



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“SENSOR SOLAR PARA APLICACIÓN ESPACIAL”**

**TESIS**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO MECATRÓNICO**

PRESENTA:  
**RICARDO HERNÁNDEZ ABRAHAM**

DIRECTOR DE TESIS:  
**DR. JORGE PRADO MOLINA**



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D. F.

Mayo, 2014

A mi madre María Guadalupe Abraham González, pilar de mi desarrollo y ejemplo a seguir, a quien amo y agradezco por todos sus consejos, su gran amor como madre y por el enorme apoyo que me ha brindado toda la vida.

A mi padre Félix Salvador Hernández Celis, a quien amo y doy gracias por enseñarme, entre otras cosas, a ser una persona trabajadora, perseverante y comprometida en todos los aspectos.

A mis hermanas Violeta y Blanca, quienes me han brindado todo su cariño y apoyo en cada aspecto de mi vida, y agradezco por cada uno de los momentos que hemos compartido juntos.

A mi abuelita Porfiria González Ortiz, quien ha sido como una segunda madre para mí, siempre brindándome su amor y cuidado.

A mi familia, porque con su ayuda he forjado gran parte de lo que soy ahora y porque siempre me han acompañado en los buenos momentos, mientras que en los difíciles he recibido su ayuda.

A mi novia Alma Plata Martínez, por brindarme su amistad y amor incondicional, por ser una motivación para mí y apoyarme en cada aspecto de mi vida. Gracias por todas las enseñanzas y momentos maravillosos que hemos compartido. Te amo.

A mis amigos, entre ellos Omar Cruz, Erick Guevara, Pilar Martínez, Ricardo Padilla, Lucia Ramírez, Sofía Mariela Teloxa, quienes han estado presentes en mi vida como si fueran mis hermanos y de los cuales estoy muy agradecido con la vida por la fortuna de haberlos conocido.

## RECONOCIMIENTOS

---

A mi alma máter, la Universidad Nacional Autónoma de México, y a su la Facultad de Ingeniería por haberme otorgado el gran privilegio de estudiar dentro de sus aulas desarrollándome profesional y personalmente.

A los doctores Saúl Daniel Santillán Gutiérrez, Saúl de la Rosa Nieves, José Alberto Ramírez Aguilar, Carlos Romo Fuentes, pertenecientes al Departamento Aeroespacial del Centro de Alta Tecnología de la UNAM, quienes me incorporaron al proyecto Cóndor y siempre me brindaron su respaldo.

Al Instituto de Geografía de la UNAM, así como a todas las personas que en él laboran, por haberme permitido trabajar dentro de sus instalaciones y hacer uso de su equipo para llevar acabo proyecto.

Al Dr. Jorge Prado Molina, quien es mi director de tesis y a quien además considero un amigo por el gran apoyo y atención que tuvo conmigo en el desarrollo de este proyecto de tesis. Estoy sumamente agradecido por todas las enseñanzas y consejos que me brindó durante este tiempo de trabajo.

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Efecto fotoeléctrico .....	1
1.2. El medio ambiente espacial .....	5
1.3. Celdas solares .....	11
1.3.1. Respuesta ante variaciones de temperatura .....	16
1.3.2. Degradación por radiación ionizante .....	17
1.4. Proyecto Cóndor UNAM-MAI .....	18
<b>2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL SENSOR SOLAR.....</b>	<b>21</b>
2.1. Sensores de Sol .....	21
2.2. Selección de celdas solares .....	23
2.3. Diseño mecánico y construcción del cuerpo del sensor .....	25
2.4. Circuito de acondicionamiento.....	30
2.5. Pruebas de funcionamiento del sensor solar .....	39
2.6. Modelo matemático mejorado .....	44
<b>3. ALGORITMO DE COMPENSACIÓN EN ÓRBITA.....</b>	<b>49</b>
3.1. Por cambios de temperatura.....	49
3.2. Por cambios de respuesta de las celdas ante la presencia de la radiación ionizante .....	51
3.3. Filtros digitales .....	53
3.4. Diagrama de flujo.....	55
3.5. Programa fuente.....	60
3.6. Implementación en computadora en una sola tarjeta.....	64
<b>4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y CALIBRACIÓN.....</b>	<b>67</b>
4.1. Simulador solar.....	67
4.1.1. Respuesta espectral del simulador solar utilizado.....	69
4.2. Curvas de respuesta y evaluación del algoritmo de calibración .....	70
4.3. Determinación de las pruebas de calificación para vuelo espacial .....	72

4.4. Protocolo de integración con satélite.....	74
<b>5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>75</b>
5.1. Resultados .....	75
5.2. Conclusiones.....	76
<b>APÉNDICE .....</b>	<b>79</b>
A. Manejo del espectrómetro GER1500 en modo Stand Alone .....	79
B. Programa en C# que da solución a la ecuación (3.7).....	89
<b>ANEXOS .....</b>	<b>93</b>
Celdas Solares K4710 .....	93
Aluminio 6061.....	95
Cable con conector Cinch Dura-Con 1114181 y 1114174.....	96
Amplificador operacional LM124J.....	99
Microcontrolador PIC18F4550.....	100
Espectrómetro GER 1500 .....	101
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>102</b>

## **SENSOR SOLAR PARA APLICACIÓN ESPACIAL**

En este trabajo se describe el procedimiento de diseño, fabricación y pruebas de funcionamiento de un sensor solar utilizado para ayudar a establecer la orientación de un satélite en órbita terrestre. Este dispositivo consiste de un arreglo de cuatro celdas solares dispuestas en forma de cruz, que proporciona orientación en dos ejes de rotación independiente. Un circuito de acondicionamiento y amplificación se encarga de efectuar la resta de las señales de cada par de celdas solares y entregar un voltaje proporcional al ángulo de desviación con respecto al vector solar. Un programa escrito en lenguaje de alto nivel, cargado en la computadora de abordo, efectúa la calibración de las señales contra cambios de temperatura y degradación de la respuesta de las celdas solares a lo largo del tiempo, debido a la radiación ionizante. Se presentan las pruebas de funcionamiento en el laboratorio con un simulador solar, aproximando las condiciones de potencia de iluminación que se tendrán en órbita y se enlistan las pruebas necesarias para calificar este dispositivo para vuelo espacial.

**Objetivo:** Diseñar, construir y probar un sensor de Sol para determinar la orientación en dos ejes en un satélite.

**Justificación:** Es necesario aprovechar la oportunidad que se presenta de enviar al espacio este sensor, con la finalidad de obtener experiencia en el diseño y fabricación de dispositivos que funcionen bajo las severas condiciones ambientales del espacio exterior.

**Metodología:** Para llevar a cabo este proyecto de tesis se seguirá la siguiente metodología.

- Revisión bibliográfica
- Selección de celdas solares y materiales para el cuerpo del sensor, cables, conectores y adhesivo.
- Diseño y fabricación de los modelos de ingeniería del sensor solar.
- Diseño y fabricación del circuito de acondicionamiento.
- Programación del algoritmo de calibración en órbita.
- Realización de las pruebas de funcionamiento y calibración.

### **Resultados esperados:**

- Diseño y construcción de un sensor solar con componentes de grado militar o espacial.
- Generación de un algoritmo de compensación contra variaciones de temperatura y radiación ionizante presente en el espacio exterior.
- Acercamiento a las pruebas de calificación para vuelo espacial y los demás protocolos para su integración en el satélite.

## INTRODUCCIÓN

Antes de hacer una descripción del sensor de Sol diseñado y construido para este trabajo de tesis, es indispensable presentar algunos conceptos que fueron utilizados en este desarrollo. Esto se lleva a cabo en este capítulo. El efecto fotoeléctrico, como tema precursor para su posterior empleo en las celdas solares, es el primero de ellos. El medio ambiente espacial es de gran importancia ya que en este entorno es donde operará el sensor solar y efectos como la temperatura y la radiación ionizante influyen de manera directa en su funcionamiento. Al final del capítulo se hace una descripción del funcionamiento de las celdas solares y elementos básicos del sensor.

**1.1. Efecto fotoeléctrico**

El efecto fotoeléctrico es un fenómeno que consiste en la expulsión de electrones de un metal cuando incide luz sobre éste. En 1887, Heinrich Hertz descubrió el efecto fotoeléctrico después de observar que el arco que salta entre dos electrodos conectados a alta tensión alcanza distancias mayores, cuando se ilumina con luz ultravioleta, que cuando se deja en la oscuridad (Flores, 2007).

Tiempo después, en 1905 con los nuevos estudios de física cuántica que se empezaban a realizar, Einstein desarrolló la teoría del efecto fotoeléctrico suponiendo que la energía de un haz luminoso viaja en paquetes de energía llamados fotones. De esta forma se establecía lo que podía ocurrir cuando los fotones inciden sobre la superficie de un metal:

1. Los fotones son reflejados de acuerdo con las leyes de la óptica.
2. Desaparecen cediendo su energía para desplazar a los electrones

Debido a que la energía de un fotón es muy pequeña, ésta suele expresarse en  $eV$  (electronvolt). Un  $eV$  equivale a la energía cinética ganada por un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de exactamente un volt, es decir:

$$1 [eV] = 1.602 \times 10^{-19} [J] \quad (1.1)$$

Con la teoría del efecto fotoeléctrico, Einstein determinó que la energía de los fotones es directamente proporcional a la frecuencia de radiación (o longitud de onda), y no a la intensidad de la luz:

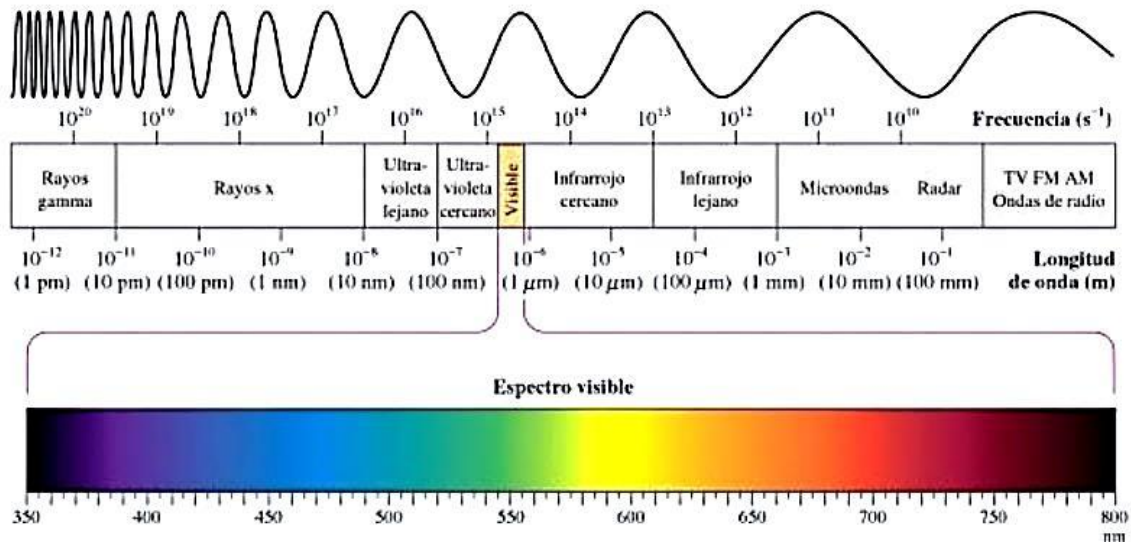
$$E = hf \tag{1.2}$$

$$E = h \frac{c}{\lambda} \tag{1.3}$$

donde:

- $E$ : Energía del fotón [J].
- $h$ : Constante de Planck [J · s].
- $f$ : Frecuencia de la onda [Hz].
- $c$ : Velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  [m/s]).
- $\lambda$ : Longitud de onda [m].

En la *Figura 1-1* se puede observar la variación de la frecuencia de radiación  $f$  a lo largo del espectro electromagnético. La energía de un fotón aumentará siempre y cuando aumente su frecuencia de propagación.



*Figura 1-1. Espectro electromagnético (Ebbing, 2010).*

Los estudios de Einstein también demostraron que la energía máxima liberada de los electrones sobre un metal ( $E_{m\acute{a}x}$ ), cuando son impactados por un fotón, es:

$$E_{m\acute{a}x} = hf - \phi \tag{1.4}$$

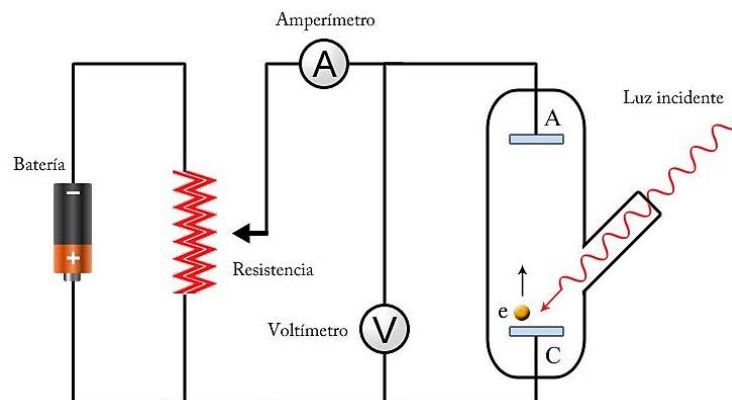
$$E_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} mV^2 \tag{1.5}$$



La ecuación (1.4) establece que el fotón trasporta cierta energía  $hf$  hacia la superficie. Parte de esa energía ( $\Phi$  función trabajo) es la energía mínima que se utiliza para que el electrón pase a través de la superficie del metal. El valor de la función de trabajo varía en cada tipo de material como puede visualizarle en la *Tabla 1-1*. La energía sobrante ( $hf - \Phi$ ) se trasmite al electrón en forma de energía cinética, aunque en la mayoría de los casos tendrá una energía menor a esta cantidad debido a las pérdidas ocurridas por coaliciones internas a medida que escapa del metal. La *Figura 1-2* muestra un diagrama esquemático del aparato básico para el estudio del efecto fotoeléctrico.

**Tabla 1-1. Tabla periódica de los elementos con información dada para muestras policristalinas. En la parte superior del símbolo se muestra el número atómico  $Z$  y en la inferior el valor de la función de trabajo  $\Phi$  en [eV] (Michaelson, 1977).**

IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIIB	VIII	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA		
3 Li 2.9	4 Be 4.98									5 B 4.45	6 C 5.0					
11 Na 2.75	12 Mg 3.66									13 Al 4.28	14 Si 4.85	15 P ...	16 S ...			
19 K 2.30	20 Ca 2.87	21 Sc 3.5	22 Ti 4.33	23 V 4.3	24 Cr 4.5	25 Mn 4.1	26 Fe 4.5	27 Co 5.0	28 Ni 5.15	29 Cu 4.65	30 Zn 4.33	31 Ga 4.2	32 Ge 5.0	33 As 3.75	34 Se 5.9	Br
37 Rb 2.16	38 Sr 2.59	39 Y 3.1	40 Zr 4.05	41 Nb 4.3	42 Mo 4.6	43 Tc ...	44 Ru 4.71	45 Rh 4.98	46 Pd 5.12	47 Ag 4.26	48 Cd 4.22	49 In 4.12	50 Sn 4.42	51 Sb 4.55	52 Te 4.95	I
55 Cs 2.14	56 Ba 2.7	57 La 3.5	72 Hf 3.9	73 Ta 4.25	74 W 4.55	75 Re 4.96	76 Os 4.83	77 Ir 5.27	78 Pt 5.65	79 Au 5.1	80 Hg 4.49	81 Tl 3.84	82 Pb 4.25	83 Bi 4.22	84 Po ...	At
87 Fr ...	88 Ra ...	89 Ac ...	90 Th 3.4	91 Pa ...	92 U 3.63											
			58 Ce 2.9	59 Pr ...	60 Nd 3.2	61 Pm ...	62 Sm 2.7	63 Eu 2.5	64 Gd 3.1	65 Tb 3.0	66 Dy ...	67 Ho ...	68 Er ...	69 Tm ...	70 Yb ...	71 Lu 3.3
			90 Th 3.4	91 Pa ...	92 U 3.63	93 Np ...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

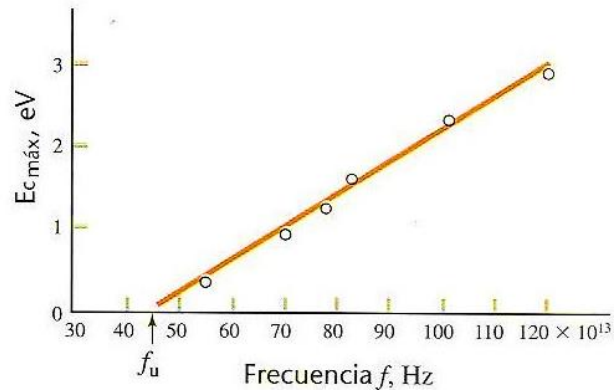


**Figura 1-2. Esquema del aparato utilizado para observar el efecto fotoeléctrico. El cátodo y el ánodo se encuentran en circuito abierto. La única forma de producir una corriente eléctrica es liberando electrones del cátodo a través de la radiación.**

En 1914, el físico estadounidense Robert Andrews Millikan obtuvo experimentalmente el valor de la constante de Planck basándose en la ecuación de Einstein. El valor aceptado de dicha constante es:

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ [J} \cdot \text{s]} = 4.136 \times 10^{-15} \text{ [eV} \cdot \text{s]} \quad (1.6)$$

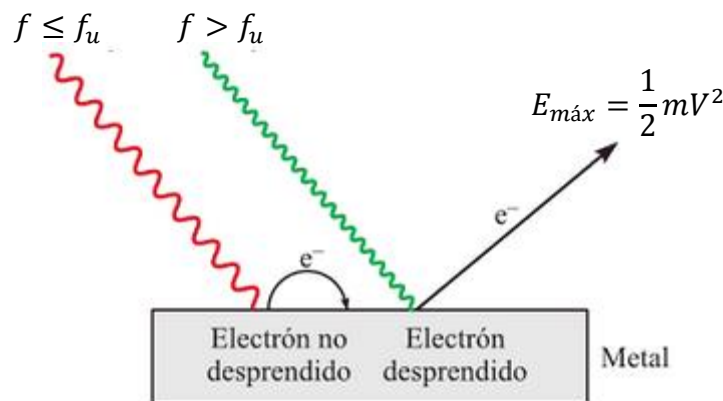
La *Figura 1-3* muestra una gráficas con los datos obtenidos por Millikan.



**Figura 1-3. Datos de Millikan sobre la energía cinética máxima “ $E_{máx}$ ” en función de la frecuencia “ $f$ ” para el efecto fotoeléctrico. Los datos caen sobre una recta que tiene una pendiente “ $h$ ” según predijo Einstein un decenio antes del experimento (Tipler, 2005).**

Los fotones con frecuencias menores que una frecuencia de umbral  $f_u$ , y por tanto, con longitudes de onda mayores que una longitud de onda umbral  $\lambda_u = c/f_u$ , no tienen energía suficiente para expulsar un electrón de un metal particular (Tipler, 2005). Un ejemplo de este fenómeno se visualiza en la *Figura 1-4*. La función trabajo es descrita como:

$$\Phi = hf_u \quad (1.7)$$



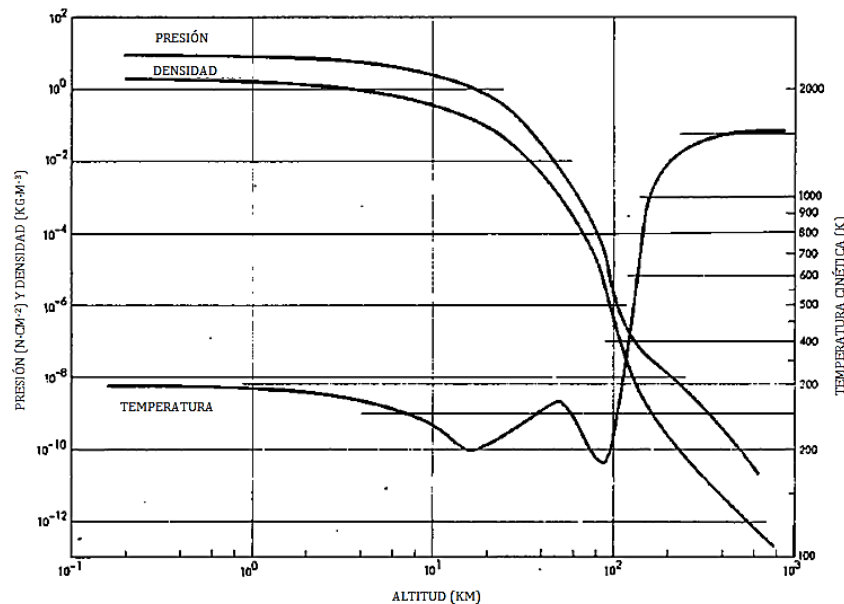
**Figura 1-4. Ejemplo del efecto fotoeléctrico. La luz verde es efectiva en la extracción de electrones de la superficie metálica, pero la luz roja no (Dominguez, 2005).**

El efecto fotoeléctrico ha sido fundamental para la construcción de transductores electrónicos capaces de interactuar con la radiación electromagnética. Su estudio es importante en este proyecto debido a que es el principio de funcionamiento en las celdas solares, elementos básicos en la elaboración del sensor solar.

## 1.2. El medio ambiente espacial

En el medio ambiente espacial encontramos condiciones extremas, en comparación con aquellas que se presentan en la Tierra. Por ello, si se requiere fabricar algún sistema que vaya a operar en el espacio, primero es importante conocer las características de este ambiente. Las condiciones de nuestro planeta (como la atmósfera y el campo magnético) nos brindan una protección contra la radiación ionizante, el gradiente de temperatura, el viento solar, el impacto de meteoritos y el alto vacío que se presentan en el espacio.

Es importante considerar las condiciones atmosféricas para cualquier vehículo que vaya a salir al espacio exterior. La atmósfera es una capa gaseosa que rodea a la Tierra, extendida desde el nivel del mar hasta altitudes de cientos de kilómetros. La variación de la presión, densidad y temperatura de la atmósfera se pueden visualizar en la [Figura 1-5](#).



**Figura 1-5. Variación de la presión, densidad y temperatura de la atmósfera respecto a la altitud (Rauschenbach, 1976).**

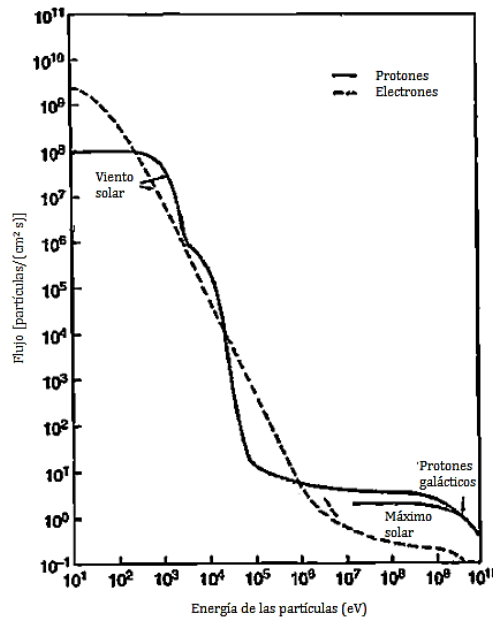
La última capa de atmósfera (exosfera) inicia a 500 [km] y termina alrededor de los 1,000 [km] dando inicio a la interacción con el espacio exterior. Tanto la presión como la densidad atmosférica decrecientan conforme aumenta la altitud, llegando así a tener valores muy pequeños una vez adentrados en el espacio, mientras que la

temperatura tiene una dinámica diferente ya que su valor depende de la capa atmosférica en donde se encuentre. Fuera de la atmósfera nos encontramos con el espacio vacío, el cual se compone de una mezcla de gases de baja densidad, conformado principalmente por hidrógeno y helio.

El Sol es la fuente más grande de calor en el sistema solar. Cuenta con una masa de  $2 \times 10^{30}$  [kg]<sup>1</sup>, un radio de 700,000[km] y una temperatura superficial promedio de 5,800 [°K]. Es la principal fuente de radiación del sistema solar y su comportamiento repercute considerablemente en las condiciones ambientales de la Tierra y de su espacio circundante.

La radiación puede manifestarse y clasificarse en dos tipos: electromagnética (sin masa) o de partículas (masa finita). La radiación electromagnética incluye rayos ultravioleta, X y gamma. La radiación por partículas contiene a los electrones, protones, neutrones y partículas alfa, entre otras. La radiación del ambiente espacial está compuesta de rayos cósmicos, radiación electromagnética, partículas atrapadas en los anillos de Van Allen y aquellas provenientes de las erupciones solares. El flujo de radiación se define como el número de partículas, fotones o energía que atraviesan un área dada en un tiempo determinado, usualmente expresado en [partículas · cm<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>] o [fotones · cm<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>].

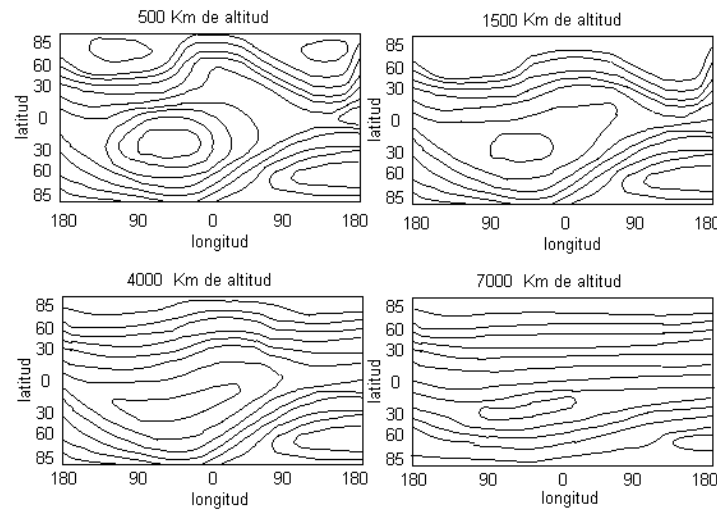
El viento solar es un gran flujo de plasma que viaja a gran velocidad, que ha sido generado en la capa exterior de la atmósfera solar. El flujo de radiación y su cantidad de energía, proveniente principalmente del viento solar, pueden visualizarse en la *Figura 1-6*.



*Figura 1-6. Espectros de electrones y protones (Fortescue, 2003).*

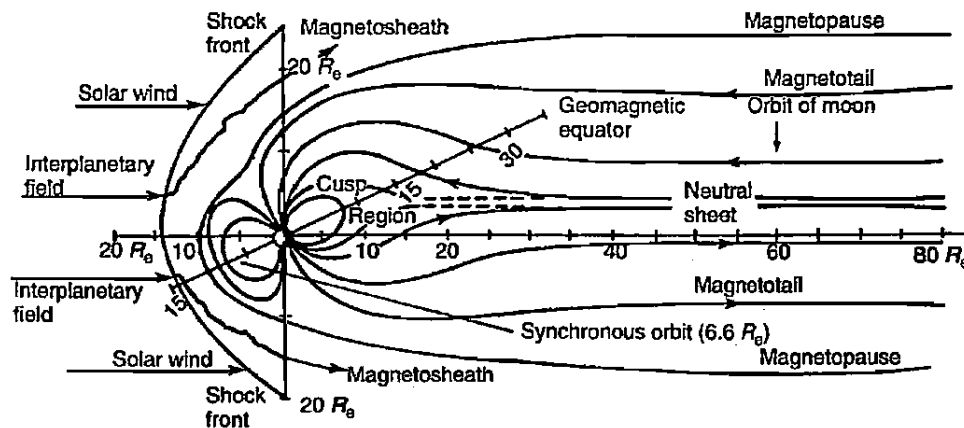
<sup>1</sup> Representa el 99.9% de la masa total del sistema solar.

Afortunadamente la atmosfera y el campo magnético protegen al planeta del viento solar. El campo magnético terrestre, también llamado geomagnético, se origina por el núcleo de hierro de la Tierra. Su intensidad total varía desde aproximadamente  $3 \times 10^{-5}$  teslas (T) en el ecuador, hasta  $6.5 - 7.0 \times 10^{-5}$  [T] en los polos magnéticos. Con el aumento en la altitud, la intensidad del campo decae aproximadamente con el cubo de la distancia. En la *Figura 1-7* puede observarse la distribución del campo a diferentes alturas.



*Figura 1-7. Distribución del campo geomagnético de la Tierra respecto a la altitud.*

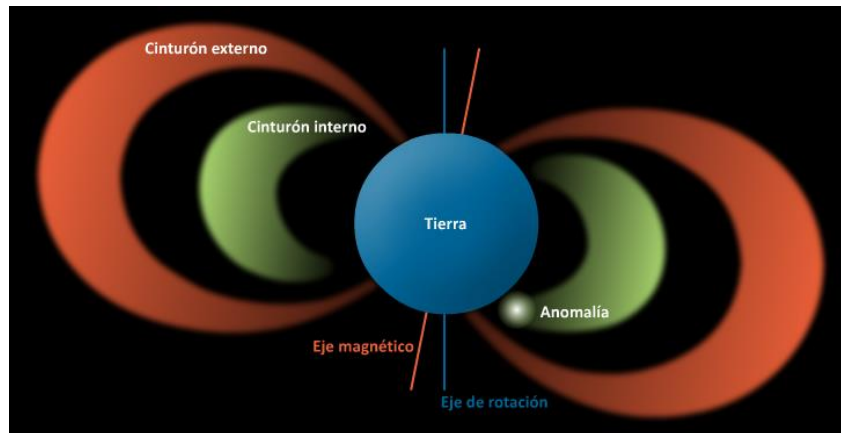
Aunque el campo magnético terrestre sirve de protección contra la radiación del espacio (*Figura 1-8*), ocurre un fenómeno interesante en el cual las partículas provenientes del espacio quedan atrapadas por el campo magnético formando así regiones de radiación conocidas como los anillos de Van Allen.



*Figura 1-8. Campo magnético de la Tierra<sup>2</sup> (Fortescue, 2003).*

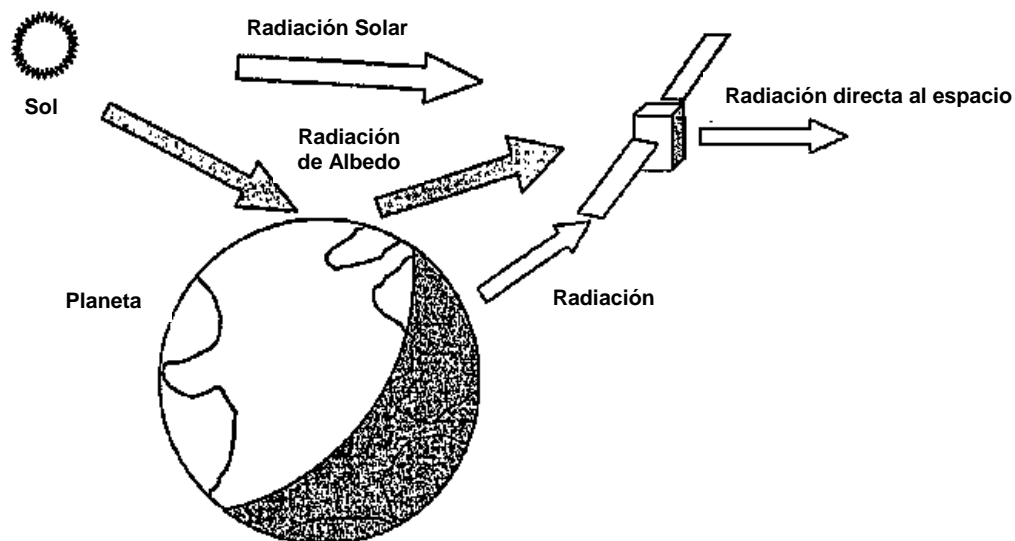
<sup>2</sup>  $R_e = 6,371$  [km] (Radio de la Tierra).

Existen básicamente dos anillos (*Figura 1-9*): el interno (compuesto de protones) ubicado entre 1,000 y 5,000 [km] sobre la superficie de la Tierra, y el externo (compuesto de electrones) situado entre los 15,000 y 30,000 [km].



*Figura 1-9. Anillos de Van Allen idealizado.*

Un aspecto muy importante que se debe considerar en órbita es la cantidad de energía térmica propagada a través de la radiación que recibe un vehículo espacial. Esta información es necesaria para efectos de conversión fotovoltaica y de ruido térmico en los sensores optoelectrónicos a bordo. En general cualquier vehículo o satélite interactúa térmicamente mediante la radiación de diversas fuentes en el espacio (*Figura 1-10*):



*Figura 1-10. Ambiente térmico típico de un vehículo espacial (Fortescue, 2003).*

- Radiación solar directa: La intensidad de la radiación solar  $J_s$  para cualquier cuerpo en el espacio ubicado a una distancia  $d$  puede encontrarse a través de la relación:

$$J_s = \frac{P}{4 \pi (d - R)^2} \quad (1.8)$$

Donde  $R$  es el radio del Sol (695,500 km),  $d$  es la distancia desde la superficie del Sol hacia cualquier punto en el espacio y  $P$  es la potencia total proveniente del astro ( $3.856 \times 10^{26}$  [W]). Con base en lo anterior, la intensidad de radiación sobre la superficie del Sol es de  $63.4356 \times 10^6$  [W/m<sup>2</sup>] mientras que fuera de la atmósfera terrestre cae hasta 1,371 [W/m<sup>2</sup>]. A este último valor se le conoce como **constante solar**.

- Radiación solar reflejada de planetas cercanos (radiación de albedo): La intensidad de este tipo de radiación está en función del tamaño del planeta y sus propiedades reflectoras, la altitud del vehículo y el ángulo de incidencia de los rayos del Sol.
- Energía térmica radiada de planetas cercanos (radiación planetaria): Energía radiada de un planeta (para este caso la Tierra) debido a sus propiedades físicas. Se ha determinado que la Tierra, para efectos prácticos, irradia energía con una intensidad de 237 [W/m<sup>2</sup>] a través de toda su superficie. Esta intensidad cae conforme la altitud aumenta. La radiación planetaria de la Tierra  $J_p$  en [W/m<sup>2</sup>] puede encontrarse a través de la siguiente expresión:

$$J_p = 237 \left( \frac{R_{rad}}{R_{orbit}} \right)^2 \quad (1.9)$$

Donde  $R_{rad}$  es el radio de la Tierra y  $R_{orbit}$  es el radio de la órbita donde opera el vehículo espacial.

- Radiación del vehículo hacia el espacio: El vehículo cuenta con una temperatura finita para su buen funcionamiento, por lo que también emite el exceso de calor en forma de radiación hacia el espacio.

Térmicamente hablando, todos los cuerpos emiten y absorben radiación electromagnética. La energía térmica irradiada por un cuerpo por unidad de tiempo es proporcional al área del cuerpo y a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Este resultado, obtenido empíricamente por Josef Stefan en 1879 y deducido teóricamente por Luudwing Boltzmann unos cinco años después, se denomina **ley de Stefan-Boltzmann** y se expresa en la forma

$$P_r = e\sigma AT^4 \quad (1.10)$$

En donde  $P_r$  es la potencia radiada en watts,  $A$  el área,  $e$  es la llamada emisividad del cuerpo y  $\sigma$  una constante universal que recibe el nombre de constante de Stefan-Boltzmann, cuyo valor es

$$\sigma = 5.6703 \times 10^{-8} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right] \quad (1.11)$$

La emisividad  $e$  es una fracción que varía de 0 a 1 y que depende de la composición de la superficie del objeto. Un cuerpo que absorbe toda la radiación que incide sobre él posee una emisividad igual a 1 y recibe el nombre de **cuerpo negro**. Un cuerpo negro también es un radiador ideal.

