

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DEL SUR DE GUANAJUATO



DISEÑO DE SISTEMA MECATRÓNICO PARA CONTROL DE INCLINACIÓN ALTITUDINAL PARA RADIOTELESCOPIO DIDÁCTICO

Opción 2: Titulación Integral – Tesis Profesional

Elaborada por:

Luis Alberto López Durán

Que presenta para obtener el título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Asesores:

Dr. Carlos Alberto Fuentes Hernández

Dr. Stanley Eugene Kurtz

Uriangato, Gto.

Mayo de 2025

“DISEÑO DE SISTEMA MECATRÓNICO PARA CONTROL DE INCLINACIÓN ALTITUDINAL PARA RADIOTELESCOPIO DIDÁCTICO”

Elaborada por:

Luis Alberto López Durán

Aprobado por Dr. Carlos Alberto Fuentes Hernández
Docente de la carrera de Ingeniería Electrónica
Asesor de la Tesis Profesional

Revisado por M.C. Susana Violeta Martínez Hernández
Docente de la carrera de Ingeniería Electrónica
Revisora de la Tesis Profesional

Revisado por M.C. Netzáhualcóyotl Martínez Cázares
Docente de la carrera de Ingeniería Electrónica
Revisor de la Tesis Profesional



LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL

Uriangato, Gto., 16/Mayo/2025

Asunto: Liberación de proyecto para la titulación integral

M.C. José Gabriel Aguilera González
Director Académico
ITSUR
PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre de estudiante y/o egresado(a): Luis Alberto López Durán	
Carrera: Ingeniería Electrónica	Núm. de control: E18120344
Nombre del proyecto: Diseño de Sistema Mecatrónico para Control de Inclinación Altitudinal para Radiotelescopio Didáctico	
Producto: Tesis Profesional	

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestras y nuestros egresados.

ATENTAMENTE

M.T.I. Eduardo Arroyo Ortega
Jefe de División de Ingeniería Electrónica
ITSUR

Instituto Tecnológico Superior
del Sur de Guanajuato



COORDINACIÓN INGENIERÍA
ELECTRÓNICA

La comisión revisora ha tenido a bien aprobar la reproducción de este trabajo.

Dr. Carlos Alberto Fuentes Hernández Asesor de la Tesis Profesional	M.C. Susana Violeta Martínez Hernández Revisora de la Tesis Profesional	M.C. Netzahualcōyotl Martínez Cázares Revisor de la Tesis Profesional

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño y desarrollo preliminar de un sistema mecatrónico para controlar la posición angular de un par de antenas Yagi-Uda. La entrada proporcionada por el usuario es procesada mediante un microcontrolador PIC16F887, que a su vez envía las señales de control al motor de pasos, el cual actúa como fuente de movimiento para el sistema.

La realización de este proyecto surge de la necesidad de abordar una limitación inherente a los radiotelescopios: el diseño de componentes personalizados. Los radiotelescopios emplean antenas de diversas formas y aplicaciones, como las utilizadas en las telecomunicaciones. Además, al igual que los telescopios ópticos, requieren monturas y componentes de control específicos. Sin embargo, debido a la gran variedad de antenas existentes, las monturas comerciales para radiotelescopios suelen ser difíciles de encontrar y, en muchos casos, no se ajustan a las necesidades particulares de la aplicación. Por esta razón, resulta conveniente desarrollar las monturas y los componentes de control desde su etapa de diseño para su construcción personalizada. Este enfoque, además, puede contribuir a la reducción de costos, especialmente cuando el sistema está orientado a aplicaciones académicas, que son el propósito principal de este trabajo.

Palabras clave: diseño mecánico, transmisión de movimiento, programación de microcontroladores, radioastronomía, electrónica, motor de pasos.

Abstract

This work presents preliminary design and development of a mechatronic system for controlling angular position of a pair of Yagi-Uda antennas. User input is processed by a PIC16F887 microcontroller, which in turn sends control signals to the stepper motor, which acts as the system's motion source.

The development of this project arose from the need to address an inherent limitation of radio-telescopes: the custom design for specific purposes. Radio telescopes employ antennas of various shapes and applications, such as those used in telecommunications. Furthermore, like optical telescopes, they require specific mounts and control components. However, due to the wide variety of existing antennas, commercial mounts for radio telescopes are often difficult to find and, in many cases, do not fit the particular needs of the application. For this reason, it is advantageous to develop mounts and control components from the design stage for custom construction. This approach can also contribute to cost reduction, especially when the system is oriented towards academic applications, which is the primary purpose of this work.

Keywords: *mechanical design, motion transmission, microcontrollers programming, radioastronomy, electronics, stepper motor.*

Agradecimientos

Al Dr. Carlos Fuentes, apreciable profesor y persona, quien, aparte de las clases que me impartió (mismas de las que aprendí mucho y me interesé fuertemente por la instrumentación electrónica), me dio la oportunidad de participar en varios proyectos que abrieron mi panorama sobre la electrónica, la ciencia y sus aplicaciones, además por permitirme aprender de él conocimientos para lo profesional y lo personal. Así como también por apoyarme durante el proceso de desarrollo del presente proyecto, asesorarme y guiarme en la escritura del mismo.

Al Dr. Stan Kurtz, a quien tuve el gusto de conocer este mismo año y ha demostrado ser un gran ser humano, por platicarme sobre la radioastronomía y cómo son sus aplicaciones, por permitirme participar en el presente proyecto, darme su retroalimentación y ser guía en el proceso del desarrollo del mismo.

Al Tecnológico Nacional de México, campus Sur de Guanajuato, lugar donde conocí a personas importantes en mi vida, tanto compañeros como profesores que aportaron a mi formación profesional y personal con sus conocimientos y amistad, especialmente agradezco a la Academia de Ingeniería Electrónica, a los profesores Julio, Susana, Melisa, Carlos, Leonel y Netzahualcóyotl, quienes con sus enseñanzas me hicieron conocer a una mayor profundidad y querer la bella carrera que cursé y que me sigue emocionando e interesando.

Al Instituto de Radioastronomía y Astrofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme, a través de la guía del Dr. Stan, desarrollar el presente trabajo en colaboración de esta institución y siempre tener las puertas abiertas para recibirme en sus instalaciones.

A Christian Nava, amigo extraordinario y que, aunque apenas a principios de este año nos conocimos, nuestra amistad creció rápidamente. Es una de las

personas que a lo largo de la creación de este trabajo me ha ayudado con sus valiosas opiniones y compartiendo conmigo sus conocimientos en modelado mecánico con el fin de lograr un trabajo bien hecho, tanto por su amistad, como por su apoyo le agradezco.

Agradezco también a mis mejores amigos, que han estado cerca todo el tiempo, que con su amistad me han hecho sentir alguien sumamente feliz y con ganas de seguir adelante, grandes amigos que atesoro: Ingrid, Obed, Andy, Yenimari, Chucho, Limón, Juan Carlos, David y Chris Nava, gracias infinitas por su amistad, por sus consejos y su apoyo incondicional, son sumamente importantes y representan un gran pilar en mi vida.

Finalmente, y de forma más significativa, agradezco profundamente a mi familia. A mi hermano Miguel, el profe Mike, quien desde tiempos muy anteriores a que yo entrara al ITSUR me platicaba de matemáticas y de física, conversaciones que me motivaban e incentivaban mi curiosidad por aprender más. Ya dentro de la carrera siempre me daba razones para continuar, con emocionantes pláticas intentando interpretar la naturaleza y durante el desarrollo de este trabajo también aportando ideas, retroalimentación y recomendaciones, en general, una de las personas que me inspiran. A mi hermano mayor, Erick, a quien cada que veía le platicaba cómo iba mi trabajo, qué era lo que seguía, para qué puede servir y siempre me escuchó con atención e interés. A mis papás, Artemio y Adelina, para quienes cualquier agradecimiento que se pueda hacer en unas hojas resulta deficiente para lo mucho que hay que agradecerles, desde la propia existencia, el esfuerzo y la dedicación que han puesto para darnos, entre muchas otras cosas, educación, vivienda y salud, el mayor de los reconocimientos que podamos recibir mis hermanos o yo, siempre estos serán también para mis papás.

Y en general, agradezco al universo, a Dios, por la vida misma.

Dedicatoria

A mis padres y hermanos, por siempre estar presentes y apoyarme cuando he necesitado platicar con alguien, un abrazo, un consejo. Simplemente, por ser y estar, les dedico este trabajo y todo logro que pueda tener en mi vida.

Hasta el cielo mando la dedicatoria para mi abuelo paterno y mi abuela materna, Artemio López Zavala, mi papá Temo y Ángela Hernández Pérez, mi mamá Ángel, quienes se adelantaron a nosotros, pero estoy seguro que estarían muy contentos de ver lo que está logrando Luisito. Sepan que sus enseñanzas, valores y fortalezas me han inspirado a ser el tipo de persona que soy actualmente.

A mi abuela paterna y mi abuelo materno, Guadalupe Aguayo Villanueva, mi mamá Lupe, y Joaquín Durán Morales, mi papá Joaquín, por todas las enseñanzas que me han dado, por su confianza, las hermosas anécdotas de antaño que hacen que uno se sienta en ese momento y su compañía en todo momento.

A Esther Santillán, amiga admirable y de gran inteligencia que ha impactado positivamente en mi vida de forma grandiosa, me ha motivado a seguir explorando y conociendo temas que me emocionan a partir de nuestras pláticas, en ocasiones de horas, pero que parecen minutos, en donde una fluida conversación lleva a reflexiones, opiniones y demás temas sumamente interesantes.

A la maestra Mari Trini Pimentel, subdirectora de investigación y posgrado en el ITSUR, quien siempre ha creído en mí y ha impulsado mi interés por las ciencias básicas, en ella he encontrado también una fuente de inspiración muy importante.

A mis sobrinitos, Evelyn y Tadeo, quienes con su curiosidad por el mundo llenan de felicidad y de emoción. Cuando juego con ellos vuelvo a ser niño, puedo pasar horas jugando, riendo e intentando resolver sus dudas. Ellos me motivan a ser un buen profesionista y dar lo mejor de mí, para tratar de que su futuro sea mejor, más consciente y responsable de las problemáticas de nuestro planeta.

Tabla de contenido

<i>Resumen</i>	3
<i>Abstract</i>	4
<i>Agradecimientos</i>	5
<i>Dedicatoria</i>	7
Capítulo 1. Introducción	16
Capítulo 2. Marco teórico	20
2.1. Astronomía.....	20
2.1.1. Formalización de la astronomía	21
2.1.2. Una ciencia <i>observacional</i>	22
2.1.3. Sistemas de coordenadas celestes horizontales	24
2.2. Radioastronomía.....	26
2.2.1. Del espectro visible a las ondas de radio.....	27
2.2.2. Primeras observaciones radioastronómicas	29
2.2.3. Radiotelescopios.....	32
2.3. Mecatrónica.....	42
2.3.1. Diseño mecánico	43
2.3.2. Actuadores mecánicos.....	44
2.3.3. Actuadores eléctricos.....	49
2.3.4. Transductores y sensores.....	59

2.3.5. Acondicionamiento de señales y procesamiento de datos	64
2.3.6. Sistemas de control automático	65
2.3.7. Protocolos de comunicación serial.....	67
Capítulo 3. Planteamiento del problema	69
3.1. Identificación	69
3.2. Justificación.....	69
3.3. Alcance	69
Capítulo 4. Objetivos.....	71
4.1. Objetivo general.	71
4.2. Objetivos específicos.	71
Capítulo 5. Metodología	72
5.1. Desarrollo del sistema mecánico	72
5.1.1. Modelo propuesto para movimiento altazimutal.....	73
5.1.2. Modelos propuestos para movimiento altitudinal	77
5.1.3. Estudios mecánicos y de colisiones.....	80
5.1.4. Comparación de modelos de monturas	82
5.1.5. Elección del acoplamiento de movimiento y del motor de pasos	83
5.2. Desarrollo del sistema de control	86
Capítulo 6. Resultados.....	95
6.1. Modelo a profundidad	95
6.1.1. Base para el motor.....	96
6.1.2. Plataforma general.....	98
6.1.3. Soportes para el eje de las antenas.....	99
6.1.4. Bases para montar las antenas	99
6.1.5. Acoplamiento del eje de las antenas al engrane conducido	100

