= Chr(10)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = var
        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
    End If
End Sub

```

```

Private Sub lblOpenVen_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles lblOpenVen.Click
    Dim eleccion As Integer
    Dim var As String
    eleccion = 0
    StrBufferOut = " "
    If btnConectar.Text = "Conectar" Then
        MessageBox.Show("La tarjeta debe estar conectada")
    Else
        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = "L11"
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        var = Chr(13)
        var &= Chr(10)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = var
        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        eleccion = CInt(MsgBox("Se ha encendido el led, para apagar presione
aceptar.", 0, "Encender led"))
    End If
    If eleccion = 1 Then
        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = "L10"
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
    End If
End Sub

```

```

        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        var = Chr(13)
        var &= Chr(10)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = var
        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
    End If
End Sub

Private Sub lblCloseVen_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles lblCloseVen.Click
    Dim eleccion As Integer
    eleccion = 0
    StrBufferOut = " "
    If btnConectar.Text = "Conectar" Then
        MessageBox.Show("La tarjeta debe estar conectada")
    Else
        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = "B11"
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        var = Chr(13)
        var &= Chr(10)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = var
        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        eleccion = CInt(MessageBox("Se ha encendido el buzzer, presione aceptar para
apagar.", 0, "Prueba del buzzer"))
    End If
    If eleccion = 1 Then
        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = "B10"
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        var = Chr(13)
        var &= Chr(10)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = var
        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
    End If
End Sub

```

```

Private Sub btnConectar_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnConectar.Click
    If btnConectar.Text = "Conectar" Then
        spPuertos.PortName = cboPuertos.Text
        spPuertos.Open()
        Call funcion()
        btnConectar.Text = "Desconectar"
    ElseIf btnConectar.Text = "Desconectar" Then
        spPuertos.Close()
        btnConectar.Text = "Conectar"
    End If
End Sub

```

```

Private Sub btnConexion_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnConexion.Click
    cboPuertos.Items.Clear()
    For Each PuertoDisponible As String In My.Computer.Ports.SerialPortNames
        cboPuertos.Items.Add(PuertoDisponible)
    Next
    If cboPuertos.Items.Count > 0 Then
        cboPuertos.Text = cboPuertos.Items(0)
        MessageBox.Show("Seleccione el puerto a trabajar")
        btnConectar.Enabled = True
    Else
        MessageBox.Show("Ningun puerto encontrado")
        btnConectar.Enabled = False
        cboPuertos.Items.Clear()
        cboPuertos.Text = (" ")
    End If
End Sub

```

```

Private Sub lblEnvio_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles lblVoltaje.Click
    Dim eleccion As Integer
    eleccion = 0
    StrBufferOut = " "
    If btnConectar.Text = "Conectar" Then
        MessageBox.Show("La tarjeta debe estar conectada")
    Else
        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = "ADC3"
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        var = Chr(13)
        var &= Chr(10)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = var
    End If
End Sub

```

```

        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        spPuertos.DiscardInBuffer()
        lblVoltajeLeido.Text = spPuertos.ReadExisting()
    End If
End Sub

Private Sub Label1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles lblTemperatura.Click
    Dim eleccion As Integer
    eleccion = 0
    StrBufferOut = " "
    If btnConectar.Text = "Conectar" Then
        MessageBox.Show("La tarjeta debe estar conectada")
    Else
        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = "ADC2"
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        var = Chr(13)
        var &= Chr(10)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        StrBufferOut = var
        Thread.Sleep(500)
        spPuertos.Write(StrBufferOut)
        spPuertos.DiscardOutBuffer()
        spPuertos.DiscardInBuffer()
        lblTemperaturaLeida.Text = spPuertos.ReadExisting()
    End If
End Sub
Private Sub funcion()
    Dim var As String
    var = Chr(13)
    var &= Chr(10)
    spPuertos.DiscardOutBuffer()
    StrBufferOut = var
    Thread.Sleep(500)
    spPuertos.Write(StrBufferOut)
End Sub
End Class

```

### **- Ventana de Inicio de Proceso**

```

Public Class Form3
    Public temperatura, intentensidad As Integer

```

```

Public tiempo As Integer
Public procesoactivo As Boolean
Private Sub Form3_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles MyBase.Load
    lblEncabezado.Text = "Facultad de Ingeniería"
    lblEncabezado.TextAlign = ContentAlignment.MiddleCenter
    lblEncabezado.Font = New Font("Arial Unicode Ms", 24, FontStyle.Regular)
    Me.Text = "Fijar parámetros"
    lblIntensidad.Text = "Intensidad luminosa deseada" & vbCrLf & "(1 - 99)"
    lblTemperatura.Text = "Temperatura deseada" & vbCrLf & "(°C)"
    lblTiempo.Text = "Tiempo de proceso" & vbCrLf & "(Segundos)"
    lblIntensidad.Font = New Font("Times New Roman", 12, FontStyle.Regular)
    lblTemperatura.Font = New Font("Times New Roman", 12, FontStyle.Regular)
    lblTiempo.Font = New Font("Times New Roman", 12, FontStyle.Regular)
    btnGráficas.Text = "Mostrar Gráficas"
    btnRegresar.Text = "Regresar"
    btnSalir.Text = "Salir"
    lblIntensidad.Cursor = Cursors.Hand
    lblTemperatura.Cursor = Cursors.Hand
    lblTiempo.Cursor = Cursors.Hand
    btnGuardar.Text = "Empezar proceso"
    lblLux.Text = "Intensidad luminosa"
    lblLux.TextAlign = ContentAlignment.MiddleCenter
    hsbIntensidad.Maximum = 99
    hsbIntensidad.Minimum = 0
    txtIntensidad.Enabled = False
    btnDetener.Text = "Detener proceso"
    lblConexion.Text = "Seleccione puerto"
    btnconectar.Text = "Conectar"
    btnconectar.Enabled = False
    btnDeterminarConexion.Text = "Determinar conexión"
    procesoactivo = False
    If btnconectar.Text = "Conectar" Then
        btnGuardar.Enabled = False
    End If
    Call estado()
End Sub

