

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**DESARROLLO DE UN DETECTOR DIRECCIONABLE  
PARA MEDICIONES DE RADIACIÓN DIFUSA**

**RODRIGO ALEJANDRO DONOSO VILLEGAS**

Profesor Guía:

Dr. Raúl Labbé Morales

Tesis presentada para optar al Título  
Profesional de Ingeniero Físico

SANTIAGO DE CHILE  
2013

“DESARROLLO DE UN DETECTOR DIRECCIONABLE PARA MEDICIONES  
DE RADIACIÓN DIFUSA”

Trabajo de Graduación presentado a la Facultad de Ciencia, en  
cumplimiento parcial de los requerimientos exigidos para optar  
al Título profesional de Ingeniero Físico.

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

SANTIAGO DE CHILE  
2013

“DESARROLLO DE UN DETECTOR DIRECCIONABLE PARA MEDICIONES  
DE RADIACIÓN DIFUSA”

RODRIGO ALEJANDRO DONOSO VILLEGAS

Este trabajo de Graduación fue elaborado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Raúl Labbé Morales, del Departamento de Física y ha sido aprobado por los miembros de la Comisión Calificadora del candidato, Dr. Ernesto Gramsch, Dr. Rodrigo Hernández y Dr. Ignacio Olivares.

---

Dr. Ernesto Gramsch

---

Dr. Rodrigo Hernández

---

Dr. Ignacio Olivares

---

Dr. Raúl Labbé Morales  
*Profesor Guía*

---

Dra. Yolanda Vargas  
*Directora*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco muy profundamente a mi profesor guía Dr. Raúl Labbé Morales, por su apoyo, y ayuda incondicional en todo el desarrollo de esta tesis, especialmente en los momentos más complicados y difíciles, por su comprensión y paciencia.

Quiero agradecer con mucho agrado y reconocimiento al Señor Gastón Bustamante por su invaluable ayuda en la realización de numerosos componentes del instrumento desarrollado en esta tesis.

Agradezco también al Dr. Ernesto Gramsch por permitir que desarrollara la parte inicial de esta tesis en su laboratorio donde conocí más de cerca su trabajo.

Agradezco a todo el equipo del Centro Mario Molina, que siempre estuvieron dispuestos a ayudarme en lo que fuera y siempre preocupados por mi avance, agradezco en especial al director Dr. Pedro Oyola y a mis compañeros Sergio Soler, Yeanice Vásquez, Felipe Reyes, Matías Tagle, Constanza Aguilera, Marcela Castillo, Marta Caballero, Gabriela Lizama, Juan Pablo Moraga, Javier Mujica, por las muestras de apoyo y por mandarme a terminar la tesis cuando ya me quedaba poco tiempo, ¡Muchas Gracias a todos!

Agradezco a mi familia por todo el apoyo que me brindaron en todo el tiempo que me demore en sacar la carrera, y a mis compañeros y amigos de la Universidad que siempre estuvieron pendientes de mi avance.

Este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo financiero de los proyectos Fondecyt No. 1090686 y Dicyt No. 041231LM.

## RESUMEN

La mayoría de los detectores de radiación difusa disponibles en el mercado hacen una integración total de la irradiancia en un ángulo sólido  $2\pi$ , lo que no permite conocer la radiación difusa proveniente de alguna dirección en particular.

El propósito de este trabajo de tesis es el diseño y fabricación de un medidor de radiación difusa capaz de cuantificar la intensidad a determinadas horas del día proveniente de diferentes direcciones, mediante un sistema automatizado.

Para ello, se diseñó un instrumento que permite el movimiento de un detector direccional de radiación en dos ángulos independientes, azimut y elevación, mediante la utilización de dos motores paso a paso controlados por un computador.

El detector de radiación se compone de un fotodiodo que mide en la banda espectral visible, un colimador para proveer de directividad al detector, y un sistema de medición de temperatura para posibilitar la corrección del error en las lecturas del detector debido al efecto de la temperatura en el fotodiodo.

# ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	1
1.1. Descripción del trabajo . . . . .	2
2. Componentes del sistema.	6
2.1. Fotodetector . . . . .	6
2.1.1. Principio de funcionamiento. . . . .	6
2.1.2. Fotodiodo . . . . .	11
2.1.3. Características del fotodetector . . . . .	13
2.2. Motores Paso a Paso . . . . .	14
2.2.1. Tipos de motores paso a paso . . . . .	15
3. Medición y compensación de temperatura	20
3.1. Diseño del sistema . . . . .	20
3.2. Resultados . . . . .	25
3.3. Calibración del termistor . . . . .	28
4. Componentes y montaje del instrumento	31
4.1. Ángulo sólido cubierto por el detector . . . . .	39

5. Sistemas de control y alimentación.	41
5.1. Alimentación del sistema . . . . .	41
5.2. Fotodetector . . . . .	45
5.3. Termistor . . . . .	46
5.4. Sistema de control de los motores . . . . .	47
5.4.1. Forma de enviar los bits. . . . .	48
5.5. Inductancia del sistema. . . . .	51
5.5.1. Inductancia del motor bipolar. . . . .	52
5.5.2. Inductancias de las bobinas del filtro LC. . . . .	54
6. Resultados	55
7. Conclusiones	57
Bibliografía	58



# ÍNDICE DE FIGURAS

1.1.	Tipos de radiación solar . . . . .	1
1.2.	Ejemplo de un piránometro comercial . . . . .	3
1.3.	Partes del trabajo . . . . .	4
2.1.	Generación térmica de un semiconductor . . . . .	8
2.2.	Juntura PN de un diodo en equilibrio . . . . .	12
2.3.	Responsividad en función de la longitud de onda inci- dente de un fotodiodo . . . . .	13
2.4.	Grafico potencial versus corriente en un diodo . . . . .	14
2.5.	Motor paso a paso híbrido bipolar de 200 pasos . . . . .	15
2.6.	Tipos de motores de paso . . . . .	17
2.7.	Tipos de motores de paso según su bobinado. . . . .	17
2.8.	Motores utilizados . . . . .	18
3.1.	Circuito de alimentación del LED. . . . .	21
3.2.	Circuito de amplificación de la señal del fotodiodo. . . . .	22
3.3.	Sistema utilizado para controlar la temperatura. . . . .	23
3.4.	Montaje utilizado para medir la compensación de tem- peratura. . . . .	23

3.5.	Programa de LabVIEW para medir la señal del fotodiodo.	24
3.6.	Ajuste polinomial entre la corriente de alimentación del detector de luz, del emisor de luz y de la temperatura del detector. . . . .	25
3.7.	Corriente del detector versus temperatura . . . . .	26
3.8.	Circuito utilizado para alimentar y medir la señal del termistor. . . . .	28
3.9.	Ajuste exponencial del comportamiento del fotodetector	29
4.1.	Semiesfera barrida . . . . .	31
4.2.	Mecanismo para colimar la luz del sol . . . . .	32
4.3.	Colimador . . . . .	32
4.4.	Telescopio . . . . .	33
4.5.	Montaje de los motores. . . . .	34
4.6.	Fotodiodo y termistor. . . . .	35
4.7.	Soporto del fotodetector y de los colimadores junto a los motores que permiten su movimiento. . . . .	36
4.8.	Soporte del ventilador . . . . .	37
4.9.	Montaje completo . . . . .	38
5.1.	Esquema del circuito que alimenta los amplificadores operacionales . . . . .	42
5.2.	Oscilador con 50 % de ciclo de trabajo. . . . .	43
5.3.	Señal con 50 % de ciclo de trabajo. . . . .	43
5.4.	Señal obtenida en la salida del transformador . . . . .	44

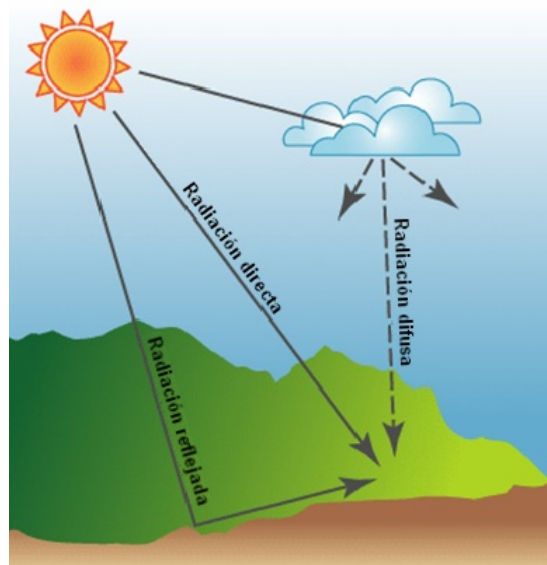
5.5.	Circuito para alimentar y medir la señal del fotodetector.	45
5.6.	Circuito utilizado para alimentar y medir la señal del termistor. . . . .	46
5.7.	Circuito controlador del motor unipolar de elevación. . .	47
5.8.	Circuito controlador del motor bipolar . . . . .	49
5.9.	Circuito utilizado para medir la inductancia de una bobina del motor bipolar. . . . .	53
5.10.	Relación entre la tensión de una de las bobinas del motor bipolar y la frecuencia de la corriente de alimentación.	53
5.11.	Mediciones de la inductancia de retroalimentación . . .	54
6.1.	Resultados de mediciones de radiación difusa . . . .	55
6.2.	Resultados de mediciones de radiación suavizadas . .	56

# ÍNDICE DE CUADROS

2.1.	Características electro ópticas del fotodetector utilizado.	15
2.2.	Características de los motores utilizados . . . . .	19
3.1.	Error en los parámetros de ajuste del fotodetector. . .	27
3.2.	Error en los parámetros de ajuste del termistor . . . .	30
5.1.	Secuencia de bits enviada al circuito controlador del motor de elevación . . . . .	48
5.2.	Secuencia de bits para mover el motor que efectúa el movimiento azimutal . . . . .	50
5.3.	Metodología para mover los motores . . . . .	51

# 1 | INTRODUCCIÓN

La radiación solar que alcanza la superficie de la tierra se puede clasificar según su trayectoria en radiación directa, difusa y reflejada.



**Figura 1.1:** La radiación solar se divide en radiación directa, difusa y reflejada dependiendo de su trayectoria [1].

La radiación directa, como su nombre lo indica, es la que proviene directamente del sol, mientras que la radiación reflejada es aquella reflejada por una superficie y depende de la capacidad de reflexión de la misma (albedo).

La radiación difusa no tiene una dirección característica y es la que predomina en días nublados. El estudio de la misma es particularmente relevante en los siguientes ámbitos:

- En los invernaderos, las plantas con gran cantidad de hojas como las hortalizas, crecen y se desarrollan mejor cuando están expuestas a radiación difusa constante que proviene de todas las direcciones [2].
- En el desarrollo de paneles solares fotovoltaicos, la radiación difusa contribuye a una parte no despreciable del total de radiación capturada [3].
- En el estudio del clima y de la dispersión de la luz debido a moléculas atmosféricas como el material particulado.

La construcción de un detector de radiación difusa direccionable toma importancia, debido a que los detectores que se encuentran disponibles en el mercado como los piránómetros (ver figura 1.2), hacen una integración de la irradiancia en todo el espacio y con ello no es posible determinar variaciones direccionales.

## 1.1 Descripción del trabajo

Este trabajo consiste en el desarrollo de un instrumento para mediciones direccionales de radiación difusa.

El dispositivo electrónico utilizado para medir la radiación es un fotodiodo sensible en el rango espectral visible. Junto a él, dos colimadores separados por



**Figura 1.2:** Piránometro comercial Sensovant modelo SR11[3].

una distancia definida permiten seleccionar la dirección del haz de luz que incide sobre su superficie. El barrido angular se logra mediante un montaje compuesto por dos motores de pasos que permiten variar el azimut y la elevación de los colimadores.

El sistema incorpora un termistor que permite medir la temperatura de operación del fotodiodo, y un ventilador que contribuye a mantener la temperatura del sistema dentro de límites seguros de operación.

Un computador equipado con una interfaz National Instrument y algunos programas especialmente creados para este fin, permiten el control de los motores y el procesamiento de datos.

En la figura 1.3 se muestran con más detalle las principales partes de este trabajo, haciendo una división entre montaje y programación.

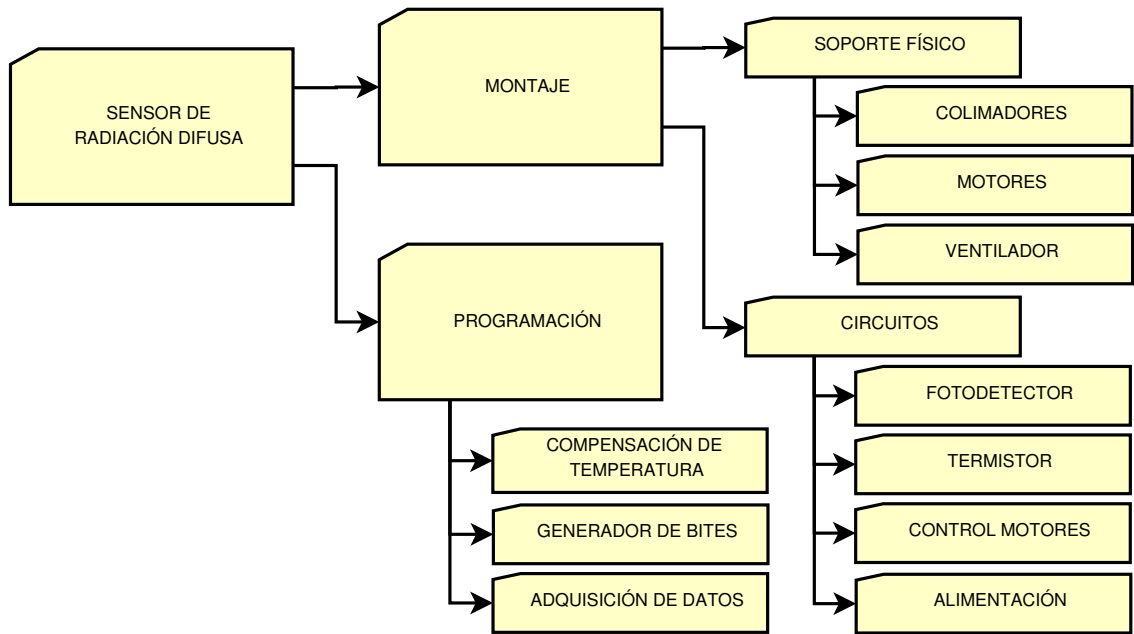


Figura 1.3: Diagrama con las principales partes de este trabajo.



