



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**TESIS**

**DESARROLLO DE UN DISCRIMINADOR DE  
CUERPOS CELESTES PARA ORIENTACIÓN  
DE UN SATÉLITE DE ÓRBITA GEO**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**PRESENTAN:**

**JORGE OSWALDO SANDOVAL TREJO  
Y  
JOSÉ GUSTAVO HERNÁNDEZ YEPES**

**DIRECTOR DE TESIS:  
ALBERTO ISRAEL HERRERA MARTÍNEZ**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, enero de 2016**



## Agradecimientos

A nuestros padres y familiares por su cariño, confianza, ejemplo y apoyo incondicional a lo largo de todos nuestros estudios.

A nuestros profesores, por compartir generosamente sus enseñanzas y experiencia, dedicando tiempo y esfuerzo siempre en beneficio de nuestro crecimiento.

A nuestros compañeros, por brindarnos su amistad en los momentos de alegría y ánimo para salir adelante en los momentos complicados.

A nuestra Universidad, por la excelente oportunidad de superarnos y concluir nuestros estudios.

A Dios.

*Oswaldo Sandoval Trejo*  
*Gustavo Hernández Yepes*  
Ciudad Universitaria, México  
Enero de 2016



# Contenido

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	7
1 INTRODUCCIÓN .....	9
1.1 OBJETIVOS .....	9
1.2 METODOLOGÍA UTILIZADA .....	9
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	9
1.4 ANTECEDENTES .....	10
1.4.1 <i>Las Comunicaciones Satelitales</i> .....	10
1.4.2 <i>Configuración de un Sistema de Comunicaciones por Satélite</i> .....	11
1.4.3 <i>Los satélites artificiales, sus características y sus órbitas</i> .....	11
2 ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE .....	15
2.1 MÉTODOS DE DETECCIÓN DE TIERRA EN LOS SATÉLITES GEOESTACIONARIOS .....	15
<i>Sensor de Tierra basado en MEMS</i> .....	15
<i>Sensor de Tierra basado en detector piroeléctrico infrarrojo</i> .....	16
<i>Sensor de Tierra basado en detector infrarrojo de termopilas</i> .....	18
2.2 ALCANCE Y CARACTERÍSTICAS DE LOS DETECTORES DE CUERPOS CELESTES .....	19
2.3 CONCLUSIONES .....	20
3 TARJETA ARDUINO UNO .....	21
3.1 CARACTERÍSTICAS DEL HARDWARE .....	21
3.2 ENTORNO DE TRABAJO E INTERFAZ DE DESARROLLO .....	22
3.3 APLICACIONES .....	24
3.4 CONCLUSIONES .....	26
4 PROPUESTA DEL DISPOSITIVO AUTOMATIZADO PARA LA DISCRIMINACIÓN DE CUERPOS CELESTES Y LA UBICACIÓN DE LA TIERRA .....	27
4.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN .....	27
4.2 DISEÑO DEL DISPOSITIVO .....	29
<i>Simulación de la Tierra</i> .....	30
<i>Simulación del Sol</i> .....	31
<i>Sensor fotoeléctrico</i> .....	32
4.3 FACTIBILIDAD DE DESARROLLO .....	34
<i>Simulación de cuerpos celestes</i> .....	34
<i>Sensores ópticos</i> .....	34
<i>Mecanismo de rotación en azimut y en elevación</i> .....	35
<i>Microcontrolador</i> .....	35
4.4 FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO .....	35
<i>Simulación de la Tierra</i> .....	35
<i>Simulación del Sol</i> .....	37
<i>Sensor óptico</i> .....	39
<i>Mecanismo de rotación en azimut y en elevación</i> .....	41
<i>Configuración eléctrica del sensor de Tierra</i> .....	43
<i>Algoritmo de funcionamiento y Diagrama de Bloques</i> .....	44

<i>Diagrama de flujo del código de Arduino</i> .....	50
<i>Código en lenguaje C del algoritmo</i> .....	63
4.5 CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO .....	68
4.6 CONCLUSIONES .....	71
5 RESULTADOS .....	73
5.1 PLANIFICACIÓN DEL ENTORNO DE PRUEBAS .....	73
• <i>Lugar de trabajo</i> .....	73
• <i>Fuentes de alimentación</i> .....	74
• <i>Configuración de hardware y software</i> .....	75
5.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO .....	75
5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	76
<i>Prueba #1:</i> .....	77
<i>Prueba #2:</i> .....	79
<i>Prueba #3:</i> .....	81
<i>Prueba #4:</i> .....	84
5.4 CONCLUSIONES .....	86
6 CONCLUSIONES GENERALES .....	87
7 REFERENCIAS .....	88
• CAPÍTULO 1.....	88
○ <i>Imágenes</i> .....	88
• CAPÍTULO 2.....	88
○ <i>Imágenes</i> .....	88
• CAPÍTULO 3.....	88
○ <i>Imágenes</i> .....	88
• CAPÍTULO 4.....	89
8 ANEXOS .....	89

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Esquema general de un sistema de comunicaciones por satélite.....	11
Ilustración 2: Dirección de los ejes roll, pitch y yaw. ....	12
Ilustración 3: Órbita de transferencia de un satélite geoestacionario.....	13
Ilustración 4: Tipos de órbitas para satélites.....	14
Ilustración 5: Principio de operación del sensor de Tierra basado en MEMS [K. Ghose] .....	16
Ilustración 6: Diagrama de operación del sensor de Tierra con sensor piroeléctrico [Kunio Nakamura et al.].....	17
Ilustración 7: Disco terrestre visto desde la órbita geoestacionaria con el sensor en correcta y en mala posición [Kunio Nakamura et al.].....	17
Ilustración 8: Esquema del telescopio infrarrojo [Kunio Nakamura et al.] .....	18
Ilustración 9: Diagrama del sensor de Tierra con detector óptico con termopilas [Falbel, Gerald]..	19
Ilustración 10: Tarjeta Arduino UNO .....	21
Ilustración 11: Microcontrolador ATmega328.....	22
Ilustración 12: Software Arduino.....	22
Ilustración 13: Interfaz IDE Arduino .....	23
Ilustración 14: Aplicación Sensor Temperatura/Ventilador .....	25
Ilustración 15: Diámetro aparente de la Tierra vista desde la órbita GEO.....	27
Ilustración 16: Representación general del principio de operación .....	29
Ilustración 17: Interacción entre los elementos del Sensor de Tierra .....	30
Ilustración 18: Relación del diámetro aparente de la Tierra y la distancia entre la simulación de Tierra y el fotodetector .....	31
Ilustración 19: Relación del diámetro aparente del Sol y la distancia entre la simulación del Sol y el fotodetector.....	32
Ilustración 20: Medidas del tubo discriminador con respecto a la simulación de la Tierra .....	33
Ilustración 21: Montaje de socket y tubo de aluminio en soporte de madera. ....	36
Ilustración 22: Diseño implementado de la Tierra .....	36
Ilustración 23: Diagrama de conexión de la Tierra con dimmer .....	37
Ilustración 24: Diseño final de la simulación del Sol.....	38
Ilustración 25: Diagrama de conexión de simulación de Sol con fuente de 12 V .....	38
Ilustración 26: Material interno reflejante contra material interno opaco (deseado) .....	39
Ilustración 27: Ensamble de fotorresistencia, tubo, soporte de servomotor y divisor de voltaje ....	40
Ilustración 28: Modelo de servomotor propuesto .....	41
Ilustración 29: Ensamble de servomotores .....	42
Ilustración 30: Diseño final del arreglo de servomotores con fotorresistencia .....	42
Ilustración 31: Movimientos del arreglo de servomotores .....	43
Ilustración 32: Configuración del Sensor de Tierra.....	44
Ilustración 33: Primeras tres acciones de operación del dispositivo. 1: lectura en elevación (0° - 180°), 2: desplazamiento en azimut sin lectura, 3: lectura en elevación (180° - 0°).....	45
Ilustración 34: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores al inicio del programa .....	45

Ilustración 35: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores después del primer barrido. Fotorresistencia apuntando a 180° .....	46
Ilustración 36: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores después de rotar 15°. Fotorresistencia apuntando a 195° .....	46
Ilustración 37: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores después del segundo barrido. Fotorresistencia apuntando a 15° .....	47
Ilustración 38: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores después de rotar 15°. Fotorresistencia apuntando a 30° .....	47
Ilustración 39: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores después del tercer barrido. Fotorresistencia apuntando a 210° .....	48
Ilustración 40: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores al inicio de la segunda etapa. Fotorresistencia apuntando a 0° y a la elevación en la que se encuentra la Tierra .....	49
Ilustración 41: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores después de hacer el recorrido de 0° a 180° en azimut por el lado derecho del círculo .....	49
Ilustración 42: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores. La fotorresistencia se coloca apuntando a 0° en azimut y en elevación a 180° menos la elevación original .....	50
Ilustración 43: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores. El motor de azimut se mueve de 0° a 180° de nuevo, pero con la fotorresistencia midiendo del lado contrario del círculo azul.....	50
Ilustración 44: Captura de pantalla de osciloscopio mostrando tren de pulsos para la posición 0° .	69
Ilustración 45: Captura de pantalla de osciloscopio mostrando tren de pulsos para la posición 180° .....	70
Ilustración 46: Lugar de trabajo aislado con únicas fuentes luminosas.....	73
Ilustración 47: Vista superior de la simulación de Tierra, Sol y Sensor de Tierra.....	74
Ilustración 48: Diseño de sistema de pruebas final: Tierra, Sol y Sensor de Tierra.....	75
Ilustración 49: Gráfica de mediciones de la primera prueba .....	77
Ilustración 50: Posición inicial del sensor .....	78
Ilustración 51: Posición donde la Tierra es ubicada después del barrido secundario.....	79
Ilustración 52: Gráfica de mediciones de la segunda prueba .....	79
Ilustración 53: Posición inicial del sensor en segunda prueba.....	81
Ilustración 54: Posición donde la Tierra es ubicada después del barrido secundario.....	81
Ilustración 55: Gráfica de mediciones de la tercera prueba .....	82
Ilustración 56: Posición inicial del sensor en tercera prueba .....	83
Ilustración 57: Posición donde la Tierra es ubicada después del barrido secundario.....	83
Ilustración 58: Gráfica de mediciones de la cuarta prueba .....	84
Ilustración 59: Posición inicial del sensor en cuarta prueba .....	85
Ilustración 60: Posición final en caso de que la Tierra no sea encontrada .....	85



# 1 Introducción

La utilización de diversas técnicas para la localización de la Tierra en satélites artificiales ha derivado en la existencia de una gran variedad de opciones en el diseño y fabricación de dispositivos. Entre estos dispositivos existen sensores de Sol, sensores de estrellas, sensores de Tierra, sensores de radiofrecuencia, giroscopios, magnetómetros, etc.

Como una alternativa a los dispositivos actuales, en esta propuesta se plantea el principio de operación, diseño y fabricación de un prototipo de Sensor de Tierra. Un Sensor de Tierra es un dispositivo montado en satélites artificiales, el cual aprovecha las características físicas del planeta Tierra para obtener su ubicación y poder orientar correctamente un satélite.

El dispositivo que se plantea debe ser capaz de obtener el apuntamiento del satélite hacia la Tierra, discriminando otros cuerpos celestes, con un bajo costo, de alta velocidad y operación automatizada.

Resultados esperados:

- Desarrollar el prototipo propuesto y demostrar la viabilidad del principio de operación.
- Obtener las características más importantes de dicho dispositivo y realizar una comparativa con los dispositivos existentes.
- Se espera que el desarrollo de este trabajo sea la base de una investigación futura de mayor alcance y como parte de un sistema completo de orientación satelital.

## 1.1 Objetivos

Adquisición de nuevos conocimientos en el área de los satélites de comunicaciones geostacionarios y de técnicas actuales de detección de cuerpos celestes.

Desarrollar un prototipo funcional para la obtención del apuntamiento de la Tierra y discriminador de Luna y Sol para un satélite de comunicaciones de órbita geostacionaria utilizando la plataforma Arduino.

## 1.2 Metodología utilizada

*Método Teórico:* en el planteamiento del problema, para conocer las características de los elementos eléctricos y electrónicos a utilizar, así como el lenguaje para el desarrollo de la programación del microcontrolador y para conocer las variables físicas de los cuerpos celestes para su identificación y discriminación.

*Método Práctico:* en el ensamblaje del dispositivo y las pruebas correspondientes.

## 1.3 Justificación

El desarrollo de los elementos que forman parte del subsistema de orientación de un satélite requiere una profunda investigación debido a que dichos elementos se encuentran siempre en constante desarrollo e innovación. La fabricación y pruebas correspondientes requieren de una elaborada metodología y análisis no trivial.

## 1.4 Antecedentes

### 1.4.1 Las Comunicaciones Satelitales

Las ondas electromagnéticas ocupadas como portadoras de información se comportan de forma tal que hacen posible la comunicación en una sola línea de vista. Lo anterior hace que la curvatura de la Tierra y accidentes geográficos limiten la distancia de las comunicaciones. Para establecer comunicaciones a larga distancia es necesaria la instalación de estaciones repetidoras o la utilización de la ionosfera para la reflexión de las ondas. Hace algunos años estas eran las únicas formas posibles para la comunicación a larga distancia. A partir de la invención de las comunicaciones satelitales es posible comunicar dos puntos en cualquier parte del mundo, cuya comunicación no es afectada por la ubicación de los puntos que se conectan o por la distancia que exista entre ellos.

Las dos principales ventajas de los satélites para las comunicaciones son:

1. Su amplia cobertura, que significa que pueden llegar a las zonas no rentables y poco accesibles para la prestación terrestre.
2. Su capacidad para instalar rápidamente nuevos servicios comparado con el despliegue de servicios terrestres.

Estas características no deben interpretarse como una competencia entre las comunicaciones satelitales y las comunicaciones por Tierra, sino como una oportunidad para que sean complementarias y sinérgicas.

En comparación con los sistemas terrestres, los satélites tienen limitaciones estrictas en cuanto a potencia y espectro asignado, lo que puede hacerlos menos atractivos en algunos escenarios. En esencia, tanto sistemas terrestres como satelitales pueden ser útiles para proporcionar comunicaciones con costos asequibles para el usuario, y la selección del sistema dependerá de sus necesidades.

Las comunicaciones satelitales proveen enlaces para comunicación a nivel mundial, por lo que es necesario optimizar el diseño y construcción de estos. Los recursos de un satélite se deben distribuir de manera correcta para satisfacer los requerimientos de las comunicaciones actuales. Se deben calcular los parámetros requeridos por un satélite y su base en Tierra, así como diseñar los subsistemas necesarios que se requieran.

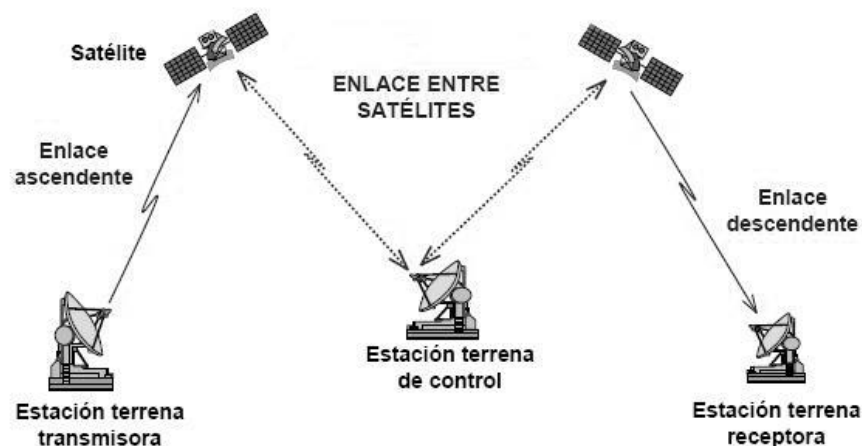
Los satélites incorporan diversas tecnologías, algunas viejas, algunas nuevas. Algunas tecnologías fueron desarrolladas específicamente para satélites, mientras que otras fueron desarrolladas en paralelo con otros usos. Las tecnologías de microondas fueron desarrolladas para uso de radar militar y después fueron mejorando para satélites. Las antenas parabólicas no eran un nuevo desarrollo pero las antenas satelitales las trajeron a la atención pública. Celdas solares eficientes y baterías de níquel-hidrógeno fueron desarrolladas específicamente para cubrir las necesidades de las comunicaciones satelitales, entre muchos otros desarrollos.

### 1.4.2 Configuración de un Sistema de Comunicaciones por Satélite

Un sistema de comunicaciones vía satélite consta de varios elementos o segmentos. La aplicación particular encomendada a un sistema satelital, por ejemplo servicio fijo por satélite, servicio móvil o servicio de difusión, determinará los elementos específicos del sistema.

Un sistema satelital básico o genérico consiste de uno o más satélites en el espacio, retransmitiendo información entre usuarios a través de las terminales en Tierra (ilustración 1). Los satélites son controlados desde Tierra mediante una estación de control en Tierra, comúnmente llamado Centro de Control Maestro (MCC por sus siglas en inglés Master Control Center) los cuales miden varios parámetros como rastreo, telemetría y comando, y además monitorean todos los subsistemas del satélite.

Un sistema de comunicaciones por satélite generalmente está compuesto por un segmento espacial y un segmento terrestre, aunque también se pueden considerar otras clasificaciones. El segmento espacial consta de uno o más satélites organizados en una constelación y de las instalaciones terrenas de control necesarias para mantener la correcta operación de los satélites. El segmento de Tierra consta de todas las estaciones terrenas o terminales receptoras y transmisoras y del equipo que se conecta con las redes de los usuarios.



*Ilustración 1: Esquema general de un sistema de comunicaciones por satélite*

### 1.4.3 Los satélites artificiales, sus características y sus órbitas

En la actualidad existen diferentes tipos de satélites, tales como satélites científicos, experimentales, militares, de navegación, meteorológicos, de telecomunicaciones, de radioaficionados, etc. Debido a las diferentes funciones que pueden llevar a cabo los satélites, los subsistemas de los que se componen varían ampliamente, sin embargo pueden ser clasificados de forma general según su función: bus o plataforma y carga útil.

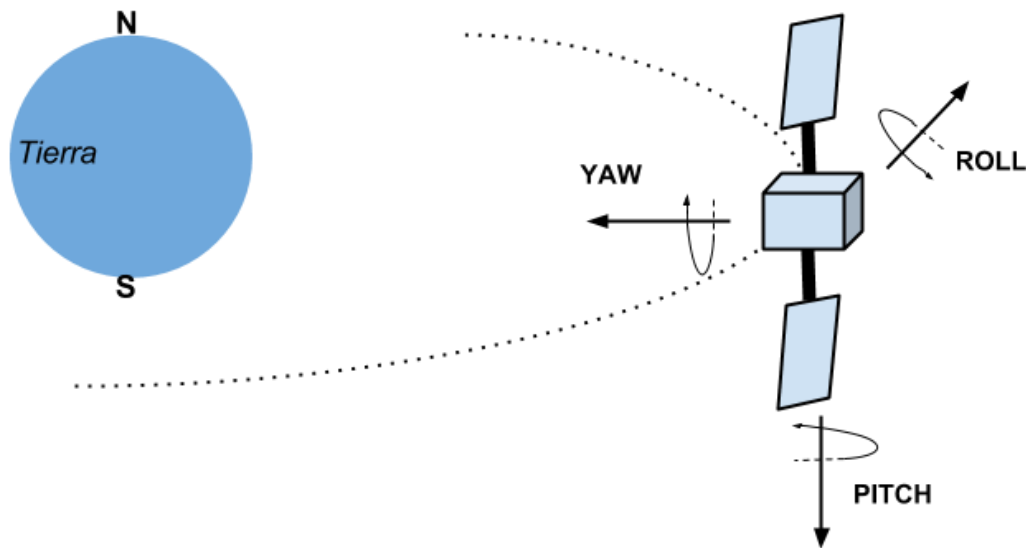
El bus o plataforma se refiere a la estructura básica de un satélite y de los subsistemas que soporta. Los subsistemas del bus del satélite son: estructura física, subsistema de potencia, subsistema de posición y control orbital, subsistema de control térmico y subsistema de telemetría y comando.

La carga útil en un satélite de comunicaciones consta de todo el equipo electrónico de comunicaciones que transmite y recibe las señales de subida y de bajada desde la Tierra. La carga útil se puede dividir en el subsistema de transpondedores y subsistema de antenas.

#### *Ejes de rotación de un satélite*

Para el buen funcionamiento de un satélite, es fundamental mantener la estabilidad. Para lograrlo se utiliza un sistema de coordenadas locales con origen en el centro de masa del satélite. Los ejes que lo componen se muestran en la ilustración 2.

El eje Yaw (guiñada) apunta hacia el centro de la Tierra, el eje Pitch (cabeceo) es un eje normal al plano orbital que apunta hacia el sur y el eje Roll (balanceo) se encuentra en el plano orbital y es perpendicular al eje Yaw.

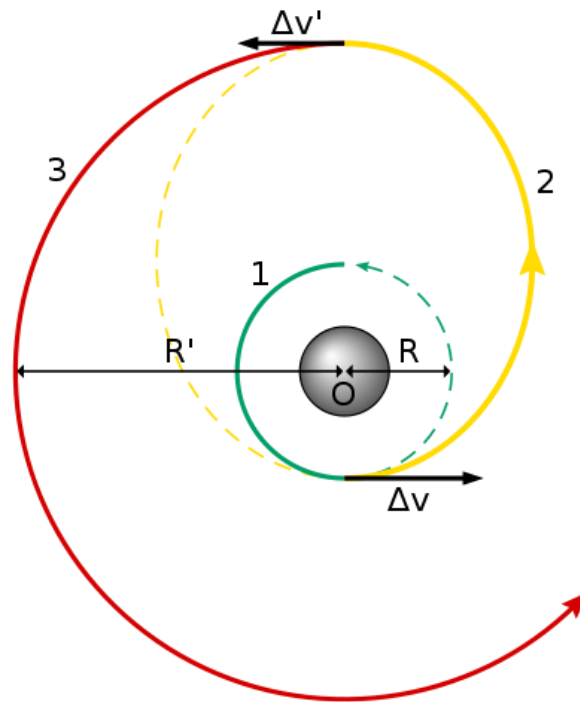


*Ilustración 2: Dirección de los ejes roll, pitch y yaw.*

#### *Puesta en órbita de un satélite*

Una órbita es la trayectoria seguida por un satélite. La puesta en órbita de un satélite consiste en posicionarlo en su órbita nominal desde un lugar de lanzamiento en la superficie de la Tierra. Un vehículo de lanzamiento, apoyado por sistemas de propulsión auxiliares, se usa para introducir al satélite a una órbita intermedia llamada Órbita de Transferencia, también llamada órbita de Hohmann (Máral y Bousquet). Esta órbita permite al satélite moverse de una órbita baja a una órbita superior con un gasto mínimo de energía.

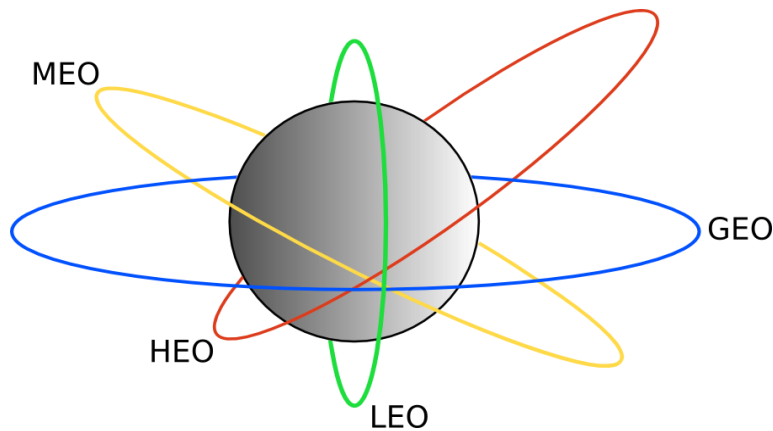
El primer incremento de velocidad  $\Delta v$  cambia la altitud de la órbita baja (órbita 1 en la ilustración 3) a una órbita de transferencia elíptica (órbita 2 en la ilustración 3), cuyo perigeo tiene la altitud de la órbita baja y cuyo apogeo depende del incremento de velocidad. El segundo incremento de velocidad  $\Delta v'$  en el apogeo de la órbita de transferencia permite al satélite adquirir una órbita circular (órbita 3 en la ilustración 3) a la altura del apogeo.



*Ilustración 3: Órbita de transferencia de un satélite geostacionario*

#### *Clasificación de órbitas satelitales*

La trayectoria se forma dentro de un plano en forma de una elipse, con una extensión máxima en el apogeo y una extensión mínima en el perigeo o una circunferencia. La velocidad de un satélite es inversamente proporcional a la distancia que se encuentra de la Tierra.



*Ilustración 4: Tipos de órbitas para satélites*

- **Órbita Baja (Low Earth Orbit, LEO)**

Es la segunda órbita más común, es circular de 80 km a 2,000 km por encima de la Tierra. El retraso en la señal es bajo (~10 ms), sin embargo el satélite se mueve a través del cielo, y la estación terrestre debe rastrear activamente al satélite para mantener las comunicaciones. Se utiliza generalmente para observación, meteorología y radioaficionados.

- **Órbita Media (Medium Earth Orbit, MEO)**

Esta órbita es similar a la LEO, sin embargo el satélite está en una órbita circular superior de 2,000 km a 35,786 km. Es una órbita popular para los satélites de navegación, tales como la constelación GPS. El retraso en la señal de estos sistemas es alrededor de 100 ms.

- **Órbita Geoestacionaria (Geostationary Earth Orbit, GEO)**

Es la órbita más popular utilizada por los satélites de comunicaciones. Un satélite GEO se encuentra en una órbita circular en el plano ecuatorial, a una distancia nominal respecto a la superficie de la Tierra de 35,786 km en un punto estable, que mantiene al satélite en una ubicación fija en el cielo. Esta es una gran ventaja para las comunicaciones por satélite, debido a que la dirección de apuntamiento permanece fija en el espacio y la antena de Tierra no tiene que realizar un seguimiento de un satélite en movimiento. Una desventaja de los satélites GEO es el tiempo de retardo de la señal (~ 260 ms), que puede afectar la sincronización de la red o impactar en las comunicaciones de voz.

- **Órbita Alta (High Earth Orbit, HEO)**

Esta es la única órbita no circular de los cuatro tipos. Funciona con una órbita elíptica, con una altitud máxima (apogeo) similar a la órbita geoestacionaria, y una altura mínima (perigeo) similar a las órbitas bajas. Este tipo de órbitas es utilizado para aplicaciones especiales donde se requiere la cobertura de los lugares de latitudes altas. El retraso en estos sistemas varía de 10 a 260 ms.

## 2 Análisis del Estado del Arte

### 2.1 Métodos de detección de Tierra en los satélites geoestacionarios

La orientación de un satélite con respecto a la Tierra es vital para las comunicaciones satelitales. A su vez la Tierra es la referencia más importante para los satélites, por lo que los sensores de Tierra se utilizan generalmente en conjunto con sensores de Sol o estrellas para poder apuntar correctamente al planeta.

#### Sensor de Tierra basado en MEMS

Estos tipos de sensores están basados en MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) y directamente miden el gradiente de la gravedad con el fin de detectar la orientación relativa de un satélite con respecto a la Tierra. El sensor de Tierra proporciona a un satélite en órbita un vector hacia el centro de la Tierra.

Estos sistemas más ligeros y compactos, utilizan un método novedoso para determinar el vector de Tierra midiendo el par inducido en un cuerpo alargado debido al gradiente de la gravedad.

La fuerza gravitacional es proporcional al inverso del cuadrado de la distancia al centro de la Tierra. Las partes de un objeto gravitatorio alrededor de la Tierra tienen ligeramente diferentes distancias al centro de la Tierra y por lo tanto son sujetas a pequeñas diferencias en la fuerza gravitacional que se ejerce sobre ellas. Esto resulta en un par de fuerzas alrededor del eje de momento de inercia máximo.

Para un satélite en órbita, estas diferencias son pequeñas, pero ya han sido utilizadas para estabilizar la orientación de pequeños satélites con respecto a la Tierra. El satélite termina con su eje de momento mínimo de inercia señalando normalmente a la superficie de la Tierra. Debido al par de fuerza de la gravedad, un péndulo adecuado al satélite se moverá en relación al resto del satélite dependiendo de la orientación del satélite con respecto al vector normal a la Tierra. Mediante la detección del movimiento de este péndulo, el vector hacia la Tierra puede ser calculado.

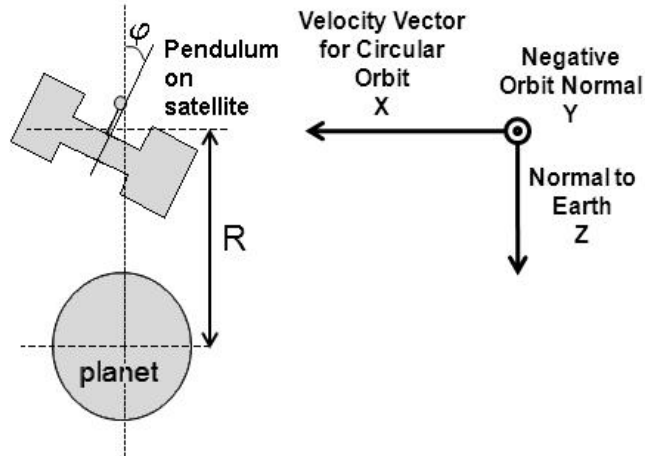


Ilustración 5: Principio de operación del sensor de Tierra basado en MEMS [K. Ghose]

### Sensor de Tierra basado en detector piroeléctrico infrarrojo

La apariencia visual de la Tierra está influenciada por la radiación solar. Con el fin de observar la Tierra como una esfera sin la influencia del Sol, se observa la radiación infrarroja de la Tierra utilizando los sensores de la Tierra.

Este tipo de sensores de Tierra utiliza detectores de infrarrojos que han sido desarrollados para satélites estabilizados en tres ejes. Los detectores tienen un par de sensores infrarrojos, cada uno de los cuales está hecho de un material piroeléctrico, los cuales están montados en una lente de inmersión.