6.1.6. Sistema de control automático.....	101
6.1.7. Otras precisiones importantes	104
Capítulo 7. Análisis de Resultados.....	106
7.1. Diseño mecánico.....	106
7.2. Sistema de control	107
Capítulo 8. Conclusiones y trabajo a futuro	109
<i>Bibliografía</i>	<i>111</i>
<i>Anexos</i>	<i>114</i>
Anexo A. Ficha técnica del motor de pasos Stepper Online 23HE30-2804S...	114
Anexo B. Curva de torque del motor de pasos	115
Anexo C. Código en C cargado al microcontrolador PIC16F887 para el control de sentido de giro del motor de pasos	116
Anexo D. Código en C cargado al microcontrolador PIC16F887 para el control de giro y conteo de pasos del motor	118
Anexo E. Código cargado al microcontrolador maestro (recepción del set point y de envío de datos de posición deseada al microcontrolador esclavo por protocolo UART)	123
Anexo F. Código cargado al microcontrolador esclavo	128

Índice de figuras

Figura 1. "El Astrónomo" de Johannes Vermeer. Fuente: Musée du Louvre.....	21
Figura 2. Dibujo de Thomas Wright en 1750 donde indica escalas aproximadas dentro del Sistema Solar y un poco más allá (Sirio). Fuente: "La diversidad de la ciencia" de Carl Sagan.	22
Figura 3. Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, Baja California. Fuente: México Desconocido.	23
Figura 4. Referencias principales de la esfera celeste. Fuente: "La esfera celeste" de Gustavo Baume.....	25
Figura 5. Coordenadas celestes del sistema horizontal. Fuente: "La esfera celeste" de Gustavo Baume.	26
Figura 6. Imagen del agujero negro supermasivo Sgr A*. La imagen fue posible gracias a la información en radiofrecuencia obtenida por el arreglo de radiotelescopios en todo el mundo llamado Event Horizon Telescope en 2022. Fuente: Conahcyt.	27
Figura 7. Antena creada por Jansky para investigar la estática telefónica. Fuente: "The Early Years of Radio Astronomy" de W. T. Sullivan III.....	30
Figura 8. Radiotelescopio construido por Grote Reber. Fuente: NIST.	31
Figura 9. Atacama Large Millimeter Array (ALMA) en el desierto de Atacama, Chile. Fuente: ESO.	32
Figura 10. a) Patrón de interferencia que se forma cuando la luz pasa a través de un orificio circular. b) Imágenes separadas a partir de dos fuentes resueltas. c) Imágenes confusas de dos objetos. Fuente: Adaptación de Wikipedia.....	34
Figura 11. Criterio de Rayleigh. Fuente: "Construcción de un interferómetro de dos elementos" de Carolina Berenice Rodríguez Garza.	34

Figura 12. Colapso en 2020 del radiotelescopio de Arecibo. Fuente: La Vanguardia.	37
Figura 13. a) Generador, en esta configuración la antena emite ondas de radio, en cambio b) es un receptor, es decir, las recibe.	39
Figura 14. Tipos de antenas de alambre. Fuente: ResearchGate.	40
Figura 15. Diagrama de bloques de receptor superheterodino. Fuente: Wikipedia.	41
Figura 16. Antena Yagi-Uda, a la izquierda se muestra el diagrama de irradiación, el lóbulo crece sólo a un lado por acción del reflector y los directores provocan un alargamiento. Fuente: Todoantenas.	42
Figura 17. Elementos básicos de un sistema mecatrónico. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.	43
Figura 18. Tipos de movimientos traslacional (izquierda) y rotacional (derecha). Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.	45
Figura 19. Tren de engranes de tres elementos. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.	46
Figura 20. a) Ejes de engranes rectos, b) Engranes cónicos. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.	46
Figura 21. Dos engranes conectados. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.	47
Figura 22. Elementos básicos de un rodamiento de bolas. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.	49
Figura 23. Motor de pasos de reluctancia variable. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.	50
Figura 24. Motor de pasos de imán permanente. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.	51
Figura 25. Rotor de motor de pasos híbrido. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.	51
Figura 26. Características de un motor de pasos. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.	53
Figura 27. A la izquierda, motor de pasos bipolar. A la derecha, motor de pasos unipolar. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.	54

Figura 28. Puentes H de control de las dos fases del motor de pasos.....	55
Figura 29. a) Motor girando una carga, b) Motor con engrane de transmisión girando una carga. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.	58
Figura 30. Motor levantando una carga. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.	58
Figura 31. Control de procesos. Adaptada de: "Instrumentación. Transductores e interfaz" de B.R. Bannister y D.G. Whitehead.	60
Figura 32. Estructura de un encoder absoluto. Fuente: Contaval.....	61
Figura 33. Representación de un potenciómetro rotativo y su símbolo. Fuente: i- Ciencias.....	62
Figura 34. Diagrama de interfaz entre el sensor y el despliegue de la información en un software. Fuente: Logicbus.	64
Figura 35. Forma básica de un sistema de control. Fuente: Sistemas de Control para Ingeniería de Norman Nise.	66
Figura 36. Diagrama de bloques de sistema en lazo cerrado. Fuente: Research Gate.	66
Figura 37. Diagrama de conexión del protocolo UART. Fuente: UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter.	67
Figura 38. Arquitectura de un paquete en UART. Fuente: UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter.	68
Figura 39. Boceto primario de la montura para antenas Yagi-Uda.....	73
Figura 40. Diseño de montura para movimiento altazimutal.....	74
Figura 41. Plano del modelo CAD de la montura altazimutal.	74
Figura 42. Ensamblaje del modelo altazimutal.	76
Figura 43. Movimiento azimutal del sistema.....	77
Figura 44. Modelo inicial del mecanismo con movimiento altitudinal.....	78
Figura 45. Montura altitudinal empleando metales para su construcción.	79
Figura 46. Vista inferior de la montura altitudinal.....	79
Figura 47. Análisis de interferencias mecánicas del sistema.	80
Figura 48. Análisis estructural de estrés.....	81

Figura 49. Análisis estructural de deformación.....	81
Figura 50. Bosquejo de contribución de torques a través de un eje.	84
Figura 51. Bosquejo de la estructura de las antenas.....	85
Figura 52. Control manual de un motor de pasos.....	87
Figura 53. Control de dirección del motor de pasos usando el PIC16F887.....	88
Figura 54. Control de sentido, paro y conteo de pasos del motor.	89
Figura 55. Diagrama de conexión del sistema de control automático para el posicionamiento angular de las antenas.	90
Figura 56. Bosquejo de recta para encontrar la expresión matemática de ángulo respecto a porcentaje de potenciómetro.	92
Figura 57. Modelo de montura elegido.	95
Figura 58. Plano general del mecanismo.	96
Figura 59. Distintas vistas de la base para el motor de pasos.....	97
Figura 60. Acercamiento a la parte inferior de la plataforma.	98
Figura 61. Soportes del eje de las antenas.	99
Figura 62. Cople entre el eje y las antenas.	100
Figura 63. Esquemático del sistema de control para el control de motor de pasos.	101
Figura 64. Tren de pulsos y señal de sentido de giro horario.	103
Figura 65. Tren de pulsos y señal de sentido de giro antihorario.	103
Figura 66. Tren de pulsos nulo y sentido de giro cambiante como indicador de posición deseada alcanzada.	104

Índice de tablas

Tabla 1. Separación angular de algunos astros vista desde la Tierra.....	35
Tabla 2. Características de algunos telescopios ópticos.	35
Tabla 3. Características de algunos radiotelescopios.	36
Tabla 4. Configuraciones del VLA.....	38
Tabla 5. Secuencia de conmutación para pasos completos.	56
Tabla 6. Secuencia de conmutación para medios pasos.	56
Tabla 7. Tabla comparativa entre materiales de impresión PLA vs. ABS vs. PETG. Con información de: All3DP.	75
Tabla 8. Cuadro comparativo de características entre los tres modelos de monturas.	82

Capítulo 1. Introducción

Los humanos nos caracterizamos por la enorme curiosidad que tenemos de forma innata, pues apenas nacemos, queremos explorar el mundo sin parar; es por esto que no resulta difícil entender por qué tenemos una constante necesidad de preguntarnos las razones de todo a nuestro alrededor e interesarnos profundamente por los procesos naturales. Esta característica nos ha ayudado a llegar como especie al desarrollo científico, tecnológico e intelectual que tenemos en la actualidad.

Esto no es un comportamiento sólo del humano moderno, pues lo que diferenció a los australopitecos del resto de animales desde aquellos remotos tiempos fue, justamente, la capacidad de pensar y razonar, aunque claro, directamente ellos no sabían que pensaban, tuvieron que pasar algunos miles de años para que alguien que seguramente vestía con una toga blanca y vivía en Grecia introdujo al colectivo de otras personas en toga blanca la idea de pensamiento, iniciando así con la filosofía, la madre de todas las ciencias y que luego muchas más civilizaciones tomaron conciencia del pensamiento, extendiéndose así por todo el mundo.

Y hablando del desarrollo del pensamiento humano y la necesidad de conocer las razones de los procesos que ocurren a nuestro alrededor, podemos coincidir conjuntamente en que una de las primeras cosas que llaman nuestra atención es esa "burbuja" inmensa que todos los días, eternamente, se curva sobre nuestras cabezas, de día azul con una luz que nos ilumina fuertemente y nos da calor, mientras que de noche se muestra oscura y con una infinidad de luces distantes. El cielo ha sido objeto de estudio y de inspiración para todas las civilizaciones que han habitado alguna vez la Tierra, es por ello que se dice que es la más antigua de todas las ciencias, incluso varios conceptos matemáticos y físicos aplicables a nuestro mundo, desde los postulados de Demócrito, Aristóteles o Ptolomeo, pasando por Copérnico, Kepler, Galileo y Newton, hasta los de científicos

contemporáneos han tenido como motivación principal tratar de entender los movimientos planetarios o algún otro fenómeno astronómico. En regiones del mundo como Mesoamérica, la astronomía era muy avanzada e importante en las civilizaciones, hechos que las construcciones y arte calendárico-astronómicas como la hierofanía de la pirámide del castillo de Kukulcán en Chichén Itzá los días de equinoccio nos dan muestra de ello.

Algo importante a destacar es la razón de que al hablar de astronomía, no podemos dejar de lado a la ingeniería como desarrollos conjuntos, pues desde siempre se ha relacionado al astrónomo con un tipo de artefactos, los telescopios, los cuales no habrían sido posibles en lo absoluto sin la aplicación y complemento de la ingeniería con la ciencia que busca generar nuevo conocimiento, el observatorio del caracol en Yucatán es una obra ingenieril magnífica que ejemplifica el gran ingenio de los mayas, con el que llegaron a predecir eclipses y otros fenómenos del cielo [1]; Galileo no habría podido observar ese 7 de enero de 1610 las lunas principales de Júpiter y probablemente, ni siquiera publicar su "Siderus Nuncius" si el humano no tuviera la capacidad de la ingeniería y la construcción, valiéndose de conceptos naturales de la física, como la mecánica, la óptica, la electricidad y mucho más, pues alguien tuvo que tener la idea de cómo usar lentes y tubos para construir una herramienta que nos hacía capaces de ver más allá de lo que nuestros ojos logran hacerlo [2].