## **Objetivos Generales.**

- Diseño y construcción de un detector direccionable de radiación difusa.

## **Objetivos Específicos**

- Determinación y estudio teórico del sensor de radiación a utilizar. Aspectos ópticos, térmicos y mecánicos.
- Diseño y fabricación de sistemas mecánicos y circuitos electrónicos de control, teniendo en cuenta los resultados del estudio anterior.
- Realización del sistema de adquisición de datos y programas de control para las pruebas y evaluación del prototipo.
- Diseño de un sistema para mediciones en terreno.

## 2 | COMPONENTES DEL SISTEMA.

El sistema incorpora 2 componentes principales, el fotodetector y los motores de pasos. En esta sección se hace una revisión de los principales aspectos teóricos de cada uno de estos sistemas con el fin de elegir los componentes apropiados, comprender sus características técnicas y su principio de funcionamiento.

### 2.1 Fotodetector

El sensor de radiación utilizado es un fotodiodo. Un fotodiodo es un tipo común de diodo semiconductor formado por la unión de dos semiconductores, de tipo P y tipo N, con la excepción de que su encapsulado permite el ingreso de luz hacia la región de la unión PN. Posee una rápida velocidad de respuesta frente a variaciones de intensidad de la radiación luminosa incidente.

#### 2.1.1 Principio de funcionamiento.

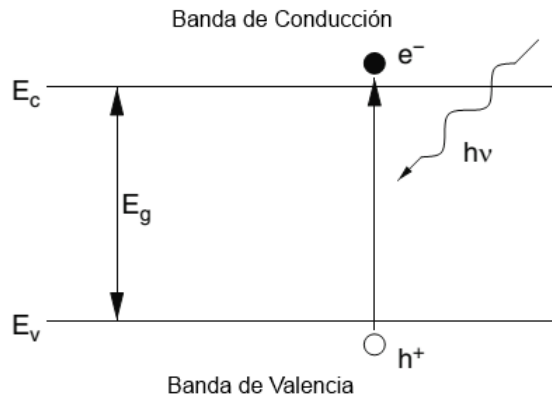
El objetivo fundamental de un detector de luz es convertir una señal que se encuentra en el dominio óptico al dominio eléctrico. Uno de los detectores más utilizados es el fotodiodo.

El fotodiodo comúnmente está fabricado de material semiconductor. En los semiconductores ocurre el fenómeno de la generación térmica de pares electrón-hueco, esta se produce cuando se mueve un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción creando una vacancia en la banda de valencia (hueco) y un electrón libre en la banda de conducción. La idealización del espacio dejado por el electrón en la banda de valencia y la interacción con su entorno se denomina hueco.

Cada semiconductor tiene un estado de equilibrio donde la generación térmica de pares electrón-hueco es compensada por su recombinación. En un semiconductor intrínseco la cantidad de huecos es igual a la cantidad de electrones libres. Por el contrario en un semiconductor dopado, las concentraciones de electrones y huecos no son iguales, si la concentración de electrones libres es mayor a la de huecos es llamado semiconductor de tipo n, mientras que si la concentración de huecos es mayor a la de electrones libres es llamado semiconductor de tipo p.

Para generar un par electrón-hueco, se necesita una energía mayor o igual a la diferencia de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción (gap de energía  $E_g$ ). Una onda electromagnética incidente puede proveer esta energía con la única condición de que la energía del fotón  $h\nu$  sea mayor al gap de energía,

$$h\nu \geq E_g = E_c - E_v, \quad (2.1)$$



**Figura 2.1:** Generación térmica en un semiconductor con gap de energía  $E_g$  [4]

donde  $h$  es la constante de Planck ( $6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}$ ),  $E_c$  es la energía del menor nivel de la banda de conducción y  $E_v$  es la energía del mayor nivel de la banda de valencia.

Por ejemplo, considerando que el gap de energía del silicio a temperatura ambiente es  $1,11 \text{ eV}$ , se puede calcular la longitud de onda requerida para crear un par electrón-hueco,

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{E_g} = \frac{(300 \times 10^6 \text{ m/s}) (6,63 \times 10^{-34} \text{ Js})}{1,11 (1,6 \times 10^{-19} \text{ J})} \approx 1,12 \mu\text{m}, \quad (2.2)$$

que corresponde a la banda infrarroja del espectro.

Mientras penetra en el material, la onda es gradualmente absorbida, este mecanismo está caracterizado por la Ley de Beer-Lambert,

$$\Phi(d) = \Phi_0 \exp^{-\alpha d}, \quad (2.3)$$

donde  $\Phi(d)$  es el flujo de fotones que penetra una distancia  $d$  de semiconductor y  $\Phi_0$  es el flujo sobre la superficie del material. La magnitud  $\alpha$  es el coeficiente

de penetración y la distancia  $1/a$  es el ancho de penetración. En el caso del Silicio, los fotones que tienen una longitud de onda mayor a  $1,12 \mu m$  tienen un bajo coeficiente de absorción y largo coeficiente de penetración, debido a esto, estos fotones son incapaces de crear pares electrón-hueco y solamente atraviesan el semiconductor. Los fotones que tienen una longitud de onda menor serán absorbidos gradualmente por el semiconductor creando pares electrón-hueco.

El fenómeno opuesto a la generación térmica es la recombinación radiativa o emisión espontánea de fotones, donde un electrón en la banda de conducción se recombina con un hueco de la banda de valencia, emitiendo el exceso de energía en forma de fotón.

El Silicio es un semiconductor de banda prohibida indirecta (*indirect band gap*); esto quiere decir que las bandas de valencia y conducción no comparten el mismo vector de onda. Un fotón no puede ser emitido directamente debido a que el electrón tiene que pasar por un estado intermedio y transferir momentum a la estructura cristalina. Por lo tanto, la transición de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción requiere administrar un monto de energía igual al gap de energía así como también un fonón (partícula caracterizada por la cuantización de las vibraciones de la red cristalina). Esta es la razón por la cual el coeficiente de penetración de un semiconductor de banda prohibida indirecta es significativamente más grande que el coeficiente de penetración de un semiconductor de banda prohibida directa.

La interacción de pares electrón-hueco, fonones, fotones y otras partículas deben satisfacer la conservación de la energía y del momentum del cristal (con-

servación del vector de onda total asociado a la estructura cristalina). Un fotón con energía igual al gap de energía necesario tiene casi cero momentum, para que la recombinación radiativa ocurra en un semiconductor de banda prohibida indirecta, el proceso debe implicar la absorción o emisión de un fonón, donde el momentum del fonón es igual a la diferencia entre el momentum del electrón y el momentum del hueco, debido a que el fotón emitido en el proceso no puede tener la cantidad de momentum necesaria para que la conservación del momentum se cumpla. Luego, es imposible que ocurra este proceso en este tipo de semiconductores.

Las estructuras cristalinas no son perfectas en la realidad. Contienen imperfecciones e impurezas que provocan la introducción de estados electrónicos entre los niveles que definen el gap de energía. Estos niveles pueden servir como centros de generación térmica o recombinación radiativa, lo cual se conoce como mecanismo de Shockley-Read-Hall.

Después de que los portadores de carga (pares electrón-hueco) han sido generados, un campo eléctrico puede ser utilizado para recoger la carga y producir una señal eléctrica.

En un fotoconductor, el material semiconductor es instalado entre 2 contactos óhmicos, de modo que al estar en presencia de un potencial eléctrico, los contactos fuerzan la aparición de un flujo de corriente eléctrica que circula a través del semiconductor. Mientras la luz alcanza el semiconductor, se crean pares de electrón-hueco. Para que sea eficiente, la vida media de los portadores de carga generados necesita ser más grande que el tiempo que les toma alcanzar los contactos.

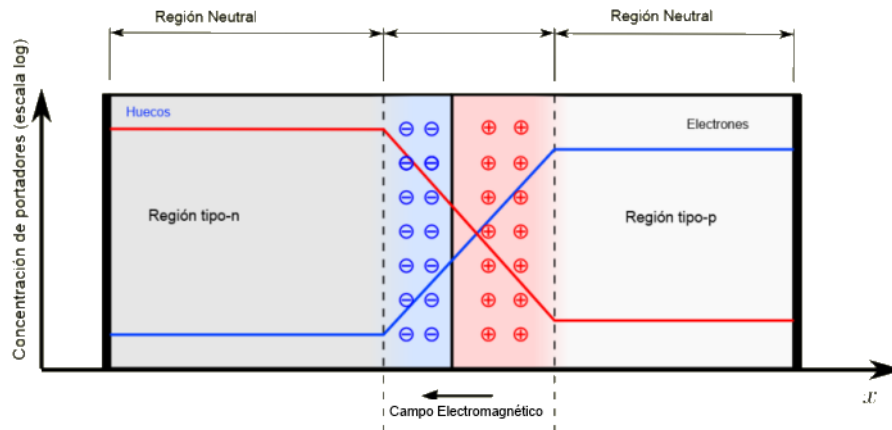
### *Diodo Semiconductor*

El diodo semiconductor está formado por la unión de dos tipos de semiconductores, un semiconductor de tipo n (mayor concentración de electrones libres) y otro de tipo p (mayor concentración de huecos libres). El semiconductor tipo p representa el cátodo y el tipo n, el ánodo. Los electrones y huecos no están igualmente distribuidos sobre la estructura. Debido al movimiento de los portadores de carga, la región tipo p está cargada negativamente, mientras que la región tipo n está cargada positivamente, se establece un campo eléctrico entre estas dos regiones que producen una corriente de electrones y huecos que balancea las corrientes de difusión, los electrones se mueven a la región tipo n y los huecos a la región tipo p, el equilibrio se alcanza cuando las corrientes se anulan entre ellas y no existe flujo de corriente desde una región a otra (ver figura 2.3).

Como se mencionó, aparece un campo eléctrico en la juntura de los semiconductores originando una redistribución de la carga. Este campo causa que el potencial varíe sobre la estructura. El ancho de esta región depende de las concentraciones de dopaje del semiconductor.

#### **2.1.2 Fotodiodo**

Si fotones con suficiente energía alcanzan la superficie del diodo semiconductor, se crean pares electrón-hueco en las regiones tipo n, tipo p y en la región desierta, el campo eléctrico en esta región separa los electrones de los huecos y aparece una fotocorriente que fluye del ánodo al cátodo.



**Figura 2.2:** Juntura PN de un diodo en equilibrio, se observa que el campo eléctrico sólo se manifiesta en la región desierta. (imagen adaptada de <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pn-junction-equilibrium.png>, última visita noviembre de 2013.)

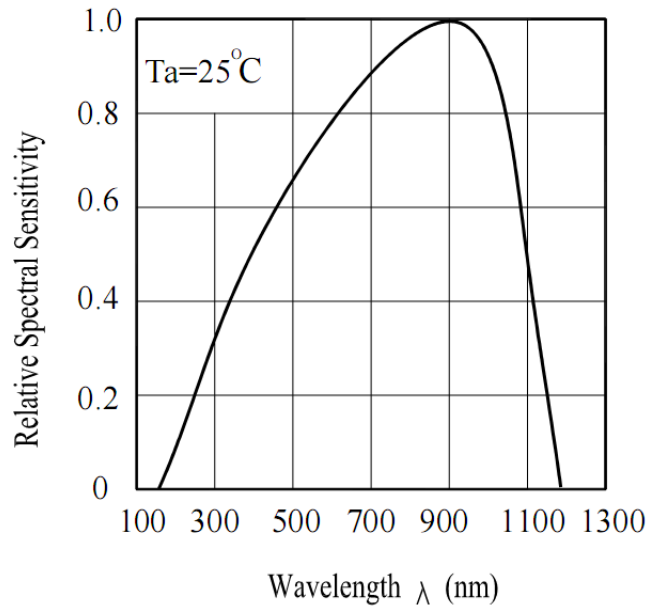
La corriente a través del diodo semiconductor es proporcional a la potencia óptica incidente,

$$I = R \times P_{IN}, \quad (2.4)$$

donde  $R$ , es la responsividad del fotodiodo. Este parámetro, cuyas unidades son  $A/W$ , representa la capacidad del fotodiodo de generar pares electrón-hueco por la incidencia de una señal óptica.

Cuando sobre el diodo incide radiación luminosa, la corriente y el voltaje característico disminuyen una cantidad determinada por la concentración de pares electrón-hueco creados y por lo tanto por el número de fotones que inciden sobre el diodo. Si el fotodiodo es alimentado con un voltaje inverso, su modo de operación siempre se mueve en el tercer cuadrante del sistema de coordenadas (ver figura 2.4), la corriente fluye del cátodo al ánodo. Un fotodiodo configurado de esta forma consume una cantidad de potencia igual a  $I_{np} V_{np} = I_{pn} V_{pn}$ .