Algunos están compuestos por una hoja de cerámica de titanato de plomo y algunos otros por una película epitaxial de titanato de plomo modificado con calcio.

El sensor de Tierra de consiste en cuatro módulos básicos: un espejo de exploración, un telescopio infrarrojo que contiene una lente de objetivo y algún tipo de detector infrarrojo, un procesador analógico de señales y un procesador digital de señales (ilustración 6).



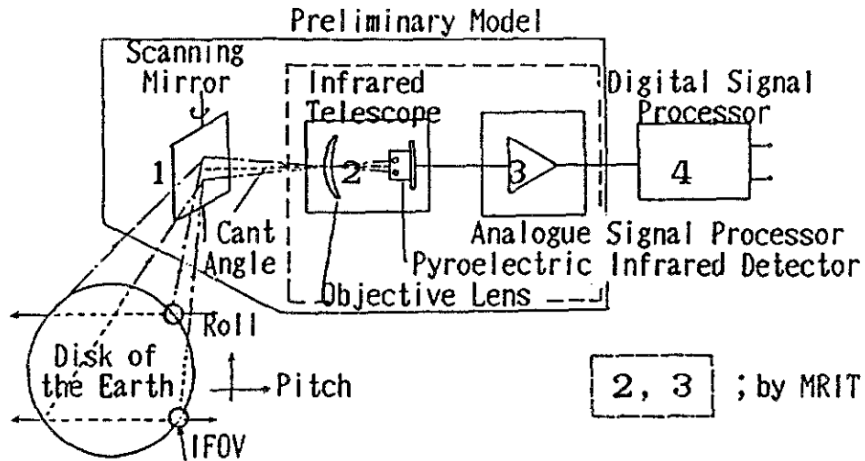


Ilustración 6: Diagrama de operación del sensor de Tierra con sensor piroeléctrico [Kunio Nakamura et al.]

Como la Tierra es un objetivo extendido, los sensores de Tierra están diseñados para localizar el horizonte de la Tierra con el fin de determinar la orientación del satélite hacia la Tierra. La posición del satélite con respecto a la Tierra está determinada por los ángulos de error en roll y pitch, como se puede observar en la ilustración 7. Cuando la orientación del satélite hacia la Tierra es la correcta, los errores en roll y pitch son cero.

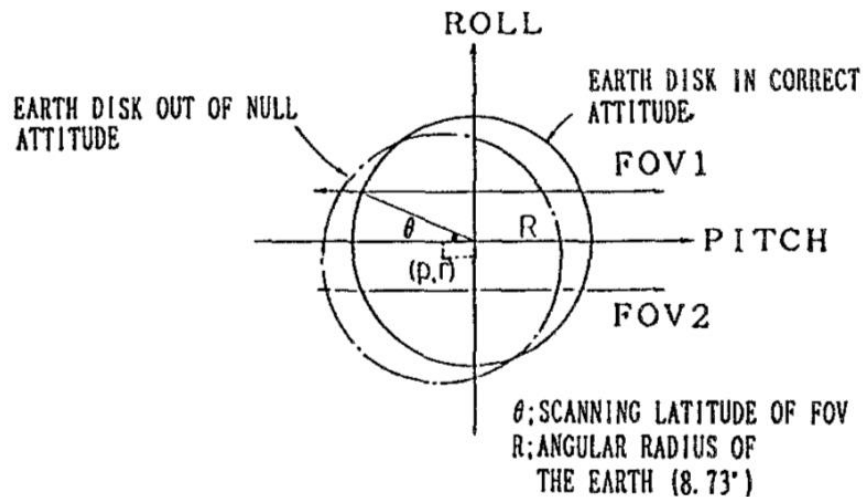
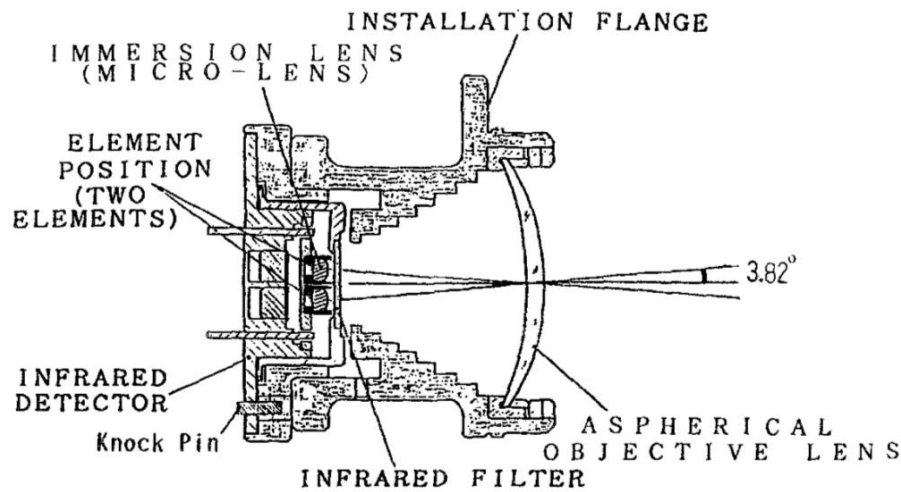


Ilustración 7: Disco terrestre visto desde la órbita geostacionaria con el sensor en correcta y en mala posición [Kunio Nakamura et al.]

En este tipo de sensor óptico, el detector infrarrojo dentro del telescopio infrarrojo es el módulo que determina el desempeño del sensor de Tierra. El telescopio infrarrojo (ilustración 8) consiste esencialmente en un objetivo de germanio y el detector infrarrojo compuesto de dos elementos.



*Ilustración 8: Esquema del telescopio infrarrojo [Kunio Nakamura et al.]*

#### Sensor de Tierra basado en detector infrarrojo de termopilas

Los sensores de Tierra actuales utilizan métodos ópticos para determinar el vector de la Tierra mediante la detección de la emisión de rayos infrarrojos de la Tierra. Esto requiere accesos ópticos en múltiples caras del satélite.

El sensor de Tierra está compuesto de cuatro detectores ópticos de termopilas, con un campo de visión de 20° por 20° a través de una ventana óptica de 12  $\mu\text{m}$ .

Este es un sensor de menos de 2.5 pulgadas cúbicas y menos de 100 g que provee una medición en un eje de  $\pm 1^\circ$  para altitudes de órbita terrestre por debajo de los 800 km y a más de 800 km de altitud de órbita, puede proporcionar una lectura en dos ejes con la misma o mejor exactitud.

Estos bajos volúmenes, pesos y los costos se logran mediante el uso de la computadora de la nave espacial para implementar un algoritmo que compensa la radiación infrarroja del horizonte de la Tierra en cada temporada.

Se pueden alcanzar mejoras en la precisión de  $\pm 1^\circ$  mediante la integración de un sensor de Sol de dos ejes.

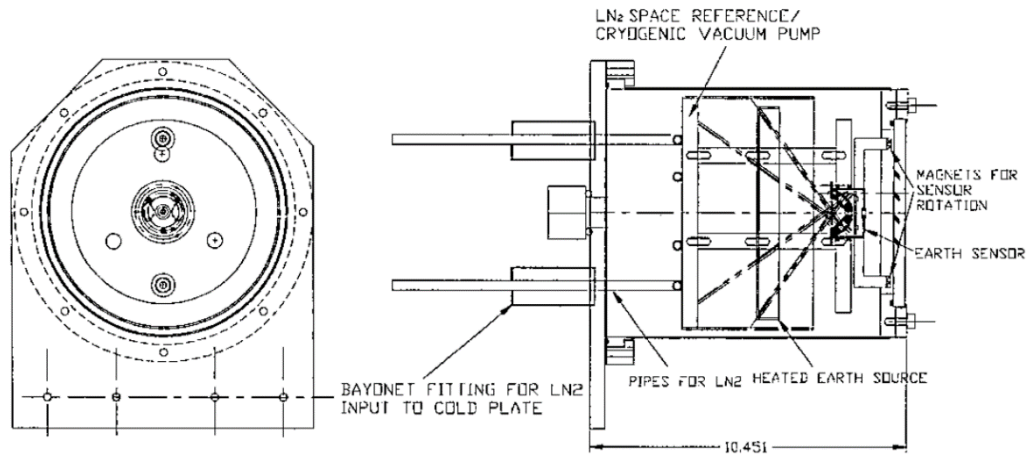


Ilustración 9: Diagrama del sensor de Tierra con detector óptico con termopilas [Falbel, Gerald]

## 2.2 Alcance y características de los detectores de cuerpos celestes

Actualmente los sensores de Tierra tienen diferentes acercamientos para cumplir con un mismo objetivo, que es detectar la ubicación de la Tierra.

De la investigación realizada de los sensores de Tierra disponibles actualmente, se pueden destacar las siguientes características

- Dispositivos con alta precisión.
- Dispositivos confiables.
- Dispositivos complejos.
- Dispositivos costosos.

A partir de este análisis se propone desarrollar un sensor de Tierra que cumpla las siguientes características:

- Bajo costo
- Bajo tiempo de respuesta en operación
- Principio de operación simple
- Confiable
- Alta precisión
- Alta exactitud para mediciones burdas
- Resolución de 1° como máximo

### 2.3 Conclusiones

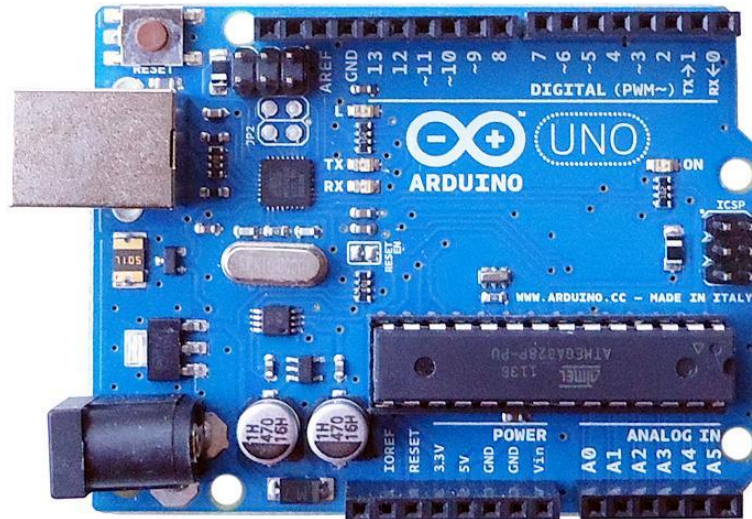
En este capítulo se describieron diferentes Sensores de Tierra, los cuales tienen diferentes principios de operación, cada uno con sus ventajas y desventajas, ofrecen diferentes formas de lograr un mismo objetivo.

En este trabajo de tesis se propone un dispositivo con un principio de operación simple pero diferente a los analizados en la revisión del estado del arte y que reúna las características necesarias para operar de forma satisfactoria como método de detección de Tierra con resultados similares a los métodos revisados en este capítulo.

## 3 Tarjeta Arduino Uno

Con la finalidad de mantener el control del dispositivo utilizado como discriminador de cuerpos celestes, se analizan las características de la tarjeta Arduino Uno. Se analiza dicha tarjeta debido a que su microcontrolador es de fácil operación y posee un amistoso entorno de programación basado en C++ simplificado.

### 3.1 Características del hardware

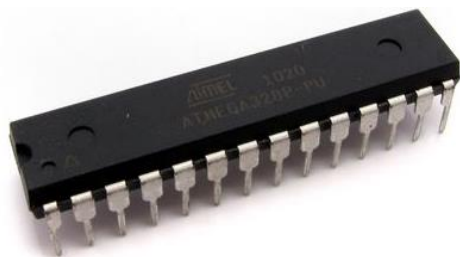


*Ilustración 10: Tarjeta Arduino UNO*

Arduino UNO R3 es una tarjeta para desarrollo de proyectos de electrónica, basada en el microcontrolador ATmega328. La Tarjeta está constituida por 14 pines digitales usados como entrada o salida; estos pines operan con estados altos y bajo (0 y 1). Cada pin opera a 5 V y puede proveer o recibir un máximo de 40 mA, contienen una resistencia interna pull-up de 20 K $\Omega$ . Cuenta también con 6 pines para entradas analógicas, los cuales proveen una resolución de 10 bits, es decir que presenta valores decimales de 0 a 1023; estos pines son únicamente para lecturas. También tiene un reloj de 16 MHz, conexión USB, conector jack para alimentación externa, ICSP (In-Circuit Serial programming), un botón de reset y los elementos necesarios para la operación del microcontrolador.

Para proporcionar alimentación a la tarjeta es requerida una conexión a una computadora por medio de un cable USB o con una fuente externa, esta puede ser conectada al pin de voltaje de entrada (Vin) ubicado en la tarjeta y la respectiva conexión a Tierra en alguno de los pines de tierra (Gnd) o también se puede conectar un adaptador o eliminador de DC al conector jack que tiene integrado la tarjeta. Cuando se ocupa una fuente de alimentación externa, el voltaje de alimentación recomendado por el fabricante para obtener un funcionamiento adecuado y no provocar daños a la tarjeta es de un rango de 7 a 12 V.

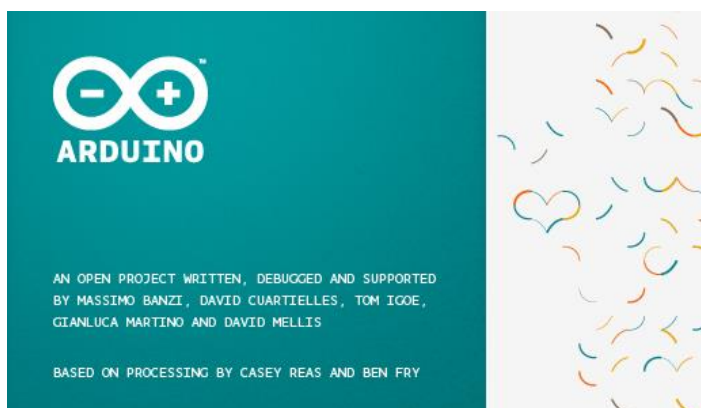
El microcontrolador ATmega328 tiene una capacidad de memoria de 32 KB de los cuales 0.5 KB son empleados para el bootloader. También tiene memoria SRAM de 2 KB y memoria EEPROM de 1 KB.



*Ilustración 11: Microcontrolador ATmega328.*

La tarjeta Arduino tiene la capacidad de establecer comunicación con una computadora, otra tarjeta Arduino UNO u otros microcontroladores. La manera para establecer comunicación entre estos dispositivos y la tarjeta es empleando la comunicación serial UART TTL que provee el microcontrolador ATmega328, la cual está disponible en los pines digitales de la tarjeta 0 (Rx) y 1 (Tx) conectados a los respectivos pines del microcontrolador. El par de leds de montaje superficial con etiquetas TX y RX incluidos en la tarjeta encenderán cuando los datos sean transmitidos y recibidos vía USB al chip serial y USB a la computadora. La tarjeta también incluye otro circuito integrado llamado ATmega16U2 el cual está encargado de “Canalizar” la comunicación serial vía USB; este aparece como un puerto COM virtual en el software de la computadora. El firmware del ATmega16U2 emplea los drivers COM USB estándar, lo que no requiere drivers externos. Sin embargo para Windows se requiere de un “archivo.inf” el cual requiere de una serie de pasos para completar la instalación y que la comunicación con la tarjeta funcione correctamente.

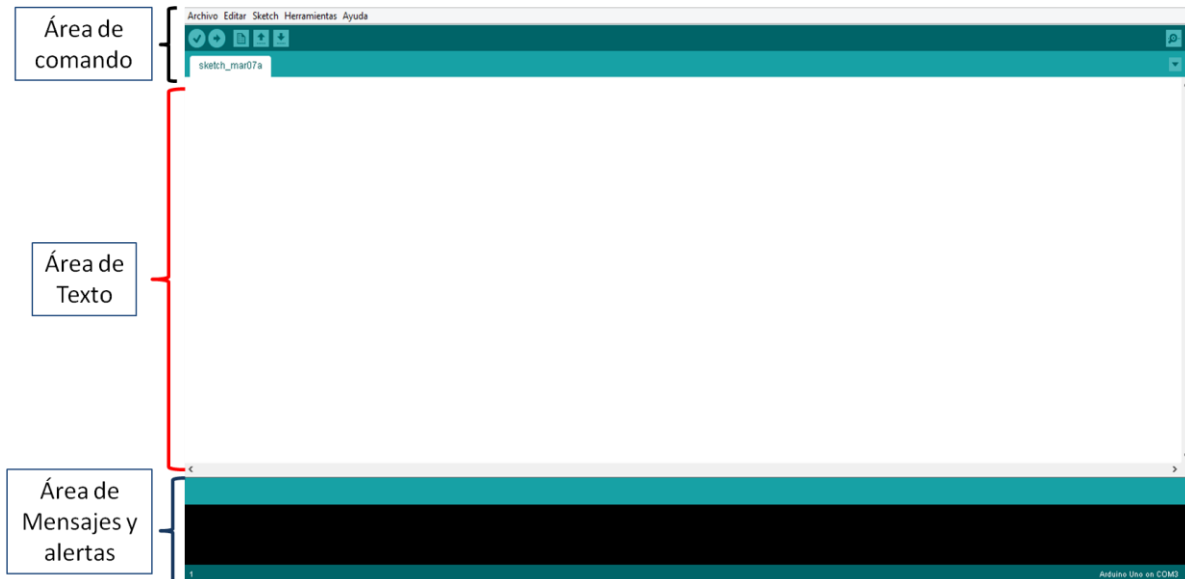
### 3.2 Entorno de trabajo e interfaz de desarrollo



*Ilustración 12: Software Arduino*

La tarjeta Arduino UNO, específicamente el microcontrolador ATmega328, requiere ser programado para poder realizar alguna función, esto es logrado mediante el software “Arduino IDE” (Arduino Integrated Development Environment) instalado en una computadora conectada vía

USB a la tarjeta. El software Arduino se presenta al usuario como una interfaz similar a un editor de texto para la escritura del programa que será cargado al microcontrolador.



*Ilustración 13: Interfaz IDE Arduino*

La interfaz IDE de Arduino es como se muestra en la ilustración 13 de la que se pueden ver algunos de los botones y pestañas mencionadas anteriormente.

Se compone de tres partes:

1.- Área de comando:

Controles sencillos como un botón para compilar el programa verificando que no existan errores de sintaxis, variables sin declarar, etc. Un botón para cargar el programa al microcontrolador y pestañas en la parte superior que contienen las librerías que tiene el software por default al descargarlo de la página arduino.cc, algunos ejemplos simples para comenzar a conocer las capacidades y funciones de la tarjeta, así como ayuda, guardar y abrir archivos que contengan códigos para cargar al microcontrolador. También incluye el acceso al monitor serial para observar los datos recibidos o enviados al microcontrolador.

2.- Área de Texto:

Para esta parte de la interfaz se tiene un espacio grande para poder escribir todo el código del programa que se cargará al microcontrolador conteniendo las funciones necesarias para su inicialización:

- a. Función setup: se inicializa la velocidad de transmisión entre computadora y el microcontrolador.

- b. Función loop: Este es un ciclo por default en donde se ejecutarán las instrucciones principales del programa, es un ciclo infinito que se puede interrumpir sólo por instrucción de una línea de código o mediante el manejo de interrupciones, en caso contrario, el código escrito en esta sección se mantendrá repitiendo todo el tiempo.

### 3.- Área de Mensajes y alertas:

Es la parte inferior de la ventana de la interfaz. En esta parte se despliegan los mensajes de error al compilar el código, mensajes del estado de memoria del microcontrolador, tamaño en bytes del código del programa, puerto COM donde se encuentra conectada la tarjeta.

El software de Arduino incluye un monitor serial el cual permite visualizar de manera simple los datos en forma de texto y que son enviados hacia y desde la tarjeta Arduino. Los datos son representados de manera decimal con un valor de 0 a 1023 lo que equivale a un rango de voltaje de referencia de 0 a 5 V por default. Arduino representa estos valores dependiendo de la lectura que esté tomando en sus entradas analógicas. Se debe considerar qué tipo de sensor se emplea y las fuentes de alimentación externas.

El microcontrolador en la tarjeta Arduino UNO tiene precargado de fábrica con un bootloader que permite que el código de un programa escrito en el software Arduino pueda ser cargado, por lo que no es necesario ningún programador externo. El bootloader puede ser transferido a otro microcontrolador a través del pin ISCP (In Circuit Serial Programming) y usando la librería Arduino ISP y siguiendo una serie de Instrucciones.

### 3.3 Aplicaciones

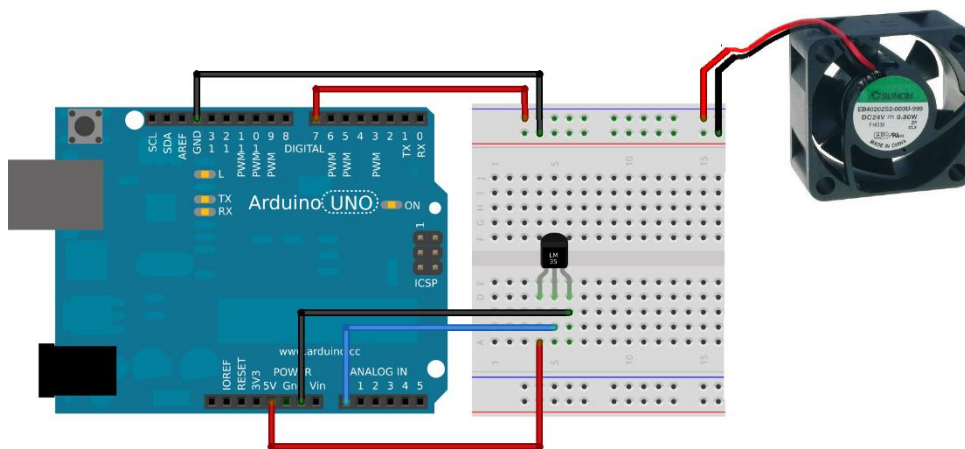
La tarjeta Arduino es empleada para diversos proyectos de electrónica, una de las principales aplicaciones es el control de dispositivos electromecánicos a pequeña escala, como lo son los motores de DC y servomotores, esto puede ser empleado para el control y manejo de brazos mecánicos, que pueden ser prototipo de una prótesis o tener una aplicación en la industria, por ejemplo en industrias armadoras y manufactureras de diversos productos. También pueden construirse prototipos de vehículos o carros a pequeña y mediana escala, controlados mediante la tarjeta, ya sea de manera autónoma o de manera remota operada por una persona. Esto va desde la construcción de prototipos básicos que operen de manera autónoma bajo una secuencia previamente programada hasta un vehículo autónomo que opere con sensores de para detección y evasión de obstáculos, o que encuentren la salida de un sitio. Estos ejemplos son parte del campo de la robótica y mecatrónica, donde existe una gran variedad de proyectos que pueden conjuntar las funciones antes mencionadas para alcanzar un objetivo en común.

Otra aplicación básica de la tarjeta Arduino es emplearlo en combinación con una gran variedad de sensores para la medición de sus respectivos parámetros, los cuales pueden ser de luminosidad, humedad, temperatura, presión atmosférica, obtención de coordenadas geográficas mediante



sistema de posicionamiento global (GPS), detección de diferentes tipos de gas, detección de algunos compuestos suspendidos en el aire como el alcohol, detectores de movimiento, detectores de proximidad, detectores de humo, giroscopios, acelerómetros, entre otros. La gran variedad de sensores permite ocupar la tarjeta Arduino de diferentes maneras y combinaciones ya que puede dedicarse a detectar diferentes parámetros con una sola tarjeta y realizar la acción que corresponda según la aplicación.

Un ejemplo sencillo de esto puede ser un sistema de enfriamiento (ilustración 14) midiendo con un sensor de temperatura y programado para que cuando algún componente alcance cierta temperatura, la misma tarjeta active un ventilador u otro método de enfriamiento para bajar la temperatura del componente.



*Ilustración 14: Aplicación Sensor Temperatura/Ventilador*

Otra aplicación importante y relativamente nueva es el área de domótica. La domótica es un conjunto de sistemas que logran la automatización de un inmueble o vivienda, esta automatización se puede realizar de manera parcial o prácticamente total. La domótica se puede implementar con diferentes tecnologías, una de ellas es Arduino, en conjunto con unos accesorios o módulos denominados shields. Los principales shields empleados para la comunicación son:

*Shield GSM/GPRS:* Este shield requiere una tarjeta SIM de alguna compañía de telefonía móvil, el módulo funciona para poder realizar y recibir llamadas telefónicas, enviar y recibir SMS y con la función de GPRS también se pueden enviar y recibir datos (internet por telefonía) a bajo costo aunque no con una velocidad tan alta. Este shield es útil para aplicaciones móviles como lo es poder transmitir las coordenadas que se obtienen de un GPS conectado al Arduino y lograr así la ubicación de algún objeto o individuo.

*Shield WiFi:* Este shield es útil en la rama de la domótica ya que permite la conexión de la tarjeta Arduino a una red de área local (LAN) y/o a Internet. De esta manera se pueden controlar y monitorear de manera remota los diversos sensores colocados en la vivienda, y dependiendo de las necesidades se puede iniciar/detener la operación de algún sistema por ejemplo, el sistema de

clima en la vivienda para colocar la temperatura deseada en una habitación antes de ingresar a esta. Activar la iluminación de manera remota ya sea fuera de casa o dentro de la misma vía la LAN.

*Shield Ethernet:* Es similar al shield WiFi en cuanto a la función, con la excepción que este debe estar conectado mediante cable UTP para red con conector RJ45 y conectado a la red de área local (LAN), por lo tanto este shield tiene la desventaja de que no puede ser móvil o no podrá ser reubicado fácilmente ya que se tendría que mover la conexión del cable UTP.

*Shield Bluetooth:* Este shield es útil para aplicaciones a corta distancia empleando el protocolo de comunicación Bluetooth y en redes pequeñas. En domótica puede ser empleado para transferencia de archivos, audio, entre otros; para comunicación con equipos móviles como celulares que cuenten con bluetooth.

*Shield Xbee:* Este shield es similar a bluetooth en cuanto al tipo de red, pero este tipo de tecnología usa un protocolo distinto y tiene la ventaja que se puede tener un alcance mayor.

*Shield NFC/RFID:* Este shield funciona con la tecnología NFC (Near Field Communications) y otro shield con el RFID (Radio Frequency Identification), ambos usan un identificador externo que puede ser una tarjeta con chip integrado para ser leído magnéticamente, y con ello obtener una autenticación de la identidad de una persona, un objeto o animal que proporcione, por ejemplo: el acceso a la vivienda. Se puede registrar la hora de llegada, acceso que ocupó e incluso en qué parte de la vivienda se encuentra.

### 3.4 Conclusiones

La tarjeta Arduino es una herramienta de fácil manejo para la implementación de proyectos y aún con su fácil manejo se pueden implementar proyectos de gran complejidad. Existe una gran variedad de aplicaciones, las cuales pueden ser combinadas en diferentes formas y además tener diferentes objetivos.

Se investigaron las capacidades y características de la plataforma Arduino y se encontró que cumple con los requerimientos para su utilización en la planeación del proyecto del discriminador de cuerpos celestes por su facilidad de operación, economía, soporte y flexibilidad.

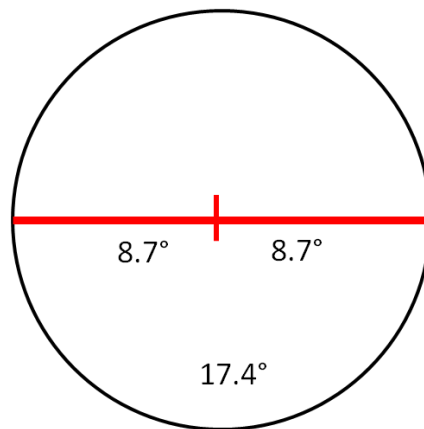
## 4 Propuesta del dispositivo automatizado para la discriminación de cuerpos celestes y la ubicación de la Tierra

### 4.1 Principio de operación

El principio de operación de este dispositivo se basa en la medición de la luminosidad en el entorno a través de barridos en azimut y en elevación por medio de un fotodetector. El microcontrolador utilizado detecta la luminosidad y la procesa tomando en cuenta dos parámetros:

a. *Intensidad luminosa*: Para detectar la Tierra, primero se toma en cuenta el rango predefinido de valores que simulan la luminosidad que refleja la Tierra, medida desde un satélite geoestacionario. Una medición fuera de este rango, ya sea inferior o superior, no se toma en cuenta para la detección de la Tierra porque corresponde a un cuerpo celeste distinto u otros factores.

b. *Número de mediciones contiguas*: Es necesario tomar en cuenta también el número de mediciones contiguas con luminosidad dentro de los umbrales para ser considerada como la Tierra, debido a que este parámetro nos indicará el diámetro del cuerpo medido y es único para la Tierra desde la órbita geoestacionaria. El diámetro aparente de la Tierra visto desde una órbita geoestacionaria se puede representar como un ángulo de  $17.4^\circ$  (Iida et al.) como se muestra en la ilustración 15. Para detectar la Tierra, se considerará un cierto número de muestras contiguas dentro de los umbrales de luminosidad de la Tierra, suficientes para considerar correcta la detección desde un satélite geoestacionario.



*Ilustración 15: Diámetro aparente de la Tierra vista desde la órbita GEO.*

Ambos parámetros servirán como entradas a la lógica del algoritmo de operación del dispositivo. Con estos datos se procede a analizar y plantear la secuencia de acciones para operar el dispositivo

Acciones de operación del dispositivo:

1. Se muestrea la luminosidad del entorno en un rango de “media esfera” desde el punto de vista del satélite, mediante mediciones a lo largo de un eje de elevación con recorridos de

180°, al terminar cada recorrido se realizará un corrimiento en azimut sin tomar mediciones, cuya magnitud será definida durante el desarrollo del acoplador del sensor luminoso, teniendo cuidado de no dejar huecos sin medir. El dispositivo verificará cada muestra para determinar si está dentro del umbral de luminosidad preestablecido para la Tierra. En caso de que el valor leído se encuentre dentro de este rango de iluminación, se guardará la posición (elevación y azimut) en la que se tomó la lectura y se llevará un conteo del número de muestras contiguas que cumplen esta condición para verificar que el tamaño del cuerpo que se mide sea el de la Tierra, esto se logra verificando que los valores consecutivos registren los 17.4° de diámetro aparente de la Tierra. En caso de detectar la Tierra durante un barrido de elevación, no forzosamente su centro, en los pasos siguientes se realizarán barridos en azimut tomando sus respectivas muestras en el punto fijo de elevación donde se detectó la Tierra.