A medida que aumenta la temperatura del cuerpo, crece la cantidad de energía que emite y se extiende a frecuencias cada vez mayores (y longitudes de onda cada vez más cortas). Para el análisis de la radiación se introduce el concepto de **emitancia**<sup>3</sup>. La emitancia  $M$  es la energía emitida por radiación  $Q$  desde una superficie  $A$  por unidad de tiempo  $t$ .

$$M = \frac{Q}{t A} \quad (1.12)$$

$$M = \frac{\phi}{A} \quad (1.13)$$

Para el estudio detallado de la radiación por cada longitud de onda se habla de la emitancia espectral:

$$M_\lambda = \frac{\phi}{A \lambda} \quad (1.14)$$

La emitancia radiante espectral de un cuerpo negro puede describirse por la **ley de Pank**.

$$M_\lambda(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \mu\text{m}} \right] \quad (1.15)$$

Dónde:

$$c_1 = 3.7418 \times 10^8 \text{ [W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}]$$

$$c_2 = 1.4388 \times 10^4 \text{ [\mu m} \cdot \text{K]}$$

$\lambda$ : Longitud de onda [ $\mu\text{m}$ ]

$T$ : Temperatura del cuerpo negro [ $K$ ]

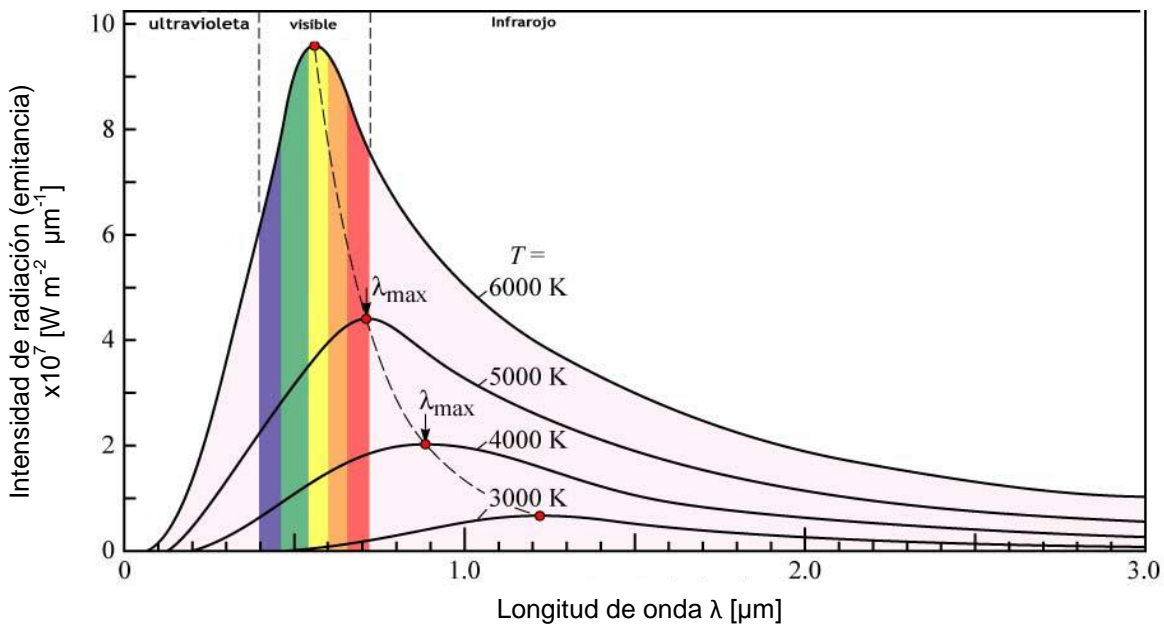
<sup>3</sup> En algunas fuentes este término también es conocido como *exitancia*.



La longitud de onda para la cual la potencia es un máximo varía inversamente con la temperatura. Este resultado se conoce como **ley del desplazamiento de Wien**:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2.898 \text{ [mm} \cdot \text{K]}}{T} \quad (1.16)$$

En la *Figura 1-11* se muestra la potencia radiada por un cuerpo negro en función de la longitud de onda para diferentes temperaturas.



*Figura 1-11. Potencia emitida específica (emitancia) en función de la longitud de onda correspondiente a la radiación de un cuerpo negro a diferentes temperaturas mostrando la variación de  $\lambda_{m\acute{a}x}$  (Perón, 2012).*

### 1.3. Celdas solares

Las celdas solares son dispositivos que convierten la energía solar en eléctrica utilizando el efecto fotoeléctrico. Están conformados de dos electrodos separados por una delgada capa de semiconductor. Las celdas son ampliamente utilizadas para detectar y medir la intensidad de la luz en los fotómetros, así como en detectores de orientación solar, como el caso aquí presentado. Su uso en paneles solares espaciales está ampliamente difundido para recargar las baterías de las naves y vehículos en órbita.

Las celdas solares comúnmente se fabrican de silicio debido a que es un material semiconductor y muy abundante. Sus propiedades como semiconductor se puede analizar fácilmente a través de la Teoría de Bandas (*Figura 1-12*).

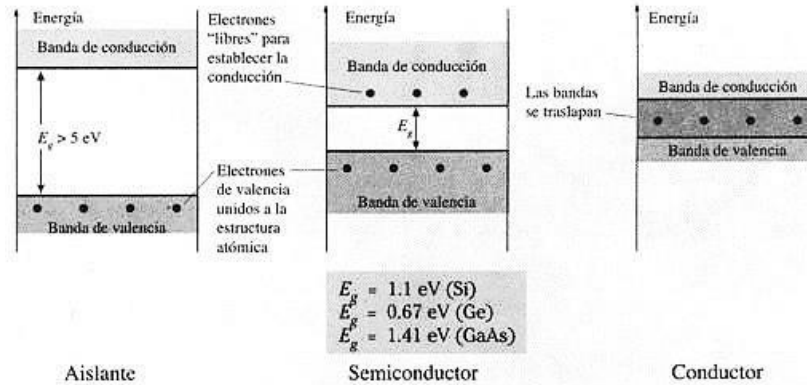


Figura 1-12. Modelo de la Teoría de Bandas (Boylestad, 1997)

Para que un material sea buen conductor de corriente eléctrica debe haber poca o ninguna separación entre la banda de conducción y la de valencia (que pueden llegar a solaparse). El flujo de corriente eléctrica se produce cuando los electrones pasan de la banda de valencia a la banda de conducción. Cuando la separación entre bandas sea mayor, el material se comportará como un aislante. En ocasiones, la separación entre bandas permite el salto entre las mismas de sólo algunos electrones. En estos casos, el material se comportará como un semiconductor. Para que el salto de electrones entre bandas en este caso se produzca el material deberá estar sometido a altas presiones, temperatura elevada, radiación electromagnética y/o añadiendo impurezas (semiconductores extrínsecos).

La [Figura 1-13](#) muestra un diagrama esquemático de una típica celda solar y el proceso que ocurre cuando se presenta el efecto fotoeléctrico. La celda está compuesta de dos regiones principales, las cuales están adaptadas para conducir cargas negativas y positivas. Un material tipo N conduce electrones, mientras que un material tipo P conduce cargas positivas. Los átomos de silicio en la celda solar están unidos a través de enlaces covalentes. El silicio tipo N está dopado con fósforo, que contiene un electrón adicional de valencia respecto al silicio, lo que genera un exceso de electrones. El silicio tipo P está dopado con boro, que tiene un electrón menos que el silicio, de manera que se generan huecos.

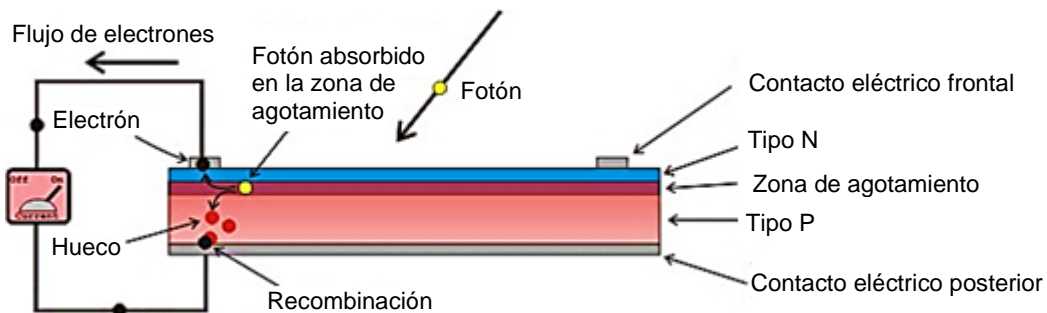
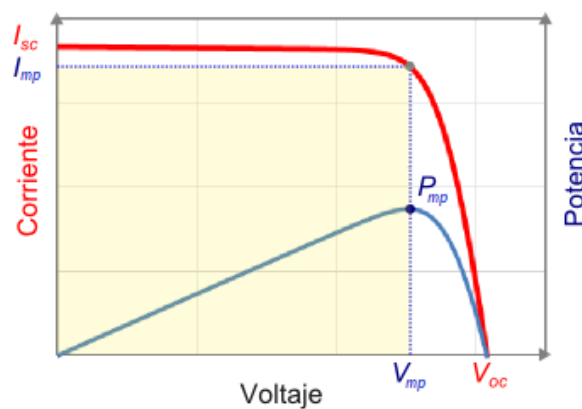


Figura 1-13. Estructura básica y funcionamiento de una celda solar.

Cuando los fotones contienen una energía mayor que aquella presente en la banda prohibida del semiconductor ( $hf \geq E_g$ ) caen en la zona de agotamiento, rompiendo la unión entre los átomos y creando un par de cargas libres (e-h). La existencia de campo eléctrico interno separa este par de cargas y las conduce hacia su respectiva región

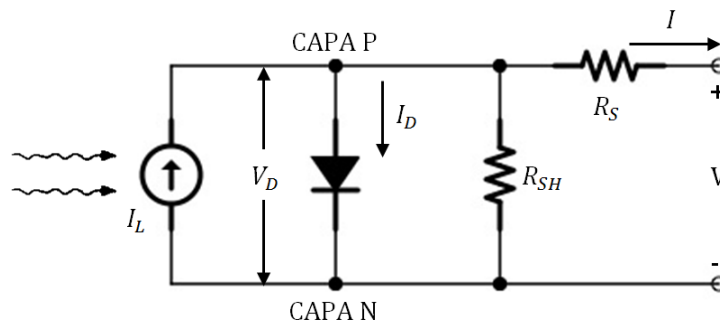
El comportamiento de la corriente respecto voltaje (I-V) y potencia respecto a voltaje (P-V) de una celda solar es ilustrada en la *Figura 1-14*. En esta figura se logran apreciar tres puntos importantes:

- $I_{sc}$ , corriente en corto circuito (voltaje de la celda es cero).
- $P_{mp}$ , punto de máxima potencia de salida.
- $V_{oc}$ , voltaje a circuito abierto (corriente de la celda es cero).



*Figura 1-14. Curva I-V y P-V característica de una celda solar (Sánchez, 2011).*

Ha sido posible modelar el comportamiento de una celda solar con suficiente aproximación basándose en el funcionamiento de un diodo. Este modelo consiste en una fuente de corriente, que satura a un diodo y tiene pérdidas de corriente y voltaje, representadas por medio de resistencias, como se ilustra en la *Figura 1-15*.



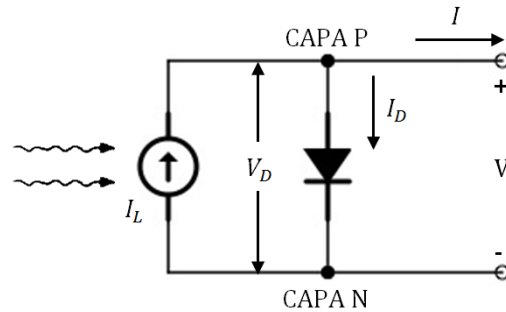
*Figura 1-15. Circuito equivalente de una celda solar.*

$$I = I_L - I_S \left( \exp \left[ \frac{e(V - I R_S)}{A k T} \right] - 1 \right) - \frac{V}{R_{SH}} \tag{1.17}$$

donde:

- $A$ : Coeficiente de emisión<sup>4</sup>.
- $R_S$ : Resistencia en serie de la celda
- $R_{SH}$ : Resistencia en paralelo.
- $I$ : Corriente de salida de la celda
- $I_L$ : Corriente generada por la luz.
- $I_S$ : Corriente de saturación del diodo.
- $e$ : Carga del electrón ( $1.602 \times 10^{-19}$  [C]).
- $V$ : Voltaje terminal de la celda.
- $k$ : Constante de Boltzmann ( $1.3806 \times 10^{-23}$  [J/K]).
- $T$ : Temperatura absoluta de la celda.

Considerando el caso ideal donde el valor de la resistencia en paralelo es muy grande y el valor de la resistencia en serie muy pequeña, la ecuación (1.17) se puede reducir y el modelo electrónico se simplificaría como lo indica la *Figura 1-16*.



**Figura 1-16. Modelo ideal de una celda solar.**

$$I = I_L - I_S \left( \exp \left[ \frac{e V}{A k T} \right] - 1 \right) \tag{1.18}$$

Otro factor importante que influye en la corriente de salida de la celda es la inclinación con la que incide la radiación solar. Para explicar este comportamiento se utilizará la *Figura 1-17*. La radiación del Sol, al llegar perpendicularmente a la superficie de la celda, cubre un área determinada  $A_0$ ; al existir una inclinación, la misma intensidad de radiación por unidad de área cubrirá un plano mayor a la original ( $A_1$ ), disminuyendo de esa forma la corriente de salida.

<sup>4</sup> Dependiente del proceso de fabricación del diodo. Suele adoptar valores entre 1 para el germanio y del orden de 2 para el silicio.

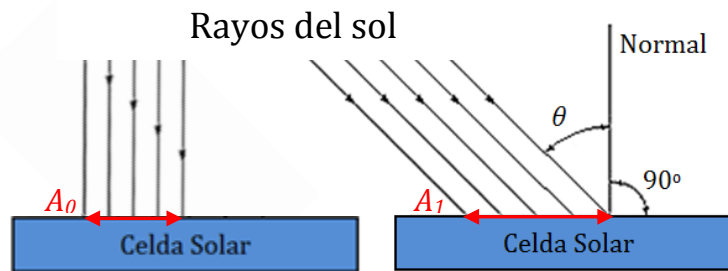


Figura 1-17. Ángulo de incidencia de rayos solares en una celda solar.

Por lo tanto, la corriente máxima que puede producir una celda sólo se llevará a cabo cuando la radiación incida ortogonalmente sobre la misma. La relación entre la corriente máxima respecto a la corriente de salida producida por la inclinación se puede determinar a través de la trigonometría mediante la siguiente expresión.

$$I = I_{m\acute{a}x} \cos \theta \quad (1.19)$$

Por otra parte, la eficiencia  $\eta$  de una celda solar se define como:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1.20)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{p_{in} A_c} \quad (1.21)$$

Donde  $P_{out}$  es la potencia eléctrica de salida en la celda,  $P_{in}$  es la potencia entregada de la celada,  $p_{in}$  es el nivel iluminación solar por unidad de área o el valor de la constante solar, y  $A_c$  es el área activa sobre la cual incide la energía solar.

El “factor de forma” (fill factor) es un término que se usa para describir cuantitativamente la forma de la curva I-V. El factor de forma se define como:

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1.22)$$

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1.23)$$

Si se supone el caso ideal donde la curva I-V tiene una forma cuadrada, entonces la potencia máxima de salida  $P_{mp}$  puede obtenerse a partir del producto entre  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$ , dando como resultado un factor de forma igual a 1. La [Figura 1-18](#) muestra la forma que tendría la curva I-V al variar el factor de forma.

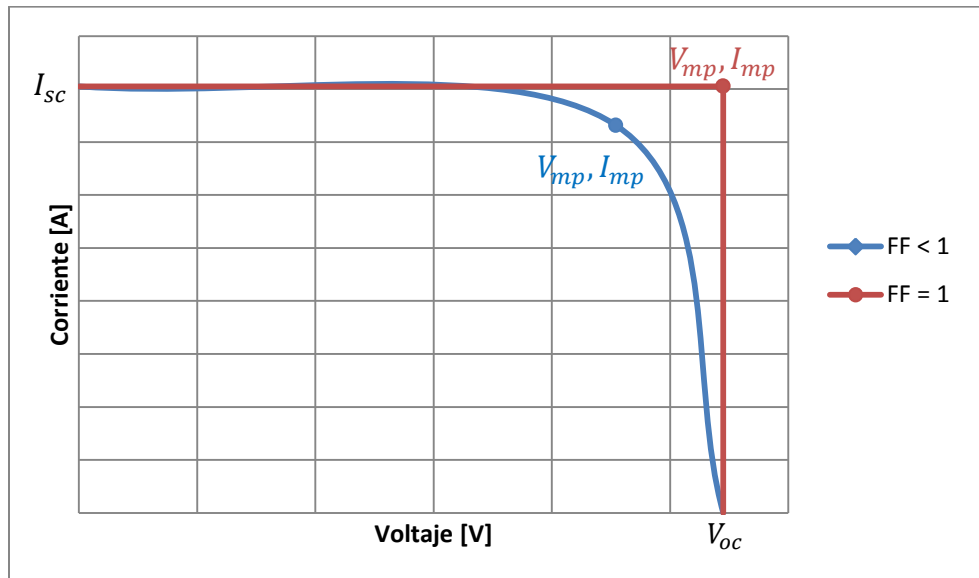


Figura 1-18. Curva I-V de una celda solar al variar el factor de forma.

En la realidad, el factor de forma es siempre menor que la unidad y en el diseño de celdas solares se procura tener un factor de forma lo más alto posible. Este factor es de gran utilidad cuando se desea comparar diferentes celdas solares bajo las mismas condiciones.

### 1.3.1. Respuesta ante variaciones de temperatura

Un incremento de temperatura mientras la celda está funcionando produce un ligero incremento en la corriente de corto circuito y un decremento considerable en el voltaje. Esto se debe a que el aumento en la temperatura de los electrones aumenta la conductividad en la celda provocando así un decremento en la diferencia de potencial de la juntura P-N. Por lo que, la variación de estos parámetros repercute directamente en la eficiencia de conversión de la celda (Figura 1-19).

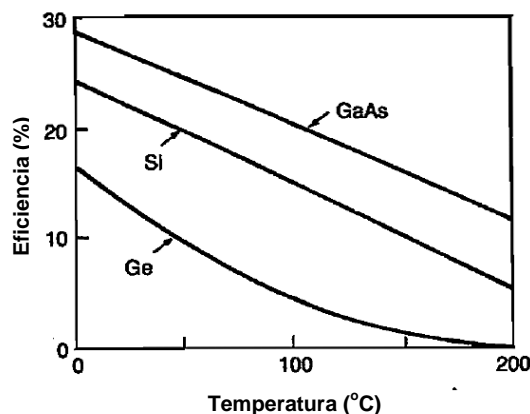


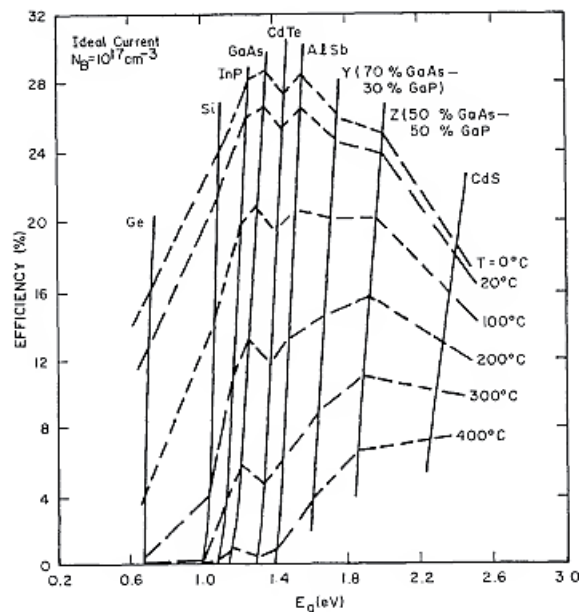
Figura 1-19. Eficiencia teórica de una celda solar en función de la temperatura de tres materiales semiconductores (Fortescue, 2003).

Para el análisis del efecto de la temperatura sobre una celda, se establecen los coeficientes de temperatura ( $\beta_I, \beta_V$ ). Estos coeficientes indican la variación de la corriente y el voltaje de la celda respecto a la temperatura.

$$\beta_I = \frac{dI}{dT} \tag{1.24}$$

$$\beta_V = \frac{dV}{dT} \tag{1.25}$$

El voltaje de salida de una celda de silicio disminuye cuando ocurre un aumento de temperatura, a una tasa que puede variar desde los 2 [mV/°C] hasta 2.5 [mV/°C], mientras que la corriente de salida se incrementa a un ritmo de menos del 0.1 por ciento por cada grado Celsius. En la *Figura 1-20* se puede apreciar los efectos en la variación de la temperatura sobre la eficiencia en diferentes semiconductores clasificados en función del ancho de su banda prohibida.



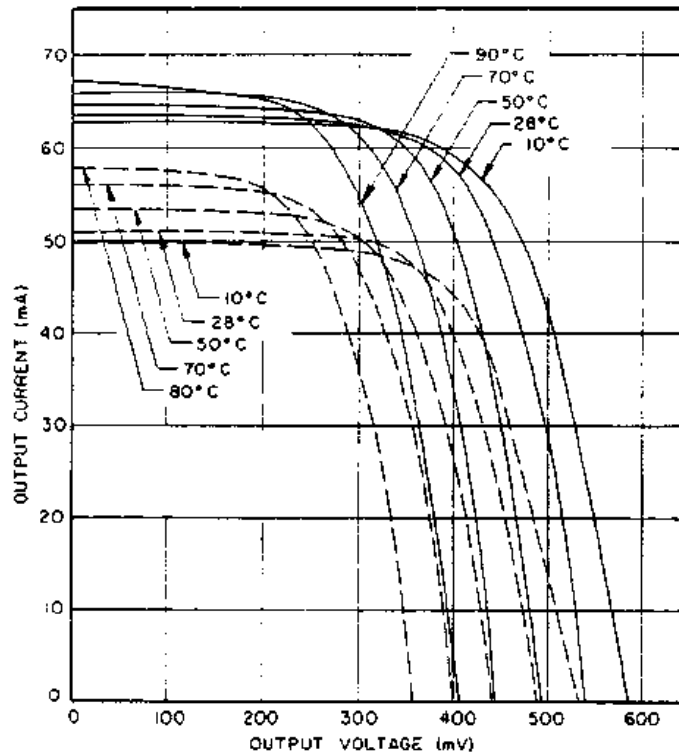
**Figura 1-20.** Eficiencia de conversión como función del ancho de banda prohibida para características ideales de corriente y voltaje. En las líneas punteadas se aprecia el cambio de eficiencia conforme varía la temperatura.

### 1.3.2. Degradación por radiación ionizante

La radiación de las celdas solares por electrones, protones, neutrones, y otras partículas pueden producir daño físico permanente a nivel atómico en la celda. Este daño influye en los parámetros de la celda, como la máxima potencia de salida, la

eficiencia de conversión y la respuesta espectral. Generalmente, los protones y neutrones producen una degradación mayor que los electrones, esto se refleja directamente en las propiedades eléctricas, disminuyendo los valores de  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  y  $P_{mp}$ .

La curva característica I-V de una celda solar antes y después de una fuerte dosis de radiación (aproximadamente  $10^{15}$  [ $p \cdot cm^{-2}$ ]) de electrones con energía de 1 [MeV] son ilustradas en la *Figura 1-21*. En esta figura se puede observar un incremento en el coeficiente de temperatura para  $I_{sc}$  mientras que el coeficiente de temperatura para  $V_{oc}$  permanece casi constante.



*Figura 1-21. Variación de la curva característica I-V de una celda solar con temperatura antes (línea continua) y después (línea punteada) de la radiación, ejemplo ilustrativo (Rauschenbach, 1976).*

#### 1.4. Proyecto Cóndor UNAM-MAI

El proyecto del microsatélite<sup>5</sup> CONDOR UNAM-MAI tendrá la misión de realizar investigaciones en el campo de los precursores ionosféricos de alta intensidad y observación de la superficie de la Tierra. Se desarrolla en el contexto del incipiente crecimiento de la industria aeroespacial mexicana y bajo el marco de cooperación para la transferencia tecnológica en el área aeroespacial entre México y la Federación Rusa, en el cual la Facultad de Ingeniería de la UNAM es la institución colaboradora

<sup>5</sup> Satélite con una masa comprendida entre 10 a 100 [kg].



por parte de México y el Instituto de Aviación de Moscú por la parte rusa. El proyecto cuenta además con la participación de otras instituciones académicas de carácter internacionales como la Universidad Nacional Central de Taiwán los cuales aportan parte de la instrumentación de la carga científica que se instalará dentro de la plataforma satelital (Ramírez, 2013).

El satélite Cóndor tendrá como objetivo comprobar una teoría desarrollada por científicos rusos, estadounidenses y españoles: entre 48 y 72 horas antes de que se presente un sismo de magnitud 5 grados Richter, hay perturbaciones en la ionósfera, en los campos magnéticos, y emisión de gases en ciertas regiones de la órbita Terrestre (Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro, 2012).

En este trabajo de tesis se describe el procedimiento de diseño, fabricación y pruebas de funcionamiento de un sensor solar utilizado para ayudar a establecer la orientación del satélite Cóndor tomando con referencia dos ejes rotación en el espacio los cuales a su vez conformarán el plano del sensor. Cabe aclarar que este instrumento no será el responsable del control de orientación en órbita.



## DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL SENSOR SOLAR

Un sensor de Sol es básicamente un dispositivo capaz de detectar la presencia de dicho astro. En aplicaciones espaciales, este tipo de sensores permite localizar el Sol para utilizarlo como un punto de referencia y llevar a cabo el control en la orientación de satélites. En este capítulo se describirá el estado del arte en sensores solares, así como la selección de materiales, componentes, diseño y manufactura del sensor solar propuesto. Por último se llevarán a cabo pruebas y con los resultados obtenidos se caracterizará su comportamiento a través de un modelo matemático.

## 2.1. Sensores de Sol

Existen diferentes tipos de sensores de Sol, clasificados por el tipo de señal que generan y por su diseño. Por el tipo de señal se clasifican en analógicos y digitales. En los sensores digitales, como el de la [Figura 2-1](#), se obtiene directamente una lectura en formato binario, esto es, la desviación del vector solar en un eje es detectada por varios transductores colocados en forma tal que proporcionan el valor binario directamente desde el bit más significativo hasta el menos significativo.

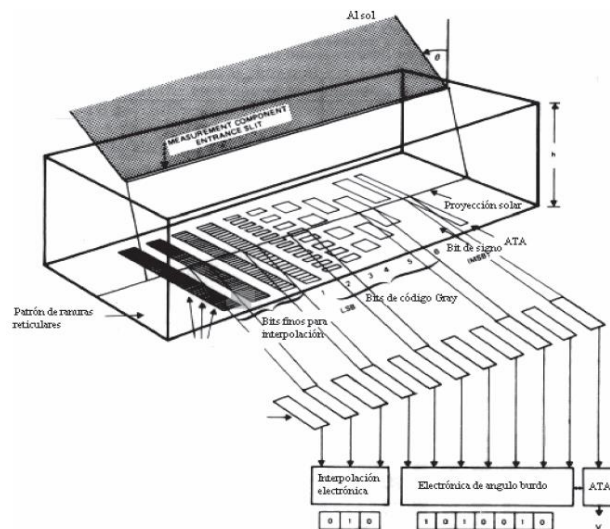
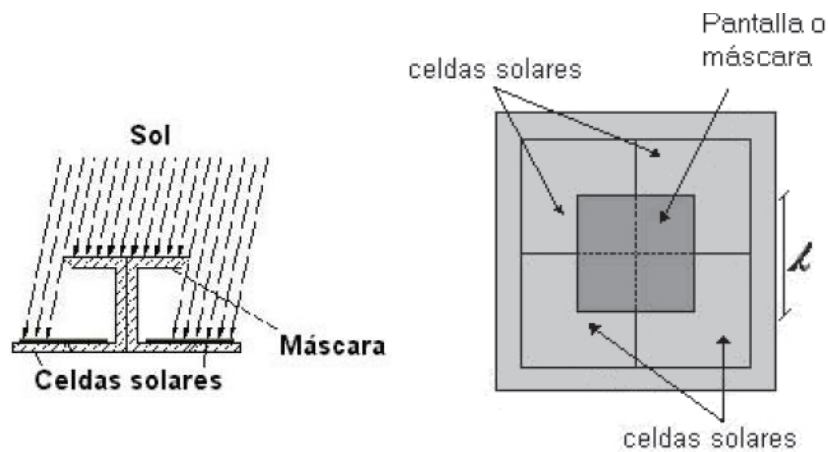


Figura 2-1. Sensor solar digital (Ruíz, 2003).

El sensor solar digital es capaz de detectar la desviación del vector solar sólo en uno de los ejes. Si se requiere conseguir mayor resolución de lectura, es necesario un mayor número de máscaras (tantas como diferentes combinaciones requieran la lectura). Esto es una desventaja desde el punto de vista de manufactura para resoluciones altas.

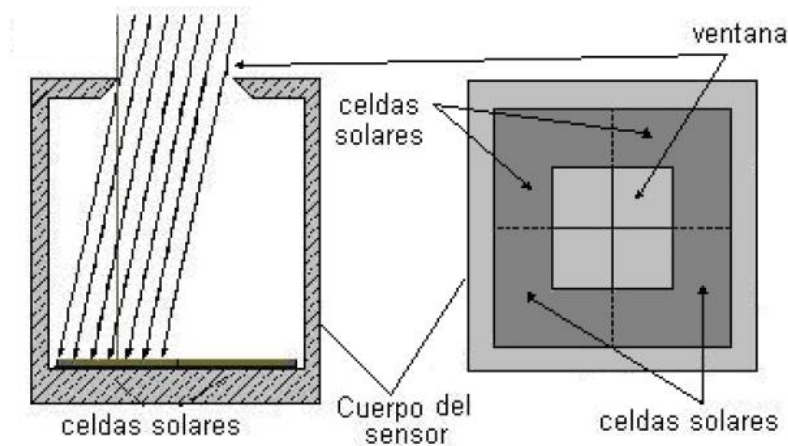
Los sensores solares que producen una señal de salida analógica pueden dividirse a su vez sensores con detectores externos o internos. Los sensores con detectores externos utilizan una máscara superior que intercepta los rayos solares. Esto es válido para un eje, pero es posible ampliarlo para dos si se colocan cuatro celdas como se muestra en la *Figura 2-2*.



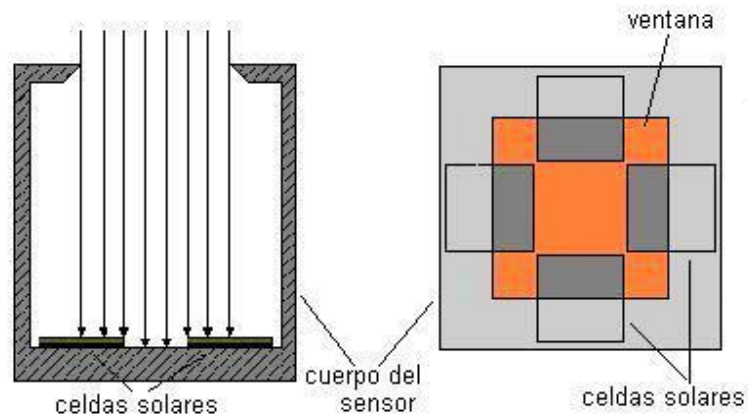
*Figura 2-2. Esquema del sensor solar analógico de detectores externos. A la izquierda se visualiza un corte lateral de un sensor de un eje y a la derecha la vista superior de un sensor para dos ejes (Ruíz, 2003).*

En los sensores con detector interno existe en la parte superior una ventana cuadrada utilizada como máscara, ésta permite que la iluminación en las dos celdas de cada eje sea la misma cuando el Sol se encuentra perpendicular a las mismas, por lo tanto, si se necesitan dos ejes es necesario contar con un arreglo de cuatro celdas. Las cuatro celdas pueden colocarse de dos formas: arreglo de ventana (*Figura 2-3*) o cruzado (*Figura 2-4*). En el arreglo de ventana, las señales de las cuatro celdas se involucran para obtener la inclinación en ambos ejes, mientras que en el arreglo cruzado, el valor de cada eje se determina por su respectivo par de celdas.

Se ha seleccionado un sensor de tipo analógico para el proyecto, debido que permite una mayor facilidad en su diseño y manufactura. Los sensores digitales son más complejos de construir si se desea aumentar la resolución. El sensor cuenta con un arreglo de cuatro celdas solares en arreglo cruzado. Cada par de celdas servirá para indicar la inclinación con respecto a un eje, en función de la cantidad de luz solar que incida sobre ellas. Se seleccionó un sensor con arreglo interno para que los elementos detectores (celdas solares) se encuentran protegidos contra partículas provenientes del espacio y las cuales podrían ocasionar daños físicos en las celdas.



**Figura 2-3.** Esquema del sensor solar de tipo interno con arreglo de ventana. A la izquierda se visualiza un corte lateral y a la derecha una vista superior (Ruíz, 2003).



**Figura 2-4.** Esquema del sensor solar seleccionado de tipo interno con arreglo cruzado. A la izquierda se visualiza un corte lateral y a la derecha una vista superior (Ruíz, 2003).

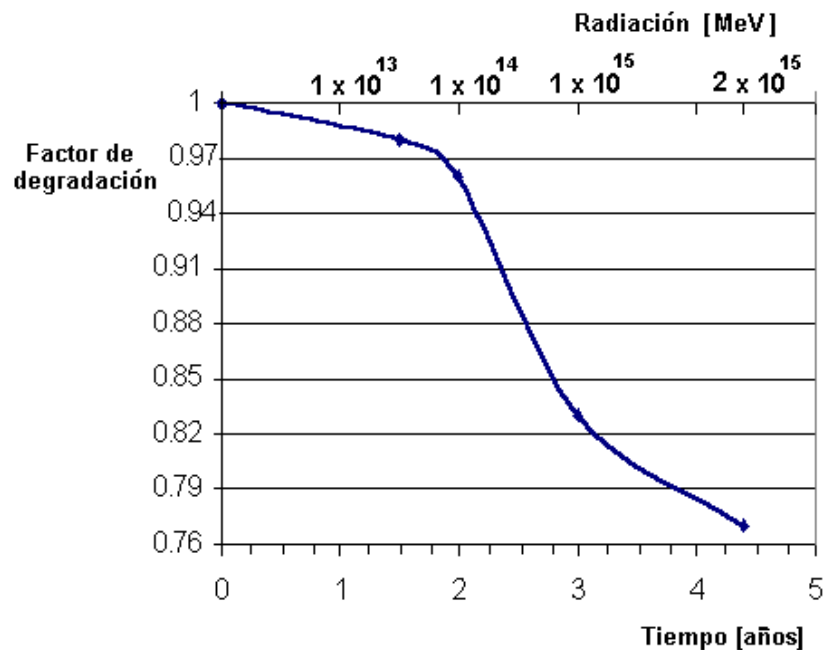
## 2.2. Selección de celdas solares

Como ya se ha mencionado, las celdas solares son el elemento principal del sensor. Debido a su interacción directa con el ambiente espacial, es necesario seleccionar celdas que puedan funcionar en este tipo de condiciones. Se optó por utilizar las celdas solares de silicio K4710 de la compañía *Spectrolab*. Además de tener una calidad de grado espacial, las características de este modelo radican principalmente en su alta eficiencia y bajo costo. En este caso la eficiencia no es un factor determinante, solamente sus características de funcionamiento en el medio ambiente espacial.