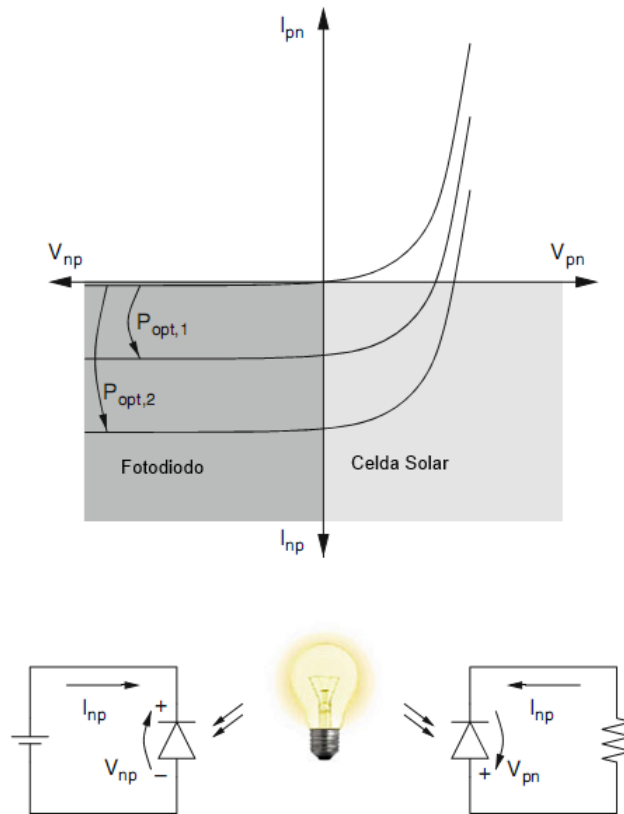


**Figura 2.3:** Curva de sensibilidad espectral relativa o responsividad típica de un fotodiodo para diferentes longitudes de onda a 25° C. [5]

A temperatura ambiente existe una pequeña probabilidad de que se produzca generación térmica de pares electrón-hueco aún en ausencia de iluminación, con lo que se puede generar una pequeña corriente que recibe el nombre de corriente oscura. Esta corriente oscura dependerá de la temperatura y de las condiciones eléctricas de operación del fotodiodo.

### 2.1.3 Características del fotodetector

El fotodiodo utilizado en este trabajo corresponde al modelo *Everlight PD638C*. Se ha elegido este modelo debido principalmente a su rango de sensibilidad espectral que cubre desde los 400 nm a los 1100 nm.



**Figura 2.4:** Gráfico potencial versus corriente en un fotodiodo, se muestran 3 casos: sin iluminación, intensidad luminosa  $P_{opt1}$ ,  $P_{opt2} > P_{opt1}$ . También se muestra la región de trabajo del fotodetector y la región de trabajo de una celda solar con su circuito equivalente[4].

## 2.2 Motores Paso a Paso

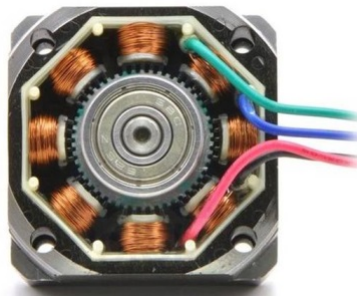
El motor paso a paso es un dispositivo electromagnético que convierte pulsos digitales en rotaciones mecánicas precisas. Sus principales ventajas son su alta fiabilidad, alto torque a bajas velocidades y que puede funcionar en casi cualquier ambiente. Su principal desventaja es el efecto de resonancia exhibido a bajas velocidades.

**Cuadro 2.1:** Características electro ópticas del fotodetector utilizado. [5]

Parámetro	Condición	Mínimo	Típico	Máximo
Ancho de banda espectral	-	400 nm	-	1100 nm
Voltaje característico ( $V_{REV}$ )	$T = 25^\circ \text{C}$	-	-	32 V
$\lambda$ máxima sensibilidad ( $\lambda_p$ )	-	-	940 nm	-
Temperatura de operación	-	$-40^\circ \text{C}$	-	$85^\circ \text{C}$
Capacitancia total	$V_{REV} = 3 \text{ V}$ $f = 1 \text{ MHz}$	-	25 pF	-
Corriente oscura	$V_{REV} = 10 \text{ V}$	-	5 nA	30 nA
Corriente inversa	$\lambda_p = 940 \text{ nm}$ $V_{REV} = 5 \text{ V}$	10,2 $\mu\text{A}$	18 $\mu\text{A}$	-

### 2.2.1 Tipos de motores paso a paso

Existen básicamente 3 tipos de motores paso a paso; de reluctancia variable, de imán permanente e híbridos.

**Figura 2.5:** Motor paso a paso híbrido bipolar de 200 pasos [6].

Los motores de imán permanente usan un imán permanente en el rotor, operan a través de la atracción o repulsión entre el rotor y los electroimanes del

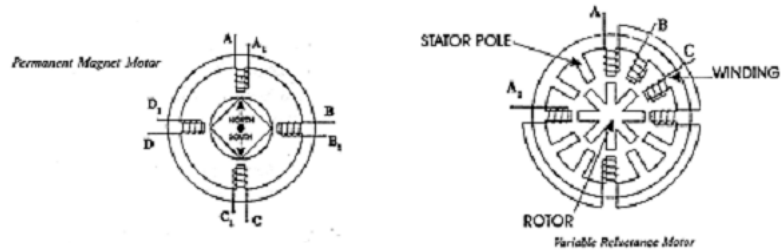
estator. Funcionan relativamente a bajas velocidades, se caracterizan por tener relativamente gran torque y grandes ángulos de paso (45 o 90 grados).

Los motores de reluctancia variable, utilizan un rotor de hierro. Cuando uno de los polos magnéticos del estator es energizado, causa una atracción magnética que alinea el rotor con este polo. Típicamente se mueven en pasos de 15 grados y no soportan torques de gran magnitud.

Los motores híbridos combinan las características de los motores de reluctancia variable y de los motores de imán permanente. Están contruidos con un estator de polos multidentados y un rotor de imán permanente, los motores híbridos estándar tienen 200 dientes y rotan con pasos de 1,8 grados. Debido a estas características y a que soportan un gran torque dinámico y estático es que son los más utilizados en aplicaciones industriales.

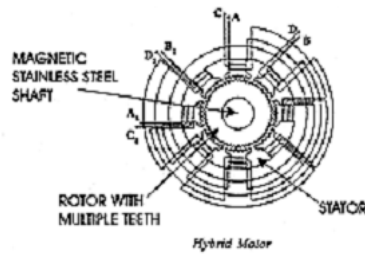
Según su bobinado, se diferencian dos tipos, unipolar y bipolar. Los motores unipolares tienen un bobinado por cada fase del estator, a cada sección del bobinado le corresponde una dirección del campo magnético. El circuito de conmutación para controlarlo puede ser muy simple (por ejemplo se puede utilizar un transistor por cada bobinado). El centro de giro de cada bobina es conectado al común, por lo que utilizan 3 cables para un motor de una fase y 5 cables para un motor típico de dos fases donde el cable común se comparte.

Los motores bipolares, tienen dos conjuntos de bobinados idénticos por cada polo del estator, la corriente se transfiere de una bobina a otra. A diferencia de los motores unipolares, para cambiar la dirección se necesita invertir la corriente sobre el bobinado. La configuración más común de este tipo de motores es con 8



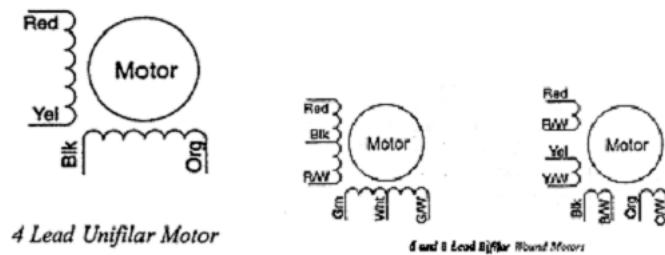
(a) Imán permanente

(b) Reluctancia variable



(c) Híbrido

Figura 2.6: Tipos de motores de paso [7]



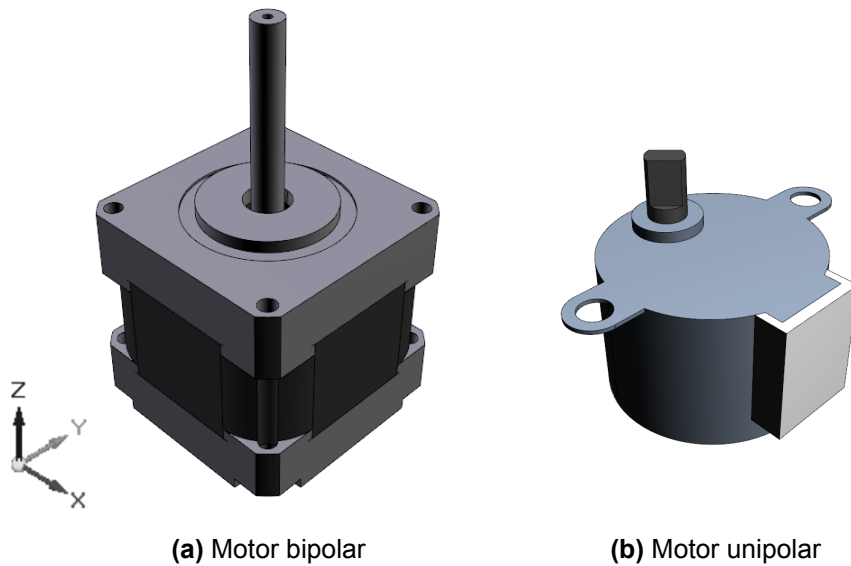
(a) Motor unipolar

(b) motores bipolares de 6 y 8 salidas

Figura 2.7: Tipos de motores de paso según su bobinado. [7]

cables debido a que ofrecen la flexibilidad de conectarlos en serie o en paralelo, aunque también hay disponibles motores bipolares de 6 cables que sólo ofrecen conexión en serie. El manejo de motores bipolares es más complicado, típicamente se utiliza un arreglo de puentes H [7].

En este trabajo se utilizaron 2 tipos de motores; un motor híbrido unipolar de dos fases y un motor híbrido bipolar.



**Figura 2.8:** Motores utilizados en el desarrollo del trabajo.

### *Características de los motores utilizados.*

En la tabla 2.2 se muestran las principales características de cada motor utilizado.

**Cuadro 2.2:** Características de los motores utilizados

	Motor unipolar	Motor bipolar
Nº de pasos completos	64	200
Reducción	64	-
Tensión de alimentación (V)	12	12
Impedancia ( $\Omega$ )	488	200

El motor bipolar se utiliza en modo de medios pasos, por lo que necesita 400 pasos para girar en 360 grados. Mientras que el motor unipolar debido a su reducción necesita  $64 \times 64 = 4096$  pasos para dar una vuelta completa.

# 3 | MEDICIÓN Y COMPENSACIÓN DE TEMPERATURA

Si se desea obtener una buena medición de la radiación incidente, se debe tomar en cuenta la respuesta ante los cambios de temperatura de la señal del fotodiodo.

Con esta finalidad, se ha diseñado un sistema que permite medir los cambios en la lectura del fotodiodo cuando se varía controladamente su temperatura y la intensidad luminosa recibida.

## 3.1 Diseño del sistema

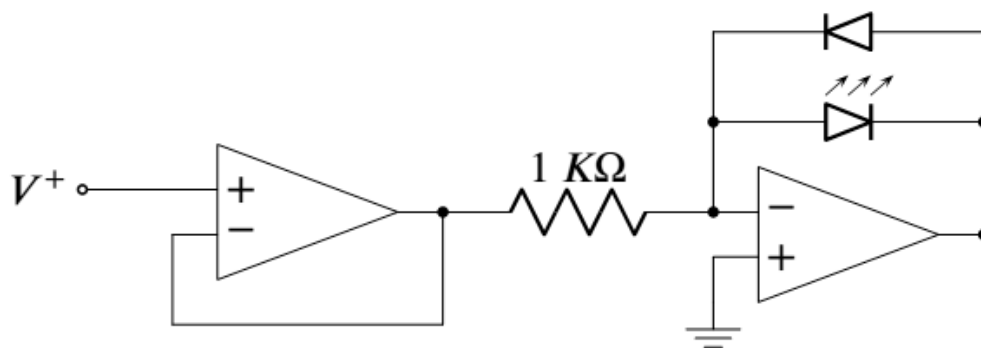
El siguiente sistema se compone de una fuente de luz controlada, un detector de luz y de un sistema que permite medir y controlar la temperatura.

En la construcción del sistema se han utilizado dos cajas de aluminio pre-sondado de medidas  $50 \times 50 \times 32$  mm con paredes de 2 mm de espesor, cartón forrado, papel aluminio, dos fuentes de poder ajustables de corriente directa MCP M10-SP-406E, tres amplificadores operacionales TL071, dos resistencias de  $1 \text{ k}\Omega$  y  $800 \text{ k}\Omega$ , un fotodiodo PD638C, un termistor de  $200 \Omega$ , un LED blanco de 3 V, un condensador de  $0,1 \mu\text{F}$ , cuatro resistencias de cerámica de 5 W, un diodo 1N4148, un medidor de temperatura con termocupla, una interfaz de adquisición



de datos NI SCB-68, un PC con programa LabVIEW versión 7,1, un termistor NTC de  $200 \Omega$ .

La fuente de luz se compone de un LED conectado entre la entrada inversora y la salida de un amplificador inversor, que a la vez se encuentra en serie con una resistencia de  $1 K\Omega$ , como se muestra en la figura 3.1.

