

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CODIFICADOR DE
ÁNGULO A SEÑAL DIGITAL PARA EL POSICIONAMIENTO DEL
RADIOTELESCOPIO RT-3

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Felipe Ernesto Carrero Muñoz

ASESOR: Dr. Jorge Heraud Pérez

Lima, agosto del 2012

RESUMEN

La radiociencia y, más puntualmente, la radioastronomía estudian fenómenos astrofísicos en cuerpos muy lejanos en el universo. Para esto, se requieren instrumentos apropiados que permitan realizar dichos estudios con el mayor rigor, de modo que los resultados sean científicamente contrastables.

En este marco, el Instituto de Radioastronomía de la Pontificia Universidad Católica del Perú ha desarrollado un radiotelescopio de tres metros de diámetro para el estudio de los fenómenos astrofísicos, interferometría, comunicaciones, entre otros, denominado RT-3. Sin embargo, para que sea posible el empleo de este radiotelescopio, tanto con fines de investigación o educativos, es necesario que sus movimientos sean controlados con precisión.

El objetivo general de la tesis es diseñar e implementar un prototipo funcional de un sensor digital de posición angular, el que obtendrá información del posicionamiento del eje del radiotelescopio para su transmisión digital hacia un sistema central de control.

En el capítulo 1, se hace una reseña sobre la radioastronomía; además, se realiza una breve descripción de dos sistemas de coordenadas empleados en radioastronomía. Para concluir el capítulo, se incluirá información básica sobre radiotelescopios, citando sus parámetros más importantes y describiendo sus partes y funcionamiento.

En el capítulo 2, se realizará una introducción a los sensores de posición, resaltando las variantes que existen en ese ámbito, pero profundizando específicamente en los sensores de posición angular absolutos. Además, en el apartado del estado del arte, se mostrarán las características de algunos dispositivos comerciales y se evaluará el estado de la tecnología de los sensores de posición angular absolutos.

En el capítulo 3, se revisa el diseño e implementación de las tarjetas requeridas para esta tesis, haciendo una detallada descripción de las consideraciones para cada una y los criterios de diseño y de elección de componentes que se tomaron para cada parte.

En el capítulo 4, se hace una revisión de las pruebas que se realizaron para constatar el funcionamiento correcto del sensor de posicionamiento. Además, se listan las conclusiones y recomendaciones ligadas al desarrollo de esta tesis.



FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño e implementación de un codificador de ángulo a señal digital para el posicionamiento del radiotelescopio RT-3

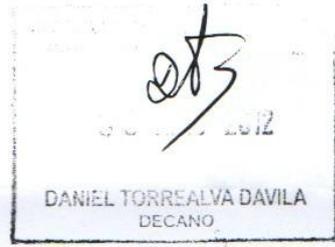
Área : Electrónica # 995

Asesor : Jorge Heraud Pérez

Alumno : Felipe Carrero Muñoz

Código : 20064485

Fecha : 04-04-12



Descripción y Objetivos

La radiociencia y, más puntualmente, la radioastronomía estudian fenómenos astrofísicos en cuerpos muy lejanos en el universo. Para esto, se requieren instrumentos apropiados que permitan realizar dichos estudios con la mayor precisión, de modo que los resultados sean científicamente contrastables.

En este marco, el Instituto de Radioastronomía de la Pontificia Universidad Católica del Perú ha desarrollado un radiotelescopio de tres metros de diámetro para el estudio de fenómenos astrofísicos, interferometría, comunicaciones, entre otros, denominado RT-3. Sin embargo, para que sea posible el empleo de este radiotelescopio, tanto con fines de investigación o educativos, es necesario que sus movimientos sean controlados con precisión.

El objetivo general de la tesis es implementar un prototipo funcional de un sensor digital de posición angular, el que obtendrá información del posicionamiento del eje del radiotelescopio y transmitirá esa información de manera digital hacia un sistema central de control. Debido a los requerimientos que derivan de las tareas que realizará el telescopio, se tiene un valor mínimo de precisión que deberá alcanzarse con el sensor y que repercutirá de forma importante en su operación.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

[Handwritten Signature]

Dr. Ing. BENJAMÍN CASTAÑEDA APHAN
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

MÁXIMO 50 PÁGINAS

FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño e implementación de un codificador de ángulo a señal digital para el posicionamiento del radiotelescopio RT-3

Índice

Introducción

1. El radiotelescopio
2. Sensor de posicionamiento
3. Diseño e implementación del sensor de posicionamiento
4. Pruebas y resultados de la implementación del sensor de posicionamiento

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

Jorge Heron
P. Andrés López
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Dr. Ing. BENJAMÍN CASTAÑEDA APHAN
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

A
MÁXIMO 50 PÁGINAS

Dedicado a mis padres, porque este
paso fue posible gracias al apoyo
incondicional que me han dado
siempre.

¡Gracias por todo!



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo 1: El radiotelescopio	
1.1 Introducción a la radioastronomía.....	2
1.1.1 Sistemas de coordenadas.....	3
1.1.1.1 Sistema de coordenadas horizontales.....	3
1.1.1.2 Sistema de coordenadas ecuatoriales.....	4
1.2 El radiotelescopio.....	7
1.2.1 Parámetros de un radiotelescopio.....	7
1.2.2 Partes de un radiotelescopio.....	9
Capítulo 2: Sensor de posicionamiento	
2.1 Marco teórico.....	12
2.1.1 Introducción a los sensores de posición.....	12
2.1.2 Clasificación de los sensores de posición.....	12
2.1.3 Sensores de posición angular.....	13
2.1.3.1 Sensores Incrementales.....	14
2.1.3.2 Sensores absolutos.....	14
2.2 Estado del arte.....	17
2.2.1 Presentación del asunto en estudio.....	17
2.2.2 Estado de la investigación.....	17
2.2.2.1 Síntesis del estado de la investigación.....	21

Capítulo 3: Diseño e implementación del sensor de posicionamiento

3.1	Objetivos.....	22
3.1.1	Objetivo General.....	22
3.1.2	Objetivos Específicos.....	22
3.2	Alcances del sistema.....	22
3.3	Diseño e implementación del sistema.....	23
3.3.1	Requerimientos del sistema.....	23
3.3.2	Diseño e implementación del hardware.....	26
3.3.2.1	Diseño del disco codificado.....	27
3.3.2.2	Diseño del fotorreceptor.....	29
3.3.2.3	Diseño del fotoemisor.....	35
3.3.2.4	Diseño de la tarjeta de pre-procesamiento.....	38
3.3.2.5	Diseño de la tarjeta de procesamiento.....	45
3.3.2.5.1	Diseño del software.....	49
3.3.3	Diseño mecánico del chasis y montaje.....	55

Capítulo 4: Pruebas y resultados de la implementación del sensor de posicionamiento

4.1	Resumen de pruebas.....	58
4.1.1	Pruebas individuales del sistema.....	58
4.1.2	Pruebas del sistema integrado.....	64
4.1.3	Prueba final del sistema.....	70
4.2	Resultados y conclusiones.....	72
4.3	Recomendaciones y trabajos a futuro.....	73

LISTADO DE ANEXOS

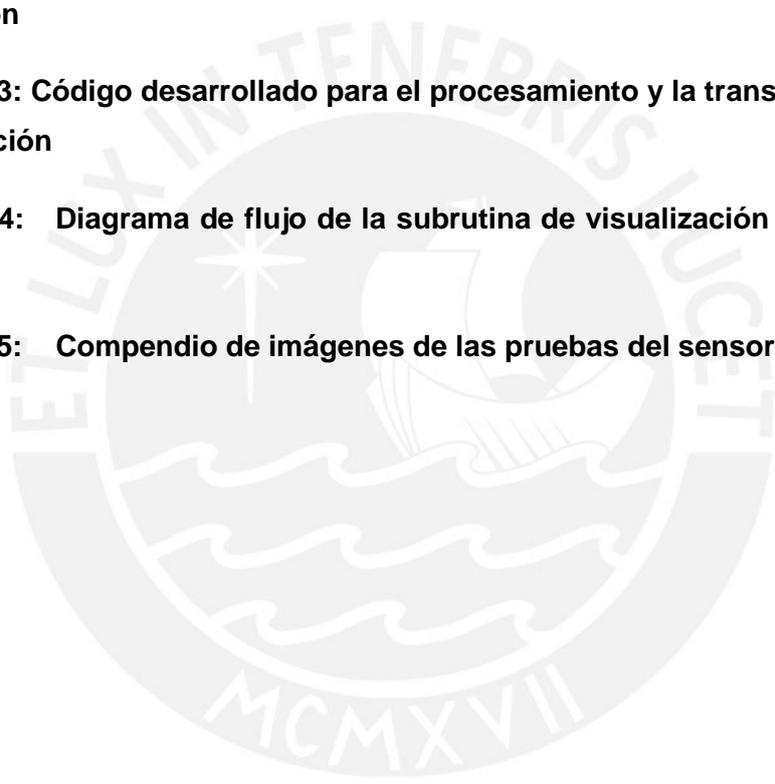
Anexo 1: Diseño del disco codificado

Anexo 2: Código desarrollado para el procesamiento y visualización de la posición

Anexo 3: Código desarrollado para el procesamiento y la transmisión serial de la posición

Anexo 4: Diagrama de flujo de la subrutina de visualización de dígitos en el LCD

Anexo 5: Compendio de imágenes de las pruebas del sensor



INTRODUCCIÓN

El control de posición de sistemas es una de las bases que permite el progreso de ámbitos como manufactura, robótica, medición, entre otros. Con esa base, las compañías dedicadas al desarrollo de los sensores de posición, que se utilizan para el control, realizan investigaciones en búsqueda de avances tecnológicos que beneficien a dichos ámbitos. El grupo dedicado a sensores de posición angular no es ajeno a este esfuerzo y ha permitido el desarrollo de dispositivos cada vez más precisos.

En nuestro país, existen pocos distribuidores de sensores de posición angular, que importan escasa variedad y a precios bastante más elevados que en el mercado internacional. Estos sensores cuentan con características óptimas para condiciones de trabajo industriales – por ejemplo, resistencia a vibración extrema, resistencia a explosiones, etc. -, las que incrementan su costo y podrían ser obviadas para aplicaciones que se desarrollen en entornos de trabajo menos agrestes. Asimismo, su costo también se eleva conforme la precisión aumenta, por lo que aplicaciones que no requieran de alta resolución podrían prescindir de los sensores de gamas más altas o, en última instancia, preferir sensores desarrollados manualmente frente a alternativas industriales.

Por otro lado, el instituto de Radioastronomía de la Pontificia Universidad Católica del Perú ha desarrollado un radiotelescopio que tendrá diversos fines, como interferometría, estudio astrofísico y estudio de objetos celestes, entre otros. Para ello, sus movimientos deberán ser controlados con precisión para que los resultados sean los esperados. El control de esta antena, entonces, requerirá la implementación de un sistema integrado que registre su apuntamiento a través sensores de posición angular, los que obtendrán información del posicionamiento de sus ejes.

En este marco, el objetivo principal de esta tesis es la implementación de un sensor de posición angular, el que permitirá, aunado a otros sistemas, realizar el movimiento controlado y preciso de los ejes del radiotelescopio; además, esto proveerá a dicho proceso con un sensor digital que, pese a no tener características de clase industrial como los dispositivos comerciales más especializados, optimizará los procesos de control del radiotelescopio mediante el uso de señales digitales, las que brindan facilidad de procesamiento e inmunidad a ruido a un sistema donde estos factores son importantes.

CAPÍTULO 1: EL RADIOTELESCOPIO

1.1 Introducción a la radioastronomía

El origen de la radioastronomía se remonta a las épocas de Karl Jansky, un ingeniero de una conocida compañía dedicada al rubro de la telefonía, quien estudiaba la naturaleza de ruidos que interferían las comunicaciones cuando utilizaba una antena direccional y un equipo receptor. Es así como descubrió, en 1932, una intensa fuente de ruido localizada en una determinada zona del cielo, la que se repetía con la misma posición de la antena aproximadamente cada 23 horas y 56 minutos. De esa forma, Jansky había observado radiación proveniente del centro de nuestra galaxia, realizando la primera observación radioastronómica y estableciendo las bases para una nueva manera de estudiar el universo. Más adelante, Grote Reber, interesado por los hallazgos de Jansky, construye en su casa la primera antena dedicada a fines astronómicos utilizando un reflector parabólico, el que sería adoptado, en lo sucesivo, por la gran mayoría de radio observatorios. [1]

Hasta hace algunas décadas, el conocimiento del hombre acerca del universo provenía de fuentes enteramente ópticas a través de telescopios, lo que se denomina ahora la astronomía óptica. Sin embargo, las últimas cinco décadas de observaciones astronómicas en el espectro electromagnético del radio han creado una nueva rama de la astronomía, denominada radioastronomía.

Podemos definir a la radioastronomía como la ciencia dedicada al estudio de objetos distantes, grandes y energéticos en el universo mediante la recolección y análisis de las ondas de radio emitidas por dichos objetos. Esta ciencia, involucra una gran variedad de temas, desde fenómenos astrofísicos, hasta el diseño de receptores y antenas. Con la inclusión de esta rama, la astronomía tiene en su repertorio la observación de todo el espectro electromagnético, desde rayos gama de alta energía hasta ondas de muy baja frecuencia; todo esto a su vez, habiendo originado nuevas ramas de la astronomía, como la astronomía ultravioleta e infrarroja.

Actualmente, mediante la interferometría, la radioastronomía es incluso capaz de crear imágenes utilizando dichas ondas de radio, llegando incluso, a veces, a alcanzar mejor resolución y claridad que una imagen obtenida mediante métodos ópticos. [2] Adicionalmente, la radioastronomía ha sido capaz incrementar el conocimiento sobre objetos familiares, como el sol, y sobre otros objetos más

enigmáticos, como núcleos activos de galaxias y remanentes de supernovas; además, también ha dado un vuelco a nuestros conocimientos al relevar algunos nuevos e inesperados fenómenos como pulsares y quásares. [3] La radioastronomía contribuye al conocimiento científico de maneras en que pocos métodos podrían hacerlo, mediante, por ejemplo, la investigación la energía remanente del Big Bang y la detección en el espectro del radio de ráfagas de rayos gama, por mencionar algunos estudios importantes. [4]

1.1.1 Sistemas de coordenadas

Una de las bases para el estudio de fenómenos que se encuentran a gran distancia de nuestro planeta es la determinación su posición. Para este fin, es necesario tener nociones sobre sistemas de coordenadas que se emplean tanto en la astronomía y radioastronomía, así como en otras áreas afines.

Esencialmente, un sistema de coordenadas nos permite conocer la orientación y determinación de puntos en base a referencias comunes; sin embargo existen varios sistemas de coordenadas que pueden ser empleadas para la determinación de objetos celestes. A continuación, se procederá a hacer la descripción del sistema que se emplea en el radiotelescopio RT-3, del Instituto de Radioastronomía, sistema de coordenadas horizontales, y otro tipo de sistema empleado con frecuencia en radioastronomía, coordenadas ecuatoriales.

1.1.1.2 Sistema de coordenadas horizontales

También llamado sistema de coordenadas alt-azimutales. Para definir este sistema es necesario precisar previamente ciertos conceptos. [1] Cada concepto está asociado al sistema de coordenadas horizontales y será referenciado más adelante:

- Círculo máximo: Circunferencia obtenida del cruce de una esfera y un plano, pasando este último por el centro de la esfera.
- Zenit: En astronomía, es el punto ubicado exactamente encima de un observador.
- Azimut: Ángulo entre el norte del observador y el cruce del círculo de la fuente con el plano de referencia.
- Elevación: Ángulo medido hace arriba desde el horizonte hacia el objeto.

La referencia de este sistema se basa en un plano paralelo al horizonte que pasa por el punto de observación donde se encuentra el observador. En la figura 1.1, se puede observar que uno de los polos corresponde al zenit. El círculo vertical que cruza al objeto celeste y al zenit es el círculo de la fuente, mientras que el círculo máximo que cruza el zenit y une al punto norte con el punto sur se conoce como círculo meridiano. [1] Las coordenadas de cualquier objeto se expresan mediante el azimut y la elevación, determinadas en grados, minutos y segundos de arco.

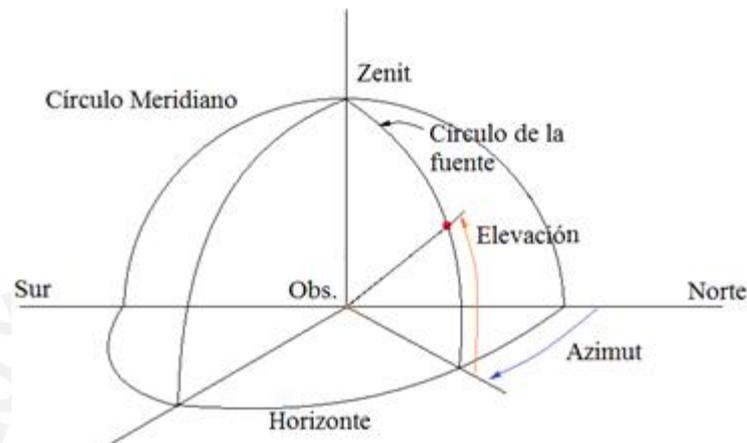


Figura 1.1: Sistema de coordenadas horizontales

Fuente: Elaboración propia

Las coordenadas de un objeto celeste en el sistema horizontal cambian continuamente durante el día debido a la rotación terrestre.

1.1.1.2 Sistema de coordenadas ecuatoriales

Empleadas para sistemas cuyo eje de ascensión recta está alineado con el eje de rotación terrestre. [1] Para definir este sistema es necesario precisar previamente ciertos conceptos. Cada concepto está asociado al sistema de coordenadas ecuatoriales y será referenciado en la figura 1.2 más adelante.

- Esfera celeste: Una superficie imaginaria esférica con la tierra en su centro, ubicada a una gran distancia del centro del planeta, donde los objetos celestes tienen fijas sus coordenadas.

- Ecuador celeste: La intersección del plano del ecuador terrestre y la esfera celeste.
- Polos celestes: Intersección de la prolongación del eje terrestre con la esfera celeste. Define el Polo Norte Celeste y el Polo Sur Celeste.
- Círculo horario (de un objeto celeste): círculo máximo que pasa por los polos celestes y el objeto.
- Eclíptica: Plano de la órbita terrestre.
- Equinoccio vernal: Punto de intersección entre el plano ecuatorial terrestre y la eclíptica
- Tiempo sideral: medido por el aparente movimiento diurno del equinoccio vernal. Se puede definir como el ángulo horario del equinoccio vernal.
- Declinación: Ángulo entre el ecuador celeste y la posición del objeto, desde el punto de referencia.
- Ascensión recta: Ángulo medido desde una referencia inicial hacia el círculo horario del objeto.

En este sistema de coordenadas, el plano de referencia es el ecuador terrestre. Los polos coinciden con la intersección del eje terrestre con la esfera celeste y son denominados Polo Norte Celeste y Polo Sur Celeste. El círculo máximo que pasa a través de los polos celestes y el Zenith es el círculo meridiano.

Las coordenadas de un determinado objeto se determinan mediante la declinación (DEC), expresada en grados positivos si el objeto está al norte del ecuador y en grados negativos si está al sur del ecuador; y la ascensión recta (AR), expresada tanto en grados, como en horas, minutos o segundos de tiempo, siendo esta última la forma más común de expresarla.

La declinación puede tomar valores entre 90° y -90° , mientras que la ascensión recta puede tomar valores entre 0 y 360° , como también entre 0 y 24 horas. Así, es posible encontrar la proporción entre los valores en grados y su valor horario; una

hora equivale a 15° de giro y fracciones generan incrementos o decrementos proporcionales al valor.

El ángulo horario (HOR) del objeto se incrementa con el tiempo; es decir, es negativo antes de que el objeto transcurra el meridiano y positivo luego de eso. Se mide en grados, entre 180° y -180° , o, más comúnmente, en horas, minutos y segundos del tiempo sideral. Finalmente, se puede deducir que el ángulo horario es la diferencia entre la ascensión recta del meridiano y la ascensión recta del objeto.