La celda de silicio cuenta con una masa total de  $0.055 \text{ [g/cm}^2\text{]}$ , dato que será importante para el cálculo de la masa final del sensor. Algunos de los parámetros eléctricos indicados en la hoja técnica de la celda K4710<sup>6</sup> son:

$$\begin{aligned} I_{sc} &= 39.3 \text{ [mA/cm}^2\text{]} \\ I_{mp} &= 36.6 \text{ [mA/cm}^2\text{]} \\ V_{mp} &= 0.454 \text{ [V]} \\ P_{mp} &= 16.6 \text{ [mW/cm}^2\text{]} \\ V_{oc} &= 0.545 \text{ [V]} \\ \eta &= 12.3\% \\ \beta_{I_{sc}} &= +20 \text{ [}\mu\text{A}/(\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}\text{]} \\ \beta_{V_{mp}} &= -2.330 \text{ [mV/ } ^\circ\text{C)}\text{]} \\ \beta_{V_{oc}} &= -2.20 \text{ [mV/} ^\circ\text{C)}\text{]} \end{aligned}$$

En el Instituto de Geografía de la UNAM se han llevado a cabo diversos proyectos con este tipo de celdas. Con uno de estos estudios se logró caracterizar la curva de respuesta de la celda solar causada por la radiación ionizante (*Figura 2-5*). Esta información es de gran importancia para el sensor solar ya que permite estimar la compensación debido a factores como el tiempo y la radiación.



**Figura 2-5.** Curva que relaciona el porcentaje de disminución en respuesta de las celdas K4710, con la degradación producida por la radiación ionizante a lo largo del tiempo en condiciones AM0 (Ruíz, 2003).

<sup>6</sup> A una intensidad de luz solar de  $135.3 \text{ [mW/cm}^2\text{]}$  y temperatura de  $28 \text{ [} ^\circ\text{C)}\text{]}$ .

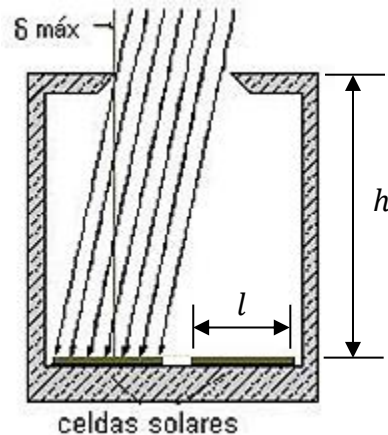
### 2.3. Diseño mecánico y construcción del cuerpo del sensor

Para la construcción del chasis del sensor solar, se debe considerar las siguientes especificaciones propuestas para cada eje:

El rango de medición:  $-22.0^\circ$  a  $+22.0^\circ$ .

La resolución:  $0.1^\circ$ .

El error absoluto:  $0.1^\circ$ .



*Figura 2-6. El ángulo de incidencia máxima de los rayos solares en el sensor depende de la altura de la ventana y de las dimensiones de las celdas solares.*

Estas especificaciones nos proporcionan parámetros para el diseño como es la altura interna  $h$  que tendrá el sensor, es decir, la distancia de las celdas y la máscara superior. Con base en la [Figura 2-6](#) y utilizando principios trigonométricos es posible obtener la relación del ángulo de incidencia respecto a la altura:

$$\delta_{\text{máx}} = \tan^{-1}\left(\frac{0.5 l}{h}\right) \quad (2.1)$$

donde:

$\delta_{\text{máx}}$ : Ángulo de incidencia máximo de los rayos solares la celda.

$l$ : Longitud de la celda solar.

$h$ : Altura o distancia entre la celda y la máscara superior.

Despejando  $h$  de la ecuación (2.1) y considerando que se va a utilizar una celda cuadrada estándar de longitud  $l = 2$  [cm] tenemos

$$h = \frac{1}{\tan \delta_{\text{máx}}} \quad (2.2)$$

Gracias a la geometría del sensor, podemos establecer una relación entre ángulo de incidencia y el porcentaje de área que es iluminado sobre cada celda de un eje. Si el ángulo tiene un valor de  $\delta_{m\acute{a}x}$ , una de las celdas estará completamente iluminada mientras que la otra estará totalmente bajo la sombra y por tanto, no generará una corriente eléctrica. Cuando la luz solar incida ortogonalmente sobre el sensor ( $0^\circ$ ) se iluminará la mitad de la superficie de cada celda, lo que provocará que cada una entregue la mitad de corriente eléctrica en comparación a la que entregaría cuando está totalmente iluminada. Cuando el ángulo sea de  $-\delta_{m\acute{a}x}$  la celda que estuvo iluminada originalmente estará ahora cubierta totalmente por la sombra y sucederá lo opuesto con la otra celda. Lo descrito anteriormente se puede representar matemáticamente mediante la siguiente expresión:

$$I = \left( \pm \frac{\theta}{2 \cdot \delta_{m\acute{a}x}} + 0.5 \right) I_o \quad (2.3)$$

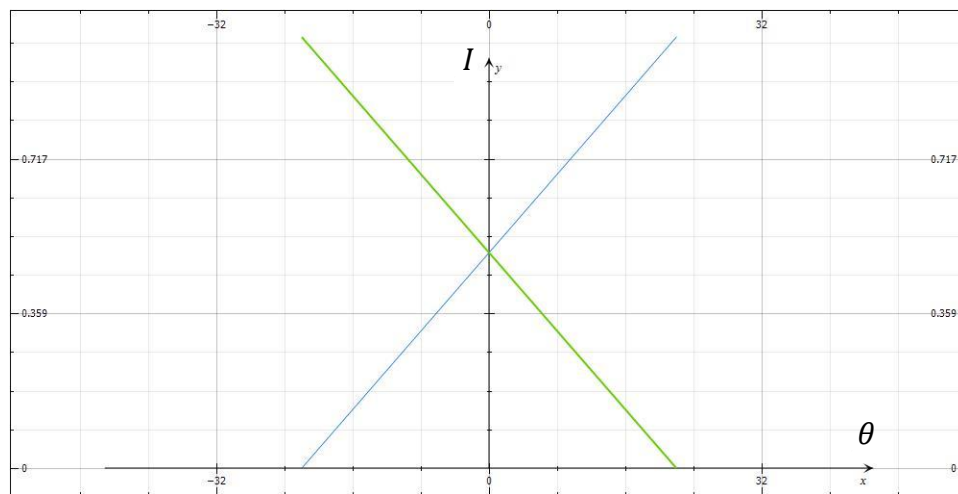
donde:

$\theta$ : Ángulo de incidencia de la luz solar o inclinación del sensor.

$I_o$ : Corriente que se generaría en la celda en caso de no existir una máscara.

$I$ : Corriente que se produce al interactuar con la sombra que genera la máscara.

Para un  $\delta_{m\acute{a}x}$  de 22 [grados] correspondería una altura de 2.475 [cm]. Sin embargo, se optó por utilizar una altura de 2.4 [cm] la cual permite un rango de hasta 22.62°. El signo positivo de la ecuación corresponde a una de las celdas de un eje, mientras que el signo negativo corresponde a la ecuación de la otra. La gráfica de la ecuación para ambos casos se visualiza en la [Figura 2-7](#).

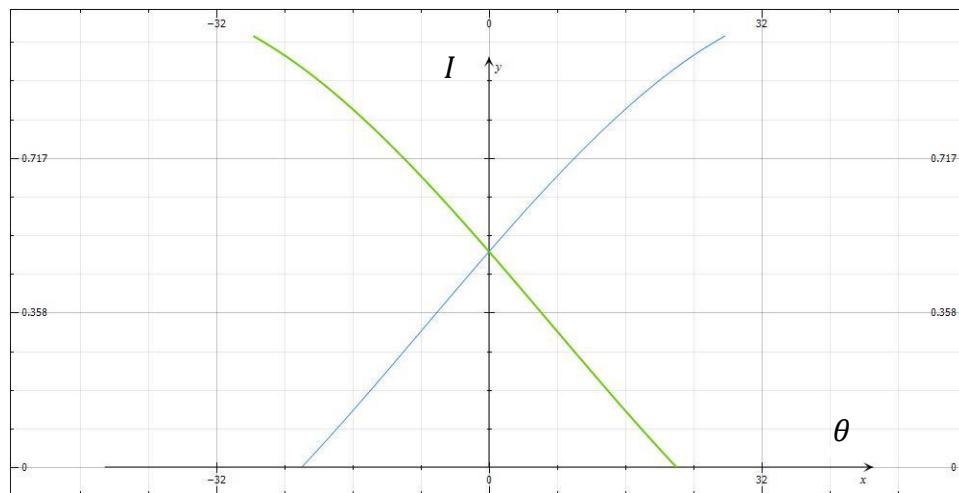


**Figura 2-7. Representación gráfica de la ecuación (2.3), tomando como datos  $\delta_{m\acute{a}x} = 22^\circ$  y unitaria la corriente  $I_o$ . La gráfica azul representa el comportamiento de una celda (signo positivo) mientras que la verde representa la otra celda del mismo eje (signo negativo).**



En caso de no existir una máscara que genere sombra, la corriente  $I_o$  se comportaría como lo establece la ecuación (1.19). Por tanto, sustituyendo dicha información en la ecuación (2.3) podemos obtener una relación más exacta de la corriente en función al ángulo de incidencia:

$$I = \left( \pm \frac{\theta}{2 \cdot \delta_{m\acute{a}x}} + 0.5 \right) I_{m\acute{a}x} \cos \theta \quad (2.4)$$



**Figura 2-8.** Representación gráfica de la ecuación (2.4), tomando como datos  $\delta_{m\acute{a}x} = 22^\circ$  y unitaria la corriente  $I_{m\acute{a}x}$ . La gráfica azul representa el comportamiento de una celda (signo positivo) mientras que la verde representa la otra celda del mismo eje (signo negativo).

### 2.3.1. Diseño mecánico del sensor solar.

Se seleccionó aluminio de la serie 6061 para la construcción del sensor, debido a su baja densidad en comparación con otros metales y su alta resistencia contra la corrosión (clasificada como “Muy Buena” en agentes atmosféricos y “Buena” en ambiente marino, véase en Anexo “Aluminio 6061”). Otras de sus propiedades son: buen conductor térmico ( $167 \text{ [W/(m } ^\circ\text{C)]}$ ) y eléctrico ( $25 \times 10^6 \text{ [S/m]}$ ), no magnético, resistente químicamente y no tóxico. El maquinado se llevó a cabo mediante fresado a partir de bloques de aluminio para obtener el cuerpo y la máscara del sensor. Ambas tienen la misma figura en su punto de unión, en anverso y reverso, para que embonen perfectamente y así esperando disminuir la posibilidad de que se separen ante vibraciones mecánicas provocando un mal funcionamiento.

Los planos y análisis del sensor se llevaron a cabo a través de un software de diseño asistido por computadora (CAD). El software utilizado fue CATIA<sup>7</sup> (Computer-Aided Three dimensional Interactive Application). En las Figuras 2-9, 2-10 y 2-11 se muestran los planos y la visualización en 3D del chasis sensor utilizando dicho software.

<sup>7</sup> CATIA ® Version 5.20. © Dassault Systemes 1998-2009. Reservados todos los derechos.

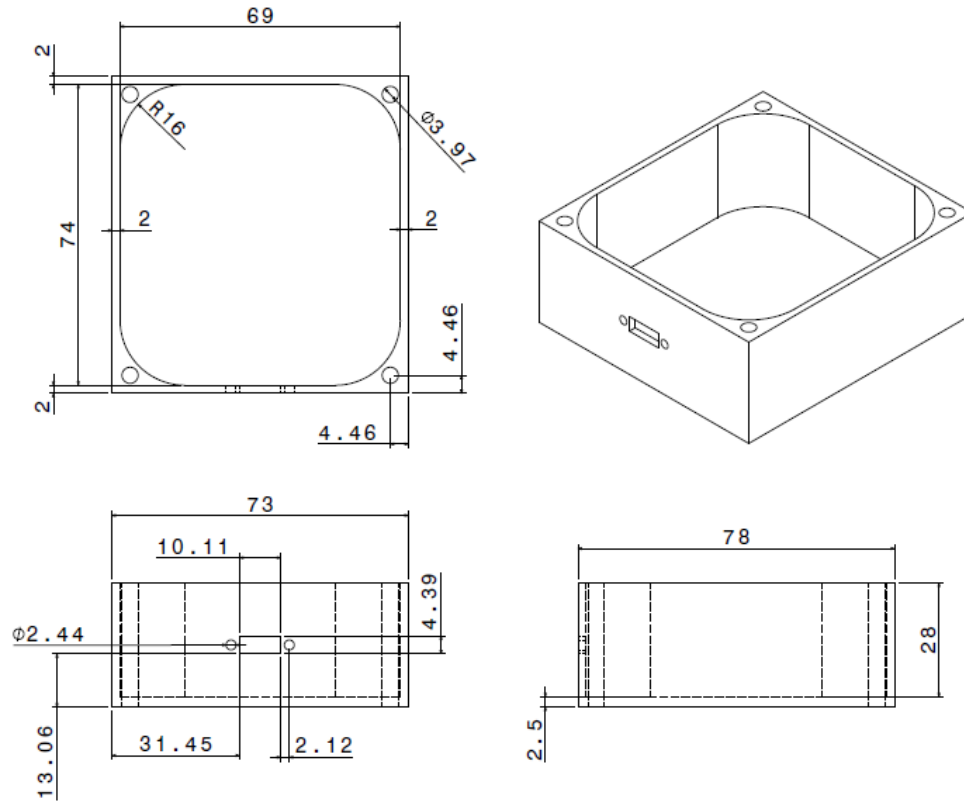


Figura 2-9. Dimensiones de la base de sensor solar, acotado en [mm].

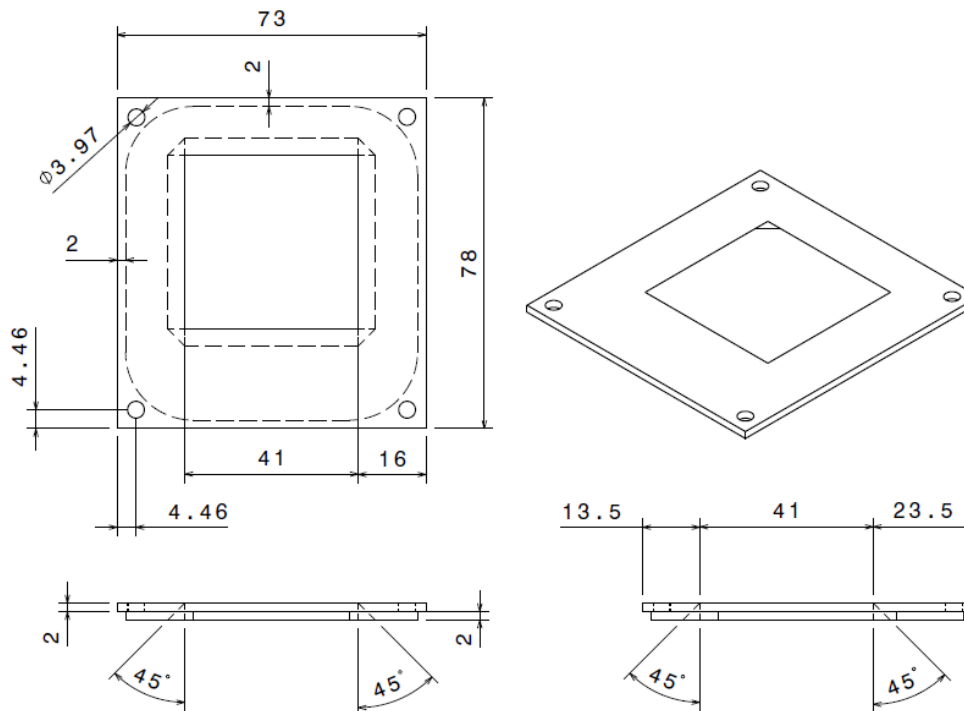
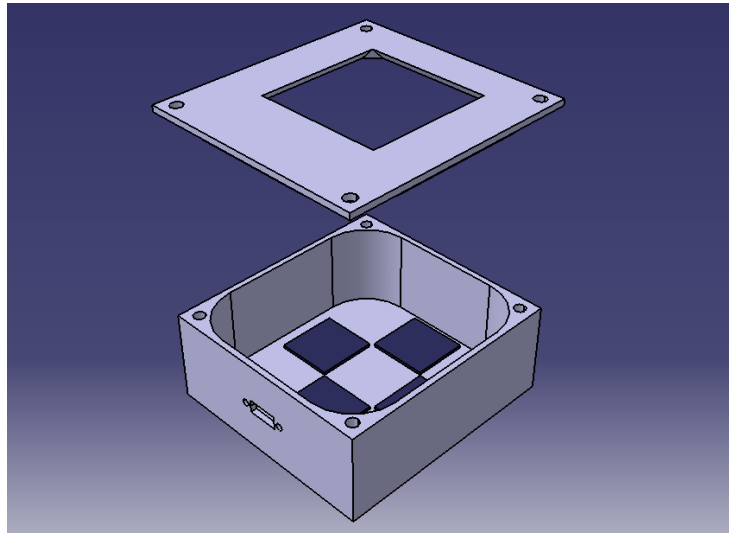


Figura 2-10. Dimensiones de la tapa del sensor solar, acotado en [mm].



*Figura 2-11. Vista en isométrico del ensamblado del sensor utilizando CATIA ® Version 5.20.*

Una de caras del cuerpo de sensor cuenta con los barrenos necesarios para colocar un conector con cable Cinch Dura-Con 1114174 (macho) de nueve pines (*Figura 2-12*). Cuatro de los nueve pines se utilizan para los voltajes de las cuatro celdas. Es recomendable aterrizar a masa los contactos restantes para evitar la producción de ruido electrónico. El cable es ideal para el proyecto debido a que cuenta con el grado de calidad militar.



*Figura 2-12. Cable Cinch Dura-Con 1114181.*

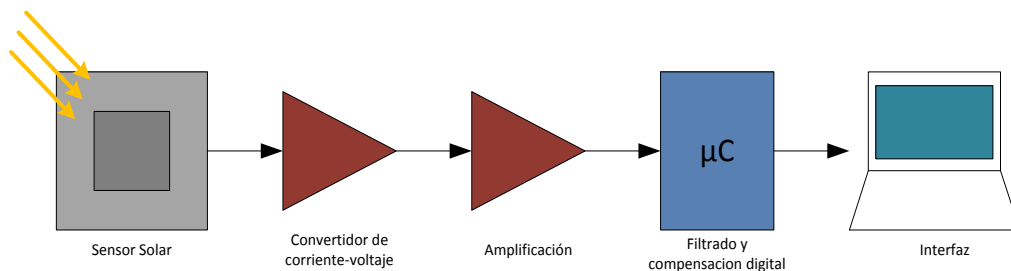
Algunas propiedades del cable son:

- Tamaño del conductor: 26 AWG.
- Rango de corriente: 3 [A].
- Temperatura de operación máxima: 135 [°C].
- Temperatura de operación mínima: -55 [°C].
- Voltaje máximo soportado V AC RMS: 600 [V].

Con el análisis de la geometría del sensor, tenemos que la base cuenta con un volumen de 35.23 [cm<sup>3</sup>], mientras que la tapa 12.98[cm<sup>3</sup>]. Considerando que el aluminio 6061 tiene una densidad de 2.7 [g/cm<sup>3</sup>], la masa de la base y la tapa sería respectivamente 95.12 [g] y 35.05 [g]. Tanto la tapa como la base están diseñadas para ser unidas por tornillos de 5/32” preferentemente Allen de acero inoxidable.

## 2.4. Circuito de acondicionamiento

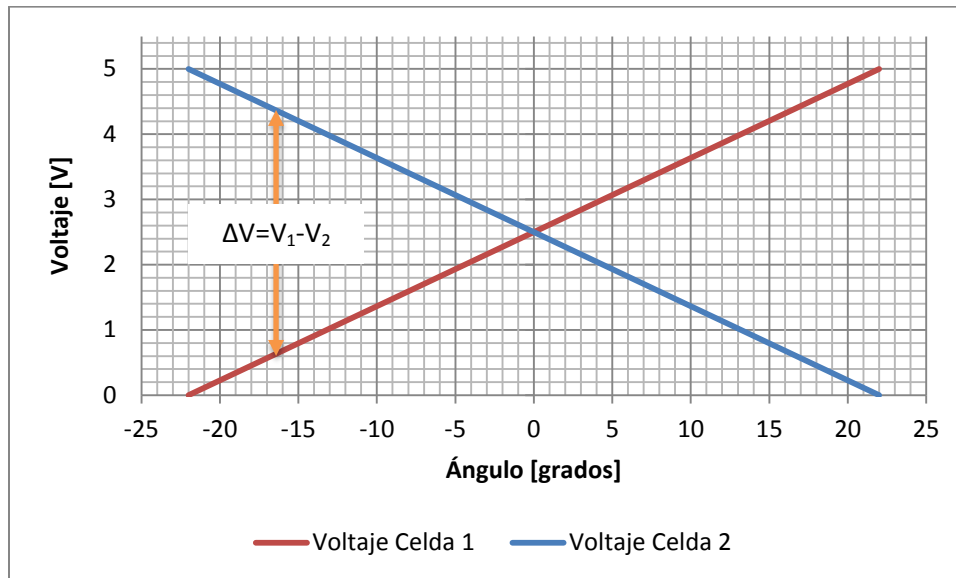
El proceso, desde el sensado hasta la determinación del ángulo de inclinación, se puede observar a grandes rasgos en la [Figura 2-13](#). La primera etapa está formada por el sensor y el arreglo de cuatro celdas que generan una corriente eléctrica en función del ángulo de incidencia de los rayos; la temperatura y la radiación ionizante acumulada en órbita influyen en su respuesta, como ya se explicó. En la siguiente fase se implementó un convertidor corriente-voltaje para tener un mejor manejo de las señales de orientación, ya que electrónicamente es más cómodo y fácil trabajar con una variación de voltaje que con una de corriente. Para la tercera fase se cuenta con un proceso de amplificación de voltaje, esto para tener una mejor resolución. En la cuarta fase se recibe este voltaje amplificado en un microcontrolador con la tarea de convertir esa información en una variable digital para posteriormente filtrar y calcular el ángulo de inclinación, con las correcciones utilizando los parámetros de calibración obtenidos tanto del fabricante como experimentalmente. Por último, en la quinta etapa se muestra el valor del ángulo calculado, a través de una interfaz de computadora.



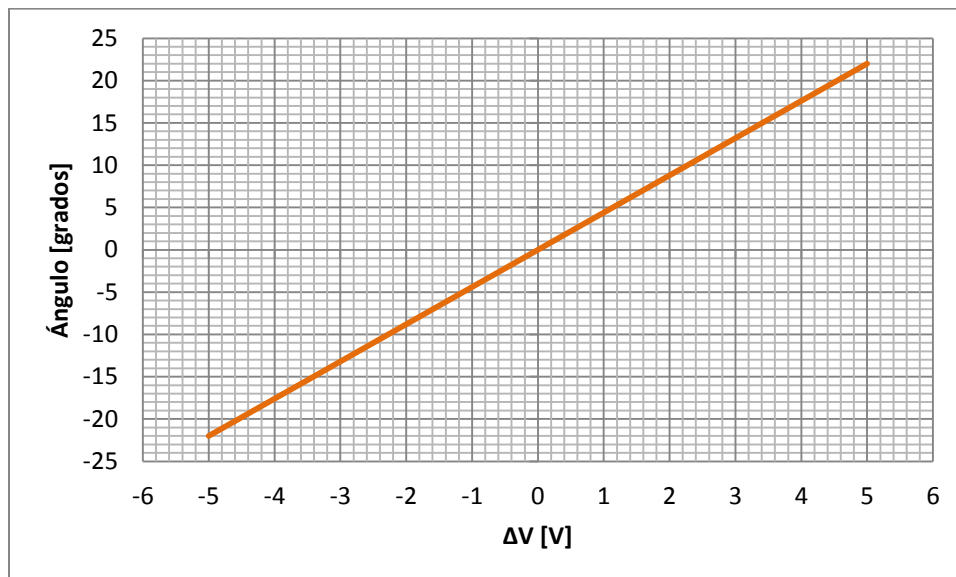
**Figura 2-13. Proceso de sensado**

El sistema debe ser capaz de medir, sobre cada eje de referencia, el ángulo de posicionamiento para un intervalo de -22° a 22°. Estos valores corresponderán a señales de voltaje acondicionados, de cada celda, de 0 a 5 [V]. En la [Figura 2-14](#) y [2-15](#) se muestra el comportamiento deseado de un par celdas para cada eje. Se propuso inicialmente que la diferencia de voltaje entre las celdas nos brinde un valor que se relacione con el ángulo de inclinación de forma proporcional debido a su facilidad en cálculo.

$$\theta = c \Delta V \quad (2.5)$$



**Figura 2-14.** Comportamiento deseado del voltaje para cada celda respecto a su ángulo de inclinación.

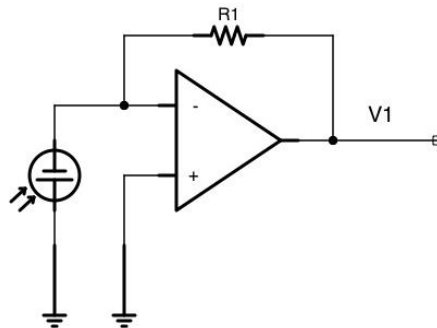


**Figura 2-15.** Función del ángulo respecto a la diferencia de voltaje esperada, ecuación (2.5).

Para que el sistema se aproxime al comportamiento deseado fue necesario llevar a cabo un acondicionamiento de las señales y no perder de vista los parámetros que alteran el comportamiento de las celdas, en otras palabras, el ángulo de inclinación está determinado por la diferencia de voltaje entre las dos celdas de un mismo eje, su temperatura y la radiación acumulada en la órbita de operación.

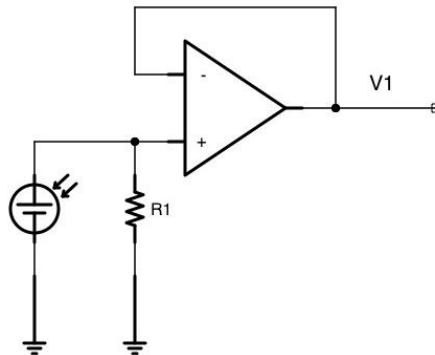
Para la primera etapa del circuito (convertidor de corriente a voltaje), se propusieron dos diferentes configuraciones. En la primera configuración (*Figura 2-16*), se conecta la terminal negativa de la celda solar a la entrada negativa del amplificador. La

posición de la celda causa que la corriente tienda a fluir desde la salida del amplificador hacia la celda, a través de la resistencia de realimentación.



*Figura 2-16. Diagrama electrónico de la propuesta 1 para la etapa de conversión corriente-voltaje.*

Para la segunda propuesta (*Figura 2-17*) se ha colocado una resistencia en paralelo a la entrada del amplificador operacional. Este tipo de configuración se conoce como seguidor y sirve para aislar y reducir el ruido en etapas posteriores de amplificación.



*Figura 2-17. Diagrama electrónico de la propuesta 2 para la etapa de conversión corriente-voltaje.*

El voltaje  $V_1$  al final de esta etapa con cualquiera de las dos configuraciones se calcula simplemente multiplicando la corriente  $I$  de la celda por el valor de la resistencia  $R$ .

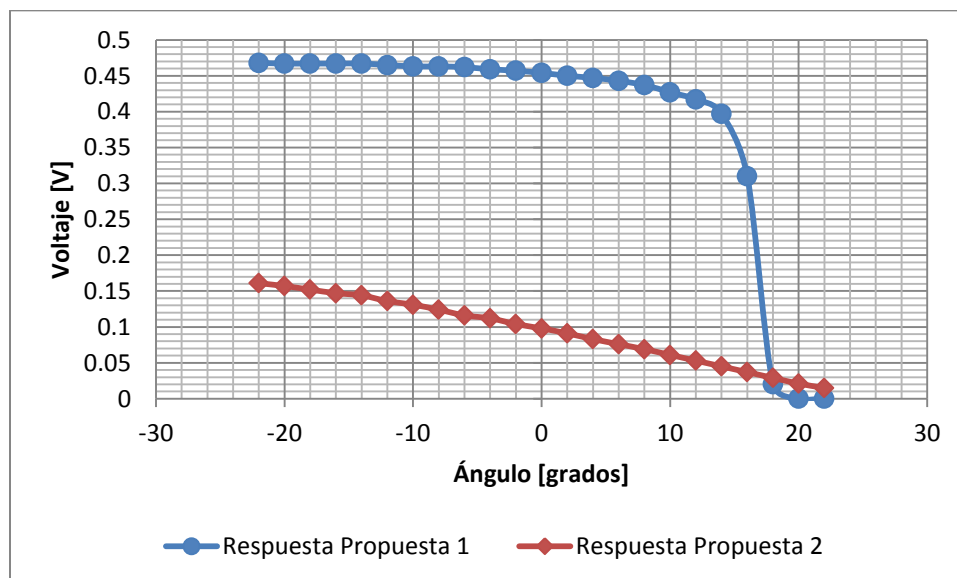
$$V_1 = R_1 I \quad (2.6)$$

Durante esta etapa del proyecto se utilizó una lámpara de halógeno marca General Electric tipo CYX de 120 [V] (*Figura 2-18*) la cual tiene una potencia de alrededor de 2000 [W]. La lámpara de halógeno permite simular la radiación solar del espacio dentro del laboratorio. Esto es importante para observar y conocer la respuesta de las celdas ante condiciones espaciales y poder diseñar posteriormente el sensor. Las características más significativas de la lámpara, así como su curva de respuesta espectral y la del Sol, se describirán con más detalle en el Capítulo 4.



**Figura 2-18.** Lámpara de halógeno marca General Electric tipo CYX

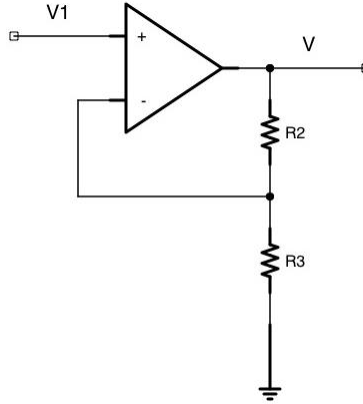
Se llevaron a cabo pruebas experimentales para analizar el comportamiento de cada propuesta, utilizando la lámpara de halógeno, a una temperatura de 50 [°C] y con  $R = 1[\Omega]$ . Finalmente se llegó a la conclusión de que la segunda propuesta (configuración seguidor) es más adecuada para el proyecto, ya que tiene un comportamiento de mayor linealidad en comparación con la primera cuando se varía el ángulo de incidencia. La comparación de las respuestas obtenidas en cada configuración se visualiza en la [Figura 2-19](#).



**Figura 2-19.** Respuesta de las propuestas consideradas para la etapa de conversión corriente-voltaje.

El voltaje de salida de la primera etapa  $V_1$  es amplificado y ajustado para tener un valor que no rebase los 5 [V]. Esto se hace alimentando los circuitos integrados con

6 [V] para que de ahí se consuma uno (necesario para su funcionamiento) y finalmente entregue un voltaje máximo de 5 [V] a la salida. Para llevar a cabo esta parte del proceso, se utiliza una configuración de amplificación no inversora (*Figura 2-20*).



*Figura 2-20. Etapa no inversora de amplificación.*

La relación de voltajes utilizando esta configuración es:

$$V = \left( \frac{R_2}{R_3} + 1 \right) V_1 \quad (2.7)$$

Sustituyendo (2.6) en (2.7) se obtiene el valor del voltaje final en función de la corriente de la celda:

$$V = \left( \frac{R_2}{R_3} + 1 \right) R_1 I \quad (2.8)$$

La corriente de la celda está en función de la corriente máxima y el ángulo de inclinación  $\theta$  del sensor como es descrito en la expresión (2.4). La corriente máxima<sup>8</sup>  $I_{m\acute{a}x}$  que podrá generar la celda una vez colocada la carga  $R_1$ , se puede visualizar utilizando dicho valor en la curva I-V. Si sustituimos esta información en (2.8) podemos tener una nueva ecuación que relaciona el voltaje final de la celda con el ángulo de inclinación

$$V = \left( \frac{R_2}{R_3} + 1 \right) R_1 I_{m\acute{a}x@R_1} \left( \pm \frac{\theta}{2 \cdot \delta_{m\acute{a}x}} + 0.5 \right) \cos \theta \quad (2.9)$$

Al final de esta etapa se coloca un capacitor de desviación (bypass) simple (sin uso de resistencias o inductores) con un valor de 100 [nF] el cual es un valor estándar

<sup>8</sup> El término  $I_{m\acute{a}x@R_1}$  simboliza la corriente máxima que existiría al colocarse una resistencia de carga con valor  $R_1$ .

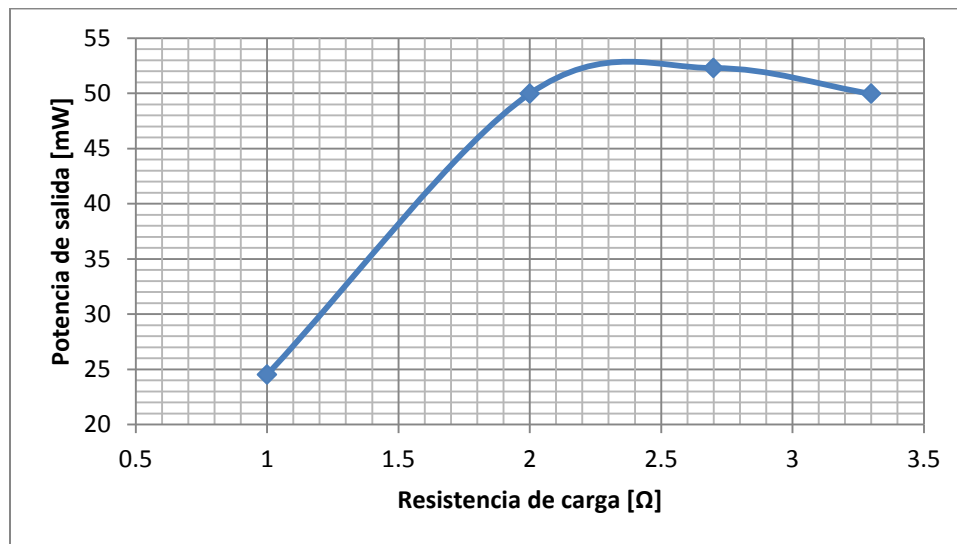


práctico aceptado en ingeniería eléctrica (Cook, 2010). El capacitor actúa como una fuente de baja impedancia y en adición reduce el ruido generado a la salida del amplificador, aunque existirá adicionalmente un filtrado digital que se describirá en el Capítulo 3.