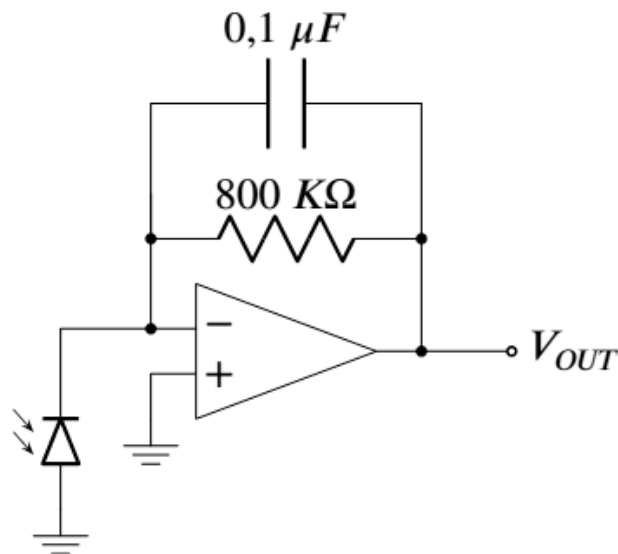


**Figura 3.1:** Circuito de alimentación del LED.

El voltaje de alimentación  $V^+$  se configura a través de la salida analógica de la interfaz National Instruments y es suministrado por un seguidor de voltaje. La corriente con la que se alimenta al LED esta dada por  $I = V^+/1 K\Omega$ .

Por otro lado, el circuito detector de luz se compone de un fotodiodo conectado a la entrada inversora de un amplificador operacional, que convierte la corriente que entrega el fotodiodo en voltaje (ver figura 3.2), de modo que la señal de salida esta dada por  $V_{OUT} = 800 K\Omega \times I$

Un condensador en paralelo a la resistencia de  $800 K\Omega$  se encarga de filtrar el ruido de la red eléctrica. El voltaje de salida se mide a través de una de las entradas analógicas de la interfaz National Instruments.

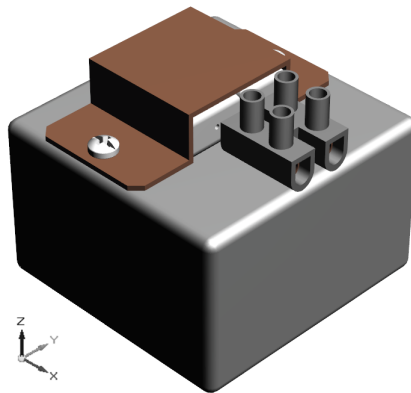


**Figura 3.2:** Circuito de amplificación de la señal del fotodiodo.

Por último, para controlar y regular la temperatura del sistema, se diseñó un pequeño horno, que consiste en una caja de aluminio conectada a un par de resistencias de cerámica de potencia  $5\text{ W}$ , mediante una base de cobre y pasta térmica. Estas resistencias pueden alcanzar altas temperaturas dependiendo de la corriente de alimentación.

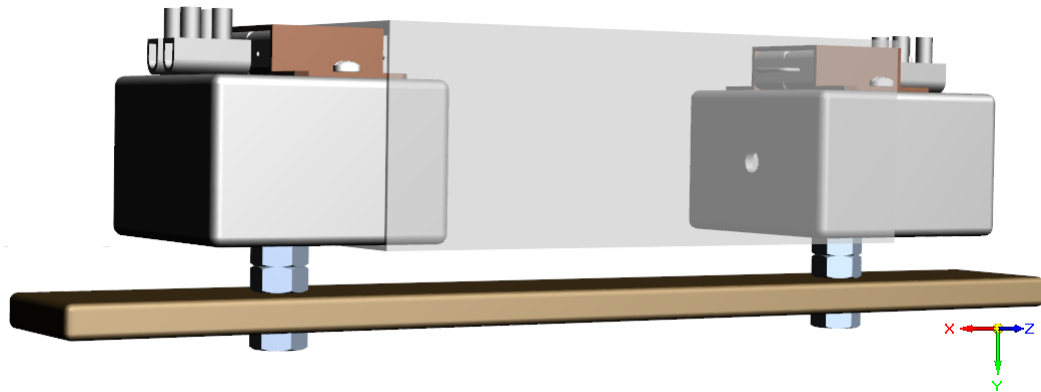
Los terminales de las resistencias se conectan a una fuente de poder de corriente continua que entrega la potencia necesaria para que el sistema alcance una temperatura dada. Esta temperatura es medida mediante una termocupla que se encuentra fija sobre una de las caras exteriores de la caja, la termocupla esta conectada a un medidor de temperatura.

El fotodiodo y el termistor se instalan en uno de los hornos (los circuitos de alimentación se encuentran fuera del horno), mientras que el LED y su circuito



**Figura 3.3:** Sistema utilizado para controlar la temperatura de los componentes electrónicos. En color blanco se puede apreciar las resistencias de potencia utilizadas.

se instala en el otro horno. Se ajusta la posición de forma que el fotodiodo se encuentre a  $15\text{ cm}$  del LED recibiendo la luz que proviene de él. Luego el espacio entre los hornos se cubre con cartón forrado negro cubierto de papel aluminio para aislarlo de la luz ambiental.



**Figura 3.4:** Montaje utilizado para medir la compensación de temperatura

Se observa en las lecturas que el sistema se encuentra bien aislado de la luz ambiental, y gracias al condensador instalado en el circuito del fotodiodo se

filtra adecuadamente el ruido proveniente de la red eléctrica, obteniéndose una lectura de datos limpia.

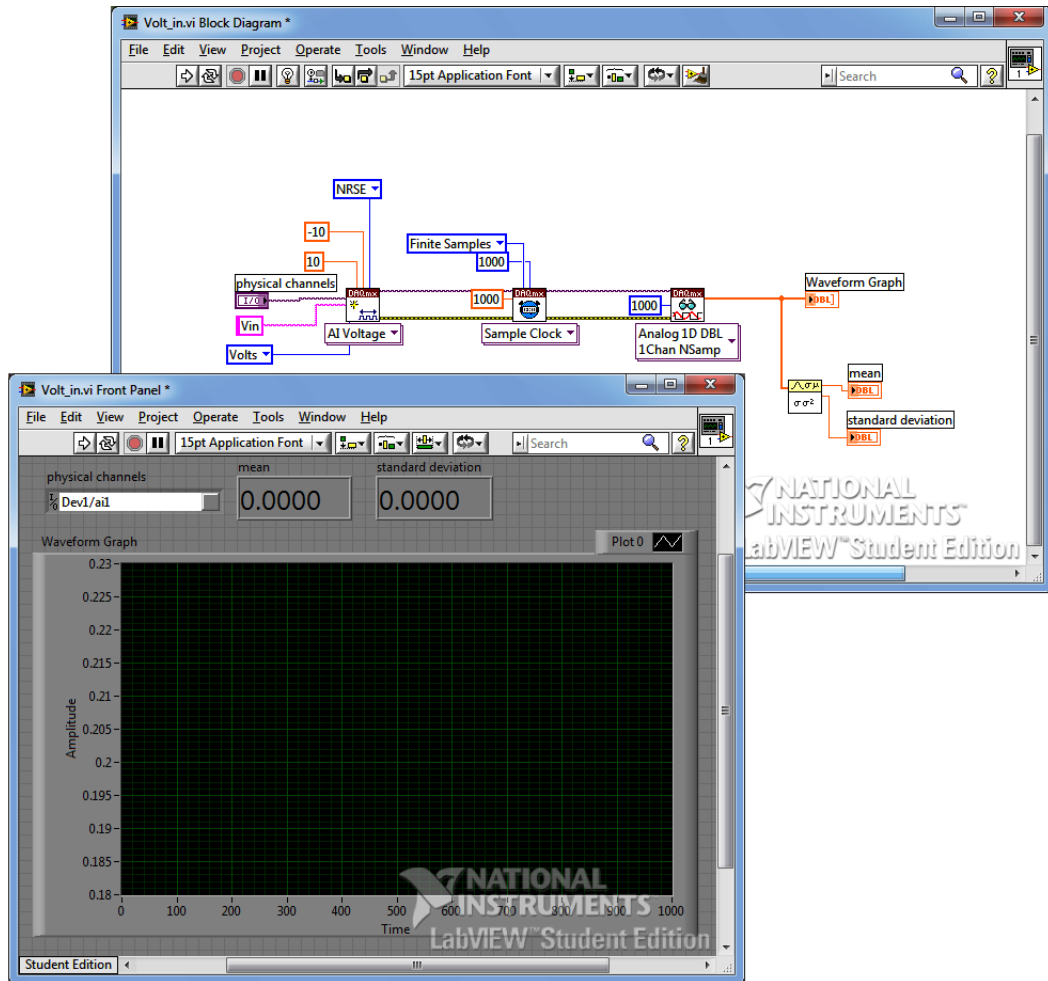


Figura 3.5: Programa de LabVIEW para la lectura de los datos.

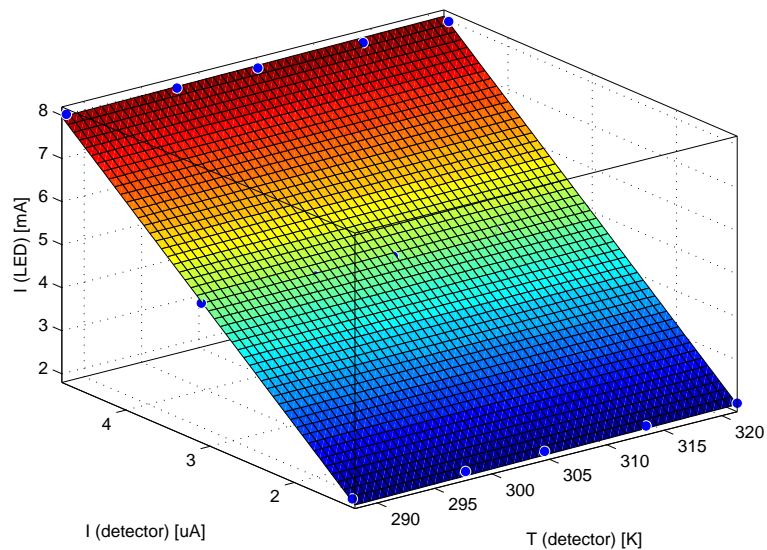
A través de la interfaz se ajusta la corriente en el LED y se realiza la lectura de datos provenientes del fotodiodo. La temperatura es medida por la termocupla instalada en la parte exterior del horno. Se considera que en equilibrio la temperatura del horno es constante.

Debido a que la temperatura variaba constantemente entre mediciones, para minimizar el error experimental y asegurar buenas mediciones se esperó a que se estabilizara la temperatura (30 minutos en promedio entre mediciones).

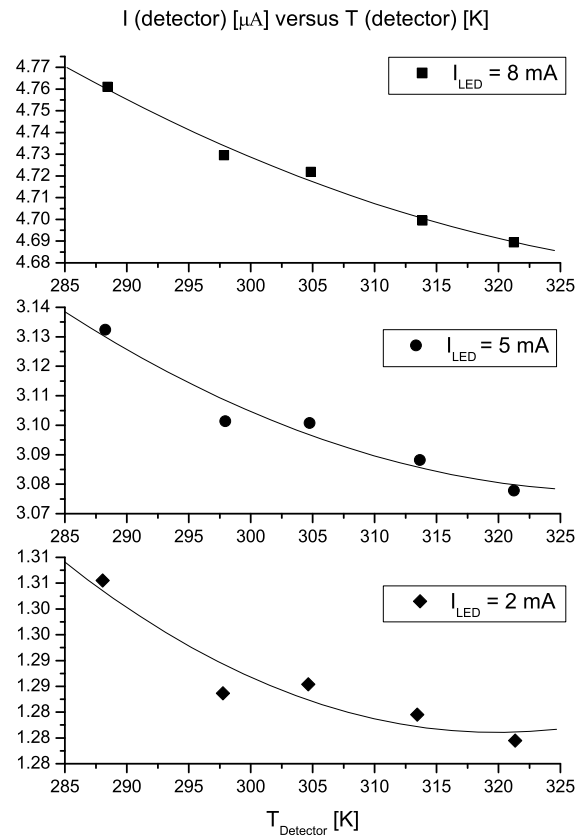
## 3.2 Resultados

Se mide la señal del circuito fotodetector, cuando su temperatura se varía entre 14,9 y 48,1 °C y cuando la corriente en el LED ( $I_{LED}$ ) se varía entre 2 mA y 8 mA.

Se realizó un ajuste de superficie y se obtuvo la ecuación de un plano como muestra la figura 3.6. La dependencia de la medición con la temperatura se puede observar en la figura 3.7.



**Figura 3.6:** Corriente en el LED como función de la corriente en el fotodiodo y la temperatura.



**Figura 3.7:** Corriente versus temperatura del detector cuando es iluminado por diferentes intensidades de luz.

La ecuación ajustada es:

$$I_F(T, I_L) = -1,483 \times 10^{-9} T + 5,716 \times 10^{-4} I_L + 6,314 \times 10^{-7}, \quad (3.1)$$

con  $I$  medido en  $A$  y  $T$  en  $K$ . Esta ecuación corresponde a la ecuación de un plano con  $r = 0,999$  y es la que se utilizará para corregir las variaciones de temperatura en el fotodetector y medir la luminosidad del cielo.

El error de los parámetros de esta ecuación con 95 % de incerteza, se muestra a continuación.

**Cuadro 3.1:** Error en los parámetros de ajuste, forma  $I_F(T, I_L) = aT + bI_L + c$ .

Parámetro	Intervalo de confianza al 95	
$a$	$-3,941 \times 10^{-9}$	$9,753 \times 10^{-10}$
$b$	$5,600 \times 10^{-4}$	$5,833 \times 10^{-4}$
$c$	$-1,212 \times 10^{-7}$	$1,384 \times 10^{-6}$

Con SSE (suma de desviaciones cuadráticas) de  $3,1 \times 10^{-14}$  y RMSE (raíz cuadrada de las desviaciones cuadráticas) de  $5,1 \times 10^{-8}$ .