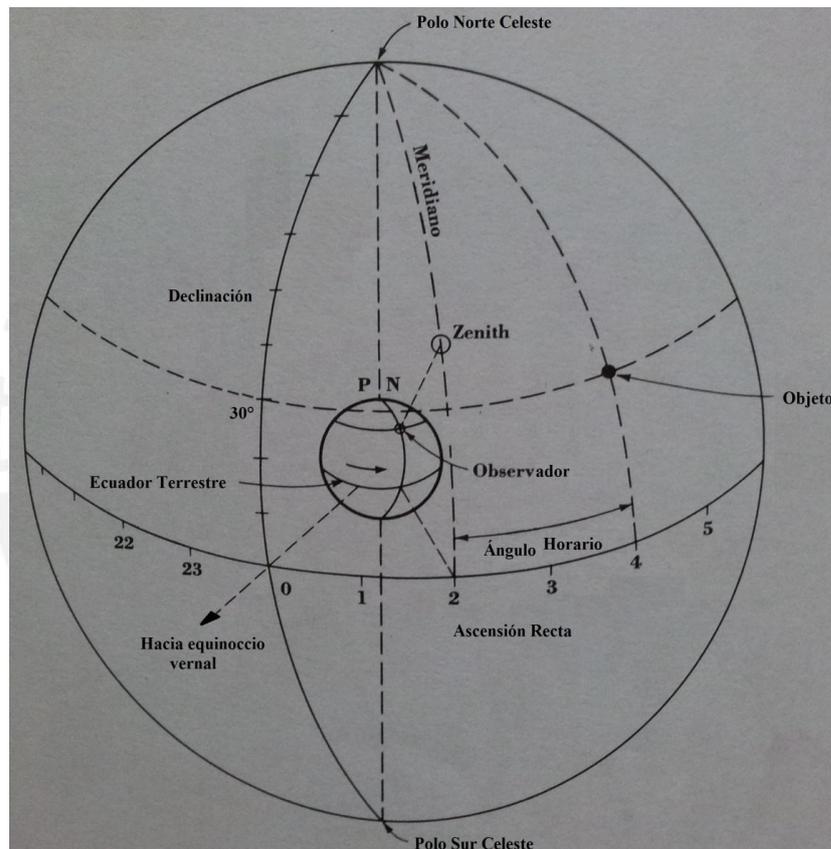


Figura 1.2: Sistema de coordenadas ecuatoriales

Fuente: Edición de imagen original en 'Radio Astronomy' – John Kraus [1]

Con esta base, se tiene referencia de la forma en que se ubican los objetos celestes utilizando coordenadas, las mismas que sirven de guía para el apuntamiento y direccionamiento de los telescopios utilizados tanto en astronomía como radioastronomía. Estos conocimientos brindan un entendimiento de la necesidad del movimiento de radiotelescopios en dos ejes para permitir el apuntamiento y rastreo sobre la superficie esférica donde están posicionados los

objetos celestes. Así, será necesario, como parte final de este capítulo, establecer las nociones necesarias sobre el radiotelescopio que utilizará estos sistemas de coordenadas para sus procesos.

1.2 El radiotelescopio

Como se mencionó anteriormente, la radioastronomía requiere, para sus procedimientos, una herramienta que permita obtener las emisiones en el espectro del radio del objeto celeste o fuente. Para ello, entonces, es primordial contar con un radiotelescopio (antena) que permita concentrar las a veces difusas manifestaciones de los fenómenos astrofísicos u otros objetos que esta ciencia estudia, pero que a la vez sea capaz de obtener dichas manifestaciones de posiciones y direcciones determinadas. Así, será necesaria una antena direccional, la que puede ser definida como la región de transición entre la onda de espacio libre y la onda guiada, sea esta de emisión o recepción. En el caso del radiotelescopio, empleado únicamente para la recepción, la antena es análoga al lente o espejo en un telescopio óptico. [1]

En radioastronomía, es común el empleo de radiotelescopios o antenas direccionales en forma parabólica, principalmente debido a su relativa facilidad de construcción y las características que brinda su geometría particular; sin embargo, esta tipo de disposición no es la única existente y se puede presentar una gran variedad de arreglos de antenas que consigan resultados similares.

1.2.1 Parámetros de un radiotelescopio

Existen numerosas especificaciones y parámetros numéricos para antenas, los que definen sus capacidades de funcionamiento. A continuación, se menciona y describe algunos de ellos. [1]

- Patrón de radiación: La respuesta de recepción y emisión de una antena como una función de la dirección es llamada el patrón de radiación de la antena. Usualmente, este patrón consiste de varios lóbulos, siendo el principal el más grande y los secundarios los menores. Este patrón determina la intensidad de la señal recibida o transmitida según la dirección; en el caso de un radiotelescopio se determina la intensidad de la señal

recibida en función a la dirección. En la figura 1.3 se muestra un patrón de radiación típico. Se indica también los puntos en los que la señal se recibe con -3dB de intensidad, definición nominal del ancho del haz.

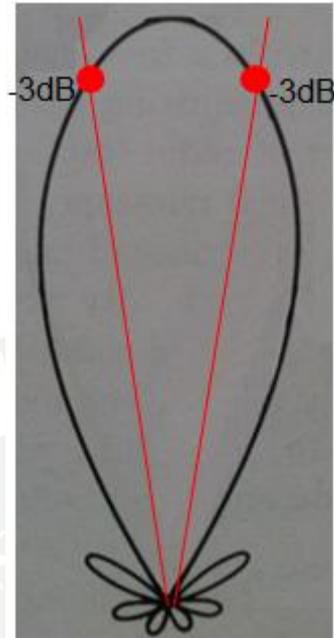


Figura 1.3: Patrón de radiación de un radiotelescopio

Fuente: Edición de imagen original en 'Radio Astronomy' – John Kraus [1]

- Ancho de haz: Normalmente definido en grados, determina el ancho angular en el que la antena podrá captar una mayor potencia en la señal. Los puntos que determinan el ancho de haz son aquellos donde la señal se recibe con una potencia de -3dB con respecto al máximo. Este parámetro se puede calcular en función a la frecuencia de operación y al diámetro de la antena, como se muestra en la fórmula siguiente:

$$A = 70 * \lambda / D$$

A = Ancho del haz (en grados)

λ = Longitud de onda

D = Diámetro del radiotelescopio

El ancho de haz permite conocer también la resolución angular requerida para el movimiento del radiotelescopio y una recepción apropiada y eficiente de la señal. En radioastronomía, como criterio de selección de la precisión

del sistema de movimiento, se toman valores entre $1/8$ y $1/10$ del ancho del haz para determinar la resolución mínima necesaria para la operación a una determinada frecuencia. [5] Posteriormente, en el trazado de los objetivos de esta tesis, se hará referencia a este parámetro para estimar la resolución necesaria para la operación del radiotelescopio RT-3.

- **Directividad:** Relaciona la densidad de potencia que irradia una antena direccional versus la densidad de potencia irradiada por un irradiador isotrópico (que irradia en todas las direcciones) utilizando la misma potencia. Este parámetro es de gran importancia en las antenas debido a que la mayoría de emisiones requieren una dirección particular.
- **Ganancia:** Un parámetro que relaciona la directividad de una antena con su eficiencia eléctrica. Con esto, para transmisión de señales, se conoce qué tan bien la antena convierte la potencia eléctrica de entrada en ondas de radio en una dirección particular. Para recepción de señales, se conoce qué tan bien la antena convierte las ondas de radio que llegan desde una determinada dirección en potencia eléctrica.

1.2.2 Partes de un radiotelescopio

El radiotelescopio requiere una fuente distante para su utilización. En el caso de la radioastronomía, las radiofuentes se encuentran a grandes distancias y son objetos idóneos para utilización de este tipo de instrumentos. [1] Cabe destacar que las antenas y receptores empleados en radioastronomía varían de gran manera y, por esto, es difícil aseverar que un determinado tipo de disposición es típico en los radiotelescopios. Sin embargo, para realizar la descripción de los componentes principales y mejorar el entendimiento de cómo se realiza la transmisión/recepción de señales, se presenta un esquema de un radiotelescopio típico – del tipo parabólico, como el construido en el instituto de radioastronomía – en la figura 1.4, a continuación.

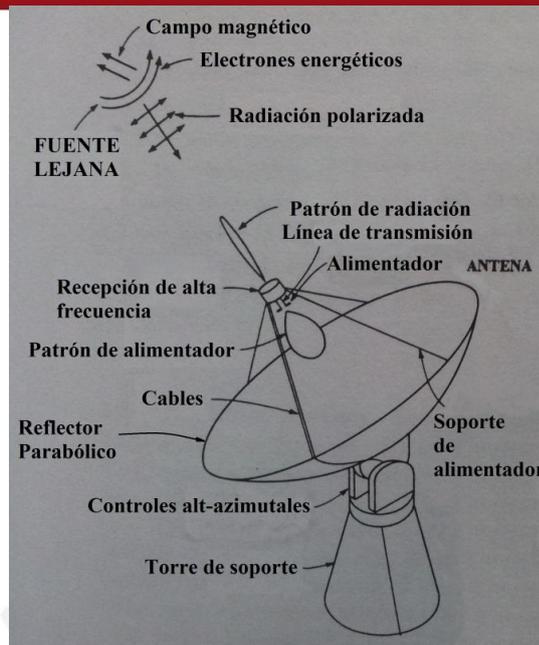


Figura 1.4: Partes del radiotelescopio

Fuente: Edición de imagen original en 'Radio Astronomy' – John Kraus [1]

Uno de los elementos principales de los radiotelescopios es el alimentador, encargado de recolectar las ondas de radio que se encuentren en la dirección del radiotelescopio y convertirlas a corrientes eléctricas para ser llevadas a receptores apropiados. Este dispositivo se conecta al resto de sistemas a través de cables y es sostenido mediante soportes construidos para dicho fin. Otro de los elementos principales es el reflector parabólico, que se encarga de reflejar en su superficie la señal proveniente de la fuente y, a través de la geometría parabólica, hacer que ésta converja en el foco, punto en el que se encontrará el alimentador. Este reflector parabólico está montado sobre una estructura de soporte apropiada y sobre controles alt-azimutales para su posicionamiento y direccionamiento. Los controles alt-azimutales pueden incluir motores y sensores que permitan el direccionamiento.

Para el funcionamiento de una antena parabólica, es necesario realizar el apuntamiento del haz de la antena en dirección a la fuente a observar. Con esto, la señal es reflejada en el reflector parabólico que la hará converger en el foco, donde será recepcionada por el alimentador. En este punto, el alimentador convertirá la señal electromagnética a corriente eléctrica; dicha corriente, será conducida al sistema de recepción. Finalmente, con ayuda de equipos apropiados, será posible la observación y registro de la señal emitida por la fuente.

La integración de todos los componentes y el esquema de funcionamiento se muestran en la figura 1.5.

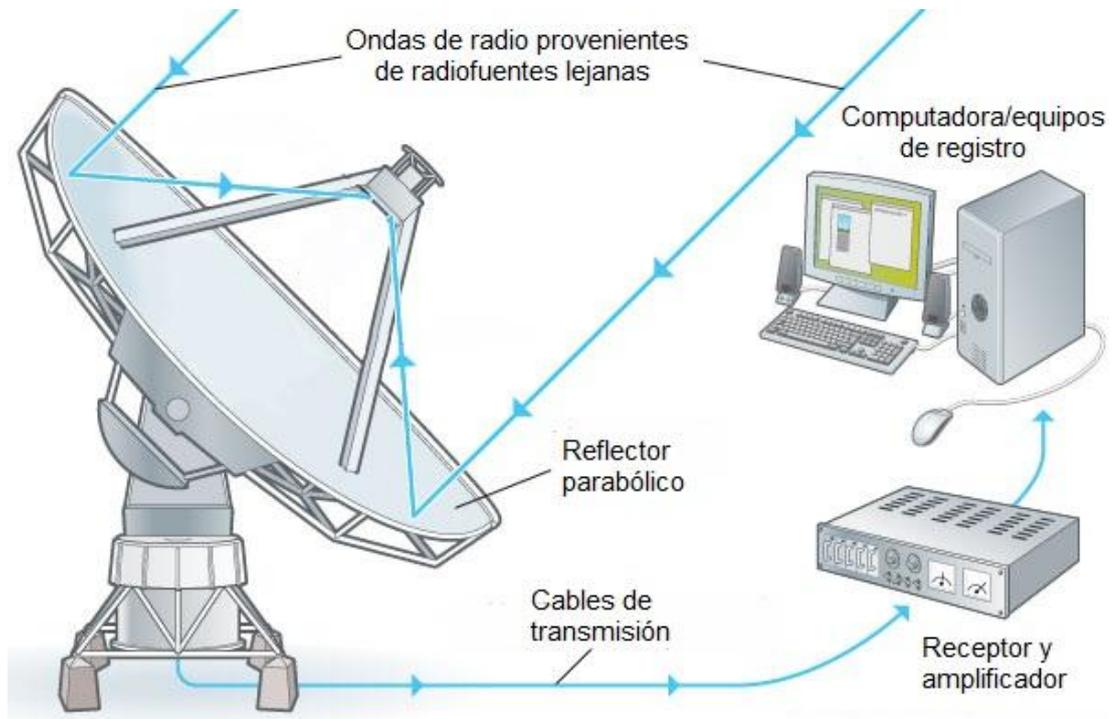


Figura 1.5: Esquema de funcionamiento de un radiotelescopio

Fuente: Edición de imagen original en la Enciclopedia Británica 2010

CAPÍTULO 2: SENSOR DE POSICIONAMIENTO

2.1 Marco teórico

2.1.1 Introducción a los sensores de posición

Se puede definir a un sensor como un dispositivo que permite medir una magnitud física y convertirla a algún tipo de señal que puede ser leída u observada. [7] El tipo de magnitud física a medir determina el tipo de sensor y la tecnología empleada para la adquisición de la muestra. Actualmente, la salida de muchos sensores modernos es una señal eléctrica; sin embargo, alternativamente también podría ser algún movimiento, presión, flujo o cualquier otra salida utilizable.

Conforme las aplicaciones posibles de los sensores de posición se incrementan, también el número y tipo de sensores. Hoy en día existen variedades de sensores para la medición de distancia, temperatura, corriente, voltaje y de cuanta magnitud exista, tanto en la industria como fuera de ella. Entre todos ellos se encuentra el rubro de los sensores de posición.

2.1.2 Clasificación de los sensores de posición

Con el avance de la tecnología, dividir a los sensores en las categorías de 'analógico' y 'digital' resulta una forma muy vaga de clasificación que poco logra categorizar los distintos tipos de sensores de posición existentes. Otra clasificación más apropiada puede darse a través del tipo de medición que se hace: lineal o angular. Como referencia, a continuación se realiza una descripción de algunos tipos de sensores de posición, clasificándolos basados en la tecnología que emplean. [7]

- Resistivos: Son, esencialmente, resistencias eléctricas variables. El principio de funcionamiento implica conectar el objeto a medir con el terminal de contacto que se desplaza sobre una resistencia eléctrica variable. La señal entregada usualmente no requiere mayor acondicionamiento posterior. La posición del objeto se obtiene en función al potencial recibido a la salida del sensor.
- Capacitivos: El funcionamiento de estos sensores se basa en la variación de la capacitancia con el aumento de la distancia entre las placas de un condensador. El objeto a medir se conecta a una placa móvil del condensador

y la posición del objeto se puede calcular en base a la capacitancia obtenida a la salida.

- Inductivos: Estos sensores utilizan el principio de inducción para la medición de la posición de un elemento. La posición del objeto se obtiene midiendo la inductancia a la salida, conectando el objeto a un núcleo móvil que se inserta en una bobina y que varía al moverse la inductancia obtenida.
- Transformador diferencial de variación lineal (TDVL): Este dispositivo aprovecha el fenómeno de la inducción de voltajes para realizar mediciones. El esquema básico del TDVL se conforma una bobina primaria y dos secundarias, entre las que se coloca un núcleo que está conectado al elemento cuya posición se desea medir. Los voltajes obtenidos, al aplicar tensión a la entrada, variarán según se aleje o acerque el núcleo móvil del centro de cada bobina secundaria.
- Efecto Hall: Su principio de funcionamiento utiliza la medición de la magnitud y polaridad de un campo magnético para generar niveles de voltaje a la salida. Se coloca un elemento magnético en el objeto cuya posición se desea medir, que genera una variación de voltaje cuando el elemento se acerque/aleje del sensor.
- Codificadores: Este tipo de dispositivos emplean un código digital para referenciar la posición del objeto. Estos sensores se basan en la asociación de cada posición posible a un código digital, el que puede ser obtenido empleando algunas de las tecnologías descritas anteriormente para codificar la posición del objeto.

2.1.3 Sensores de posición angular

Los sensores de posición angular son esencialmente codificadores de posición que permiten obtener el ángulo, respecto a una referencia inicial, en el que se encuentra apuntando el objeto cuya posición se desea medir. [8] Se emplean principalmente para sistemas compuestos por ejes o por partes mecánicas provistas de movimientos circulares o rotatorios. Estos sistemas pueden emplear varias de las tecnologías mencionadas anteriormente en los sensores de posición.

Debido a su implementación mecánica, se requiere el movimiento de un eje sobre una base que se mantiene fija. Así, es posible que, mediante detectores apropiados, se cuente el número de señales recibidas durante el movimiento del sistema o que se decodifique una señal originalmente codificada, que contiene la información sobre la posición del eje.

2.1.3.1 Sensores Incrementales

También llamados sensores relativos, los sensores incrementales de posición angular emplean una cuenta de pulsos – obtenida a través de detectores que pueden ser ópticos, de tipo Hall, magnéticos, entre otros – para detectar el movimiento del eje móvil; así, es posible conocer la posición exacta del mismo, mediante técnicas que permitan convertir dicha cuenta de pulsos a distancias. [8] La desventaja principal de estos sistemas es que la posición actual es relativa a una posición previa almacenada, obteniéndose la posición actual calculando el desplazamiento. Sin embargo, existen maneras de sobrellevar dichos inconvenientes, como memorias no volátiles para almacenar la posición anterior, o marcadores de posición inicial, entre otros.

Estos sistemas presentan una gran facilidad de implementación ya que no requieren más que un elemento que permita generar pulsos eléctricos a ser contados por dispositivos electrónicos. Su precisión está vinculada a la implementación mecánica del dispositivo, usualmente un disco ranurado alineado con dispositivos ópticos de emisión/recepción, lo que genera las variaciones de voltaje – traducidas por el hardware y software como cuentas.

2.1.3.2 Sensores Absolutos

Los codificadores absolutos de posición angular emplean la codificación de cada posición posible en el sistema a través de pistas con patrones determinados. Como se mencionó anteriormente, los codificadores pueden emplear distintos métodos de detección dependiendo de su aplicación; sin embargo, los más empleados en este rubro son los codificadores de posición angular ópticos y magnéticos. [8]

Los sensores absolutos de posición angular emplean un código único para cada posición posible del sistema en un rango de 360°. Así, para una mayor cantidad de posiciones codificadas, lo que se traduce en una determinación más precisa de la

posición angular, se requiere un mayor número de combinaciones posibles. De ahí deriva lo que se denomina la resolución del dispositivo. En el caso de estos codificadores, la resolución se mide en bits, que es la unidad mínima que permite codificar cada sector. Para el caso del disco de 1 bit, se tienen tan solo 2 posiciones que se podrían detectar, mientras que en el de 2 bits, se tienen hasta 4 posiciones detectables y así sucesivamente.

En el caso esta tesis, se plantea la construcción de un codificador de 12 bits, lo que implicaría hasta 4096 posiciones detectables distintas.

El esquema de funcionamiento de este tipo de codificadores se basa principalmente en la detección óptica de sectores. Así, se instala un emisor de luz (arreglo de LEDs, láseres, etc.), colocando algún tipo de elemento que, si fuera necesario, enfoque o haga converger la luz, dirigiendo ese haz hacia un receptor óptico (arreglo de fotodiodos, fototransistores, optoacopladores, etc.). Entre el emisor y receptor, ambos fijos, se coloca el disco codificado – anexo al eje de movimiento–, de modo que los haces de luz se interrumpan dependiendo de la posición del disco respecto al arreglo emisor-receptor. Estas variaciones de intensidad luminosa en el receptor inducen, a través de electrónica apropiada, un cambio de voltaje, lo que, a su vez, permite obtener niveles lógicos discretos que pueden ser usados directamente en el procesamiento de la información. Se puede observar cómo se da la integración de todos los componentes para hacer funcionar al sistema en la figura 2.1.