A lo largo del tiempo se han ido perfeccionando las técnicas de observación, junto con la construcción de telescopios con mejores características y nos han permitido conocer más del universo donde vivimos, pero no fue hasta las primeras décadas del Siglo pasado que se empezó a tomar en cuenta la observación del cielo desde otras regiones del espectro electromagnético, pudiendo ver, entonces, lo que es invisible a los ojos humanos. En la década de 1920, Karl G. Jansky, un ingeniero de radio se encontraba haciendo investigaciones sobre la interferencia telefónica en los sistemas inalámbricos de la compañía Bell Telephone por medio de unas antenas y entre las razones de la interferencia que encontró estaba una fuente

desconocida, que luego de hacer más estudios se llegó a la conclusión de que era una señal proveniente de un lugar más alejado de nuestro Sistema Solar, apuntado hacia la constelación de Sagitario, había detectado en ondas de radio el centro de la Vía Láctea, nuestra galaxia [3]. Aunque en su tiempo no fue tomado tan en cuenta, Jansky había comenzado con la radioastronomía, la cual fue tomando más fuerza luego de la Segunda Guerra Mundial y en la actualidad es toda una ciencia bien establecida, y como vemos, desarrollada también de la mano de la ingeniería por los instrumentos que necesita para hacer sus investigaciones, con los grandes automatismos mecánicos y eléctricos que se utilizan para el posicionamiento del objetivo en los telescopios ópticos y de las antenas en los radiotelescopios, donde se aplican conocimientos de instrumentación electrónica, diseño mecánico, automatización industrial, circuitos eléctricos y electrónicos, entre muchas áreas más.

En este trabajo se muestra el desarrollo del diseño mecánico y del sistema de control automático para un sistema mecatrónico para el posicionamiento de un par de antenas Yagi-Uda a partir de una entrada por el usuario para determinar el ángulo de inclinación altitudinal de las mismas, siendo movidas por un motor de pasos, esto con la finalidad de que sea aplicado en investigaciones radioastronómicas, principalmente académicas.

Los motivos principales que motivaron a la creación del presente proyecto es que, si bien, es común que todos los telescopios comerciales se encuentran ya con su montura o que la montura de un telescopio óptico normalmente tiene el mismo mecanismo y sistema de sujeción que cualquier otro, para la radioastronomía esto difiere un poco, debido a que en esta área de la astronomía no se usan telescopios ópticos, sino antenas de radiofrecuencia que muchas veces funcionan para otras aplicaciones más, un ejemplo es la antena parabólica, la cual tiene su principal uso para las televisiones, sin embargo, muchos de los radiotelescopios, como veremos en el trabajo, utilizan antenas parabólicas para sus observaciones, y como la región de observación de la radioastronomía es, como su nombre lo indica, la de radio,

podemos concluir en que las antenas que se utilizan para telecomunicaciones también pueden servir para estos mismos fines dependiendo de su construcción, sin embargo, comercialmente es más común que alguien compre una antena para la televisión que para usarlo como radiotelescopio, haciendo que sea difícil de encontrar alguna montura móvil destinada para ello, por esta razón resulta conveniente el diseño de una que pueda funcionar según las necesidades de esta aplicación, que en este caso, es poderla tener a un nivel considerablemente alto con respecto al suelo, y además que pueda tener la capacidad de provocar un movimiento altitudinal con el fin de hacer observaciones con las antenas a esa inclinación.

El impacto principal de este proyecto reside en la cuestión de que representa una alternativa de construcción propia y a bajo costo de una montura de radiotelescopio, pues los elementos empleados para su construcción mecánica pueden ser fácilmente encontrados de manera comercial, y aquellos más puntuales pueden ser fabricados mediante la tecnología de prototipado rápido de impresión 3D con una amplia gama de materiales, o bien, maquinando una pieza metálica en alguna máquina de control numérico CNC.

En el capítulo del marco teórico encontraremos tanto una visión histórica de esta ciencia, así como las razones para emplearla y cómo se utiliza, aunado a los conceptos teóricos que se necesitan para entender la mecatrónica involucrada en el desarrollo de los diseños. En la metodología encontraremos los procesos llevados a cabo, las diferentes versiones de la montura y por qué se decidió la que quedó como diseño final, complementando a los resultados y su análisis. Finalmente, se dan las conclusiones y se proyecta el futuro del presente trabajo con las ideas necesarias para la continuación y perfeccionamiento del mismo.

*Luis Alberto López Durán
noviembre de 2023*

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Astronomía

La astronomía es una ciencia fundamental, motivada principalmente por la característica humana de la curiosidad y el interés por saber más acerca de la naturaleza y el universo.

Cuando en la oscuridad dirigimos nuestra vista hacia arriba, cuando no hay nubes ni contaminación lumínica en exceso que opaquen la vista, podemos ver el cielo lleno de estrellas en todo su esplendor, que resulta ser uno de nuestros primeros intereses desde que somos niños y con el que quedamos totalmente maravillados, preguntándonos por toda nuestra vida qué hay más allá, cómo se formó el universo y por qué estamos aquí.

El fenómeno del interés humano por el cielo no es algo siquiera relativamente contemporáneo, pues, con total razón se dice que la astronomía *es la más antigua de todas las ciencias*, para poner esto en perspectiva es necesario decir que ya en la era de los cromañones, hace unos 30,000 años, se grababan las fases de la Luna en huesos (es probable que se trate de una de las primeras concepciones de noción del tiempo por parte del humano), mismos que son considerados los documentos astronómicos más antiguos, hechos unos 25,000 años antes que los primeros registros de escritura.

El conocimiento de lo que sucede en el cielo y la intención de explicarlo ha acompañado a la humanidad a lo largo de toda su historia, usándose para diversas áreas, desde la agricultura y los pronósticos climáticos a partir de las estaciones del año y la solución de problemas de navegación marítima, hasta las cosmovisiones de las religiones del mundo con respecto al movimiento de cuerpos celestes, pasando, obviamente, por los esfuerzos científicos de explicar la mecánica de los

astros que nos dio la existencia de teorías, como la geocéntrica de Ptolomeo y la heliocéntrica de Copérnico tiempo después. [4]



Figura 1. "El Astrónomo" de Johannes Vermeer. *Fuente: Musée du Louvre.*

2.1.1. Formalización de la astronomía

Fue durante los Siglos XVII y XVIII que la astronomía tuvo un papel mucho más científico, resolviendo problemas de navegación y otras cuestiones, gracias a los trabajos sobre el movimiento de los planetas desarrollados por Copérnico, Tycho Brahe, Kepler, Galileo y Newton. También en este tiempo es que podemos darle la definición actual de astronomía a esta ciencia, la cual dice que:

La Astronomía es la ciencia que estudia cuanto se refiere a los astros o cuerpos celestes, principalmente las leyes de sus movimientos.

A partir de lo anterior también resulta prudente mencionar que el estudio de cómo funcionan los astros, cómo y cuándo se formaron, entre otras cosas, son parte de la astrofísica, la cual se encarga de estudiar las propiedades físicas de los cuerpos celestes, como la luminosidad, tamaño, masa, temperatura y composición, así como su origen y evolución. [5]

La investigación astronómica ha cambiado el punto de vista del humano sobre el mundo desde las concepciones geocéntricas y antropocéntricas a la actualidad de un vasto universo donde el humano y la Tierra juegan un papel insignificante.

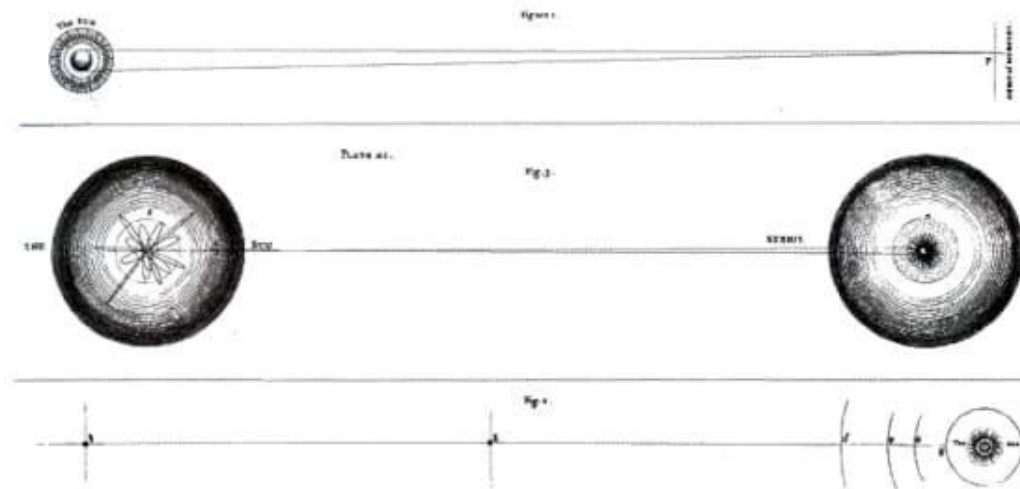


Figura 2. Dibujo de Thomas Wright en 1750 donde indica escalas aproximadas dentro del Sistema Solar y un poco más allá (Sirio). Fuente: "La diversidad de la ciencia" de Carl Sagan.

2.1.2. Una ciencia *observacional*

La astronomía, a diferencia de la física, la química y la biología es una ciencia más bien *observacional* que experimental, esto significa que el astrónomo no puede cambiar las condiciones físicas del sistema que es observado, está limitado a recibir la información de los cuerpos celestes en forma de radiación electromagnética, y con ella generar modelos que expliquen la naturaleza de las observaciones. [5]

El primero de los instrumentos astronómicos, podríamos coincidir en que es el ojo, sin embargo, si nos referimos a instrumentos que no formen parte de nuestro cuerpo tenemos que mencionar por fuerza a Galileo Galilei, quien en 1609 construyó un telescopio refractor mejorado con respecto al de Hans Lippershey, exactamente el tercero que creaba. Con tal telescopio Galileo voltearía al cielo el 7 de enero de 1610 para descubrir cuatro de los satélites naturales de Júpiter: Europa,

Ganímedes, Calisto e Ío, que inicialmente las llamo *Estrellas Mediceas* en su libro *Siderus Nuncius*. [6]

Es a partir de este momento que se atribuye el inicio de la astronomía moderna, a manos de Galileo Galilei, y es entonces que se comienzan a hacer más y más investigaciones de este campo, requiriendo con ello más y mejores telescopios, es así que fueron profesionalizándose las técnicas de construcción de instrumentos astronómicos, surgieron los telescopios reflectores, entre otros, conectando ya desde este momento las observaciones astronómicas con la ingeniería, específicamente con el diseño mecánico en complemento de la óptica, así siguió creciendo el uso y construcción de instrumentos de observación hasta llegar a los telescopios puestos en la órbita terrestre, como el Hubble o recientemente el *James Webb*, que, desde luego, utilizan sistemas mecánicos y electrónicos para su funcionamiento en cuanto al procesamiento y envío de la información.



Figura 3. Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, Baja California. *Fuente: México Desconocido.*

Hasta el momento sólo hemos estado hablando de telescopios ópticos, sin embargo, esta es sólo una pequeña franja del espectro electromagnético en la que se puede observar el universo, existen instrumentos que usan otras longitudes de

onda para este mismo fin; el estudio y observación del nacimiento de estrellas resulta difícil e incluso imposible empleando telescopios ópticos [7] para este tipo de aplicaciones se utiliza otro tipo de instrumentos, aquellos que reciben señales en la región de las ondas de radio y de los que profundizaremos más adelante en la sección de Radioastronomía.

Algo que hay que precisar es la importancia de los sistemas mecatrónicos en la actualidad para la creación de este tipo de instrumentos de observación e investigación, pues resultan cruciales para un funcionamiento adecuado con respecto a las demandas tecnológicas actuales, en nuestros tiempos no basta con apuntar un arreglo de lentes manualmente, sino también hacer un sistema de posicionamiento, movimiento, acondicionamiento y procesamiento de señales.