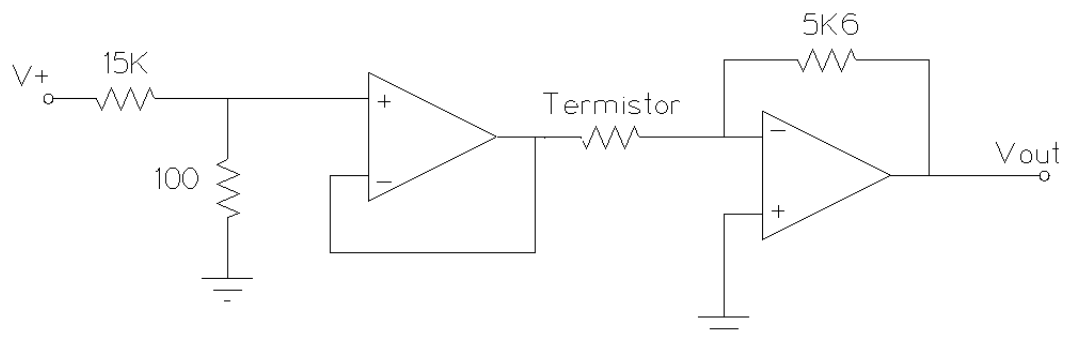
### 3.3 Calibración del termistor

La resistencia medida en un termistor se relaciona con la temperatura según:

$$R = R_0 \exp\left(\frac{B}{T}\right), \quad (3.2)$$

donde  $R_0$  y  $B$  son variables que dependen del material del termistor y del tipo de termistor en particular.

Utilizando el mismo montaje descrito en la sección anterior, se puede calibrar el termistor que medirá la temperatura en el montaje final. Para esto, se utiliza el circuito mostrado en la figura 3.8



**Figura 3.8:** Circuito utilizado para alimentar y medir la señal del termistor.

El circuito del termistor se alimenta con  $15\text{ V}$ . En la entrada del seguidor de voltaje se encuentra un divisor de tensión que fija la tensión sobre los terminales del termistor.

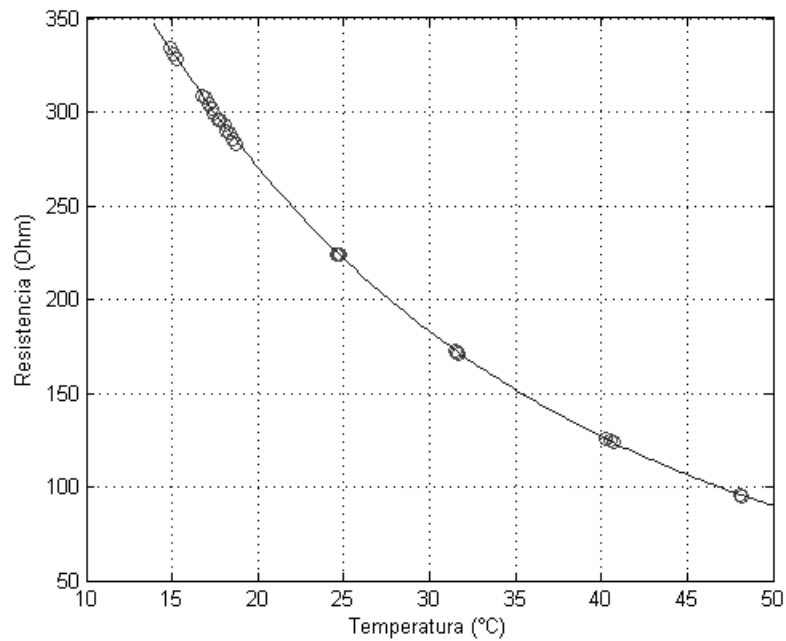
$$V_b = \left( \frac{1000\ \Omega}{15\ \text{K}\Omega + 100\ \Omega} \right) V_+. \quad (3.3)$$



Llamando  $R$  a la resistencia del termistor, el voltaje de salida está dado por:

$$V_{OUT} = 5,6 \text{ K}\Omega \times \left( \frac{V_b}{R_T} \right). \quad (3.4)$$

Se midió la resistencia del termistor a distintas temperaturas, luego se realizó un ajuste de la ecuación 3.2, el resultados se muestra en la figura 3.9.



**Figura 3.9:** Ajuste exponencial del comportamiento del termistor

La ecuación encontrada corresponde a:

$$R = (1,884 \times 10^{-3}) \exp\left(\frac{3481}{T}\right), \quad (3.5)$$

esta ecuación es la que se utilizara para calcular la temperatura. El error de los parámetros de esta ecuación con 95 % de incerteza, se muestra a continuación.

**Cuadro 3.2:** Error en los parámetros de ajuste, forma  $f(x) = a \times \exp(b/x)$ 

Parámetro	Intervalo de confianza al 95%	
a	0.0018	0.0020
b	3463,0	3493,0

Con SSE (suma de los errores al cuadrados) de 11,960 y RMSE (raíz cuadrada del error cuadrático medio) de 0,7059.

# 4 | COMPONENTES Y MONTAJE DEL INSTRUMENTO

La idea principal del dispositivo es permitir que el fotodetector rote en torno al eje  $z$  (movimiento azimutal) y en torno a un eje horizontal (movimiento de elevación). En coordenadas esféricas,  $(r, \phi, \theta)$ , los movimientos anteriores corresponden a variar los ángulos  $\phi$  y  $\theta$  en los intervalos  $[0, 2\pi)$  y  $[0, \pi/2]$ , respectivamente. Definiendo la dirección del eje  $z$  desde el punto en que se sitúa el instrumento y el cenit, en principio es posible medir la intensidad luminosa proveniente de cada una de las direcciones de la esfera celeste entre el cenit y el plano horizontal en que se encuentra el instrumento. En la práctica, estas direcciones están discretizadas por la variación angular mínima definida por el paso de los motores.

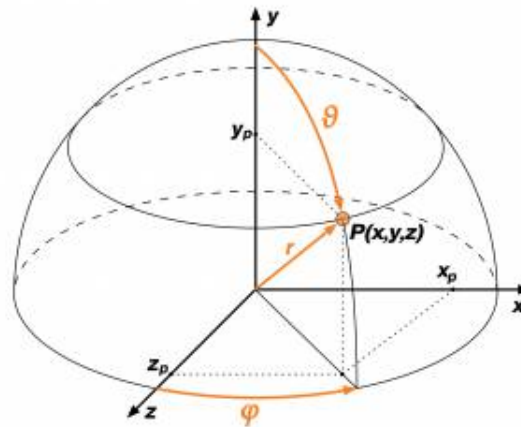
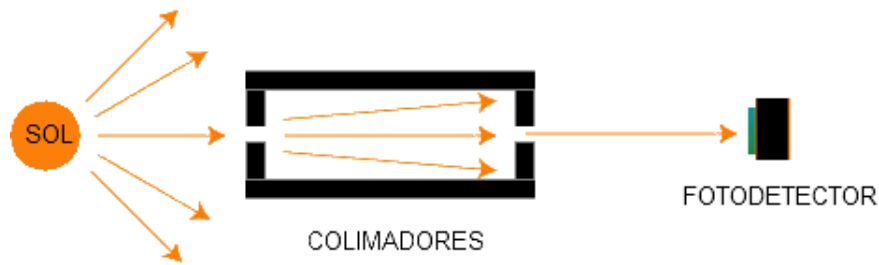
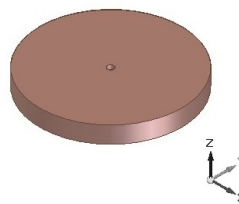


Figura 4.1: Sistema de coordenadas

Con el fin de proveer de direccionalidad al detector, se utilizaron dos colimadores fabricados con placa de fibra de vidrio para circuitos impresos de doble faz, la cual está cubierta en ambos lados con películas de cobre opacas para el espectro visible. Se cortaron dos discos en los cuales se practicaron agujeros de 1 mm de diametro en sus centros, y se instalaron frente al fotodiodo, uno de ellos a unos 3 mm del mismo y el otro separado a una distancia de 25 cm del primero, como se muestra en las figuras 4.3 y 4.4.



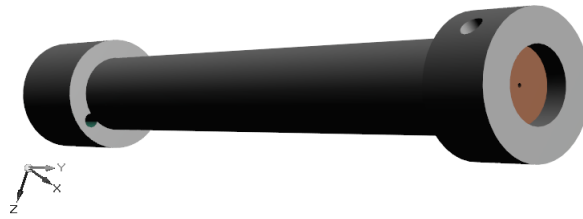
**Figura 4.2:** Mecanismo para colimar la luz del sol



**Figura 4.3:** Colimador

El interior del tubo se encuentra pintado de color negro opaco con la finalidad de impedir que la luz se refleje en el interior.

Como se mencionó anteriormente, el movimiento del detector es realizado por dos motores paso a paso: un motor unipolar de 64 pasos con un reductor

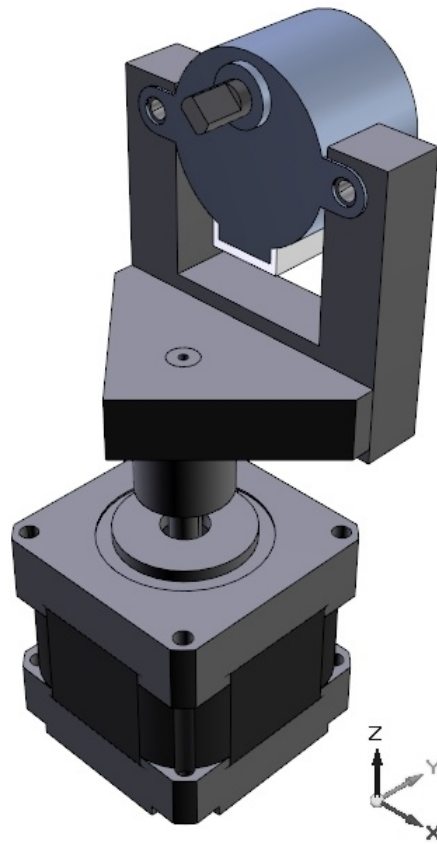


**Figura 4.4:** Dispositivo utilizado para proveer de direccionalidad al detector. Está formado por dos colimadores separados una distancia de 25 cm. El interior del tubo está pintado de color negro opaco.

64 : 1, lo cual da a su eje de salida una resolución de 4096 pasos por vuelta, y un motor bipolar de 200 pasos por vuelta. Este último puede funcionar en modo *half-step*, con lo cual su resolución aumenta a 400 pasos por vuelta. El motor bipolar es de construcción robusta y su eje está construido para soportar una carga considerable, por lo que se utilizó como base para el montaje del motor de elevación junto con el detector. Además, el motor bipolar es el que define el movimiento azimutal. Por otro lado, el eje del motor unipolar no está diseñado para soportar grandes cargas, pero gracias a su reducción puede moverse en ángulos mucho más pequeños. Este motor se utilizó para variar el ángulo de elevación. Los ejes de los motores son mutuamente ortogonales, como muestra la figura 4.5.

La estructura que soporta al fotodiodo y a los colimadores se montó en el eje del motor de elevación. La superficie fotosensible del fotodiodo se dispuso paralela a la superficie de los colimadores. Junto al fotodiodo se instaló un termistor, con la finalidad de posibilitar la corrección de los errores en las mediciones debido a los cambios de temperatura (ver figuras 4.6 y 4.7).

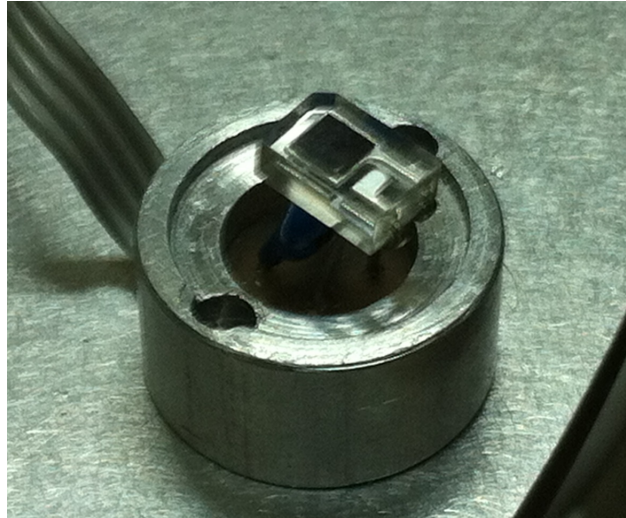
Finalmente, se incorporó un disco de aluminio grueso para dar estabilidad al sistema y permitir la instalación bajo él de la placa con la electrónica que ener-



**Figura 4.5:** Montaje diseñado para que los ejes de los motores sean mutuamente ortogonales.

giza y controla las funciones del instrumento, junto con un ventilador encargado de mantener la temperatura dentro de márgenes seguros para la operación del sistema. Este ventilador enviara un flujo de aire hacia el motor azimutal, el motor de elevación y hacia el disco de aluminio grueso.