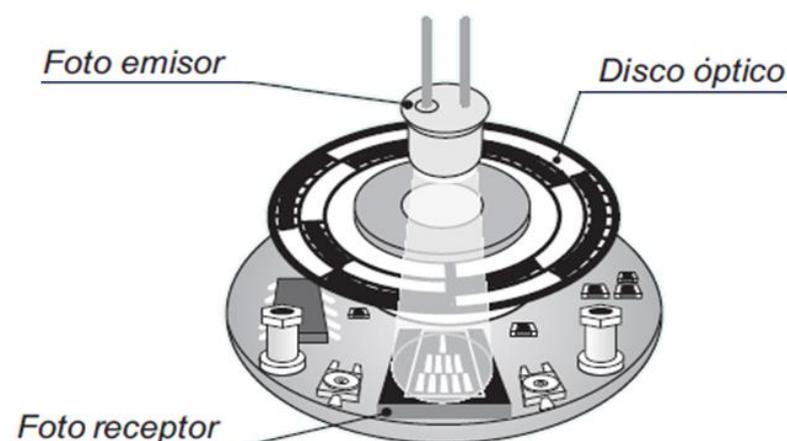


Figura 2.1: Esquema completo del codificador de posición angular

Fuente: Folleto digital de Silge Electrónica S.A. - Argentina

La tecnología de detección óptica presenta algunas ventajas sobre otro tipo de sistemas; entre ellas, evita interferencias eléctricas y electromagnéticas que puedan ser inducidas por el medio o por dispositivos cercanos. Es menos susceptible a desgastes mecánicos debido a que no existe algún tipo de contacto entre sus componentes. Además, para resoluciones medias (considerando baja resolución hasta 8 bits, resoluciones medias entre 9 y 14 bits y 15 bits en adelante como alta resolución) no se requiere demasiada precisión y exactitud para su implementación mecánica; la electrónica involucrada es relativamente sencilla y puede ser implementada sin mayores complicaciones. Algunas desventajas de esta tecnología se presentan para altas resoluciones, donde los discos codificados se vuelven más complicados de decodificar ópticamente, lo implica el uso de tecnología más especializada – por ejemplo, lectores ópticos como aquellos utilizados en escáneres. De igual forma, para resoluciones medias-altas, este sistema es más susceptible a imperfecciones mecánicas de construcción y vibraciones que, probablemente, cualquier otro tipo de sistema. [9]

Una mención importante en este acápite es el tipo de codificación que se le asigna al disco, la que influye de gran manera en la recepción y decodificación de la información. En este caso, una variación de varios bits simultáneamente podría ocasionar errores de lectura debido a imprecisiones de construcción mecánica. Para minimizar los errores de este tipo se realiza un patrón utilizando código Gray, caracterizado por presentar solo la variación de 1 solo bit entre valores subsiguientes.

En lo que respecta a las características más importantes de los sensores absolutos de posición angular se debe resaltar a la resolución. Ésta se traduce en la medida mínima de precisión que se puede tener respecto a la medida total de la circunferencia. En otras palabras, con una mayor resolución es posible contar una mayor cantidad de posiciones individuales del codificador; para ello, se requiere una mayor cantidad de bits. Por ejemplo, la resolución del codificador de posición angular que se desea implementar es de 4096 posiciones; así, dividiendo los 360 grados de la circunferencia entre el número de posiciones posibles detectables, se obtiene una resolución de 0.087 grados, siendo esta la mínima variación de posición detectable.

2.2 Estado del arte

2.2.1 Presentación del asunto de estudio

Como se mostró en el capítulo 1, la precisión en el control de los radiotelescopios, y en general de cualquier sistema móvil, es un aspecto crítico en aplicaciones que requieren de altos niveles de estabilidad. De ahí se desprende que el desarrollo de sensores más precisos es un aspecto clave en cualquier sistema de control. Sin embargo, los sensores de posición angular varían su tamaño, forma, tecnología y otros parámetros dependiendo de la aplicación específica.

En el ámbito de los sensores de posición angular, se puede encontrar una gran variedad de sistemas diseñados y aplicados a artefactos electrónicos comunes, por ejemplo, en impresoras. Para sistemas más especializados, existe un gran número de empresas que se dedican a la creación de los sensores más precisos y efectivos; en el rubro de la medición de la posición angular también se encuentra una enorme cantidad de compañías que buscan obtener los mejores valores de precisión y sensibilidad en sus sensores. Así, las tecnologías más avanzadas se están perfeccionando y actualmente se ha llegado a valores de precisión de alto orden, como sensores de posición angular de hasta 24 bits.

2.2.2 Estado de la investigación

Los codificadores de posición angular representan una solución práctica y eficaz para sistemas de control, robótica, procesos industriales, equipos de medida, entre varios otros. [9] Con el pasar de los años, este tipo de tecnología ha evolucionado en gran manera y, a continuación, se presenta una muestra de los dispositivos que pueden ser encontrados actualmente en el mercado internacional, desarrollados por los fabricantes más importantes de este rubro. Se presenta también un resumen de sus características a fin que éstas sirvan de referencia para el sistema que se va a implementar.



Figura 2.2: Codificador angular absoluto de 12 bits, Dynapar AR62

Fuente: Catálogo de productos Dynapar 2010 [10]

Tabla 2.1: Especificaciones del codificador angular Dynapar AR62

Fabricante:	Dynapar
Modelo:	AR62 – Codificador angular absoluto
Resolución:	12 bits (0.088°, 316.4 arcseg.)
Voltaje de entrada DC:	10 - 30 V
Rango de temperatura de operación:	-40°C a 100°C
Características principales:	Detección magnética de posición, resistente a choque hasta 200g, resistente a vibración hasta 20g, carcasa de acero o aluminio.
Dimensiones:	Eje: 10mm de diámetro, sensor: 59mm de diámetro, 32mm de espesor.
Precio:	\$536

Fuente: Catálogo de productos Dynapar 2010 [10]



Figura 2.3: Codificador angular absoluto de 17 bits, Dynapar AX70

Fuente: Catálogo de productos Dynapar 2010 [10]

Tabla 2.2: Especificaciones del codificador angular Dynapar AX70

Fabricante:	Dynapar
Modelo:	AX70 – Codificador angular absoluto
Resolución:	17 bits (0.00275°, 9.9 arcseg.)
Voltaje de entrada DC:	10 - 30 V
Rango de temperatura de operación:	-40°C a 60°C
Características principales:	Detección óptica de posición, protección contra explosiones, carcasa de acero o aluminio.
Dimensiones:	Eje: 10mm de diámetro, sensor: 69mm de diámetro, 130mm de espesor.
Precio:	\$2600

Fuente: Catálogo de productos Dynapar 2010 [10]

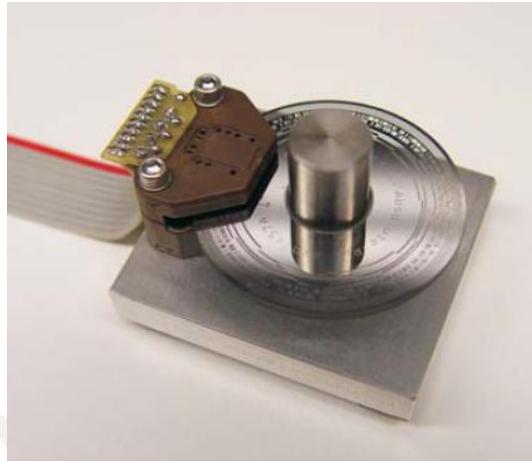


Figura 2.4: Codificador angular absoluto de 19 bits, Gurley 7700

Fuente: Catálogo de productos Dynapar 2010 [10]

Tabla 2.3: Especificaciones del codificador angular Gurley 7700

Fabricante:	Gurley
Modelo:	7700 – Codificador angular absoluto
Resolución:	19 bits (0.0006°, 2.5 arcseg.)
Voltaje de entrada DC:	5 V
Rango de temperatura de operación:	-40°C a 100°C
Características principales:	Detección óptica de posición, diseño modular, carcasa de plástico moldeado Ryton PPS.
Dimensiones:	Eje: 10mm de diámetro, sensor: 43mm de diámetro, 15mm de altura.

Fuente: Catálogo de productos Dynapar 2010 [10]

2.2.2.1 Síntesis del estado de la investigación

Existe una gran variedad de dispositivos de medición absoluta de posición angular; sin embargo, esta variedad se presenta en el mercado internacional, al que no es sencillo acceder sin recurrir a la importación directa. En el mercado local existen pocas alternativas de sensores de posición – obtenidos vía importación a través de distribuidores –, principalmente porque las opciones que se ofrecen están pensadas para aplicaciones industriales que requieren alta precisión y alta protección frente al entorno de trabajo.

Como se puede apreciar, en el mercado internacional existen dispositivos industriales con características de resolución similares a las que se desea llegar (12 bits); sin embargo, se debe resaltar que el precio de estos dispositivos es elevado (superior a \$500), incluso a resoluciones medias como la que se requieren, además de incorporar características de protección (contra vibración extrema, contra choques) que tienen poca cabida en el entorno para el que estarían destinados (control de posición de un radiotelescopio) y que son uno de los factores que contribuye a precios tan elevados.

La escasa variedad de sensores digitales absolutos de posición angular en el mercado local, la dificultad de importación de estos dispositivos, el excesivo precio y características de protección innecesarias para su aplicación en radioastronomía hacen que la construcción de un sensor absoluto de posición angular sea una buena opción para dotar al radiotelescopio de un sistema de control de movimientos que permita realizar de una manera óptima las investigaciones y aplicaciones para las que se construyó el reflector parabólico RT-3.

CAPÍTULO 3: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR DE POSICIONAMIENTO

3.1 Objetivos

3.1.1 Objetivo General

- Diseño e implementación de un sensor digital absoluto de posición angular

3.1.2 Objetivos específicos

- Obtención de una resolución menor o igual a 0.087° ($\approx 313''$ arco)
- Utilización de métodos ópticos discretos para la implementación del sensor
- Estimar límites en la implementación óptica de sensores de posición angular para tamaños y para resoluciones más altas

3.2 Alcances del sistema

Para cumplir con los objetivos trazados anteriormente, se ha realizado el siguiente esquema que ayuda a entender el conjunto dentro del que el sensor de posición deberá funcionar. Esto permitirá especificar las necesidades de cada etapa.

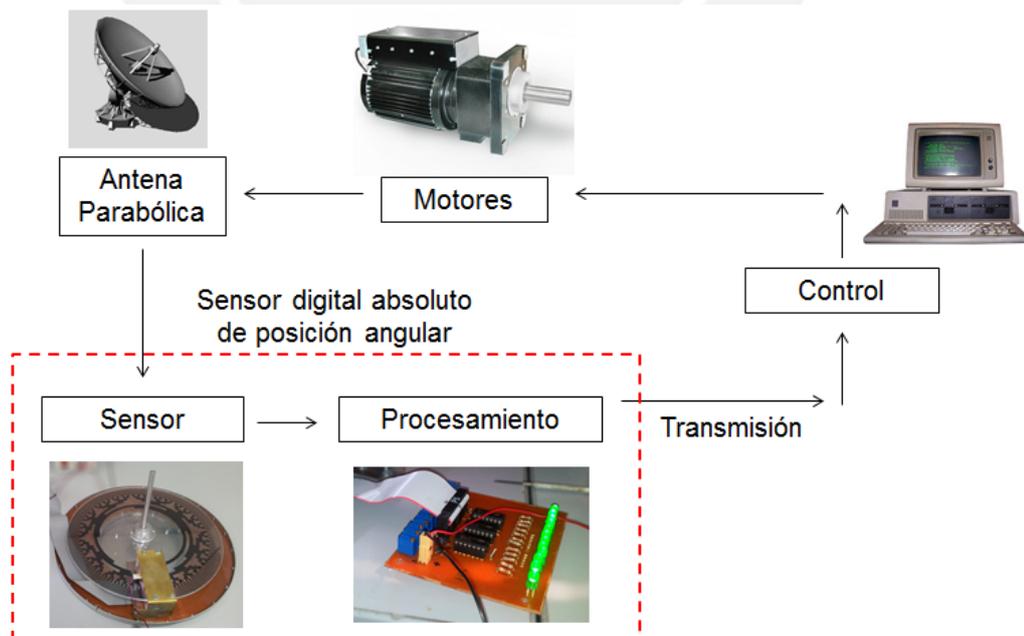


Figura 3.1: Esquema de control de la antena RT-3

Se debe tener en cuenta que existen 5 tesis vinculadas al radiotelescopio RT-3: el alimentador de la antena; el reflector parabólico de 3 metros de diámetro; la electrónica de control de motores y soporte mecánico de la antena; el sensor de posición angular; y el hardware de comunicación y el sistema de control de posición. De estas 5 tesis, solo 2 se encontraban desarrolladas al momento de realizar este documento: el alimentador y el reflector parabólico.

La figura 3.1 ilustra el sistema de control del radiotelescopio RT-3, que cuenta con 3 partes básicas: una computadora que controlará los motores de la antena utilizando coordenadas que obtendrá de un software de radioastronomía, un par de motores para el movimiento de los ejes de azimut y elevación y un par de sensores de posición angular, que registrarán la posición en la que se encuentren los ejes del radiotelescopio.

El sensor de posición consta de dos etapas principales: la del sensor como tal, encargado de convertir la posición física en información digital, y la de procesamiento, encargada de realizar la conversión del código asociado a la posición a valores digitales comprensibles por el software a emplear en la computadora.

Esta tesis abarca el desarrollo del sensor de posición, incluyendo la electrónica y el montaje de tarjetas y componentes mecánicos (como el disco codificado y el eje) para permitir el funcionamiento apropiado del sensor; y la etapa de procesamiento de las señales, que implica también una etapa de software para convertir el código gray a código binario. Asimismo, será necesario que este software prepare los valores registrados para su transmisión a través de comunicación serial; el hardware involucrado para la transmisión y posterior conversión a otros protocolos es tema de la tesis de Alfredo Rivera. Se considera también para esta tesis una etapa que permite la visualización de la posición en tiempo real en un LCD, que permite constatar el funcionamiento correcto del sistema.

3.3 Diseño e implementación del sistema

3.3.1 Requerimientos del sistema

Como se ha explicado en capítulos anteriores, las antenas parabólicas requieren un grado de precisión que depende de las aplicaciones a las que están destinadas. Para ser más puntuales, la frecuencia a la que trabajen influirá en la precisión que

debe alcanzarse para realizar observaciones exitosas. Con esa base, se han realizado cálculos para el radiotelescopio RT-3, basados en la fórmula del ancho del haz mostrada en el capítulo 1, en el acápite de parámetros del radiotelescopio, con los que se ha determinado la resolución necesaria para la operación de la antena en cuestión. Como se explicó, se requiere una resolución en el movimiento que no debería exceder valores de 1/10 del ancho del haz, valor considerado para el cálculo de la tabla 3.1 que se presentará más adelante.

Por otro lado, se ha considerado que la superficie del plato de la antena RT-3 fue realizada teniendo en mente una frecuencia de operación máxima teórica de 30GHz, empleando procesos de alta precisión para su implementación. Sin embargo, debido a los procesos reales de construcción involucrados, una frecuencia máxima de 10GHz se consideró como un límite seguro y alcanzable para la operación.

En la tabla 3.1, se muestran los valores de resolución obtenidos con distintos números de bits posibles, así como la precisión de apuntamiento requerida para algunas frecuencias importantes y la frecuencia de operación máxima vinculada al número de bits.

Tabla 3.1: Precisión de apuntamiento para el radiotelescopio RT-3

N	Resolución Numérica	Resolución Angular	Resolución Angular	Precisión de Apuntamiento			Frecuencia de Operación Máxima
				(en arcseg.) para las frecuencias: (A * 1/10)			
# bits	$2^{\text{exp}(N)}$	en GRADOS	en arcseg.	1.42 GHz	4.46 Ghz	6.67 GHz	GHz
9	512	0.70313	2531.250	x	x	x	0.99
10	1,024	0.35156	1265.625	√	x	x	1.99
11	2,048	0.17578	632.813	√	√	x	3.979
12	4,096	0.08789	316.406	1773.42	564.63	377.55	7.96
13	8,192	0.04395	158.203	√	√	√	15.92
14	16,384	0.02197	79.102	√	√	√	31.84

Fuente: Adaptado del elaborado por el Dr. Jorge Heraud Pérez para el radiotelescopio RT-20

Como se puede apreciar, con 12 bits (316.4" de arco) se obtiene una frecuencia de operación máxima de 7.96GHz, el valor más cercano al parámetro de 10Ghz entre todas las posibles resoluciones. En contraste, para resoluciones de 11 y 13 bits, los valores de frecuencia máxima de operación son de 4 y 16GHz aproximadamente.

Para el caso de 11 bits, la frecuencia máxima de 4GHz podría llevar a no aprovechar al máximo la potencialidad del reflector parabólico. Para 13 bits, la complejidad de construcción del sensor podría opacar los 2GHz adicionales de rango de operación que se obtienen frente a la alternativa de 12 bits; además, se tiene un rango de frecuencia desaprovechado (desde 10GHz hasta 15.92GHz) que muy probablemente no podría alcanzarse con el reflector parabólico disponible.

Existen, además, una gran número de frecuencias de interés para la radioastronomía en la banda en la que permitiría trabajar un sensor de 12 bits de resolución, por lo que la elección de esta resolución no se limita simplemente a acercarse lo más posible a los 10GHz de máxima frecuencia de operación impuesto por el reflector parabólico.

Como se puede observar en la tabla 3.2, existen numerosos elementos o compuestos químicos de interés para la radioastronomía que podrían ser estudiados utilizando el radiotelescopio RT-3 y sensores de 12 bits de resolución.

Tabla 3.2: Frecuencia de interés para la radioastronomía en el rango de operación

Sustancia	Frecuencia (en GHz)	Resolución requerida (en arcseg.)	¿Disponible con 12 bits de resolución?
Deuterio (DI)	0.33	7631.08	Sí
Hidrógeno (HI)	1.42	1773.42	Sí
Radical Hidroxilo (OH)	1.61	1564.13	Sí
Formaldehído (H ₂ CO)	4.82	522.46	Sí
Metanol (CH ₃ OH)	6.67	377.55	Sí
Helio 3 (3He ⁺)	8.66	290.79	Sí, a un valor de $A*1/8$

Fuente: Elaboración propia [6]

Si bien el Helio 3 no se encontraría disponible para estudio con una resolución de 12 bits (316.4 arcseg.), se debe recordar que existe un rango que asegura la recepción correcta de la señal que va entre 1/8 y 1/10 del ancho del haz. Teóricamente, es posible, entonces, recibir señales – aunque a menor eficiencia y menor coherencia de la señal – con frecuencias del Helio 3 si se considera un parámetro de 1/8 de ancho del haz para el cálculo de la resolución requerida. Se debe mencionar, también, que la frecuencia principal de operación del radiotelescopio será de 1.42GHz, empleándose el resto de las frecuencias disponibles para estudios o investigaciones circunstanciales.

Debido a que el movimiento de los radiotelescopios es, en la mayor parte de los casos, bastante lento, no existían parámetros numéricos adicionales a considerar, como, por ejemplo, hubiera podido ser lograr una determinada resolución a una cierta velocidad de movimiento. Además, el ambiente en el que se instalará el sistema no presenta peligro por esfuerzos mecánicos, como choques, vibración, etc.

Debido a la distancia entre la sala de control y el radiotelescopio se ha considerado la transmisión serial como el método de comunicación para el sistema. Adicionalmente, también debió considerarse que, por la condición anterior, el sistema debería estar protegido contra inclemencias del medio ambiente, como lluvia, polvo, humedad, etc.

Un factor adicional que debió considerarse al momento de diseñar el sistema fue el tamaño que debía tener el mismo. Al tenerse un reflector parabólico de 3 metros de diámetro, las estructuras mecánicas de soporte tendrán un tamaño acorde a tales dimensiones, por lo que se tenía un espacio relativamente limitado para el sensor de posición, particularmente para el disco codificado que se diseñó. Esta limitante conllevó a sopesar el tamaño que debía tener el disco codificado frente a la posibilidad/facilidad de lectura óptica que realiza el sensor.

Por último, también debió implementarse una etapa de visualización de la información del sensor, en la cual debía ser posible observar las variaciones de cada bit de información (del código binario) y del ángulo estimado - la posición real queda determinada con el código binario que será enviado vía transmisión serial y que será utilizado por el sistema de control.

3.3.2 Diseño e implementación del hardware

A continuación se presentan las consideraciones tomadas para la selección de componentes y diseño e implementación de circuitos necesarios para el sensor. Se destaca principalmente a lo siguiente: el disco codificado, el fotorreceptor, el fotoemisor, la tarjeta de pre-procesamiento y la tarjeta de procesamiento.

3.3.2.1 Diseño del disco codificado

Como se mencionó en el capítulo 2, la base de los sensores de posición angular es un disco con varias pistas codificadas, las que permiten la obtención de un código particular para cada posición del disco anexado al eje de movimiento.

Para el caso de esta tesis, se ha diseñado un disco codificado utilizando código Gray; esto minimiza errores de lectura en zonas de conmutación múltiple, lo que sí se presenta con frecuencia en código binario. Con la resolución especificada en etapas anteriores, se tiene un arreglo de 12 pistas codificadas que serán leídas por 12 sensores discretos individuales.

Este disco codificado fue diseñado en el software AutoCAD y posteriormente realizado en un fotolito de alto contraste, lo que permite que los niveles de luz (zona transparente) y sombra (zona opaca) sean fácilmente diferenciables. Este fotolito fue colocado entre dos planchas de acrílico y asegurado mediante pernos y tuercas, brindándole estabilidad y rigidez. Adicionalmente, fue necesario el desarrollo de una pieza de acople para un eje, en particular para uno de 3/8 de pulgada. En la figura 3.2 se muestra el diseño implementado y la mecánica desarrollada para esta etapa.