Cabe señalar que la comparación de los voltajes de ambas celdas por eje, se llevará a cabo digitalmente una vez ingresada la información al microcontrolador y no de forma analógica a través de amplificadores operaciones, evitando así el uso y procesamiento de voltajes negativos. Los amplificadores operacionales utilizados en este proyecto fueron los LM124J debido a que están clasificados como de grado militar.

Una vez establecido la configuración del circuito electrónico, se realizó un análisis teórico y experimental para seleccionar los valores adecuados de las resistencias. Se llevaron a cabo diversas mediciones de la corriente en corto circuito y voltaje en circuito abierto de diversas celdas K4710 de 2x2 [cm] mediante la lámpara de halógeno, iluminando completamente la celda, con un ángulo de incidencia de 90° y a una temperatura de 35 [°C], obteniendo como resultado una corriente y voltaje promedio de 0.16 [A] y 0.48 [V] respectivamente.

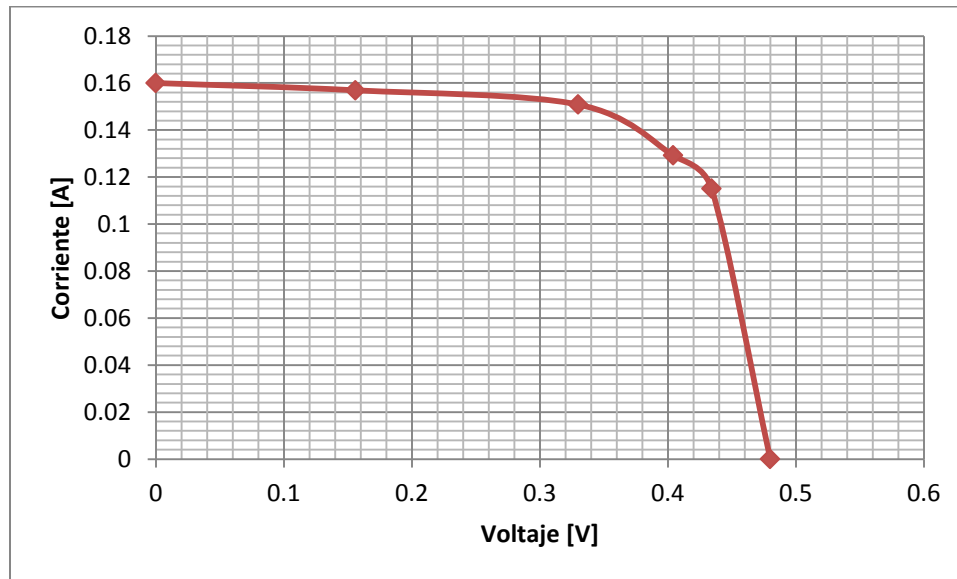
Para la etapa de conversión corriente-voltaje, se probaron con la lámpara de halógeno diferentes resistencias de carga para obtener la potencia máxima de salida. De acuerdo a las especificaciones, la resistencia óptima<sup>9</sup> sometiendo la celda a una contante solar y a una temperatura de 28 [°C] es de 3.1 [ $\Omega$ ], por lo que se hicieron pruebas tomando como referencia ese valor. Se utilizaron, para la resistencia de carga, valores de 1, 2, 2.7 y 3.3 [ $\Omega$ ] y los resultados obtenidos se muestran en la [Figura 2-21](#).



**Figura 2-21.** Potencia máxima de salida de la celda variando la resistencia de carga.

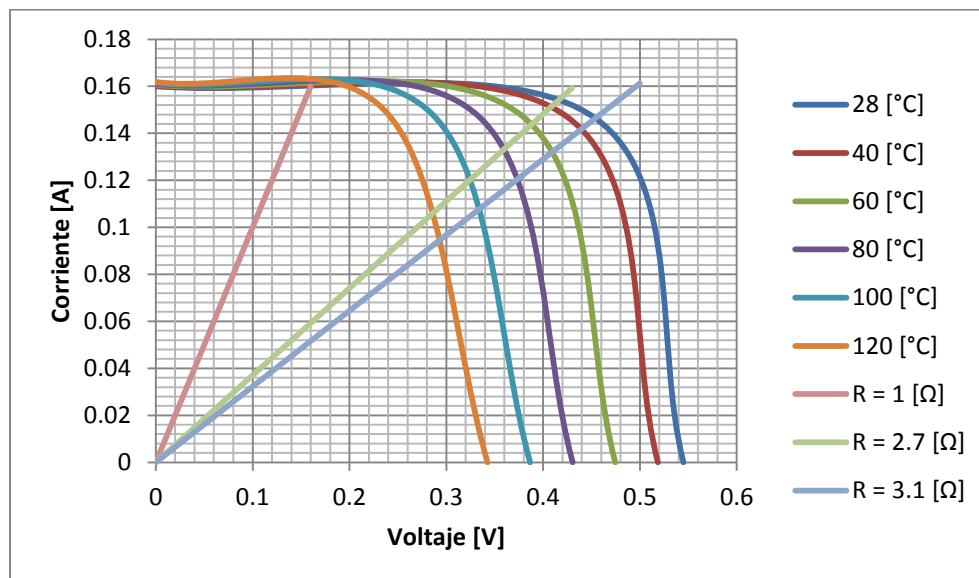
<sup>9</sup> La resistencia óptima se calcula dividiendo el voltaje de máxima potencia  $V_{mp}$  entre la corriente de máxima potencia  $I_{mp}$ .

Por otra parte, el voltaje y la corriente de salida obtenidos al variar la resistencia de carga permitieron trazar la curva característica I-V de las celdas (*Figura 2-22*).

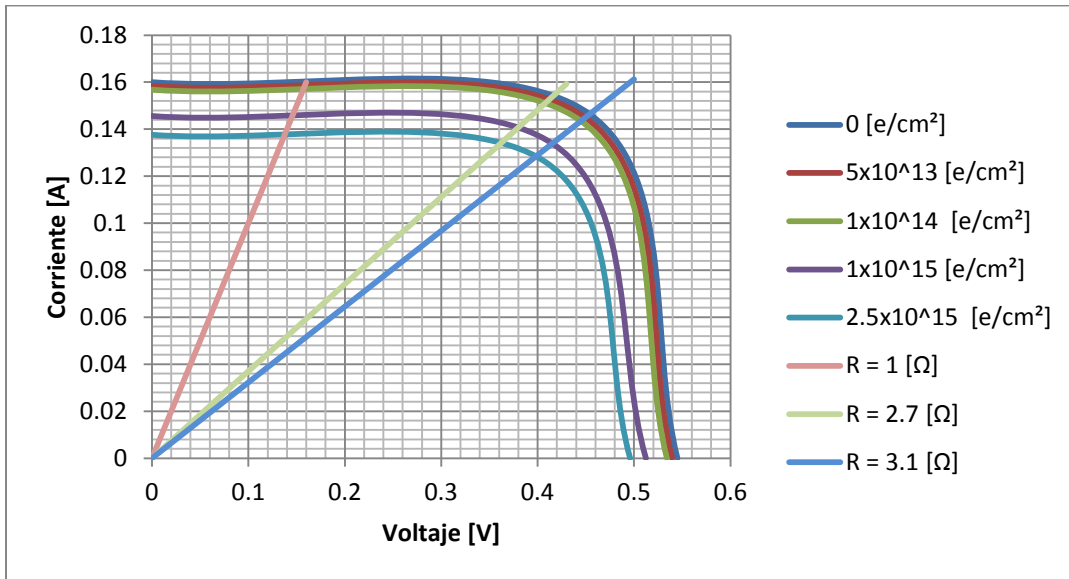


*Figura 2-22. Curva I-V experimental de una celda K4710 de 2x2 [cm] a 50 [°C]*

Las pruebas indican que el valor de 2.7 [Ω] para la resistencia  $R_1$  nos brinda una mayor potencia de salida (54 [mW]). Con las especificaciones de las celdas se realizaron gráficas mostrando la variación de curva I-V ante cambios de temperatura y radiación, esto para analizar el comportamiento del voltaje y corriente de las celdas con diversas resistencias de carga. Los datos obtenidos de las especificaciones de la celda se visualizan en las *Figura 2-23* y *2-24*.



*Figura 2-23. Variación de la curva I-V teórica de la una celda solar K4710 de 2x2 [cm] respecto a la temperatura mostrando las resistencias de cargas propuestas.*



**Figura 2-24.** Variación de la curva I-V teórica de la una celda solar K4710 de 2x2 [cm] respecto a la radiación mostrando las resistencias de cargas propuestas a 28 [°C]. El flujo mostrado es considerando una cantidad de energía de 1 [MeV].

Observando las figuras anteriores se puede decir que tanto el voltaje como la corriente sufren cambios de menor escala cuando la resistencia de carga tiende a disminuir, en otras palabras, la potencia de salida tiende a mantenerse cuando se utiliza una resistencia pequeña a pesar de los cambios producidos por la temperatura y radiación. Estas pequeñas variaciones en corriente y voltaje al disminuir la resistencia, indican que es necesario utilizar una resistencia de carga  $R_1$  con el menor valor comercial disponible: 1 [Ω].

Una vez obtenido el valor de  $R_1$ , esta se coloca en la primera etapa y se mide el voltaje máximo de salida, dando un valor promedio de 0.16 [V] utilizando la lámpara de halógeno. Si se desea tener un voltaje  $V \approx 5$  [V] cuando  $V_1 = 0.16$  [V] entonces es necesaria una ganancia de 31.25. Por tanto, para la etapa de amplificación no inversora, se propone  $R_2 = 10$  [kΩ] y  $R_3 = 330$  [Ω], lo que brinda una ganancia real de 31.3 según la ecuación (2.7).

Por lo tanto, el circuito electrónico final utilizado para las cuatro celdas, partiendo de los circuitos de las Figuras 2-17 y 2-20, así como los valores de cada componente y las conexiones en los amplificadores operacionales se describe en la Figura 2-25.

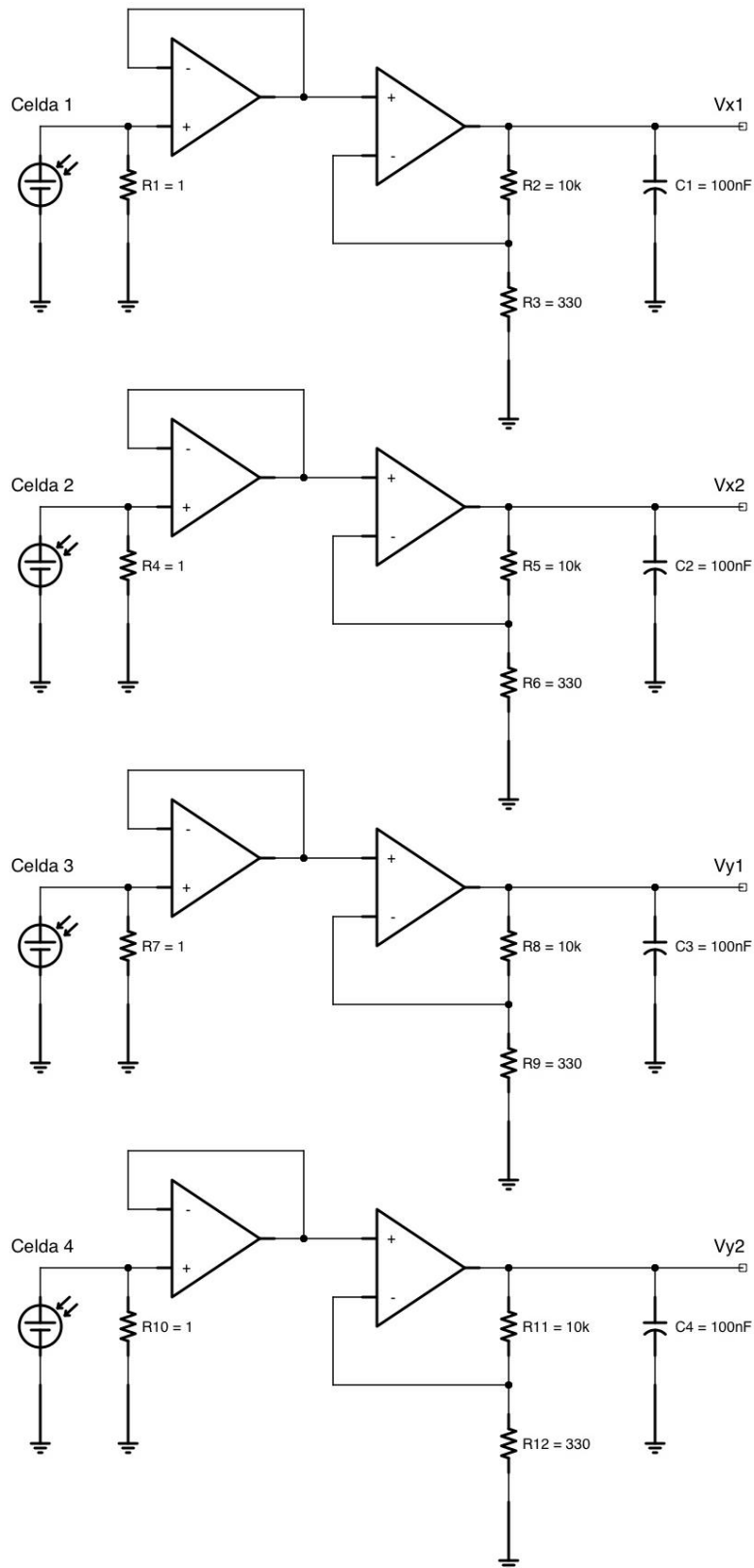
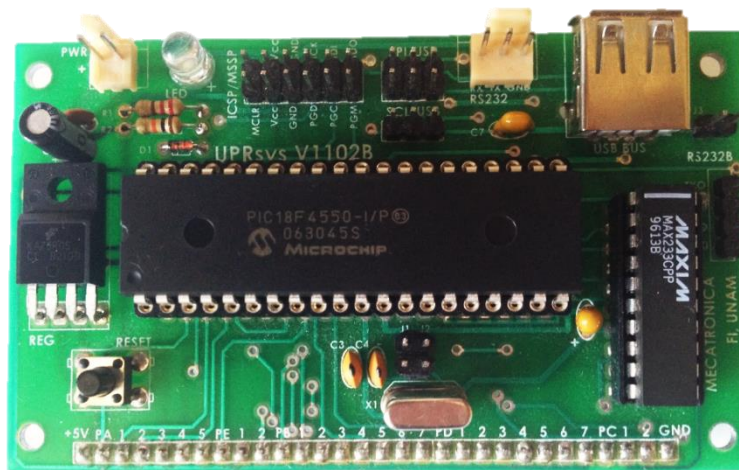


Figura 2-25. Diagrama esquemático circuito final correspondiente a la etapa de sensado de las 4 celdas. Los valores de las resistencias están expresados en [Ω].

## 2.5. Pruebas de funcionamiento del sensor solar

Para el filtrado y compensación digital se utilizó un microcontrolador de gama alta PIC18F4550. Este modelo es adecuado debido a que para este proyecto se propuso un convertidor analógico-digital de 10 bits a bordo del satélite a causa de la precisión en los datos y dicho microcontrolador cuenta con este componente integrado en su arquitectura. La interfaz se desarrolló a través de LabVIEW v2012 y únicamente cuenta con la tarea de mostrar los datos enviados por el microcontrolador a través de la comunicación RS232. Tanto el microcontrolador como la interfaz representan la tarea que llevará a cabo la computadora de bordo del satélite y servirán sólo para visualizar y comprobar los algoritmos de compensación desarrollados en el proyecto. La tarjeta de desarrollo y el microcontrolador utilizados se muestran en la [Figura 2-26](#).



**Figura 2-26. Tarjeta de desarrollo UPRsys V1102B**

La interfaz realizada en LabVIEW ([Figura 2-27](#)) muestra seis datos provenientes del microcontrolador: los cuatro voltajes del sensor y los dos ángulos calculados. Cada par de voltajes es mostrado además, en un gráfico de tiempo real. La interfaz no lleva a cabo ningún procesamiento de datos, sólo sirve de indicador visual, mostrando principalmente seis datos provenientes del microcontrolador: los cuatro voltajes del sensor y los dos ángulos calculados. El microcontrolador envía los datos través de una cadena de caracteres, siendo cada dato separado por un espacio en blanco. Al recibir la cadena, la interfaz se encarga de separar los datos utilizando como referencia dicho espacio para posteriormente mostrarlos en su respectivo indicador. Como medida de seguridad se implementó en el diagrama de bloques ([Figura 2-28](#)) la condición de que, para llevar a cabo correctamente la separación de los datos, la cadena no tendría una dimensión menor al valor establecido por la suma total de los tamaños de cada dato. Es decir, la cadena enviada está conformada por al menos 28 caracteres  $(0.00\_0.00\_0.00\_0.00\_0.0\_0.0)^{10}$  y el proceso de separación no se lleva a cabo si la cadena recibida es de un menor tamaño.

<sup>10</sup> El símbolo ( \_ ) representa el espacio en blanco.

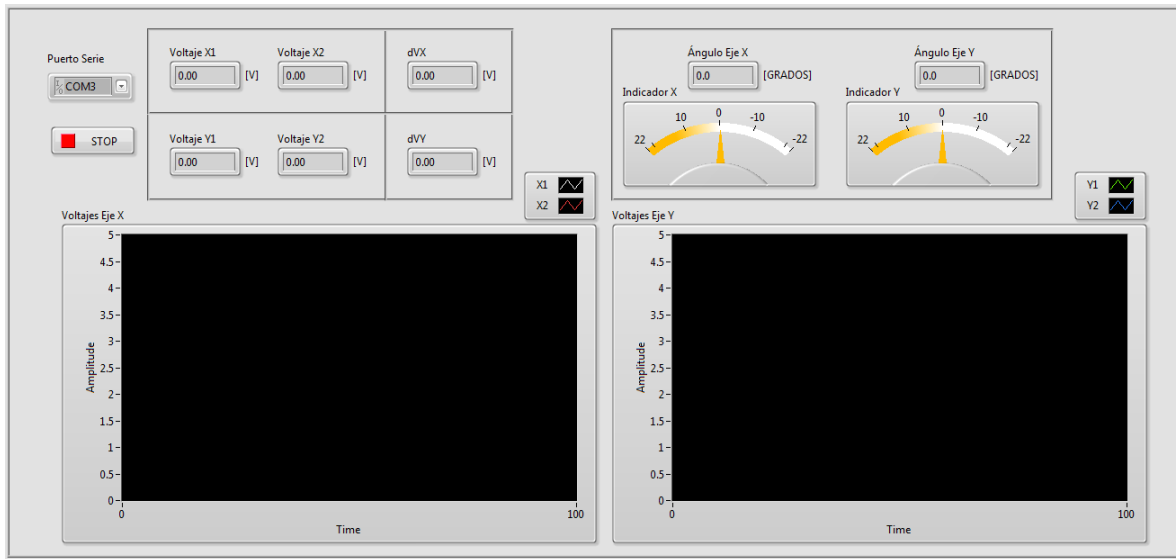


Figura 2-27. Panel frontal de la interfaz en LabVIEW.

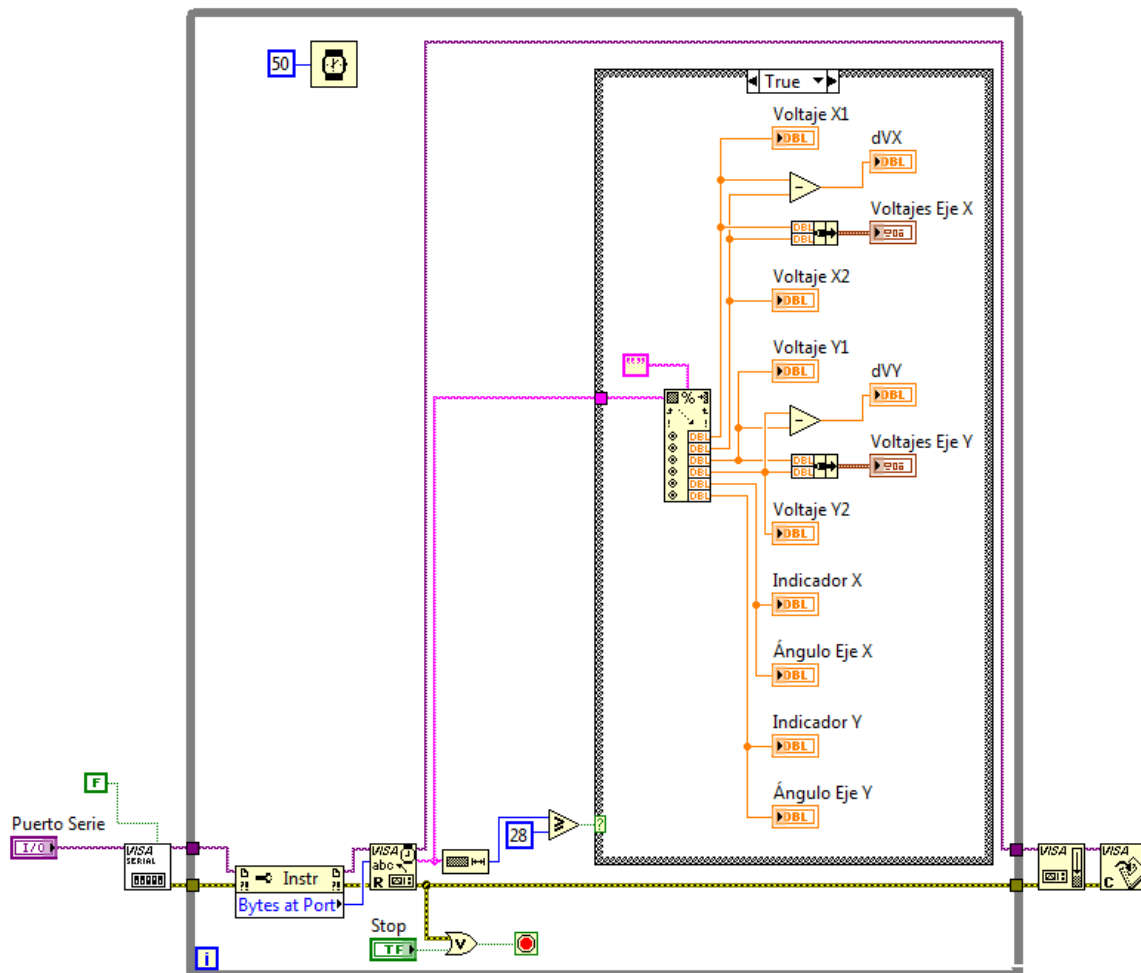


Figura 2-28. Diagrama de bloques de la interfaz en LabVIEW.

Considerando que cada celda tiene un comportamiento indicado por la ecuación (2.9), la diferencia de voltajes dada por el par de celdas de cada eje sería:

$$\Delta V = V_1 - V_2 \quad (2.10)$$

Expandiendo esta ecuación y considerando el signo de (2.9) para cada celda:

$$\Delta V = \left[ \left( \frac{R_2}{R_3} + 1 \right) R_1 I_{m\acute{a}x@R1} \left( \frac{\theta}{2 \delta_{m\acute{a}x}} + 0.5 \right) \cos \theta \right]_{celda1} - \left[ \left( \frac{R_2}{R_3} + 1 \right) R_1 I_{m\acute{a}x@R1} \left( -\frac{\theta}{2 \delta_{m\acute{a}x}} + 0.5 \right) \cos \theta \right]_{celda2} \quad (2.11)$$

Utilizando (2.8) es posible reducir la ganancia y la corriente máxima en términos de un voltaje máximo:

$$V_{m\acute{a}x} = \left( \frac{R_2}{R_3} + 1 \right) R_1 I_{m\acute{a}x@R1} \quad (2.12)$$

Sustituyendo (2.12) en (2.11) y realizando los productos, tenemos:

$$\Delta V = V_{m\acute{a}x_{celda1}} \left( \frac{\theta}{2 \delta_{m\acute{a}x}} + 0.5 \right) \cos \theta + V_{m\acute{a}x_{celda2}} \left( \frac{\theta}{2 \delta_{m\acute{a}x}} - 0.5 \right) \cos \theta \quad (2.13)$$

Si consideramos que se utilizaron celdas de las mismas propiedades eléctricas y resistores de igual valor para la etapa de conversión de voltaje y amplificación, es posible decir que:

$$V_{m\acute{a}x_{celda1}} = V_{m\acute{a}x_{celda2}} = V_{m\acute{a}x} \quad (2.14)$$

Por tanto:

$$\Delta V = V_{m\acute{a}x} \left( \frac{\theta}{2 \delta_{m\acute{a}x}} + 0.5 \right) \cos \theta + V_{m\acute{a}x} \left( \frac{\theta}{2 \delta_{m\acute{a}x}} - 0.5 \right) \cos \theta \quad (2.15)$$

$$\Delta V = \frac{\theta V_{m\acute{a}x}}{2 \delta_{m\acute{a}x}} \cos \theta + 0.5 V_{m\acute{a}x} \cos \theta + \frac{\theta V_{m\acute{a}x}}{2 \delta_{m\acute{a}x}} \cos \theta - 0.5 V_{m\acute{a}x} \cos \theta \quad (2.16)$$

$$\Delta V = \frac{V_{m\acute{a}x}}{\delta_{m\acute{a}x}} \theta \cos \theta \quad (2.17)$$

Al ser  $V_{m\acute{a}x}$  y  $\delta_{m\acute{a}x}$  valores contantes, la división proporciona un valor constante que se definirá como  $k$ , rescribiendo nuevamente la ecuación de diferencia de voltaje como:

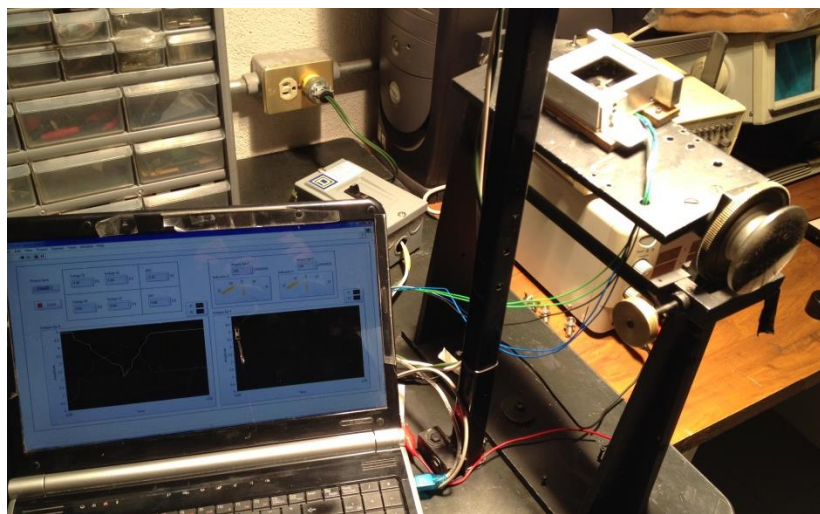
$$\Delta V = k \theta \cos \theta \quad (2.18)$$



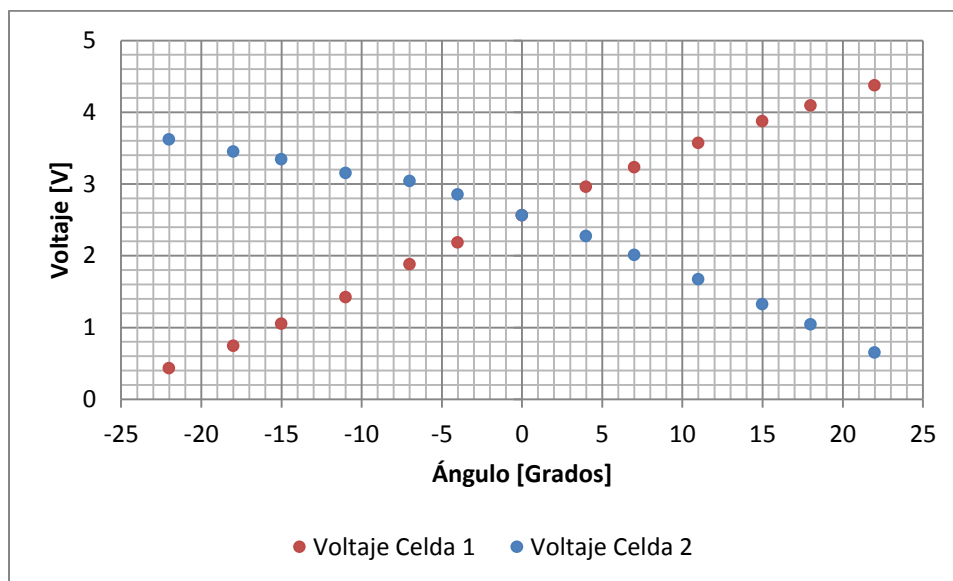
En este caso, si tenemos que  $V_{m\acute{a}x} = 5$  [V] y  $\delta_{m\acute{a}x} = 22.62^\circ$ , entonces obtendremos un valor de  $k$  igual a 0.221 volts por cada grado, describiendo nuevamente la ecuación de diferencia de voltaje como:

$$\Delta V = 0.221 \theta \cos \theta \tag{2.19}$$

Se llevaron a cabo diversas pruebas como se puede visualizar en la *Figura 2-29* para comprobar el modelo de la diferencia de voltaje utilizando la lámpara halógeno procurando tener una temperatura de 30 [°C]. Se midió el voltaje de cada celda variando el ángulo desde -22 hasta 22 [grados] con una variación de 4 [grados]. El comportamiento de cada celda para un eje se visualiza en la *Figura 2-30*. Con estos datos podemos obtener la relación del ángulo a partir de la diferencia de voltaje real.



*Figura 2-29. Pruebas realizadas con la lámpara de halógeno.*



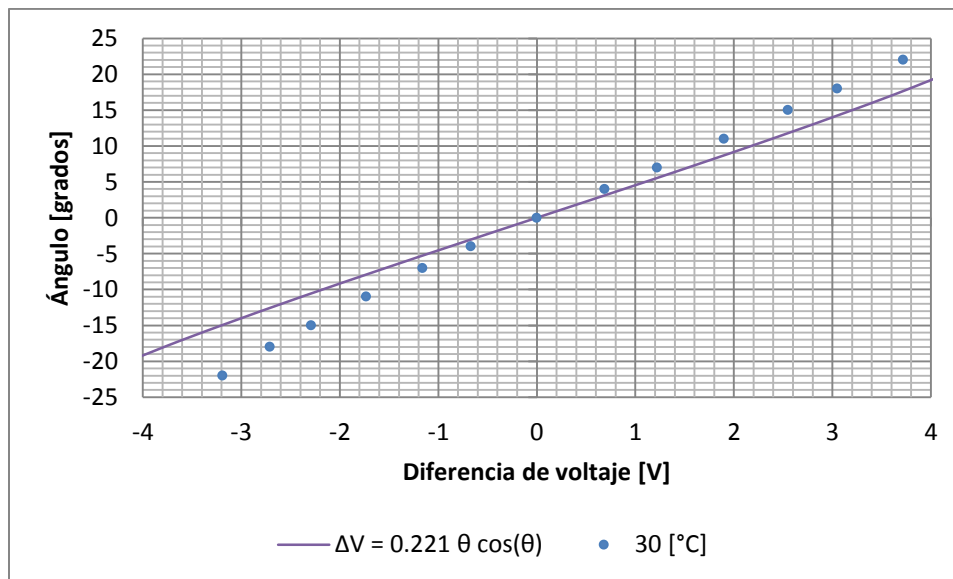
*Figura 2-30. Comportamiento real obtenido del voltaje para cada celda respecto a su ángulo.*



La ecuación (2.18) ofrece una desventaja: debido a su forma, para obtener el ángulo a partir de ella, es necesario el uso de métodos numéricos. Por ello fue necesario diseñar un programa independiente en C que fuera capaz de obtener el valor de  $\theta$ , conociendo el valor de  $k$  y la diferencia de voltaje  $\Delta V$ .

El método numérico utilizado fue el de bisección, ya que limita la solución entre dos valores propuestos. Acotar la solución fue indispensable ya que la ecuación puede tener muchas soluciones diferentes ya que está conformada por una función trigonométrica. Los valores límites establecidos para el método fueron -23 y 23 grados. Gracias a esto, fue posible graficarla y compararla con suficiente precisión con la obtenida experimentalmente.

En la *Figura 2-31* se muestra la diferencia de voltajes de los datos obtenidos experimentalmente comparados con la ecuación (2.19) la cual es la función teórica esperada.



*Figura 2-31. Relación obtenida del ángulo respecto a la diferencia de voltaje.*

La anterior representación teórica queda descartada debido a que tiene un error absoluto máximo de hasta 7 grados. Este error tan grande puede explicarse debido a que se consideró por igual las características eléctricas de ambas celdas y suponer resistencias ideales, es decir, exactas al valor comercial indicado. Por ello se diseñará un nuevo modelo matemático de mayor precisión tomando como base los datos experimentales

## 2.6. Modelo matemático mejorado

Para obtener un modelo matemático se tomaron dos propuestas: la primera es llevar a cabo regresiones con los datos obtenidos, y la segunda ajusta los valores de  $k$  de la ecuación (2.18) para aproximarlos al comportamiento real.

Para la primera propuesta se hicieron regresiones lineales y polinómica, observando la variación del índice de correlación,  $R^2$ . Los resultados obtenidos se visualizan en las Figuras 2-32, 2-33, 2-34.

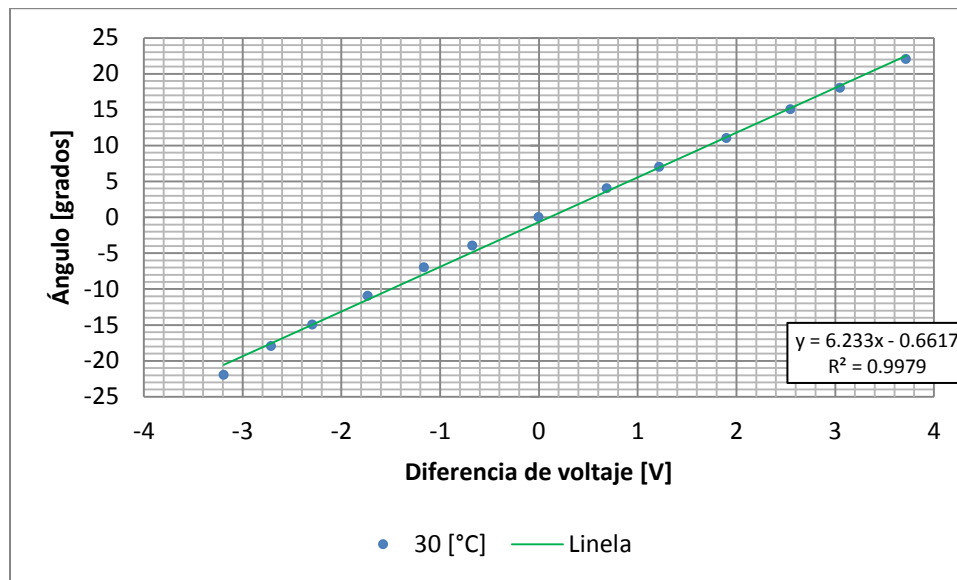


Figura 2-32. Regresión lineal para los datos experimentales.