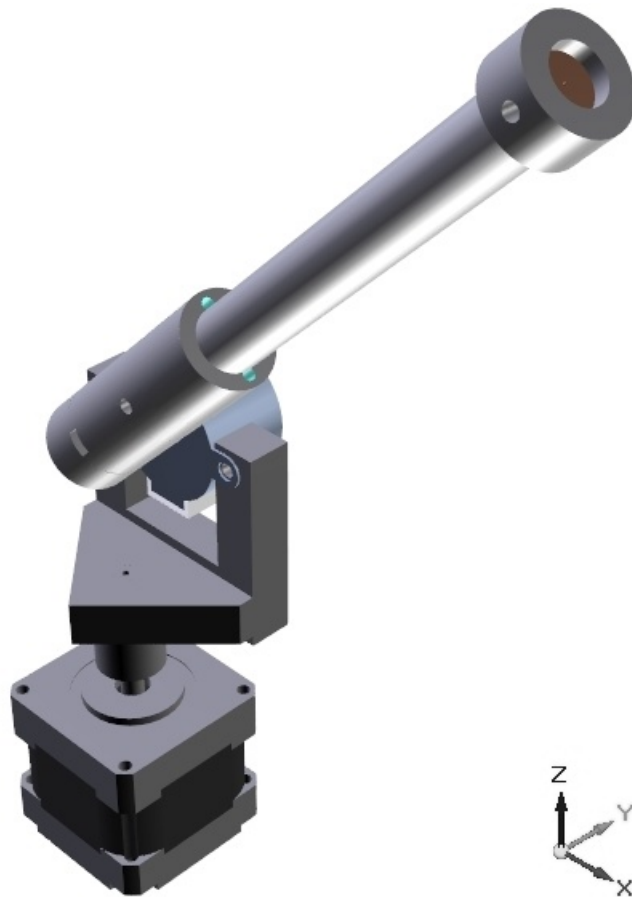
En la figura 4.8, se muestra el sistema que permite enfriar el montaje y en la figura 4.9, el montaje completo.



**Figura 4.6:** Fotodiodo y termistor.

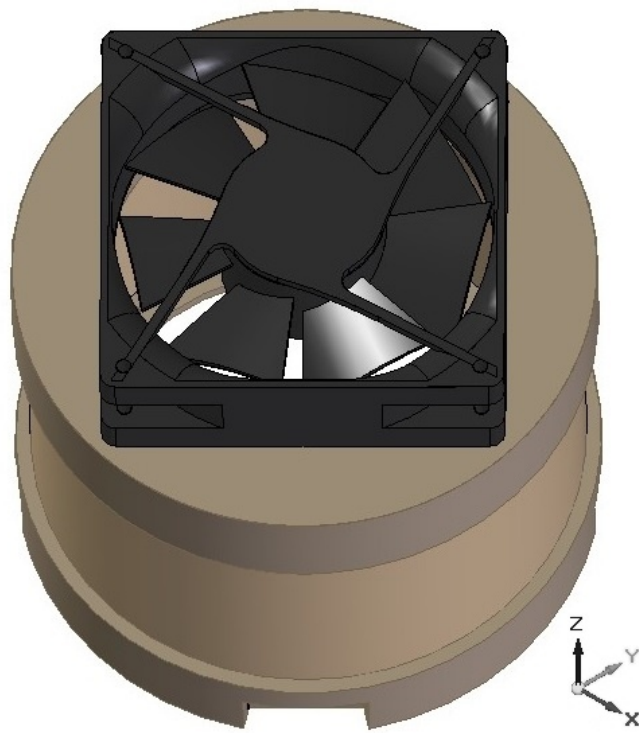
El soporte del ventilador contiene agujeros en la parte superior que permiten que el flujo de aire se distribuya a través del disco grueso de aluminio. Como el aluminio es buen conductor de calor, permite enfriar la mayor parte del montaje.

La placa de circuito impreso con la electrónica que controla el sistema se instaló en la parte inferior de la base entre dos de los tres soportes que mantienen el sistema en posición horizontal.



**Figura 4.7:** Sistema que soporta el fotodetector y los colimadores junto a los motores que permiten su movimiento.





**Figura 4.8:** Ventilador y su soporte. El soporte esta fabricado de PVC.



Figura 4.9: Montaje Completo.

## 4.1 Ángulo sólido cubierto por el detector en cada posición angular.

Por construcción, el sistema de detección no define una dirección única cuando apunta en una dirección dada  $(\phi, \theta)$ . En realidad, debido al tamaño finito de los agujeros de los colimadores, el detector cubre un ángulo sólido  $\Omega$  alrededor de cada dirección  $(\phi, \theta)$ . Teniendo en cuenta los tamaños de los componentes y la geometría del detector, obtenemos:

$$\Omega = \frac{A}{R^2} = \frac{\pi (0,5 \text{ mm})^2}{(125 \text{ mm})^2} = 5,02 \times 10^{-5} \text{ str} \quad (4.1)$$

donde  $A$  es el área del agujero de los colimadores y  $R$  es la mitad de la distancia entre ellos. La razón entre el ángulo sólido  $2\pi$ , correspondiente al hemisferio que se barre en una medición, y  $\Omega$ , permite obtener el número de posiciones angulares que deben medirse para cubrir completamente la bóveda celeste:

$$N = \frac{2\pi}{\Omega} \approx 125000. \quad (4.2)$$

Esta última ecuación nos permite concluir que la directividad del detector es mucho más que suficiente para el tipo de medición que nos interesa: aún utilizando la máxima resolución que nos permite el motor azimutal, difícilmente vamos a tener

traslape en las mediciones de intensidad de radiación difusa, al menos para ángulos de elevación no demasiado grandes. Por otro lado, si pensamos en un tiempo de medición de 1 s para cada posición angular, si se quisiera medir con el grado de resolución que implica la ecuación (4.2), el barrido completo tomaría unas 35 horas, lo cual es claramente impráctico. Dado que una medición de radiación difusa no debiera tomar más de media hora, el número de posiciones angulares debe restringirse a unas 1800, lo cual implica definir un conjunto de posiciones angulares que, si bien debe permitir muestrear uniformemente la bóveda celeste, en ningún caso va a cubrir un porcentaje mayor que 0,52 % del ángulo sólido  $2\pi$ . Por supuesto, esto último no representa un problema, pero revela el tipo de dificultades que involucraría una medición direccional de radiación difusa de alta resolución.

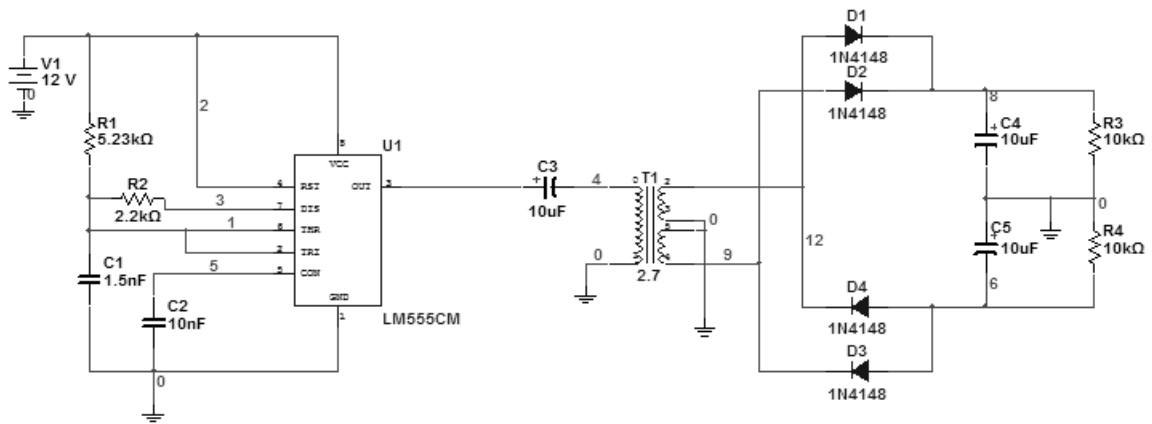
# 5 | SISTEMAS DE CONTROL Y ALIMENTACIÓN.

## 5.1 Alimentación del sistema

Para alimentar los motores de paso, se utiliza una fuente switching que entrega 12 V DC y 2500 mA, lo que es suficiente para alimentar todos los componentes del sistema junto a los motores. Los motores funcionan con 12 V, pero ciertos componentes como los amplificadores operacionales necesitan alimentarse con un voltaje alrededor de  $\pm 7$  V y además se necesita una fuente de 5 V para alimentar circuitos integrados (Latch y shift register).

La fuente de 5 V se obtendrá por medio de un regulador de voltaje estándar 78L05.

Para alimentar los amplificadores se diseñó un circuito que convierte los 12 V en  $\pm 7$  V. El sistema se compone básicamente de un circuito integrado LM555 configurado para generar una onda rectangular con un ciclo de trabajo de 50 %, tal como aparece en la documentación técnica del LM555 provista por National semiconductors. La salida del LM555 se conecta a un transformador con secundario con punto medio, el cual alimenta un puente de diodos para rectificar la señal como muestra la figura [5.2](#).



**Figura 5.1:** Esquema del circuito que alimenta los amplificadores operacionales

La documentación del circuito integrado LM555 indica que para producir un ciclo de trabajo de 50 % se debe cumplir que  $t_1 = 0,693 R_a C$  y  $t_2$ :

$$\frac{R_a R_b}{R_a + R_b} C \ln \left( \frac{R_B - 2R_A}{2R_B - R_A} \right), \quad (5.1)$$

con la frecuencia de oscilación dada por:

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} \quad (5.2)$$

Se realizó una simulación de este circuito con el programa Multisim y se variaron las magnitudes de las resistencias  $R_a$  y  $R_b$ , obteniendo el mejor resultado cuando  $R_a = 5,23 K\Omega$  y  $R_b = 2,2 K\Omega$ .

En la figura 5.3 se muestra la señal entregada por el circuito. Con los parámetros usados en él se obtuvo un voltaje de  $\pm 15,23$  V teóricos con tiempo de bajada (rampa) de  $1,8 \mu s$ .

Con los parámetros usados en el circuito real se obtuvo  $\pm 7$  V.

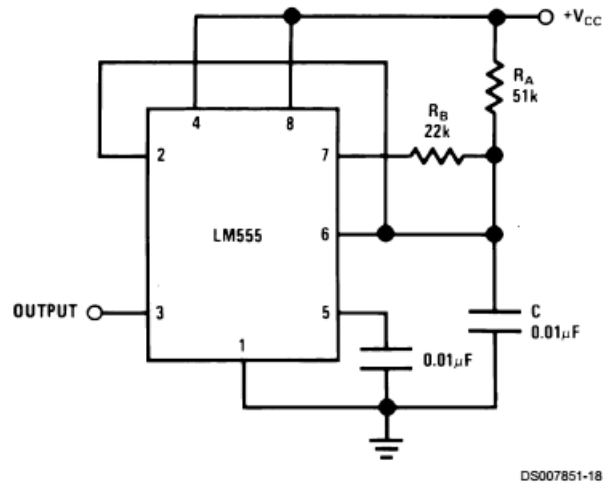


Figura 5.2: Oscilador con 50 % de ciclo de trabajo.

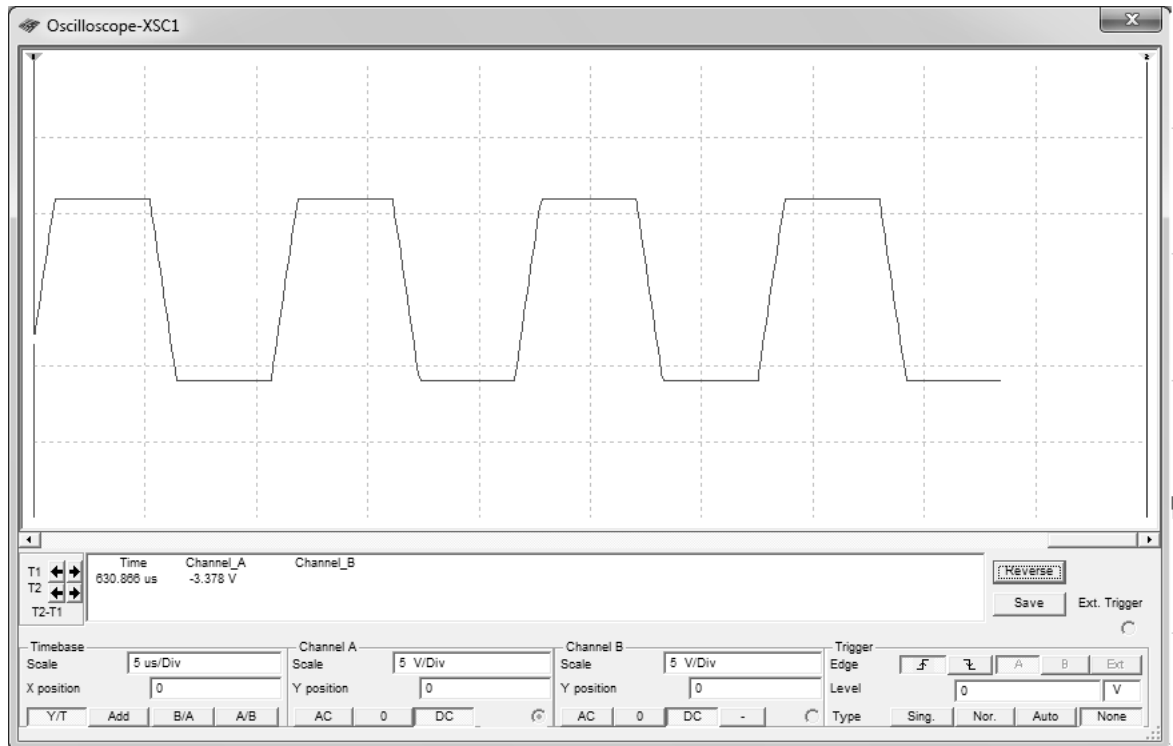
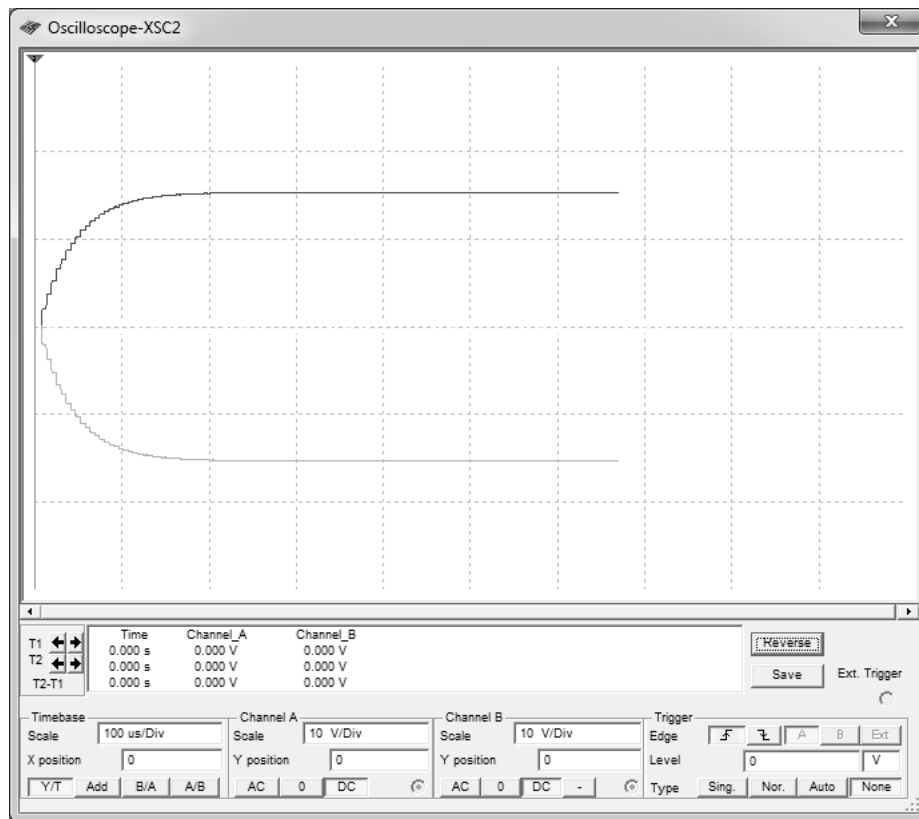