Figura 3.2: Implementación del disco codificado

El tamaño del disco fue elegido debido al ancho del último bit que se presenta para la resolución elegida. Para resoluciones mayores a un diámetro fijo, se tiene que el

ancho del último bit decrece. Esto se calculó utilizando la longitud aproximada de la circunferencia dividida entre el número de posiciones posibles, en este caso, 4096.

En la Tabla 3.3, a continuación, se puede apreciar la relación entre el diámetro del disco y el ancho del último bit. De ahí se desprende que, para un diámetro de 20cm, el ancho del último bit no supera 0.2mm para resoluciones superiores a 11 bits. Esto es inconveniente debido a que el ancho del último bit está íntimamente ligado al área que se debe cubrir en el arreglo del fotorreceptor, de modo que se evite el filtrado de luz del medio o de receptor aledaños.

Al momento de realizar la cubierta para el fotorreceptor se contaba con una broca de 0.3 mm., por lo que la medida que se buscaba para el ancho del último bit debía ser lo más cercano a ese valor. Con esto, para una resolución de 12 bits y un diámetro de 30cm. se tenía que el ancho del último bit era de 0.23mm.

Tabla 3.3: Resolución vs. Ancho de último bit

Resolución	Tamaño del disco (mm)	Ancho del último bit (mm)
11	200	0.30
11	300	0.46
12	200	0.15
12	300	0.23

Pese a tener un diámetro de 30cm., el largo área útil del disco cuenta es de tan solo 7.2 cm. de longitud, que se extiende desde el contorno más externo del disco hacia el centro. Esto se debe a que se debía maximizar el ancho del último bit, lo que fue posible colocándolo lo más cercano al borde externo del disco. El área útil quedó definida en conjunto con las dimensiones del fototransistor final que sería utilizado como cada sensor individual; así, este disco pudo ser finalmente desarrollado cuando se terminó el diseño del fotorreceptor. El esquema de las medidas se muestra en la figura 3.3, imagen referencial.

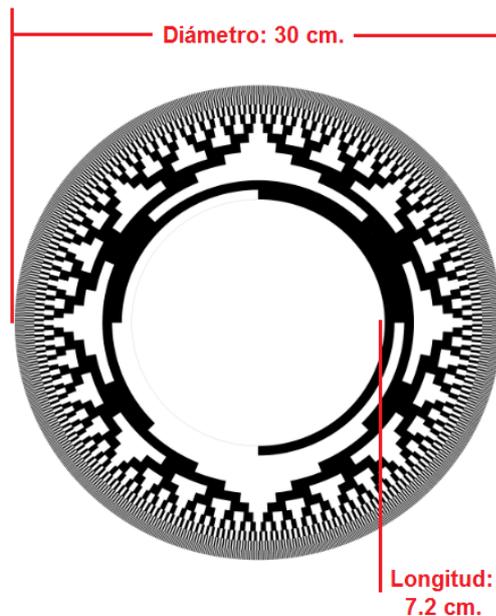


Figura 3.3: Medidas del disco codificado

Debido al tamaño del disco, no se presenta una imagen del mismo a tamaño real en esta parte del documento; sin embargo, una imagen en alta resolución se presenta en el Anexo 1, donde se puede apreciar el diseño realizado.

3.3.2.2 Diseño del fotorreceptor

El diseño del sistema contemplaba el uso de componentes de montaje superficial de modo que se ahorre espacio y se maximice el área utilizada. Con eso en mente, se procedió a la elección de fotorreceptores individuales en la forma de fototransistores. Para obtener la resolución de 12 bits se conectaría 12 fototransistores para su lectura independiente en paralelo.

En la elección del fototransistor a emplear se realizó la comparación con diversos dispositivos de esta familia. Debido a la escasez de este tipo de componentes en el mercado local (en lo concerniente a variedad), se optó por la importación. La comparación final con los stocks y variedades de fototransistores de la empresa Digikey arrojó una lista de candidatos a emplear. Finalmente, se descartaron varios por parámetros de funcionamiento, rangos de voltaje, de corriente, precio, tamaño, disponibilidad, entre otros. La elección final terminó dando dos posibles opciones, las que deberían ser comparadas más a fondo para poder determinar el dispositivo más conveniente.

Las alternativas eran el fototransistor SFH3710 y el fototransistor SFH3400. Las principales características eléctricas y ópticas que influyeron en la elección del dispositivo se resumen a modo comparativo en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Características eléctricas y ópticas

Parámetro	SFH3710	SFH3400
Voltaje Colector-Emisor	Hasta 5.5V	Hasta 20V
Voltaje de saturación Colector-Emisor	100mV	170mV
Corriente de Colector inducida típica	4-8uA	100-200uA
Rango de respuesta espectral	350-950nm	460-1080nm
Longitud de onda de máxima respuesta espectral	570nm (Verde)	850nm (Infrarrojo)

Elaboración propia: Hoja de datos del SFH3400 y SFH3710

Por un lado, el fototransistor SFH3400 posee un voltaje colector-emisor máximo mayor, por lo que sería más favorable optar por esta elección al ser 5v el voltaje de alimentación pensado para esta etapa, lo que estaría más alejado del límite máximo del SFH3710 y permitiría, para esta etapa, variar la fuente de alimentación sin problemas. Si bien es cierto que el fototransistor SFH3710 posee un voltaje colector-emisor de saturación menor, la diferencia con el SFH3400 es mínima, por lo que este parámetro no influye mayormente en la elección.

Un parámetro importante que definió la elección del SFH3400 fue la corriente de colector inducida típica, calculada para condiciones de luz iguales en la base de en ambos transistores, según la hoja de datos. Este parámetro era de, en promedio, 6uA en el SFH3710, mientras que en el SFH3400 era de 150uA. Esto se traduce a que, para las mismas condiciones, el SFH3400 genera un corriente mayor, lo que permite que se conecte directamente a otros circuitos, sin necesidad de amplificación o procesos adicionales.

La respuesta espectral de los fototransistores se puede apreciar en la figura 3.4. De ella se concluye que el fototransistor SFH3710 opera principalmente en el espectro óptico, mientras que el fototransistor SFH3400 permite además el trabajo en parte del infrarrojo cercano, lo que podría haber sido considerado al momento del diseño de los fotoemisores. En cuanto a parámetros de respuesta espectral, el SFH3710 posee la máxima respuesta espectral alrededor del espectro del color verde, mientras que el SFH3400 posee la respuesta espectral máxima alrededor del color rojo. Se concluyó que el SFH3400 exhibe condiciones más favorables para el

diseño utilizando componentes con respuestas espectrales superiores – como el infrarrojo –, mientras que su contraparte permite emplear componentes de respuestas espectrales meramente ópticas. Cabe mencionar, sin embargo, que en ambos casos los fototransistores aún exhiben una eficiencia espectral moderadamente alta para un gran rango de longitudes de onda.

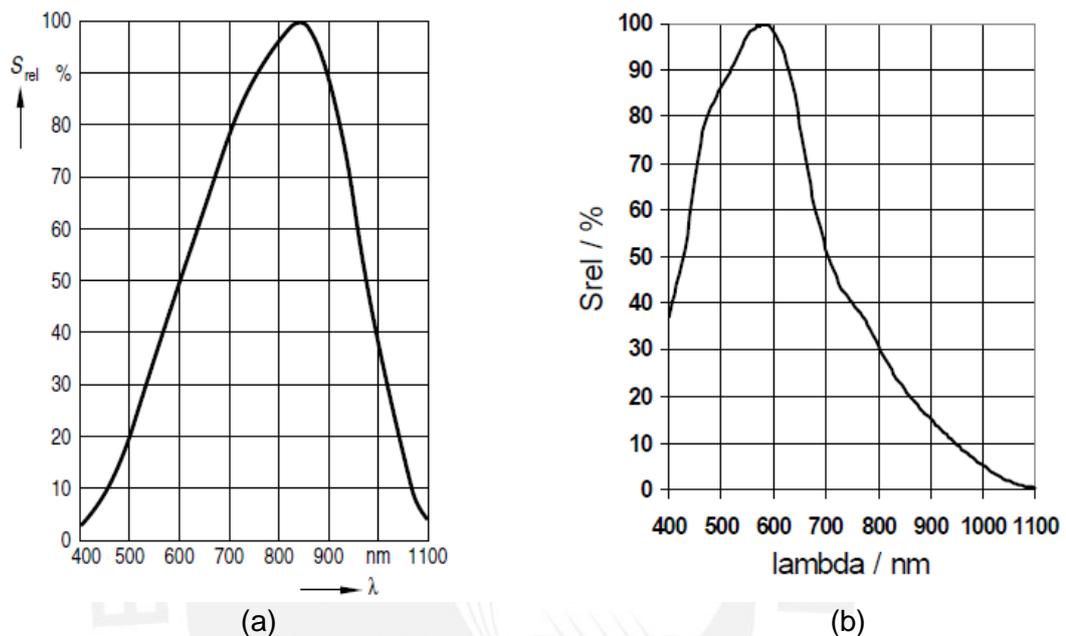


Figura 3.4: Respuesta espectral del fototransistor SFH3400 (a) y del SFH3710 (b)

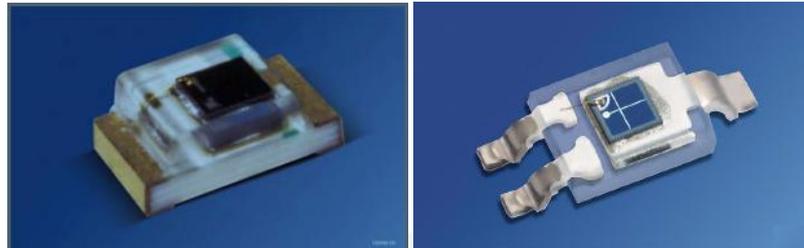
En cuanto a las dimensiones físicas, el fototransistor SFH3710 es de menor tamaño que el SFH3400, lo que se puede traducir en mayor dificultad para el soldado (debido también al empaque del dispositivo). El fototransistor SFH3400 es de mayores dimensiones y posee un empaque más favorable para el soldado, lo que permite que la implementación de la tarjeta de esta etapa se realice de mejor manera. De igual forma, el SFH3400 posee un área fotosensible mayor, lo que permite una mayor tolerancia en la alineación de las fuentes de luz con el área fotosensible. Ambos fototransistores se pueden observar en la figura 3.5.

En la Tabla 3.4 se muestran las medidas que se consideraron en la elección de los fototransistores.

Tabla 3.4: Dimensiones de los componentes

Parámetro	SFH3710	SFH3400
Dimensiones	1.25mm x 3.2mm	2mm x 4.6mm
Área fotosensible	0.29mm ²	0.55mm ²

Elaboración propia: Hoja de datos del SFH3400 y SFH3710



(a)

(b)

Figura 3.5: (a) fototransistor SFH3710, (b) fototransistor SFH3400

En lo referente a costos, el SFH3710 cuesta alrededor de 0.97 dólares en el distribuidor internacional Digikey, mientras que el SFH3400 costaba cerca a 1.10 dólares al momento de la compra. La diferencia de precio no es verdaderamente sustancial para construcción individual no industrial de sensores de posición angular (diferencia de 1.69 dólares para un grupo de 13) y, debido a la cantidad empleada de fototransistores, no representa un factor importante. En la Tabla 3.5 se compara los costos que representaría la adquisición de cada uno de estos dispositivos. Se consideró un fototransistor adicional por motivos de precaución.

Tabla 3.5: Costo de adquisición

Dispositivo	Cantidad	Costo Unitario	Costo final
Fototransistor SFH3400	13	\$ 1.10	\$ 14.3
Fototransistor SFH3710	13	\$ 0.97	\$ 12.61

Fuente: Digikey Corporation

En resumen, se puede concluir que el fototransistor SFH3400 presenta mejores prestaciones en cuanto a características eléctricas y dimensiones, lo que se traduce en una mayor facilidad de implementación y minimización de errores y fallas, asegurando que el sistema opere óptimamente. Esta elección también simplifica la elección de componentes y la implementación de etapas subsiguientes. Si bien el costo del fototransistor SFH3400 es más elevado en comparación al SFH3710, el

fototransistor elegido se justifica para aplicaciones que no sean industriales o de producción en serie, en las que el costo de adquisición sí juega un papel importante por las cantidades involucradas. Para fines de esta tesis y la implementación de pocos sensores de posicionamiento para su uso en el Instituto de Radioastronomía, la elección es también justificada en cuanto a costo.

Para el diseño del circuito del fotorreceptor se consideró el empleo de los fototransistores en modo de interruptor. Debido al principio de funcionamiento de los Sensores de posición angular, se tendrán diferencias de intensidad de iluminación debido a los sectores opacos y transparentes del disco, lo que generará cortes y saturación en la juntura del fototransistor; esto, a su vez, generará niveles de voltaje a través de la electrónica apropiada. El diseño completo del sistema se presenta en la etapa de diseño de la tarjeta de pre-procesamiento; en este acápite se presenta solo la tarjeta diseñada para albergar los fototransistores.

A continuación, se presenta el diseño esquemático y diseño de tarjeta impresa que se realizó para esta etapa, en la que se tiene el arreglo de 12 fototransistores. Esta tarjeta se conecta mediante un cable flat a la tarjeta de pre-procesamiento, en la que se encuentra el resto de componentes necesarios para acondicionar las señales.

Por otro lado, es importante resaltar que este tipo de diseño modular se adoptó para poder desmontar partes del sistema independientemente en caso de falla o para revisión, además de brindar mayor flexibilidad en el momento de la futura implementación mecánica y montaje. Esta implementación no generó ruido en el sistema debido a que las distancias entre los módulos eran mínimas (inferiores a 5cm.) y solo se tendrán 3 módulos.

La siguiente imagen, figura 3.6, muestra el diseño esquemático que se realizó para la tarjeta del fotorreceptor, en el que se puede apreciar 12 fototransistores con sus terminales de Colector y Emisor conectados, cada uno, a un par de conectores IDC (5V1, en la figura), los cuales se presentan en un arreglo de 13x2. Esto último se debió a que, en los cables flat disponibles, el menor número de conectores era de 13 pines.

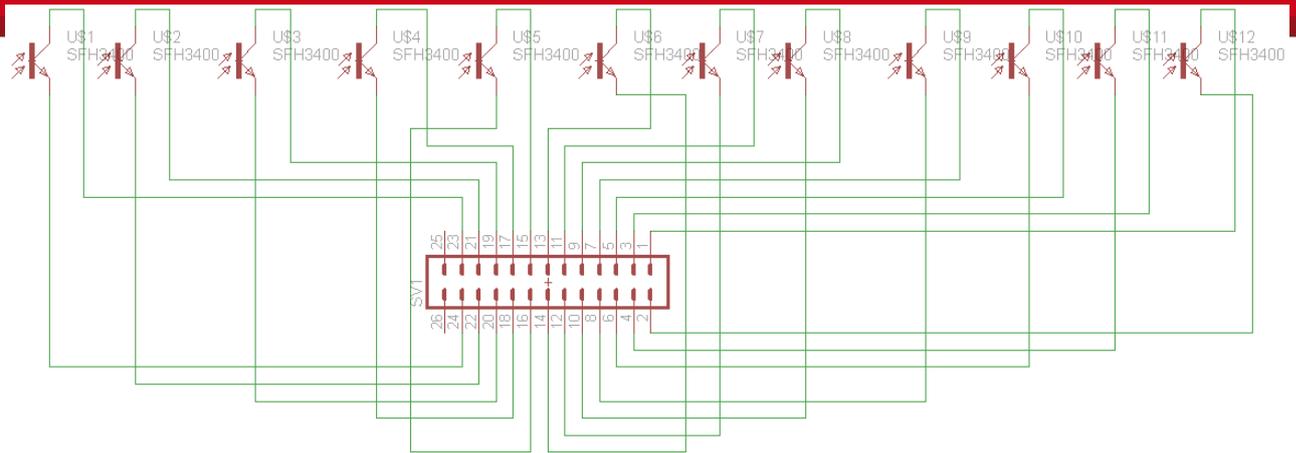


Figura 3.6: Diseño esquemático de la tarjeta del fotorreceptor

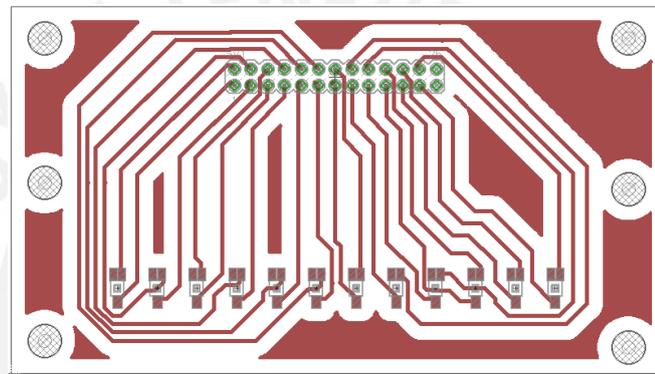


Figura 3.7: Diseño de la tarjeta del fotorreceptor

La figura 3.7 muestra el diseño de la tarjeta de circuito impreso que se realizó para esta etapa. Se debe notar que se elaboró el empaque de los componentes de montaje superficial SFH3400, usando las medidas suministradas en la hoja de datos del fabricante, para el programa Eagle, debido a que no se contaba con este por defecto.

Esta tarjeta tiene una separación de 6mm entre los centros de los fototransistores, lo que permite una separación de 3mm de cada fototransistor con la pista codificada correspondiente a fototransistores colindantes. Esto se traduce a 72mm de dimensión total en la tarjeta sólo para los componentes, siendo esto lo que definió el área útil del disco codificado. Finalmente, las dimensiones de la tarjeta se muestran en la figura 3.8, a continuación. Se debe destacar que se realizó una placa perforada utilizando la broca disponible, acorde a los requerimientos citados en el acápite del disco codificado. Esta placa perforada cubre a los fototransistores de luz exterior o de luz que no corresponda a su fotoemisor asociado; de esa forma, cada fotorreceptor está alineado directamente con los fotoemisores

correspondientes y se minimiza errores asociados a luz del ambiente o luz de transistores colindantes.

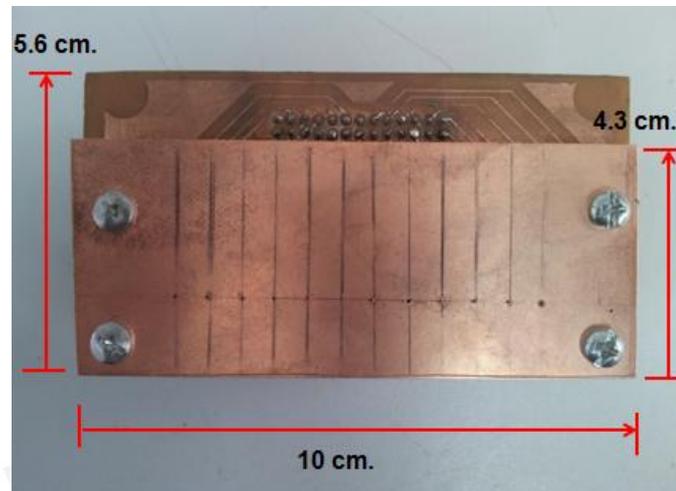


Figura 3.8: Medidas de la tarjeta del fotorreceptor

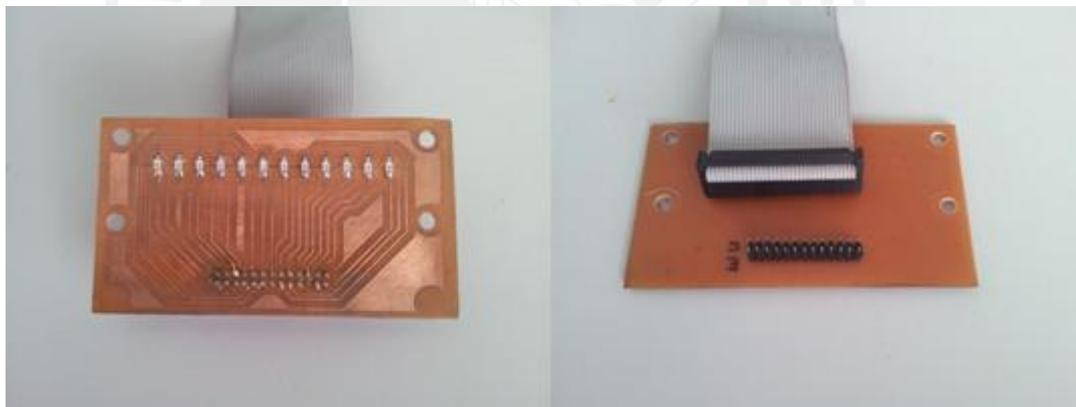


Figura 3.9: Tarjeta final del fotorreceptor

La figura 3.9 muestra la implementación de la tarjeta de circuito impreso sin la placa perforada. Esta tarjeta es, básicamente, el arreglo de fototransistores y el conector que permitirá transmitir las señales generadas en esta tarjeta hacia aquella del pre-procesamiento.