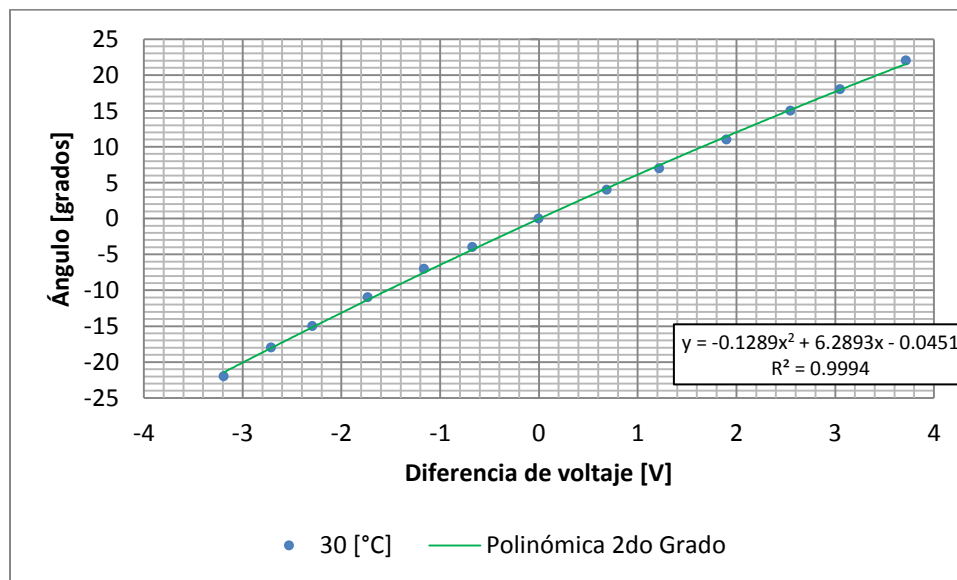


Figura 2-33. Regresión polinómica de segundo grado para los datos experimentales.

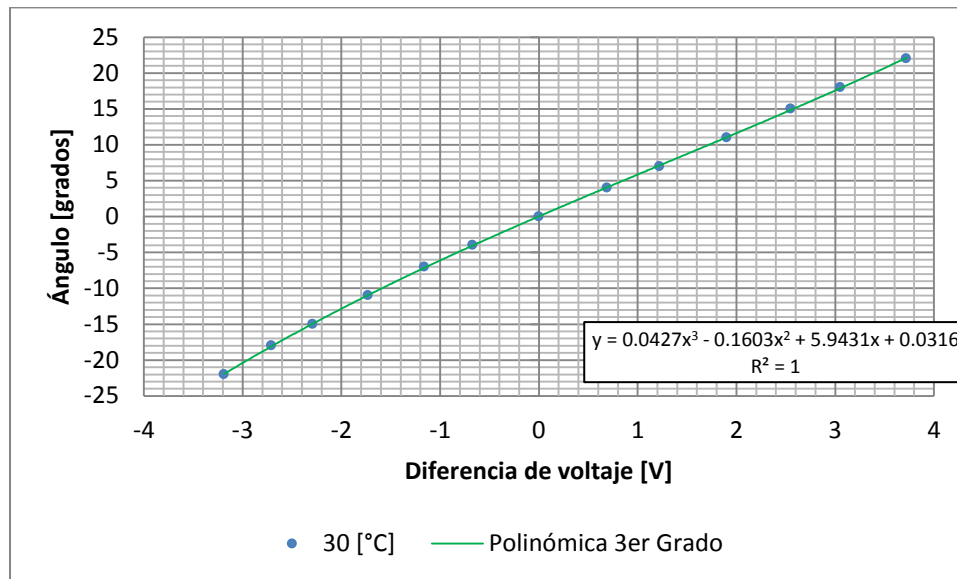


Figura 2-34. Regresión polinómica de tercer grado para los datos experimentales.

Se observó que utilizando la regresión polinómica de tercer orden se tenía una aproximación muy exacta (índice de correlación  $R^2 = 0.9999525646$ )<sup>11</sup>. Entonces, el modelo matemático que relaciona el ángulo con la diferencia de voltaje para el sensor solar tendría la forma:

$$\theta = a \Delta V^3 + b \Delta V^2 + c \Delta V + d \quad (2.20)$$

Sin embargo, esta forma trae como desventaja la dependencia de cuatro literales ( $a, b, c, d$ ) que tendrán una variación respecto a la temperatura y la radiación iónica.

Para la segunda propuesta se calculó el valor de  $k$  para cada punto, despejándola de (2.18). Los resultados obtenidos muestran una variación casi lineal de dicho término respecto a la diferencia de voltaje (Figura 2-35).

<sup>11</sup> Dato obtenido al utilizar la función "Coeficiente de correlación" de Microsoft Excel 2012.

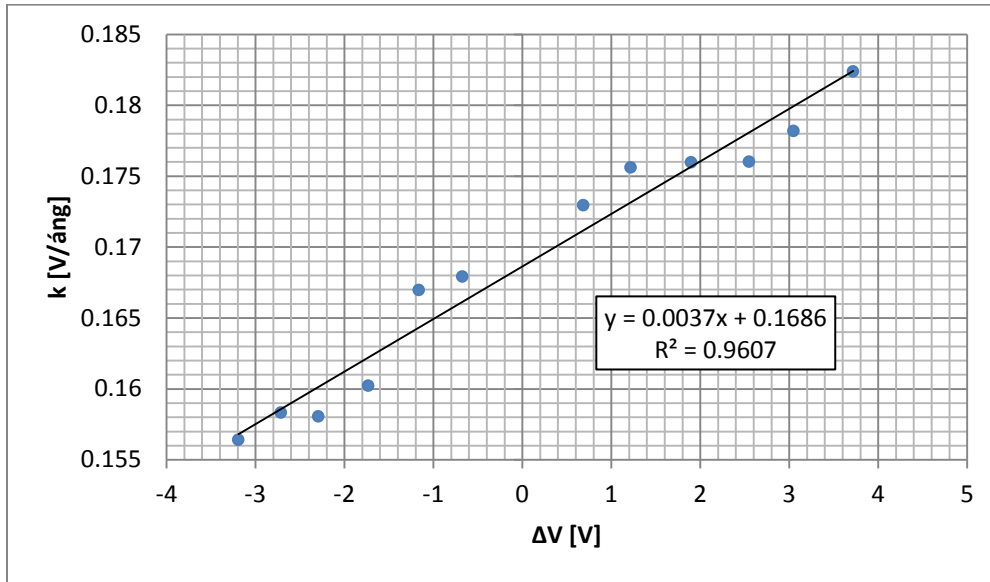


Figura 2-35. Variación del parámetro  $k$  respecto a la diferencia de voltaje

Para finalizar, la ecuación (2.18) ahora se podría generalizar como:

$$\Delta V = (A \Delta V + B) \theta \cos \theta \tag{2.21}$$

Con esta información podemos concluir que esta propuesta tendría como ventaja la dependencia de sólo dos variables ( $A, B$ ) pero la desventaja de aplicar un cálculo de más complejo para obtener el ángulo, por lo que necesario la implementación un método numérico (bisección) para su resolución. La gráfica para este segundo caso obtenida a partir de (2.21) se describe en [Figura 2-36](#).

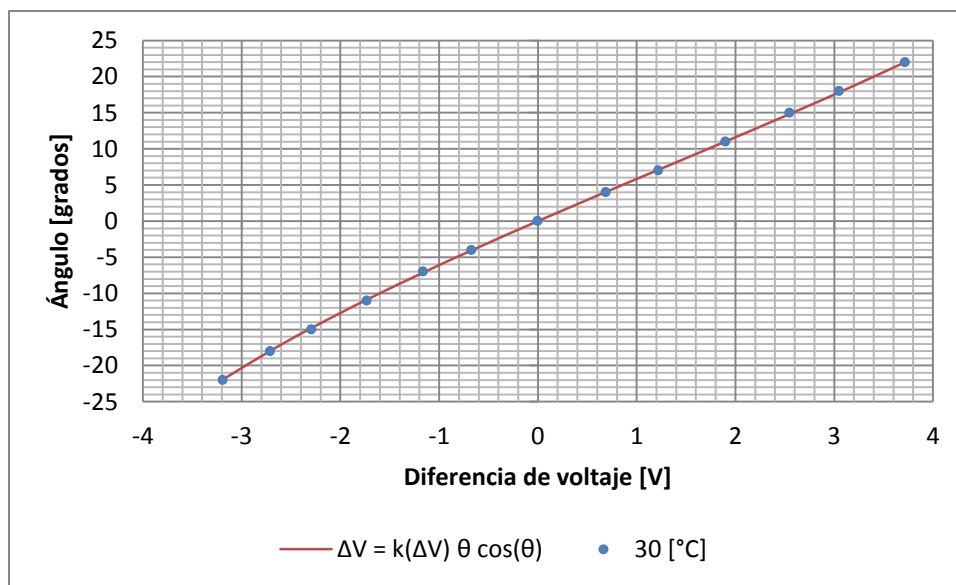


Figura 2-36. Modelo de la segunda propuesta (variación de  $k$ ) respecto a los datos reales.

Esta última función tiene un índice de correlación  $R^2$  de 0.9999294412, lo cual indica que es una representación muy acertada. También se comprobó que para obtener los valores de  $A$  y  $B$  basta con realizar una regresión lineal conociendo únicamente los valores de  $k$  para una diferencia de voltaje en 22 y en -22 grados. Por todo lo anterior, la última propuesta fue seleccionada como aquella que describirá matemáticamente el comportamiento del sensor solar.



## ALGORITMO DE COMPENSACIÓN EN ÓRBITA

El algoritmo propuesto compensará las señales leídas por el sensor ante dos fenómenos que varían extremada y repentinamente en el espacio: la temperatura y la radiación. Esto servirá para brindar una mayor exactitud en la información brindada por el sensor. El algoritmo se ejecutará en la computadora a bordo del satélite, sin embargo, para este proyecto se ocupará un microcontrolador y una computadora de escritorio para poder analizar y corroborar su eficacia.

## 3.1. Por cambios de temperatura

Para llevar a cabo la implementación de la compensación se hicieron pruebas a 30, 60, 90 y 120 [°C] y después se obtuvo su respectiva ecuación. Los valores obtenidos se exponen en la [Tabla 3-1](#).

*Tabla 3-1. Variación de la diferencia de voltaje respecto al ángulo y temperatura.*

Ángulo [Grados]	Diferencia de voltaje $\Delta V$ [V]			
	T = 30 [°C]	T = 60 [°C]	T = 90 [°C]	T = 120 [°C]
22	3.75	3.85	3.95	3.97
-22	-3.19	-3.30	-3.36	-3.40

De la ecuación (2.21) obtenemos el valor de  $A$  y  $B$  para cada una de las temperaturas utilizadas. En cada caso se tiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas. Por ejemplo, para  $T = 30$  [°C] obtendremos el siguiente sistema:

$$3.75 = (3.75 A + B) (22^\circ) \cos(22^\circ) \quad (3.1)$$

$$-3.19 = (-3.19 A + B) (-22^\circ) \cos(-22^\circ) \quad (3.2)$$

Del sistema anterior se tiene que  $A = 3.9459 \times 10^{-3}$  y  $B = 0.1690$ . Utilizando el mismo procedimiento obtenemos los valores respectivos para las demás temperaturas. Los resultados se muestran en la [Tabla 3-2](#).

Tabla 3-2. Variación de los parámetros A y B respecto a la temperatura.

	T = 30 [°C]	T = 60 [°C]	T = 90 [°C]	T = 120 [°C]
<b>A</b>	$3.9559 \times 10^{-3}$	$3.7711 \times 10^{-3}$	$3.9568 \times 10^{-3}$	$3.7916 \times 10^{-3}$
<b>B</b>	0.1690	0.1742	0.1780	0.1796

Observando los la dinámica de los parámetros, podemos concluir que A varía con una ligera desviación estándar al rededor del valor de 0.00387 (Figura 3-1), mientras que el parámetro B tiene una variación casi lineal (Figura 3-2).

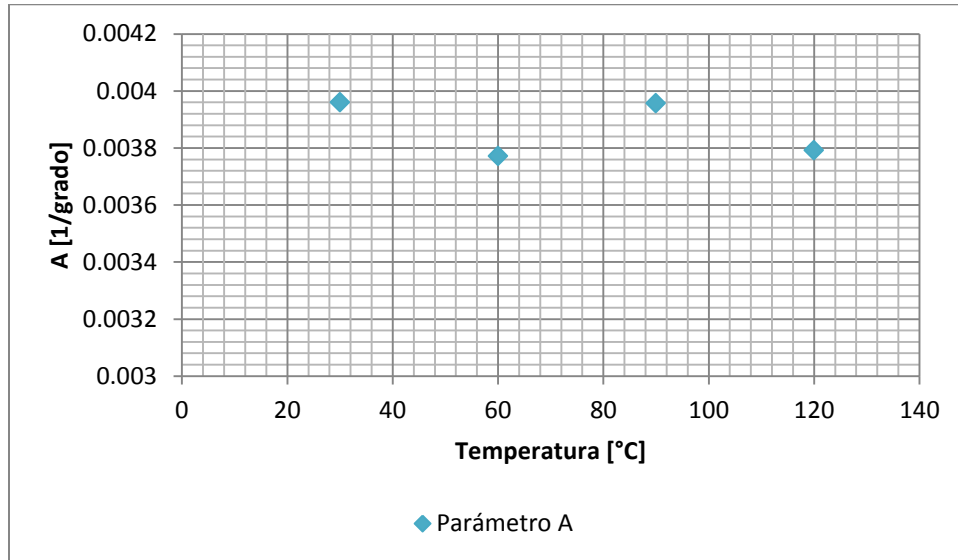


Figura 3-1. Variación del parámetro A respecto a la temperatura.

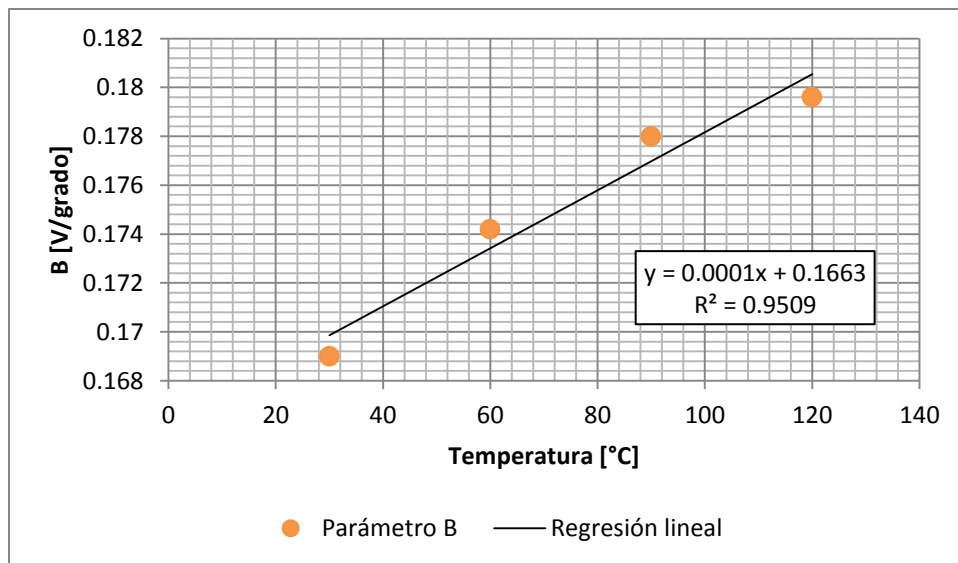


Figura 3-2. Variación del parámetro B respecto a la temperatura.



Por lo que finalmente se concluye que ambos parámetros se determinan de la siguiente manera:

$$A = 0.00387 \quad (3.3)$$

$$B = 0.00012T + 0.1663 \quad (3.4)$$

Sustituyendo (3.3) y (3.4) en (2.21) obtendremos una ecuación donde es posible determinar el ángulo conociendo el valor de la diferencia de voltaje y temperatura.

$$\Delta V = (0.00387 \Delta V + 0.00012T + 0.1663) \theta \cos \theta \quad (3.5)$$

### 3.2. Por cambios de respuesta de las celdas ante la presencia de la radiación ionizante

Estudios preliminares indican que la respuesta de la celda solar disminuye dependiendo de la radiación ionizante acumulada en ella a través del tiempo. Es decir, tomando como base en ecuación (2.17) se puede decir que

$$\Delta V = \frac{X V_{m\acute{a}x}}{\delta_{m\acute{a}x}} \theta \cos \theta \quad (3.6)$$

Donde  $X$  es un parámetro de degradación adimensional que afecta de manera proporcional el voltaje de salida de la celda. En caso de que la celda sea prácticamente nueva, es decir, no se haya sometido a radiación iónica, este parámetro tendrá en valor de 1. Mientras transcurra el tiempo y la celda esté sometida a la radiación ionizante el valor de  $X$  disminuirá.

La variación del parámetro  $X$  (Figura 3-3) se determinará con base en la información brindada por el fabricante (véase en Anexo "Celdas Solares K4710", Tabla Degradación por Radiación) y con ayuda de la Figura 2-5 (Curva que relaciona el porcentaje de disminución en respuesta de las celdas K4710, con la degradación producida por la radiación ionizante a lo largo del tiempo).

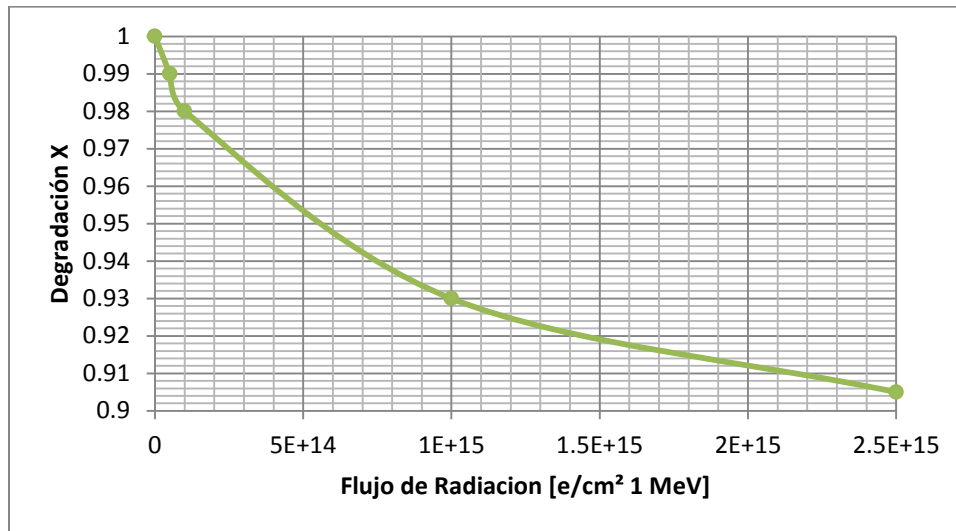


Figura 3-3. Variación del parámetro X respecto al flujo de radiación ionizante.

Considerando lo anterior, podemos reescribir la ecuación (3.5) con dependencia de la radiación ionizante.

$$\Delta V = X(0.00387 \Delta V + 0.00012T + 0.1663) \theta \cos \theta \quad (3.7)$$

Debido a que sólo se tiene información para valores puntuales de X, se optó llevar a cabo una interpolación lineal para datos intermedios, mientras que para aquellos valores superiores a  $2.5 \times 10^{15}$  [e/cm<sup>2</sup>] se hará una extrapolación. Para llevar a cabo la interpolación y extrapolación, se utilizan dos puntos conocidos  $[x_1, f(x_1)]$  y  $[x_2, f(x_2)]$ :

$$f(x) = f(x_1) + (x - x_1) \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \quad (3.8)$$

Recordando que para el caso de la interpolación:  $x_1 < x < x_2$

Finalmente, partiendo de (3.7) es posible establecer una ecuación general que pueda describir el comportamiento del ángulo para cualquier eje y de cualquier sensor de la siguiente forma:

$$\Delta V = X(a \Delta V + b_1 T + b_2) \theta \cos \theta \quad (3.9)$$

donde:

$\Delta V$ : Diferencia de voltaje [V].

$\theta$ : Ángulo del sensor respecto a un eje [grados].

X: Coeficiente de degradación (adimensional).

T: Temperatura [°C].

a,  $b_1$ ,  $b_2$ : Coeficientes característicos [1/grado], [V/(grado °C)], [V/grado].

3.3. Filtros digitales

Para el caso del filtrado digital se analizaron tres tipos de funcionamiento. En cada caso la función  $x[n]$  representa el comportamiento de la señal original mientras que  $y[n]$  constituye la señal filtrada.

**Respuesta impulsional finita o FIR (Finite Impulse Response):** en este filtro se retarda ligeramente una copia de la señal de entrada (de uno o varios períodos de muestreo) y se combina con la nueva señal de entrada (*Figura 3-4*).

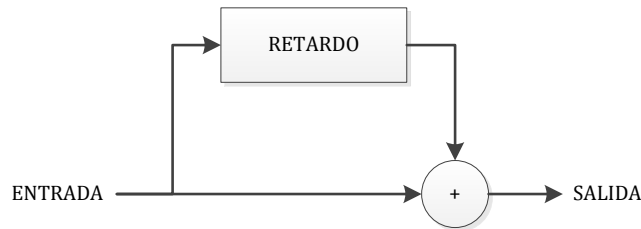


Figura 3-4. Diagrama de bloques del filtro tipo FIR.

$$y[n] = \sum_{i=0}^N a_i x[n - i] \tag{3.10}$$

Los filtros FIR ofrecen en general una respuesta de fase más lineal y no entran jamás en oscilación (es decir, no se vuelven inestables), ya que no poseen realimentación. Por otro lado, requieren un gran número de términos en sus ecuaciones y eso les hace más costosos en cuanto a cálculo o carga computacional. Un filtro FIR con un corte muy abrupto (es decir, que tenga una banda de transición muy corta) puede requerir hasta centenas de retardos.

**Respuesta impulsional infinita o IIR (Infinite Impulse Response):** aquí se retarda una copia de la señal de salida, la cual es combinada con la nueva señal de entrada. Los filtros digitales basados en este funcionamiento se les denominan filtros recursivos o con feedback (*Figura 3-5*).

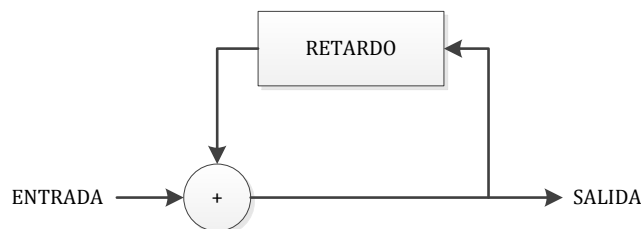


Figura 3-5. Diagrama de bloques del filtro tipo IIR.

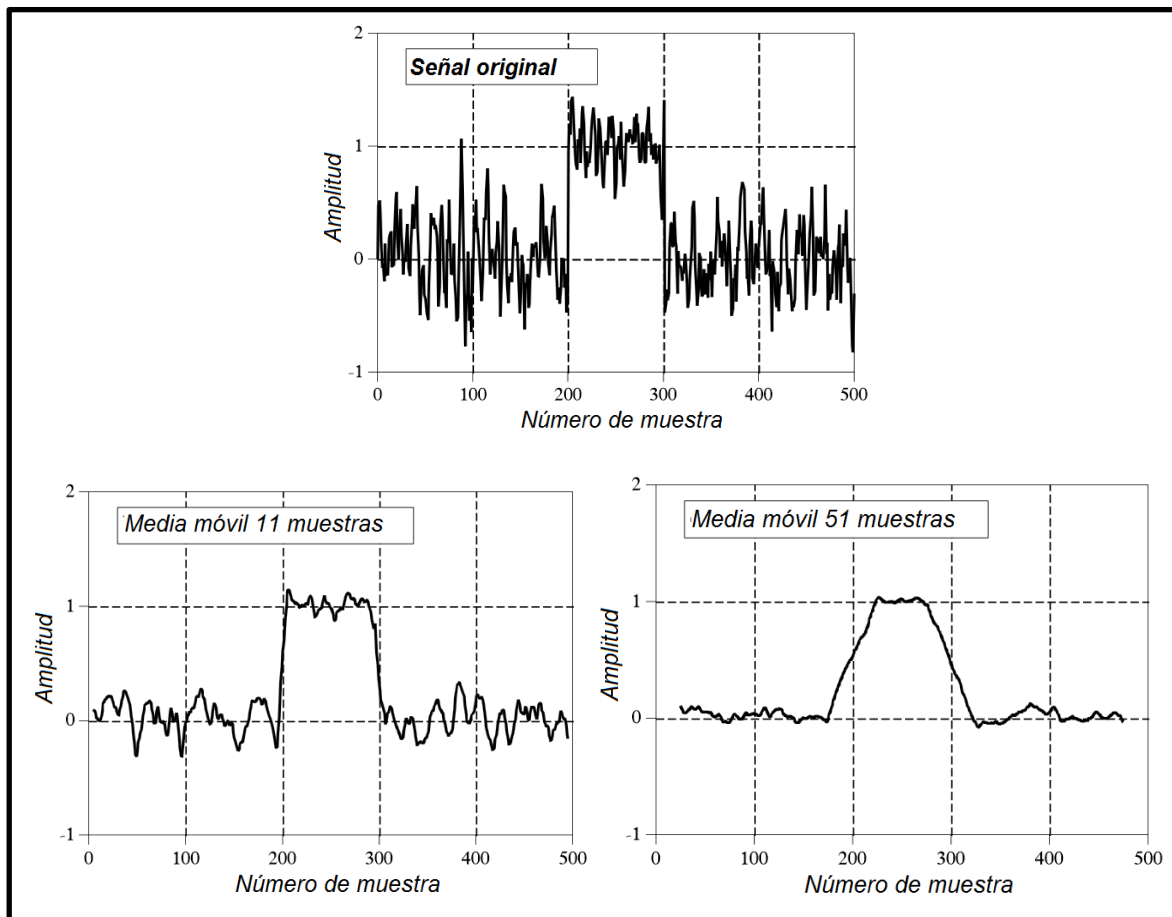
$$y[n] = \sum_{i=0}^N a_i x[n - i] - \sum_{j=1}^M b_j y[n - j] \tag{3.11}$$

Los filtros IIR, son muy eficaces y pueden proporcionar pendientes de corte muy pronunciadas. Por otro lado, al poseer características de realimentación tienen tendencia a entrar en oscilación y en resonancia.

**Media móvil.** En un filtro de media móvil de largo  $M$ , la salida actual consiste en el promedio de las últimas  $M$  muestras de la entrada. En la *Figura 3-6* se observa el comportamiento del filtro a considerar diferentes cantidades de muestras previas.

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x[n-i] \quad (3.12)$$

Este tipo de filtro tiene como aplicación principal suavizar una señal. Su implementación es más fácil en comparación a los primeros dos tipos de filtros debido a que carece de un cálculo complejo para la obtención de los coeficientes de prealimentación, los cuales son obtenidos a través de la media de la muestras. Por lo anterior, este filtro fue el seleccionado para procesar la señal del sensor solar, considerando suficiente un valor de  $M = 40$ .



*Figura 3-6. Ejemplo de un filtro media móvil. Se visualiza la señal original y dos señales filtradas cuando  $M = 11$  y  $M = 51$  (Smith, 1997).*

### 3.4. Diagrama de flujo

El diagrama de flujo es el diseño lógico del algoritmo propuesto, éste deberá considerar cada uno de los pasos a seguir para poder obtener el valor del ángulo utilizando la expresión (3.9). El diagrama de flujo deberá ser general, de tal forma que pueda ser programado en cualquier plataforma y por lo anterior deberá utilizar los alias propuestos en la tabla de entradas y salidas. Para este caso, la plataforma a utilizar será en C debido a que así fue solicitado por la contraparte rusa.

Hay que tomar en cuenta que en el microcontrolador que se pretende utilizar, muchos de los puertos tienen también la función de entradas y salidas de canales analógicos, por lo cual es necesario configurarlos sólo como entradas analógicas, ya que los datos procesados se transmitirán a través de la comunicación serial (RX, TX) y no a través de los canales del microcontrolador.

En la *Tabla 3-3* se describe la función y ubicación de los elementos que se utilizarán del microcontrolador y se les asigna un alias el cual servirá para distinguirlos dentro del diagrama de flujo.

*Tabla 3-3. Entradas y salidas.*

Descripción	Ubicación	Tipo	Alias
Se necesita un bit	PORTA0	I	vx1
Se necesita un bit	PORTA1	I	vx2
Se necesita un bit	PORTE0	I	vy1
Se necesita un bit	PORTE1	I	vy2

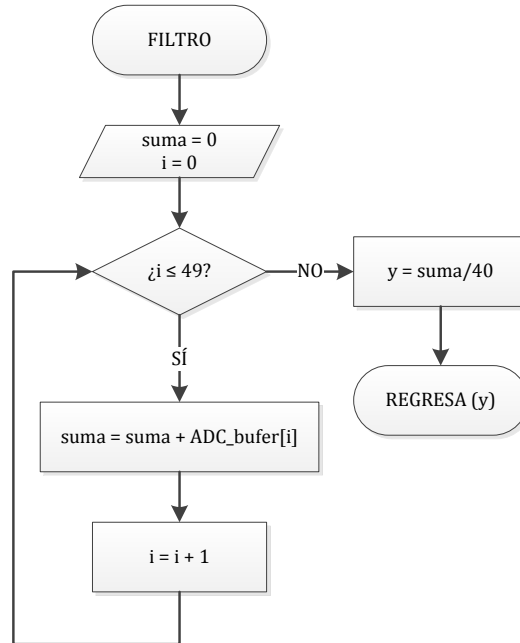
Para el funcionamiento del programa se consideran ciertos parámetros. Si alguna de las siguientes condiciones no se cumple, entonces el programa se detendrá dejando de enviar datos y volverá a funcionar hasta que se vuelva a cumplir la o las condiciones correspondientes.

1. Las celdas deben estar al menos parcialmente iluminadas ( $vx1 > 0[V]$ ,  $vx2 > 0[V]$ ,  $vy1 > 0[V]$ ,  $vy2 > 0[V]$ ).
2. El flujo de radiación iónica  $R$  debe ser mayor o igual a 0 [ $e/cm^2$ ].
3. El coeficiente de radiación iónica  $X$  debe ser mayor o igual a cero.
4. El ángulo  $\theta$  debe encontrarse entre los valores límites de  $-22.3^\circ$  y  $22.3^\circ$ .

El programa automáticamente volverá a ejecutar los cálculos hasta que las respectivas condiciones dejen de cumplirse, todo esto para evitar la generación de información errónea.

Dentro del programa existen dos procesos importantes: el filtrado digital y la implantación de un método numérico (bisección). A continuación se describirá en que consiste cada uno de ellos.

El filtro digital se considerará como un subproceso (o funciones en términos de programación) debido a que es utilizado en diversas ocasiones y, por lo tanto, facilitará la elaboración del diagrama de flujo de todo el programa. En la *Figura 3-7* se muestra el diagrama de flujo del filtro digital basado en la ecuación (3.12).