2.1.3. Sistemas de coordenadas celestes horizontales

Una de las primeras concepciones del universo por el humano fue que se encontraba en una *esfera celeste*, donde las estrellas se mantenían fijas en la superficie de la esfera y en el centro se encontraba la Tierra, siendo el centro del universo. Esta concepción, si bien sabemos, es errónea, pues no somos el centro del universo, sin embargo, podemos apoyarnos en un principio parecido a esta antiquísima idea para posicionarnos en el cielo, ignorando por el momento la distancia que existe entre los astros y la Tierra, de esta manera podemos tener dos coordenadas bastante útiles. Existen varios sistemas de posicionamiento, pero para cuestiones prácticas sólo nos centraremos en explicar el sistema horizontal, que será también el que utilizaremos para nuestro proyecto y que también es el más común. [4]

Para comenzar con la explicación sobre las coordenadas celestes horizontales debemos tener en cuenta las referencias en que se sustenta este sistema de coordenadas, el cual se toma desde la perspectiva del observador como origen, y a partir de él se extiende la esfera celeste, misma que se observa en la

Figura 4, donde además podemos ver algunas referencias de la esfera, el plano sobre el que se hacen las mediciones coordenadas es el *Horizonte*, mismo que se encuentra tangente a la superficie de la Tierra, a partir de él están representadas de forma paralela las *Almicántaras*, que serían lo equivalente a los trópicos de la tierra y de forma perpendicular están los *Círculos Verticales*, equivalentes a los meridianos terrestres. Los polos de este sistema son las intersecciones los círculos verticales, que están en el punto más alto sobre el plano principal y en el punto más bajo del mismo, el que está por encima del observador se llama *Cenit* (Z) y el que se encuentra por debajo es el *Nadir* (N). [8]

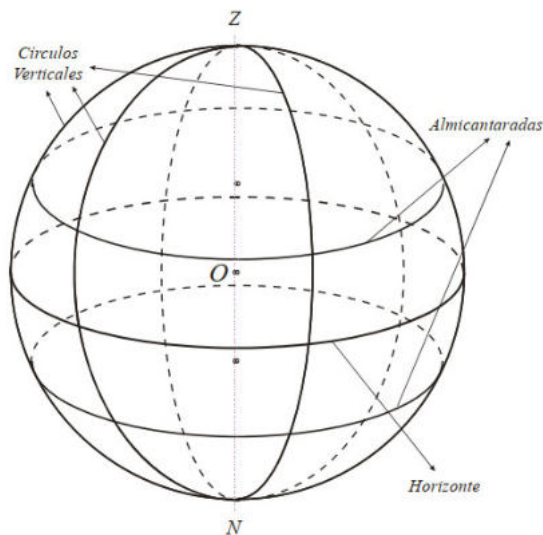


Figura 4. Referencias principales de la esfera celeste. Fuente: "La esfera celeste" de Gustavo Baume.

Las coordenadas empleadas en el sistema horizontal son la *altitud* y *azimut*, mismas que son representadas en la Figura 5. La primera coordenada (altitud o elevación) es denotada por h , se mide a partir del horizonte, a través del círculo vertical correspondiente hasta llegar al objeto, que, en la figura mostrada, el objeto ubicado es el Sol (S). El rango de valores para la altitud es $[-90^\circ, +90^\circ]$, donde $h = +90^\circ$ es el cenit, es positiva para objetos sobre el horizonte y negativa para los cuerpos debajo de él, es decir, $h = -90^\circ$ corresponde al nadir. Además de la altitud existe una medida complementaria a esta, llamada *distancia cenital* que es

denotada por z y que corresponde al ángulo entre el cenit y el objeto, ya que es complementaria, tal medida se puede calcular como $z = 90^\circ - h$.

La segunda coordenada, llamada azimut (o acimut), denotada por A es la medida angular comprendida entre el círculo vertical del astro, con respecto a un punto fijo, usualmente este punto es el norte o el sur terrestre, sin embargo, puede moverse, pero siempre se debe indicar a partir de cuál punto se toma esta medida y sus valores se toman entre 0° y 360° . En el presente trabajo sólo se usará la primera de las coordenadas, la altitud.

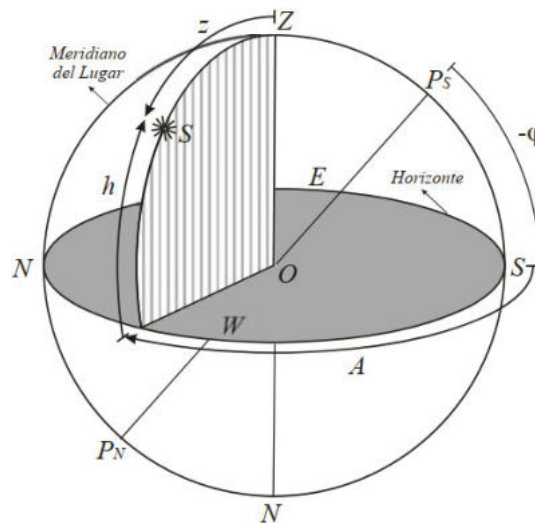


Figura 5. Coordenadas celestes del sistema horizontal. Fuente: "La esfera celeste" de Gustavo Baume.

2.2. Radioastronomía

La radioastronomía, nos dice la NASA, es la rama de la astronomía que estudia los objetos celestes y los fenómenos astrofísicos midiendo su emisión de radiación electromagnética en la región de radio del espectro. En la radioastronomía, para poder recibir buenas señales, se deben utilizar grandes antenas, o grupos de antenas más pequeñas trabajando en paralelo. La mayoría de los radiotelescopios utilizan una antena parabólica para amplificar las señales, y así obtener una buena lectura de estas. Esto permite a los astrónomos observar el espectro de radio de

una región del cielo. La radioastronomía es un área relativamente nueva de la generación astronómica, que todavía tiene mucho por descubrir.

En la actualidad, existen gigantescos radiotelescopios, permitiendo observaciones de una resolución imposible en otras longitudes de onda. Entre los problemas que la radioastronomía ayuda a estudiar, se encuentran la formación estelar, las galaxias activas, la cosmología, entre otras. [9]

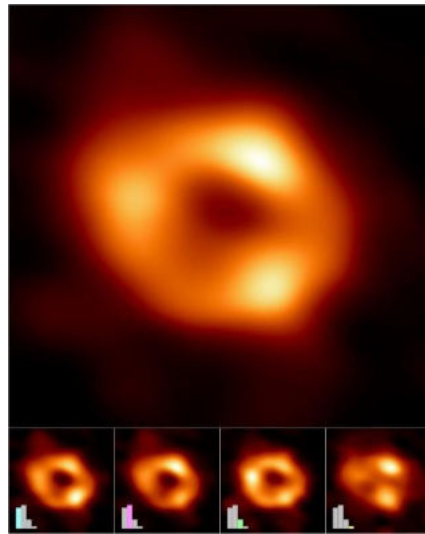


Figura 6. Imagen del agujero negro supermasivo Sgr A*. La imagen fue posible gracias a la información en radiofrecuencia obtenida por el arreglo de radiotelescopios en todo el mundo llamado *Event Horizon Telescope* en 2022. Fuente: *Conahcyt*.

Esta es una de las aplicaciones que el humano ha encontrado para el aprovechamiento de las ondas de radio y que, como veremos más adelante en la sección sobre las primeras observaciones radioastronómicas, surgió a partir del estudio de las comunicaciones inalámbricas a principios del Siglo pasado por un ingeniero de radio.

2.2.1. Del espectro visible a las ondas de radio

Si nos situamos a partir del inicio del Siglo XX, todo el tiempo detrás de entonces el estudio astronómico había sido exclusivamente en el rango visible del espectro electromagnético, desde nuestros antepasados más antiguos, naturalmente, debido

a que el único instrumento para este fin que poseían era el propio ojo humano, pasando, claro, por el Siglo XVII cuando Galileo mejoró el telescopio, y en la actualidad los telescopios ópticos siguen teniendo el mismo prestigio que han tenido y tendrán, pues aun siendo una pequeña región del espectro en la que se trabaja han aportado información de trascendente importancia que nos ha llevado a la actualidad, pero fue hacia el Siglo XIX cuando se empezó a hacer más amplio el panorama sobre las otras regiones del espectro, cuando el estudio de la electricidad y el magnetismo ayudaron a que ese mismo siglo se desarrollaran las radiocomunicaciones y a partir de este suceso, la radioastronomía comenzó allá por la década de 1930 a manos de Karl G. Jansky mientras investigaba el ruido estático de las comunicaciones telefónicas en los Laboratorios Bell.

El principal de los trabajos relacionados con el electromagnetismo fue el desarrollo de las ecuaciones de Maxwell, en la que se reveló que cualquier longitud de onda de luz es posible y que la luz visible es sólo una pequeña ventana de un espectro, creando así el concepto de onda electromagnética. En 1887, Heinrich Hertz produjo de manera satisfactoria ondas de radio en laboratorio, suceso que motivó a otros científicos para hacer investigaciones para detectar ondas de radio provenientes del espacio.

En 1890, Thomas Edison y Arthur Kennelly propusieron encontrar la correlación entre la cantidad de manchas solares y la señal de radio captada proveniente de un trozo de hierro mineral, para 1894, Sir Oliver Lodge intentó este experimento, pero falló y se lo atribuyó a fuentes terrestres de radiofrecuencia. Más tarde astrónomos como Johannes Wisling, Julius Scheiner y Charles Nordmann lo intentaron e igualmente fallaron. Actualmente se sabe que estos fracasos fueron a causa de que los equipos de radiodetección no eran lo suficientemente sensibles, como los que existen hoy en día. [10]

Estos fueron los principios de las investigaciones que culminarían en agrandar el rango que el humano puede percibir, si bien, no de manera natural o

con el ojo, pero sí por medio de aparatos que se construyen para detectar este tipo de radiación. Actualmente existen detectores para una gran variada gama de longitudes de onda, y fue a principios del Siglo XX cuando el humano se extendió a comprender el universo más allá del espectro visible, como se mencionó al inicio del apartado de *Astronomía*, esta es probablemente la más antigua de todas las ciencias, pero especialmente la radioastronomía es, relativamente, una ciencia muy nueva.

2.2.2. Primeras observaciones radioastronómicas

Para hablar de los inicios de la Radioastronomía es necesario mencionar a dos personajes con papeles fundamentales en su desarrollo: *Karl G. Jansky* y *Grote Reber*.

En el caso de Jansky se trata de un ingeniero que trabajaba en la mejora de las comunicaciones telefónicas para los Laboratorios Bell y que, con la unión de habilidad, persistencia y fortuna, reveló un fenómeno electromagnético que eventualmente transformaría el desarrollo de la astronomía en la forma que había venido haciéndose desde hacía siglos atrás, aunque en el principio su descubrimiento fue relativamente ignorado. Por otro lado, tenemos a Reber, quien destinó cerca de una década a estudiar las ondas de la “estática cósmica” que había descubierto Jansky en la década de 1930 con un radiotelescopio construido por él mismo en el patio trasero de su casa.

Después de la Segunda Guerra Mundial, el estudio del ruido extraterrestre creció rápidamente con el uso de radares que quedaron después de la guerra, pero no fue hasta una década después que la comunidad de astrónomos en su totalidad reconoció la importancia de las nuevas técnicas de radio para el estudio astronómico. [11]

Hacia la década de 1930, el ingeniero de radio Karl Guthe Jansky investigaba para *Bell Telephone Laboratories* un fenómeno que representaba una problemática

para las comunicaciones telefónicas inalámbricas, tal problema era que existía una interferencia, comúnmente conocida como “estática”, que dificultaba la comunicación de un teléfono a otro. Para estas investigaciones, Jansky montó una antena receptora direccional (Figura 7) diseñada para recibir ondas de radio de 20.5 MHz , equivalente a una longitud de onda de 14.6 m [12], con la que descubrió, con ayuda de unos audífonos y un graficador, que las interferencias se debían a tres causas que reportó en 1932 en un artículo de nombre *Directional Studies of Atmospherics at High Frequencies*, la primera de ellas son las tempestades eléctricas cercanas, la segunda eran las tormentas en el mar, y finalmente una desconcertante tercera causa, la cual era una especie de “*steady hiss*” de origen desconocido.