3.3.2.3 Diseño del fotoemisor

Para el diseño de esta etapa se consideró el requerimiento de una fuente de luz que sea lo más uniforme posible, que emitiera una gran intensidad de luz y que se pudiera alinear a cada fotorreceptor individual. A la vez, dicha fuente de luz debía

ser lo suficientemente pequeña para poder encajar con las medidas que tiene el fotorreceptor.

Para esto, se evaluó la respuesta espectral del fototransistor elegido, el SFH3400, para conocer la eficiencia del fototransistor con respecto a las distintas longitudes de onda que soporta. Con ayuda de la figura 3.4, mostrada anteriormente, se pudo determinar que la máxima respuesta espectral del fototransistor se da en el espectro del infrarrojo cercano ($\approx 850\text{nm}$); aun así, la respuesta para el resto del espectro inferior es relativamente alta, superior al 50% desde 600nm.

Se realizaron pruebas con LEDs de alto brillo de color rojo y verde de montaje superficial, aunque también se realizaron pruebas con LEDs convencionales de 5mm. Los LEDs de alto brillo rojos y verdes tenían una intensidad de luz relativamente baja comparada a su contraparte de color blanco puro, la que emitía con superior intensidad y de manera direccional, no difusa. Siendo el color blanco la combinación de un rango espectral desde alrededor de 400nm hasta alrededor de 750nm y considerando que, para LEDs de alto brillo, la emisión en este color es por lejos superior a cualquier otro, se eligió realizar un arreglo de LEDs direccionales de alto brillo de color blanco, los que estarían alineados exactamente con cada fototransistor, asegurando la máxima intensidad en el área fotosensible del dispositivo.

En la Tabla 3.6: Características eléctricas del LED se muestran las características eléctricas del LED de 5mm. de alto brillo que se eligió.

Tabla 3.6: Características eléctricas del LED

Parámetro	Valor
Voltaje Umbral	2.4V
Corriente	6.5mA

En este caso, la corriente total será de alrededor de 78mA, lo que será considerado al momento de listar los requerimientos para una fuentes de alimentación, etapa no incluida en esta tesis.

Las características eléctricas de este tipo de LED indican que el tiempo de vida estimado es de 20000 horas en el peor de los casos. Considerando que cada LED estará permanentemente encendido, se asume que el tiempo de vida estimado

podría ser menor. Asumiendo que el tiempo de vida se acorte a la mitad, es decir, unas 10000 horas, la duración del sistema se puede extender durante 416 días ininterrumpidos. Luego de esto, sería prudente realizar una verificación del estado del arreglo de LEDs antes de constatar su correcto funcionamiento de manera electrónica. En caso el sistema no se use ininterrumpidamente, la vida útil del fotoemisor se podría extender durante mucho más tiempo sin revisión alguna.

Para el diseño se consideró una fuente de alimentación de 5V, lo que requería una resistencia de 390 ohmios para el circuito.

A continuación se presentan los diagramas esquemático y de tarjeta impresa diseñados para este parte.

En la figura 3.10 se muestra el diseño que se realizó para este fin. Los terminales correspondientes a alimentación positiva y tierra están asociados a los pines de un conector doble tipo Molex.

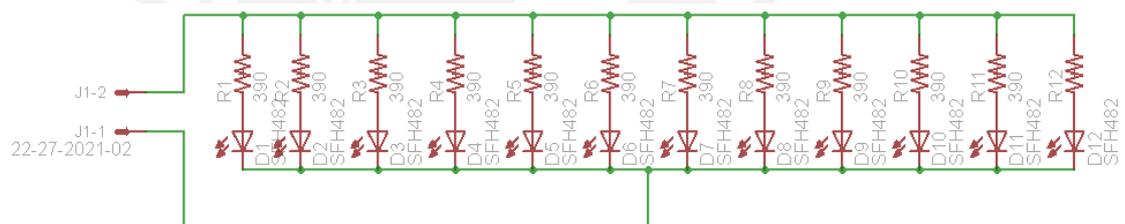


Figura 3.10: Diseño esquemático del fotoemisor

En la siguiente imagen, figura 3.11, se muestra el diseño de la tarjeta de circuito impreso.

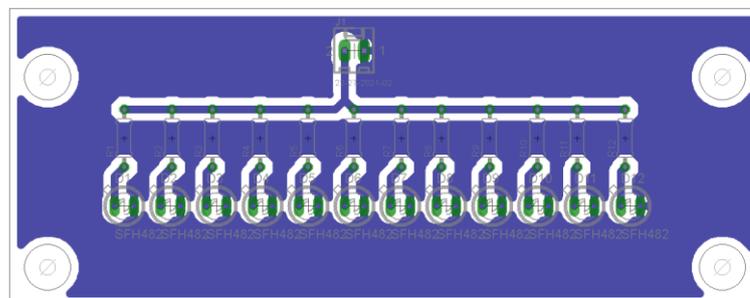


Figura 3.11: Diseño del circuito impreso del fotoemisor

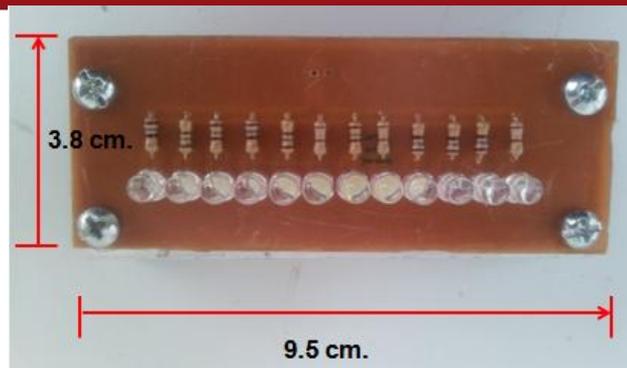


Figura 3.12: Dimensiones del fotoemisor

La figura 3.12 muestra la implementación final de la tarjeta del fotoemisor y sus dimensiones. Estas dimensiones están acorde con aquellas de la tarjeta del fotorreceptor, de modo que cada LED individualmente esté alineado con cada agujero y el área fotosensible de cada fototransistor. Se debe mencionar, por otro lado, que el conector Molex de 2 pines, mostrado en el diagrama de circuito impreso, se encuentra soldado de manera superficial en la otra cara de la tarjeta.

3.3.2.4 Diseño de la tarjeta de pre-procesamiento

En esta parte, se realizó una tarjeta electrónica capaz de acondicionar las señales que se obtenían de los fototransistores. Esto era un requerimiento debido a que la etapa de procesamiento requería señales que pudieran ser trabajadas por el microcontrolador para la visualización de la posición del eje.

Así, se realizó un circuito que, unido a la tarjeta del fotorreceptor era capaz de obtener salidas lógicas de 0 ó 5 voltios, dependiendo del nivel de luz recibido. A continuación se muestra el esquema de funcionamiento de uno de los fototransistores conectado a la tarjeta de pre-procesamiento.

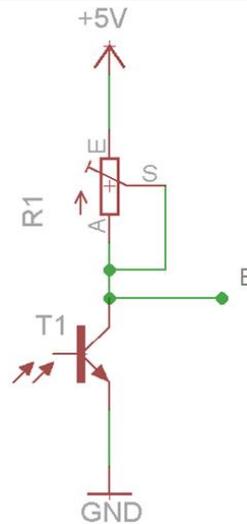


Figura 3.13: Diseño del circuito de pre-procesamiento

En la figura 3.13 se puede observar el circuito básico de cada fototransistor. Como se puede ver, el colector del fototransistor T1 está conectado al terminal S del potenciómetro de precisión, el que, a su vez, tiene su terminal E conectado a la alimentación de 5 voltios empleada para esta tarjeta. Como se puede ver, el segundo segmento del potenciómetro queda cortocircuitado y evita algún tipo de ruido en la señal recibida por el fototransistor.

El fototransistor, inicialmente en corte por la ausencia de luz, previene que el potencial de tierra alcance el nodo B, lo que permite que, en este caso, se tenga en ese punto un valor de aproximadamente 5 voltios, descartando la baja caída de potencial en la resistencia del potenciómetro por ser mínima la corriente circulante. Cuando el fototransistor se somete a luz, un sector transparente del disco codificado, se excita la base del mismo y se produce la saturación del fototransistor. Con esto, el potencial de tierra prácticamente se reproduce en el nodo B (0 voltios + 0.17 voltios de voltaje de saturación del fototransistor), lo que genera una corriente circulante de la fuente de alimentación a tierra, que dependerá de la resistencia que se asigne al potenciómetro. Con estos potenciómetros es posible la regulación del umbral de saturación del fototransistor, permitiendo definir los niveles de luz a los que satura. Esto evita también el uso de compuertas más especializadas, como aquellas con disparo Schmitt, que podrían generar errores de procesamiento debido a desincronización del disparo individual de cada uno de los fototransistores.

El nodo B, mostrado anteriormente, es el que se conectará a compuertas NAND para realizar la obtención una lógica positiva ('1' lógico con luz, '0' lógico con ausencia de luz) y para poder realizar la conexión directa de estas señales con las

compuertas del microprocesador de etapas siguientes para el procesado de las señales. Si bien es cierto que compuertas inversores serían más apropiadas para el realizar el cambio de lógica, se debe resaltar que en el Instituto de Radioastronomía se aprovechan los componentes disponibles y se tenían se tenían disponibles compuertas NAND en tecnología TTL y CMOS, por lo que este fue el principal motivo del uso de las compuertas NAND. En cualquier caso, el número de integrados requeridos (para el caso de inversores cuádruples y compuertas NAND cuádruples) difería en uno: usando compuertas NAND eran necesarios 3 circuitos integrados, mientras que usando inversores eran necesario 2 circuitos integrados. Como se dijo anteriormente, debido a que el diseño es realizado para fines de tesis y para empleo interno del instituto, no para producción en masa, diferencias en el número de integrados no presentan mayor importancia.

A continuación, se realizará una comparativa entre las dos compuertas NAND disponibles para el diseño del circuito. En la tabla 3.7 se puede apreciar las principales características tomadas de sus respectivas hojas de datos; en ellas, observando los parámetros, se ha logrado determinar los puntos resaltantes de cada circuito integrado.

Tabla 3.7: Comparativa entre circuitos NAND

Parámetro	74LS00	HC4011
Tecnología	TTL	CMOS
Voltaje de alimentación	4.75-5V	-0.3 – 18V
Corriente por puerta	20uA	≈0
Tolerancia a ruido	≈0.4V	≥1V
Disipación de potencia	Baja	Mínima
Tiempo de Propagación	15ns	60ns

Fuente: Hoja de datos del 74LS00 y el HC4011

Las compuertas TTL poseen un valor de alimentación limitado en cuanto a rango, mientras que las compuertas CMOS son capaces de satisfacer una gama mucho mayor de voltajes de alimentación. Esto, al momento de diseño es un parámetro importante, ya que permite que la etapa de alimentación para los circuitos y tarjetas que se diseñen posea un rango más amplio de valores posibles en caso se desee separar las fuentes de alimentación para cada bloque.

Por otro lado, la corriente necesaria para alimentar cada compuerta del circuito integrado asciende a 20uA en el caso del 74LS00. Este valor, si bien es cierto que

no sobrepasa el límite impuesto por los fototransistores para un buen funcionamiento, impone una limitante en cuanto a criterios de diseño ya que, por ejemplo, esto podría haber limitado la elección del fototransistor SFH3710 (cuya corriente inducida típica es de 6uA) por requerir etapas adicionales de amplificación. En el caso del HC4011, el valor de corriente de puertas es virtualmente cero, debido a la tecnología CMOS empleada por el circuito integrado, lo que favorece esta aplicación, en la que las corrientes que son posibles generar a través de los fototransistores son muy limitadas.

Otro punto importante que se tomó en cuenta fue el de la tolerancia a ruido. Debido a que el sistema estará, muy probablemente, a la intemperie, además de estar cerca a las líneas de alimentación de motores y a los motores en sí, podría darse que exista un nivel de ruido que podría llegar a afectar al circuito de manera constante. Así, para el caso del integrado 74LS00, se tiene típicamente una tolerancia al ruido de 0.4v, siendo este un valor relativamente bajo, especialmente en comparación de las compuertas CMOS. El HC4011, por su parte, tiene una tolerancia a ruido de al menos 1v, lo que supera a la compuerta TTL por más del doble.

La disipación de potencia en ambos integrados es baja; sin embargo, en el caso de las compuertas CMOS, se conoce que su disipación de potencia es extremadamente baja. Aún así, este punto no influye mayormente en la decisión de diseño debido a que la cantidad de componentes a utilizar y las potencias acumuladas que éstos representan no constituyen valores importantes que se deberían considerar para el diseño de fuentes de alimentación para el sistema.

Por último, el tiempo de propagación (de alta a baja y de baja a alta) en el 74LS00 es de alrededor de 15ns, lo que puede hacer ver a los 60ns del integrado HC4011 como un gran tiempo de retardo en la propagación. En este punto, debe notarse que ambos tiempos son medidos en nanosegundos, lo que representa una fracción de segundo muy pequeña y casi despreciable para la aplicación a la que va destinada. Considerando la velocidad de movimiento máxima de un radiotelescopio inferior a los 5° por segundo, y considerando un número de 4096 cuentas para los 360° que se obtienen por la resolución del sensor, se puede concluir que la cantidad de variaciones por segundo es de aproximadamente 34. Este número representa la variación de hasta 34 posiciones distintas por segundo debido a que en el código gray solo se realiza la variación de 1 bit por cada cuenta sucesiva. Con un retardo de 100ns (asumiendo para el peor de los casos un factor de adicional de

retardo de 66%, 40ns - lo que incluye tiempos de propagación eléctricas) se puede comprobar que la cantidad de variaciones posibles supera ampliamente las 34 variaciones por segundo (10 millones de variaciones por segundo vs 34 variaciones por segundo). En cualquier caso, queda claro que el retardo de propagación no influye de manera significativa en el desempeño del sistema.

Luego de esta comparación, se concluye que una elección favorable para el desarrollo del sistema sería la del circuito integrado HC4011.

A continuación, figura 3.14, se presenta el diagrama esquemático de la tarjeta que se diseñó.

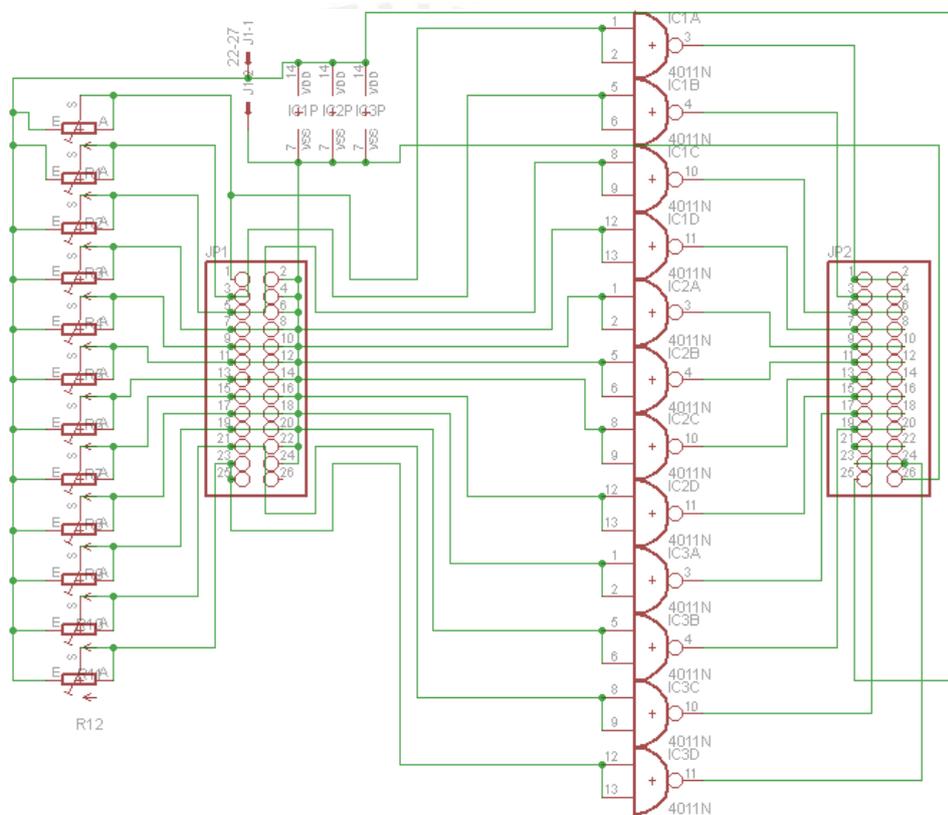


Figura 3.14: Diagrama esquemático de la tarjeta de pre-procesamiento

El nodo B del esquema que se presentó anteriormente en la figura 3.13 corresponde a cada una de las entradas de las compuertas NAND, las que actúan como inversor. En el pin 1 del conector IDC JP1 debe conectarse al terminal Colector del primer fototransistor y el pin 2 al terminal Emisor del mismo fototransistor; el pin 3 va conectado el terminal Colector del segundo fototransistor, el pin 4 el terminal emisor del segundo fototransistor y así sucesivamente.

Como se explicó anteriormente, cuando se recibe luz, se tiene un nivel de aproximadamente 0 voltios en las entradas de la compuerta, lo que a la salida genera un valor lógico de '1'. Cuando, por el contrario, se tiene ausencia de luz en el fototransistor, se tiene aproximadamente 5 voltios en el punto mencionado anteriormente (debido a la alta impedancia de entrada de las compuertas CMOS), lo que genera un valor lógico de '0'. Este es el principio de funcionamiento para el procesamiento directo de las señales; esto permite que las señales se ingresen directamente al microprocesador sin necesidad de amplificación o procesamiento adicional.

En este caso, el valor que se tiene en los potenciómetros es de alrededor a $80\text{k}\Omega$, de modo que se tenga una corriente de $62\mu\text{A}$, valor típico de operación para el fototransistor elegido.

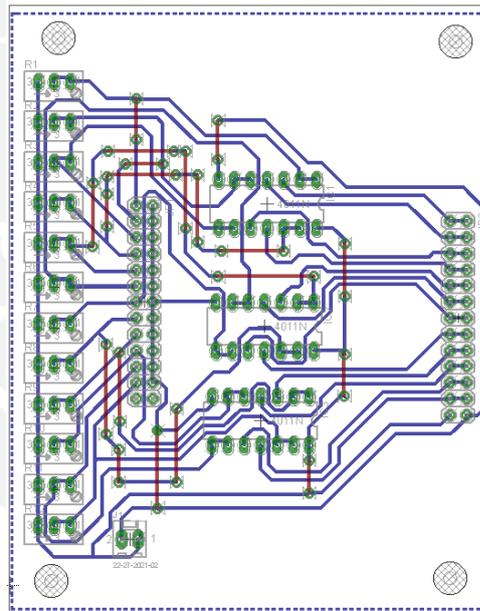


Figura 3.15: Diagrama de circuito impreso para la tarjeta de pre-procesamiento

En la Figura 3.15 se puede apreciar el diagrama de circuito impreso que fue elaborado para la tarjeta de pre-procesamiento. Se debe destacar, de izquierda a derecha, la presencia de los potenciómetros de regulación, el conector Molex de 2 pines para proporcionar tensión de 5 voltios y tierra, conectores IDC de doble fila – de entrada para los fototransistores y de salida para las compuertas lógicas – para

conexión de la tarjeta con otras etapas vía cable flat y los circuitos integrados NAND 4011.



Figura 3.16: Tarjeta final de pre-procesamiento

La figura 3.16 muestra la tarjeta final que implementó para la conexión con el resto del sistema. Adicionalmente, a continuación, se presenta una tarjeta de pre-procesamiento con salida a diodos LED que se realizó inicialmente para visualizar la conmutación de señales y permitir la regulación de los umbrales de saturación a través de una simple inspección visual.

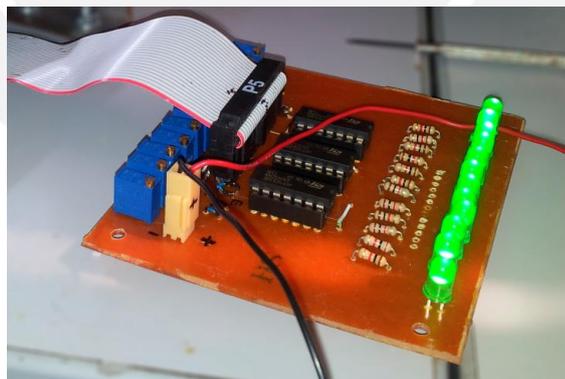


Figura 3.17: Tarjeta de inspección visual

La tarjeta que se muestra en la figura 3.17 es el primer prototipo de la tarjeta final que se implementó, la que sigue el mismo esquema de diseño y funcionamiento que la tarjeta final, con la diferencia que las salidas de las compuertas están conectadas a LEDs en lugar de conectores de salida. Esto se realizó para lograr una inspección visual rápida de los niveles de corriente requeridos por cada

fototransistor, ajustables con los potenciómetros, para operar en condiciones de luz que se den; con ello, se puede asegurar que todos los fototransistores están operando en corte/saturación cuando es debido, dejando para posteriores inspecciones detalladas del funcionamiento la medición de los voltajes respectivos.