2. Si se obtienen las mediciones esperadas para ubicar la Tierra dentro de un barrido en elevación, se detiene esta etapa y el sensor apunta a la posición calculada para el centro de la Tierra y el microcontrolador entrega los datos de azimut y elevación del centro de la Tierra.
3. Después de conocer la primera aproximación de la ubicación de la Tierra, se dará paso a ubicarla con mayor exactitud, mediante barridos en azimut con el motor de elevación fijo apuntando a la posición más cercana al centro donde se detectó la Tierra. Después del barrido de 180° en azimut, el motor de elevación se colocará en el complemento de su ubicación original (180° menos la elevación original) y se realizará otro barrido en azimut de tal forma que se podrán completar las mediciones para cubrir una circunferencia imaginaria de 360°. En esta circunferencia imaginaria es donde se debe encontrar el centro de la Tierra.
4. Si el centro de la Tierra no es encontrado, se terminan los barridos y el microcontrolador entrega el resultado como “no encontrado”.

El valor del diámetro de la Tierra se manejará como una variable en el algoritmo de detección y se podrá modificar para efectos de ajuste y calibración debido a condiciones externas.

La siguiente ilustración muestra los pasos a seguir por el dispositivo propuesto en una configuración que presenta los tres cuerpos celestes importantes a discriminar, colocados al azar. En dicha ilustración también se aprecia el primer barrido en elevación (recta vertical hacia abajo en azul) en cuyo camino (línea vertical gruesa verde) podrá detectar cualquier cuerpo celeste por su luminosidad. Una vez detectada la Tierra, aun cuando sólo sea una sección de ella, el siguiente paso será realizar un barrido completo en azimut, (líneas curvas azules con flechas), en donde deberá encontrarse el centro de la Tierra.

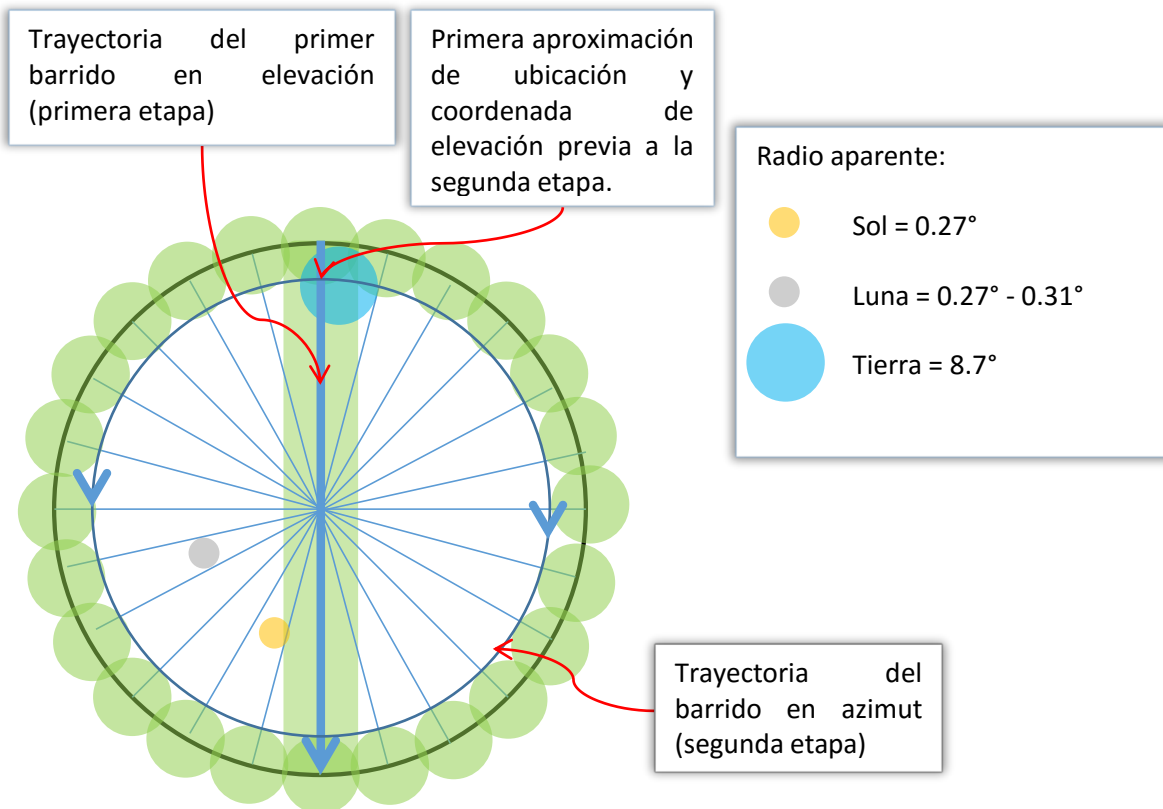


Ilustración 16: Representación general del principio de operación

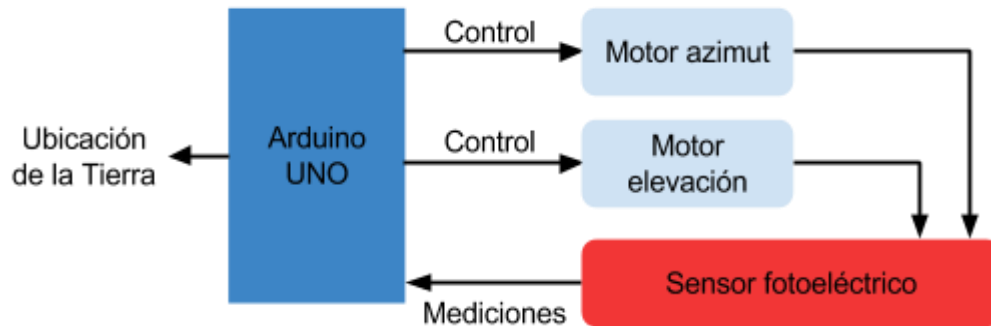
## 4.2 Diseño del dispositivo

El diseño del sensor de Tierra se ha planteado a partir de las siguientes consideraciones:

- Debe ser capaz de buscar e identificar al planeta Tierra, sin darle seguimiento continuo.
- Su posición de operación será en una órbita geoestacionaria.
- Debe ser autónomo.
- Su operación debe ser rápida.
- Con un principio de operación simple.
- De bajo costo.
- No contempla las perturbaciones externas que afecten la posición o estabilidad del satélite, debido a que pueden utilizarse giroscopios u otros dispositivos para compensar posibles errores.

Acorde a lo planteado en el principio de operación, para realizar el diseño se propone usar dos servomotores, un microcontrolador Arduino y una fotorresistencia. El microcontrolador generará el tren de pulsos necesario para mover o para fijar los motores en una cierta posición, un motor en el eje de elevación y un motor en el eje de azimut. A su vez el arreglo de motores tendrá montado el sensor que irá tomando medidas según lo indique el microcontrolador. Dependiendo de las

medidas obtenidas será el movimiento de los motores, es decir, si se ha encontrado a la Tierra o si es necesario seguir con la operación. En la ilustración 17 se ejemplifica un diagrama de interacción entre estos elementos.



*Ilustración 17: Interacción entre los elementos del Sensor de Tierra*

Es necesario aclarar que para poder probar el funcionamiento del dispositivo sin necesidad de tenerlo en órbita GEO, se realizará un modelo que simule tanto la luminosidad como diámetro aparente de la Tierra y del Sol.

### Simulación de la Tierra

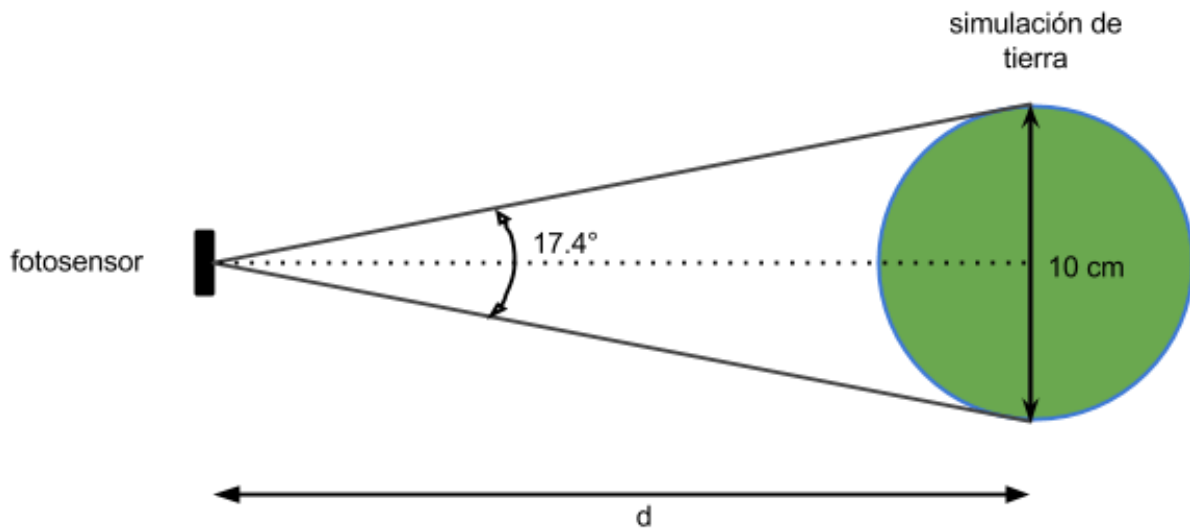
El principal requerimiento para simular la Tierra es utilizar un objeto luminoso del mismo diámetro que se percibe desde la órbita geoestacionaria, el cual es visto como un disco de diámetro igual a un ángulo de 17.4° (Iida et al.). Se busca que este objeto luminoso tenga intensidad variable para fines de pruebas experimentales.

Se propone iluminar un círculo de 10 cm de diámetro y a partir de este calcular la distancia a la que debe estar para tener un diámetro angular proporcional. Se toman como base para los cálculos de las ecuaciones 1 y 2, el triángulo rectángulo que se forma al proyectar el diámetro angular de la Tierra y se utiliza la identidad trigonométrica tangente. Lo anterior se ejemplifica en la ilustración 18 quedando:

$$\tan\left(\frac{17.4^\circ}{2}\right) = \frac{5}{d} \quad \text{Ec. 1}$$

$$d = \frac{5}{\tan(8.7^\circ)} = 32.67 \text{ cm} \quad \text{Ec. 2}$$

Como resultado tenemos que el disco que funcionará como la Tierra debe colocarse a 32.7 cm del sensor fotoeléctrico.



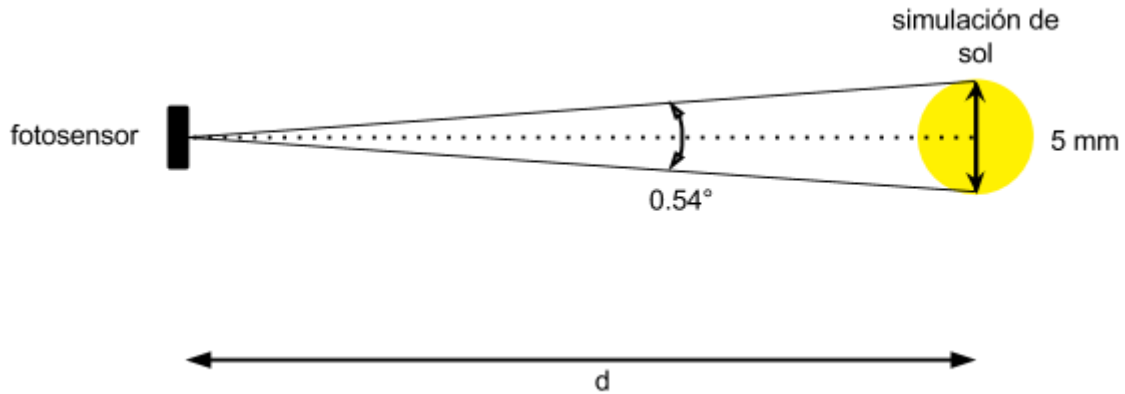
*Ilustración 18: Relación del diámetro aparente de la Tierra y la distancia entre la simulación de Tierra y el fotodetector*

#### Simulación del Sol

De manera similar a la simulación de la Tierra, se calcula en las ecuaciones 3 y 4 la distancia del disco que servirá como Sol al fotodetector. Como se observa en la ilustración 19, esta vez se tomó como base un disco de 5 mm de diámetro y el diámetro aparente del Sol que se observa desde la órbita geoestacionaria de  $0.54^\circ$  (Iida et al.), de lo que se obtiene:

$$\tan\left(\frac{0.54^\circ}{2}\right) = \frac{2.5}{d} \quad \text{Ec. 3}$$

$$d = \frac{2.5}{\tan(0.27^\circ)} = 530\text{mm} = 53\text{cm} \quad \text{Ec. 4}$$



*Ilustración 19: Relación del diámetro aparente del Sol y la distancia entre la simulación del Sol y el fotodetector*

#### Sensor fotoeléctrico

Para realizar las lecturas de luminosidad se propone utilizar una fotorresistencia montada en el arreglo de motores, la cual contará con un tubo al que se ajusta en su base el sensor fotoeléctrico. El tubo debe tener la altura necesaria para dejar pasar justo el haz de luz reflejado de la Tierra y su objetivo es discriminar con mayor eficacia la Tierra de otros planetas.

En las ecuaciones 5 y 6 utilizando la identidad trigonométrica tangente y el triángulo rectángulo delimitado por la fotorresistencia, el haz de luz que entra al tubo y una línea imaginaria en el medio de la fotorresistencia se calcula la altura necesaria para el tubo discriminador.

$$\tan(8.7^\circ) = \frac{3 \times 10^{-3}}{h/2} \quad \text{Ec. 5}$$

$$h = \frac{6 \times 10^{-3}}{\tan(8.7^\circ)} = \frac{0.006}{0.15302} = 0.0392m = 3.92cm \quad \text{Ec. 6}$$



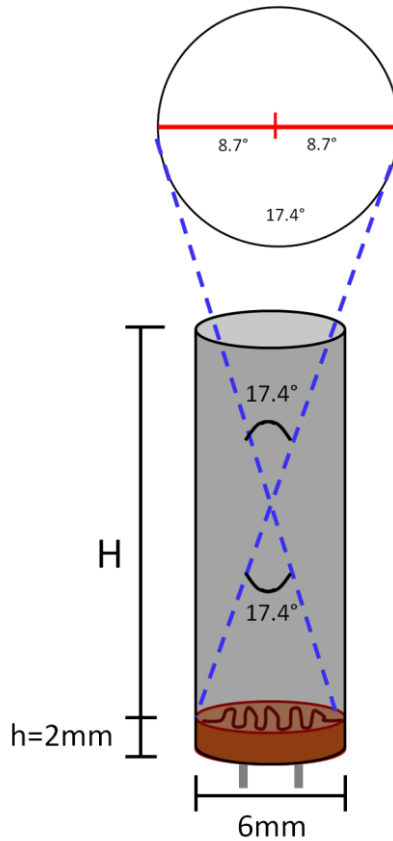


Ilustración 20: Medidas del tubo discriminador con respecto a la simulación de la Tierra

Con esta apertura en el detector, se podrá recibir la iluminación de la Tierra con su diámetro como valor máximo del umbral de detección, aunque también puede detectar intensidades mayores y de menor diámetro como el Sol. De esta forma, el centro de la Tierra será un valor más exacto, ya que si el círculo a detectar fuera más pequeño o más grande de lo que puede recibir el detector, no se podría tener la certeza de que se apunta al centro de la Tierra. Con esta apertura en las ecuaciones 7 y 8 se logra determinar la óptima separación entre los recorridos de elevación para realizar la detección de la Tierra.

$$\frac{180^\circ \text{ de recorrido}}{17.4^\circ \text{ de apertura}} = 10.3448 \text{ barridos} \quad \text{Ec. 7}$$

Lo que se puede redondear como 11 barridos, pero daremos un margen de traslape para evitar dejar secciones sin detectar, por lo que seleccionamos 12 barridos.

$$\frac{180^\circ \text{ de recorrido}}{12 \text{ barridos}} = 15^\circ \text{ de separación entre barridos} \quad \text{Ec. 8}$$

Esto quiere decir que tendremos 15° de separación entre cada barrido de elevación, es decir, 15° en azimut.

### 4.3 Factibilidad de desarrollo

Una vez que se definieron nuestras necesidades y requerimientos para el diseño del sensor de Tierra, en este subcapítulo se describirán las opciones para concretar el diseño.

#### Simulación de cuerpos celestes

- *Tierra*

Para el desarrollo de este cuerpo se planteó usar un disco luminoso con la circunferencia preestablecida y con iluminación ajustable. Con estas características definidas, se plantearon opciones diversas tales como lámparas, reflectores, focos y cuerpos luminosos esféricos.

Para el diseño final se ha propuesto un difusor con acrílico para uniformizar la iluminación. Se propone que el difusor tenga un foco de filamento y que esté conectado a un regulador de voltaje (dimmer) para poder ajustar la intensidad luminosa.

- *Sol*

Para fines prácticos de este proyecto se buscó un dispositivo lo más brillante posible y pequeño posible y que a la vez fuera asequible. Se encontraron opciones como LED ultra brillantes, LED de potencia o focos de filamento. Después de varias pruebas con un foco de 6 W con varios LED de potencia fue el que más brillo alcanzó.

Un requisito indispensable es el diámetro del foco propuesto en los cálculos, esto se conseguirá al reducir el diámetro de iluminación con un material opaco.

- *Luna, estrellas y otros cuerpos celestes*

En este proyecto el papel que juega la Luna en el reconocimiento de los cuerpos celestes podría parecer crucial por su cercanía a la Tierra. Se ha decidido no simular la Luna en los experimentos debido a que su diámetro angular visto desde la órbita geoestacionaria es similar al Sol,  $0.44^{\circ}$ - $0.62^{\circ}$  y  $0.54^{\circ}$  respectivamente (Iida et al.). Debido a que se buscarán dos características para encontrar la Tierra (diámetro e intensidad luminosa), la Luna no representará un factor determinante para los fines de este trabajo.

Las estrellas y otros cuerpos celestes no se simularon debido a su tamaño. Gracias a la combinación de luminosidad y de diámetro angular de la Tierra, se tiene una forma lo suficientemente efectiva para identificar a la Tierra y descartar cualquier otro cuerpo celeste.

#### Sensores ópticos

En este caso se plantea utilizar un foto receptor que percibe luz en el rango visible (400 nm a 700 nm aproximadamente), pues se utiliza para fines demostrativos, sin embargo, en un satélite de comunicaciones de órbita geoestacionaria se podrían utilizar foto receptores infrarrojos sin afectar el principio de operación del resto de los elementos. Como se planteó en la etapa del diseño, se tomó como sensor a una fotorresistencia. Sin embargo pueden ser planteadas diferentes opciones para la detección de la luminosidad como fotodiodos o fototransistores. La fotorresistencia es un sensor ideal para el presente proyecto por su costo asequible, su uso conocido ampliamente y la facilidad de implementación.

### Mecanismo de rotación en azimut y en elevación

Para poder llevar a cabo los barridos propuestos, se requieren dos ejes de rotación independientes, es decir, dos motores independientes montados y ajustados de tal manera que proporcionen al sensor los ejes de rotación necesarios. En el mercado existen diferentes opciones que pueden desempeñar esta tarea como los motores a pasos, motores de DC o servomotores. Se seleccionaron los servomotores debido a que su resolución (1 grado) es suficiente para utilizar un modo burdo para este trabajo, su bajo costo y su fácil manejo con Arduino.

### Microcontrolador

Existen diferentes marcas y modelos de microcontroladores en el mercado. Sin embargo, el objetivo principal de este proyecto no es desarrollar una programación especializada para el sensor de Tierra. Debido a la facilidad de programación, popularidad y gran documentación se ha escogido a los microcontroladores de plataforma Arduino.

## 4.4 Fabricación del dispositivo

La fabricación del dispositivo se realizó de manera que fuera posible realizar las pruebas necesarias en un ambiente controlado. El diseño del dispositivo deja abierta la oportunidad de analizar y diseñar una cubierta con la finalidad de proteger el dispositivo en un ambiente espacial.

### Simulación de la Tierra

La simulación de este cuerpo se realizó pensando en tener menor intensidad luminosa que el dispositivo que simula al Sol. Para poder realizar el ajuste de luminosidad inferior, se empleó un foco incandescente de 40 W en conjunto con un atenuador (dimmer) para poder reducir la intensidad luminosa del foco. A su vez para tener una proyección homogénea de luminosidad, el foco fue conectado a un socket y contenido en un tubo de aluminio con diámetro de 10 cm (para poder soportar el calor generado por el foco incandescente) y se colocó un material translúcido y opaco, en este caso una placa de acrílico, para así obtener la simulación del disco terrestre (ilustración 21 y 22).



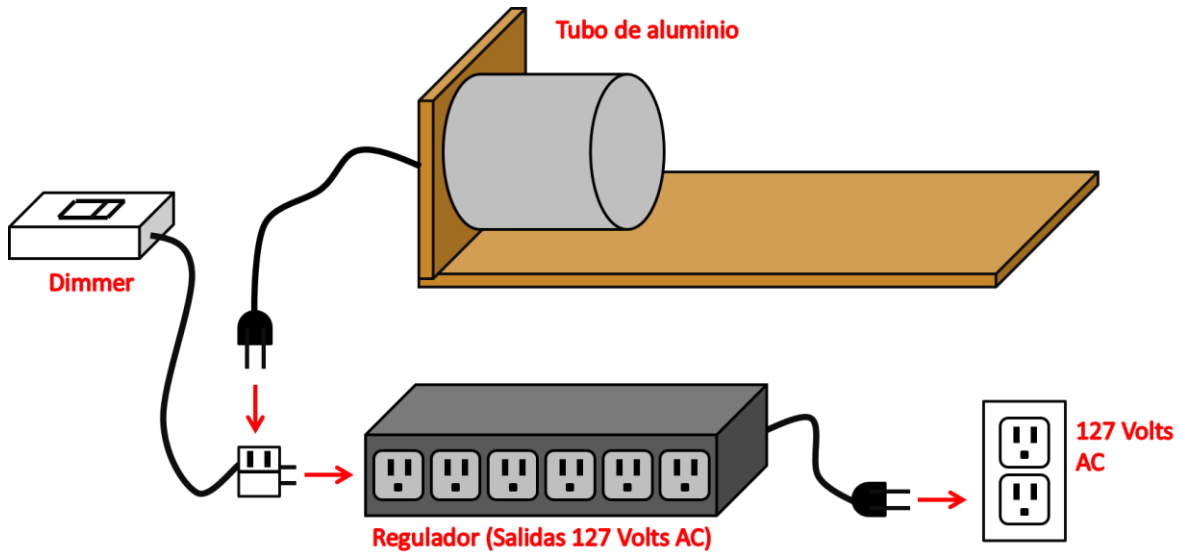
*Ilustración 21: Montaje de socket y tubo de aluminio en soporte de madera.*



*Ilustración 22: Diseño implementado de la Tierra*

Posteriormente para implementar y simular las dimensiones aparentes de los cuerpos celestes, el sensor se colocó a la distancia calculada previamente. Para la Tierra, como se muestra en la

ilustración 18, se debe colocar a una distancia de 32.67 cm, por lo que se marcó la distancia frente al tubo con el acrílico sobre la tabla que soporta el socket y el tubo. La fuente de alimentación de la Tierra es la toma de corriente de 127 Vac que alimenta al foco y que puede ser modificado por el dimmer.



*Ilustración 23: Diagrama de conexión de la Tierra con dimmer*

### Simulación del Sol

Se empleó un dispositivo de alta luminosidad como lo es un foco de leds de potencia (marca SiLed de 6 W) debido a la intensidad luminosa que genera, y con ello es posible sobrepasar la intensidad luminosa de la Tierra en nuestro diseño. El montaje de este led de potencia también se implementó según los cálculos de la ilustración 19 para cumplir con las dimensiones aparentes de este cuerpo, situándolo a una distancia de 53 cm del sensor. Se implementó montado en una varilla recortada que cumple con la distancia previamente mencionada. A lo largo de la varilla se enrollan los cables que proporcionan la alimentación a este led de potencia.



Ilustración 24: Diseño final de la simulación del Sol

La alimentación de este elemento es una fuente de 12 V de corriente directa. Esta fuente de voltaje es dedicada únicamente a alimentar el led de potencia por lo que es independiente de cualquier otra fuente.

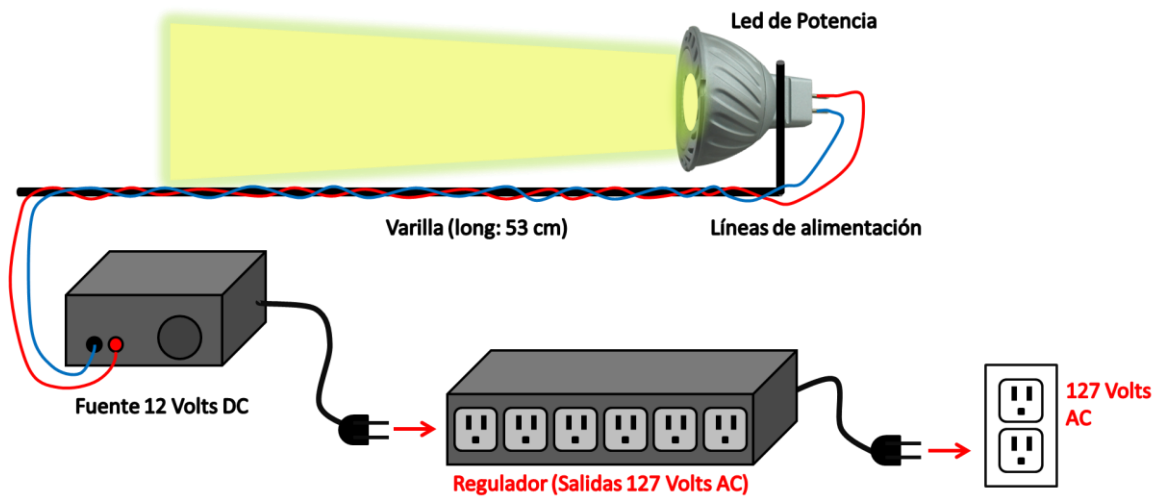
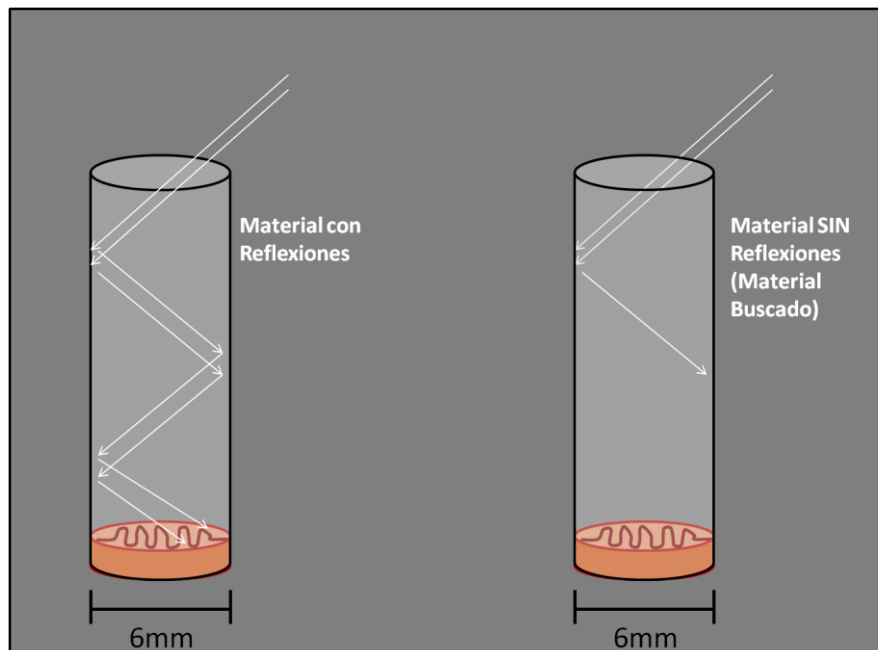


Ilustración 25: Diagrama de conexión de simulación de Sol con fuente de 12 V

## Sensor óptico

Para la fabricación del acoplador del sensor se tomaron en cuenta los cálculos realizados previamente para construir el tubo discriminador que tiene la función de limitar la luz que recibe la fotorresistencia y cuya longitud es la necesaria para dejar pasar justo el haz de luz del diámetro de la Tierra. Por ello se buscó un elemento cilíndrico y hueco que cumpliera con el diámetro justo para la fotorresistencia (6mm).

Otro elemento de vital importancia es la característica interna del tubo, que para evitar reflexiones internas que causaran una lectura inadecuada de la intensidad luminosa, se determinó que fuera de un material opaco y que evitara al máximo las reflexiones de luz (ilustración 26).



*Ilustración 26: Material interno reflejante contra material interno opaco (deseado)*

Se fabricaron diversos diseños con diferentes materiales como papel y plástico, pero no se obtuvieron los resultados esperados y fueron deficientes en la tarea de evitar reflexiones. Se buscaron diferentes tipos de papel hasta encontrar una cartulina opaca que evitaba la mayor parte de reflexión y se decidió usar este material. El elemento cilíndrico hueco se obtuvo de un popote que fue recortado a la medida calculada previamente. Se forró su interior con la cartulina opaca y se realizaron pruebas de muestreos con un excelente resultado donde se evitaba prácticamente por completo la reflexión interna en el tubo y se lograba una lectura fina de luminosidad.