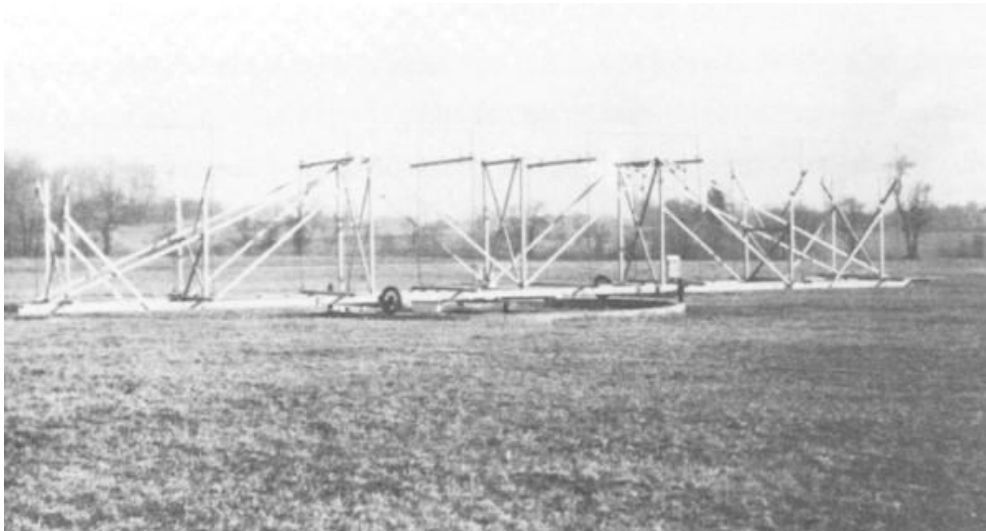


Figura 7. Antena creada por Jansky para investigar la estática telefónica. Fuente: “*The Early Years of Radio Astronomy*” de W. T. Sullivan III.

El tercer tipo de estática llamó mucho la atención de Jansky, quien continuó estudiándolo alrededor de un año más este fenómeno, donde se dio cuenta que la gráfica que obtenía salía todos los días desplazada cuatro minutos con respecto al día anterior, lo que significa que esta era una señal en tiempo sideral y no solar, es decir, la señal no provenía de dentro de la Tierra, ni siquiera de nuestro Sistema Solar, sino de algún lugar en el espacio situado entre las constelaciones Escorpión

y Sagitario, información que publicó en 1933 con el apoyo del Instituto de Ingenieros de Radio (*IRE*, que más tarde se convertiría en la *IEEE*), esta región, se concluyó, se trata del centro de la Vía Láctea, marcando así el inicio de la astronomía fuera del rango visible, usando ondas de radio.

Con los descubrimientos de Jansky, un radio experimentador de nombre Grote Reber quedó totalmente fascinado y quiso seguir profundizando en el tema, por lo que para el año 1938 decide construir un radiotelescopio parabólico en el patio de su casa (Figura 8) y que fue el primer aparato construido exclusivamente con la finalidad de analizar las señales de radio enviadas desde el espacio, más allá de la Tierra, reportando sus resultados en revistas especializadas, el trabajo más notable de Reber con su radiotelescopio fue un radio mapa, pero ya que fue durante el conflicto de la segunda guerra mundial esta aportación no tuvo mayor trascendencia en su tiempo. [13]

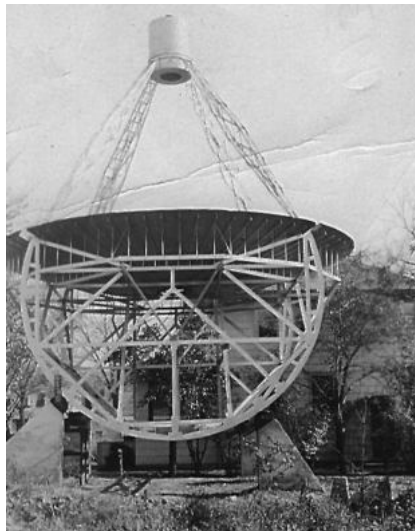


Figura 8. Radiotelescopio construido por Grote Reber. *Fuente: NIST.*

Durante la segunda guerra mundial se desarrollaron importantes avances en instrumentación y técnicas de localización y radio comunicaciones, uno de ellos fue el radar, el cual fue inventado de manera simultánea por Alemania, Holanda, Gran Bretaña y Estados Unidos bajo el nombre inicialmente de *RDF* (*Radio Detection*

Finding) y que luego se conocería con su nombre actual por *Radio Detection And Ranging*. Con el desarrollo de este aparato también se suscitaron descubrimientos astronómicos, pues en el *Army Operational Research Group*, J. S. Hey y sus colegas descubrieron que el sol emite radiofrecuencias y la primera fuente discreta de radio emisión en la constelación de Cygnus. [12]

Debido a que los radares requieren antenas y receptores sensibles para el manejo de radiofrecuencias, estos fueron sumamente útiles para la radioastronomía una vez acabada la guerra, permitiendo así el pleno florecimiento de esta ciencia a partir de 1950. A partir de entonces, los esfuerzos por seguir investigando las señales de radio han ido en aumento y actualmente existen radio observatorios de gran importancia y magnitud como ALMA en Chile, VLA en Estados Unidos, el GTM de Puebla, o futuramente en ngVLA, con tecnología cada vez más actualizadas, como el uso de radio interferómetros (arreglos de radiotelescopios) y con una variada gama de longitudes de onda detectadas, desde milímetros hasta metros.



Figura 9. Atacama Large Millimeter Array (ALMA) en el desierto de Atacama, Chile. Fuente: ESO.

2.2.3. Radiotelescopios

Como ya se vio en las secciones anteriores, el instrumento principal para poder llevar a cabo investigaciones radioastronómicas es el llamado *radiotelescopio*, que es el equivalente al telescopio óptico para el rango visible del espectro electromagnético (entre 380 nm y 780 nm), con la característica de que algunas

mediciones en radiofrecuencia pueden resultar inalcanzables para la luz visible, y viceversa [3]. Los radiotelescopios permiten captar señales de radio emitidas por los cuerpos celestes, las cuales son de frecuencias relativamente bajas, que se encuentran entre los 10 MHz y 1,000 GHz (de 30 m a 0.3 mm respectivamente) dependiendo de las características de sus antenas y su configuración, este rango de frecuencias es una gran ventana que permite el paso de señales sin ser absorbidas por la atmósfera y con ayuda de instrumentos, además de las antenas, como receptores que contienen amplificadores de señales se acondicionan la lecturas de las antenas a un nivel razonable para poder ser medidas e interpretadas.

Uno de los principales problemas de los telescopios ópticos es el fenómeno conocido como *seeing*, el cual es la degradación en la resolución de las observaciones astronómicas causada por las turbulencias atmosféricas y que todos los telescopios ópticos terrestres sufren, en el caso de los que se encuentran en la órbita de la Tierra no sufren de este problema. Por su parte, los radiotelescopios, al usar otra longitud de onda no se ven afectados por este fenómeno, sin embargo, no están exentos de problemas, pues la resolución angular es el que les aqueja a ellos debido a la longitud de onda que se maneja, para entender de mejor manera este concepto, se explica a continuación.

En la imagen a) de la Figura 10 se muestra el patrón de difracción formado por una fuente de luz cuando el haz pasa a través de un orificio, el punto central de máxima intensidad se le conoce como disco de Airy y está rodeado por franjas de interferencia claras y oscuras. Consideremos como dos fuentes de luz las provenientes de dos estrellas y que pasa a través de un telescopio. Si las imágenes se distinguen como separadas se dice que están resueltas, como se muestra en la imagen b), en caso contrario, que no se puedan distinguir como imágenes separadas se dice que no están resueltas, como en la imagen c).

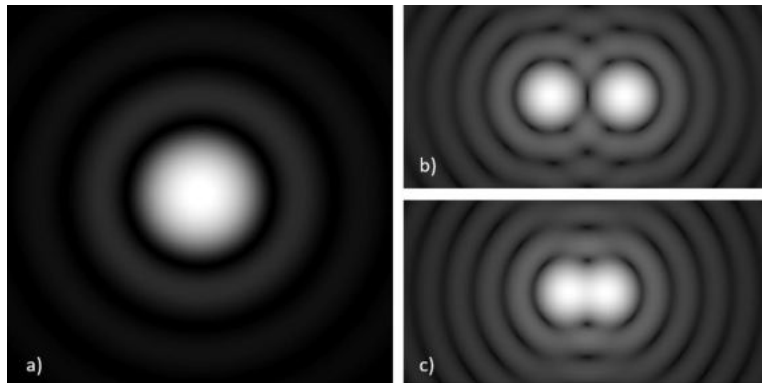


Figura 10. *a)* Patrón de interferencia que se forma cuando la luz pasa a través de un orificio circular. *b)* Imágenes separadas a partir de dos fuentes resueltas. *c)* Imágenes confusas de dos objetos. *Fuente:* Adaptación de Wikipedia.

El ángulo más pequeño θ para el que dos objetos muy próximos entre sí se pueden distinguir separadamente es una medida de la resolución angular y en un telescopio ese ángulo está descrito por:

$$\theta \approx 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (1)$$

Donde λ representa la longitud de onda a la que trabaja el telescopio y D es el diámetro del objetivo, es decir, la medida del lente para telescopios ópticos y la medida de la antena para radiotelescopios. A este criterio se le conoce como Criterio de Rayleigh, es decir, que dos objetos apenas se resuelven cuando el disco de Airy de un patrón coincide con la primera franja del otro (Figura 11). [14]



Figura 11. Criterio de Rayleigh. *Fuente:* "Construcción de un interferómetro de dos elementos" de Carolina Berenice Rodríguez Garza.

Para entender por qué se dice que los radiotelescopios tienen un problema con la resolución angular tomemos en cuenta algunos cuerpos celestes que se encuentran relativamente cercanos y su separación angular (Tabla 1), para este caso son elegidos Júpiter y su satélite natural Europa con $204''$, y también el sistema binario de Sirio que tiene una separación de $0.1''$.

Astros	Separación angular
Júpiter y Europa	$204''$
Sistema binario de Sirio	$0.1''$

Tabla 1. Separación angular de algunos astros vista desde la Tierra.

Ya que conocemos las separaciones angulares de algunos cuerpos celestes vistos desde la Tierra podemos compararlos con respecto a instrumentos y su resolución angular para determinar si son capaces de ver de manera resuelta tales astros, comenzando por los telescopios ópticos tomemos en cuenta la Tabla 2 donde aparecen las resoluciones angulares de diferentes instrumentos.

Telescopios Ópticos	Diámetro	Resolución angular (θ)
Telescopio de Galileo	0.04 m	$2''$ a $3.6''$
OAN, Ensenada, B.C.	2.1 m	$0.03''$ a $0.06''$
Telescopio Keck	10 m	$0.008''$ a $0.01''$
Telescopio Hubble	2.4 m	$0.03''$ a $0.06''$
Telescopio James Webb	6.5 m	$\sim 0.0003''$

Tabla 2. Características de algunos telescopios ópticos.

Como podemos ver, de todos los telescopios ópticos sólo el de Galileo, que, por cierto, es el más antiguo, es con el único que no se alcanzarían a distinguir las dos estrellas que conforman al sistema binario de Sirio (o al menos eso parece tomando en cuenta sólo la expresión del criterio de Rayleigh), pero Júpiter y Europa sí de hecho, fue con ese telescopio con el que se descubrió Europa, junto a sus otras tres lunas principales. Sin embargo, aunque el Telescopio Hubble tiene la misma resolución angular que el del Observatorio Astronómico Nacional, este último tiene que considerarse con una degradación en este parámetro debido al fenómeno del *seeing*, dejándolo con una resolución angular de aproximadamente $0.5''$ y el Keck en $0.1''$ una degradación de casi diez veces el valor nominal, dejando ahora con esta nueva información el dato que con el OAN no se alcanza a ver por separado el sistema binario y el Keck tiene justo la resolución angular mínima para poder verlo. Ahora hagamos el mismo procedimiento para los radiotelescopios que se muestran en la Tabla 3.

Radiotelescopios	Diámetro	Rango de λ	θ
Parkes, Australia	64 m	0.7 cm a 1 m	$23''$ a $54'$
Effelsberg, Alemania	100 m	0.3 cm a 90 cm	$40''$ a $31'$
Arecibo, Puerto Rico	305 m	3 cm a 6 m	$20''$ a $68'$

Tabla 3. Características de algunos radiotelescopios.

En la tabla se puede observar claramente a qué se refiere el *problema de la resolución angular*, pues ninguno de los radiotelescopios listados, por más grande que este tenga su antena puede distinguir como figuras resueltas las estrellas que conforman el sistema binario de Sirio, aunque han sido de una enorme utilidad para muchísimas aplicaciones, de eso no hay ninguna duda, como el GTM en Puebla.