3.3.2.5 Diseño de la tarjeta de procesamiento

Para esta etapa se requería una tarjeta capaz de procesar las señales que se obtenían de la tarjeta de pre-procesamiento, que pudiera realizar la conversión de código Gray a código binario convencional y almacenara este valor en un registro para posterior visualización y/o transmisión. Un requerimiento adicional era el de poder mostrar el valor en grados sexagesimales en un visualizador LCD, de modo que se pueda constatar que el sistema completo funcionaba apropiadamente.

Para estos fines, se decidió utilizar el microcontrolador ATmega8, debido a la facilidad de programación, lo que haría menos complicada la tarea de convertir el código Gray a binario; además, el número de entradas disponibles en el microcontrolador era el suficiente para la aplicación, así como su frecuencia de operación (1MHz) y los requerimientos de voltaje.

De igual forma, se optó por un visualizador LCD de 16 caracteres y 2 líneas. Esto permitiría mostrar el valor en grados sexagesimales en una línea y, en la otra, el valor binario que se tiene a cada instante, de modo que sea posible comprobar que las transiciones se producen entre bit y bit de manera secuencial.

No se describirá detalladamente el microcontrolador debido a que, en general, no se realizará uso extenso de sus funciones adicionales, como generadores de PWM, temporizadores, conversores análogo-digital, etc. Las características principales del microcontrolador ATmega8 se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Características principales del microcontrolador Atmega8

Nº de líneas de entrada/salida:	23
Nº de instrucciones:	130
Nº de registros de propósito general:	32
Nº de contadores/temporizadores:	3
Frecuencia máxima de reloj:	16 Mhz
Resolución del conversor ADC:	10 bits
Características adicionales:	USART Programmable
Voltaje de alimentación:	4.5-5.5v

La figura 3.18, a continuación, muestra la configuración de pines para el microcontrolador ATmega8 de montaje DIP. Posteriormente, se hará mención a los pines usados en el software desarrollado.

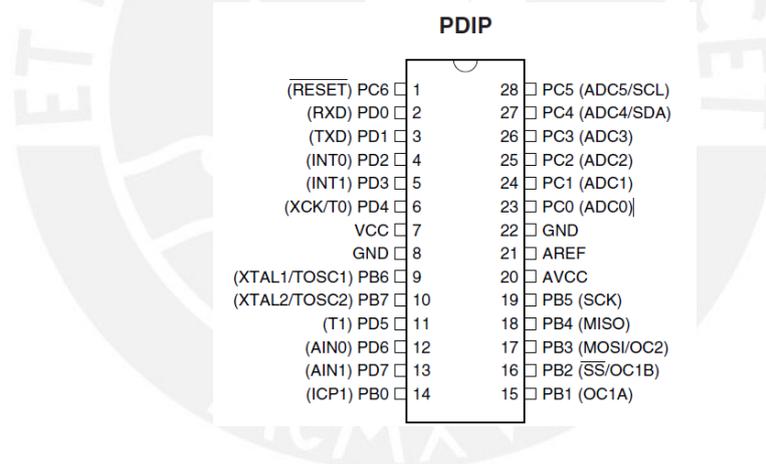


Figura 3.18: Disposición de pines para el ATmega8

Las características más importantes del visualizador empleado, el TS1620A, se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3.8: Características del visualizador LCD

Visualización:	16 caracteres x 2 líneas
Fuente:	5x8 puntos
Voltaje de alimentación:	5 voltios
Características adicionales:	Contraste regulable, modo de transmisión a 4 bits y 8 bits

El LCD posee 16 pines, cuya configuración se muestra resumida en la tabla 3.9.

Tabla 3.9: Pines del visualizador LCD TS1620A

N° de pin	Símbolo	Función
1	Vss	Tierra
2	Vdd	Alimentación (5v)
3	Vo	Ajuste de contraste
4	RS	Selección de Registro (datos/ instrucción)
5	R/W	Selección de Operación (lectura/escritura)
6	E	Inicio de operación
7-10	DB0-DB4	4 bits menos significativos para transmisión
11-14	DB5-8	4 bits más significativos – desactivados para transmisión a 4 bits
15	BLA	Alimentación para retroiluminación (5v)
16	BLK	Tierra para retroiluminación

La tarjeta de procesamiento permite el funcionamiento del microprocesador y brinda los conectores necesarios para la interconexión del ATmega8 con el resto del sistema y con el visualizador LCD.

A continuación, se presentan los diagramas esquemático y de circuito impreso que se realizaron para esta tarjeta.

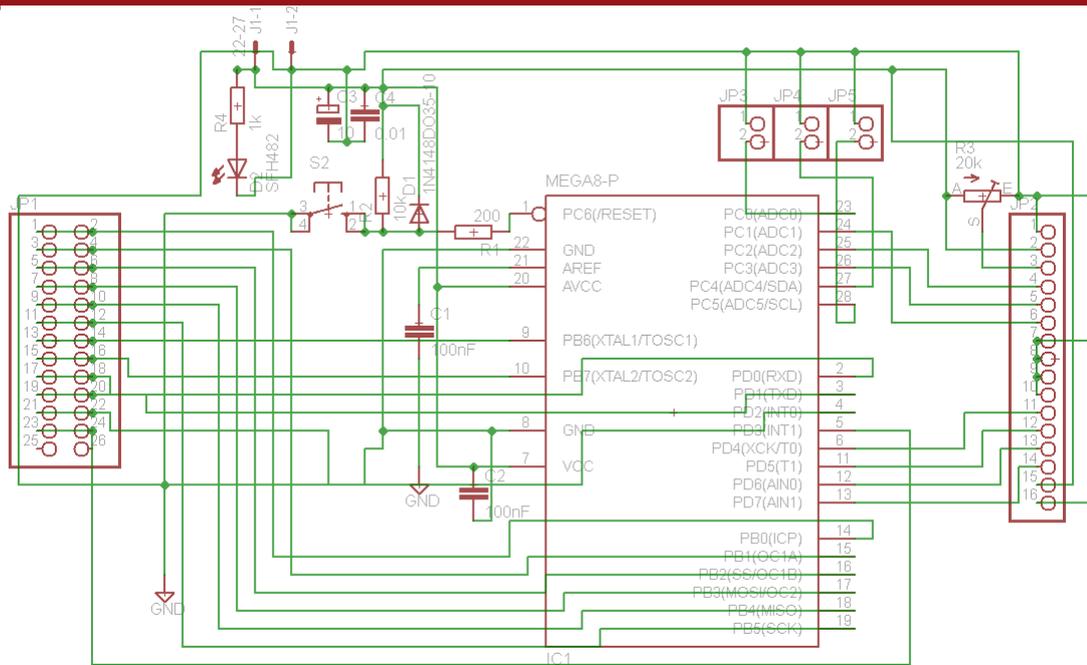


Figura 3.19: Diagrama esquemático de conexiones para la tarjeta de procesamiento

En la figura 3.19 se muestra un grupo de conectores IDC de doble fila en la parte izquierda, los que se utilizan para realizar las conexiones de los 12 bits del sensor de posicionamiento, que se obtienen de la tarjeta de pre-procesamiento, con la tarjeta de procesamiento. Además, se tiene un LED que indica la presencia de voltaje de alimentación, un pulsador para el reinicio del microcontrolador, un circuito contra efecto rebote del pin reset (constituido por el Diodo D1 y la resistencia R2) y condensadores necesarios para el funcionamiento apropiado del microcontrolador y supresión de ruido. En el lado derecho de la imagen, se tienen IDC dobles conectados a cada una de los pines de entrada/salida que no se están utilizando (PC0, PC4, PC5), un potenciómetro de 20kΩ variar el contraste del LCD (a través de la conexión al terminal Vo de LCD) y el grupo de conectores IDC de 16 pines y una fila, que se conectará al LCD.

Se debe mencionar la distribución de conexiones y disposición de los conectores se realizó de tal forma que, al conectar los cables flat, las tarjetas se pudieran interconectarse de manera directa a los pines asociados y el LCD tuviera los pines de control y bus de datos conectado a las entradas/salidas que se destinaron en el microcontrolador para tal fin. Como se puede apreciar en el conector del lado derecho, los pines 7 al 10 del conector IDC JP2 de 16x1 están conectados a tierra para asegurar que la transmisión a 4 bits que se eligió para el LCD se produzca sin errores o interferencias.

En la siguiente imagen, figura 3.20, se muestra el diagrama de circuito impreso que se realizó para esta parte y su correspondiente implementación.

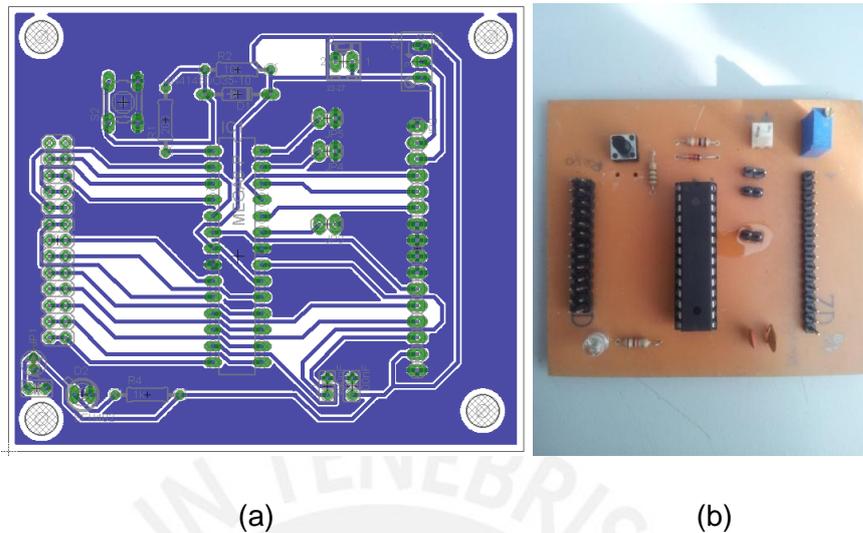


Figura 3.20: (a) Diagrama de circuito impreso para la tarjeta de procesamiento, (b) Tarjeta de procesamiento implementada

3.3.2.5.1 Diseño del software

Para emplear la tarjeta de procesamiento que se diseñó para el microcontrolador ATmega8 y su conexión al LCD, fue necesario el desarrollo de software que fuera capaz de realizar la conversión de código Gray a código binario y, posteriormente, a valores decimales para ser mostrados en el LCD. Además, se diseñó otro programa que realizaba la misma conversión y enviaba dichos valores a través de transmisión serial, el tipo de comunicación que, muy probablemente, será adoptada por el sistema central de control.

Este software fue escrito en lenguaje de programación Assembler y compilado y simulado en el entorno de programación VMLAB.

El primer programa implementado tomaba las señales de 12 pines de entrada del microcontrolador y realizaba la conversión del código Gray a código binario; posteriormente, estos valores binarios se convertían a sus equivalentes en dígitos decimales para la visualización aproximada de la posición en grados sexagesimales, siguiendo el diagrama de flujo que se mostrará más adelante, en la figura 3.23.

El segundo programa implementado realizaba el mismo procedimiento, recibiendo las 12 señales de entrada y convirtiendo el código Gray recibido en código binario, obteniendo valores decimales y sus dígitos, correspondientes a la posición obtenida. Este programa empleaba, en vez de visualización vía LCD, comunicación serial a 8 bits, lo que permitirá más adelante que la computadora reciba estos valores para realizar el control del radiotelescopio.

La comunicación con el LCD se realiza mediante 11 pines de salida (descartando los usados para alimentación y tierra), cuya distribución se muestra en la tabla 3.10.

Tabla 3.10: Asociación de pines microcontrolador-LCD

I/O del procesador	Pin del LCD Asociado	Función
PC1	6	Habilitador de transmisión
PC2	4	Selección de registro
PC3	5	Selección de operación
PD7	14	Bus de datos
PD6	13	Bus de datos
PD5	12	Bus de datos
PD4	11	Bus de datos

Los pines de transmisión de datos menos significativos (DB3-DB0) están conectados físicamente a tierra como requerimiento de la transmisión a cuatro bits que se realizó para el LCD.

En el caso del programa para la comunicación serial se toma los 12 bits de código de las entradas PC3-PC0 para los 4 bits más significativos y de las entradas PB7-PB0 para los 8 bits restantes. La comunicación serial se realizaba a través de los pines destinados para ese fin en el microcontrolador.

En la figura 3.21 se muestra la simulación de la visualización de la posición en el LCD. En la primera línea se puede ver la posición en grados sexagesimales y en la segunda se puede ver el código binario asociado. El código gray se encuentra almacenado en registros para su empleo posterior.



Figura 3.21: Simulación de la visualización de la posición en el LCD

En la figura 3.22 se muestran las simulaciones de transmisión serial. En este caso, se espera el comando txpos, seguido de un enter, lo que indica que es necesario iniciar la conversión del código y realizar el envío de la información.

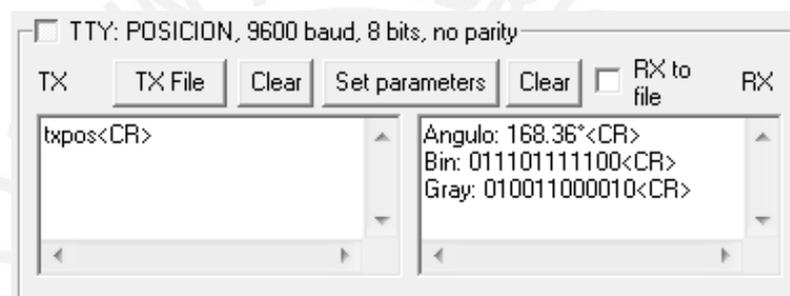


Figura 3.22: Simulación de la transmisión serial de los datos de la posición

A continuación se presenta, en la figura 3.23, el diagrama de flujo del programa principal que se realizó para la visualización de los datos del sensor de posicionamiento en el LCD. Se debe mencionar que se presentan las subrutinas principales del programa, las que, a su vez, presentan subrutinas, retardos y otras operaciones que permiten el correcto funcionamiento del programa.

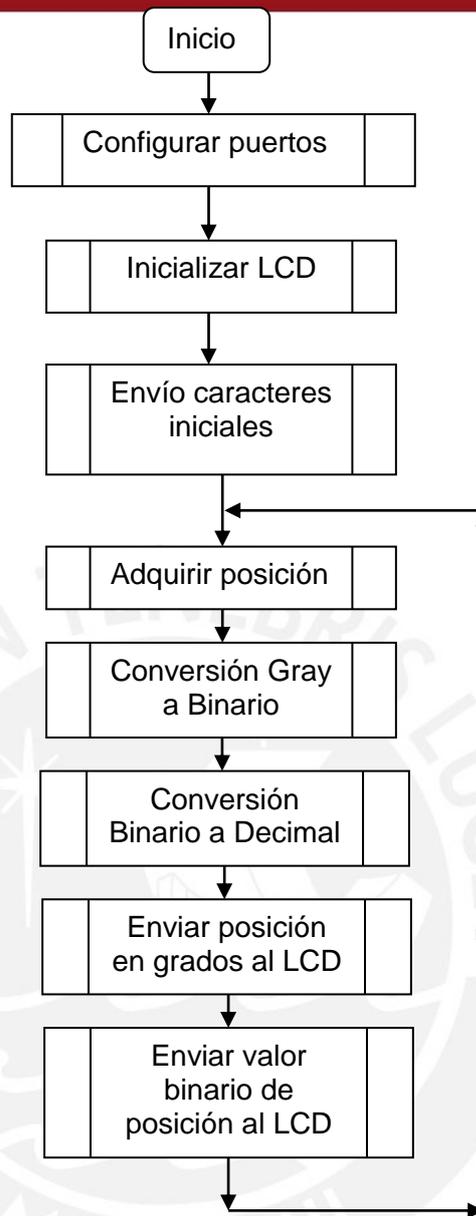


Figura 3.23: Diagrama de flujo del programa de procesamiento y visualización

El programa inicia configurando los puertos del microcontrolador y sus pines como entradas y salidas para trabajar con los datos que se tienen. Luego, se realiza la inicialización del LCD vía software, configurándolo para permitir el empleo de datos de 4 bits en el bus de datos. Posteriormente, se realiza el envío de caracteres iniciales, que son caracteres que permanecerán inmutables durante toda la ejecución del programa (por ejemplo, el símbolo de grados, los dos puntos, etc.). Lo siguiente es realizar la subrutina de adquisición de posición, en la que se realiza la lectura de las entradas del microcontrolador asociadas al fotorreceptor, obteniendo el código Gray de la posición actual del sensor. Seguidamente, se realiza la

conversión del código Gray a código binario, mediante el método de operaciones EXOR sucesivas. Con ese valor binario, se realiza la conversión al número decimal correspondiente, lo que representa el número de pasos que se ha desplazado el eje desde el valor inicial de 0° . Considerando un máximo 4096 pasos debido a la resolución, es posible realizar cuentas sucesivas hasta llegar al valor actual para determinar los dígitos de la posición en grados del eje. Una vez se tiene la posición y sus dígitos, se envía al LCD cada dígito individualmente y, adicionalmente, se realiza el envío del valor binario asociado, de modo que pueda notarse la variación correcta de los bits con el movimiento del eje. Cuando se concluye todo el proceso, el programa regresa a adquirir la posición para registrar la posición actual del sistema con un mínimo retardo.

Cada subrutina (y las subrutinas de éstas) y su descripción están especificadas más claramente en el código completo, presentado en el Anexo 2.

Es importante resaltar que el algoritmo de conversión de código binario a los dígitos decimales que se muestran en el LCD fue implementada con una resolución de 0.09° ; es decir, la mínima variación (1 bit) generará un incremento de 0.09° , por lo que fue necesario incluir rutinas de compensación del error que esto genera. Esto está opuesto a la variación mínima real alcanzable por el sensor de 0.087890625° , que se obtiene de dividir 360° entre los 4096 (2^{12}) pasos posibles del disco codificado. Con los pasos de 0.09° , se generaban los siguientes valores posibles para mostrar los decimales: 0.09, 0.18, 0.27, 0.36, 0.45, 0.54, 0.63, 0.72, 0.81, 0.90 y 0.99, todos en grados. El algoritmo diseñado para la visualización de estos dígitos implicaba aproximar el valor de pasos de la posición, registrado en binario (con 0.087890625° por cuenta), al siguiente valor de paso posible más cercano. Es decir, si se presentaran, por ejemplo, valores como 319.93° , el programa aproximaría dicho valor a 319.99° en vez de aproximarlo al valor más cercano de 319.90° . La visualización en grados sexagesimales no es objetivo directo de esta tesis, pero se realiza como un añadido, que además permite constatar la consecución resultados y el funcionamiento correcto del sensor.

Para entender de mejor manera lo explicado acerca de la visualización, se sugiere revisar el Anexo 4, donde se incluye el diagrama de flujo de la subrutina de conversión del código binario a dígitos decimales. Este punto es importante debido a que esta subrutina influye en la precisión que se visualiza en el LCD – aunque no en la que se logra alcanzar en el sensor.

El esquema siguiente, la figura 3.24, presenta el diagrama de flujo del segundo programa implementado, que posee las mismas rutinas de decodificación y conversión que el programa anterior, incluyendo la conversión a dígitos decimales; la única distinción es la configuración y comunicación serial, con los comandos y rutinas asociados.