Para poder detectar correctamente los valores de luminosidad, es necesario configurar la fotorresistencia con un divisor de voltaje (ilustración 27), el cual está formado por una fotorresistencia y una resistencia fija. Para este trabajo se utilizó una fotorresistencia con valores que oscilan entre  $0 \Omega$  cuando se encuentra con máxima iluminación y  $2 M\Omega$  cuando no recibe luz.

Con el objetivo de obtener la mejor resolución posible en el convertidor analógico digital de 10 bits del microcontrolador se hicieron los cálculos para elegir el valor de la resistencia fija, tomando en cuenta dos casos, cuando el sensor es iluminado con la mayor intensidad posible y cuando el sensor no recibe luz alguna.

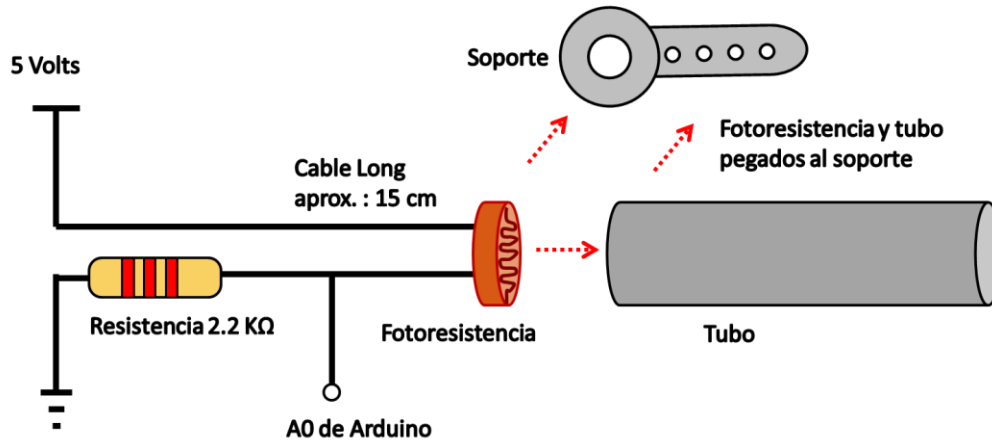


Ilustración 27: Ensamble de fotorresistencia, tubo, soporte de servomotor y divisor de voltaje

- *Cálculos del divisor de voltaje*
  - Sensor iluminado (corto-circuito)
 

Si la fotorresistencia recibe gran cantidad de luz, su resistencia será baja, de alrededor de  $50 \Omega$  (dato obtenido experimentalmente) y el microcontrolador medirá un voltaje  $V$  de acuerdo a la ecuación 9.

$$V = \frac{R_2}{R_1 + R_2} 5V = \frac{2.2 \text{ k}\Omega}{50\Omega + 2.2\text{k}\Omega} 5V = 4.89 \text{ V} \quad \text{Ec. 9}$$

El valor de voltaje se puede representar en niveles de cuantificación, tomando como referencia un valor de 5 V y un convertidor analógico-digital de 10 bits, el valor máximo que podría tomar es 1023. Adicionalmente sabemos que el valor real máximo de voltaje que puede medir es de 4.889 V, entonces tenemos que:

$$\text{valor max. de cuantización} = \frac{4.889 \times 1023}{5} = 1000 \quad \text{Ec. 10}$$

- Sensor no iluminado (circuito abierto)
 

Si la fotorresistencia no recibe nada de luz, su valor será de 2 MΩ según la hoja de datos característicos de la fotorresistencia y el microcontrolador medirá un voltaje  $V$  de acuerdo a la ecuación 11.



$$V = \frac{R2}{R1 + R2} 5V = \frac{2.2 \text{ k}\Omega}{2M\Omega + 2.2k\Omega} 5V = 5.49 \text{ mV} \quad \text{Ec. 11}$$

Este valor de voltaje se puede representar en niveles de cuantificación, tomando como referencia un valor de 5 V como el valor máximo de 1023 bits. Adicionalmente sabemos que el valor real mínimo de voltaje que puede medir es de 5.49 mV, entonces tenemos que:

$$\text{valor min. de cuantización} = \frac{5.49 \times 10^{-3} \times 1023}{5} = 1 \quad \text{Ec. 12}$$

De las ecuaciones anteriores se tiene que el voltaje de la resistencia fija puede variar entre 4.89 V y 5.5 mV, lo cual se traducirá en el microcontrolador como variaciones entre 1 y 1000 niveles de cuantificación.

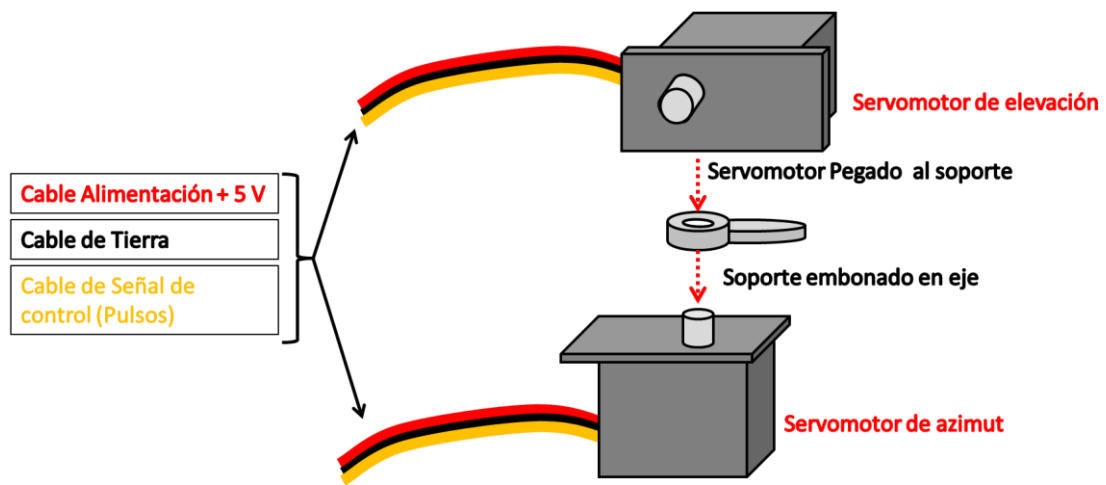
#### Mecanismo de rotación en azimut y en elevación

El mecanismo de rotación está compuesto por dos servomotores modelo RB-15PG, que se muestran en la ilustración 28, los cuales recibirán la posición deseada del microcontrolador Arduino en forma de un tren de pulsos y se moverán de 0° a 180° debido a limitantes mecánicas intrínsecas a los motores. Dependiendo del ancho de los pulsos que genere el microcontrolador será la posición en la que se colocará el motor.



*Ilustración 28: Modelo de servomotor propuesto*

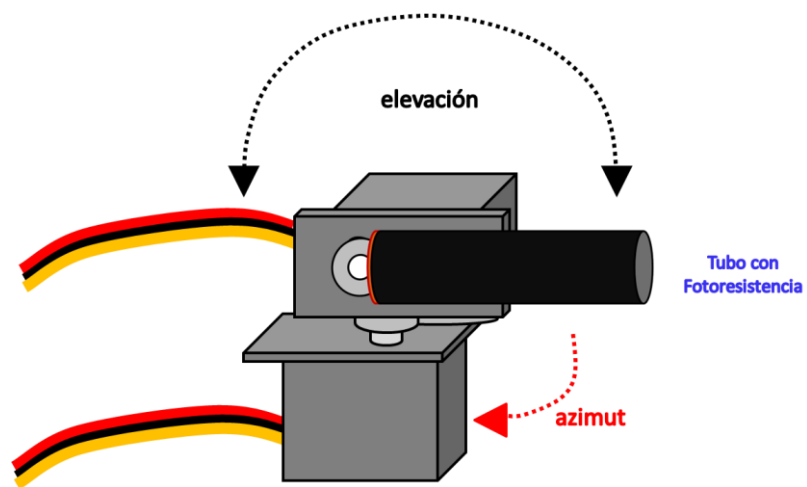
El sistema de rotación en dos ejes para el sensor de Tierra compuesto por servomotores (ilustraciones 29 y 30) se monta de forma que el eje de rotación del servomotor de azimut sea perpendicular al eje de rotación del servomotor de elevación. Los movimientos del arreglo de servomotores permitirán cubrir un área de media esfera alrededor del sensor de Tierra (ilustración 31).



*Ilustración 29: Ensamble de servomotores*



*Ilustración 30: Diseño final del arreglo de servomotores con fotorresistencia*

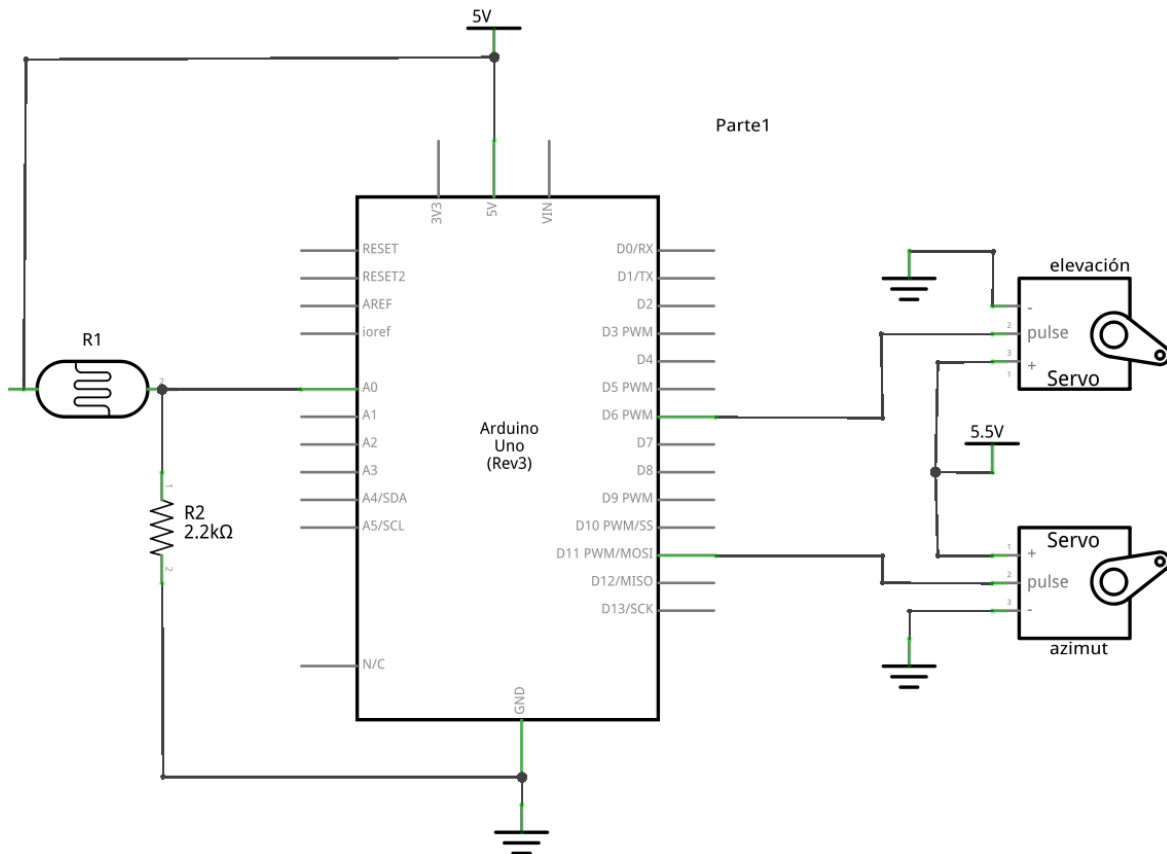


*Ilustración 31: Movimientos del arreglo de servomotores*

#### Configuración eléctrica del sensor de Tierra

La configuración eléctrica del sensor de Tierra se detalla a continuación y se observa en la ilustración 32.

- El microcontrolador se conectó a una fuente externa de voltaje.
- El arreglo de servomotores se conectó a una fuente de voltaje externa independiente a la del microcontrolador.
- Todos los elementos tienen tierra común.



*Ilustración 32: Configuración del Sensor de Tierra*

### Algoritmo de funcionamiento y Diagrama de Bloques

El objetivo del algoritmo que rige el movimiento de los motores y la detección de los cuerpos celestes es que funcione de manera lo más sencilla, confiable y rápida posible. Se ha dividido el algoritmo en dos partes. En la primera, los motores se colocan en 0°, posteriormente el motor de elevación hará que la fotorresistencia se mueva haciendo un semicírculo de 180°, obteniendo ciento ochenta lecturas por vez y al terminar cada barrido de elevación se realizará un corrimiento de 15° en azimut, es decir, el motor en azimut hará girar al motor de elevación y a la fotorresistencia. Si se detecta la Tierra esta parte del algoritmo termina y se guarda la posición en elevación y se prosigue a la segunda parte. De no detectar la Tierra el algoritmo termina indicando que no se encontró la Tierra. En la segunda parte, el motor de elevación se queda con la posición de la Tierra y el motor de azimut ejecuta un movimiento de 0° a 180° durante el cual se toman lecturas, después el motor de elevación se mueve a la posición de 180° menos su posición original con el fin de tomar muestras de la semicircunferencia complementaria y el motor de azimut ejecuta un barrido de 180° a 0°, tomando lecturas también. Dentro de esas 360 lecturas se busca el mayor valor de iluminación que se encuentre dentro del umbral de luminosidad de la Tierra y esa será la posición final del centro de la Tierra. A continuación se describe la lógica de programación hasta el tercer barrido de elevación(210°), si no se localiza la Tierra todos los pasos serán

repetitivos hasta los doce barridos (345°), en caso de que la Tierra no se encuentre, el funcionamiento del sensor se detendrá. Si la Tierra es encontrada, entonces se ejecuta la siguiente etapa que “lee” una circunferencia a la altura en la que se encontró la Tierra.

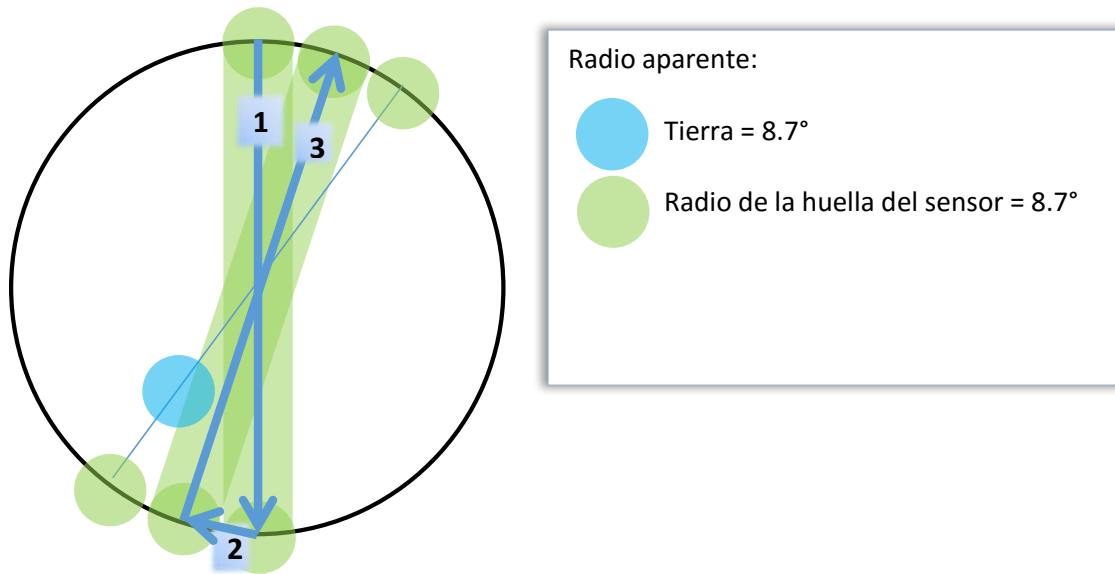


Ilustración 33: Primeras tres acciones de operación del dispositivo. 1: lectura en elevación (0°-180°), 2: desplazamiento en azimut sin lectura, 3: lectura en elevación (180° - 0°)

1. Al energizar el sensor de Tierra, este se coloca siempre en la posición de inicio, 0° para los dos motores.

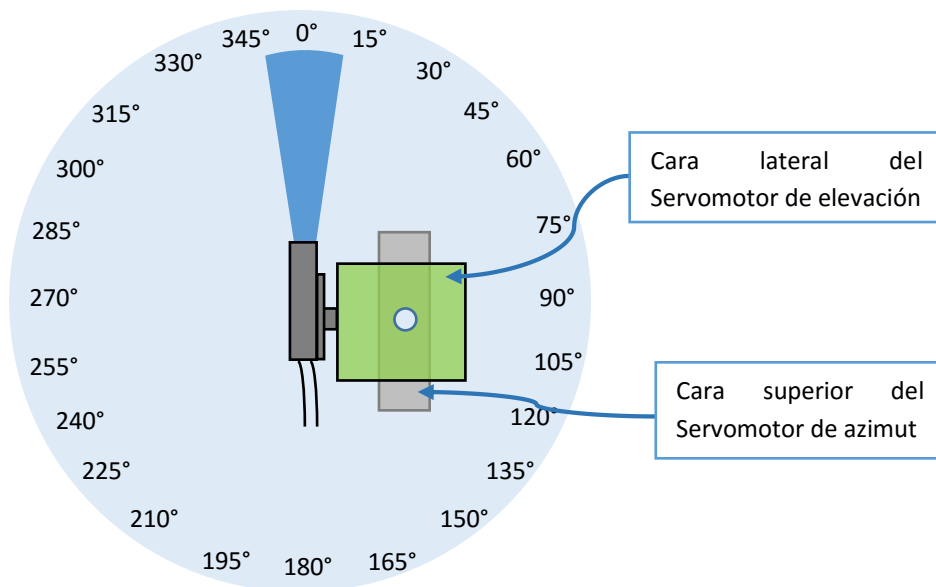
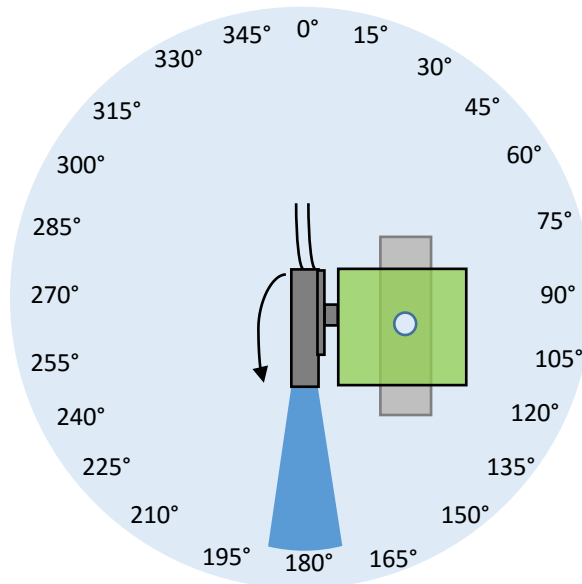


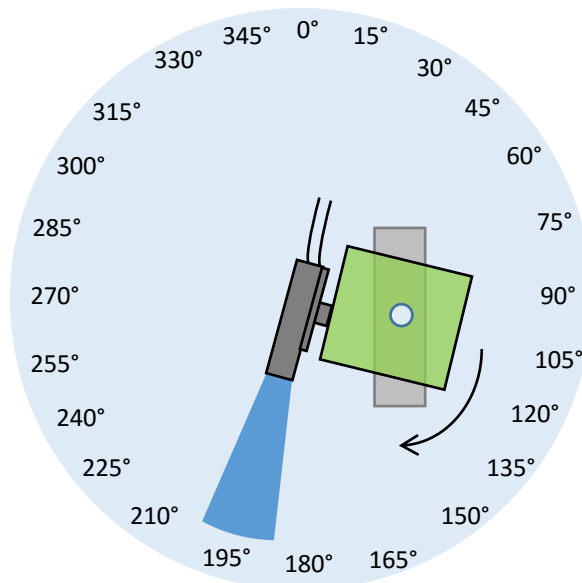
Ilustración 34: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores al inicio del programa

2. El servomotor de azimut mantiene su posición inicial ( $0^\circ$ ) y el servomotor en elevación mueve la fotorresistencia de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  para tomar lecturas.



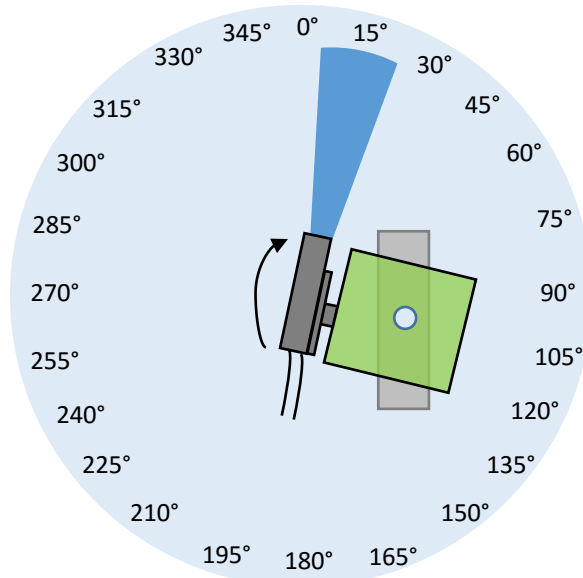
*Ilustración 35: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores después del primer barrido. Fotorresistencia apuntando a  $180^\circ$*

3. El servomotor de azimut rota  $15^\circ$  al servomotor de elevación y a la fotorresistencia en sentido horario; el servomotor de elevación mantiene la posición.



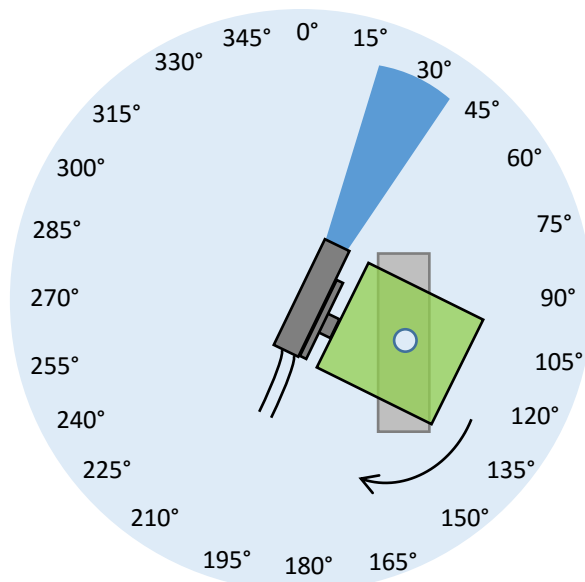
*Ilustración 36: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores después de rotar  $15^\circ$ . Fotorresistencia apuntando a  $195^\circ$*

4. El servomotor de azimut mantiene su posición ( $\Delta\text{azimut}=15^\circ$ ) y la fotorresistencia hace un barrido de  $180^\circ$  de regreso por medio del motor de elevación. En la ilustración va de  $195^\circ$  a  $15^\circ$  de la circunferencia.



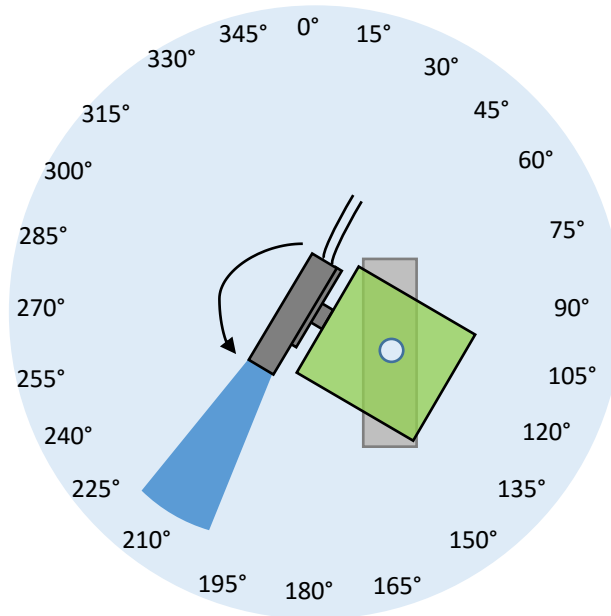
*Ilustración 37: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores después del segundo barrido. Fotorresistencia apuntando a  $15^\circ$*

5. El servomotor de azimut rota  $15^\circ$  ( $\Delta\text{azimut}=30^\circ$ ) en sentido horario y el servomotor en elevación mantiene la posición.



*Ilustración 38: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores después de rotar  $15^\circ$ . Fotorresistencia apuntando a  $30^\circ$*

6. El servomotor de azimut mantiene su posición y la fotorresistencia hace un barrido de 180° en elevación (de 30° a 210° de la circunferencia).

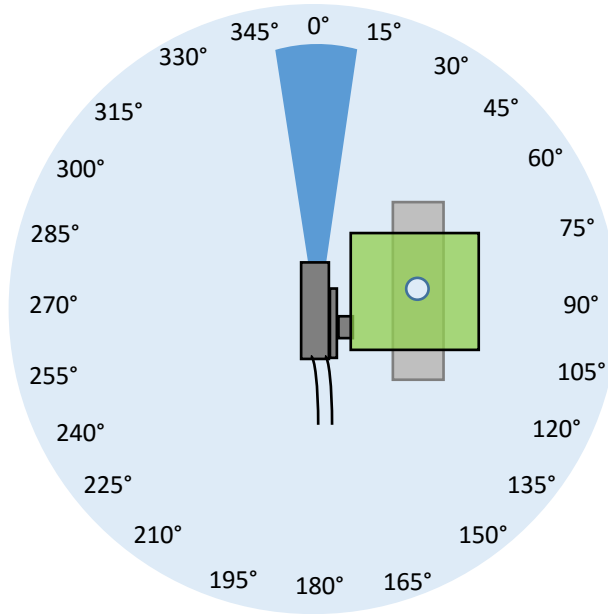


*Ilustración 39: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores después del tercer barrido. Fotorresistencia apuntando a 210°*

Suponiendo que en el tercer barrido (ilustración 39) se encuentre la Tierra, se guardará la posición de ambos motores para que al terminar el barrido en curso el motor de elevación regrese a esa posición donde se encuentra la Tierra. Se guardará la posición en elevación y se procederá a la segunda etapa del algoritmo. Para ejemplificar la siguiente etapa se tomará un ángulo de elevación arbitrario.

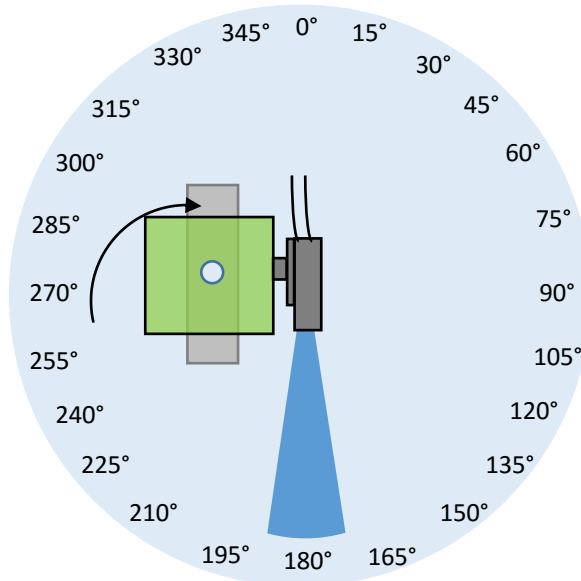


7. El servomotor de azimut se coloca en  $0^\circ$  y el motor de elevación permanece estático (con la elevación de la última etapa).



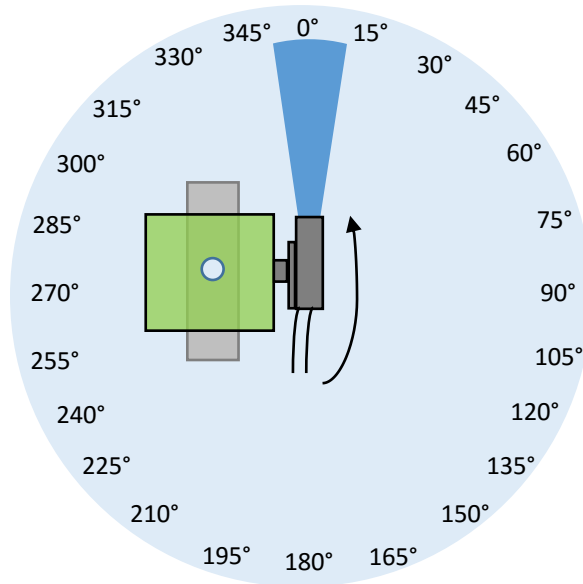
*Ilustración 40: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores al inicio de la segunda etapa. Fotorresistencia apuntando a  $0^\circ$  y a la elevación en la que se encuentra la Tierra*

8. El servomotor de azimut se mueve de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  y la fotorresistencia toma ciento ochenta medidas de luminosidad. El motor de elevación permanece estático.



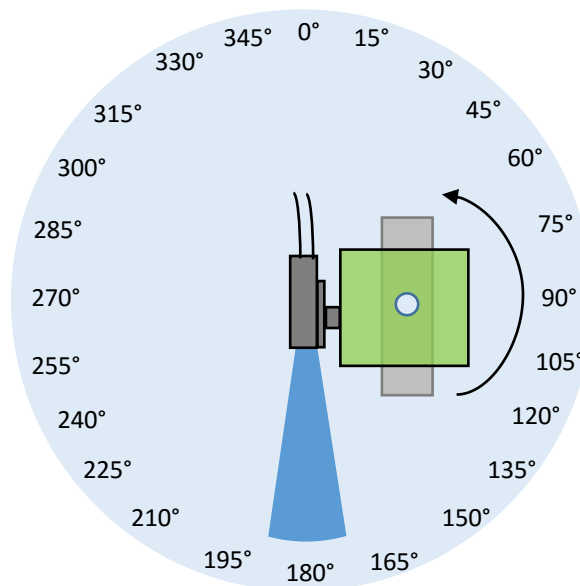
*Ilustración 41: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores después de hacer el recorrido de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  en azimut por el lado derecho del círculo*

9. El servomotor de azimut permanece estático en  $180^\circ$  pero el motor de elevación se mueve a la posición de  $180^\circ$  grados menos la posición de elevación actual, es decir, al “complemento” del ángulo de elevación anterior.