Para aumentar la resolución angular, considerando la expresión del criterio de Rayleigh existen dos formas de hacerlo, una de ellas sería aumentar el diámetro de la antena y otra disminuir la longitud de onda que se recibe, esta última sería ilógica, pero la primera presenta problemas de construcción física, como lo que pasó con el radiotelescopio de Arecibo en 2020 (Figura 12), el cual era sumamente grande y terminó por colapsar (aunque soportó desde 1960).



Figura 12. Colapso en 2020 del radiotelescopio de Arecibo. *Fuente: La Vanguardia.*

La solución para este problema es el empleo de radiointerferómetros, que son arreglos de antenas que correlacionan sus señales para hacerlas una sola y de esa manera tener una mejor lectura. La resolución angular aún responde al criterio de Rayleigh, pero en lugar de usar el diámetro D de cada antena se usa la distancia máxima entre antenas B , entonces se disminuye en gran medida el problema del diámetro. Tomemos el ejemplo del *Very Large Array* (VLA) que se encuentra en Estados Unidos, el cual consiste en un arreglo de 27 antenas con un diámetro de 25 m cada una de ellas, repartidas en tres brazos en forma de Y, cada brazo midiendo 21 km y que tiene cuatro configuraciones que se enlistan en la Tabla 4.

Configuración	Separación
A	36 km
B	10 km
C	3.6 km
D	1 km

Tabla 4. Configuraciones del VLA.

La cobertura de longitudes de onda de este radiointerferómetro va desde los 0.6 cm hasta 90 cm, que al calcular la resolución angular obtenemos que para la configuración D, la más compacta, es de $3.1'$ y para la configuración A es de $5.2''$, muchísimo más puntual que la configuración D, e incluso que el radiotelescopio de Arecibo. Así como este, existen otros arreglos que mejoran por mucho la resolución angular, como el WSRT con $\theta = 2.3''$, el ALMA con $\theta = 0.5''$ o recientemente el esfuerzo mundial del *Event Horizon Telescope*, en el cual varios radiotelescopios de todo el mundo se unieron, creando un radiointerferómetro de $0.00002''$ de resolución angular, con el que fue posible capturar las primeras imágenes de agujeros negros, el de M87 en 2019 y SgrA* (Figura 6) en 2022 y que representa uno de los mayores descubrimientos de los que va del Siglo.

2.2.3.1. Elementos de un radiotelescopio

Como ya fue visto en secciones anteriores, el elemento principal de un radiotelescopio es una antena, sin embargo, hay varios tipos de antenas utilizadas para esta aplicación, cada una con diferentes características. Además de las antenas se utilizan otros elementos, principalmente electrónicos, para acoplar las señales para que estas sean posibles de interpretar. A continuación, se mencionan tales elementos, enfocándonos exactamente a los que necesita un radiotelescopio que utiliza antenas *Yagi-Uda*.

Antenas. Están compuestas por un solo dispositivo metálico que se usa para el envío o recepción de ondas de radio. Para lograr cada una de las modalidades hace falta que estén conectadas a equipos que le den esa propiedad, ya sea un generador o un receptor (Figura 13).

Las antenas emisoras lanzan ondas de radio al medio exterior, a causa de una señal eléctrica, mientras que las receptoras reciben las ondas de radio y convierten en señales eléctricas. Por las antenas circula corriente debido al generador o al emisor al que están conectadas. En el caso de las emisoras, esta corriente eléctrica fluye a través de una línea de transmisión hasta la antena, donde esta convierte la señal en ondas electromagnéticas que se propagan en el espacio libre. Para las antenas receptoras el proceso es contrario, la antena recibe ondas de radio provenientes del espacio libre que se convierte en una corriente que fluye hacia el receptor.

En la radioastronomía las antenas utilizadas son las receptoras, así que en este trabajo al hablar de antenas nos referiremos sólo a este tipo.

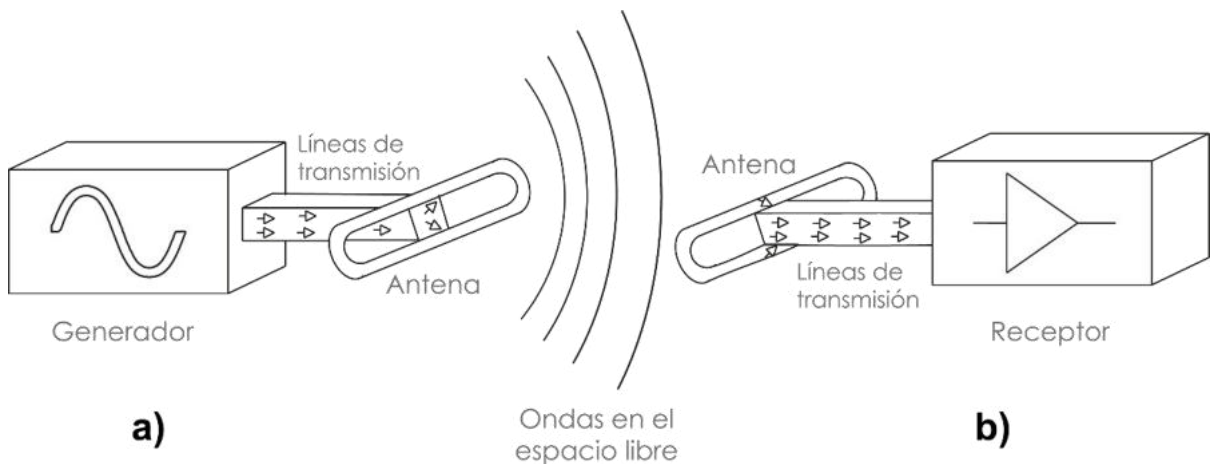


Figura 13. a) Generador, en esta configuración la antena emite ondas de radio, en cambio b) es un receptor, es decir, las recibe.

Existen diferentes tipos de antenas usadas en radioastronomía, pero las principales son las antenas de alambre y las reflectoras, las primeras son las más comunes ya que son muy fáciles de encontrar comercialmente.

Las antenas de alambre se caracterizan por estar construidas de con hilos conductores. Pueden estar formados por hilos rectos (dipolos), anillos (circular, cuadradas o de otra forma) y hélices (Figura 14), de este tipo son las antenas *Yagi-Uda*, mismas en las que se enfoca el presente trabajo.

Por su parte, las antenas reflectoras se basan en el trazado de rayos de un espejo. Las señales que rebotan en la antena son concentradas en el punto focal del reflector, donde se encuentra un *alimentador* encargado de recibir las señales. Algunas configuraciones para antenas reflectoras son: esquinas, parabólicas o Cassegrain. [15]

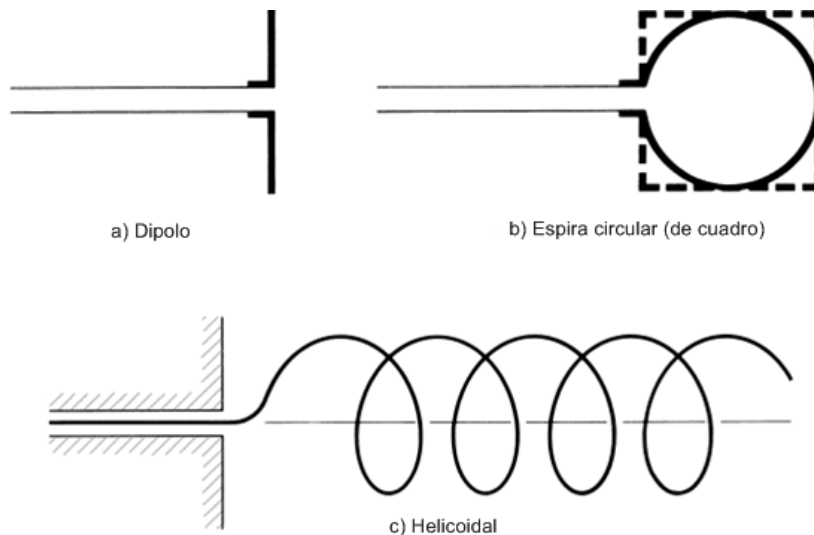


Figura 14. Tipos de antenas de alambre. *Fuente: ResearchGate.*

Receptor. Otra parte del radiotelescopio construido con antenas de alambre, como la que se trata en este trabajo es, como ya se dijo anteriormente, un equipo receptor que se encargue de transformar las ondas de radio en señales eléctricas para ser interpretadas.

Las tres principales especificaciones de cualquier receptor son la amplificación, sensibilidad y selectividad. Esto quiere decir que si una señal es captada débil es captada por una antena, al pasar por el receptor debe producirse una señal suficientemente fuerte y sin distorsiones exageradamente elevadas. La

sensibilidad se define como la señal mínima detectable por el receptor y la selectividad se determina comúnmente por un filtro pasabandas.

Son los receptores los que, con ayuda de las antenas construyen en su totalidad el radiotelescopio, pues las señales de salida de estos serán las que se manipularán para, por ejemplo, correlacionarlas a fin de crear un radiointerferómetro y obtener mejores resultados de las observaciones, como es, tener una resolución angular mucho más grande.

El receptor más comúnmente usado es el conocido como *Superheterodino* que se ilustra en la Figura 15, donde se pueden apreciar las etapas de amplificación y filtros de los que se habló anteriormente, así como también la posibilidad de controlar la frecuencia a la que recibe señales.

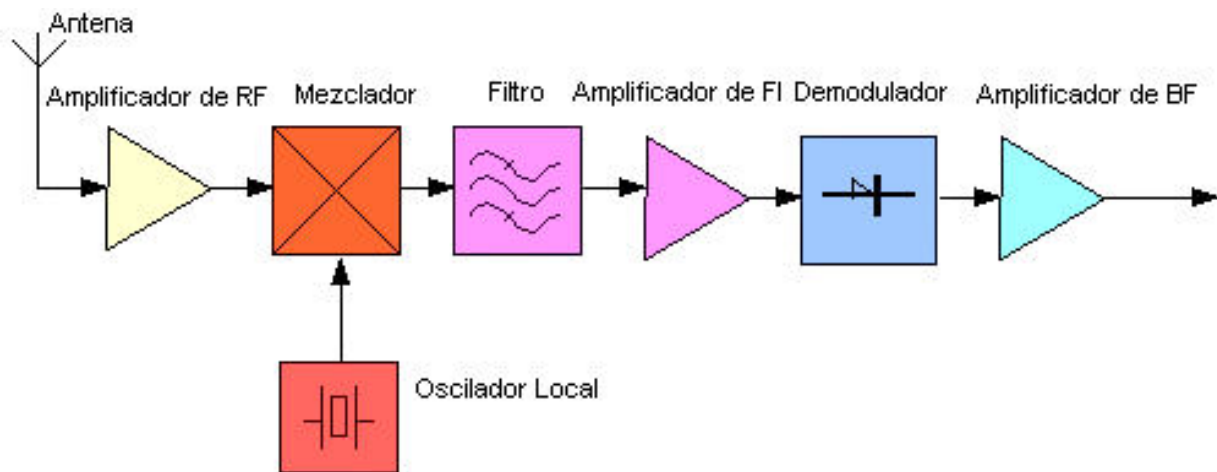


Figura 15. Diagrama de bloques de receptor superheterodino. *Fuente: Wikipedia.*

2.2.3.2. ¿Por qué utilizar antenas *Yagi-Uda*?

En la sección anterior se mencionó cómo las antenas de alambre son las más comunes de encontrar de manera comercial, uno de esos tipos de antenas es la *Yagi-Uda*, además de ser fácil de encontrar tiene buenas características de recepción y es accesible económicamente hablando. [16]

La antena Yagi-Uda es direccional y fue inventada en 1926 por Hidetsugu Yagi y en menor parte por Shintaro Uda. Esta antena está formada por un elemento conductor que se denomina reflector y se encuentra detrás del elemento activo que funciona como captador, y también por una serie de elementos llamados directores, los cuales se encargan de alargar el lóbulo del diagrama de irradiación de la antena. Tanto los directores como el reflector son elementos parásitos y sólo el colector es activo.