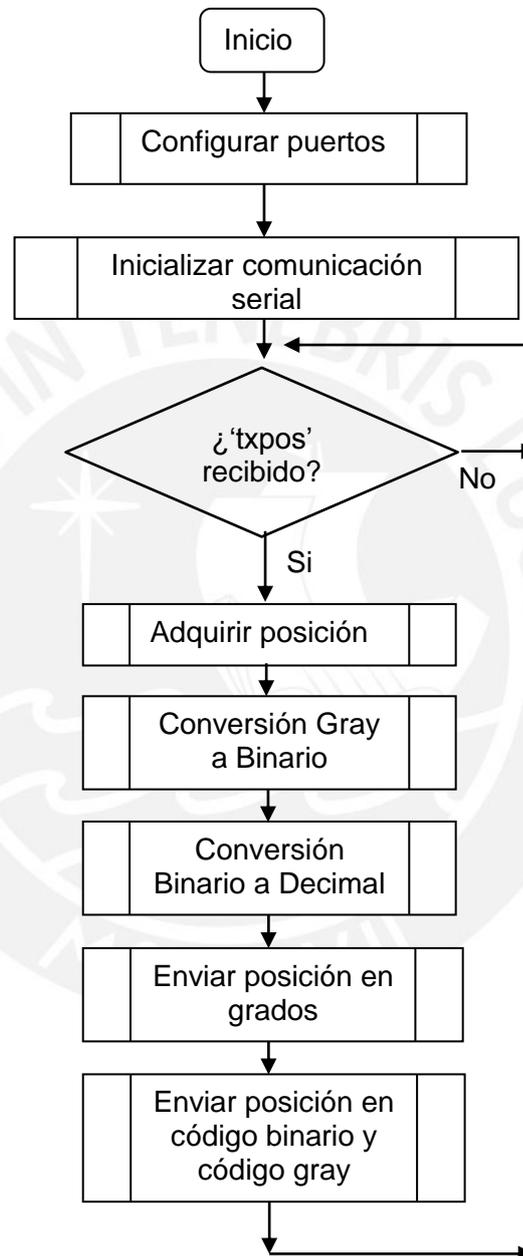


Figura 3.24: Diagrama de flujo para el programa que emplea transmisión serial

El programa elaborado basado en este diagrama se muestra en el Anexo 3.

3.3.3 Diseño mecánico del chasis y montaje

La implementación de la mecánica implicaba realizar un arreglo que le brindara estabilidad y rigidez al par fotoemisor-fotorreceptor, de modo que la alineación de ambas se realizara de manera óptima y permitiera el correcto funcionamiento del sensor. Para esto se emplearon planchas dobladas de bronce de 1mm. de espesor, lo que permitía que el doblado y el soldado de las mismas se realizara con relativa facilidad. Una de las planchas se empleó como soporte para el arreglo, mientras que otra, la que fue soldada al soporte, se utilizó para permitir al arreglo pivotar para poder alinearlos correctamente con la dirección del radio del disco codificado. La separación realizada en el arreglo para ambas tarjetas es de aproximadamente 1.5 cm, probada como la distancia óptima de funcionamiento.

La mecánica implementada en esta parte se muestra en las figuras 3.25 y 3.26.



Figura 3.25: Arreglo fotoemisor-fotorreceptor, vista frontal



Figura 3.26: Arreglo fotoemisor-fotorreceptor, vista posterior

La mecánica para el chasis del sensor se realizó con discos de metal y pernos, así como rodajes para sostener el eje y permitir el giro del disco codificado. El sensor permite anexarse al eje de movimiento de la antena a través del eje integrado al disco codificado, saliente por una de las caras del chasis. Además, debido a que se planea montar el sensor a desarrollar cerca al área de los controles alt-azimutales de la antena – en cada eje –, sería necesario construir una estructura que brinde soporte a todo el arreglo. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, no se han realizado las estructuras de soporte para el reflector parabólico, por lo que no se tiene referencias sobre las conexiones eléctricas o el acople mecánico que tendrá el sensor.

El diseño de la construcción mecánica sigue los siguientes esquemas, que se muestran en la figura 3.27 y en la figura 3.28 a través gráficos en 3D realizados para esta tesis. Se debe mencionar que la parte móvil está constituida por el disco codificado y el eje, mientras que el chasis se mantiene estático.

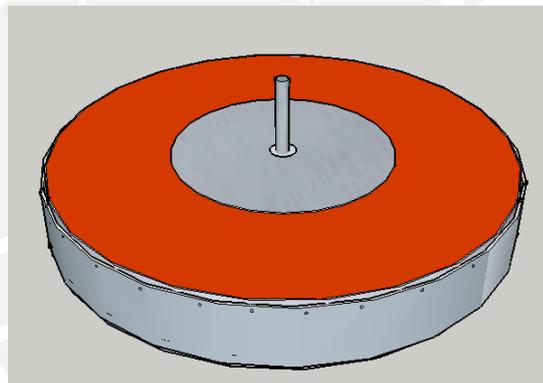


Figura 3.27: Esquema de construcción mecánica para el chasis del sensor de posicionamiento

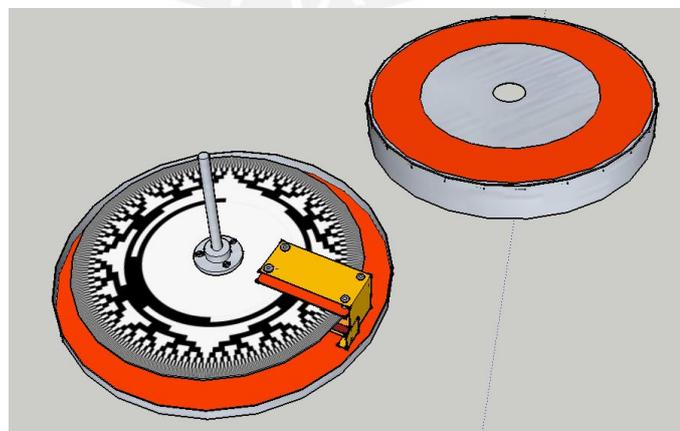


Figura 3.28: Vista interna del diseño para la construcción mecánica del sensor de posicionamiento

La implementación final del arreglo empleó discos de aluminio de 35cm., junto con discos centrales de 23cm., para la base del arreglo; además, se usó perfiles rolados de aluminio para el contorno donde se colocan las paredes metálicas del sensor, lo que permite cerrarlo. Se utilizó bridas para rodajes, alojadas en la parte central de los discos, y se colocó el arreglo fotoemisor-fotorreceptor, alineándolo correctamente con el disco codificado, cuyo eje fue insertado en el rodaje de la brida central. En la figura 3.29 se muestra una vista del interior del sensor desarrollado. En la figura 3.30 se muestra el sensor desarrollado conectado al resto de la electrónica.



Figura 3.29: Vista interna del sensor

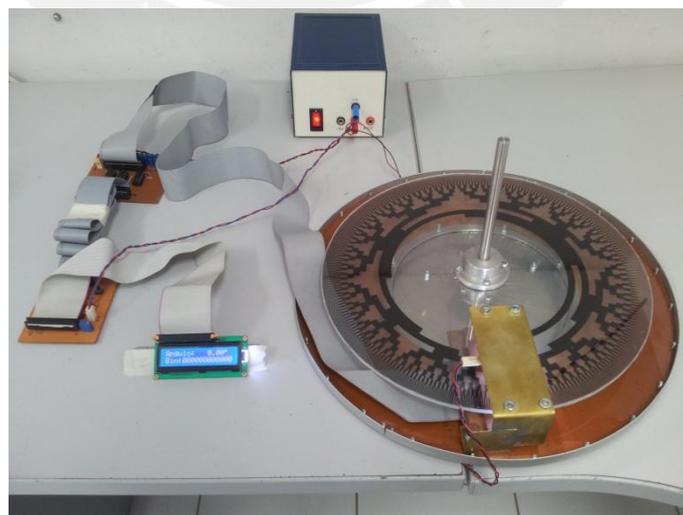


Figura 3.30: Conexión del sensor al resto de la electrónica

CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR DE POSICIONAMIENTO

4.1 Resumen de pruebas

El siguiente acápite aborda el grupo de pruebas que se realizó para el sensor de posicionamiento. Éstas consideraron las tarjetas diseñadas y su desempeño individual, asegurando que cada constituyente funcione apropiadamente antes de la prueba del sistema integrado.

El primer grupo de pruebas se realizó con la tarjeta de pre-procesamiento con salida de inspección visual, que se diseñó. Posteriormente, se realizó otro grupo de ensayos con la tarjeta de pre-procesamiento y la conexión al LCD sin utilizar el disco codificado diseñado. Finalmente, se realizó la prueba del sensor de posicionamiento utilizando todas las tarjetas diseñadas con el disco codificado. La prueba final se realizó luego de concluido el montaje y siguió los mismos lineamientos de pruebas anteriores.

Para reducir la extensión de esta tesis, se ha optado por solo incluir algunas imágenes asociadas a cada una de las pruebas, aunque es posible acceder a imágenes adicionales en el Anexo 5.

4.1.1 Pruebas individuales del sistema

Para realizar estas prueba se conectó la tarjeta del fotorreceptor a la tarjeta de inspección visual (gemela a la tarjeta de pre-procesamiento), de modo que se pudiera visualizar la conmutación del estado de los LED, comprobando el funcionamiento de la tarjeta del fotorreceptor y la tarjeta de pre-procesamiento. Las pruebas para estas tarjetas se realizaron utilizando un LED de alta intensidad, como el que algunos equipos celulares utilizan como flash, aplicando la luz individualmente a cada agujero alineado con el fototransistor. En la figura 4.1 se muestra el procedimiento realizado.

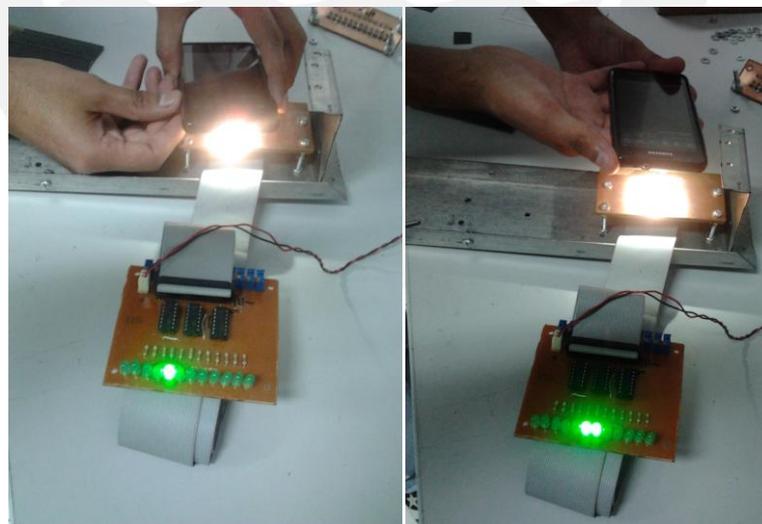
Los resultados eléctricos de la prueba se muestran en la Tabla 4.1. Las pruebas se realizaron promediando los valores encontrados en cada uno de los 12 fototransistores.

Tabla 4.1: Resultado de pruebas eléctricas

Estado	Corriente (@5v, 80k Ω)	Voltaje Colector-emisor
Ausencia de luz	0.003uA	5V
Presencia de luz	65uA	0.172mV

Los resultados mostrados concuerdan con los parámetros eléctricos del fototransistor. La corriente de oscuridad típica del dispositivo listada en la hoja de datos es de 3nA, lo que está acorde a lo analizado para esta parte. La corriente en presencia de luz está dentro de los parámetros de funcionamiento del fototransistor. De igual forma, el voltaje colector emisor de saturación en ausencia y presencia de luz teórico concuerda con las pruebas que se realizaron.

Las pruebas visuales de saturación y corte de cada fototransistor se presentan utilizando la tarjeta de inspección visual que se desarrolló. En estas pruebas, como se puede apreciar en la figura 4.1, se da el encendido y apagado de LEDs para la iluminación para los fototransistores.



(a)

(b)

Figura 4.1: (a) Prueba de iluminación directa a menor distancia, (b) Prueba de iluminación directa a mayor distancia

Como se puede ver, para estas pruebas se registró el encendido y apagado de los LEDs asociados a los fototransistores iluminados. En la figura 4.1-a se observa que con una menor distancia a una intensidad luminosa se enciende un LED, mientras

que a una mayor distancia – mayor área iluminada –, como en el caso de la figura 4.1-b, se encienden dos LEDs. Esta característica no implica riesgo alguno para el sistema debido a que éste diseñó teniendo en mente una intensidad luminosa menor (como la de LEDs ultra brillantes) y distancias del emisor hacia el receptor menores a la que se utilizó en la Figura 4.1-b, que fue aproximadamente 3cm.

La siguiente prueba que se realizó fue la iluminación de todos los fototransistores con el arreglo de LEDs que se diseñó. Con ello, sería posible determinar si la intensidad de iluminación que cada LED individual brinda a los fototransistores es suficiente para producir el corte y saturación del dispositivo. Estas pruebas también permitieron constatar que cada LED estaba alineado correctamente con el fototransistor asociado. Además, también se logró compensar las diferencias entre los niveles de saturación de los fototransistores que se presentan (considerando que los procesos de fabricación no siempre son exactamente iguales, haciendo que, por ejemplo, la sensibilidad a la luz entre fototransistores difiera levemente), así como también compensar las imperfecciones de los agujeros de la placa perforada; con estas pruebas se realizaron ajustes mínimos a los valores iniciales de resistencia de los potenciómetros de precisión para conseguir la saturación de todos los fototransistores.

La siguiente imagen, figura 4.2, muestra el arreglo de LEDs y la tarjeta del fotorreceptor alineadas. En este caso, la tarjeta del fotorreceptor se conectó también a la tarjeta de inspección visual para poder observar el efecto deseado. Posteriormente, también, se realizó la conexión con la tarjeta de pre-procesamiento final y se procedió a medir las señales obtenidas a la salida de la misma.

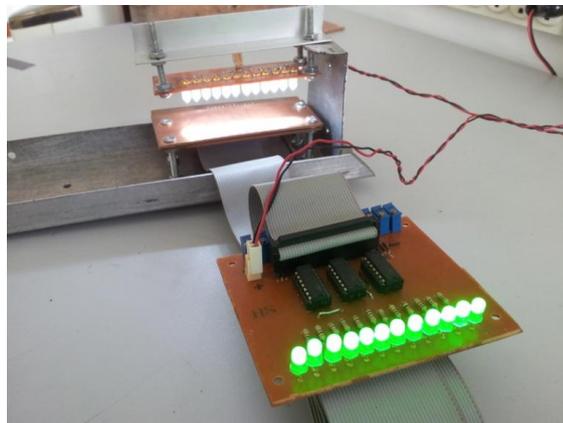


Figura 4.2: Prueba de la tarjeta de procesamiento con el arreglo de LEDs

En la figura 4.2 se muestra el arreglo del fotoemisor, alineado con el fotorreceptor y los LEDs asociados a cada uno de los fototransistores encendidos a causa de la intensidad luminosa que incide en el área sensible. Se comprueba el funcionamiento y alineamiento correcto de las tarjetas. Para asegurar la correcta operación de la tarjeta se cubrió ciertos agujeros con una placa opaca y se constató el apagado de los LEDs asociados, como se puede observar en la figura 4.3

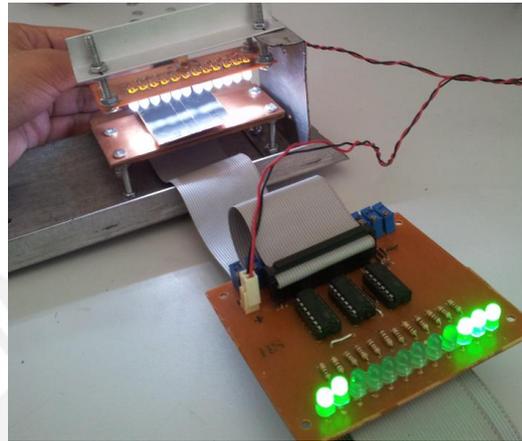


Figura 4.3: Prueba con placa opaca

Finalmente, la última prueba visual que se realizó para el sensor fue una con el disco codificado colocado entre el sensor y el emisor. De igual forma, fue necesario ajustar nuevamente los niveles de saturación de los fototransistores utilizando los potenciómetros de precisión. En la imagen siguiente, figura 4.4, se aprecia que se tiene un código asociado al sensor que se refleja en los LEDs encendidos y apagados a la salida de la tarjeta.

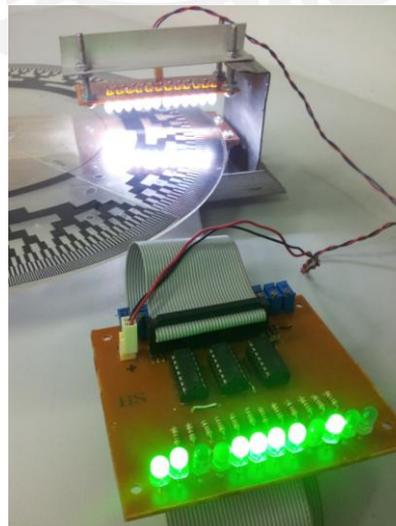


Figura 4.4: Prueba con el disco codificado de la tarjeta de inspección visual

Como se puede observar, para las diferentes configuraciones de las pruebas de fototransistores expuestos o no a luz, se tiene la respuesta deseada de producir o no que el LED asociado se encienda.

Se realizaron, además, pruebas y mediciones para asegurar que el voltaje a la entrada de la compuerta NAND en cada integrado estuviera acorde a lo diseñado. El esquema, figura 4.5, a continuación, se presenta ayuda a entender dónde se realizaron las mediciones. Los nodos utilizados son el nodo B y el nodo D.

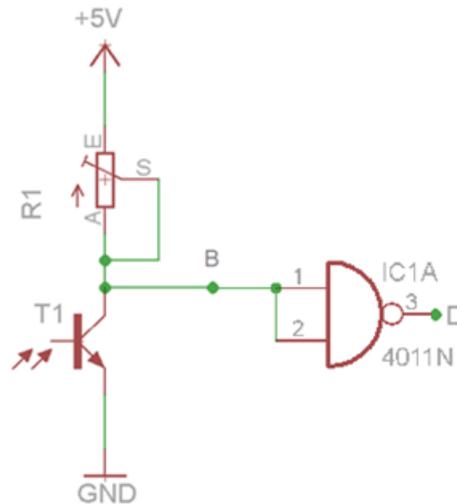


Figura 4.5: Esquema de conexión de un fototransistor

En la figura 4.6, a continuación, se muestra, en la tarjeta de pre-procesamiento, el nodo B, colector del fototransistor, y el nodo D, salida de la compuerta lógica, a los que se hace referencia en el esquema anterior y que se toma de ejemplo para las mediciones que se realizaron. Se debe mencionar que las mediciones se realizaron también para el resto de nodos asociados a las entradas de cada una de las compuertas empleadas.

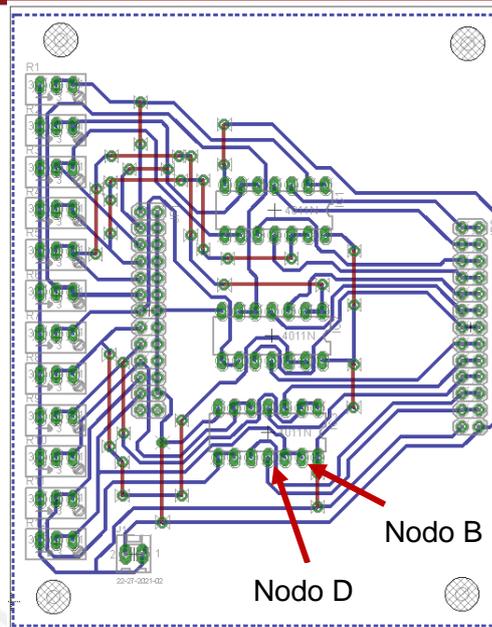


Figura 4.6: Nodos de pruebas

Los valores que resultaron de las mediciones son similares en todos los casos; sin embargo, se muestran solo los valores para un par de nodos (nodo B y nodo D) en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Lecturas en el nodo B y en el nodo D

Número de prueba	Estado	Voltaje en nodo B	Voltaje en nodo D
1	Ausencia de luz	4.86V	0V (nivel bajo)
2	Presencia de luz	0.17V	4.36V (nivel alto)

Las siguientes imágenes, figura 4.7 y figura 4.8, registran el proceso de medición de voltajes en los nodos ilustrados en la tarjeta. El valor de voltaje registrado para el nodo B concuerda con el valor del voltaje colector-emisor de saturación del fototransistor. La salida de la compuerta lógica está acorde a los parámetros especificados en su hoja de datos.