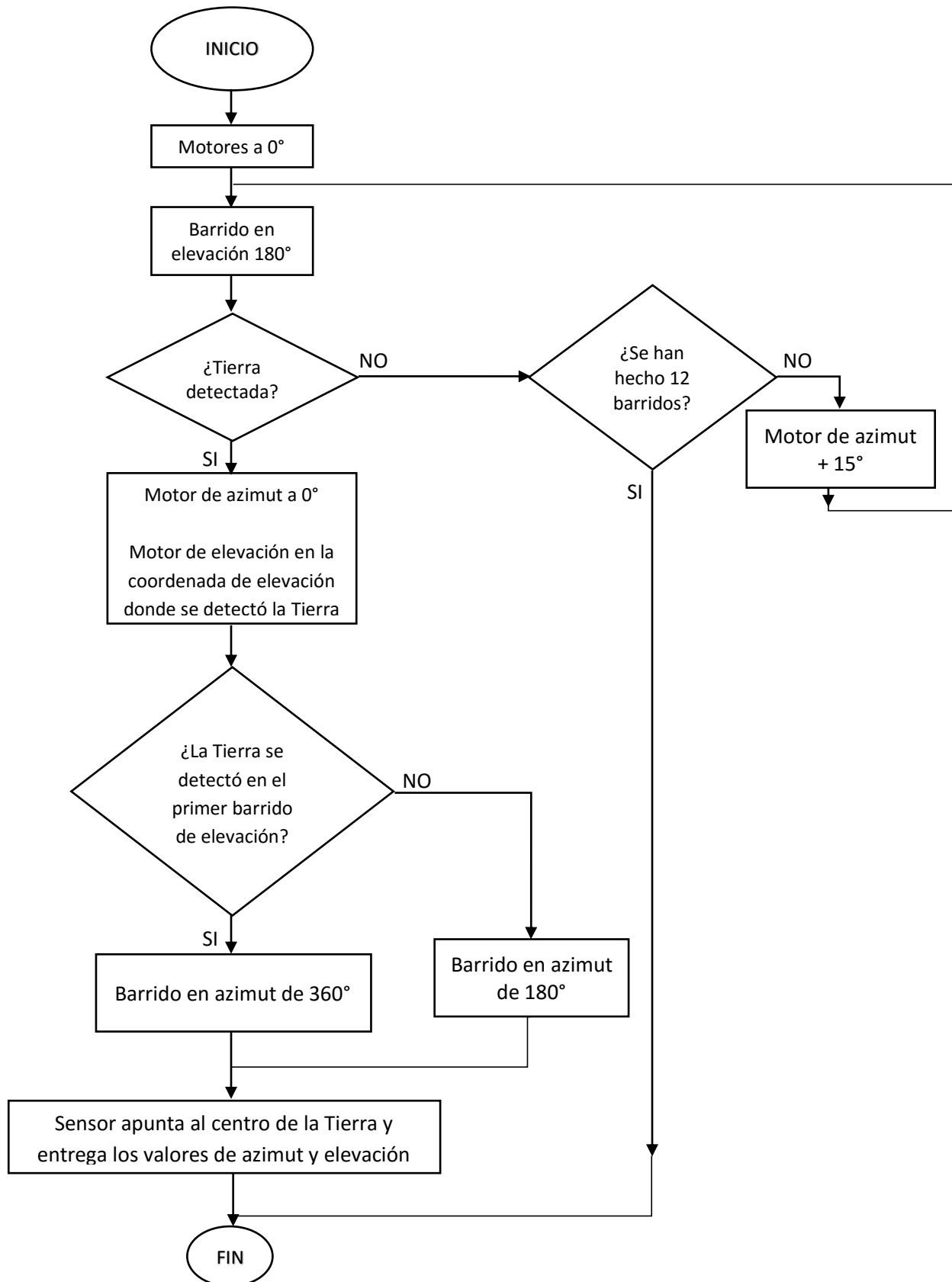
*Ilustración 42: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores. La fotorresistencia se coloca apuntando a  $0^\circ$  en azimut y en elevación a  $180^\circ$  menos la elevación original*

10. El servomotor de azimut se mueve de  $180^\circ$  a  $0^\circ$ . Se toman ciento ochenta medidas de luminosidad y el motor de elevación permanece estático.



*Ilustración 43: Vista desde la Tierra del arreglo de servomotores. El motor de azimut se mueve de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  de nuevo, pero con la fotorresistencia midiendo del lado contrario del círculo azul.*

## Diagrama de flujo del código de Arduino



Al principio del algoritmo se declaran las variables y constantes que se utilizarán en el programa. Algunas destacables son:

- ➔ “s1” y “s2” son variables para declarar los servomotores en elevación y azimut respectivamente.
- ➔ “umbralMin” y “umbralMax”: sirven para definir el valor mínimo y el valor máximo de luminosidad que detectará el microcontrolador como el rango de luminosidad para identificar la Tierra.
- ➔ “incr” define los pasos de un grado que el motor de azimut realizará en la primera etapa de las lecturas.
- ➔ “arr[tam]”: es un vector de dimensión ajustable (tam) que define el número de muestras contiguas que son necesarias para detectar correctamente el diámetro aparente de la Tierra vista desde la órbita geoestacionaria.

Tanto la variable “tam” como los valores “umbralMin” y “umbralMax” se pueden modificar dependiendo del diámetro aparente y de la intensidad luminosa de la Tierra pronosticada para diferentes épocas del año. Los posibles ajustes se podrían hacer manualmente desde Tierra o pre-programarlos en la computadora de abordo con fines de calibración y ajuste en el sensor del satélite.

Después de declarar las variables y constantes a usar, se declara la función de configuración o “setup” en la cual se definen los parámetros necesarios para que el microcontrolador Arduino y el arreglo de servomotores funcionen correctamente. Dentro de la función “s1.attach” y “s2.attach” se define el pin donde está conectado el control del servomotor (6 y 11), mientras que 540 y 2500 definen el ancho del pulso (en  $\mu$ s) que se utilizará para mover los motores a la posición de  $0^\circ$  (540) y a la posición de  $180^\circ$  (2500). Los valores utilizados fueron ajustados experimentalmente.

### *Función principal*

En la primera ejecución del ciclo principal del programa se colocan los motores en la posición cero para poder comenzar con los barridos.

Se ejecuta la función “discriminadora1” la cual se encarga de hacer los barridos en elevación de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , si se ha encontrado a la Tierra (no necesariamente el centro) el sensor regresa a la posición en la que encontró la Tierra y se procede con la segunda etapa. En el caso de no haber encontrado a la Tierra se incrementa  $15^\circ$  en azimut en sentido horario y se procede con la función “discriminadora2”.

La función “discriminadora2” se encarga de hacer barridos en elevación de  $180^\circ$  a  $0^\circ$ , es decir, en sentido contrario a la función “discriminadora1”. Si se ha encontrado la Tierra el sensor regresa a la posición en la que encontró la Tierra y se procede con la segunda etapa. Si no se ha encontrado la Tierra, se verifica si la suma de los incrementos en azimut hasta el momento es mayor o igual a  $180^\circ$ , es decir, si la fotorresistencia ha hecho doce barridos en elevación; en caso positivo se

detiene el programa y se da por concluida la búsqueda, en caso negativo se vuelve al inicio de la función principal para continuar midiendo la luminosidad del entorno.

Suponiendo que en la función “discriminadora1” o “discriminadora2” se hubiera encontrado la Tierra (“if(ban==1)”), se pasa a la segunda etapa del programa, la cual es la misma sin importar en que función se encontró la Tierra.

Para la segunda etapa, el motor de elevación conserva su posición y el motor de azimut regresa a 0°. Después, el motor de azimut ejecuta un barrido de 0° a 180° (función “adelante”), en el cual la fotorresistencia toma mediciones cada grado, es decir, ciento ochenta mediciones. Si en la primera etapa, la Tierra fue encontrada en el primer barrido, es decir, cuando el motor de azimut está en 0°, entonces para asegurar que se encuentra la Tierra sin error se ejecuta un segundo barrido en la segunda etapa (función “atrás”), ahora de 180° a 0° en azimut y en elevación la fotorresistencia apunta a 180° menos la elevación original. Por ejemplo, si el ángulo de elevación en la primera etapa fue de 50° y se encontró en el primer barrido, entonces se hace un barrido en azimut (0° a 180°) a 50° de elevación y un segundo barrido en azimut (180° a 0°) a 130° de elevación.

La forma de detectar el centro de la Tierra en la segunda etapa cambia con respecto a la primera. Para la primera etapa se considera el diámetro aparente de la Tierra y el rango de luminosidad que se mide desde la órbita geostacionaria, el centro de la Tierra es considerado como el valor central del vector de mediciones que corresponden a la Tierra. Para la segunda etapa se considera la medición con la mayor luminosidad dentro del rango de la Tierra como el centro de la Tierra (función “compara”), puesto que este barrido es para corroborar y en su caso mejorar las coordenadas de ubicación de la Tierra, de la cual ya se tiene su elevación. Más adelante se detallan las funciones que realizan estas tareas.

La ubicación que resulte de la segunda parte del programa será la ubicación final que entregue el Sensor de Tierra.

#### *Función “discriminadora 1”*

Esta función empieza con un ciclo “for” que se ejecuta 181 veces. Dentro del ciclo se escribe la posición del motor de elevación (s1.write(pos)), la cual va desde 0° hasta 180°, se lee el valor analógico de la fotorresistencia (L=analogRead(A0)) y se compara con los valores del umbral preestablecido de la Tierra (if(L>Umbral\_min && L<Umbral\_Max)).

Si el valor leído por el sensor está dentro del rango esperado, se incrementa el contador “g” y se compara con “tam” (if(g<tam)) para asegurarse que la cantidad de coordenadas (“pos”) que se guarden sean solo las predefinidas por la variable “tam”. En el programa “i” representa la posición en el arreglo “arr” en la que se guardará la coordenada del valor leído y “tam” es el valor preestablecido de medidas contiguas que debe leer el sensor para encontrar la Tierra satisfactoriamente.

Si "i" es mayor a "tam" entonces no se guarda la posición de la lectura y se lee el siguiente grado. Si "i" es menor a "tam" entonces la posición de la lectura actual se guarda en la posición "i" del arreglo "arr" (arr[i] = pos), se incrementa "i" (i=i+1) y se verifica si ya se llenó la última posición del arreglo "arr" (if(i==tam-1)) para que en caso positivo se levante una bandera (ban=1) y en el ciclo principal se detenga el programa. Lo anterior permite guardar la posición de la Tierra para poder ubicarla posteriormente.

En el caso de que el sensor detecte un valor fuera del rango esperado (como apuntamiento al Sol o al espacio oscuro), el contador "i" se reinicia a cero (i=0) para que una vez que se lea un valor de luminosidad correspondiente a la Tierra, su posición empiece a guardarse siempre en la primera posición del arreglo. También al final de cada lectura se da un tiempo al motor para que se mueva a la siguiente posición (delay(15)) y tome la siguiente lectura.

Al final del ciclo "for", es decir, al final de las 181 mediciones si se encontró la Tierra el servomotor de elevación regresa a la posición que se guardó en la mitad del arreglo (s1.write(arr[mit])), es decir, apunta al centro de la Tierra y también se guarda en el arreglo "posi" (posi[0] = arr[mit]) para su posterior uso. Si no se encontró la Tierra al final del ciclo "for", se incrementa 15° la posición del motor en azimut, (PA=PA+incr) y (s2.write(PA)), e "i" y "g" se reinician a cero. Como tarea adicional se guarda la posición del motor de azimut para su posterior incremento (posi[1] = PA).

#### *Función "discriminadora 2"*

Esta función es similar a la función "discriminadora 1", la única diferencia es que el motor de elevación moverá la fotorresistencia en sentido contrario, es decir empezará en la posición de 180° y terminará en 0°. Cabe mencionar que estos ángulos se refieren a la posición relativa que la fotorresistencia mantiene con respecto a su posición original, no se refieren a los ángulos tomados como referencia para hacer los barridos en azimut.

#### *Función "adelante"*

Esta función implementa un ciclo "for" con ciento ochenta repeticiones para mover el motor de "azimut" desde 0° a 180° (s2.write(pos)) y en cada grado mide la luminosidad (L=analogRead(A0)). Posteriormente compara "L" se compara con el mayor valor detectado "L1" y se guarda en "L1" el valor mayor junto su posición "pos" en "p1". Al finalizar el ciclo "for", la medición con mayor luminosidad y su posición "L1" y "p1" respectivamente, se guardan en el arreglo "datbarr1".

#### *Función "atrás"*

Esta función realiza la misma tarea que la función "adelante" solo que parte de 180° y termina en 0°, es decir, el ciclo "for" empezará en ciento ochenta y terminará cuando llegue a cero. Las variables "L1" y "p1" se cambian por "L2" y "p2" respectivamente, mientras que el arreglo "datbarr1" cambia por "datbarr2".

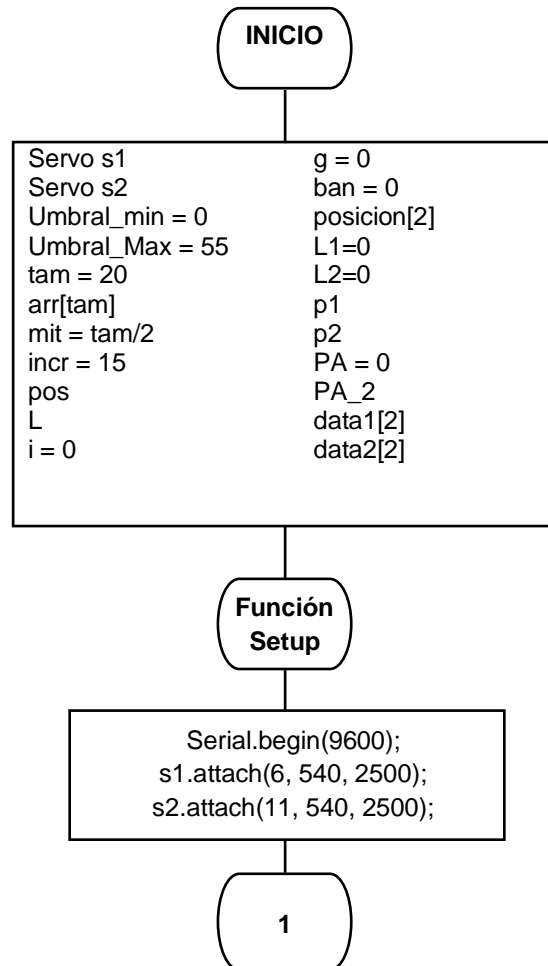
#### *Función "compara"*

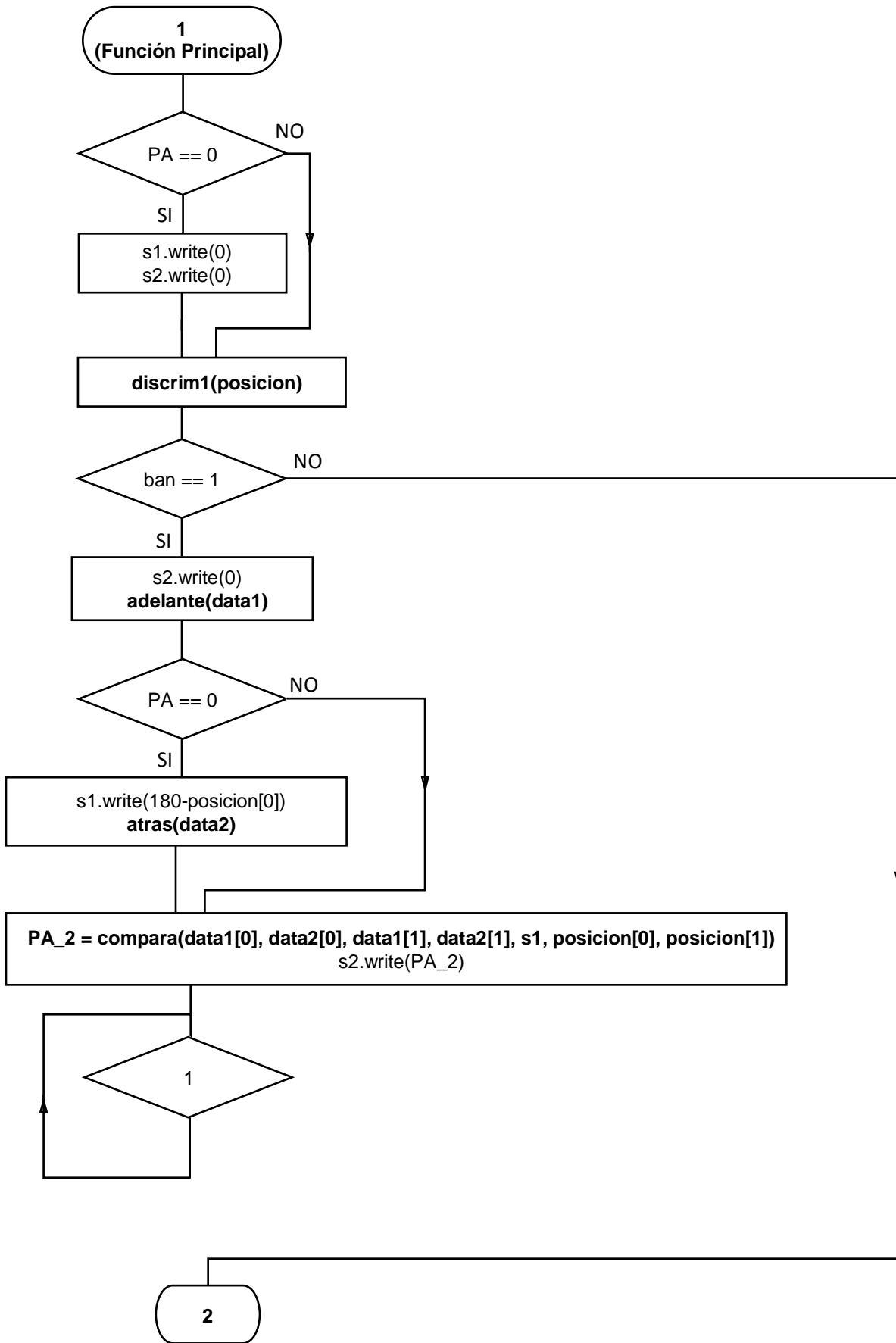
Después de la ejecución de funciones "adelante" y "atrás", en caso de haber encontrado la Tierra en el primer barrido de elevación ("if(PA == 0)" azimut=0°) de la primera etapa del programa o

después de la ejecución sólo de la función “adelante” en caso de haber encontrado la Tierra en cualquier otro barrido de elevación (“else”  $\text{azimut} \neq 0^\circ$ ), se ejecuta esta función.

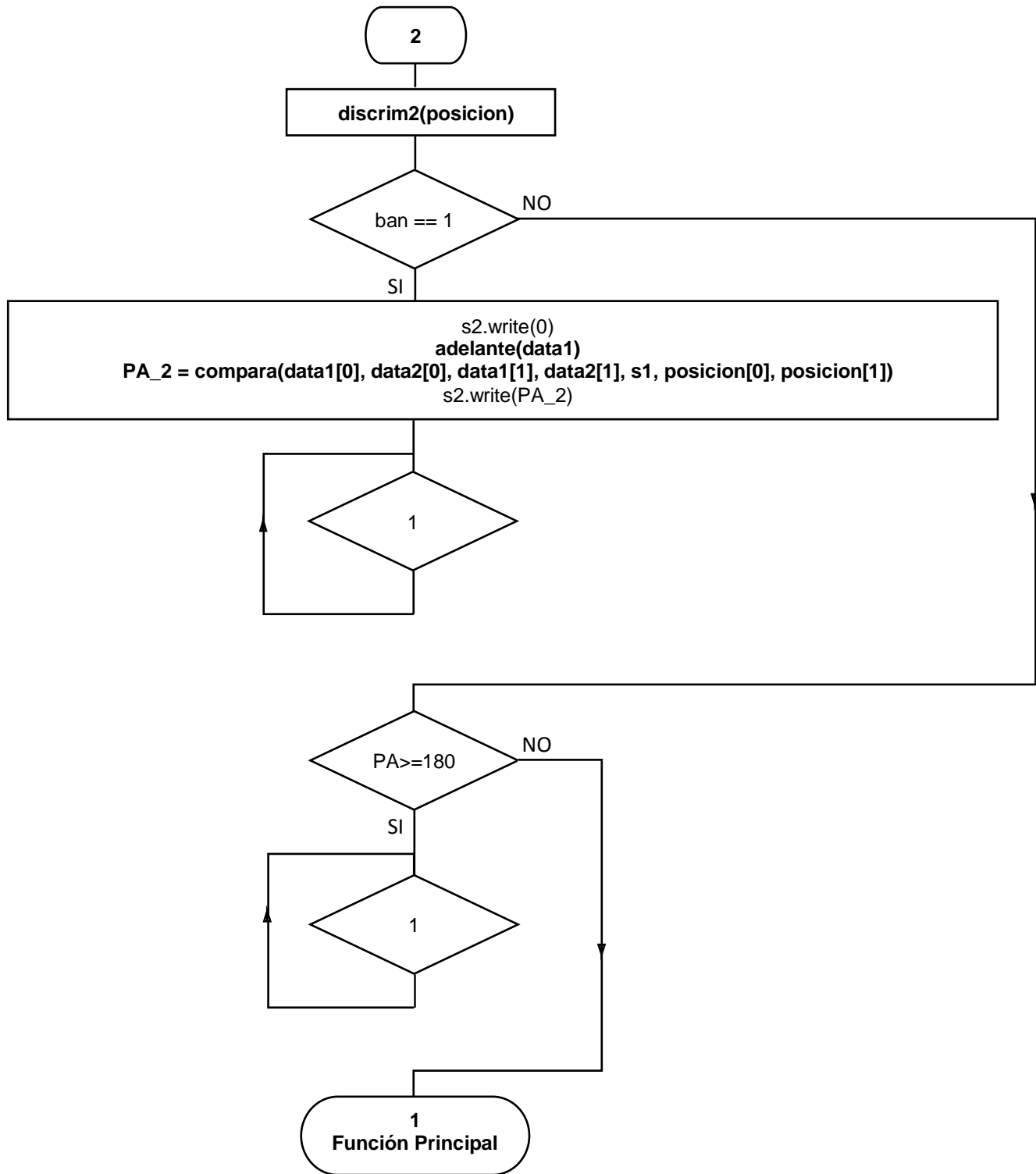
En el primer caso ( $\text{if}(\text{PA} == 0)$ ) se decide cual medición es la de mayor luminosidad, si la de la función “adelante” o la de la función “atrás”, adicionalmente se verifica que la posición del valor escogido esté dentro de un rango de  $\pm 15^\circ$  comparado con la posición de la Tierra encontrada en la primera etapa del programa. Si no está dentro del rango quiere decir que lo que se ha encontrado no es la Tierra y se anuncia un error en el puerto serial.

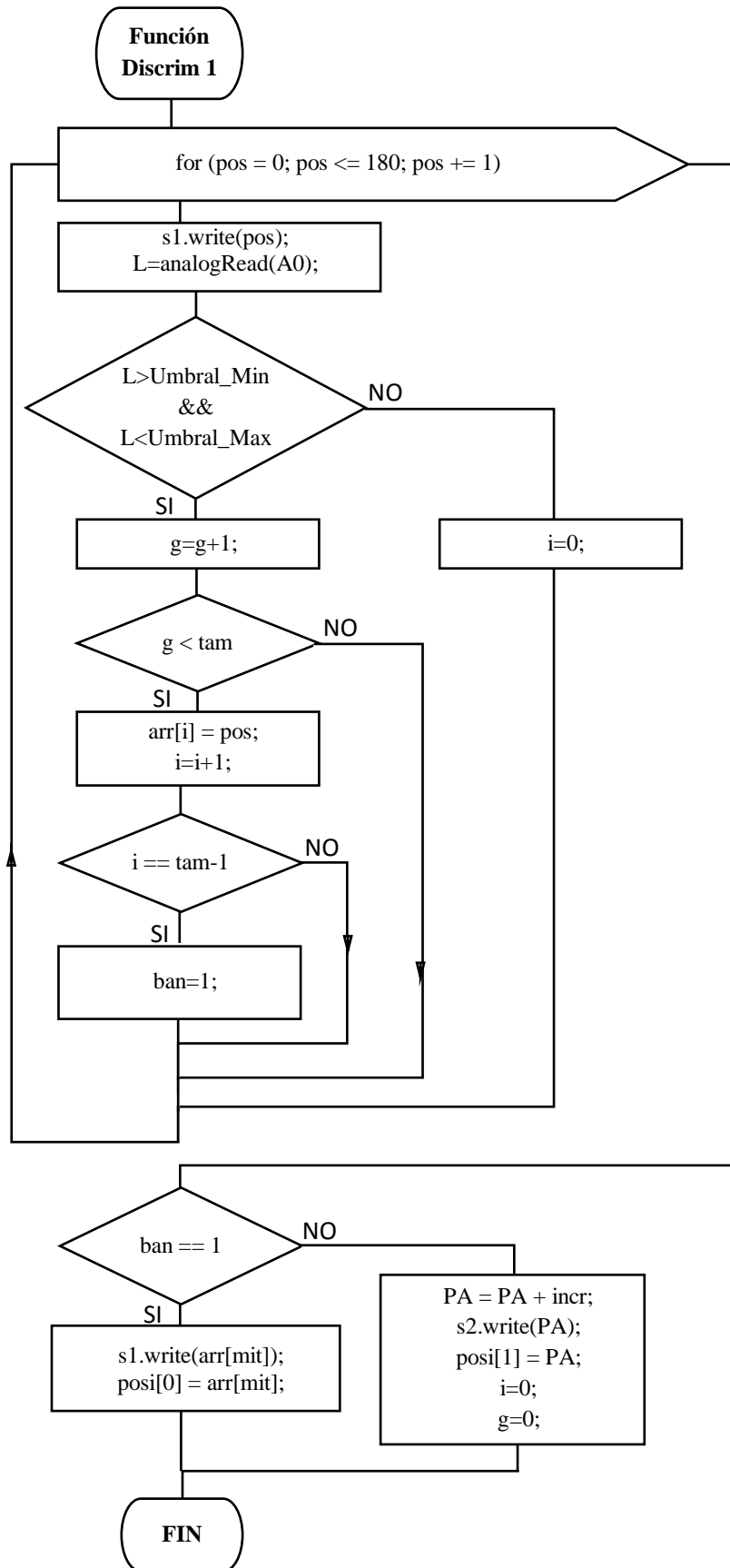
En el segundo caso (else) no se comparan valores de luminosidad puesto que sólo se ejecuta la función “adelante”, sólo se verifica que la posición de la medida con mayor luminosidad esté dentro de un rango de  $\pm 20^\circ$  con respecto a la posición de la Tierra encontrada en la primera etapa del programa. Si no está dentro del rango quiere decir que lo que se ha encontrado no es la Tierra y se anuncia un error en el puerto serial.