*Figura 3-7. Diagrama de flujo del subproceso de filtrado.*

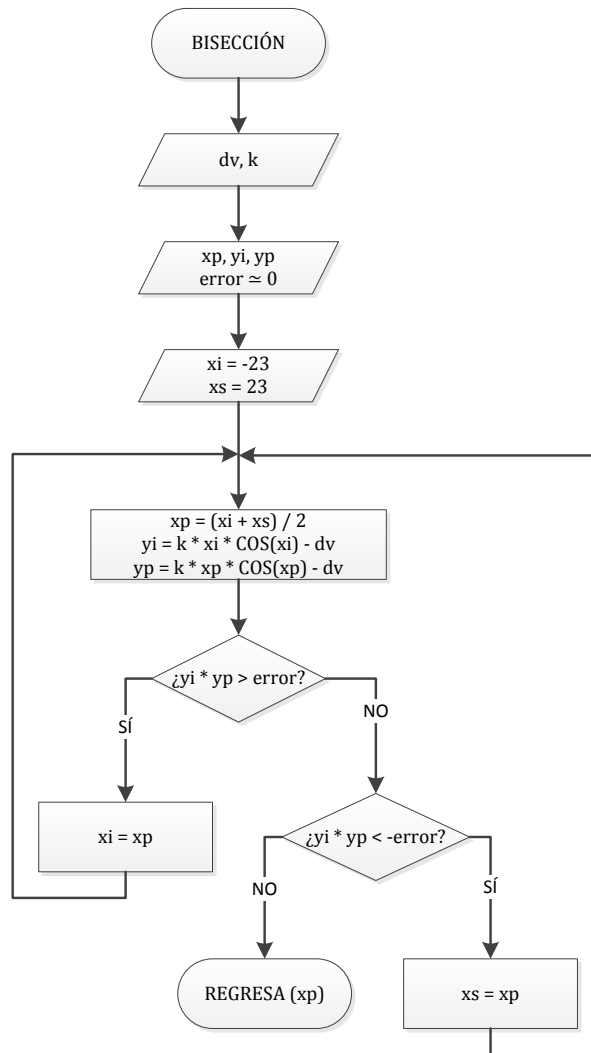
Otra función importante en el programa es el método de bisección. El método de bisección, conocido también como corte binario, de partición en dos intervalos iguales o método Bolzano, es un método de búsqueda incremental en el que el intervalo se divide siempre en dos. Si la función cambia de signo sobre un intervalo, se evalúa el valor de la función en el punto medio. La posición de la raíz se determina situándola en el punto medio del subintervalo dentro del cual ocurre el cambio de signo. El proceso se repite hasta obtener una mejor aproximación (Chapra, 2007). El desarrollo numérico del algoritmo es el siguiente:

1. Elegir los valores iniciales inferior  $x_i$  y superior  $x_s$  de forma tal que la función cambia de signo sobre el intervalo. Esto se puede verificar asegurándose de que  $f(x_i) f(x_s) < 0$ .
2. La primera aproximación a la raíz  $x_r$  se determina como:

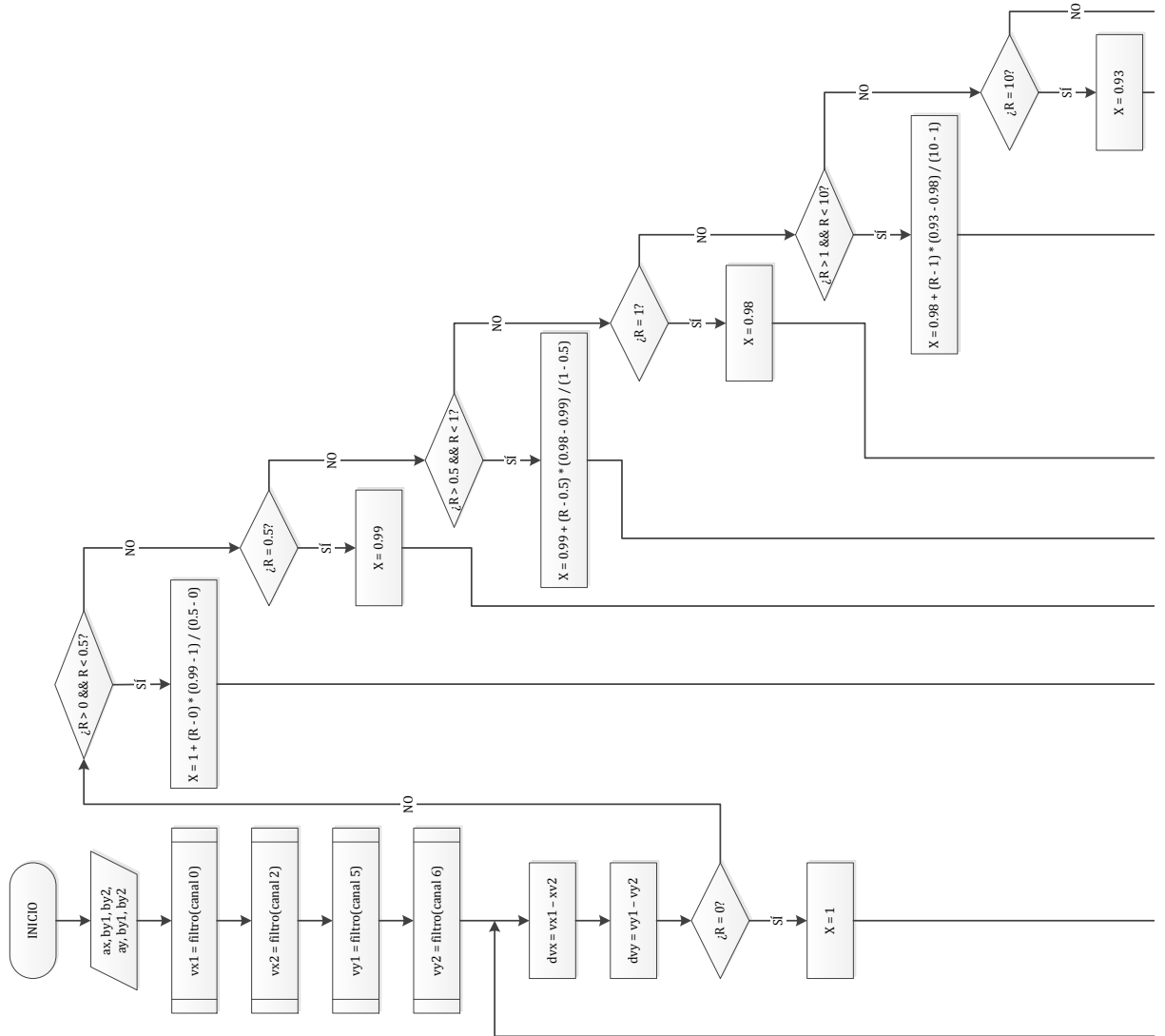
$$x_r = \frac{x_i + x_s}{2} \quad (3.13)$$

3. Realizar las siguientes evaluaciones para determinar en qué subintervalo cae la raíz:
  - a. Si  $f(x_i) f(x_r) < 0$ , entonces la raíz se encuentra dentro del subintervalo. Por lo tanto, se toma  $x_s = x_r$  y se regresa al paso 2.
  - b. Si  $f(x_i) f(x_r) > 0$ , entonces la raíz se encuentra dentro del subintervalo superior. Por lo tanto, se toma  $x_i = x_r$  y se regresa al paso 2.
4. Si  $f(x_i) f(x_r) = 0$ , la raíz es igual a  $x_r$ : termina el cálculo.

Al igual que el filtro digital, la implementación del método de bisección se considerará como un subproceso. El algoritmo descrito previamente se representa en un diagrama de flujo ilustrado en la *Figura 3-8*. En la *Figura 3-9* se muestra el diagrama de flujo correspondiente al algoritmo completo.



*Figura 3-8. Diagrama de flujo del subproceso del método de bisección para el cálculo del ángulo.*





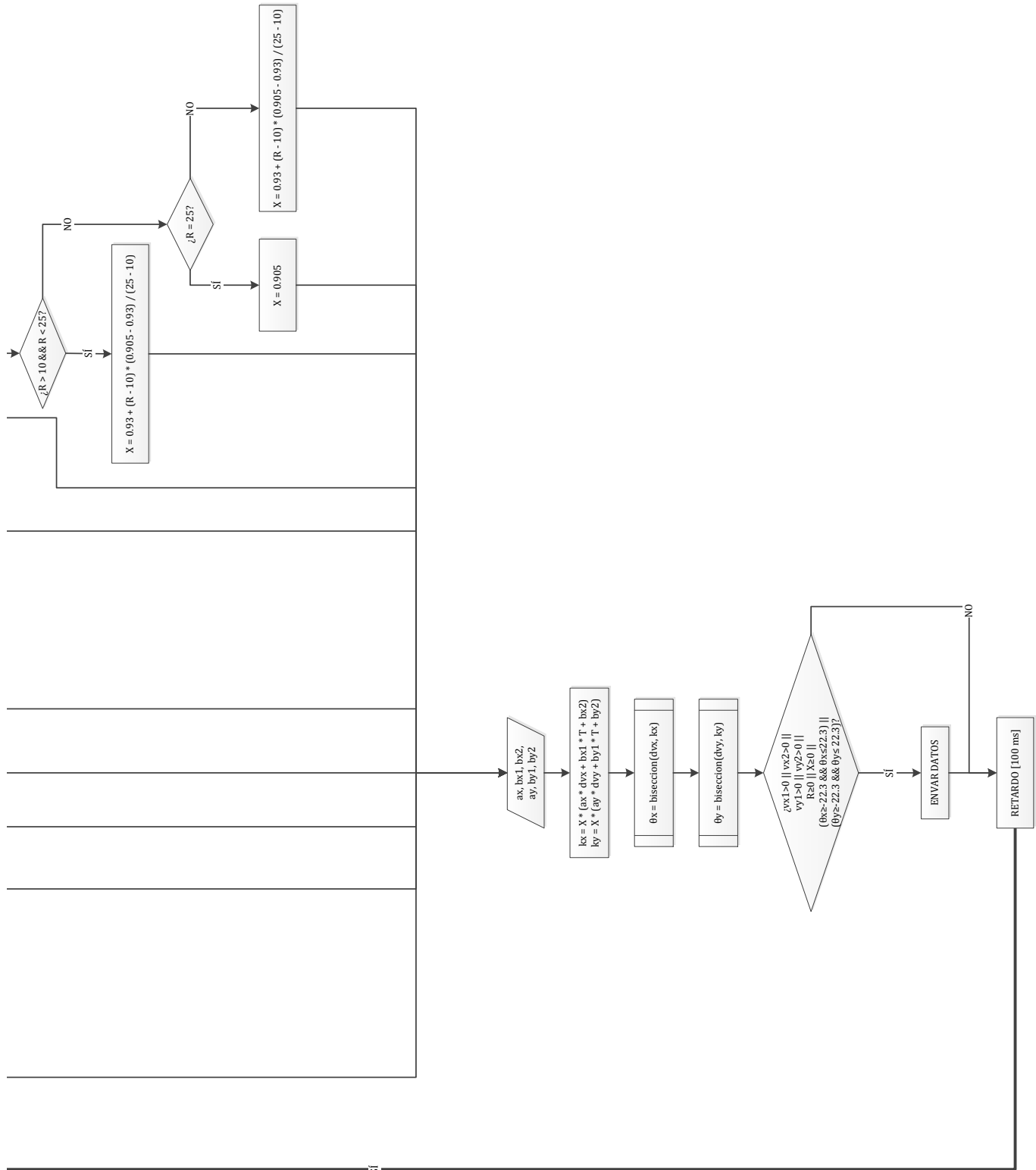


Figura 3-9. Diagrama de flujo completo utilizado para el procesamiento de señales procedentes del sensor solar.

### 3.5. Programa fuente

El programa fuente se desarrolló utilizando el lenguaje de programación C. Se utilizó además un compilador para convertir el lenguaje de alto nivel a instrucciones en lenguaje máquina. *PIC C Compiler* (Figura 3-10) fue el compilador utilizado debido a que ha sido desarrollado específicamente para microcontroladores PIC. Dispone de una amplia gama de librerías de funciones predefinidas y controladores (drivers) para diversos dispositivos (LCD, ADC, relojes en tiempo real, memorias seriales).

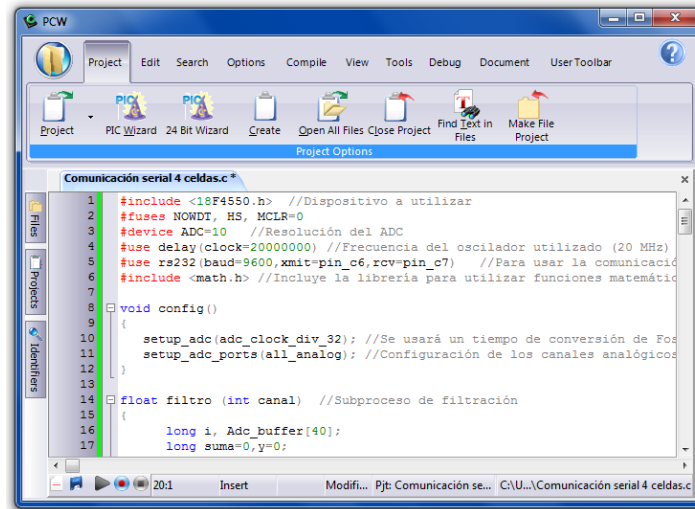


Figura 3-10. Interfaz del compilador PIC C.

El programa en C consta básicamente de los siguientes elementos:

- **Directivas y declaraciones:** Se ubican al inicio del programa, básicamente tratan de configuración de hardware, así como de opciones para el compilador.
- **Variables:** El lenguaje C permite utilizar variables globales y locales, ambas deben ser declaradas. Las globales se declaran después de las directivas, mientras que las locales al inicio de la función que se encuentren.
- **Funciones:** Éstas son bloques con un conjunto de instrucciones para generar una tarea en específico, son llamadas como un comando desde cualquier otra función, pueden tener o no argumentos para su ejecución y/o resultado al término de la misma.
- **Función principal "main":** Es el núcleo del programa, en esta función es donde comienza la ejecución de instrucciones. Desde *main* se realizarán llamados a otras funciones, y en caso de que el programa tenga un fin, será cuando *main* concluya.

En las siguientes páginas se mostrará el código fuente programado.

```

#include <18F4550.h> //Dispositivo a utilizar
#fuses NOWDT, HS, MCLR=0
#device ADC=10 //Resolución del ADC
#use delay(clock=20000000) //Frecuencia del oscilador utilizado (20 MHz)
#use rs232(baud=9600,xmit=pin_c6,rcv=pin_c7) //Para usar la comunicación RS232
#include <math.h> //Incluye la librería para utilizar funciones matemáticas

void config()
{
    setup_adc(adc_clock_div_32); //Se usará un tiempo de conversión de  $F_{osc}/32 = 20M/32 = 1.6 \text{ us}$ 
    setup_adc_ports(all_analog); //Configuración de los canales analógicos
}

float filtro (int canal) //Subproceso de filtración
{
    long i, Adc_buffer[40];
    long suma=0,y=0;
    float filtro=0;

    set_adc_channel(canal); //Se lee dicho canal
    for (i=0; i<=39; i++) //Realiza la sumatoria
    {
        delay_us(10);
        Adc_buffer[i]=read_adc();
        suma=suma+Adc_buffer[i];
    }
    y=suma/40; //Realiza la media

    filtro=(float)y*5/1024; //Multiplicación por la resolución del ADC
    return filtro;
}

float biseccion (float dv, float k) //Subproceso del método de bisección
{
    // Datos necesarios para el método de bisección
    int salir = 1;
    float xp, yi, yp;
    float xi = -23, xs = 23;
    float error = 0.0000000001;

    do
    {
        xp = (xi + xs) / 2;
        yi = k * xi * COS(xi*PI/180) - dv;
        yp = k * xp * COS(xp*PI/180) - dv;
    }
}

```

```

    if (yi * yp > error)
        xi = xp;
    else if (yi * yp < -error)
        xs = xp;
    else
        salir = 0;
    }
    while (salir==1);
    return xp;
}

void main()
{
    float vx1=0, vx2=0, vy1=0, vy2=0, dvx=0,dvy=0,thetax=0,thetay=0;
    config(); //Llama función "config"
    while(true) //Inicia el bucle
    {

        ////////// Obtención de datos de los voltajes //////////
        vx1 = filtro(0);
        vx2 = filtro(1);
        vy1 = filtro(5);
        vy2 = filtro(6);
        dvx = vx1-vx2;
        dvy = vy1-vy2;

        ////////// Cálculo del ángulo //////////

        // Parámetros generales
        float T=30; //Temperatura
        float R=0, X; //Radiación

        // Interpolaciones para el coeficiente X del flujo de radiación
        /*
        *   R x10^(14)   X
        *   0             1
        *   0.5           0.99
        *   1             0.98
        *   10            0.93
        *   25            0.905
        */

        if (R == 0)
            X = 1;
        else if (R > 0 && R < 0.5)

```

```

    X = 1 + (R - 0) * (0.99 - 1) / (0.5 - 0);
else if (R == 0.5)
    X = 0.99;
else if (R > 0.5 && R < 1)
    X = 0.99 + (R - 0.5) * (0.98 - 0.99) / (1 - 0.5);
else if (R == 1)
    X = 0.98;
else if (R > 1 && R < 10)
    X = 0.98 + (R - 1) * (0.93 - 0.98) / (10 - 1);
else if (R == 10)
    X = 0.93;
else if (R > 10 && R < 25)
    X = 0.93 + (R - 10) * (0.905 - 0.93) / (25 - 10);
else if (R == 25)
    X = 0.905;
else //(R > 25)
    X = 0.93 + (R - 10) * (0.905 - 0.93) / (25 - 10);

// Parámetro k y coeficientes característicos a, b1, b2
float kx;
float ax = 0.00387, bx1 = 0.00012, bx2 = 0.1663;
float ky;
float ay = 0.00387, by1 = 0.00012, by2 = 0.1663;

// Cálculo del parámetro k
kx = X * (ax * dvx + bx1 * T + bx2);
ky = X * (ay * dvy + by1 * T + by2);

// Cálculo de los ángulos con el método de bisección
thetax = biseccion(dvx,kx);
thetay = biseccion(dvy,ky);

//Condiciones para que el programa funcione
//Si alguna de las condiciones se cumple, se dejará de enviar datos
if(!(vx1<0.01 || vx2<0.01 || vy1<0.01 || vy2<0.01 || R<0 || X<0 || thetax<-22.3 ||
thetax>22.3 || thetay<-22.3 || thetay>22.3))
{
    // Envío de información a través de comunicación RS232
    printf("%.2f %.2f %.2f %.2f %.1f %.1f ",vx1, vx2, vy1, vy2, thetax, thetay);
}
delay_ms(100); //Espera 100 ms para ejecutar nuevamente el programa
}
}

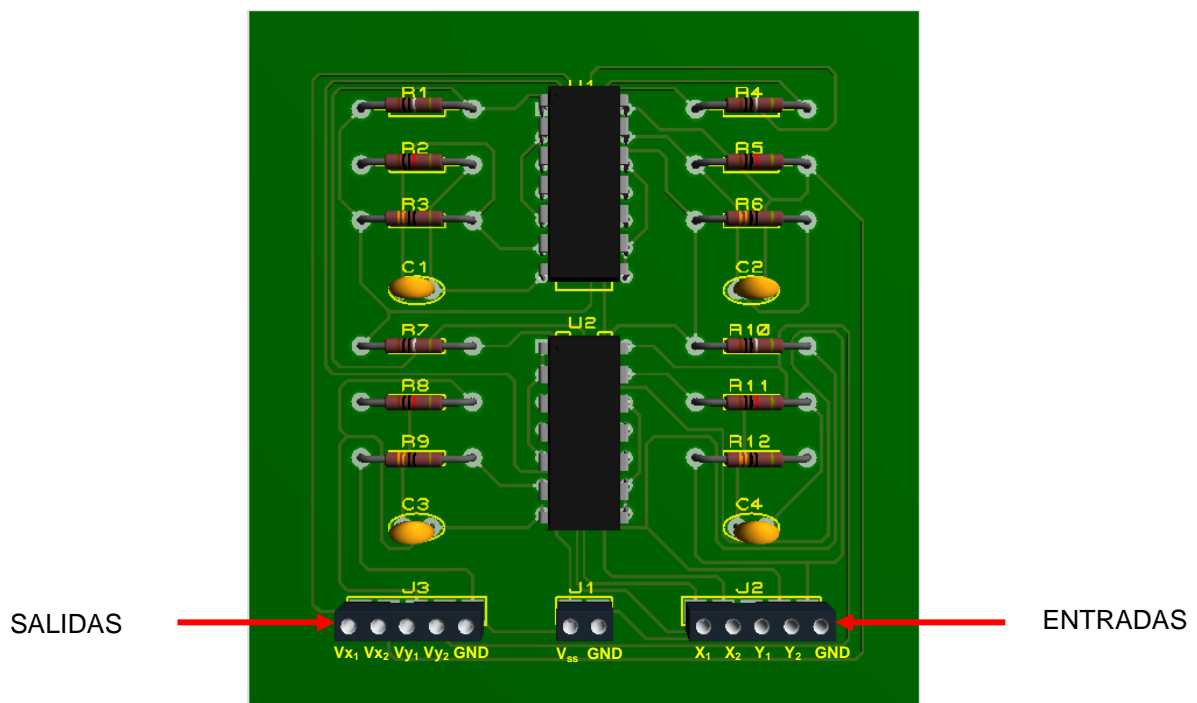
```

### 3.6. Implementación en computadora en una sola tarjeta

Para la parte electrónica del sensor solar, se diseñó una tarjeta de circuito impreso o PCB<sup>12</sup> para montar el circuito descrito en la [Figura 2-25](#). Se utilizó ARES como el software de diseño para generar la plantilla del PCB. Al no utilizar voltajes negativos para el funcionamiento de los amplificadores operacionales, se incluyó sólo una línea de voltaje y otra de tierra. Recordando que la señal máxima que entregara el amplificador operacional al incrementar la señal de cada celda es de 5 [V] y además, un volt es lo que consume el circuito integrado para su funcionamiento, entonces el voltaje de alimentación para la tarjeta tiene que ser de al menos 6 [V].

En el circuito impreso también se consideran cuatro puntos de entrada, necesarios para las señales recibidas de las cuatro celdas del sensor y otros cuatro correspondientes a las señales de salida los cuales serán conectados, ya sea al microcontrolador o a la computadora a bordo del satélite. En las líneas de entradas se colocará un cable con conector 1114174 el cual se conectará con su contra parte situada en el chasis del sensor.

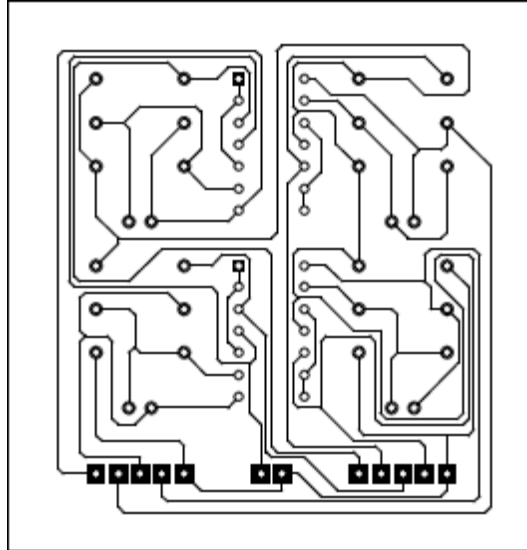
En la [Figura 3-11](#) se observa el diseño final propuesto del circuito electrónico, en donde se muestra claramente la ubicación de las líneas de entrada, salida y alimentación.



**Figura 3-11.** Circuito electrónico diseñado para las etapas de conversión I-V y de acondicionamiento, en el proceso de sensado.

<sup>12</sup> Del inglés Printed Circuit Board.

El circuito impreso cuenta con sólo una cara de pistas, lo que facilita su fabricación. Asimismo, se trató de utilizar el menor espacio posible dada su aplicación espacial. Cuenta con una dimensión aproximada de 7.3 por 7.1 [cm]. En la [Figura 3-12](#) se muestra el modelo del grabado para el PCB en tamaño real.



*Figura 3-12. Circuito impreso para contener la electrónica del sensor de Sol. Escala 1:1.*





# 4

## PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y CALIBRACIÓN

### 4.1. Simulador solar

Un simulador solar es un dispositivo que produce una radiación cercana a la del Sol. El propósito de un simulador solar es llevar a cabo, en un lugar cerrado y con condiciones controladas, pruebas representando la energía solar incidente. Por ello, antes del análisis del simulador solar es necesario conocer el comportamiento de la radiación solar espacial para finalmente compararlos.

En la *Figura 4-1* se puede observar, entre otras cosas, la radiación solar que llega a nuestro planeta antes de atravesar la atmósfera. La energía radiante solar se encuentra dentro del intervalo de longitudes de onda entre 150 y 4,000 [nm], que incluyen a la luz visible y una porción de luz ultravioleta en infrarrojo. Considerando la totalidad de la radiación solar, aproximadamente un 6% corresponde al ultravioleta y un 46% al infrarrojo. El 48% restante se encuentra en el espectro visible con una intensidad máxima en aproximadamente 500 [nm] (Castillo, 2001). Debido a que el Sol es considerado como un cuerpo negro, es posible calcular la temperatura de su superficie utilizando la ecuación (1.16), dando como resultado una temperatura de 5,800 [K]. Al atravesar la atmósfera, parte de la radiación solar es reflejada o absorbida.

En la misma figura es posible observar las características de absorción de celdas solares elaboradas con diferentes semiconductores. La banda prohibida (o badgap) de cada material semiconductor es el que determina la porción del espectro solar que es capaz de captar y es susceptible de ser transformado en corriente eléctrica por la celda solar. En el caso del silicio, fundamentalmente capta una porción del espectro que se corresponde con el visible y parte del infrarrojo cercano, convirtiéndola directamente en electricidad. Las longitudes correspondientes al UV se disipa en forma de calor y las longitudes de onda menores atraviesan la celda solar sin aprovecharse. Las celdas solares que emplean otros materiales semiconductores absorben preferentemente en el rango del visible e IR (infrarrojo), dado que la radiación solar que llega a la corteza terrestre lo hace en forma de fotones con energías en un rango entre los 0,7 y los 3,9 eV (Admat Net, 2013).

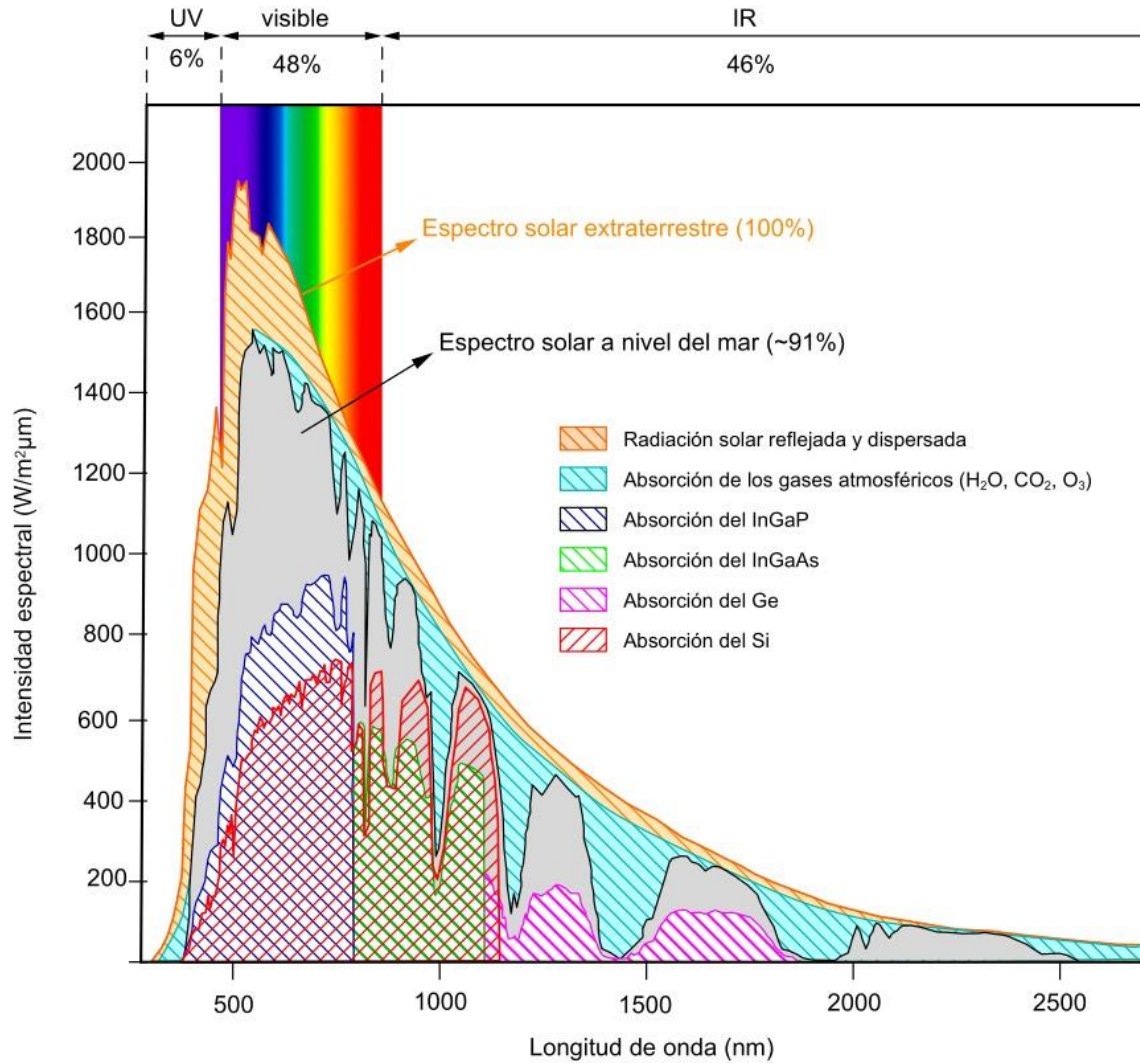


Figura 4-1. Variación del espectro solar y propiedades de absorción de algunos semiconductores (Admat Net, 2013).

Como se vio en el Capítulo 2, se utilizó una lámpara de halógeno como simulador solar para analizar el funcionamiento del sensor solar. Algunas de las especificaciones técnicas de esta lámpara se visualizan en la [Tabla 4-1](#).

	<b>Código ANSI</b>	CYX
	<b>Watts</b>	2,000
	<b>Volts</b>	120
	<b>Horas de vida promedio</b>	350
	<b>Tipo de socket</b>	G38
	<b>Lumen</b>	59,000
	<b>Temperatura de color</b>	3,200 [K]

Tabla 4-1. Especificaciones de la lámpara de halógeno utilizada como simulador solar (Voostore, 2014).

Se utilizó un espectrómetro para obtener las características de la radiación del simulador solar y compararlas respecto a la radiación solar en el espacio.

El equipo a utilizar para medir el espectro se visualiza en la *Figura 4-2* y consiste en baterías, cargador de baterías, panel Espectralon, espectrómetro GER1500 y el software para el procesamiento de datos. El sistema GER1500 (Geophysical and Environmental Research Corporation) es capaz de medir sobre un rango de longitudes de onda correspondientes a la luz visible hasta el infrarrojo cercano.



*Figura 4-2. Equipo para la medición de la intensidad de radiación.*

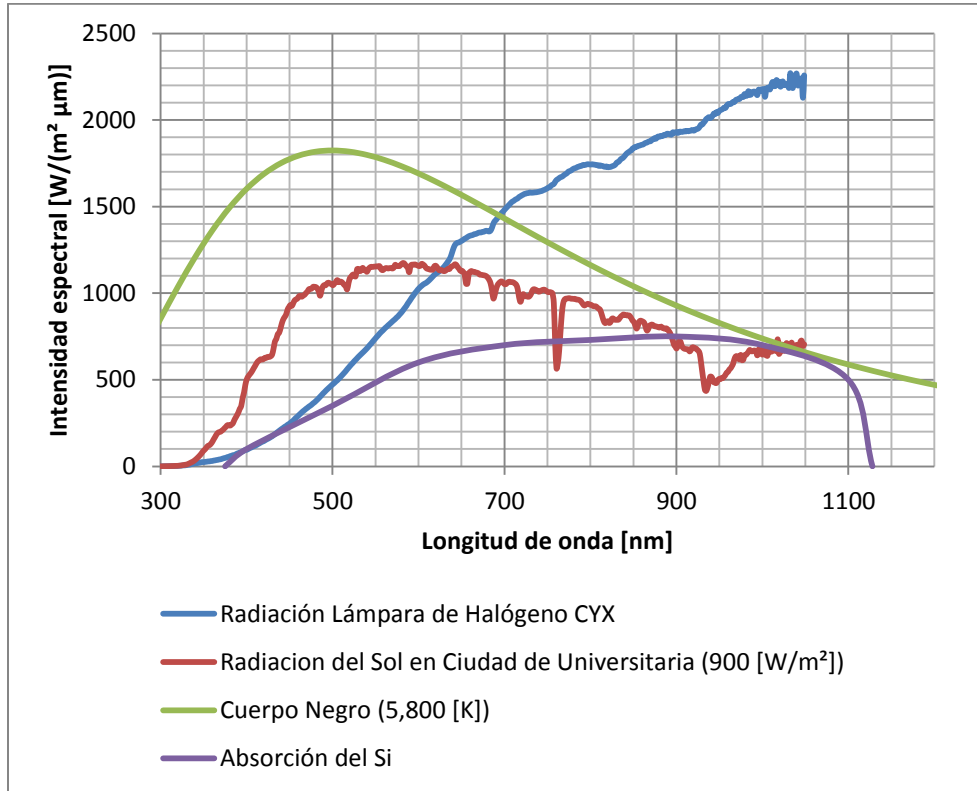
En el Apéndice A se describe el proceso correspondiente para utilizar el equipo en modo *Stand Alone*<sup>13</sup>, midiendo además la radiación de la lámpara de halógeno para ejemplificar su uso.

#### **4.1.1. Respuesta espectral del simulador solar utilizado**

Conociendo el funcionamiento del espectrómetro, se midió la emitancia del simulador solar y de la radiación directa del Sol. Se hizo una comparación de la radiación solar que llega a las afueras de nuestra atmósfera, utilizando la ecuación (1.15) y considerando que la emitancia producida en la superficie del Sol cae hasta  $2.16 \times 10^{-5}$  de su valor original al llegar a la Tierra (de  $63.4356 \times 10^6$  [W/m<sup>2</sup>] a 1,371 [W/m<sup>2</sup>]).

<sup>13</sup> Existen tres modos de operación para el Sistema GER1500: Single-Beam (transmisión de datos en tiempo real desde un espectrómetro), Dual-Beam (transmisión de datos en tiempo real desde dos espectrómetros) y Stand-Alone (almacenamiento de datos en la memoria interna de un espectrómetro).

En la *Figura 4-3* se puede apreciar la radiación, medida y calculada, de diferentes fuentes, así como la radiación máxima que puede ser absorbida por una celda solar de silicio en el espacio. Se observa que la radiación emitida por la lámpara de halógeno abastece por completo el rango de absorción de la celda, al igual que lo hace la radiación solar extraterrestre. En la radiación que llega hasta la superficie de la Tierra existen variaciones provocadas por la presencia del aire, por lo que no se cubre totalmente el rango de absorción de la celda. Por lo anterior se concluye que la lámpara de halógeno simula las condiciones necesarias de trabajo en el espacio para el sensor solar.



*Figura 4-3. Radiación de diversas fuentes y absorción máxima de una celda de silicio.*

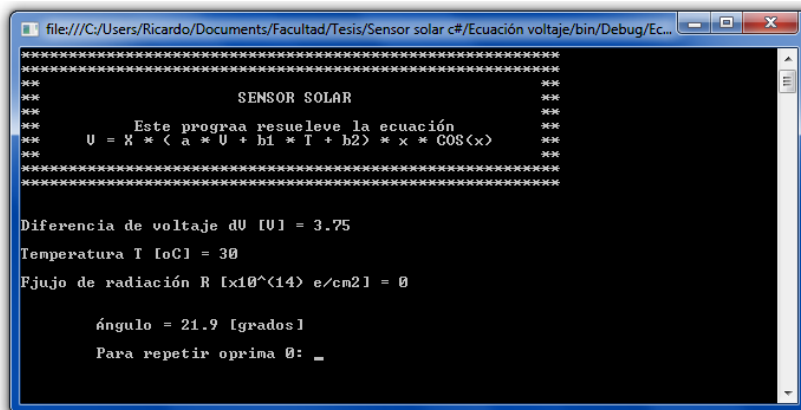
## 4.2. Curvas de respuesta y evaluación del algoritmo de calibración

Se llevaron a cabo diversas pruebas sometiendo al sensor a la radiación de lámpara de halógeno. Las pruebas realizadas sirvieron para corroborar la precisión de la ecuación (3.7). La radiación iónica, al no poder simularla dentro del laboratorio, se consideró nula ( $X = 1$ ).

Para poder comparar los datos experimentales obtenidos con el modelo matemático, diseñé un programa (independiente al programa del microcontrolador) en Microsoft Visual C# 2010 Express capaz de ejecutar el algoritmo de compensación y calcular el ángulo de inclinación a partir de los datos de diferencia de voltaje, temperatura y

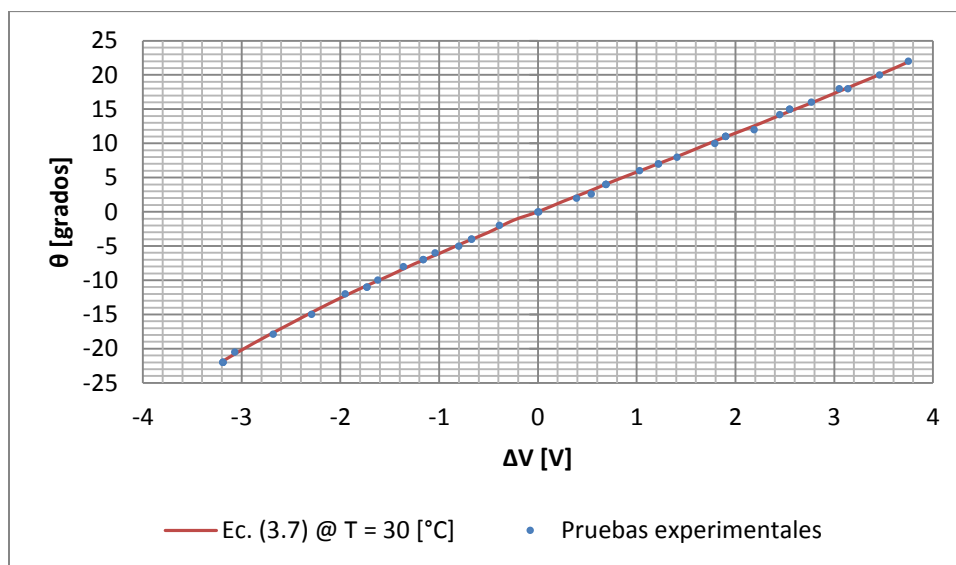
radiación ionizante ingresados por el usuario a través del teclado de la computadora (*Figura 4-4*).