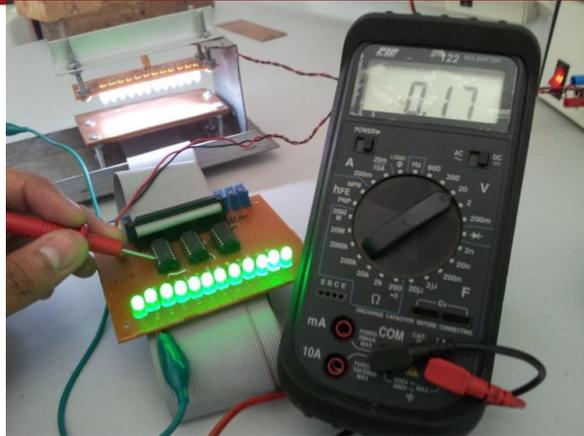


Figura 4.7: Voltaje en el nodo B, presencia de luz

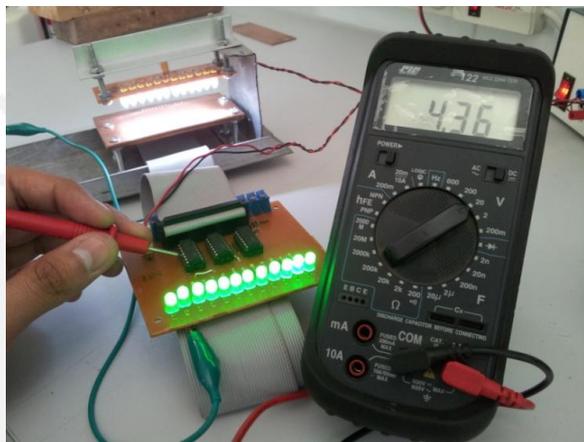


Figura 4.8: Voltaje en el nodo D, presencia de luz

4.1.2 Pruebas del sistema integrado

El siguiente grupo de prueba implicaba el uso de todo el sistema integrado. Se conectó el fotorreceptor a la tarjeta de pre-procesamiento final y ésta, a su vez, conectada a la tarjeta de procesamiento del microcontrolador; finalmente, se colocó un visualizador LCD para poder observar la variación de la posición del sensor.

La primera prueba realizada fue utilizando valores de posición conocidos que se generaban en el sensor permitiendo o no el paso de luz a los agujeros de determinados fototransistores. A continuación, la tabla 4.3 muestra los valores en código Gray que se generaron en el sensor, los códigos binarios asociados y la posición en grados.

Tabla 4.3: Primera prueba del sistema integrado

Número de Prueba	Foto-transistor cubierto	Código Binario	Código Gray	Posición Esperada (°)	Posición angular obtenida (°)
1	12avo	111111111111	100000000000	359.91°	359.90°
2	10mo	001111111111	001000000000	89.91°	89.90°
3	4to	000000001111	000000001000	1.32°	1.36°
4	1ero	000000000001	000000000001	0.088°	0.09°

Las figuras 4.9 y 4.10, presentadas a continuación, muestran dos pruebas de todas para las condiciones arriba mencionadas.



Figura 4.9: Prueba con el 12avo fototransistor cubierto

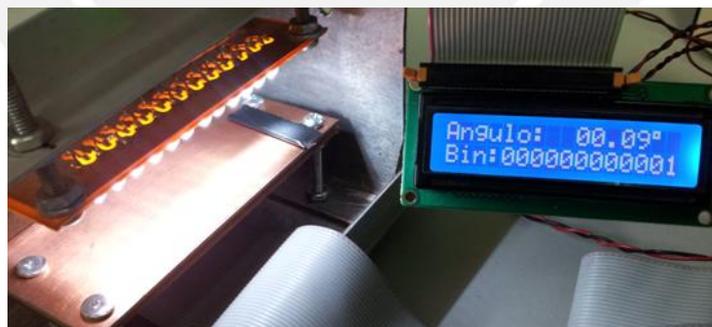


Figura 4.10: Prueba con el primer fototransistor cubierto

Al cubrir el fototransistor se inducía un potencial de 5 voltios a la entrada de la compuerta NAND, lo que generaba una salida de nivel lógico bajo. El programa implementado en el microcontrolador ATmega8 tenía en cuenta este estado; así, el programa entendía un valor lógico de '0' para presencia de luz y un valor lógico de

'1' para ausencia de luz. Es con esta lógica que se realiza la conversión al valor binario asociado y, posteriormente, a cada dígito de la posición angular.

Como se puede observar en las imágenes, se posee una precisión certera en cuanto a los valores que debían obtenerse, en especial para los valores Gray y binario. Las diferencias entre los valores esperados y los obtenidos en la visualización se deben a la manera en que se diseñó e implementó el software del microcontrolador. Como se ha mencionado en el acápite del software, en el capítulo 3, éste consideraba los pasos decimales fijos – para evitar complejidad en la escritura del código y costo computacional -, de modo que se tiene un valor de paso mínimo de 0.09° , frente al teórico de 0.087890625° , requerido para obtener los 360 grados con los 4096 pasos de los 12 bits de resolución. Dicho de otro modo, la resolución de 12 bits requerida para el sensor sí se pudo alcanzar al proporcionar de manera correcta el código asociado a la posición correspondiente (tanto en Gray como en binario, ambos valores reales coincidentes con los resultados – basta con multiplicar el valor decimal resultante del código binario por el paso mínimo de 0.087890625° para comprobarlo); al momento de implementar el programa se visualizan valores redondeados del paso mínimo. Se buscó corregir este redondeo, pero solo se logró en cierta medida, lo que se evidencia en algunos valores más cercanos al esperado y otros un poco más lejanos. La compensación no solo debía corresponder al valor del paso mínimo redondeado sino también al efecto de tener pasos fijos de decimales, por lo que el error no es constante; sin embargo, el error de la visualización es mínimo en cada posición.

Cabe resaltar que la visualización en grados sexagesimales no es objetivo directo de esta tesis, pero se realiza como un añadido, que además permite constatar la consecución resultados y el funcionamiento correcto del sensor. El objetivo de la tesis implica el almacenamiento de los códigos asociados a la posición (Gray y binario) en registros, la visualización de éstos y el diseño del código que permita el envío serial, que se simuló en el capítulo 3, en el acápite del software. Será tarea del software de control del radiotelescopio (Alfredo Rivera) realizar una conversión más certera a dígitos decimales y visualizar esta posición en el computador.

Adicionalmente, se realizaron mediciones de las corrientes consumidas por todo el arreglo, las cuales se muestran en la tabla 4.4. Éstas servirán de referencia al momento de diseñar la fuente de alimentación que se conecte al sistema, la que deberá considerar también circuitos adicionales para la transmisión serial y el

cambio de protocolos de comunicación serial en busca de inmunidad frente a ruido en la transmisión, parte de la tesis de control del radiotelescopio de Alfredo Rivera.

Tabla 4.4: Consumos máximos del sistema

Elemento	Consumo
Fotoemisor (Arreglo de 12 LEDs de alto Brillo)	78 mA
Fotorreceptor + Tarjeta de Pre-procesamiento	3 mA
Tarjeta de Microprocesador	4 mA
Total	85mA

Con los resultados de las pruebas que se mostraron anteriormente, era necesario realizar una prueba del sistema integrado utilizando el disco óptico codificado que se diseñó para su empleo con el sensor de posicionamiento.

Las siguientes pruebas implicaban la visualización de la posición angular del sistema teniendo como fuente de información el disco codificado. Esto significaba que todos los fototransistores del sensor fueran capaces de entregar el código que correspondía a la posición del disco y el procesador fuera capaz de convertir el código asociado a binario y posteriormente a dígitos decimales.

Para evaluar el sistema, lo que se hizo fue elegir una posición del eje al azar, calcular la posición esperada y visualizar en el LCD el resultado de la posición.

En la siguiente tabla, tabla 4.5, se muestra una lista con 5 códigos elegidos al azar en distintos puntos del disco codificado, conseguido rotando el disco hasta la posición elegida.

Tabla 4.5: Segunda prueba del sistema integrado

Número de prueba	Código Binario	Código Gray	Posición Esperada (°)	Posición angular obtenida (°)
1	011000101111	010100111000	139.13°	139.18°
2	110100110011	101110101010	296.98°	296.99°
3	001001010110	001101111101	52.55°	52.54°
4	011111111000	10000000100	179.29°	179.27°
5	100010000101	110011000111	191.69°	191.72°

Las figuras 4.11, y 4.12 muestran imágenes asociadas a dos de estas cinco pruebas.



Figura 4.11: Primera prueba con el disco codificado

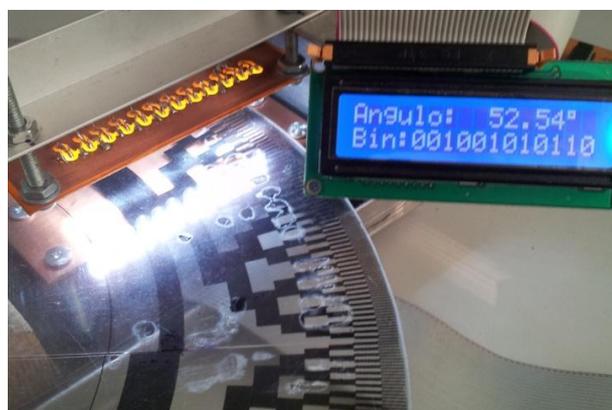


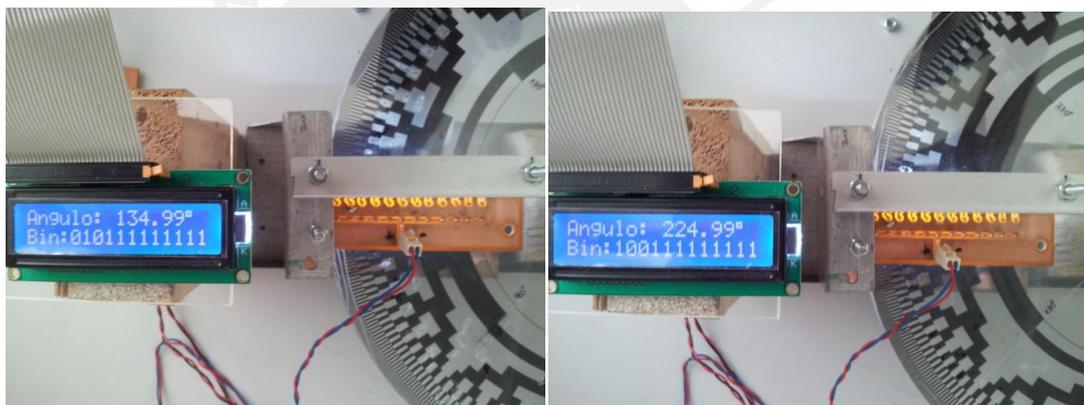
Figura 4.12: Tercera prueba con el disco codificado

El sistema fue probado para toda la extensión del disco codificado en un movimiento continuo, registrando los valores correspondientes en el LCD desde 0° hasta 359.90° . Las imágenes 4.13, 4.14 y 4.15 ilustran la secuencia del proceso.



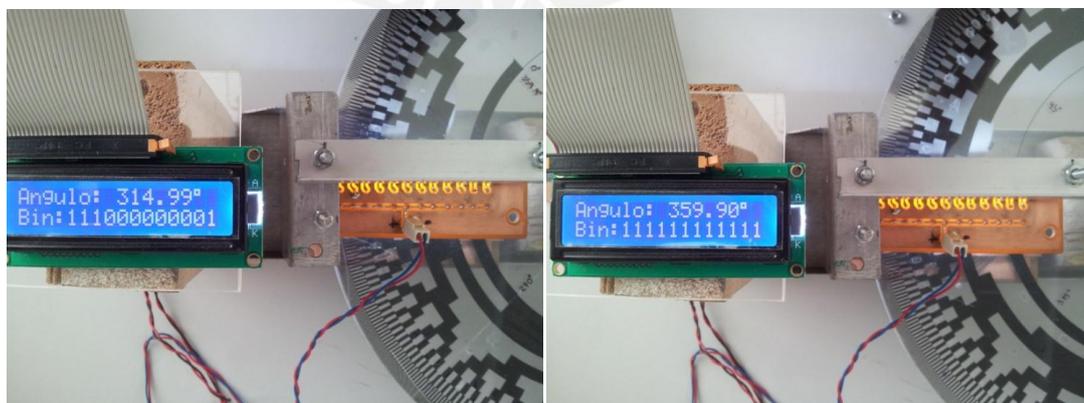
(a) (b)

Figura 4.13: (a) Inicio en 0° , (b) Paso por 45°



(a) (b)

Figura 4.14: (a) Paso por 135° , (b) Sensor en 225°



(a) (b)

Figura 4.15: (a) Paso en 315° , (b) Final en 359.90°

Por último, se debe resaltar que el sistema fue probado continuamente durante varias horas consecutivas sin presentar falla alguna; este proceso abarcó toda la duración de las pruebas reportadas en este documento y, además, tiempo adicional que el sistema se dejó encendido para observar el comportamiento de los componentes, realizando cambios de posición esporádicos.

4.1.3 Prueba final del sistema

Luego de realizado el montaje mecánico de todos los componentes, como se mostró en el capítulo 2, en el acápite de chasis y montaje, se realizó una prueba del sistema utilizando la disposición final que tendría el sensor.

Las pruebas finales siguieron el mismo esquema de las pruebas conjuntas, por lo que se muestra solo los valores registrados con sus correspondientes valores binarios asociados. Las figuras 4.16 y 4.17, mostradas más adelante, ilustran dos de las pruebas realizadas.

Tabla 4.6: Resultados de la prueba final del sistema

Número de prueba	Código Binario	Código Gray	Posición angular obtenida (°)
1	000100000100	000110000110	22.90
2	011101001011	010011101110	164.09
3	101100011110	111010010001	250.18
4	111111110000	100000001000	358.54

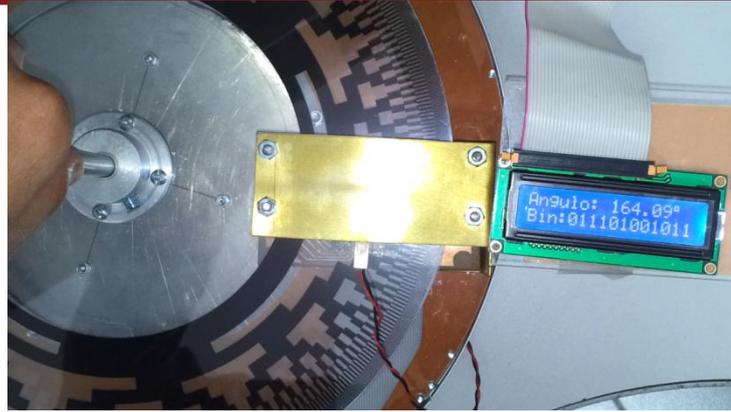


Figura 4.16: Segunda prueba del sensor

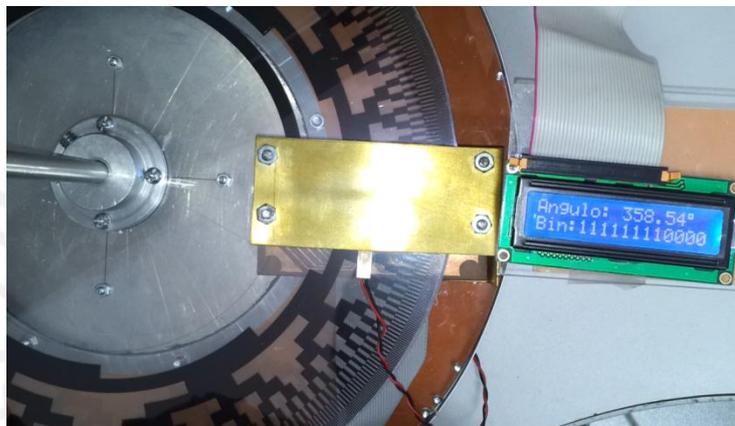


Figura 4.17: Cuarta prueba del sensor

Se debe destacar que se realizaron pruebas en numerosos escenarios de funcionamiento (como inicio del sistema en posiciones aleatorias, apagados súbitos del sistema, movimientos rápidos, etc.) y se probó el funcionamiento para toda la extensión del disco codificado. Con esto, se comprobaron los resultados obtenidos en pruebas anteriores y se constató el funcionamiento correcto del sistema final, integrado y montado.

4.2 Resultados y conclusiones

- Se diseñó un sensor digital absoluto de posición angular, capaz de adquirir y procesar señales del posicionamiento de un eje a través de receptores y etapas de un sistema de baja complejidad. Además, se implementó este sensor de posicionamiento, constatando su correcto funcionamiento para una variedad de pruebas y de escenarios posibles.
- El diseño e implementación contemplaron la resolución de 12 bits, 0.087890625° ó $316.40''$ de arco. La visualización se vio redondeada a 0.09° ; sin embargo, la resolución real de 0.087890625° se alcanzó al momento de obtener el código digital del sensor y se almacenó como valores binarios dentro del microcontrolador utilizado, permitiendo su disponibilidad para las aplicaciones de futuras tesis a través de transmisión serial, implementada y simulada para el microcontrolador Atmega8.
- Se constató que los métodos ópticos discretos suponen una alternativa viable para el desarrollo de sensores de posición angular – en lo particular, para resoluciones medias – con las ventajas de versatilidad, simplicidad de hardware y simplicidad para el software que los componentes utilizados implican; más aún si se compara frente otras alternativas de solución que podrían haberse implementado para esta tesis. Arreglos de sensores de escáneres (con la electrónica precisa de control requerida y el procesamiento electrónico implicado) y cámaras web con lentes para enfocar el código (posteriormente empleando PDS para su decodificación), presentan ciertas desventajas frente al método empleado, en particular en lo referente a complejidad de hardware y software requerido.
- Un sensor de posición angular de 12 bits implementado con métodos ópticos discretos, para aplicaciones, dimensiones (del disco codificado, del chasis y de las futuras estructuras de montaje del radiotelescopio) y condiciones de funcionamiento similares a las desarrolladas para esta tesis, suponen, muy probablemente, el límite máximo en cuanto a resolución alcanzable. No se descarta, sin embargo, que una resolución de 13 bits pueda ser alcanzada para condiciones similares, pero el esfuerzo y precisión involucrados en su desarrollo, así como los procesos a utilizar,

podrían superar a los beneficios que presentan este tipo de desarrollos discretos frente a alternativas existentes. Para resoluciones mayores, en vista de lo que se requirió para esta tesis, serían necesarias herramientas para mecánica fina, manufactura de circuitos impresos de precisión, implementación mecánica a través de herramientas CNC, técnicas de ensamblaje mecánico de alto nivel, etc.

4.3 Recomendaciones y trabajos a futuro

- Si bien el acabado del chasis desarrollado considera sellos para las uniones utilizando materiales impermeables, pegamentos sintéticos y silicona, para condiciones de trabajo más agrestes o condiciones ambientales críticas, se recomienda el uso de un chasis con acabados de clase industrial, lo que podría proteger de mejor manera a la electrónica y mecánica de condiciones de lluvia, polvo, humedad, etc.
- La fuente de alimentación del sistema debe ser diseñada teniendo en cuenta criterios de protección si es que componentes que afecten la calidad de la energía suministrada se encuentran conectados. Por ejemplo, motores de alta potencia podrían generar caídas o picos de tensión que podrían afectar a los componentes del sistema diseñado.
- El microcontrolador elegido permite el procesamiento a tiempo real de los datos obtenidos del sistema, por lo que una buena opción sería conectarlo a un sistema capaz de monitorear esa información también en tiempo real.
- Los diseños de las tarjetas se pueden reducir en tamaño, aunque sería necesario el cambio de ciertos componentes; por ejemplo, los diodos del fotoemisor permitirían reducir la altura del arreglo hasta en 1.5 cm. Esta tesis no contempló miniaturización debido a que no existían condiciones que forzaran a diseñar un sistema con las menores dimensiones, principalmente porque el disco codificado reducía las posibilidades de miniaturizarlo.

Bibliografía:

- [1] Kraus, John
1986 Radio Astronomy. Segunda Edición. Ohio, USA. Cygnus-Quasar Books.
- [2] NRAO
2011 Very Large Baseline Array [en línea]. Consulta: 27/11/2011
<<http://www.nrao.edu/index.php/about/facilities/vlba>>
- [3] Newton, David
2011 Radioastronomy – Quasars and Pulsars [en línea]. Consulta: 27/11/2011
<<http://science.jrank.org/pages/5673/Radio-Astronomy-Quasars-pulsars.html>>
- [4] NRAO
2011 Radio Astronomy and Interference [en línea]. Consulta: 27/11/2011
<<http://www.nrao.edu/index.php/learn/radioastronomy/interference>>
- [5] Rochblatt, David J.
2008 Microwave Antenna Holography [en línea]. Consulta: 23/07/2012
<http://descanso.jpl.nasa.gov/Monograph/series10/08_Reid_chapt+8.pdf>
- [6] International Telecommunication Union
1995 Handbook on Radio Astronomy. Geneva, Suiza. Radiocommunication Bureau.
- [7] Soloman, Sabrie
2009 Sensors and Control Systems in Manufacturing. Segunda edición. Nueva York, USA. McGraw-Hill Professional Publishing.

- [8] Nyce
2004 Linear Position Sensors: Theory and Application. Hoboken, NJ, USA. Wiley.
- [9] BEI Industrial Encoders
2011 BEI Industrial Encoders Design and Specifying Guide [en línea]. Consulta: 08/24/2011.
<<http://www.bmb.co.th/download/BEI-Industrial-Encoders.pdf>>
- [10] Dynapar
2010 Encoders & Resolvers [en línea]. Consulta: 07/12/2011
<http://dynapar.com/uploadedFiles/_Site_Root/Service_and_Support/Dynapar2010Catalog.pdf>