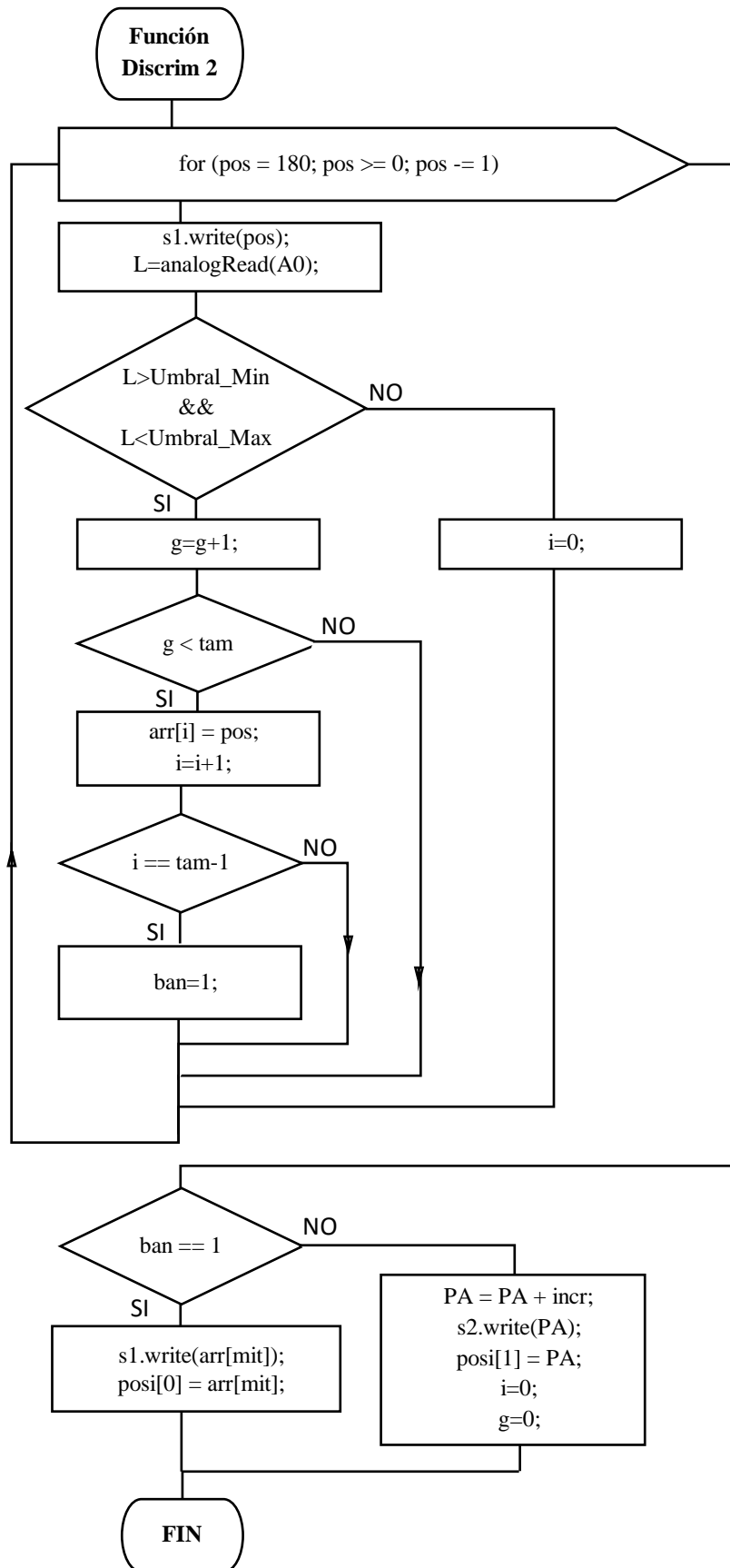


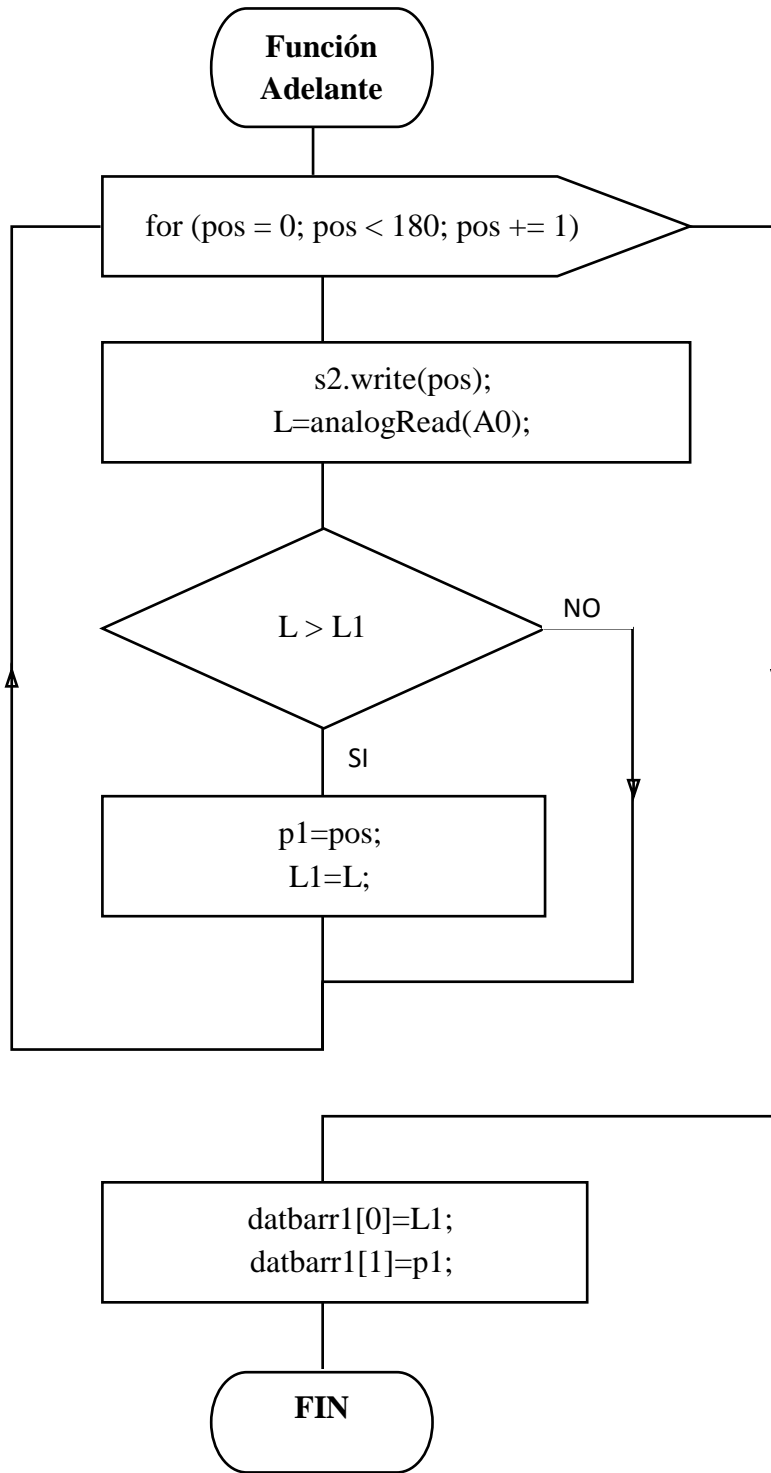


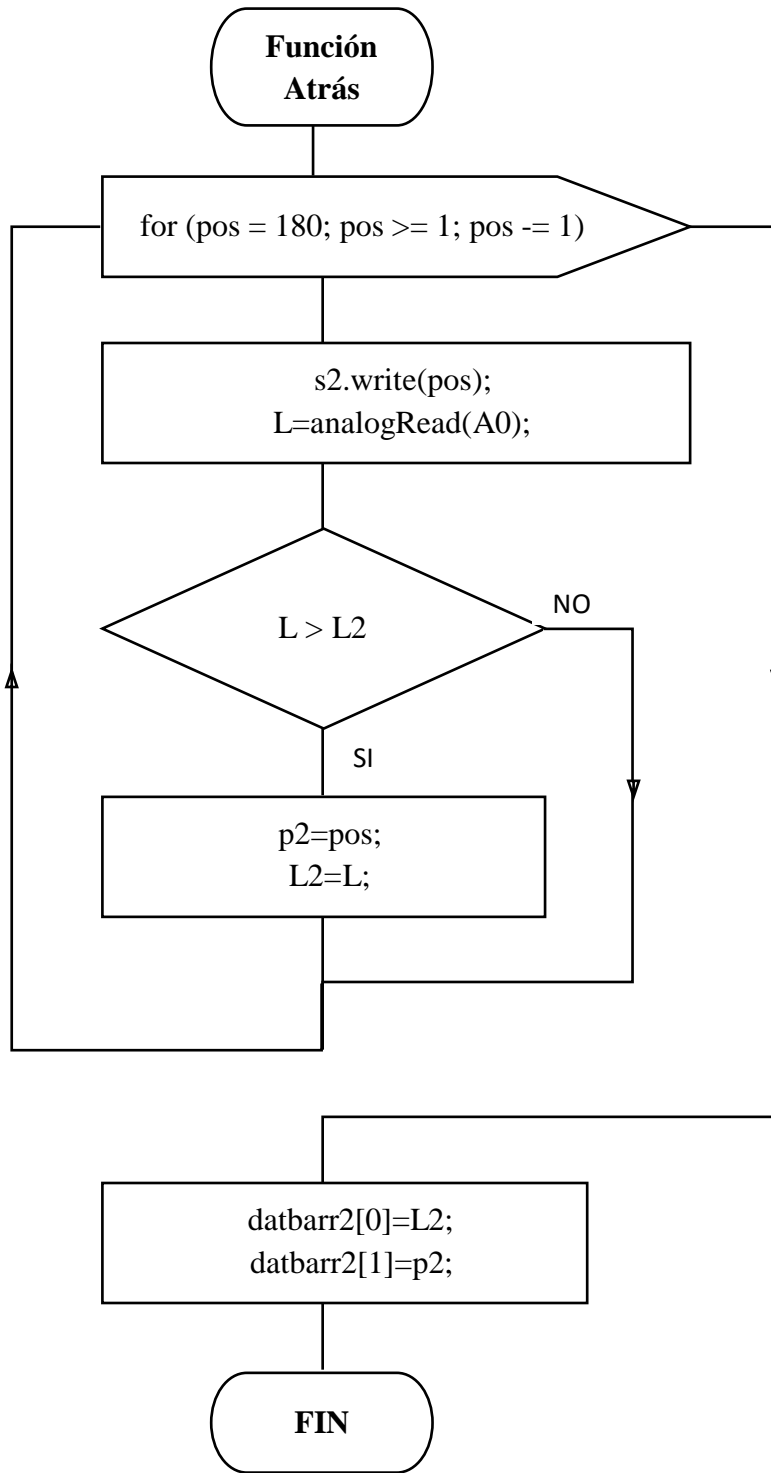


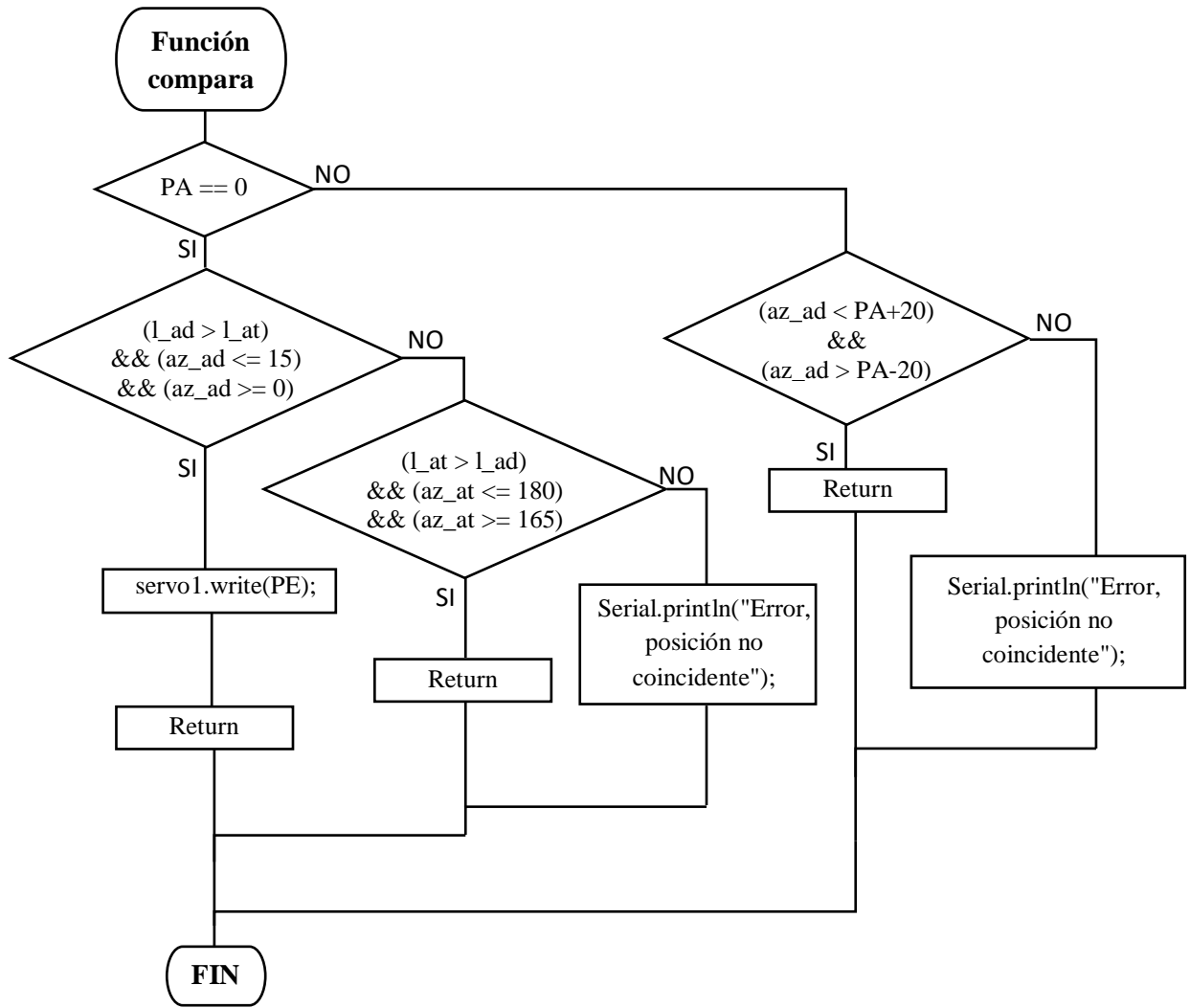












## Código en lenguaje C del algoritmo

```
#include <Servo.h>
Servo s1;
Servo s2;
int Umbral_min = 0;
int Umbral_Max = 55;
const int tam = 20;
int arr[tam];
int mit = tam/2;
int incr = 15;
int pos;
int L;
int i = 0;
int g = 0;
int ban = 0;
int posicion[2];
int L1 = 0;
int p1;
int data1[2];
int L2 = 0;
int p2;
int data2[2];
int PA = 0;
int PA_2;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  s1.attach(6, 540, 2500);
  s2.attach(11, 540, 2500);
}

void loop()
{
  if(PA == 0)
  {
    s1.write(0);
    s2.write(0);
    delay(500);
  }
  discrim1(posicion);
}
```

```

delay(500);
if(ban == 1)
{
    delay(3000);
    s2.write(0);
    delay(500);
    adelante(data1);
    if(PA == 0)
    {
        s1.write(180-posicion[0]);
        delay(500);
        atras(data2);
    }
    PA_2 = compara(data1[0], data2[0], data1[1], data2[1], s1, posicion[0],
posicion[1]);
    s2.write(PA_2);
    while(1){
    }
}
delay(500);
discrim2(posicion);
delay(500);
if(ban == 1)
{
    delay(3000);
    s2.write(0);
    delay(1000);
    adelante(data1);
    PA_2 = compara(data1[0], data2[0], data1[1], data2[1], s1, posicion[0],
posicion[1]);
    s2.write(PA_2);
    while(1){
    }
}
delay(500);
if(PA >= 180)
{
    while(1){
    }
}
}

```



```

void discrim1(int posi[])
{
  for(pos = 0; pos <= 180; pos += 1)
  {
    s1.write(pos);
    L = analogRead(A0);
    if(L>Umbral_min && L<Umbral_Max)
    {
      g = g+1;
      if(g < tam)
      {
        arr[i] = pos;
        I = i+1;
        if(i == tam-1)
        {
          ban = 1;
        }
      }
    }
    else
    {
      i = 0;
    }
    delay(15);
  }
  if(ban == 1)
  {
    delay(1000);
    s1.write(arr[mit]);
    posi[0] = arr[mit];
  }
  else
  {
    PA = PA + incr;
    s2.write(PA);
    posi[1] = PA;
    i = 0;
    g = 0;
  }
}
}

```

```

void discrim2(int posi[])
{
  for(pos = 180; pos >= 0; pos -= 1)
  {
    s1.write(pos);
    L = analogRead(A0);
    if(L>Umbral_min && L<Umbral_Max)
    {
      g = g+1;
      if(g < tam)
      {
        arr[i] = pos;
        i=i+1;
        if(i == tam-1)
        {
          ban = 1;
        }
      }
    }
    else
    {
      i = 0;
    }
    delay(15);
  }
  if(ban == 1)
  {
    delay(1000);
    s1.write(arr[mit]);
    posi[0] = arr[mit];
  }
  else
  {
    PA = PA+incr;
    s2.write(PA);
    posi[1] = PA;
    i = 0;
    g = 0;
  }
}
}

```

```

void adelante(int datbarr1[])
{
  for(pos = 0; pos < 180; pos += 1)
  {
    s2.write(pos);
    L = analogRead(A0);
    Serial.println(L);
    if(L > L1)
    {
      p1 = pos;
      L1 = L;
    }
    delay(15);
  }
  datbarr1[0] = L1;
  datbarr1[1] = p1;
}

```

```

void atras(int datbarr2[])
{
  for(pos = 180; pos>=1; pos-=1)
  {
    s2.write(pos);
    L = analogRead(A0);
    Serial.println(L);
    if(L>L2)
    {
      p2 = pos;
      L2 = L;
    }
    delay(15);
  }
  datbarr2[0] = L2;
  datbarr2[1] = p2;
}

```

```

int compara(int l_ad, int l_at, int az_ad, int az_at, Servo servo1, int PE, int
PA)
{
  if(PA == 0)
  {

```

```

if(l_ad>l_at && az_ad<=15 && az_ad>=0)
{
  servo1.write(PE);
  return az_ad;
}
else if(l_at>l_ad && az_at<=180 && az_at>=165)
{
  return az_at;
}
else
{
  Serial.println("Error, posición no coincidente");
}
}
else
{
  if(az_ad<PA+20 && az_ad>PA-20)
  {
    return az_ad;
  }
  else
  {
    Serial.println("Error, posición no coincidente");
  }
}
}
}

```

#### 4.5 Características de funcionamiento

El sensor de Tierra desarrollado funciona de forma simple y automática. Una vez polarizados todos los componentes del sensor de Tierra comenzará a funcionar automáticamente de la siguiente manera:

1. Los servomotores se colocan en la posición inicial y posteriormente comienzan a moverse para tomar lecturas. Esto se logra modificando el ciclo de trabajo del tren de pulsos que se genera mediante el microcontrolador Arduino y que se rige por las variables "pulsoMin" y "pulsoMax". El valor que toman estas variables es el tiempo en milisegundos que durarán los pulsos de la señal, es decir, definen el ciclo de trabajo de la señal de control para los servomotores. El pulso mínimo (540  $\mu$ s) da como resultado la posición de 0° y el pulso máximo (2.5 ms) la posición de 180° mientras se mantiene fija la frecuencia a 50 Hz que es un parámetro de fábrica para los motores.

En la ilustración 44 se puede ver que el pulso mínimo es de 540.1  $\mu$ s, aproximadamente los 544  $\mu$ s definidos en el código, esta señal coloca los servomotores en la posición correspondiente a 0°.

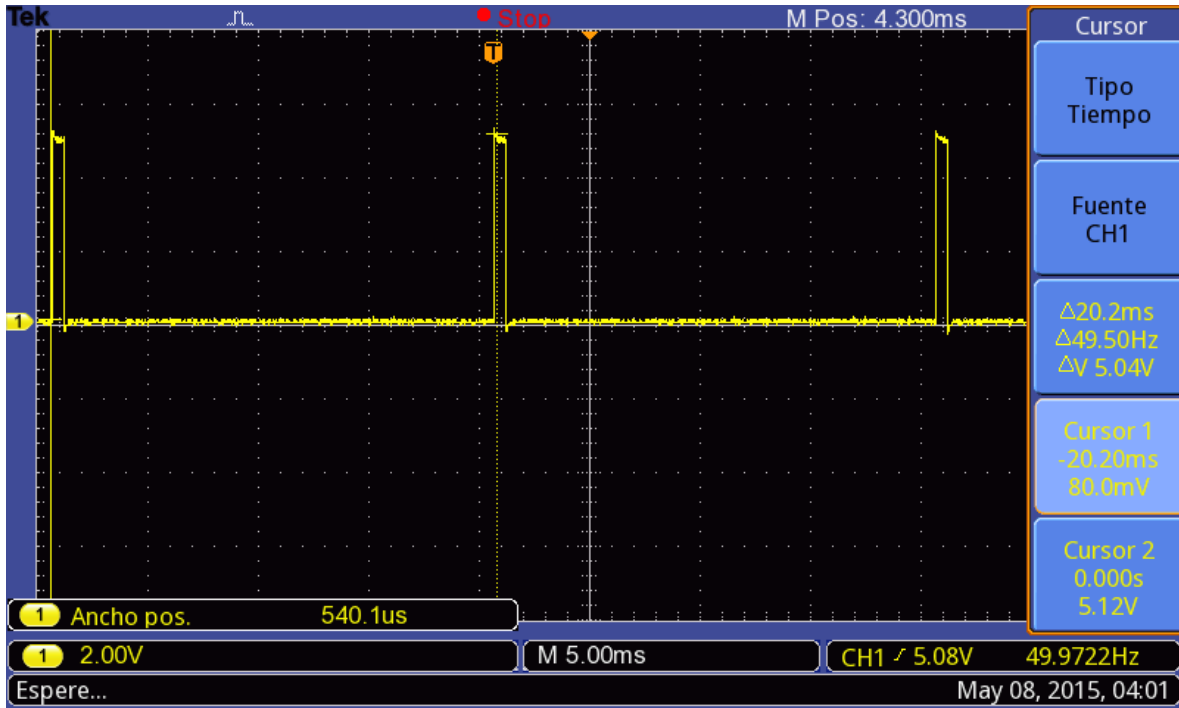


Ilustración 44: Captura de pantalla de osciloscopio mostrando tren de pulsos para la posición 0°

En la ilustración 45 se puede observar que el pulso máximo es de 2.5 ms, esta señal coloca a los servomotores en la posición correspondiente a 180°.

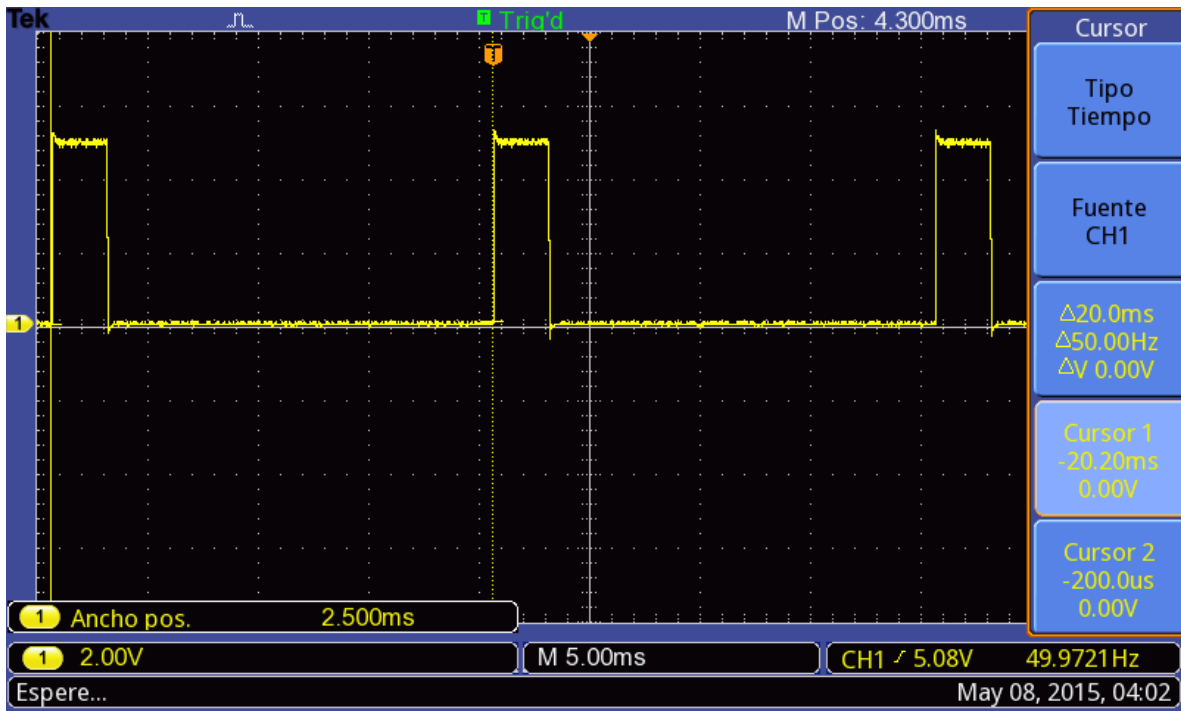


Ilustración 45: Captura de pantalla de osciloscopio mostrando tren de pulsos para la posición 180°

2. La toma de mediciones por parte del sensor es llevada a cabo por la fotorresistencia colocada en el extremo del arreglo de motores. Esta fotorresistencia es un transductor que representa la luminosidad recibida como valores de una resistencia variable. El microcontrolador no lee directamente el valor de la resistencia variable, sino que se implementa un divisor de voltaje con una resistencia fija, para que cuando el voltaje en la resistencia fija cambie, se lea este en el microcontrolador.  
Para poder interpretar los valores de voltaje, se conecta el nodo que conecta a la resistencia fija al “puerto analógico” del microcontrolador. Esto es, se conecta a un puerto del convertidor analógico-digital de 10 bits integrado en la tarjeta Arduino.
3. El microcontrolador recibe los valores de luminosidad y detecta automáticamente si ya se ha encontrado la Tierra basado en los parámetros descritos en el principio de operación. Al mismo tiempo también genera el tren de pulsos que envía al arreglo de servomotores para moverlos según las mediciones tomadas.
4. Finalmente en el momento que se encuentra la Tierra, el sensor termina el barrido en curso y regresa físicamente a la posición donde la encontró. El sensor también regresa los datos de elevación y azimut donde encontró a la Tierra.

## 4.6 Conclusiones

Se desarrolló la metodología del principio de operación del discriminador de cuerpos celestes para encontrar la Tierra basándose en dos factores ajustables con la finalidad de brindar flexibilidad al dispositivo ante fenómenos físicos externos a su operación. Estos dos factores son el diámetro aparente de la Tierra y la luminosidad que es recibida por el sensor en la órbita geoestacionaria.

Se determinó que el desarrollo del dispositivo es factible para los fines de este trabajo, por lo cual se realizó la fabricación del sensor utilizando materiales de bajo costo para que el sensor fuera asequible, pero sin sacrificar funcionalidad o eficacia. Sin embargo, al utilizar materiales especializados, se puede llegar a tener una mejor eficiencia en el funcionamiento del sensor y garantizar su funcionalidad ante ambientes espaciales.

Se logró implementar un algoritmo simple para detectar la Tierra, mediante el uso de la plataforma Arduino y diversos componentes electrónicos, y se programó dicho algoritmo con la lógica simple de operación planteada tomando en cuenta la flexibilidad del principio de operación.





## 5 Resultados

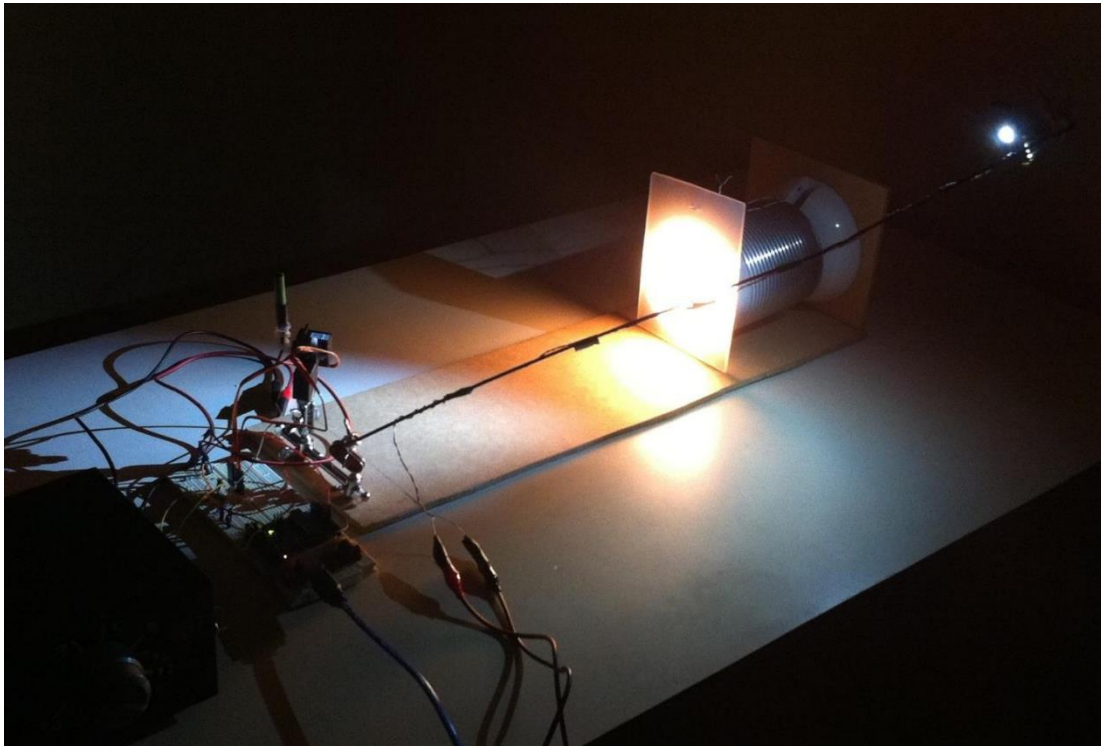
### 5.1 Planificación del entorno de pruebas

A fin de llevar a cabo los experimentos con la mayor fidelidad posible y obtener resultados confiables lo más apegados a la realidad, el entorno de pruebas se adaptó para mantenerse en las mismas condiciones durante todo el experimento. Finalmente se obtuvieron las siguientes condiciones:

- Lugar de trabajo

Lo que se requirió para obtener resultados consistentes y confiables es la adecuación del entorno de pruebas el cual se preparó como se mencionó previamente en la implementación del entorno de pruebas y se cuidó que no hubiera alteraciones a la cantidad de intensidad luminosa que ingresaba en el cuarto desde el exterior.

Como las ilustraciones 46 y 47 muestran, el lugar de trabajo se aisló de manera que no penetrara la luz solar ni ninguna otra fuente de iluminación, para obtener únicamente la fuente de iluminación del Sol y la Tierra. Se cubrieron completamente ventanas y puerta para evitar el paso de luz.



*Ilustración 46: Lugar de trabajo aislado con únicas fuentes luminosas*



*Ilustración 47: Vista superior de la simulación de Tierra, Sol y Sensor de Tierra.*

- Fuentes de alimentación

Debido a los picos en el consumo de corriente, los suministros de energía para los motores y para los elementos que simulan a la Tierra y al Sol funcionaron de forma independiente.

Es necesario que el suministro de voltaje sea constante todo el tiempo en el que el sensor tome lecturas ya que la variación de voltaje afecta la intensidad luminosa de los elementos que se emplean para la simulación de los cuerpos celestes, y provoca variaciones en las lecturas, que dependiendo de los valores seleccionados como umbral máximo y umbral mínimo, puede causar lecturas que estén fuera de estos valores y tener lecturas erróneas cuando deberían ser correctas. Esto trae como consecuencia que en un barrido que con

condiciones normales encuentra la Tierra, no la pueda detectar por alteraciones externas a la operación del sensor, por lo que es una consideración importante.