El programa sirvió además para obtener varios datos de la ecuación para posteriormente graficar y compararla con la información de las pruebas experimentales.



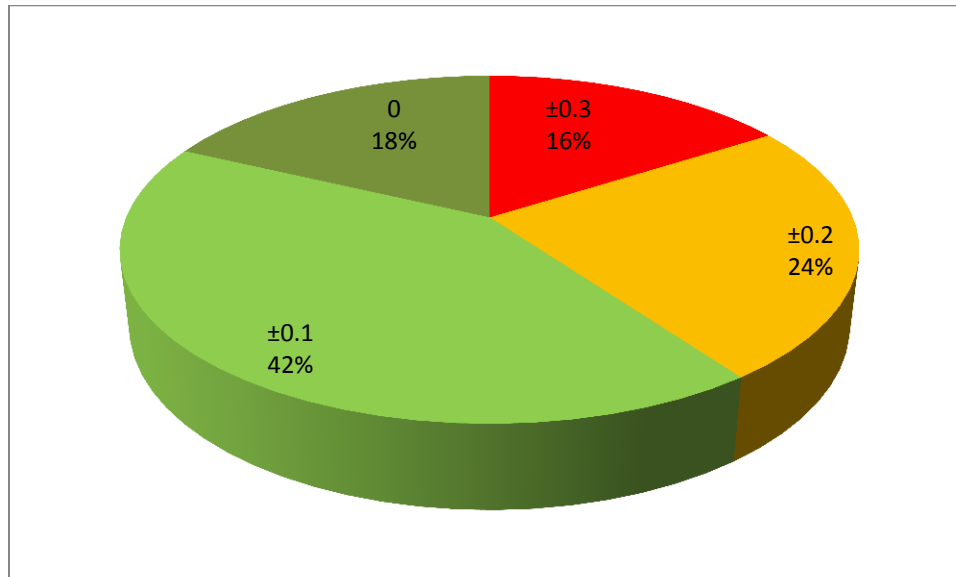
*Figura 4-4. Interfaz del programa en C# para la obtención del ángulo de inclinación a partir de la ecuación (3.7).*

Las primeras pruebas se realizaron a temperatura constante, para poder compararlas fácilmente con la ecuación. Los resultados obtenidos pueden observarse en la *Figura 4-5*, donde se aprecia claramente la cercanía que se tiene con el modelo matemático propuesto. El error absoluto obtenido en esta serie de pruebas respecto a la estimada apenas alcanza el valor de  $\pm 0.3$  grados para una cantidad mínima de muestras.



*Figura 4-5. Resultados de las primeras pruebas realizadas al sensor solar considerando una temperatura constante y radiación ionizante nula.*

Se puede concluir que aunque, el modelo no es exacto, es lo suficientemente certero para utilizarlo. Después de estas primeras pruebas, se realizaron otras variando la temperatura, ya que en condiciones espaciales este parámetro varía súbitamente. Se llevaron a cabo cincuenta pruebas arbitrarias. El rango de temperatura utilizado fue de 30 a 120 [°C], variando el ángulo y considerando nuevamente como nula la radiación ionizante. Los resultados obtenidos se muestran en la *Figura 4-6*.



*Figura 4-6. Resultado de las 50 pruebas realizadas. El número superior indica el error absoluto obtenido, mientras que el inferior indica el tanto por ciento de las 50 pruebas que obtuvieron dicho error.*

Es posible observar que 16% de las pruebas tuvieron un error absoluto de  $\pm 0.3$  grados, mientras que el 60% arrojaron un error igual o menor a  $\pm 0.1$  grados. El error de hasta  $\pm 0.2$  grados es tolerable, concluyendo que si bien el algoritmo propuesto es bastante certero, aun cuenta con una cantidad pequeña de lecturas cuyo error es mayor a la estimada. Considerando lo anterior se optó por no modificar el algoritmo y proponer un sistema de redundancia en hardware para reducir considerable el error en el sensado.

### 4.3. Determinación de las pruebas de calificación para vuelo espacial

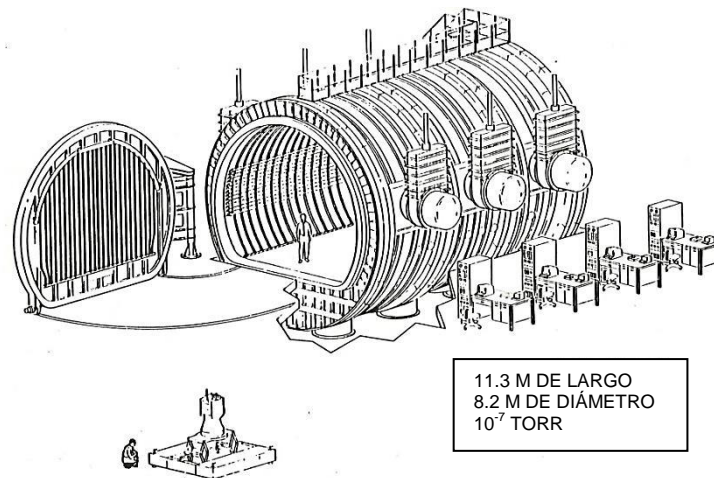
Todos los componentes y sistemas que serán colocados en órbita tienen que someterse previamente a criterios y pruebas de calificación para asegurar con suficiente certeza el funcionamiento correcto del instrumento en las condiciones extremas del espacio. Someter al sensor a este tipo de pruebas ya no forma parte de este proyecto de tesis, sin embargo, se presentará una breve descripción acerca de las pruebas más importantes para vuelo espacial.



Entre los criterios de calificación para vuelo espacial se menciona que los equipos que ya han estado en órbita y han cumplido exitosamente su misión, están aceptados para vuelo orbital futuro. Para poder utilizar componentes o dispositivos aún no calificados es recomendable aplicar ciertos métodos, por ejemplo, colocándolos en contenedores sellados, protegidos por cajas metálicas.

Otro recurso muy utilizado es construir dos modelos del mismo instrumento, uno de prueba (al que se le somete a los ensayos más rigurosos de calificación) y otro conocido como modelo de vuelo (al que se le somete a pruebas de aceptación que son menos severas que las primeras). Los principales equipos que deben utilizarse para las pruebas son los siguientes:

- **Cámara de termovacío:** Es una cámara con bombas mecánicas y de difusión (*Figura 4-7*) para llevar y mantener al sistema a una presión de vacío de  $10^{-7}$  [torr] que equivale a  $1.33 \times 10^{-4}$  [N/m<sup>2</sup>].



*Figura 4-7. Cámara de termovacío (Logsdon, 1998).*

- **Horno:** Para someter a temperaturas extremas, este equipo utiliza como elementos calefactores resistores y el enfriamiento se realiza con nitrógeno líquido.
- **Mesa vibratoria:** Para someter a los equipos a vibraciones. En esta serie de pruebas debe demostrarse que los equipos pueden soportar el espectro de vibración que les impondrá el lanzamiento a órbita, y debe cumplirse también el requisito de que la frecuencia de resonancia de la carga útil sea diferente a la del vehículo lanzador.
- **Acelerador de partículas:** Este equipo es utilizado para demostrar que la carga útil puede soportar los niveles de radiación estipulados en el diseño.

#### 4.4. Protocolo de integración con satélite

Para efectuar el proceso de montaje del sensor solar en el satélite Cóndor es necesario llevar a cabo el siguiente protocolo, esto nos asegurará una lectura acertada cuando se ponga en marcha en el espacio.

Es importante mencionar que si se desea fabricar más sensores, cada sensor tendrá una respuesta la descrita por la ecuación (3.9), sin embargo, por la exactitud requerida en el proyecto, cada sensor deberá ser estudiado y caracterizado para obtener el valor exacto de sus tres coeficientes. La caracterización consiste en hacer pruebas a 22 y -22 grados a 30, 60, 90 y 120 [°C] para desarrollar el procedimiento descrito en el subtema 3.1.

Recordando, el sensor solar brinda la inclinación, en grados, sobre dos ejes de referencia X y Y. Durante el montaje del sensor es necesario tener algún instrumento independiente al sensor que sea capaz de medir con suficiente precisión la inclinación que tenga el satélite (una brújula por ejemplo). Cuando se coloque el sensor éste debe estar en funcionamiento mientras se mide la diferencia de voltaje de cada eje. Esto es necesario para asegurar que la posición considerada como cero grados sea la correcta al tener una diferencia de voltaje de cero volts.



## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

## 5.1. Resultados

El objetivo principal de este trabajo de tesis fue diseñar, construir y probar un sensor de Sol para determinar la orientación en dos ejes en un satélite. En nuevo diseño tendría que permitir mejoras respecto a la masa, consumo de energía y precisión, al compararse las propuestas preliminares desarrolladas en el Laboratorio de Análisis Geoespacial del Instituto de Geografía, esto fundamentalmente por su implementación sobre un satélite real: el Cónдор.

La energía que alimenta un satélite, un recurso limitado, fue uno de los principales parámetros a considerar. Por el uso de amplificadores operacionales, en diseños previos se habían utilizado fuentes de voltaje simétricas comprendidas desde  $-12$  hasta  $12$  [V] para el funcionamiento del circuito del sensor solar. Sin embargo, se pudo reducir ese consumo con el diseño de un circuito que no requiere de voltaje de alimentación negativa, y puede funcionar hasta con  $6$  [V] de alimentación directa. Al utilizar un filtro digital en lugar de un filtro activo se redujo considerablemente el número de componentes electrónicos utilizados, lo que propicia una mejora en consumo de energía y reducción de masa.

Para el procesamiento digital de la señal, se utilizó un microcontrolador de gama alta simulando las tareas realizadas por la computadora de abordo del satélite y de esta forma poner a prueba el algoritmo desarrollado en este trabajo. El algoritmo está diseñado para poder ser implementado en cualquier lenguaje de programación si se interpreta correctamente el diagrama de flujo. Para este caso, se elaboró el programa en un lenguaje de alto nivel (C), debido a que así fue solicitado para el proyecto. Utilizar un lenguaje de alto nivel tiene como ventaja su facilidad de programación, lo que es ideal para proyectos de alta complejidad, además de que hoy en día es muy usado alrededor del mundo.

Respecto a la lectura del sensado, se estableció que es sensor funcionara dentro de un rango de  $-22^\circ$  hasta  $22^\circ$  por cada eje. Para el diseño del sensor y su electrónica, así como para el algoritmo de compensación, se utilizó un rango mayor considerando un factor de seguridad y el error absoluto que podría tener, por lo que se garantiza un

buen funcionamiento dentro de los  $\pm 22.3^\circ$ . El error absoluto esperado era de  $\pm 0.1^\circ$ , sin embargo, las pruebas indican lecturas con errores de hasta  $\pm 0.3^\circ$ . Aunque el error obtenido es mayor al esperado, sigue siendo mucho mejor en comparación con prototipos previos. Estos últimos llegaron a alcanzar errores de hasta  $\pm 0.5^\circ$ . Se espera que al utilizar los materiales especificados y construyendo la electrónica del sensor en un laboratorio con ausencia de impurezas en el aire y con condiciones ambientales controladas, el sensor reduzca su error. Por último, respecto a su precisión, se propone un sistema de redundancia en hardware, configuración muy utilizada en satélites y la cual consiste en utilizar más de un sensor para obtener una señal más confiable.

## 5.2. Conclusiones

A partir de trabajo realizado se puede concluir que los objetivos principales se cumplieron: fue posible diseñar el chasis de aluminio, la electrónica de acondicionamiento y un algoritmo de compensación de un sensor de Sol; se construyó un prototipo funcional del sistema de sensado para someterlo a pruebas y así comprobar su correcto funcionamiento. El sistema de sensado está capacitado para funcionar en el espacio, ya que fue construido con materiales y componentes de calidad militar y espacial.

El sensor es capaz de dar la orientación respecto a dos ejes utilizando como referencia la ubicación del Sol. Cuenta con un rango de funcionamiento ubicado entre  $\pm 22.3^\circ$ , una resolución de  $0.1^\circ$  y un error absoluto de  $\pm 0.3^\circ$ , error que puede disminuir si el sensor es fabricado como se especifica y además si es implementado un sistema de redundancia en hardware. La resolución del sensor pudo ajustarse correctamente a  $0.1^\circ$  gracias al tamaño del ADC (10 bits).

Algo no planeado como objetivo para este trabajo de tesis fue la descripción del uso correcto del espectrómetro GER1500. Sin embargo, el manejo de este equipo en el proyecto sirvió para documentar su uso. El espectrómetro, aunque es muy utilizado en el laboratorio, no cuenta con un instructivo o manual por lo que esta tesis servirá de guía para aquellos estudiantes e investigadores que en un futuro requieran utilizar el espectrómetro.

Respecto a la intensidad de radiación emitida por la lámpara de halógeno, se logró comprobar que es ideal para realizar pruebas de simulación espacial. La lámpara de halógeno no tiene el mismo comportamiento que la radiación solar espacial, sin embargo, su radiación es suficiente para cubrir la capacidad de absorción en la celda solar. Esto es algo que no podría resultar ventajoso si se utilizara la radiación directa del Sol a nivel del suelo, ya que tiende a disminuir por la presencia del aire y las condiciones ambientales.

Si bien, durante las pruebas en el laboratorio, la temperatura no pudo ser medida a través del microcontrolador, medirla a través de un termopar tipo K permitió recabar

la información necesaria para el desarrollo del algoritmo de compensación. El algoritmo está diseñado para poder ejecutar la compensación respecto a la temperatura no importando si este dato se envía manualmente por un usuario o si es medida a través de un sensor.

Es recomendable que el modelo del sensor final sea sometido a las pruebas para vuelo espacial aunque haya sido elaborado con componentes espaciales y militares. Esto para aumentar la certidumbre respecto a su funcionamiento en el espacio. Durante este trabajo no se pudo someter al sensor a pruebas de calificación espacial debido a que no se contó con el equipo necesario y el tiempo no fue suficiente.

El sistema de sensado fue totalmente rediseñado, siendo flexible para ser utilizado en diversos proyectos espaciales posteriores, ajustando únicamente los parámetros del sensor de acuerdo a las características del proyecto en el que se vaya a trabajar. El principio del sensor de Sol podría utilizarse en tierra, por ejemplo, para el posicionamiento de paneles solares a lo largo del día.

Participar y desarrollar este tipo proyectos es de gran importancia para el impulso de la industria aeroespacial mexicana, industria que ha tenido crecimiento considerable en los últimos años y la cual promete ser una pilar firme en el desarrollo económico, social y tecnológico, esperando que este trabajo sirva para mostrar que hay capacidad para desarrollar este tipo de tecnología y que los distintos sectores (gobierno, académico e industrial) se decidan a dar un gran apoyo a este sector que tanto dinero le ha costado al país,



# A

## Manejo del espectrómetro GER1500 en modo Stand Alone

El espectrómetro utiliza una batería de níquel-hidruro metálico (NiMh) de 6 [V] a 2,150 [mAH]. Es posible poner hasta dos baterías a la vez en el cargador incluido (*Figura A-1*). Es importante señalar que antes de colocar o retirar las baterías se debe asegurar que el cargador esté apagado. Una vez insertadas las baterías, se puede encender.

Por un costado de la ranura de las baterías hay dos leds indicadores, uno verde y otro rojo. Cuando el led verde se enciende quiere decir que la batería se colocó correctamente. El led rojo nos muestra el estado de carga: cuando se encuentra encendido nos indica que la batería está cargándose, y cuando se apaga indica que la batería se ha cargado al 100% y está lista para usarse.



*Figura A-1. Estado de carga para las baterías.*

La batería cargada se coloca en la parte posterior de espectrómetro teniendo cuidado de que éste último se encuentre apagado. Después de colocar la batería encendemos el espectrómetro y observamos dos datos en la pantalla frontal: el nombre del equipo (GER 1500) y la dirección en memoria interna (MEM XXX). Es necesario saber cuál es el estado de la memoria actual ya que es ahí donde se guardará la siguiente muestra. Cada muestra tomada ocupará una dirección en memoria, por ello es importante conocer que muestra se guarda y en dónde. Es posible guardar hasta 470 muestras.

El espectrómetro se enciende pulsando el botón *POWER*. El fabricante indica que el espectrómetro se tenga que “calentar” para minimizar el error en la medición. Esto se hace prendiendo el equipo y esperar al menos 15 minutos verificando. Ya pasado ese tiempo oprimimos indiferentemente el botón ▲ o ▼. Haciendo eso notamos que la línea superior de la pantalla muestra la leyenda de *TAR* o *REF* seguido de un número. Este número representa el voltaje de alimentación del espectrómetro. Si este valor está por debajo de los 6 [V], quiere decir que la batería está en un estado crítico y debe ser remplazada por una totalmente cargada.

Para la recopilación de datos es necesario poner el espectrómetro sobre el objetivo de interés, ya sea montándolo sobre un tripieé o sosteniéndolo con una mano. Los botones ▲ y ▼ permite cambiar entre el modo *REF* (reference o referencia) y *TAR* (target u objetivo). El modo *REF* mide un espectro de referencia al utilizar el panel Espectralon, mientras que el modo *TAR* se encarga de realizar mediciones sobre cualquier objetivo (rocas, tierra, plantas). El panel Espectralon tiene un comportamiento cercano a la de una superficie Lambertiana, es decir, refleja toda la radiación incidente sobre él. Así, si medimos como referencia la radiación de una fuente utilizando el panel Espectralon casi se asegura la medición de toda la radiación de la fuente. Un ejemplo de esto se da cuando medimos como referencia la radiación del Sol utilizando el panel y después medimos como objetivo la radiación sobre la hoja de una planta iluminada por el Sol. Si se establece que la medición de referencia es toda la radiación que incide sobre la hoja y la medición objetivo es la radiación que emite la hoja, entonces la diferencia de estas dos radiaciones nos indica la energía absorbida por la hoja.

Para ejemplificar el procedimiento descrito hasta ahora, se medirá la radiación de la lámpara de halógeno. En la [Figura A-2](#) observamos que nuestro valor de *REF* se guardará en la dirección 200 de memoria y por lo tanto se asignará la dirección 201 para el valor de *TAR*.



**Figura A-2. Selección del modo y dirección de memoria.**

Una vez que seleccionado el modo, el espectrómetro se posiciona sobre la superficie que se desea medir y se presiona el disparador rojo (sin soltarlo) para activar el apuntador láser el cual será posicionarlo sobre la superficie a medir. Al soltar el disparador, el láser se apagará y el obturador del espectrómetro se abrirá y se escucharán dos clics. Entre esos dos clics, el espectrómetro deberá permanecer en una posición estática, después del segundo clic es seguro moverlo.

Es necesario tomar una muestra de referencia para cada muestra objetivo, por lo tanto, se debe ir intercalando de modo de *REF* a *TAR* cada vez que se tome una muestra, tratando de tener una diferencia de tiempo entre las dos lecturas lo más pequeña posible. Para el ejemplo práctico se tomaron ambos tipos de muestras utilizando el panel Espectralon (*Figura A-3*).



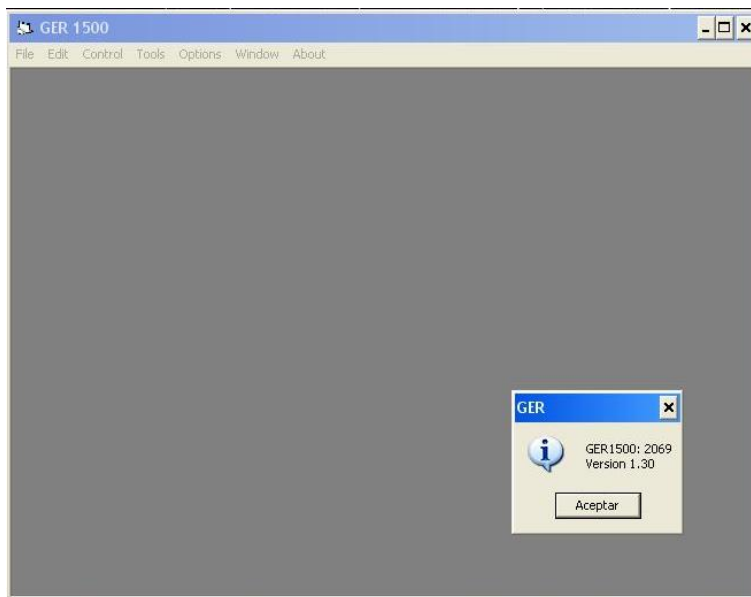
*Figura A-3. Apuntamiento y medición sobre el panel Espectralon.*

Después de la toma de muestras se procede a adquirir los datos almacenados a través de la computadora. Para conectar el espectrómetro a la computadora es necesario utilizar un cable serial entre ambos. El cable se conecta al puerto COM2 de espectrómetro verificando que este último se encuentre apagado. Finalizando la conexión, encendemos el espectrómetro (*Figura A-4*) y ejecutamos el programa GER1500. Nos mostrara un mensaje de bienvenida en donde se mostrará la versión del software (*Figura A-5*).





**Figura A-4. Conexión serial del espectrómetro.**

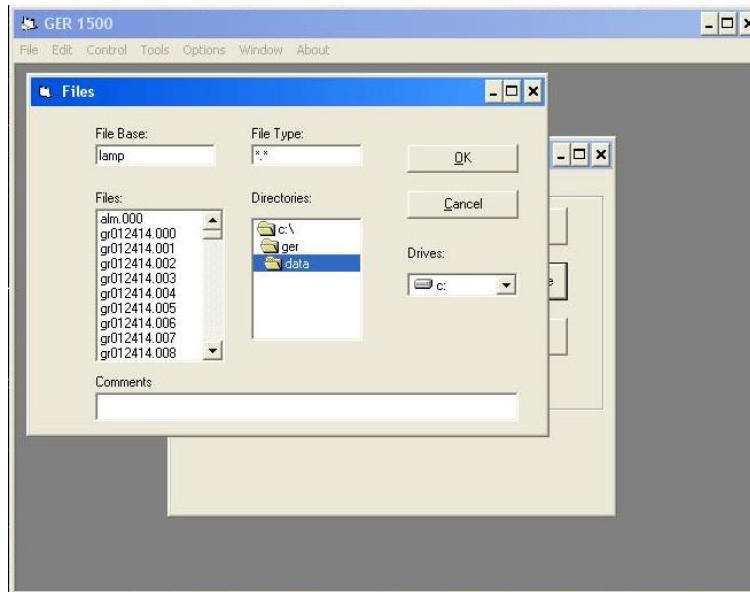


**Figura A-5. Ventana generada al ejecutar el software GER1500.**

Damos clic en aceptar para cerrar el cuadro. Para la adquisición de datos debemos seleccionar la pestaña *Control* y después *Read Memory*. Si aparece una ventana de error con la siguiente leyenda: *Connection Time Out on Parameter Read. Is Instrument Connected?*, es necesario verificar si el cable serial está bien conectado o si el espectrómetro no se encuentra apagado. Si todo está en perfecto estado se abrirá una nueva ventana con varios rubros. Lo primero que hay que hacer es seleccionar el rango de memoria donde se encuentran nuestras lecturas. En este caso recordamos que nuestro valor de REF se guardó en la dirección 200 y nuestro valor de TAR en la 201, por lo tanto, introducimos este intervalo de valores escribiendo 200 como *Fisrt Scan* y 201 como *Last Scan*. Ahora, opcionalmente pondremos un nombre base para

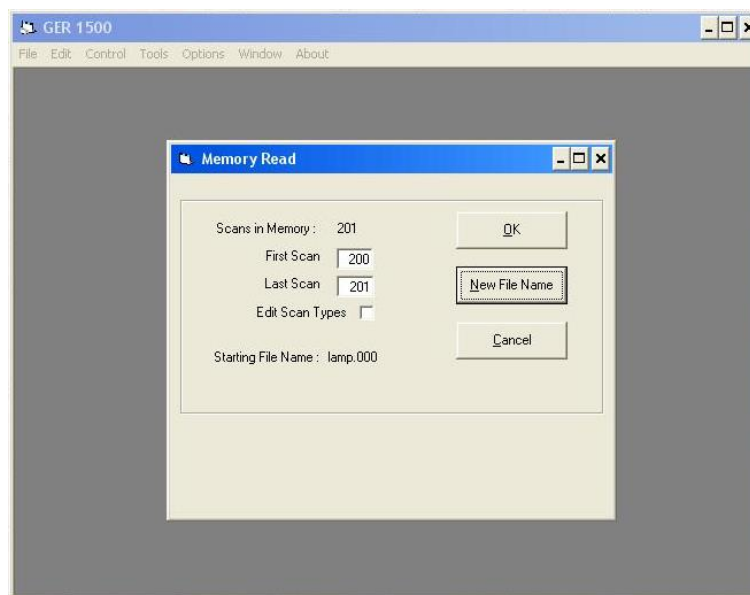


los archivos que se generen al sustraer los datos y así identificarlos fácilmente. Para hacer esto damos clic en el botón *New File Name*, que nos abrirá una ventana llamada *File*. En *File Base* escribimos el nombre base para todos nuestros archivos a generar. En este caso pondremos *lamp* para recordar que son los datos adquiridos de la lámpara de halógeno (*Figura A-6*).



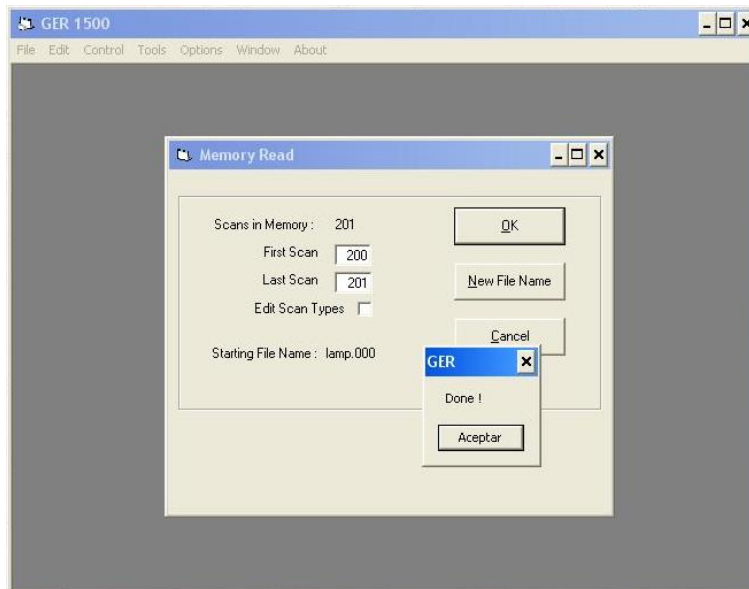
**Figura A-6. Renombramiento del nombre base.**

Le damos clic en *OK* y aparecerá nuevamente la ventana *Memory Read* configurada como se muestra en la *Figura A-7*.



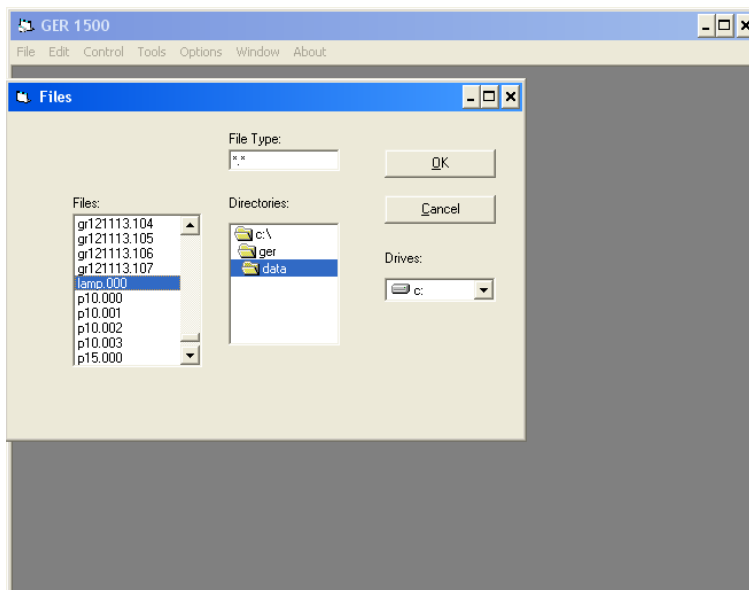
**Figura A-7. Configuración para la adquisición de datos.**

La ventana se quedará pasmada cierto tiempo mientras adquiere los datos. El tiempo que puede tardar dependerá del tamaño del rango de memoria a leer. Al finalizar la adquisición de datos aparecerá una pequeña ventana diciendo *Done!*.



**Figura A-8. Adquisición de datos finalizada.**

Ahora se procederá a visualizar la información guardada. Para hacerlo, damos clic en la ventana *File* y después en *Open*. Buscamos los archivos correspondientes, para este caso, los que cuenten con el prefijo *lamp*. Los archivos generados se guardan en el disco duro para posteriormente tener acceso a esa información sin la necesidad de conectar es espectrómetro. En este caso se guardaron en la ruta C:\ger\data.

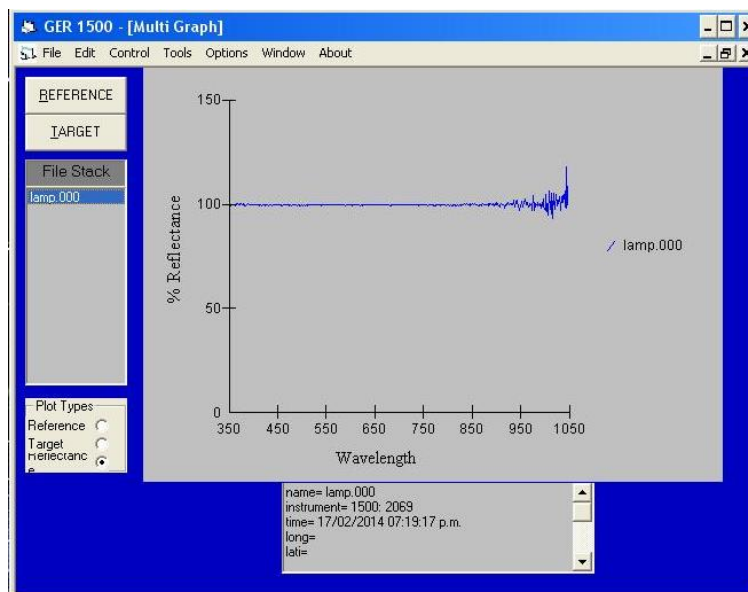


**Figura A-9. Abrir archivo.**

Vemos que sólo se generó un archivo con esas características. Aquí es importante mencionar que el valor de *REF* y *TAR* medidos se guardan en un solo archivo. Por eso la importancia de intercalar estos modos al tomar las lecturas con el espectrómetro. En el caso de que tuviéramos 6 lecturas se generarían 3 archivos (3 de muestras *REF* con sus respectivos *TAR*). Al dar clic en *OK* se abrirá la ventana mostrada en la [Figura A-10](#). En ella se visualiza como primer parámetro la **reflectancia**, que es la fracción o porcentaje de radiación reflejada por una superficie para cada longitud de onda. Matemáticamente se calcula como:

$$\rho(\lambda) = \frac{E_{refl}(\lambda)}{E_{incid}(\lambda)} \quad (\text{A.1})$$

Donde  $E_{refl}(\lambda)$  y  $E_{incid}(\lambda)$  son las intensidades espectrales reflejadas e incidentes respectivamente. En otras palabras, la reflectancia se podría definir como el valor del cociente entre el valor objetivo *TAR* sobre el valor de referencia *REF*.



**Figura A-10. Gráfica de la reflectancia.**

Para este caso, como el valor de *REF* y *TAR* son los mismos, el valor de la reflectancia será de 1 o 100% para todas las longitudes de onda. Para poder observar los valores de *REF* y *TAR* tenemos que seleccionar la opción *Reference* o *Target* del cuadro *Plot Types*, ubicado en la esquina inferior izquierda de la venta.

Es importante no presionar los botones de *REFERENCE* y *TARGET* ubicados en la esquina superior izquierda de la ventana, ya que estos no se utilizan cuando se está en modo *Stand Alone*.

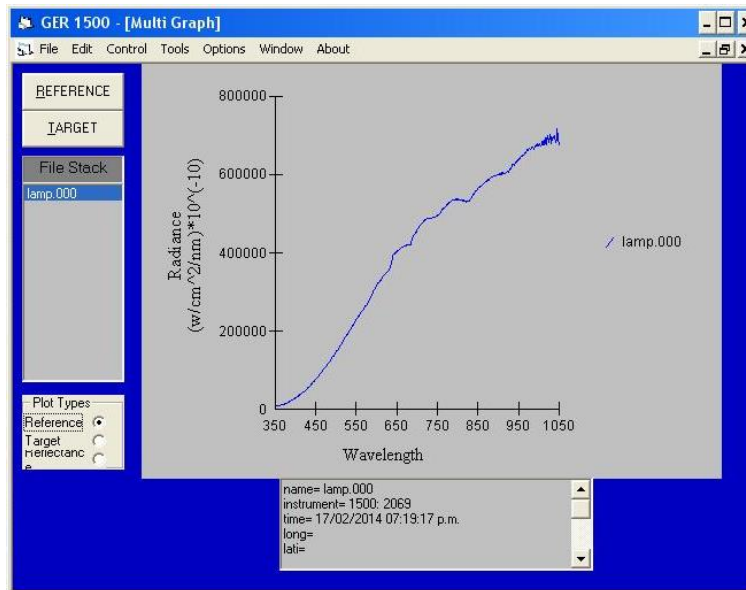


Figura A-11. Gráfica de la referencia REF.