Figura 5.3: Señal con 50 % de ciclo de trabajo. Su amplitud es de 6,001 V.

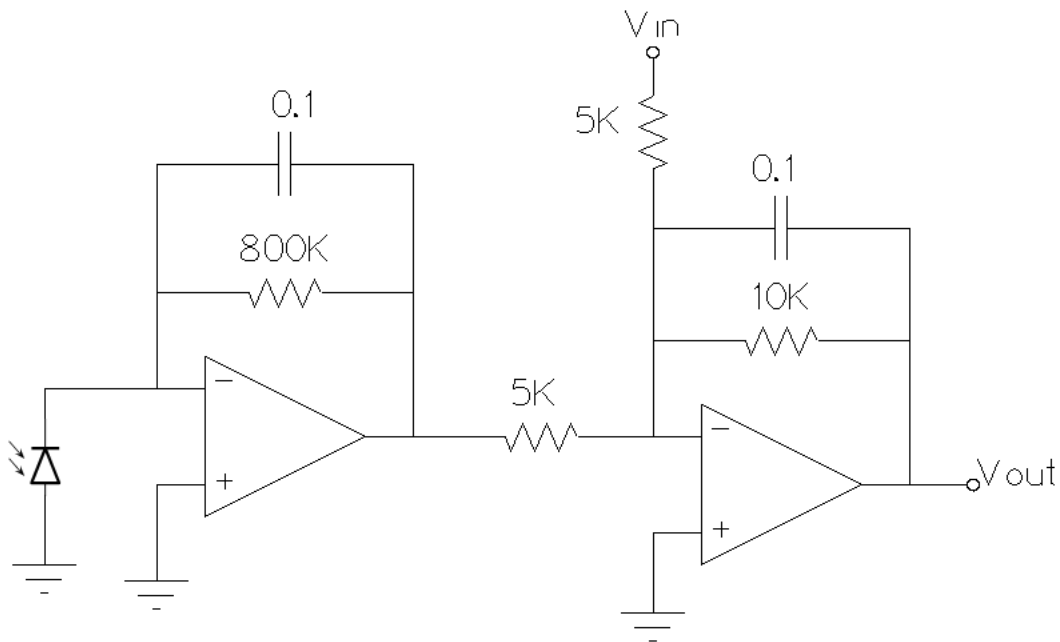


**Figura 5.4:** Señal obtenida en la salida del transformador,  $\pm 15,23$  V al encender la fuente de alimentación.



## 5.2 Fotodetector

Debido a que la interfaz que se utilizará para comunicar al detector con el computador mide voltajes, y puesto que el fotodiodo produce una corriente al ser iluminado, se hace necesario utilizar un conversor corriente-voltaje para realizar las mediciones. Esto se logra conectando el detector a la entrada inversora de un amplificador operacional. Se utiliza un amplificador TL071, como se muestra en la 5.5. En la salida del primer amplificador operacional se tiene  $V_a = 800\text{ K}\Omega \times I_F$ , donde  $I_F$  es la corriente que entrega el fotodiodo. El parámetro  $V_{in}$  se utiliza como tensión de offset de modo que la tensión de medición se encuentre dentro del intervalo aceptado por el conversor análogo digital de la interfaz.



**Figura 5.5:** Circuito para alimentar y medir la señal del fotodetector. El valor de las resistencias está medido en Ohm, y el de los condensadores en micro Farad.

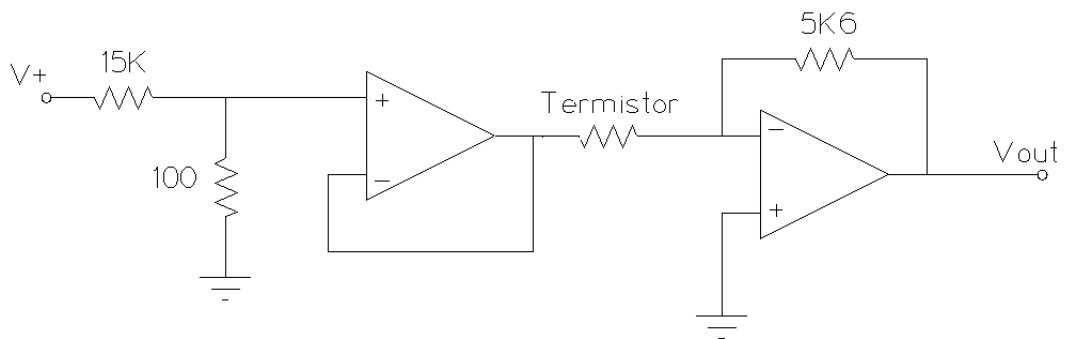
Para tensiones y corrientes estáticas, tenemos:

$$V_{OUT} = -10 \text{ k}\Omega \times \left( \frac{V_a}{5 \text{ k}\Omega} + \frac{V_{IN}}{5 \text{ k}\Omega} \right) = -10 \text{ k}\Omega \left( \frac{800 \text{ k}\Omega \times I_F}{5 \text{ k}\Omega} + \frac{V_{IN}}{5 \text{ k}\Omega} \right) \quad (5.3)$$

## 5.3 Termistor

El circuito del termistor es mostrado en la figura 5.6, este circuito se alimenta con alrededor de 7 V. En la entrada del seguidor de voltaje se encuentra un divisor de tensión que fija la tensión sobre los terminales del termistor.

$$V_b = \left( \frac{100 \Omega}{15 \text{ K}\Omega + 100 \Omega} \right) V_+ = 46 \text{ mV} \quad (5.4)$$



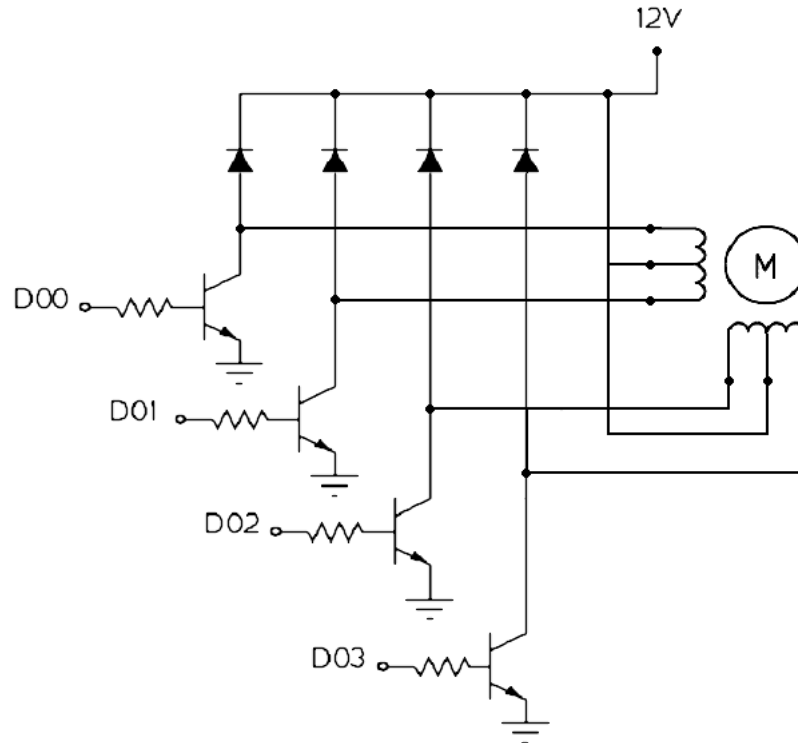
**Figura 5.6:** Circuito utilizado para alimentar y medir la señal del termistor.

Llamando  $R_t$  a la resistencia del termistor, el voltaje de salida está dado por:

$$V_{out} = 5,6 \text{ K}\Omega \times \left( \frac{V_b}{R_t} \right) \quad (5.5)$$

## 5.4 Sistema de control de los motores

El motor unipolar se controló mediante un arreglo de transistores como muestra la 5.7.



**Figura 5.7:** Circuito controlador del motor unipolar de elevación.

La serie de bits que sirve para controlar el motor se muestra en la tabla 5.1.

El motor que efectúa el movimiento azimutal, como ya se mencionó, es un motor bipolar. Debido a esto, la forma de controlarlo es más complicada. Se utilizó el circuito integrado PLB3717A que provee de un puente H, para convertir los niveles lógicos de tensión a corrientes.

**Cuadro 5.1:** Secuencia de bits enviada al circuito controlador del motor de elevación

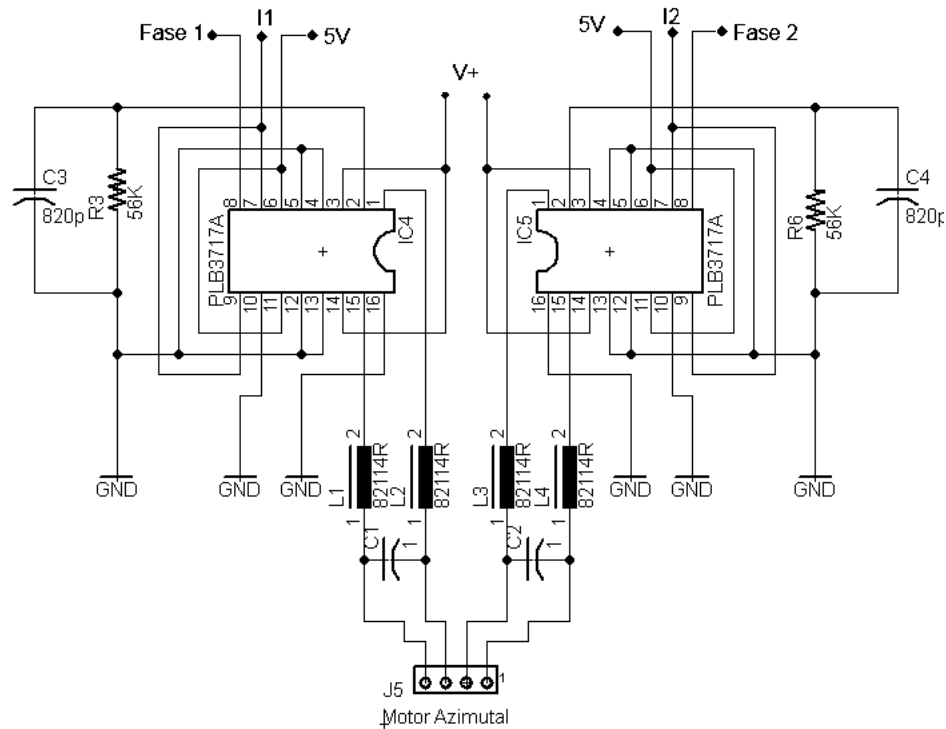
Motor unipolar			
1	0	0	0
1	1	0	0
0	1	0	0
0	1	1	0
0	0	1	0
0	0	1	1
0	0	0	1
1	0	0	0

Se utilizó una configuración de medio paso, de modo que los bits enviados manejan la corriente en las bobinas y la fase maneja la dirección de la corriente. La secuencia utilizada para mover el motor es mostrada en la tabla 5.2.

#### 5.4.1 Forma de enviar los bits.

Para comunicar el computador con los motores de pasos, se utiliza una interfaz Nacional Instruments USB 6211. Esta interfaz tiene el inconveniente de contar con una salida digital de sólo cuatro bits. El problema se resolvió, utilizando un circuito integrado shift register 74HC164 que permite convertir una secuencia de 8 bits en un byte. Junto a él se utilizó el Latch 74HC573 que envía los bits a los circuitos controladores de los dos motores.