Esta antena no sólo tiene una ganancia de potencia elevada en una dirección, sino que también eleva el nivel de la señal recibida en esa dirección. Cuando el diagrama de irradiación de la antena es angosto y la relación frente-espalda elevada, se atenúan considerablemente los ruidos e interferencias provenientes de otras direcciones. [17]



Figura 16. Antena Yagi-Uda, a la izquierda se muestra el diagrama de irradiación, el lóbulo crece sólo a un lado por acción del reflector y los directores provocan un alargamiento. *Fuente: Todoantenas.*

2.3. Mecatrónica

El término “mecatrónica” se propuso en 1969 por un ingeniero japonés para hacer referencia a sistemas que involucran mecanismos y electrónica en el proceso de diseño. El término en la actualidad tiene un significado más amplio, ya que es usado

para describir una filosofía en la tecnología de la ingeniería en la cual hay una integración coordinada y concurrentemente desarrollada de la ingeniería mecánica con la electrónica y el control automático por computadora, en el diseño de productos y procesos.

La mecatrónica reúne áreas de la tecnología que involucran sensores y sistemas de medición, sistemas de manejo y actuación, así como sistemas de microprocesador, junto con el análisis del comportamiento de sistemas y sistemas de control. [18]

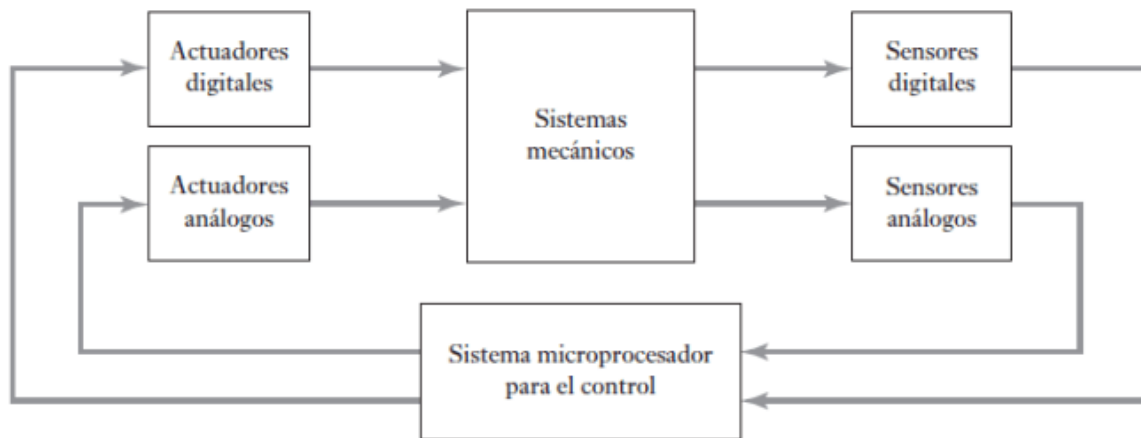


Figura 17. Elementos básicos de un sistema mecatrónico. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.

2.3.1. Diseño mecánico

El diseño mecánico hace referencia al proceso de creación que se realiza antes de fabricar una pieza o dispositivo donde se tienen en cuenta distintos aspectos como el tipo de material, las dimensiones y la funcionalidad.

Para poder crear piezas funcionales para algún sistema mecánico o mecatrónico (que son los que nos interesan en este caso) es necesario conocer el mecanismo que se quiere lograr, es decir, los movimientos que se necesitan ejecutar, para esto es necesario concebir ideas y proponer soluciones al problema del mecanismo, con diversos modelos que por lo general comienzan con bosquejos

hechos a mano considerando medidas y morfologías, para posteriormente pasarlos a un software de dibujo mecánico asistido por computadora, tal como SolidWorks. De esta manera, teniendo simuladas cada una de las piezas mecánicas para el sistema, se puede hacer un ensamble de piezas a fin de que, por medio de relaciones de posición, se puedan probar los movimientos que tendrá y así validar si se está llegando a lo que se quiere construir en la realidad.

Finalmente, una parte de fundamental importancia es considerar los esfuerzos, cargas y torques que se vean incluidos en el movimiento de nuestro sistema, y para esto existen softwares especializados para la simulación de estas contribuciones mecánicas, como Ansys, aunque siempre se tienen las herramientas matemáticas que, de hecho, es en lo que los softwares están basados, con los modelos matemáticos de fenómenos físicos y que en siguientes secciones de transmisiones de movimiento se tratarán.

La importancia de esta última parte reside en que, si no se llegan a determinar de forma correcta las características necesarias de elementos de movimiento como motores, engranes, o misma resistencia de materiales, el mecanismo, por mejor modelado que esté, no podrá funcionar en la realidad.

2.3.2. Actuadores mecánicos

Los sistemas de actuación mecánica se refieren a aquellos elementos netamente mecánicos que se pueden considerar convertidores de movimiento, siendo esto, transformadores de un tipo de movimiento en otro, o bien, el aumento o decremento de par inducido por un dispositivo encargado de la generación de movimiento, como un motor, entre otros más para poder realizar cierta tarea específica de manera mecánica. A continuación, se explicarán algunos conceptos de los movimientos mecánicos que resultarán de trascendencia para el desarrollo del presente proyecto.

2.3.2.1. Tipos de movimiento

El movimiento de un cuerpo rígido se puede considerar como la combinación de movimiento de traslación y rotación. Al considerar las tres dimensiones espaciales, el movimiento de traslación será un movimiento que se divide en componentes coincidentes con uno más de los tres ejes existentes. Por su parte, el movimiento de rotación es la acción de girar con respecto a uno de los ejes.

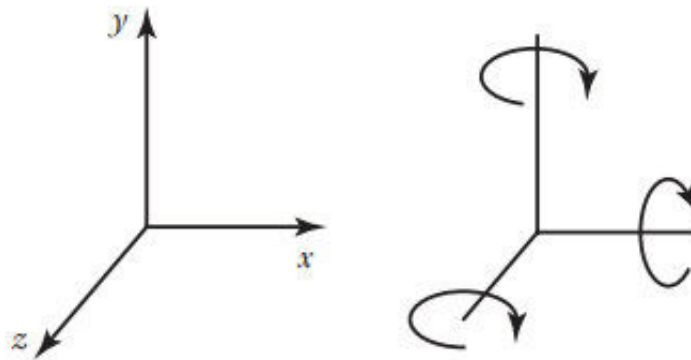


Figura 18. Tipos de movimientos traslacional (izquierda) y rotacional (derecha). *Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.*

Los movimientos complejos pueden entenderse como una combinación de movimientos de traslación y rotación. Tomemos el ejemplo de una mano tomando un lápiz, tal acción puede involucrar que oriente la mano en determinado ángulo con la mesa, gire la mano, separe los dedos y los coloque en posición adecuada para tomar el lápiz. Desde luego esa serie de movimientos resulta compleja para explicarla detalladamente, pero de que se puede descomponer en los dos movimientos simples antes descritos. Este tipo de análisis de movimientos es relevante al momento de diseñar el mecanismo de un robot para que haga cierta tarea. Por ejemplo, entre las señales de control que se envían a un mecanismo podrían figurar agrupamientos de señales con las que se le ordena a la articulación 1 girar 20° y a la articulación 2 hacer una extensión de 4 mm de movimiento de traslación. [18]

2.3.2.2. Engranés

Los trenes de engranes son mecanismos muy utilizados para transformar y transmitir el movimiento rotacional. Se usan cuando es necesario un cambio de velocidad o par motor de un dispositivo que se encuentra girando. Un ejemplo de situación en que se usan los trenes de engranes son las cajas de velocidades de los automóviles, que permiten al conductor igualar los requerimientos de velocidad y par motor para cierta superficie con la potencia disponible del motor.

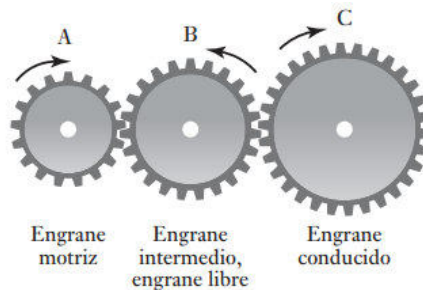


Figura 19. Tren de engranes de tres elementos. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.

Los engranes transmiten el movimiento rotacional entre ejes paralelos y entre ejes inclinados entre sí (Figura 20). El término de *engrane cónico* se usa cuando las líneas de los ejes se intersectan. Cuando dos engranes están dentados, el mayor se llama *corona* o simplemente engrane, y el menor se conoce como *piñón*. Los engranes que se usan para conectar ejes paralelos tienen dientes rectos, esto quiere decir que los ejes se cortan en líneas axiales paralelas. Este tipo de engranes se llaman rectos.

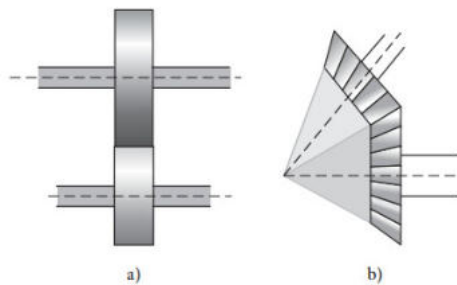


Figura 20. a) Ejes de engranes rectos, b) Engranes cónicos. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.

Consideremos dos engranes conectados (Figura 21). Si el engrane A tiene 40 dientes y el B tiene 80 dientes, el engrane A gira dos veces en el mismo tiempo que el B gira sólo una vez. Por lo tanto, la velocidad angular del engrane A, ω_A , debe ser el doble a la del engrane B, ω_B .

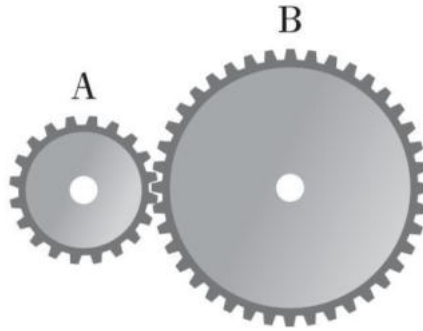


Figura 21. Dos engranes conectados. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.

Y ya que el número de dientes es proporcional al diámetro del engrane, también podemos expresar la relación en términos de estos tres parámetros, esto quiere decir que:

$$\frac{\omega_B}{\omega_A} = \frac{\text{número de dientes de B}}{\text{número de dientes de A}} = \frac{d_B}{d_A} \quad (2)$$

En el caso propuesto, la relación de engranes es 2, que determina la reducción de velocidad, pero también el aumento de torque (o par) en el engrane conducido, es decir, que si el piñón (Engrane A) gira a 100 *r.p.m.* con un torque de 10 Nm, el engrane B girará a 50 *r.p.m.* con un torque de 20 Nm. [18]

Una característica importante a tomar en cuenta al momento de diseñar un mecanismo que contiene engranes es la distancia entre centros, la cual podemos interpretar inmediatamente como la suma de los dos radios de los engranes, entonces la expresión matemática quedaría como:

$$l_{AB} = r_A + r_B \quad (3)$$

Donde l_{AB} es la longitud que existe entre el centro del engrane A y el B. Sin embargo, normalmente se utilizan las medidas de los diámetros, entonces, para dejarlo en estos mismos términos podemos representarlo de forma:

$$l_{AB} = \frac{d_A + d_B}{2} \quad (4)$$

Y para hacerlo más general, podemos dejarlo en términos del número de dientes y el módulo del engrane, puesto que $z = md$, donde z es el número de dientes del engrane, m su módulo (esta medida debe ser igual para los dos engranes) y d , naturalmente, es el diámetro. Entonces tomando en cuenta esto:

$$l_{AB} = m \frac{z_A + z_B}{2} \text{ (mm)} \quad (5)$$

Con respecto a esto, podemos considerar que tratándose de engranes con módulo igual a 2, la distancia entre centros del ejemplo es de 120 mm.

2.3.2.3. Rodamientos

Siempre que hay desplazamiento de una superficie que está en contacto con otra, ya sea por rotación o desplazamiento, las fuerzas de fricción producidas generan calor que desperdicia energía y produce desgaste. La función de los rodamientos es guiar el movimiento de una parte con respecto a otra con mínima fricción y máxima exactitud.