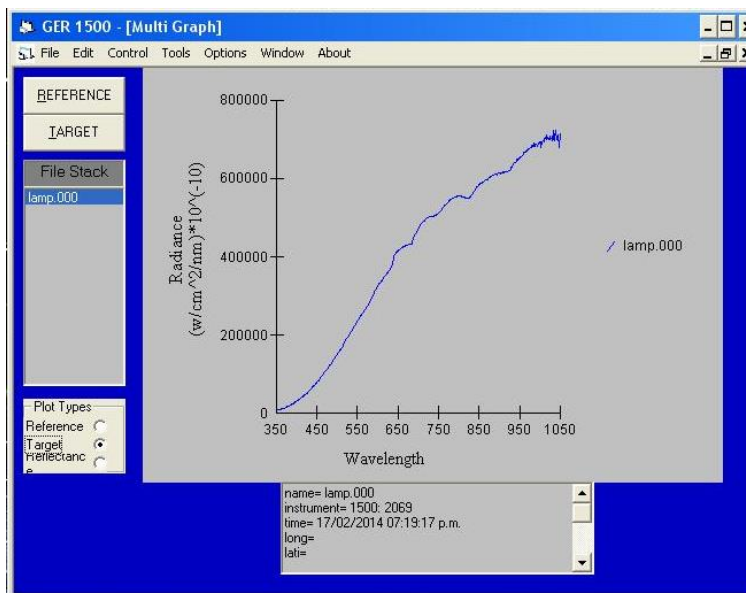


Figura A-12. Gráfica del objetivo TAR

En este estado es posible abrir otro archivo (*File/Open file*) para comparar la respuesta de dos o más mediciones. Los archivos que se vayan abriendo se irán colocando sobre la pila ubicada del lado izquierdo de la pantalla (*File Stack*).

En las gráficas obtenidas podemos observar la leyenda de *radiancia* en el eje de las ordenadas. La **radiancia**  $L$  es el flujo radiante ( $\phi$ ) emitido en un cono de ángulo sólido (estereorradián) a través de una fuente con cierta área. Las unidades en que se mide son  $[W m^{-2} sr^{-1}]$ . Su importancia radica en que es la magnitud que detecta el

espectrómetro. En los datos obtenidos, la radiancia se refiere a una porción concreta del espectro electromagnético por lo que se le denomina radiancia espectral ( $L_\lambda$ ).

$$L = \frac{\phi}{\Omega \cos(\Theta) A} \quad \text{(A.2)}$$

$$L_\lambda = \frac{\phi}{\Omega \cos(\Theta) A \lambda} \quad \text{(A.3)}$$

Donde  $\Theta$  es el ángulo formado por la dirección del flujo radiante y el vector perpendicular a la superficie receptora de tamaño  $A$ .

Para las fuentes emisoras lambertianas, la radiancia es emitida en una semiesfera (Gómez E. , 2006) y, por lo tanto, la emitancia y la radiancia se relacionan por medio de:

$$L_\lambda = \frac{M_\lambda}{\pi} \quad \text{(A.4)}$$

Esta última relación es importante ya que para el estudio de la radiación en este proyecto se ha estado trabajando con la emitancia y no con la radiancia.

Por ultimo cabe mencionar que los archivos generados se pueden abrir través del Bloc de Notas de Windows y de esta forma obtener los valores para cada punto. Esto resulta útil ya que se puede exportar y analizar mediante otros programas como Microsoft Excel.



# B

## Programa en C# que da solución a la ecuación (3.7)

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;

namespace Sensor_solar
{
    class Program
    {
        static void Main(string[] args)
        {
            //Parámetros
            float V; //Diferencia de voltaje
            float T; //Temperatura
            float R, X; //Radiación
            float k; //Parámetro k
            float a = 0.00387F, b1 = 0.00012F, b2 = 0.1663F; //Parámetros a, b1, b2
            (constantes)
            float error; //Para detener el método de bisección

            //Calculo de ángulo con el método de bisección
            int op;
            do
            {
                try
                {
                    Console.WriteLine("***** SENSOR SOLAR *****\n\n");

                    //Solicitud de lectura de diferencia de voltaje
                    Console.WriteLine("\nDiferencia de voltaje dV [V] = ");
                    V = Convert.ToSingle(Console.ReadLine());

                    //Solicitud de temperatura
                    Console.WriteLine("\nTemperatura T [oC] = ");
                    T = Convert.ToSingle(Console.ReadLine());
```

```

//Solicitud de radiacion
Console.WriteLine("\nFjujo de radiación [x10^(14) e/cm2] = ");
R = Convert.ToSingle(Console.ReadLine());
/*
 * R x10^(14)      X
 * 0              1
 * 0.5            0.99
 * 1              0.98
 * 10             0.93
 * 25             0.905
 */
if (R == 0F) { X = 1F; }
else if (R > 0F && R < 0.5F) { X = 1F + (R - 0F) * (0.99F - 1F) / (0.5F - 0F); }
else if (R == 0.5F) { X = 0.99F; }
else if (R > 0.5F && R < 1F) { X = 0.99F + (R - 0.5F) * (0.98F - 0.99F) / (1F -
0.5F); }
else if (R == 1F) { X = 0.98F; }
else if (R > 1F && R < 10F) { X = 0.98F + (R - 1F) * (0.93F - 0.98F) / (10F -
1F); }
else if (R == 10F) { X = 0.93F; }
else if (R > 10F && R < 25F) { X = 0.93F + (R - 10F) * (0.905F - 0.93F) / (25F
- 10F); }
else if (R == 25F) { X = 0.905F; }
else { X = 0.93F + (R - 10F) * (0.905F - 0.93F) / (25F - 10F); } //(R > 25)

//V = X * ( a * V + b1 * T + b2) * x * COS(x)
k = X * (a * V + b1 * T + b2);

bool salir = true;
float xp=0, yi, yp;
float xi = -23, xs = 23;
error = 0.00000001F;
int i = 0;
do
{
    if (i <= 10000000)
    {
        i++;
        xp = (xi + xs) / 2;
        yi = k * xi * Convert.ToSingle(Math.Cos(xi * Math.PI / 180)) - V;
        yp = k * xp * Convert.ToSingle(Math.Cos(xp * Math.PI / 180)) - V;

        if (yi * yp > error)
            xi = xp;
        else if (yi * yp < -error)

```



```

        xs = xp;
    else
        salir = false;
    }
    else
        salir = false;
    }
while (salir);

if (i <= 10000000)
    Console.WriteLine("\n\nángulo = {0}", Math.Round(xp, 1));
else
    Console.WriteLine("\n\nNO EXISTE SOLUCION CON ESTOS DATOS");
} //Cierre de try

catch
{
    Console.WriteLine("\n\n\tERROR");
}

Console.Write("\n\n\tPara repetir oprima 0: ");
op = Convert.ToInt32(Console.ReadLine());
Console.Clear();
}
while (op == 0);
Console.Read();
}
}
}

```



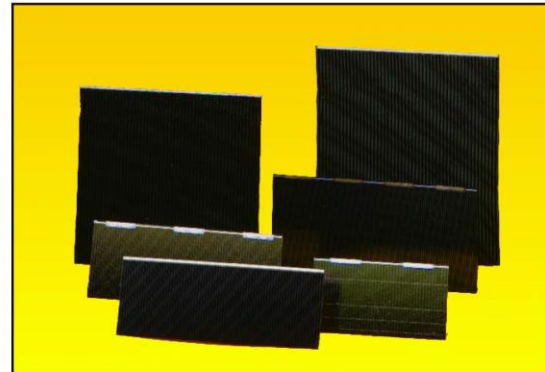
## Celdas Solares K4710



### Silicon K4710 Solar Cells

#### Features

- High Conversion Efficiency
  - Beginning of Life
  - End of life
- High state-of-the-art reliability
- Optimized operating temperature
- Hardened applications
  - Space environmental effects: military & commercial
  - Terrestrial power
  - Consumer products
- Low Cost
  - Standard Products
  - Custom Products



#### Product Description

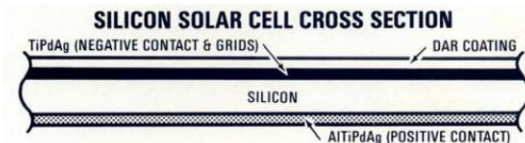
Standard/Special Product	Standard
Resistivity (p-type)	10 Ohm-cm
Crystal Orientation	1 - 0 - 0
Method of Growth	Czochralski
Shallow Junction	0.15 Micron
Metallization (Front)	TiPdAg
Metallization (Back)	AlTiPdAg
Anti-Reflective Coating	Multi-Layer
Back Surface Reflector	Aluminum
Back Surface Field	No
Sculptured Front Surface	No
Thickness	200 Microns
Sizes	Up to 8x8 cm
Weldable	Yes
Solderable	Sn62 Solder (QQ-S-571)

Note: other variations are available upon request

The information contained on this sheet is for reference only. Specifications subject to change without notice. 12/15/1999

#### Typical Qualification Test Results Nominal Degradation

Test	Description	Results
Humidity	+45°C, 90% RH Min., 30 Days	<1.5%
Thermal Cycle	+80°C to -180°C, 3000 Cycles	<2.5%
Thermal Shock	+140°C to -185°C, 5 Cycles	<1.5%
Thermal Soak	+140°C for 168 Hrs., $5 \times 10^{-5}$ torr	<1.5%
Radiation	Characterized thru $1 \times 10^{16}$ 1 MeV e/cm <sup>2</sup>	—
Pull Test	90° Pull, Standard Tab	>250 gm



**ISO9001:2000**  
**REGISTERED**

Spectrolab Inc. 12500 Gladstone Avenue, Sylmar, California 91342 USA • Phone: 818.365.4611 • Fax: 818.361.5102



**Typical Electrical Parameters**  
 {AM0 Sunlight (135.3 mW/cm<sup>2</sup>), 28°C}

J <sub>sc</sub> = 39.3 MilliAmperes/cm <sup>2</sup>
J <sub>mp</sub> = 36.6 MilliAmperes/cm <sup>2</sup>
V <sub>mp</sub> = 0.454 Volts
P <sub>mp</sub> = 16.6 MilliWatts/cm <sup>2</sup>
V <sub>oc</sub> = 0.545 Volts
Cff= 0.78
Efficiency 12.3% Minimum Average

**Radiation Degradation**  
 (Fluence e/cm<sup>2</sup> 1 MeV Electrons)

Parameter	5x10 <sup>13</sup>	1x10 <sup>14</sup>	1x10 <sup>15</sup>	2.5x10 <sup>15</sup>
I <sub>sc</sub> /I <sub>sc0</sub>	0.99	0.98	0.91	0.86
I <sub>mp</sub> /I <sub>mp0</sub>	0.99	0.98	0.91	0.86
V <sub>mp</sub> /V <sub>mp0</sub>	0.99	0.98	0.92	0.90
V <sub>oc</sub> /V <sub>oc0</sub>	0.99	0.98	0.94	0.91
P <sub>mp</sub> /P <sub>mp0</sub>	0.98	0.96	0.83	0.77

**Thermal Properties**

Solar Absorptance= 0.74 (CMX)
Solar Absorptance= 0.69 (Fused Silica)
Emittance (Normal)= 0.85 (CMX)
Emittance (Normal)= 0.81 (Fused Silica)

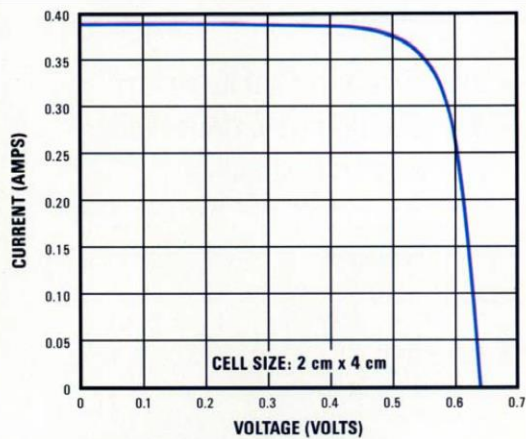
**Weight**

55 Milligrams/ cm <sup>2</sup> (Bare)
---------------------------------------

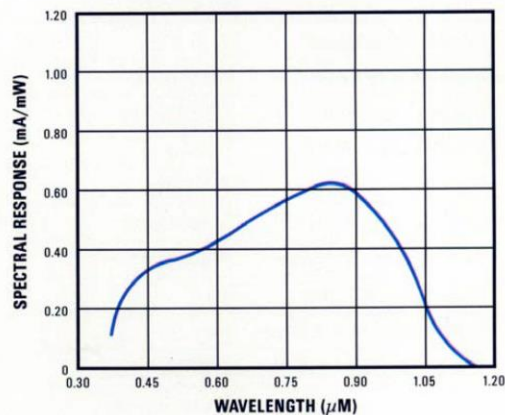
**Temperature Coefficients**

I <sub>sc</sub> = +20.0 MicroAmperes/cm <sup>2</sup>
V <sub>mp</sub> = -2.33 MilliVolts/°C
V <sub>oc</sub> = -2.20 MilliVolts/°C

**Typical I-V Characteristic Curve**  
 AM0 Sunlight (135.3 mW/cm<sup>2</sup>), 28°C



**Spectral Response**



**ISO9001:2000**  
 REGISTERED  
 SPECTROLAB

A BOEING COMPANY

## Aluminio 6061



## ALUMINIO 6061

## USOS MÁS FRECUENTES

Componentes de chapa conformada y/o soldada, piezas mecánicas, industria del plástico, camiones, torres, canoas, vagones, muebles, cañerías y otras aplicaciones estructurales donde se requiera soldabilidad y resistencia a la corrosión y mecánica.

## COMPOSICIÓN QUÍMICA EN %

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros	Al
Min	0.40		0.15		0.80	0.04				
Max	0.80	0.70	0.40	0.15	1.20	0.35	0.25	0.15	0.15	Resto

## PROPIEDADES FÍSICAS

Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ]	2.7	Coef. De dilatación (0 a 100 °C) [°C <sup>-1</sup> x 10 <sup>6</sup> ]	23.6
Rango de fusión [°C]	575 – 650	Conductividad Térmica (0 a 100 °C) [W/m °C]	Temple T6: 167
Módulo de elasticidad [MPa]	69500	Resistividad a 20 °C [μΩcm]	Temple T6: 4.0
Coefficiente de Poisson	0.33	Calor específico (0 a 100 °C)	940

## PROPIEDADES TECNOLÓGICAS

Proceso	Clasificación	Proceso	Clasificación
<u>Soldabilidad:</u>		<u>Maquinabilidad</u> (Temple T6)	
Electrón Beam	A	Corte de viruta	C
Gas Inerte (TIG o MIG)	B	Brillo de sup. mecanizada	A
Por resistencia	B		
Brazing	B		
<u>Embutido Profundo</u>		<u>Resistencia a la corrosión</u>	
Recocido		Agentes atmosféricos	A
Semi duro		Ambiente marino	B
Duro			
<u>Repujado</u>		<u>Anodizado</u>	
Temple 0		Protección	A
		Brillante	C
		Duro	A

Clasificación: (A) Muy buena - (B) Buena - (C) Aceptable - (D) Pobre o No Recomendado

## PROPIEDADES MECÁNICAS

Dureza Brinell: 65

## Cable con conector Cinch Dura-Con 1114181 y 1114174

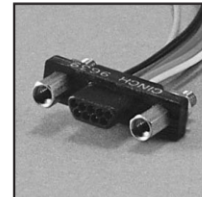
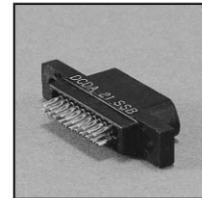
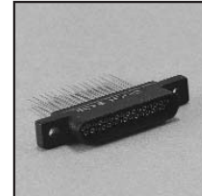
**Dura-Con**  
**High Reliability**  
**All-Plastic**

.050" (1.27mm) Density  
 Solder Cup/Wire  
 D-Microminiature



FEATURES

- Both plug and socket available in 9, 15, 21, 25, 31, 37, and 51 positions.
- Termination styles - solder cup, gold-plated solid wire, and insulated stranded wire.
- Several styles of mounting hardware are available for cable-to-cable, cable-to-board mount, and cable-to-panel mount applications.
- High-performance Dura-Con twist-pin contact.
- Economical all-plastic shell for lightweight applications where no shielding is required.
- Meets requirements of MIL-C-83513 except where noted.



MATERIALS

**Insulator:** UL94V-0 rated glass-filled polyester  
**Contacts:** Pins - Copper alloy, Sockets - Copper alloy (machined)  
**Contact Plating:** .000050 in gold

ENVIRONMENTAL

**Operating Temperature:** -55° C to +135° C

ELECTRICAL

**Current Rating:** 3 Amps maximum  
**Withstanding Voltage:** 600 VAC RMS @ sea level  
**Contact Resistance:** 8 milliohms maximum change

MECHANICAL

**Individual Contact:** 6 oz. (170.40 g) maximum insertion;  
 0.5 oz. (14.20 g) minimum withdrawal  
**Mating / Unmating Force:** See table

No. of Contacts	Maximum Mating Force		Minimum Unmating Force	
	Lb.	Kg	Lb.	Kg
9	5.63	2.56	.28	.13
15	9.38	4.26	.47	.21
21	13.13	5.96	.66	.30
25	15.63	7.10	.78	.35
31	19.38	8.80	.97	.44
37	23.13	10.50	1.16	.53
51	31.88	14.47	1.59	.72

Call Toll Free: 1 (800) 323-9612

5-4

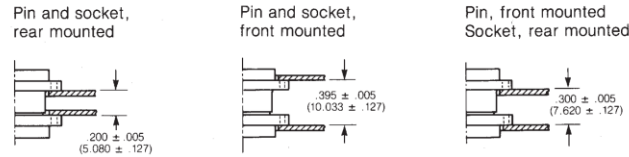


**Dura-Con**  
**High Reliability**  
**All-Plastic**

.050" (1.27mm) Density  
 Solder Cup/Wire  
 D-Microminiature



**Panel Mounting Dimensions**



**Panel Cutout Dimensions**

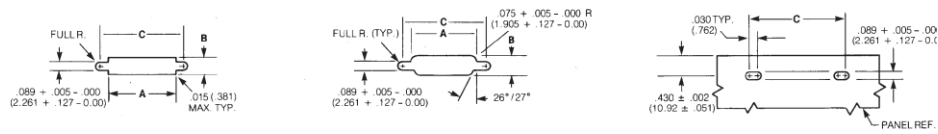


Figure 1. Front Mounting

Figure 2. Rear Mounting

Figure 3. Edgeboard Mounting

No. of Contacts	Figure Number	A		B		C	
		+0.004 -0.000 in	(.101) (.000) mm	+0.004 -0.000 in	(.101) (.000) mm	+0.005 -0.000 in	(.127) (.000) mm
9	1	.408	10.36	.172	4.37	.570	14.48
	2	.373	9.47	.216	5.49	.570	14.48
	3	-	-	-	-	.570	14.48
15	1	.558	14.17	.172	4.37	.720	18.29
	2	.523	13.28	.216	5.49	.720	18.29
	3	-	-	-	-	.720	18.29
21	1	.708	17.98	.172	4.37	.870	22.10
	2	.674	17.12	.216	5.49	.870	22.10
	3	-	-	-	-	.870	22.10
25	1	.808	20.52	.172	4.37	.970	24.64
	2	.774	19.66	.216	5.49	.970	24.64
	3	-	-	-	-	.970	24.64
31	1	.958	24.33	.172	4.37	1.120	28.45
	2	.924	23.47	.216	5.49	1.120	28.45
	3	-	-	-	-	1.120	28.45
37	1	1.108	28.14	.172	4.37	1.270	32.26
	2	1.074	27.28	.216	5.49	1.270	32.26
	3	-	-	-	-	1.270	32.26
51	1	1.058	26.87	.215	5.46	1.220	30.99
	2	1.024	26.01	.259	6.58	1.220	30.99
	3	-	-	-	-	1.220	30.99

5

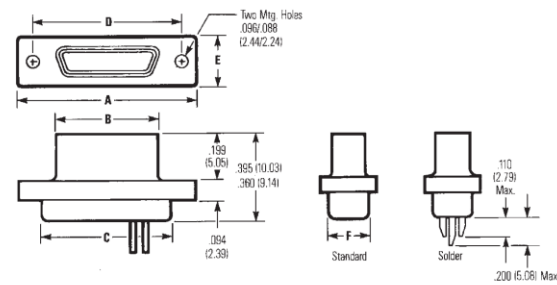
**Dura-Con**  
**High Reliability**  
**All-Plastic**

.050" (1.27mm) Density  
 Solder Cup/Wire  
 D-Microminiature

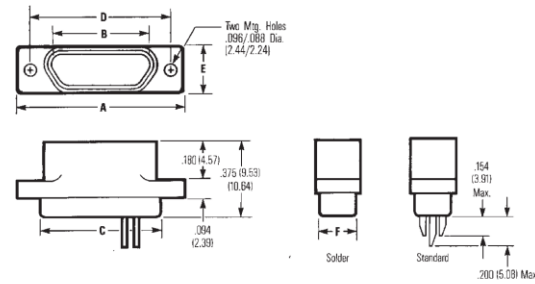


Connector Dimensions - Plastic Shell

Plug



Socket



5

No. of Contacts	A		B Max.		C		D		E		F Max.	
	±.010 (.254)				+.010 (.254) -.018 (.457)		±.005 (.127)		±.010 (.254)			
	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm
9 Plug	.778	19.76	.292	7.42	.398	10.11	.565	14.35	.208	5.28	.173	4.39
9 Socket	.778	19.76	.376	9.55	.398	10.11	.565	14.35	.208	5.28	.173	4.39
15 Plug	.928	23.57	.442	11.23	.548	13.92	.715	18.16	.208	5.28	.173	4.39
15 Socket	.928	23.57	.526	13.36	.548	13.92	.715	18.16	.208	5.28	.173	4.39
21 Plug	1.078	27.38	.592	15.04	.698	17.73	.865	21.97	.208	5.28	.173	4.39
21 Socket	1.078	27.38	.676	17.17	.698	17.73	.865	21.97	.208	5.28	.173	4.39
25 Plug	1.178	29.92	.692	17.58	.798	20.27	.965	24.51	.208	5.28	.173	4.39
25 Socket	1.178	29.92	.776	19.71	.798	20.27	.965	24.51	.208	5.28	.173	4.39
31 Plug	1.328	33.73	.842	21.39	.948	24.08	1.115	28.32	.208	5.28	.173	4.39
31 Socket	1.328	33.73	.926	23.52	.948	24.08	1.115	28.32	.208	5.28	.173	4.39
37 Plug	1.478	37.54	.992	25.20	1.098	27.89	1.265*	32.13	.208	5.28	.173	4.39
37 Socket	1.478	37.54	1.076	27.33	1.098	27.89	1.265*	32.13	.208	5.28	.173	4.39
51 Plug	1.428	36.27	.942	23.93	1.048	26.62	1.215	30.86	.250	6.35	.220	5.59
51 Socket	1.428	36.27	1.026	26.06	1.048	26.62	1.215	30.86	.250	6.35	.220	5.59

Call Toll Free: 1 (800) 323-9612

5-6



## Amplificador operacional LM124J

### LM124, LM124A, LM224, LM224A LM324, LM324A, LM2902 QUADRUPLE OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS066H – SEPTEMBER 1975 – REVISED OCTOBER 2002

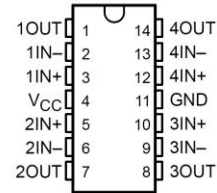
- **Wide Range of Supply Voltages:**  
Single Supply . . . 3 V to 30 V  
(LM2902, 3 V to 26 V) or Dual Supplies
- **Low Supply-Current Drain Independent of Supply Voltage . . . 0.8 mA Typ**
- **Common-Mode Input Voltage Range Includes Ground, Allowing Direct Sensing Near Ground**
- **Low Input Bias and Offset Parameters:**
  - Input Offset Voltage . . . 3 mV Typ  
A Versions . . . 2 mV Typ
  - Input Offset Current . . . 2 nA Typ
  - Input Bias Current . . . 20 nA Typ  
A Versions . . . 15 nA Typ
- **Differential Input Voltage Range Equal to Maximum-Rated Supply Voltage . . . 32 V (26 V for LM2902)**
- **Open-Loop Differential Voltage Amplification . . . 100 V/mV Typ**
- **Internal Frequency Compensation**

#### description/ordering information

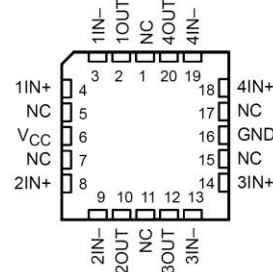
These devices consist of four independent high-gain frequency-compensated operational amplifiers that are designed specifically to operate from a single supply over a wide range of voltages. Operation from split supplies also is possible when the difference between the two supplies is 3 V to 30 V (for the LM2902, 3 V to 26 V) and  $V_{CC}$  is at least 1.5 V more positive than the input common-mode voltage. The low supply-current drain is independent of the magnitude of the supply voltage.

Applications include transducer amplifiers, dc amplification blocks, and all the conventional operational-amplifier circuits that now can be more easily implemented in single-supply-voltage systems. For example, the LM124 can be operated directly from the standard 5-V supply that is used in digital systems and easily provides the required interface electronics without requiring additional  $\pm 15$ -V supplies.

LM124 . . . D, J, OR W PACKAGE  
LM124A . . . J PACKAGE  
LM224, LM224A . . . D OR N PACKAGE  
LM324 . . . D, N, NS, OR PW PACKAGE  
LM324A . . . D, DB, N, NS, OR PW PACKAGE  
LM2902 . . . D, N, NS, OR PW PACKAGE  
(TOP VIEW)



LM124, LM124A . . . FK PACKAGE  
(TOP VIEW)



NC – No internal connection

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

 **TEXAS  
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 2002, Texas Instruments Incorporated  
On products compliant to MIL-PRF-38535, all parameters are tested unless otherwise noted. On all other products, production processing does not necessarily include testing of all parameters.

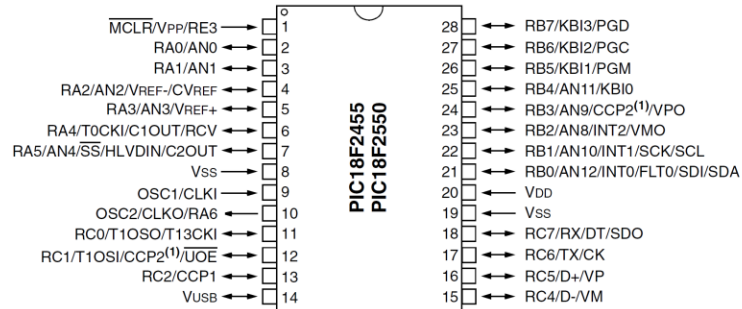
1

Microcontrolador PIC18F4550

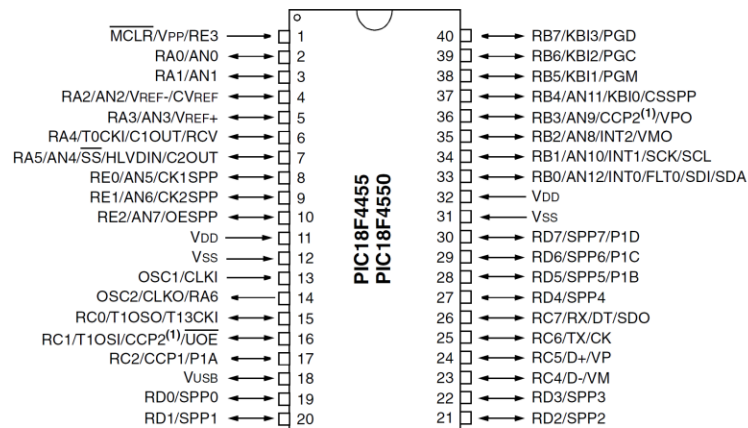
PIC18F2455/2550/4455/4550

Pin Diagrams

28-Pin PDIP, SOIC



40-Pin PDIP



Note 1: RB3 is the alternate pin for CCP2 multiplexing.

## Espectrómetro GER 1500

## SVC GER 1500

**LIGHT WEIGHT • STAND-ALONE**  
Field Portable Spectroradiometer

Instrument Specifications CE

<b>Spectral Range</b>	350 nm to 1050 nm
<b>Internal Memory</b>	470 scans
<b>Spectral Channels</b>	512
<b>Linear Array</b>	Si Photo Diode
<b>Bandwidth (nominal)</b>	1.5 nm
<b>Resolution FWHM</b>	3.2 nm
<b>Integration</b>	5 ms & up
<b>FOV</b>	4° std., 8° optional
<b>Head Size</b>	8.3 cm x 15.2 cm x 19.7 cm 3.25" x 6" x 7.75"
<b>Weight</b>	2 kg, 4.5 lbs.
<b>Battery</b>	6 volt NiMH
<b>Battery Life</b>	4 hours
<b>Digitization</b>	16 bit
<b>Wavelength Repeatability</b>	±0.1 nm
<b>Noise Equivalent Radiance</b>	
Based on 1 sec. integration	
400nm:	$1.10 \times 10^{-9} \text{ W cm}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$
700nm:	$0.50 \times 10^{-9} \text{ W cm}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$
900nm:	$2.00 \times 10^{-9} \text{ W cm}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$
<b>Maximum Radiance Levels</b>	
Based on 5ms integration	
700nm:	$1.5 \times 10^{-4} \text{ W cm}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$
<b>Radiometric Calibration Accuracy</b>	
(Traceable to NIST):	5%
<b>Dark Current Correction:</b>	automatic selectable
<b>Spectrum Averaging:</b>	
<b>Humidity:</b>	to 90% (non-condensing)
<b>Temperature:</b>	-10° to 50° C
<b>Sighting:</b>	Laser



The GER 1500 system is pictured in the sturdy watertight field case with high density foam. The system includes the instrument with two (2) batteries, a dual battery charger, standard foreoptic, communication cable, software and instruction manual. The optional rugged PDA with GPS, Bluetooth © and charger are also shown.

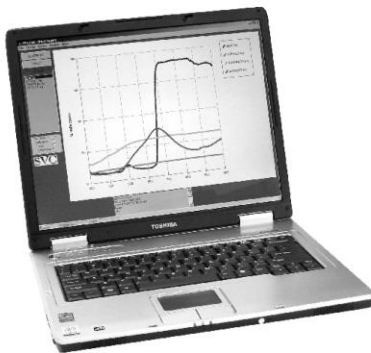
The GER 1500 system offers the user the greatest possible ease of operation for hand-held, tripod, above canopy or underwater applications. Simple menu-driven programs control the setup, acquisition, and data manipulation functions, allowing the user to be effective within a short time following introduction to the instrument. Generated real-time data is displayed on-screen for immediate interpretation and evaluation. Data is stored in ASCII format for easy transfer to other software programs. The SVC technical team is ready to assist in evaluating your requirements to determine the best instrument and options for your application. Following delivery of an instrument, SVC continues to provide product support. We are proud to service the instruments we produce.

**Applications**

Vegetative Stress Analysis  
Crop Analysis and Management  
Forestry  
Wetlands Assessment  
Environmental Testing  
Ocean Color  
Coral Health Assessment  
Ground Truthing  
Surface Color Measurements

**Options**

Fiber Optic Light Guides  
Foreoptics  
Calibration Light Sources  
Leaf Measurement Probe  
Reflectance Panels  
Underwater Enclosure  
Notebook Computer  
PDA  
Tripods



GER 1500 software runs under current Windows® operating systems for PCs and notebook computers; an optional version is available for use with the rugged PDA. The software allows multiple data sets to be viewed simultaneously with selectable radiance or reflectance allowing data to be analyzed in the laboratory or in the field.



Underwater spectral measurements are acquired using the standard GER 1500 instrument outfitted with the submersible enclosure. Instrument setup is accomplished using the external rotary dial. The laser sight provides targeting guidance. The internal memory can store a day's worth of data and is quickly downloaded without opening the enclosure. The internal battery is designed to provide power for two full days of operation.

**SVC** Spectra Vista Corporation

29 Firemen's Way Poughkeepsie, NY 12603 USA Ph: 845-471-7007 Fax: 845-471-7020 e-mail: spectravista@aol.com www.spectravista.com

- Admat Net.* (2013). Obtenido de <http://admatnet.com/tag/investigacion/>
- Aguirre, A. (1994). *Introducción al tratamiento de señales*. España: Díaz de Santos.
- Boylestad, R. L. (1997). *Electrónica: Teoría de Circuitos* (Sexta ed.). México: Prentice Hall.
- Burbano, E. (2003). *Física general* (32 ed.). España: Tébar.
- Castillo, F. E. (2001). *Agrometeorología* (Segunda ed.). España: Grupo Mundi Prensa.
- Chapra, S. (2007). *Métodos Numéricos para Ingenieros* (Quinta ed.). México: McGraw-Hill.
- Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro. (Septiembre de 2012). Centro de Alta Tecnología, Facultad de Ingeniería de la UNAM. *Ciencia, Tecnología e Innovación en Querétaro*.
- Dominguez, M. Á. (2005). *Química: la ciencia básica*. España: Thomson.
- Ebbing, D. D. (2010). *Química general* (Novena ed.). México: Cengage Learning.
- Flores, N. E. (2007). *Física moderna*. México: Pearson Education.
- Fortescue, P. (2003). *Spacecraft Systems Engineering* (Tercera ed.). Inglaterra: Wiley.
- García, E. (2008). *Compilador C CCS y simulador Proteus para microcontroladores PIC*. México: Alfaomega.
- García, J. A. (2008). *Radiación de un cuerpo negro*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, J. L. (2010). *Promoción de la tecnología espacial mediante el desarrollo de satélites pequeños en las universidades*. México: Academia de Ingeniería.
- Gómez, E. (2006). *Guía básica de conceptos de radiometría y fotometría*. España: Universidad de Sevilla.
- Gómez, E. (2009). *Introducción al filtrado digital*. España: ESMUC.
- Logsdon, T. (1998). *Orbital Mechanics: Theory and Applications*. Estados Unidos de América.
- Michaelson, H. B. (1977). The work function of the elements and its periodicity. *Journal of Applied Physics*, 48(11), 4729-4733.

- Perón, N. (2012). *Instituto Argentino de Radioastronomía*. Recuperado el 2014, de <http://www.iar.unlp.edu.ar/divulgacion/art-difu-21.htm>
- Prado, J. (1990). *Diseño de un sistema para detección de orientación de un satélite*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de maestría.
- Rauschenbach, H. S. (1976). *Solar Cell Array Design Handbook* (Vol. 1). Estados Unidos: Jet Propulsion Lab.
- Ruíz, D. (2003). *Sensor de Sol para detección de orientación de un satélite*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de licenciatura.
- Sánchez, P. (2011). *Universidad Internacional de Andalucía. OpenCourseWare*. Obtenido de <http://ocw.unia.es/ciencias-tecnologicas/tecnologia-de-celulas-y-modulos-fotovoltaicos/Materiales/ud1/unidad-1.-la-celula-solar/>
- Smith, S. (1997). *The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. Estados Unidos de América: California Technical Pub.
- Tipler, P. A. (2005). *Física para la ciencia y tecnología* (Quinta ed., Vol. 2). Barcelona, España: Reverté.
- Tipler, P. A. (2005). *Física para la ciencia y tecnología* (Quinta ed., Vol. 1C ). Barcelona, España: Reverté.
- Voosestore. (2014). *Catalogo de Voosestore*. Obtenido de <http://www.voosestore.com/es/iluminacion/lampara-2000w-230v-3200k.html>
- Zuloaga, F. (1999). *Pontificia Universidad Católica de Chile*. Obtenido de [http://www7.uc.cl/sw\\_educ/qda1106/CAP2/2B/2B1/](http://www7.uc.cl/sw_educ/qda1106/CAP2/2B/2B1/)