Private Sub btnRegresar_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnRegresar.Click
    Dim Form1 As New Form1
    Me.Finalize()
    Form1.Show()
End Sub

Private Sub btnSalir_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnSalir.Click

```

```

Dim eleccion As Integer
If btnconectar.Text = "Desconectar" Then
    MessageBox.Show("Debe desconectar primero la tarjeta")
Else
    eleccion = CInt(MessageBox("¿Desea salir?", MsgBoxStyle.OkCancel,
"¿Salir?"))
    If eleccion = 1 Then
        Me.Close()
    End
    End If
End If

End Sub

Private Sub btnGuardar_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnGuardar.Click
    Call ingresoparametros()
End Sub

Private Sub hsbIntensidad_Scroll(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.ScrollEventArgs) Handles hsbIntensidad.Scroll
    txtIntensidad.Text = hsbIntensidad.Value
End Sub
Private Sub proceso()
    btnRegresar.Enabled = False
    Call enviardato()
    Call estado()
End Sub
Private Sub ingresoparametros()
    If txtTemperatura.Text = "" Or Val(txtTemperatura.Text) = 0 Or
Val(txtTemperatura.Text) < 0 Or Val(txtTemperatura.Text) > 100 Then
        MsgBox("Debe ingresar temperatura válida" & vbCrLf & "(La temperatura
debe estar entre 1°C y 100°C)", MsgBoxStyle.Information, "Error de temperatura")
        txtTemperatura.Text = ""
        Me.txtTemperatura.Focus()
    Else
        temperatura = Val(txtTemperatura.Text)
        txtTemperatura.Enabled = False
    End If
    If txtIntensidad.Text = "" Then
        MsgBox("Debe ingresar la intensidad luminosa deseada." & vbCrLf &
"Utilice la barra para seleccionar la intensidad liminosa deseada",
MsgBoxStyle.Information, "Error en intensidad luminosa")
        Me.hsbIntensidad.Focus()
    Else
        intentensidad = hsbIntensidad.Value
        txtIntensidad.Enabled = False
    End If
End Sub

```

```

        hsbIntensidad.Enabled = False
    End If
    If txtTiempo.Text = "" Then
        MsgBox("Debe ingresar un tiempo válido", MsgBoxStyle.Information, "Error
de tiempo")
        Me.txtTiempo.Focus()
    Else
        tiempo = Val(txtTiempo.Text)
        txtTiempo.Enabled = False
    End If
    If temperatura > 0 And intentensidad > 0 And tiempo > 0 Then
        procesoactivo = True
        Call proceso()
    End If
End Sub

```

```

Private Sub btnDetener_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnDetener.Click

```

```

    procesoactivo = False
    temperatura = 0
    tiempo = 0
    intentensidad = 0
    Call estado()
    btnRegresar.Enabled = True
    txtTemperatura.Enabled = True
    hsbIntensidad.Enabled = True
    txtTiempo.Enabled = True
    txtTemperatura.Text = ""
    txtTiempo.Text = ""
    hsbIntensidad.Value = 0
    txtIntensidad.Text = ""
    REM Call ingresoparametros()
End Sub

```

```

Private Sub estado()
    If procesoactivo = False Then
        lblEstado.Text = "Se ha detenido el proceso"
        lblEstado.Font = New Font("Times New Roman", 20, FontStyle.Bold)
        lblEstado.BackColor = Color.Red
        lblEstado.TextAlign = ContentAlignment.MiddleCenter
    End If
    If procesoactivo = True Then
        lblEstado.Text = "Ha comenzado el proceso"
        lblEstado.Font = New Font("Times New Roman", 20, FontStyle.Bold)
        lblEstado.BackColor = Color.Lime
        lblEstado.TextAlign = ContentAlignment.MiddleCenter
    End If
End Sub

```

```

Private Sub btnDeterminarConexion_Click(ByVal sender As System.Object,
ByVal e As System.EventArgs) Handles btnDeterminarConexion.Click
    cboPuertos.Items.Clear()
    For Each PuertoDisponible As String In My.Computer.Ports.SerialPortNames
        cboPuertos.Items.Add(PuertoDisponible)
    Next
    If cboPuertos.Items.Count > 0 Then
        cboPuertos.Text = cboPuertos.Items(0)
        MessageBox.Show("Seleccione el puerto a trabajar")
        btnconectar.Enabled = True
    Else
        MessageBox.Show("Ningun puerto encontrado")
        btnconectar.Enabled = False
        cboPuertos.Items.Clear()
        cboPuertos.Text = (" ")
    End If
End Sub

```

```

Private Sub btnconectar_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnconectar.Click
    If btnconectar.Text = "Conectar" Then
        spPuertos.PortName = cboPuertos.Text
        btnconectar.Text = "Desconectar"
        spPuertos.Open()
        btnGuardar.Enabled = True
    ElseIf btnconectar.Text = "Desconectar" Then
        If procesoactivo = True Then
            MessageBox.Show("Primero debe debeter el proceso")
        Else
            btnconectar.Text = "Conectar"
            spPuertos.Close()
        End If
    End If
End Sub
Private Sub enviardato()

```

```

End Sub

Private Sub btnGráficas_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnGráficas.Click
    Form4.Show()
End Sub
End Class

```