El programa de LabVIEW desarrollado utiliza 3 salidas digitales de un bit:



**Figura 5.8:** Circuito controlador del motor bipolar

1. La primera salida se utiliza para enviar en forma secuencial los bits que comandan a los motores.
2. La segunda salida es utilizada como reloj, con cada transición de 0 a 1 el shift register acepta uno de los bits y lo guarda. Esto se repite hasta completar los 8 bits que forman el byte que se envía a los controladores de los motores.
3. La tercera salida es la que habilita al latch para enviar el byte a los motores. Se habilita cuando han ingresado en el shift register los 8 bits enviados en forma secuencial.

**Cuadro 5.2:** Secuencia de bits para mover el motor que efectúa el movimiento azimutal del sistema.









Motor bipolar			
Fase 1	$I_1$	$I_2$	Fase 2
0	0	0	0
0	1	0	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	0	0	1
1	1	0	1
0	0	0	1
0	0	1	1

Debido a que se están enviando los bits que mueven los motores en forma secuencial, se utiliza más tiempo que al enviarlos en forma paralela, a lo menos 8 veces más dependiendo de la forma en que el programa cambia las salidas digitales. Pese a lo anterior, cuando el programa corre sin restricciones la tasa de envío de datos a los motores supera ampliamente la capacidad de respuesta de los mismos, de modo que es necesario introducir pausas de algunos milisegundos para que los motores puedan responder sin perder pasos.

Los motores se pueden mover simultáneamente, pero se optó por una metodología más simple en donde se envía la secuencia de bytes (correspondientes a 8 bits) para mover el motor azimutal en un sentido y mantener la posición del motor de elevación. Cuando se da una vuelta completa, se mantiene la posición del motor azimutal y se mueve el motor de elevación en un sentido (para que el sistema se mueva hacia arriba), luego se mantiene la posición del motor de ele-

vación y se mueve el motor azimutal en sentido opuesto hasta que se alcanza la posición inicial del motor azimutal, luego nuevamente se mueve el motor de elevación en el mismo sentido anterior y se vuelve a repetir el proceso hasta que el sistema halla barrido todo el hemisferio superior.

**Cuadro 5.3:** Metodología para mover los motores. El motor azimutal se mueve hasta que da una vuelta completa, El motor de elevación se mueve hasta que se alcance la nueva posición deseada.

Tiempo	Movimiento del eje	
	Motor azimutal	Motor de elevación
1		
2		
3		
4		

En cada movimiento de los motores, el programa debe medir y guardar a través de las entradas análogas el voltaje correspondiente a la intensidad de radiación difusa recibida y la tensión en la salida del circuito del termistor. Estas variables se guardan en formato binario y se procesan luego con un script MATLAB.

## 5.5 Inductancia del sistema.

Los puentes H presentes en el circuito controlador del motor bipolar (PLB3717A) producen en su salida una tensión que varía muy rápidamente, lo cual genera radiación electromagnética de alta frecuencia.

Este problema se puede resolver insertando un filtro LC pasa baja en la salida, lo cual permite reducir el valor de  $dV/dt$ . El precio que se paga es un aumento en el tiempo que demora la corriente en llegar al nivel de operación del motor. La constante de tiempo asociada está dada por:

$$\tau_m = \frac{L_m}{R_m}, \quad (5.6)$$

donde  $L_m$  es la inductancia de una de las bobinas del motor y  $R_m$  su resistencia.

### 5.5.1 Inductancia del motor bipolar.

Para medir la inductancia de una bobina del motor bipolar, se conectó en serie con una fuente de tensión alterna y una resistencia conocida de  $385\Omega$ , para evitar exigirle demasiada corriente al generador de funciones.

Se utiliza un generador de funciones Agilent modelo 33220A, con resistencia interna de  $50\Omega$  y un osciloscopio LG modelo OS8100A.

El osciloscopio se conecta entre los terminales de la bobina y se genera una onda sinusoidal de amplitud  $4\text{ Vp-p}$  como se muestra en la figura 5.9.

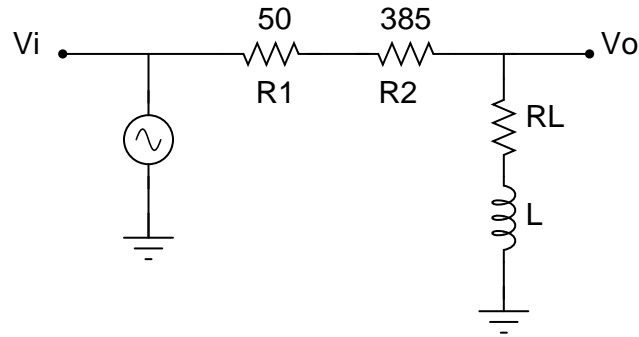
Al resolver el circuito, se obtiene que la relación entre el voltaje en el motor y el voltaje de entrada  $V_i$  está dada por:

$$V_m(s) = \left( \frac{Ls + R_L}{R + Ls + R_L} \right) V_i(s) \quad (5.7)$$

donde  $R = 435\Omega$ , la ganancia está dada por:

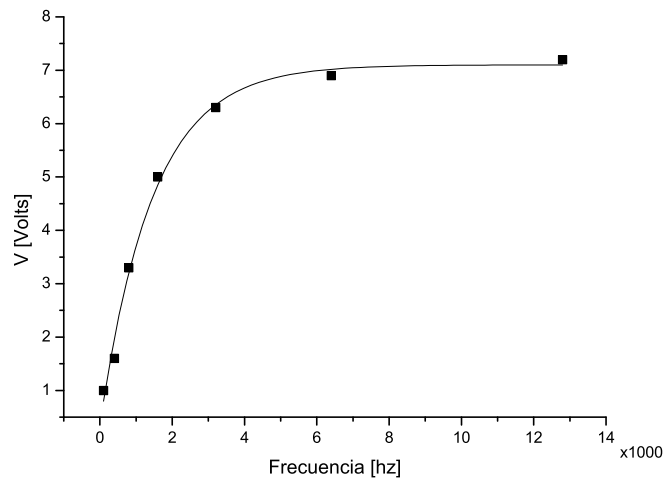
$$G_M = \sqrt{\frac{(\omega L)^2 + R_L^2}{(R + R_L)^2 + (\omega L)^2}}, \quad (5.8)$$





**Figura 5.9:** Circuito utilizado para medir la inductancia de una bobina del motor bipolar.

Se barrió la frecuencia desde 100 Hz a 12,8 Hz , midiendo la tensión en una de las bobinas del motor. Mediante un ajuste por mínimos cuadrados se encuentra que la inductancia tiene el valor  $L = 37 \text{ mH}$  con un coeficiente de correlación de 0,98.



**Figura 5.10:** Relación entre la tensión de una de las bobinas del motor bipolar y la frecuencia de la corriente de alimentación.

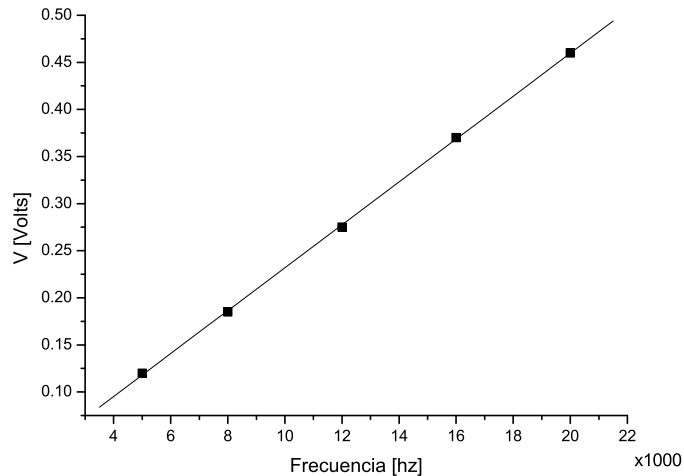
### 5.5.2 Inductancias de las bobinas del filtro LC.

Al igual que con el motor, en las bobinas de filtro LC se midió la inductancia utilizando un circuito RC. En este caso podemos despreciar la resistencia de la bobina. En esta configuración la ganancia está dada por:

$$G_M = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (5.9)$$

donde la resistencia utilizada fue de  $470\Omega$ , más la resistencia interna de  $50\Omega$  del generador.

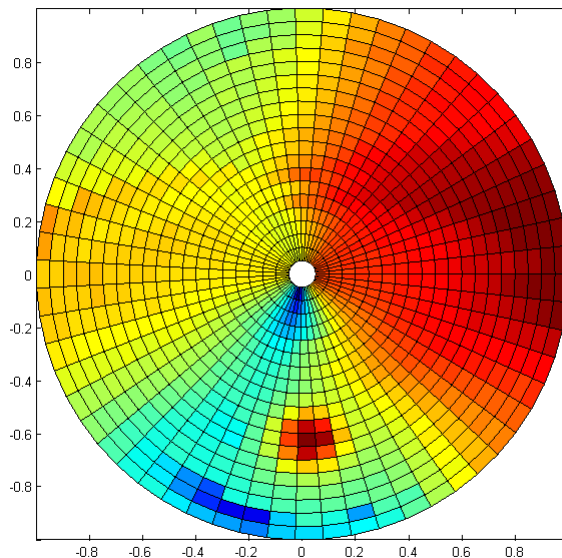
Se alimentó el sistema con una tensión alterna sinusoidal de 2 Vpp y se varió la frecuencia linealmente 5 veces entre 4 y 20 kHz, obteniéndose una inductancia de alrededor de  $L = 800\mu H$ .



**Figura 5.11:** Mediciones de la inductancia de retroalimentación

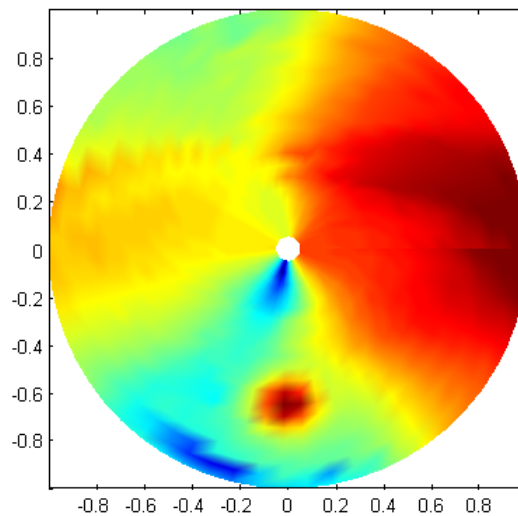
# 6 | RESULTADOS

En las figuras 6.1 y 6.2 se muestra los resultados de la medición de radiación difusa medida el día 20 de noviembre a las 17 horas en el techo del edificio principal del departamento de física, los resultados se encuentran en escala logarítmica.



**Figura 6.1:** Resultados de medición de radiación difusa

El sistema se configuro para que midiera cada 6 grados en el plano azimutal y cada 9 grados en el eje de elevación, alrededor de 1200 puntos.



**Figura 6.2:** Resultados de medición de radiación difusa suavizadas

En el resultado la pequeña zona roja en la parte de abajo corresponde al sol, mientras que la gran zona roja al lado derecho corresponde a radiación infrarroja proveniente de un edificio que se encuentra en las cercanías del lugar de medición.

## 7 | CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha logrado construir un detector de radiación difusa direccionable, que permite medir la distribución de intensidad de radiación proveniente desde diferentes direcciones del espacio. El detector permite dividir la bóveda celeste hasta en un máximo de 1024 por 400 direcciones posibles (el máximo de pasos por vuelta de los motores), midiendo en cada dirección un valor de corriente correspondiente a la intensidad luminosa incidente sobre el fotodiodo. La conversión a intensidad de radiación difusa puede obtenerse mediante calibración con una fuente de intensidad conocida y características espectrales similares a las de la luz natural diurna.

La lectura del fotodiodo no depende fuertemente de la temperatura, pero su compensación es importante cuando se desea medir pequeñas variaciones de intensidad luminosa que pueden ser comparables a las desviaciones producidas por cambios de temperatura. La caracterización térmica del detector, realizada como parte de este trabajo, permite realizar sin problemas la corrección de las lecturas mediante una rutina simple incorporada en el programa de análisis de datos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] *ESRI GIS software support on-line help system*. Sep. de 2010. URL: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/body.cfm?tocVisible=1&ID=4859&TopicNameCalculating%20solar%20radiation>.
- [2] Hemming S. Dueck T. Janse J. y Van Noort F. «The effect of diffuse light on crops». En: *International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management: Greensys2007* 801 (2008), págs. 1293-1300.
- [3] *Folleto Comercial SR11*. Sensovant, sep. de 2013. URL: <http://www.sensovant.com/productos/meteorologia/radiacion-solar/articulo/piranometro-clase-A-primera-clase-SR11.html>.
- [4] Steyaert M. Tavernier F. *High-Speed Optical Receivers with Integrated Photodiode in Nanoscale CMOS*, pág. 42.
- [5] Jaine Tsai. *Technical Data Sheet, 2,75 × 5,25 mm Silicon PIN Photodiode. PD638C*. Everlight Electronics Co., Ltd. Mayo de 2005. URL: <http://www.vtm.co.uk/PDF/Everlight/PD638C.pdf>.

- [6] Robot Gear. *Imagen: Motor paso a paso hibrido bipolar de 200 pasos*. Nov. de 2013. URL: <http://www.robotgear.com.au/Product.aspx/Details/459-Stepper-Motor-Bipolar-200-Steps-Rev-3-9V-600mA-180g-cm-torque>.
- [7] INC. AMS Advanced Micro System. *Stepper motor system basics (Rev.5/2010)*. Nov. de 2013. URL: <http://www.ams2000.com/pdf/step101.pdf>.