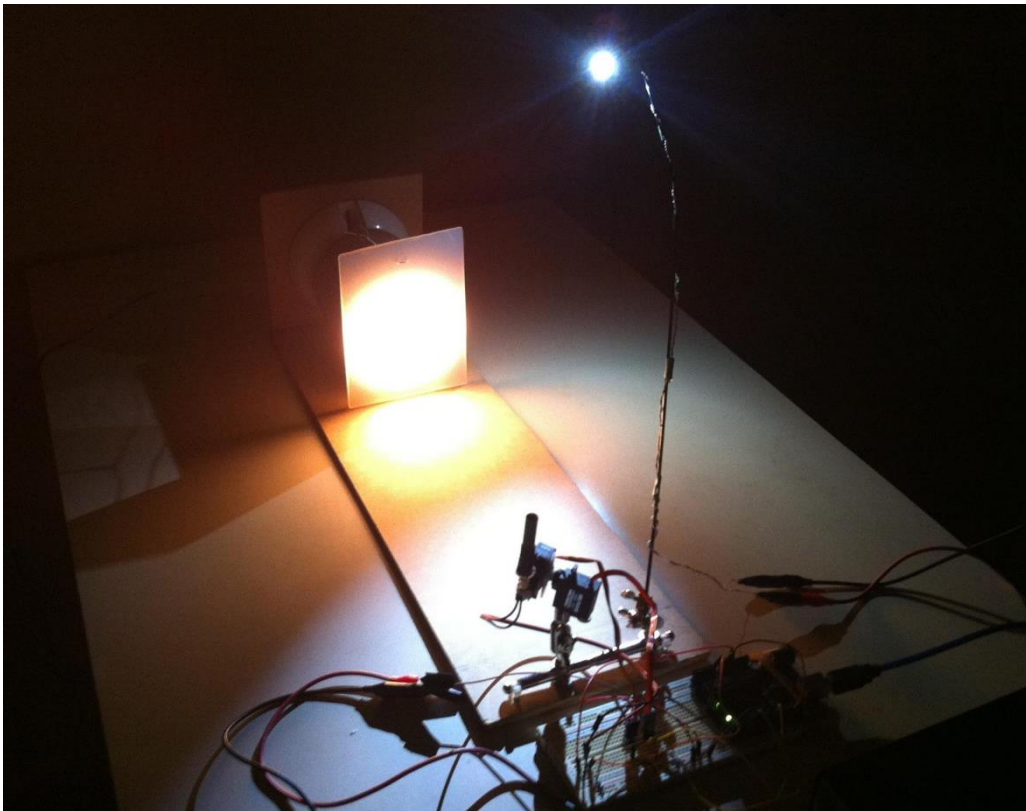
Se colocó un regulador de picos de voltaje para evitar variaciones de voltaje y para proteger las fuentes que alimentan los motores y al led de potencia que representa al Sol.

- Configuración de hardware y software

Para el monitoreo o modificación de valores o parámetros que emplea el algoritmo se puede emplear una computadora que cuente con el software o entorno de desarrollo de Arduino. Se podría implementar la modificación a estos parámetros de manera remota pero con configuración adicional y un sistema que pueda recibir y transmitir información.

Cualquier computadora con puerto USB puede monitorear la información del sensor vía serial, sin necesidad de tener la interfaz para programar el microcontrolador, sólo se necesita visualizar el puerto serial de la computadora.

## 5.2 Pruebas de funcionamiento



*Ilustración 48: Diseño de sistema de pruebas final: Tierra, Sol y Sensor de Tierra.*

Una vez que se estableció el entorno de pruebas, se puso en funcionamiento el sensor de Tierra. Después de varias pruebas salieron a relucir diferentes problemáticas. A continuación se mencionan algunas que son importantes para el buen desempeño del experimento.

1. El primer problema que se nos presentó fue obtener un movimiento de  $180^\circ$  en ambos servomotores. En las primeras pruebas que realizamos pudimos apreciar que la rotación de los ejes era menor a  $180^\circ$  y con variaciones en cada barrido, esto se solucionó introduciendo una modificación al ciclo de trabajo máximo y mínimo en cada servomotor, modificando así el ancho de los pulsos para lograr incrementos constantes en el barrido. Estos tiempos se determinaron de manera experimental hasta obtener un barrido de  $180^\circ$ . Además se decidió emplear fuentes independientes para evitar variaciones que pudieran afectar el comportamiento de los servomotores.
2. Se pretendía contener las 181 lecturas de cada barrido ( $0^\circ$  a  $180^\circ$ ) en un arreglo pero era poco práctico y complicado para procesar posteriormente. Se decidió cambiar por un arreglo actualizable de 17 o 18 elementos, los cuales son procesados antes de guardarlos en el arreglo, lo que mejora la velocidad del algoritmo y ahorra espacio de memoria.
3. El material interno del tubo empleado para discriminar debe ser un material no reflejante o que absorba la mayor cantidad de luz posible y evite reflexiones internas para así evitar nuevamente lecturas erróneas que salgan del umbral durante el barrido cuando el sensor debe encontrar a la Tierra y que reciba reflexiones del Sol que se encuentren dentro de los valores de umbrales máximo y mínimo y que lleven a una ubicación errónea de la Tierra. A su vez las medidas del tubo deben ser adecuadas a los cálculos realizados por la misma cuestión que puedan existir haces de luz que logren llegar a la fotorresistencia y causar malas mediciones y que lleven a una posición incorrecta de la Tierra.

### 5.3 Análisis de resultados

Posteriormente a la solución de las problemáticas presentadas tanto del entorno de pruebas como del sensor de Tierra, se desarrollaron varias pruebas para verificar el funcionamiento exitoso del experimento. Con el fin de lograrlo, al programa del microcontrolador Arduino se le añadieron instrucciones para recolectar los datos de intensidad luminosa que entrega el foto receptor, para posteriormente ser procesados en una hoja de datos.

Según las pruebas realizadas se espera recibir los siguientes valores en la conversión analógico-digital:

- Cero si el sensor no recibe luz.
- Cuatrocientos si el sensor detecta el Sol.
- Umbral mínimo para la detección de Tierra: 0
- Umbral máximo para la detección de Tierra: 55

En las gráficas presentadas a continuación se presentan los resultados obtenidos por el microcontrolador en cuanto a luminosidad (voltaje muestreado) y grado en el que se obtuvieron dichas medidas. Cada barrido tiene ciento ochenta y un muestras cuyo conteo no se reinicia en los barridos subsecuentes.

Se expresa en el eje horizontal de forma acumulativa los grados recorridos por el motor de elevación hasta que se encontró la Tierra, así mismo en el eje vertical se muestra la magnitud de las mediciones del voltaje de la fotorresistencia. Se muestra en Y=55 el umbral superior definido como “umbralMax” en color anaranjado respectivamente, las cuales representan el valor mínimo y el valor máximo respectivamente del rango de luminosidad en bits que usará el sensor para detectar la Tierra.

#### Prueba #1:

En esta prueba el sensor es colocado de manera frontal a la Tierra (ilustración 50), de esta manera la media esfera imaginaria que generan los barridos también se sitúa de manera frontal a la Tierra.

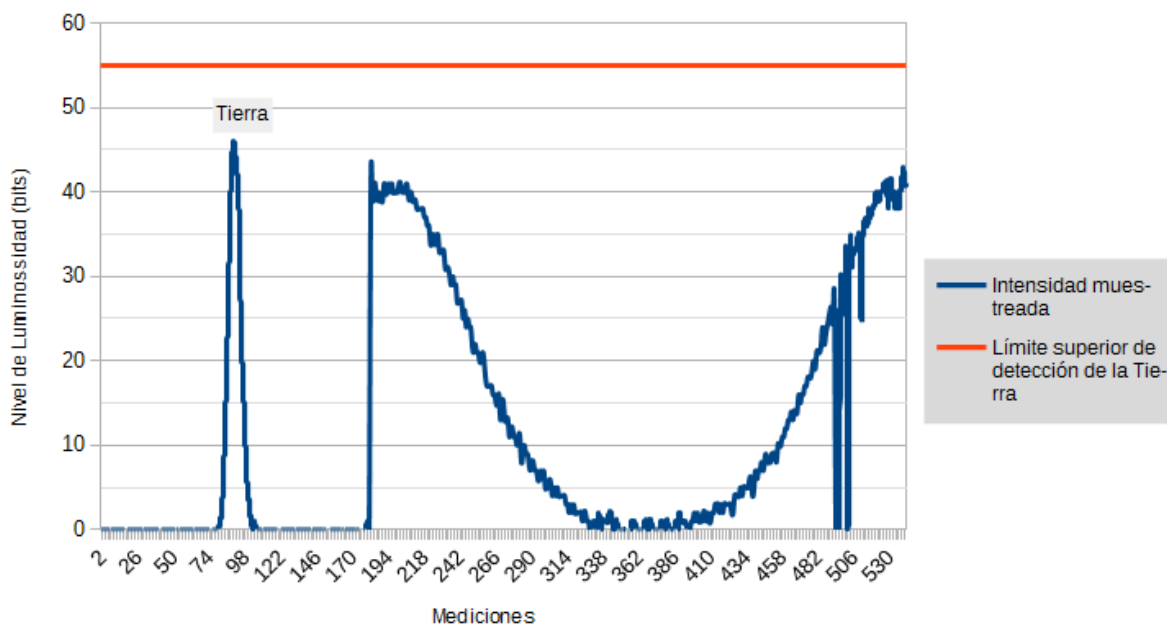


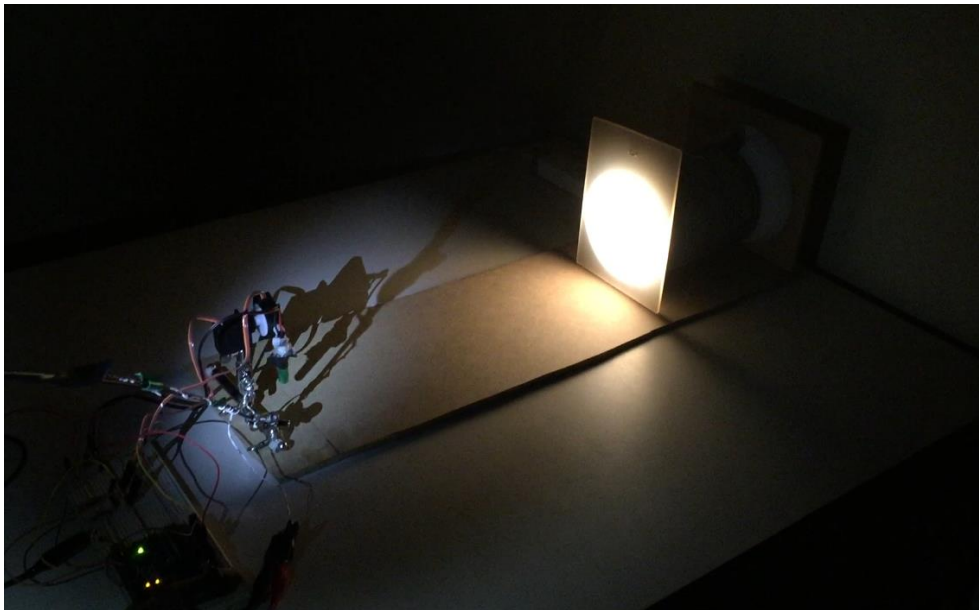
Ilustración 49: Gráfica de mediciones de la primera prueba

En esta prueba, la Tierra es encontrada durante el primer barrido, en la primera parte de la gráfica (ilustración 49) se puede apreciar que durante el primer barrido de 0° a 180° existe una medición de luminosidad que entra en el rango del umbral predeterminado en las variables y por lo que el programa determina que la Tierra fue encontrada en: 90° en elevación y 0° en azimut. En esta prueba el Sol no fue detectado por el sensor.

Este barrido cumple con la condición especial donde se requiere un barrido secundario de 360° para ubicar con mayor precisión el centro de la Tierra debido a que la Tierra fue encontrada durante el primer barrido de elevación. Lo anterior debido a que no se sabe con certeza la

ubicación exacta del centro de la Tierra, ya que podría estar hacia la derecha o hacia la izquierda de  $0^\circ$  en azimut.

Este barrido se aprecia en la segunda parte de la gráfica, se realizó este barrido en azimut partiendo de la posición en elevación donde la Tierra fue encontrada, primero en  $180^\circ$  en un sentido y  $180^\circ$  hacia el sentido opuesto moviendo el motor de elevación a la posición original  $-90^\circ$  para realizar el ciclo de  $360^\circ$  completo. Este procedimiento es llevado a cabo de esta manera debido a la limitante mecánica de los servomotores cuyo rango de movimiento es solamente  $180^\circ$ . Finalmente la Tierra es encontrada en la medición 539, correspondiente a  $182^\circ$  en azimut en la misma coordenada de elevación que en la primer parte del programa. Lo anterior se puede ver en la ilustración 51.



*Ilustración 50: Posición inicial del sensor*

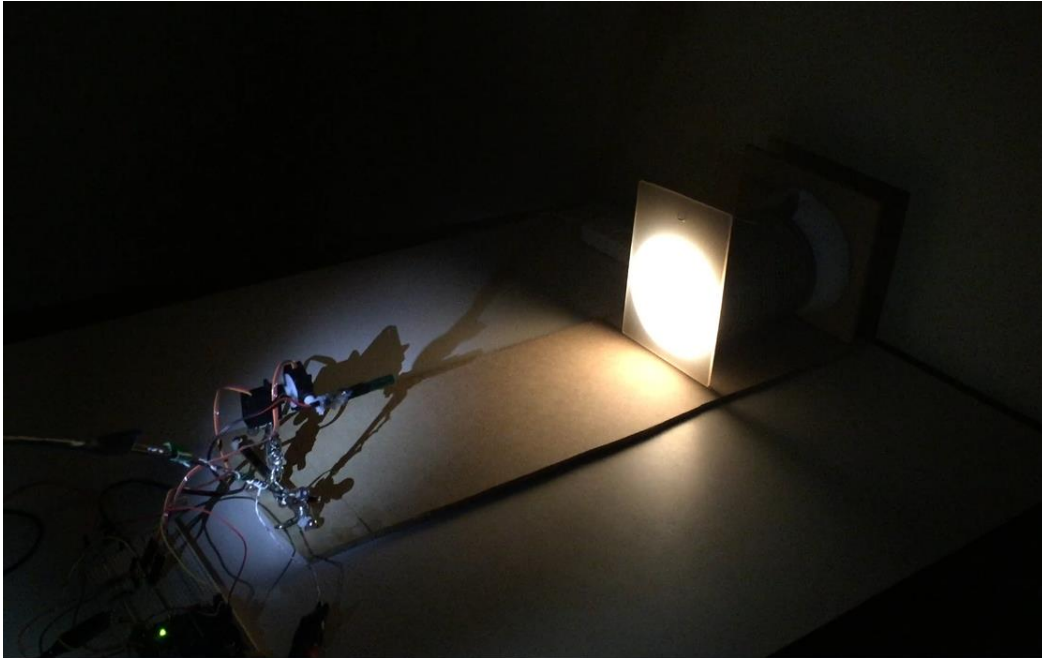


Ilustración 51: Posición donde la Tierra es ubicada después del barrido secundario

#### Prueba #2:

En esta prueba se reorientó el Sol proyectando su haz de luz de una manera más directa al sensor y también se reorientó el sensor junto con los motores teniendo la media esfera apuntando ligeramente a la izquierda de la posición anterior, por lo que la media esfera imaginaria no queda completamente frontal a la Tierra (ilustración 53).

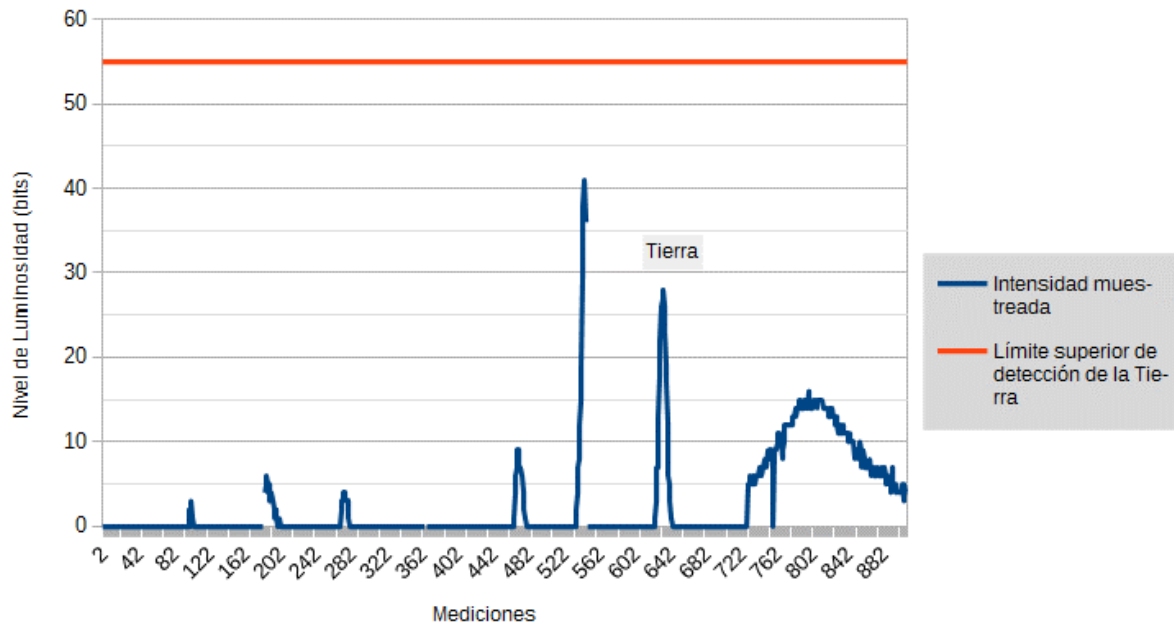


Ilustración 52: Gráfica de mediciones de la segunda prueba

En esta prueba, la Tierra es encontrada durante el cuarto barrido. En la gráfica de la ilustración 52 se aprecia el primer barrido (medición 0 - 180) y se ve una espiga con muy poca intensidad luminosa correspondiente a la Tierra.

En el segundo barrido (medición 181 - 361) lo primero que se aprecia es un haz de luz del Sol al inicio y posteriormente es una espiga de baja intensidad correspondiente a la Tierra.

En el tercer barrido (medición 362 - 542) inicialmente se aprecia una espiga cercana a las 10 unidades en la escala de nivel de luminosidad, posteriormente es un haz de luz del Sol cercano a las 40 unidades.

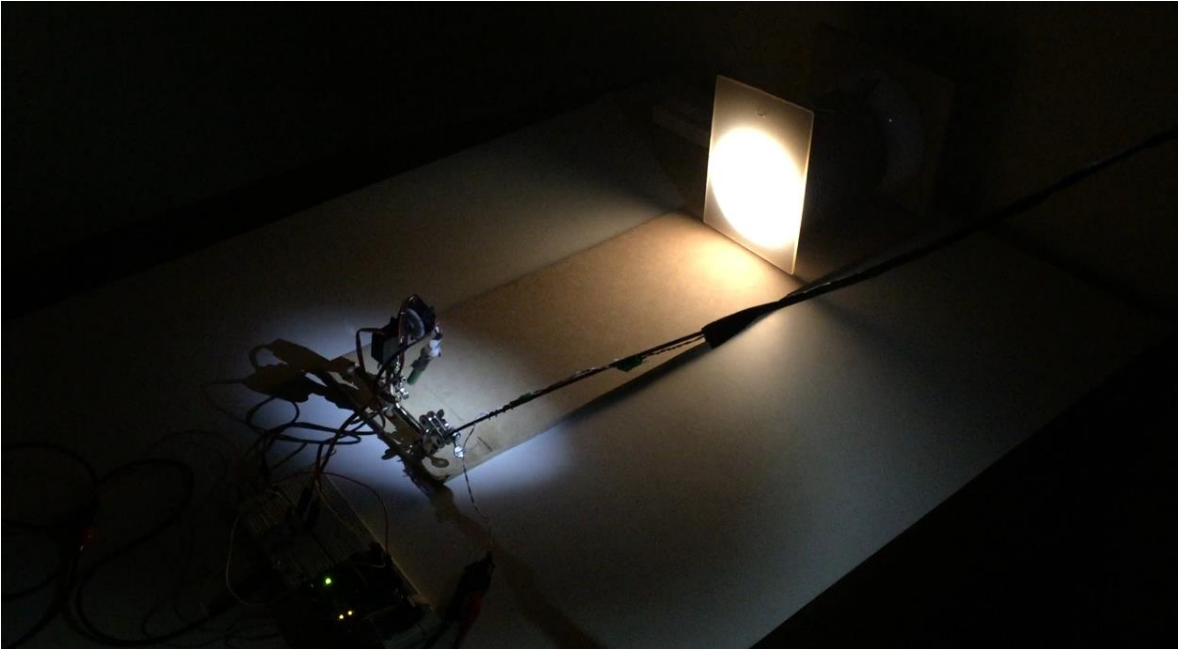
En todos estos barridos iniciales no se cumple la condición mínima de mediciones continuas del arreglo "tam" para poder apreciar y considerar alguno de esas espigas como la Tierra.

En el cuarto barrido (medición 543-723) se aprecia la espiga correspondiente a la Tierra que sí cumple con el valor mínimo para ser considerado como el cuerpo buscado; el valor máximo se encuentra en la medición 633. Por lo que se determina que la Tierra fue encontrada en:  $86^\circ$  en elevación y  $225^\circ$  en azimut. De esta posición parte la segunda parte de la gráfica y correspondiente al barrido para ubicar con mayor precisión el centro de la Tierra. En esta prueba el Sol no fue visto de manera directa pero aun así no causo interferencia en las mediciones debido a que por su tamaño es discriminado.

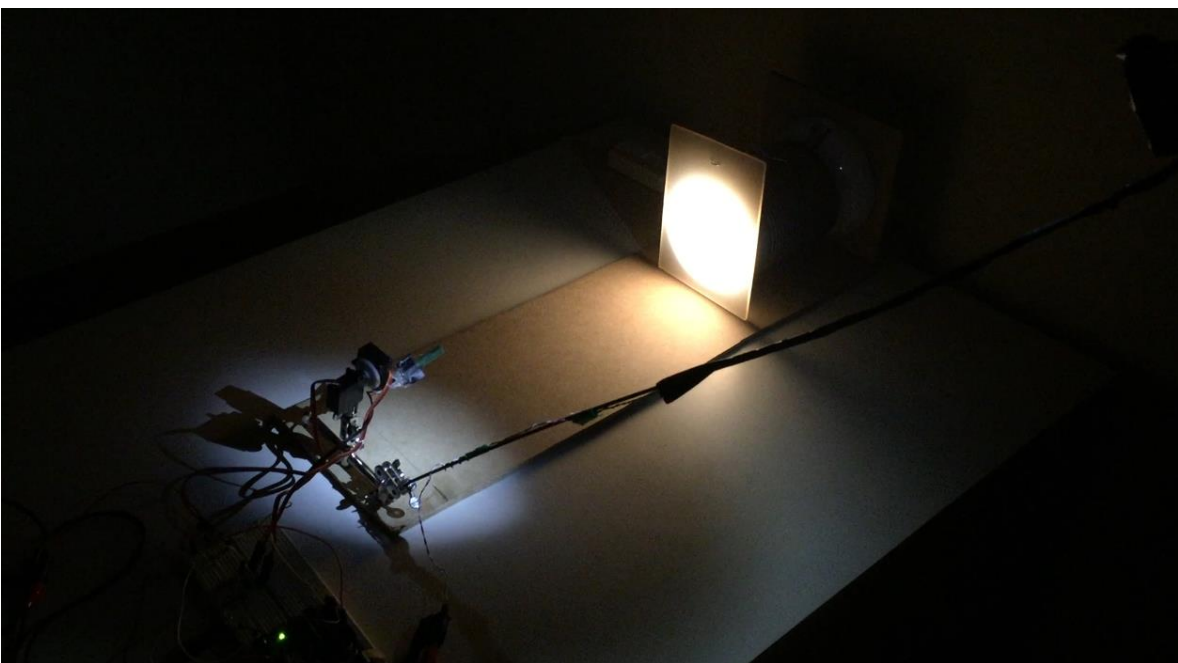
La segunda parte de la gráfica se realizó diferente a la prueba #1 esto es debido a que la Tierra no fue encontrada durante el primer barrido. En este caso sólo se realiza un barrido de  $180^\circ$  en azimut para encontrar el centro de la Tierra, tal como se explica en la fabricación del dispositivo. En esta ocasión la Tierra se encontró en la medición 797, la cual corresponde a  $69^\circ$  en azimut y  $86^\circ$  en elevación (ilustración 54).

Podría pensarse que la primera aproximación de la ubicación de la Tierra ( $86^\circ$  elevación y  $225^\circ$  azimut) no coincide con la segunda aproximación ( $86^\circ$  elevación y  $69^\circ$  azimut) en cuanto a la posición en azimut. Esto es debido a que la Tierra está ubicada casi en  $90^\circ$  en elevación, provocando que pueda haber variaciones grandes entre la primera medición (ubicación de la Tierra) y la segunda medición (ubicación del centro de la Tierra). Sin embargo la segunda medición es la que determinará de manera más exacta la ubicación de la Tierra.





*Ilustración 53: Posición inicial del sensor en segunda prueba*



*Ilustración 54: Posición donde la Tierra es ubicada después del barrido secundario*

### Prueba #3:

En esta prueba se reorientó nuevamente el Sol proyectando su haz de luz de manera vertical a al sensor, también se reorientó el sensor junto con los motores teniendo la media esfera apuntando ligeramente a la derecha teniendo como referencia la posición inicial de la prueba #1, por lo que

nuevamente la media esfera imaginaria no queda frontal a la Tierra, como se puede ver en la ilustración 56.

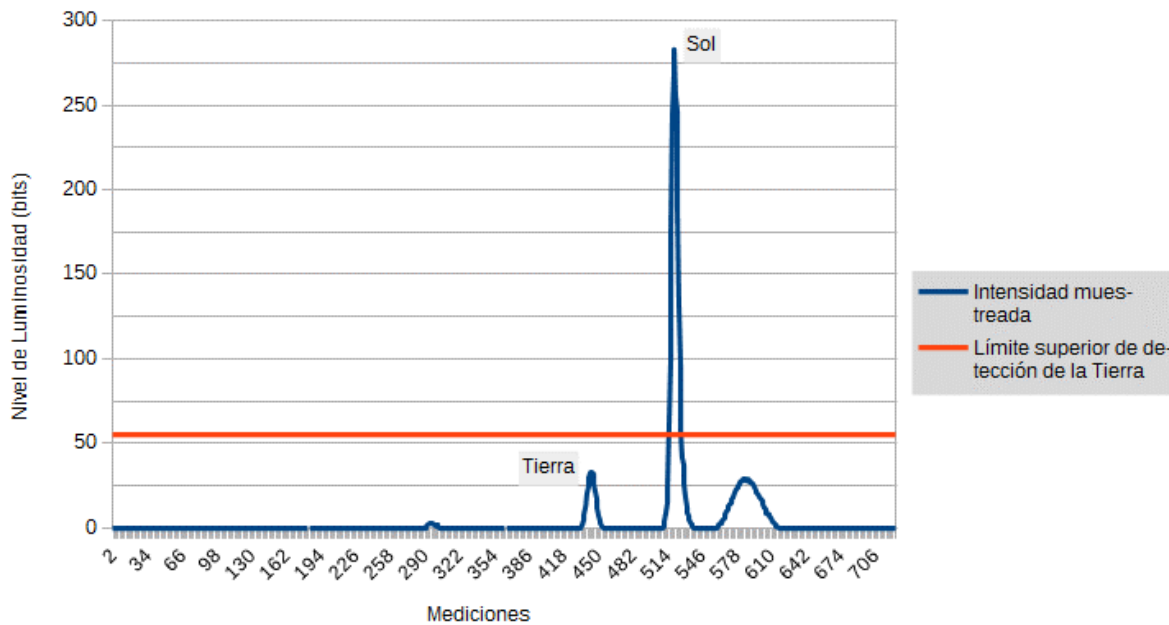


Ilustración 55: Gráfica de mediciones de la tercera prueba

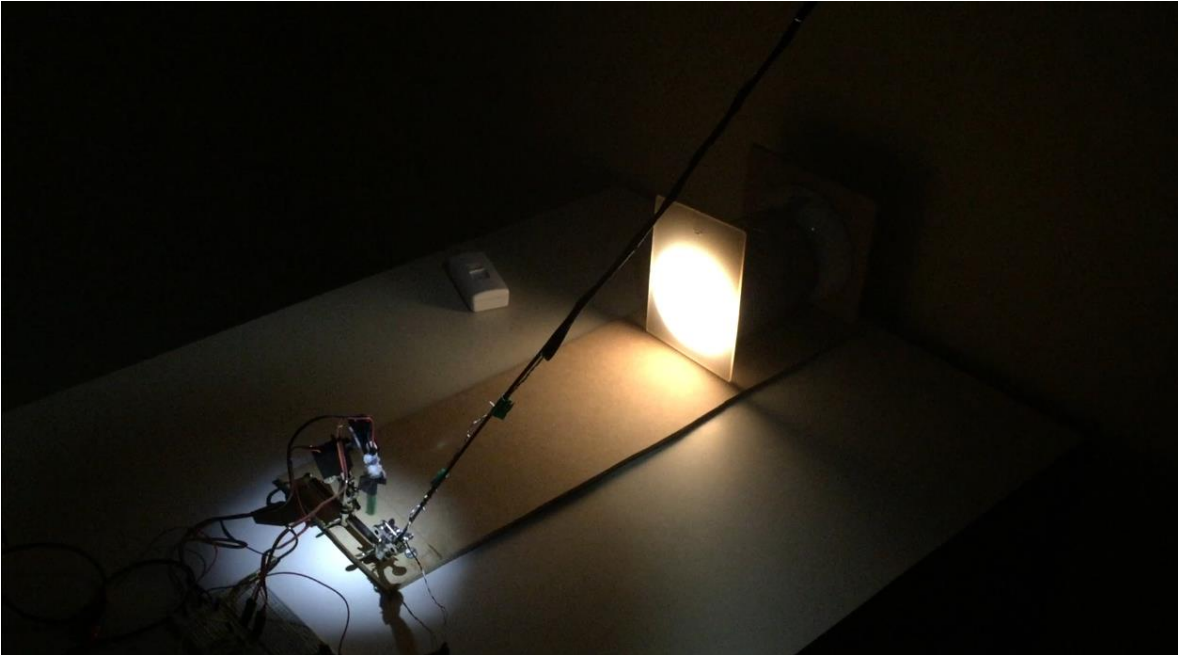
En esta prueba la Tierra es encontrada en el tercer barrido.

En la gráfica de la ilustración 55 se aprecia el primer barrido con luminosidad nula (medición 0-180).

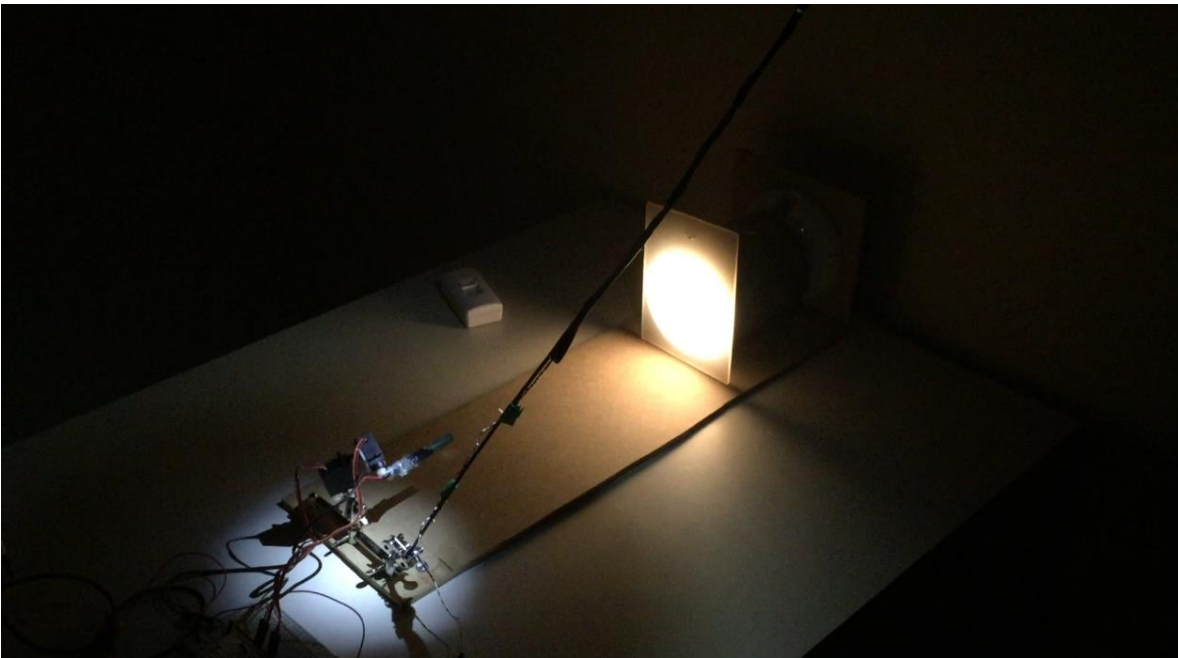
En el segundo barrido (medición 181-361) se aprecia un haz de luz muy pequeño de la Tierra o de un reflejo del Sol.

En el tercer barrido (medición 362-542) se aprecia la espiga correspondiente a la Tierra que sí cumple con el valor mínimo de la variable “tam”. El máximo alcanza menos de 50 en la escala de nivel de luminosidad y en la medición 443. Por lo que se determina que la Tierra fue encontrada en: 79° en elevación y 30° en azimut. Al final de este barrido el sensor recibe una gran cantidad de luz proveniente del Sol, aun así el sensor cumple su cometido discriminando el Sol debido a su tamaño.

De esta misma posición parte la segunda parte de la gráfica, correspondiente al barrido en azimut para hallar el centro de la Tierra. Se encuentra en la medición 585, correspondiente a 40° en azimut y 79° en elevación (ilustración 57).



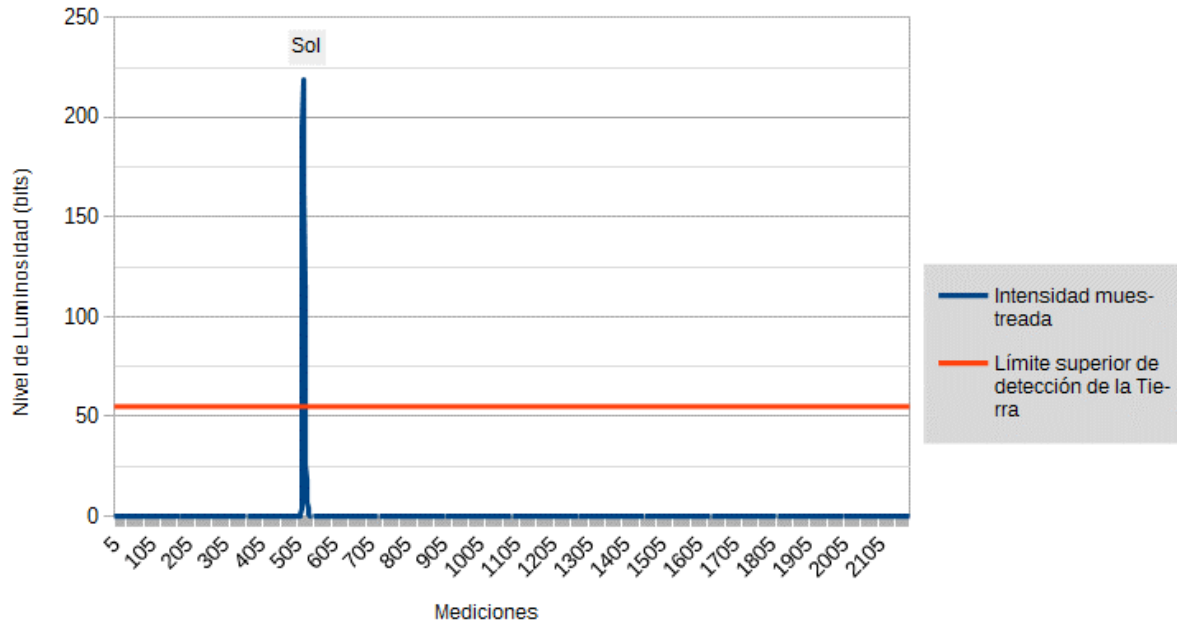
*Ilustración 56: Posición inicial del sensor en tercera prueba*



*Ilustración 57: Posición donde la Tierra es ubicada después del barrido secundario*

#### Prueba #4:

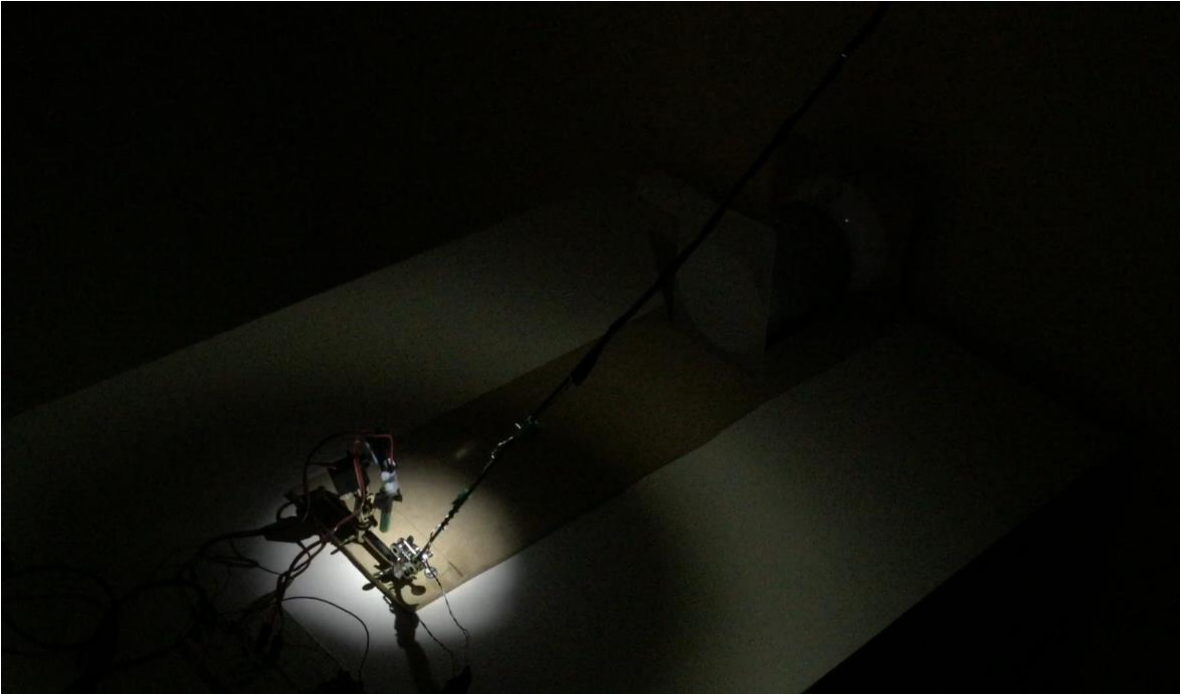
Para esta prueba se emplea la misma posición de Sol y de los motores con el sensor que en la prueba #3 pero el caso es que la Tierra es apagada por completo (ilustración 59), por lo que se espera no se encuentre y realice todos los barridos de media esfera y al no encontrarla termine el programa, y por consecuencia el barrido secundario en azimut no ocurrirá.



*Ilustración 58: Gráfica de mediciones de la cuarta prueba*

Como se mencionó, la prueba realizada con la Tierra apagada da como resultado todos los barridos de la media esfera imaginaria realizados sin obtener éxito encontrando la Tierra. Se logró ver al Sol durante el tercer barrido (362-542) pero nuevamente es discriminado como se puede observar en la gráfica de la ilustración 58. Se comprueba que sólo funciona para un cuerpo del tamaño e intensidad luminosa de la Tierra.

En esta prueba se ejecutan todos los barridos de la primera etapa, sin pasar a la segunda aproximación en azimut. El programa acaba en el décimo segundo barrido (ilustración 60).



*Ilustración 59: Posición inicial del sensor en cuarta prueba*



*Ilustración 60: Posición final en caso de que la Tierra no sea encontrada*

La configuración de hardware puede ser modificada siempre y cuando no se cambie el principio de operación del sensor, es decir los elementos mecánicos como lo son los servomotores pueden ser sustituidos por elementos de una mejor calidad y mayor precisión en el movimiento y que no requieran una modificación al código del programa, es decir motores que operen bajo un control por ancho de pulso o ciclo de trabajo de una señal. La tarjeta Arduino puede ser reemplazada por otra tarjeta Arduino de mayor o igual capacidad que la empleada (Arduino UNO), existe la posibilidad de emplear otro microcontrolador con la capacidad de generar las señales de pulsos y a su vez también realizar el análisis de las lecturas analógicas para determinar la localización de la Tierra, es decir un microcontrolador que soporte el algoritmo y que sea compatible con el entorno de programación Arduino o que acepte una versión adaptada del algoritmo y que no cambie el principio de operación del sensor.

El elemento que sería más importante considerar reemplazar sería el foto receptor ya que estos valores considerados en el umbral son los que se emplearon para probar el sensor y que sirven para esa distancia entre Tierra, Sol y satélite y que se deben mantener para la operación exitosa del sensor. Si se desea emplear un sensor de mejor calidad o precisión será necesaria la realización de pruebas que verifiquen los valores obtenidos en este ambiente y a su vez se requiere considerar su sensibilidad y el material empleado para el tubo discriminador. Además como ya se mencionó con anterioridad, el foto receptor usado en este trabajo funciona para rangos de luz visible y es utilizado para mostrar el principio de operación que se plantea en este trabajo, un foto receptor para ser montado en un satélite real debe detectar frecuencias de luz infrarroja.

#### 5.4 Conclusiones

De los resultados obtenidos en las pruebas se tiene:

- a) El dispositivo discrimina correctamente a la Tierra de otros cuerpos celestes.
- b) Se logró de manera exitosa la implementación del principio de operación y se comprobó su correcto funcionamiento ante diferentes situaciones modificando la configuración en el entorno de pruebas y la posición de los cuerpos celestes.
- c) Se comprobó que el tiempo en el que el dispositivo puede entregar un resultado es de un minuto con diez segundos.
- d) Se corroboraron los resultados obtenidos por el dispositivo discriminador de cuerpos celestes mediante un análisis realizado en hoja de cálculo y modelando su comportamiento mediante gráficas, encontrando que dicho dispositivo funciona correctamente.

## 6 Conclusiones generales

- 1) Se desarrolló un dispositivo que es capaz de discriminar la Tierra de otros cuerpos celestes mediante la identificación de la luminosidad y del radio aparente de la Tierra.
- 2) Se demostró que el principio de operación es factible y se logró aplicarlo a un dispositivo básico, el cual a través de un algoritmo de programación lleva a cabo de manera satisfactoria los principios establecidas en el principio de operación.
- 3) De la comparación de los resultados teóricos y experimentales se encontró que:
  - a) El sensor de Tierra es capaz de encontrar la Tierra en un espacio equivalente a una media esfera de visión.
  - b) Sin importar la ubicación de la Tierra dentro del rango de visión anteriormente mencionado, es posible encontrar la Tierra, la única variación será el tiempo transcurrido antes de encontrarla.
  - c) Se encontró que la velocidad de entrega de un resultado con este dispositivo es de máximo 1' 10s, en comparación a un Star tracker que es de aproximadamente 50 s y un Sensor de Tierra comercial 1'40 s.
  - d) El material utilizado al interior del tubo que delimita las lecturas del sensor no es perfectamente opaco, es decir, alcanza a reflejar una pequeña porción de la luminosidad que choca en la superficie interior del tubo. Lo anterior se refleja en el aumento de mediciones correspondientes a la Tierra, provocando que en vez de tomar 17 medidas, se tomen al 22 generalmente. Sin embargo, las imperfecciones del material se pueden ajustar al cambiar el umbral inferior de detección de la Tierra, logrando evitar efectos no deseados debidos a la reflexión.
- 4) Se desarrolló un algoritmo que realiza las funciones de control de servomotores, lectura de valores analógicos, comparación de medidas y toma de decisiones autónomo. Además, posee la ventaja de poder hacer ajustes a los umbrales de luminosidad esperados y al diámetro aparente de la Tierra. Esto dota de gran flexibilidad al sensor de Tierra ya que se puede adaptar a las variaciones previstas para estos dos factores antes mencionados.
- 5) Se conjuntó la aplicación de control de movimiento de servomotores y la aplicación de detección analógica de intensidad luminosa para lograr encontrar la Tierra y las coordenadas en azimut y elevación de los servomotores respectivamente, que se obtengan cuando se localice la Tierra. Al realizar el proyecto con la tarjeta Arduino se obtuvo un diseño e implementación satisfactorios y que cumple con el objetivo y principio de operación del sensor de Tierra propuesto.

## 7 Referencias

- Capítulo 1

Gordon Gary D. y Walter L. Morgan, *Principles of Communications Satellites*, Wiley, 1993.

Maral Gérard, y Bousquet Michel, *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques, and Technology*, Wiley, 2002.

Ippolito Louis J., *Satellite Communications Systems Engineering: Atmospheric Effects, Satellite Link Design, and System Performance*, Wiley, 2008.

Evans et al., *1945–2010: 65 Years of Satellite History from Early Visions to Latest Missions*, Proceedings of the IEEE. vol. 99 num. 11 (2011) 1840-1857.

Global Change Master Directory, *Ancillary Description Writer's Guide*, National Aeronautics and Space Administration, 2015. <http://gcmd.nasa.gov/add/ancillaryguide>

- Imágenes

1 - Sistema de comunicaciones por satélite. <http://wikitel.info/wiki/Imagen:Enlaces.JPG>

3 - Bartkowiak Hubert, *Hohmann transfer orbit*.

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hohmann\\_transfer\\_orbit.svg\mediaviewer/File:Hohmann\\_transfer\\_orbit.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hohmann_transfer_orbit.svg\mediaviewer/File:Hohmann_transfer_orbit.svg)

- Capítulo 2

K. Ghose, H.R. Shea, *Fabrication and Testing of a MEMs based Earth Sensor*, IEEE, 2009.

Kunio Nakamura et al., *Pyroelectric Infrared Detector for Precision Earth Sensor*, International Journal of Infrared and Millimeter Waves. Vol. 10, No. 8, 1989.

Falbel, Gerald, *A low weight/power/cost Infrared Earth Sensor*, IEEE, 2004.

- Imágenes

5 - K. Ghose, H.R. Shea, *Fabrication and Testing of a MEMs based Earth Sensor*, IEEE, 2009.

6,7,8 - Kunio Nakamura et al., *Pyroelectric Infrared Detector for Precision Earth Sensor*, International Journal of Infrared and Millimeter Waves. Vol. 10, No. 8, 1989.

9 - Falbel, Gerald, *A low weight/power/cost Infrared Earth Sensor*, IEEE, 2004.

- Capítulo 3

Yusuf Abdullahi Badamasi, *The Working Principle of an Arduino*, Nigerian Turkish Nile University, IEEE, 2014.

Arduino UNO Wiki. <http://arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/ArduinoBoardUno>

- Imágenes

Arduino.cc: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>



- Capítulo 4

Richharia M., *Satellite Communications Systems, Design Principles*, McGraw-Hill, 1995.

Iida Takashi et al., *Wave Summit Course: Satellite Communications*, Ohmsha, 2000.

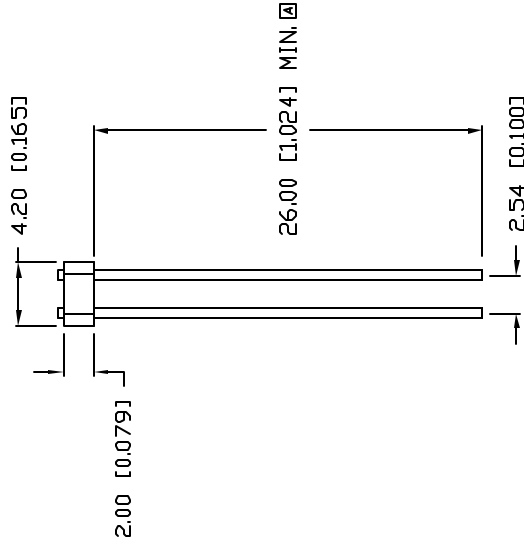
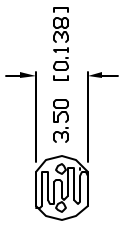
Maini Anil K. y Agrawal Varsha, *Satellite Technology: Principles and Applications*, 2a ed, Wiley, 2011.

Kosow Irving, *Máquinas eléctricas y transformadores*, Pearson Educación, 1993.

Couch Leon W., *Digital and Analog Communication Systems*, 6a ed, Prentice Hall, 2001.

## 8 Anexos

PART NUMBER		REV.
OED-PCC-9P5-1L		A
E.C.N. NUMBER AND REVISION COMMENTS		DATE
A E.C.N. #10902.		08.26.02



ARIATION OF CONDUCTANCE WITH TEMPERATURE AND LIGHT

LUX	0.1	1.0	10	100	1000
TEMPERATURE	% CONDUCTANCE				
-25 °C	117	108	98	95	96
0 °C	105	102	96	95	97
25 °C	100	100	100	100	100
50 °C	96	95	101	106	104
75 °C	82	81	98	111	110

RESPONSE TIME VERSUS LIGHT

LUX	0.1	1.0	10	100	1000
RISE (SECONDS)	5.80	0.82	0.140	0.035	0.010
DECAY (SECONDS)	2.96	0.56	0.110	0.043	0.014

PEAK RESPONSE WAVELENGTH (nm)	RESISTANCE (K ohm) TO LUX		MIN DARK RESISTANCE AFTER 2 SECS.	MAX VOLTAGE RATING (PEAK AC) (volts)	MEASUREMENT VOLTAGE (volts)
	MIN	MAX			
550	25	60	2.0 (Mega ohm)	100	10

NOTES:

- TEMPERATURE RANGE: -25°C TO +75°C
- MAXIMUM POWER: 125mW

UNCONTROLLED DOCUMENT

\*UNLESS OTHERWISE SPECIFIED TOLERANCES PER DECIMAL PRECISION ARE: X=#1 (+0.039), X.X=#10.5 (+0.020), X.XX=#10.25 (+0.010), X.XXX=#10.127 (+0.006), LEAD SIZE=#0.06 (+0.002), LEAD LENGTH=#0.76 (+0.030), MIN. = -0.00

CONFIDENTIAL INFORMATION  
 THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE PROPERTY OF LUMEX INC. EXCEPT AS SPECIFICALLY AUTHORIZED IN WRITING BY LUMEX INC, THE HOLDER OF THIS DOCUMENT SHALL KEEP ALL INFORMATION CONTAINED HEREIN CONFIDENTIAL AND SHALL PROTECT SAME IN WHOLE OR IN PART FROM DISCLOSURE AND DISSEMINATION TO ALL THIRD PARTIES.  
 RELIABILITY NOTE  
 OUR MANY YEARS OF EXPERIENCE DATA ACCUMULATION INDICATE THAT SOLDER HEAT IS A MAJOR CAUSE OF EARLY AND FUTURE FAILURE. PLEASE PAY ATTENTION TO YOUR SOLDERING PROCESS.



290 E. HELEN ROAD  
 PALATINE, IL 60067-6976  
 PHONE: +1.847.359.2790  
 US WEB: www.lumex.com  
 TW WEB: www.lumex.com.tw

DATE: 2.1.96  
 PAGE: 1 OF 2  
 SCALE: N/A

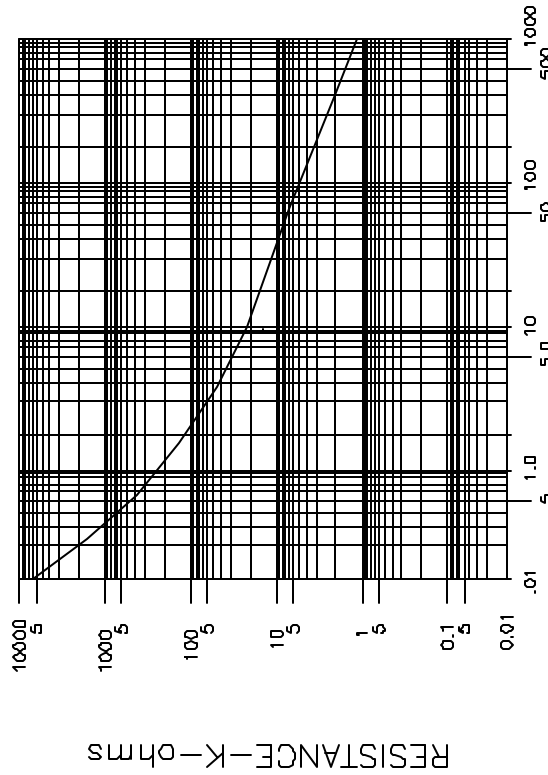
REV.	PART NUMBER
A	OED-PCC-9P5-1L

PHOTOCONDUCTIVE CELL.

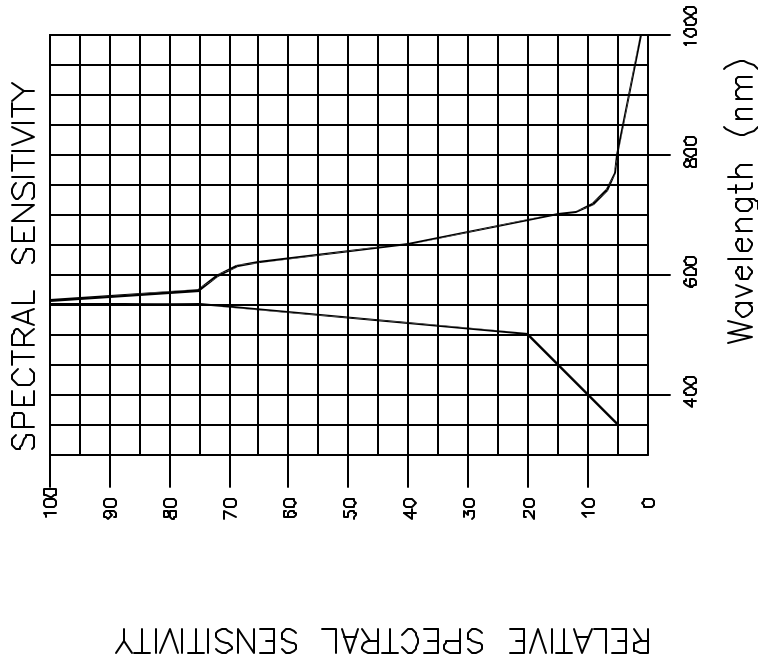
DRAWN BY:	CHECKED BY:	APPROVED BY:

PART NUMBER		REV.
OED-PCC-9P5-1L		A
REV.	E.C.N. NUMBER AND REVISION COMMENTS	DATE
A	E.C.N. #10BRDR. & 10902.	8.26.02

CELL RESISTANCE CURVES WITH VARIABLE ILLUMINATION



Illumination - Lux



UNCONTROLLED DOCUMENT

\*UNLESS OTHERWISE SPECIFIED TOLERANCES PER DECIMAL PRECISION ARE: X=#1 (+0.038), X.X=#0.5 (+0.020), X.XX=#0.25 (+0.010), X.XXX=#0.127 (+0.006), LEAD SIZE=#0.05 (+0.002), LEAD LENGTH=#0.75 (+0.030), MIN.= -0.00 (+0.000), MAX.= -0.00 (-0.000) DECIMAL PRECISION

CONFIDENTIAL INFORMATION  
 THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE PROPERTY OF LUMEX INC. EXCEPT AS SPECIFICALLY AUTHORIZED IN WRITING BY LUMEX INC., THE HOLDER OF THIS DOCUMENT SHALL KEEP ALL INFORMATION CONTAINED HEREIN CONFIDENTIAL AND SHALL PROTECT SAME IN WHOLE OR IN PART FROM DISCLOSURE AND DISSEMINATION TO ALL THIRD PARTIES.  
 RELIABILITY NOTICE  
 OUR MANY YEARS OF EXPERIENCE DATA ACCUMULATION INDICATE THAT SOLDER HEAT IS A MAJOR CAUSE OF EARLY AND FUTURE FAILURE PLEASE PAY ATTENTION TO YOUR SOLDERING PROCESS.

REV.	PART NUMBER
A	OED-PCC-9P5-1L

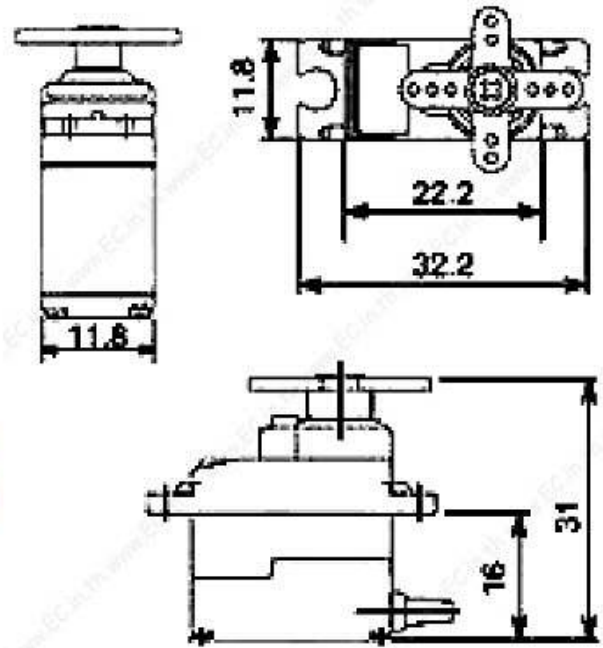
PHOTOCONDUCTIVE CELL.

DRAWN BY:		CHECKED BY:	APPROVED BY:	DATE:
				2.1.96
				PAGE: 2 OF 2
				SCALE: N/A



290 E. HELEN ROAD  
 PALATINE, IL 60067-6976  
 PHONE: +1.847.359.2790  
 US WEB: www.lumex.com  
 TW WEB: www.lumex.com.tw

# SG90 9 g Micro Servo

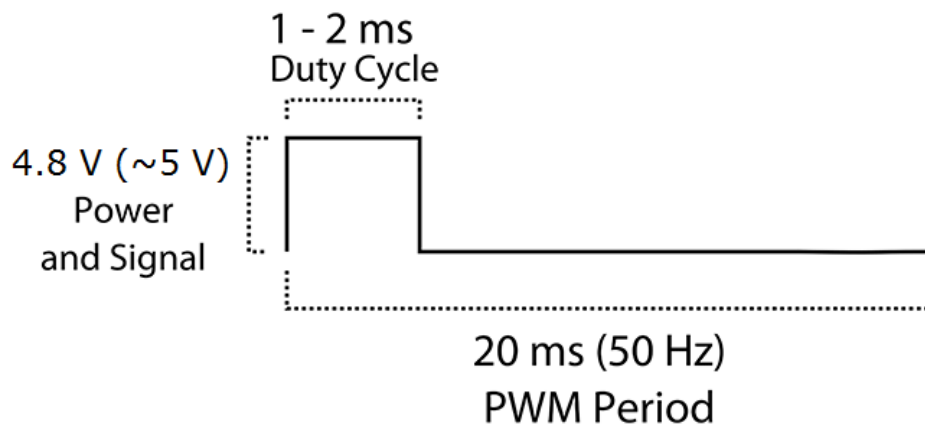
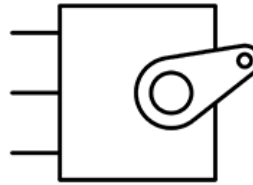


Tiny and lightweight with high output power. Servo can rotate approximately 180 degrees (90 in each direction), and works just like the standard kinds but *smaller*. You can use any servo code, hardware or library to control these servos. Good for beginners who want to make stuff move without building a motor controller with feedback & gear box, especially since it will fit in small places. It comes with a 3 horns (arms) and hardware.

## Specifications

- Weight: 9 g
- Dimension: 22.2 x 11.8 x 31 mm approx.
- Stall torque: 1.8 kgf·cm
- Operating speed: 0.1 s/60 degree
- Operating voltage: 4.8 V (~5V)
- Dead band width: 10  $\mu$ s
- Temperature range: 0 °C – 55 °C

PWM=Orange (  $\square$  )  
Vcc = Red ( + )  
Ground=Brown ( - )



Position "0" (1.5 ms pulse) is middle, "90" (~2 ms pulse) is all the way to the right, "-90" (~1 ms pulse) is all the way to the left.