Rodamientos de bolas

Con este tipo de rodamiento, la carga principal se transfiere del eje rotacional al apoyo mediante un contacto de rodadura en vez de un contacto por deslizamiento. Un rodamiento de rotación consta de cuatro elementos principales: una pista interna, una pista externa, el elemento de rodamiento de bolas o rodillos y una jaula que mantiene separados los elementos de rodamiento (). Las pistas internas y externas contienen guías endurecidas dentro de las que giran los elementos rodantes.

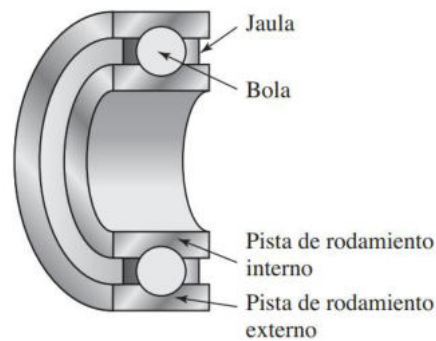


Figura 22. Elementos básicos de un rodamiento de bolas. *Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.*

Los rodamientos de movimiento rotacional son usualmente utilizados para rangos amplios de diámetro del eje, así como cargas y velocidades relativamente elevadas.

2.3.3. Actuadores eléctricos

Para el desarrollo de un sistema mecatrónico siempre es necesario contar con actuadores capaces de transformar las señales eléctricas de control en movimiento y de esta manera darle sentido al término de la *automatización* de un proceso, es decir, reemplazar la transmisión manual de la energía mecánica, para que en su lugar la realice un dispositivo. Específicamente los actuadores en que nos enfocaremos en este trabajo son los motores de pasos (o paso a paso) que se describen a continuación.

2.3.3.1. Motores de pasos

La característica esencial de los motores de pasos es la habilidad para transformar pulsos en precisos cambios de la posición del rotor, a los que llamamos pasos. Por ejemplo, si en el caso de un motor un pulso produce un cambio de 6° , entonces 60 pulsos bastarán para dar toda la vuelta al eje, pero los motores más comunes comercialmente son aquellos de 200 pasos para hacer una vuelta, es decir, una resolución de $1.8^\circ/\text{paso}$. Existen diferentes tipos de motores de pasos:

- **Motores de pasos de reluctancia variable**

En este tipo de motores, cuando una corriente fluye a través de devanados opuestos, se produce un campo magnético, cuyas líneas de fuerza pasan de los polos al estator a través del grupo de polos más cercano al estator. Dado que las líneas de fuerza se pueden considerar como un hilo elástico, siempre tratando de acortarse, el rotor se moverá hasta que sus polos y los del estator queden alineados, a este estado se le conoce como posición de reluctancia mínima.

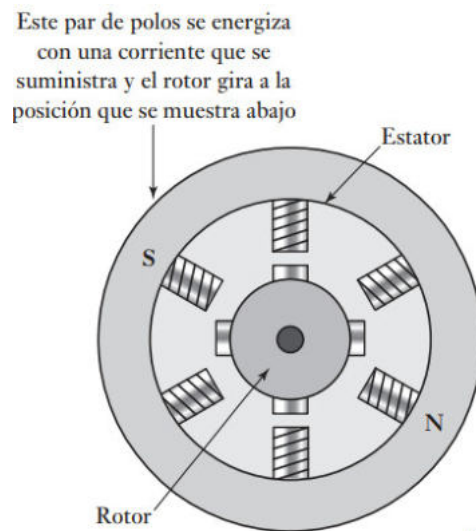


Figura 23. Motor de pasos de reluctancia variable. *Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.*

- **Motor de pasos de imán permanente**

La característica principal de este tipo de motor de pasos es que el rotor es un imán permanente y el estator está constituido por cuatro polos devanados, por lo tanto, al conectar una corriente a uno de los pares de polos del estator, el rotor se desplazará hasta alinearse con él. A continuación, se muestra una ilustración de la construcción de este tipo de motores de pasos.

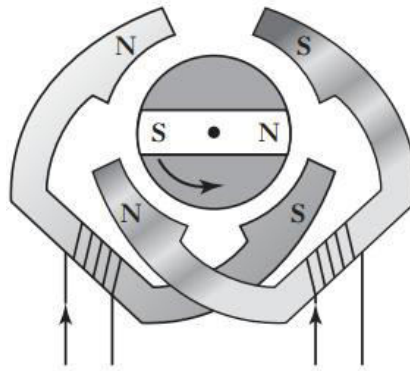


Figura 24. Motor de pasos de imán permanente. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.

- Motor de pasos híbrido

Este tipo de motores unen las características de los motores de pasos de reluctancia variable y los de imán permanente, cuentan con un imán permanente que se encuentra dentro de un par de tapones dentados de hierro. El rotor se coloca a sí mismo en la posición de reluctancia mínima cuando se energiza un par de devanados en el estator. Si un motor tiene n fases y m dientes en el estator, el número total de pasos por revolución será de nm . Estos motores se usan mucho en aplicaciones que requieren un posicionamiento de alta precisión, como en las unidades de disco duro de las computadoras.

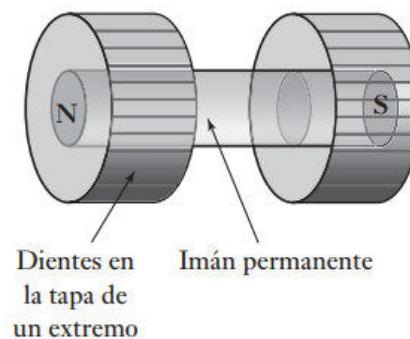


Figura 25. Rotor de motor de pasos híbrido. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.

Para entender los términos que se usan al momento de elegir y usar motores de pasos, así como para su control, es necesario conocer sus definiciones, las cuales se enlistan a continuación.

- **Fase**

Se refiere a la cantidad de devanados independientes del estator, por ejemplo, en la Figura 24 se muestra un motor de dos fases. La corriente requerida para cada fase, así como su resistencia e inductancia se especifican de manera que también se especifique la salida de conmutación al controlador. Los motores bifásicos se usan en aplicaciones que no implican una carga pesada, los trifásicos suelen ser de reluctancia variable y se usan para cargas moderadas, mientras que los de cuatro fases se usan para mayores potencias.

- **Ángulo de paso**

Se refiere a la distancia angular que se desplaza el rotor cuando se hace un cambio de paso, producto de la aplicación de corriente en los devanados del estator.

- **Par de retención**

Es el máximo torque que se le puede aplicar a un motor energizado sin que este salga de la posición de reposo, provocando una rotación en el eje.

- **Par máximo de enganche**

Es el par máximo con el que puede arrancar un motor, dada una frecuencia de pulsos, y lograr la sincronización sin perder un paso.

- **Par máximo de desenganche**

Es el par máximo que es posible aplicar a un motor, trabajando a determinada frecuencia de pasos, sin perder su sincronización.

- **Frecuencia de enganche**

Es la frecuencia de conmutación máxima a la que un motor puede arrancar sin perder un paso.

- Frecuencia de desenganche

Es la frecuencia de conmutación en la que un motor puede mantener su sincronía conforme se reduce la frecuencia de conmutación.

- Velocidad de progresión

Es el rango de frecuencias de conmutación entre el enganche y el desenganche dentro del cual el motor funciona en sincronía, pero no puede ni arrancar ni invertir su giro.

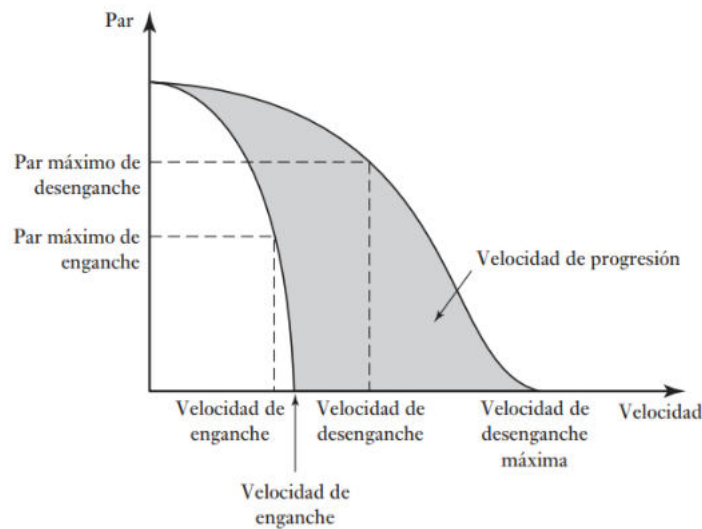


Figura 26. Características de un motor de pasos. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.

Como se puede ver, una característica importante que se debe tomar en cuenta en los motores de pasos es el llamado *par*, al que también podemos conocer como torque o momento de fuerza, este concepto se puede definir como una tendencia a producir un cambio en el movimiento rotacional y se denota por la letra griega tau (τ) y se expresa matemáticamente como:

$$\tau = Fr \quad (6)$$

Siendo F la fuerza aplicada y r la distancia del brazo de palanca, entonces, las unidades de medida del torque o el par son Nm (newton-metro). En un motor

normalmente se le conoce como *par motor*, debido a que es el par que es capaz de generar el dispositivo para mover una carga, evidentemente, el par motor debe ser mucho mayor que el torque que produciría la carga sobre el eje del motor. [19]

2.3.3.1.1. Control de un motor de pasos

Los motores de pasos más comúnmente utilizados para una gran cantidad de aplicaciones son los bifásicos, es decir, aquellos que sólo tienen dos devanados independientes, y es de este tipo de motores en el que nos centraremos para explicar su control, aunque para motores con más fases terminan siendo solo arreglos derivados del mismo que se usa para los bifásicos. Lo primero que hay que decir es que el método de control es utilizar electrónica de estado sólido, es decir, mediante conmutación utilizando transistores.

Dentro de los motores bifásicos existen dos tipos de motores diferenciados por su construcción, aquellos que tienen cuatro cables para hacer la secuencia de control se les llama *bipolares*, pero existen otros que tienen seis cables, a estos se les llama *unipolares* y esos dos cables extra son producto de una derivación central en cada uno de los devanados, si estas derivaciones se conectan entre sí es posible controlar el motor con sólo cuatro transistores. En la Figura 27 se muestran estos dos tipos de motores.

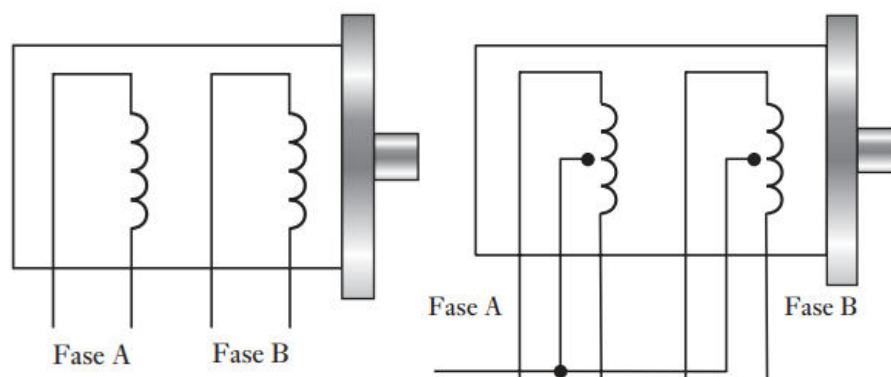


Figura 27. A la izquierda, motor de pasos bipolar. A la derecha, motor de pasos unipolar. Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.

En la Figura 28 se muestra el circuito de los puentes H necesario para controlar cada una de las fases del motor de pasos, la importancia del puente H está en garantizar que existan los electroimanes de buena manera, es decir, que cuando la terminal 1 esté siendo alimentada, la terminal A esté a la polaridad positiva de la fuente y la terminal C conectada a tierra, por su parte, si la terminal 3 es la alimentada, la conexión de las terminales A y C será la contraria. Las terminales A, B, C y D son las que se conectarán a las terminales de control del motor de pasos.

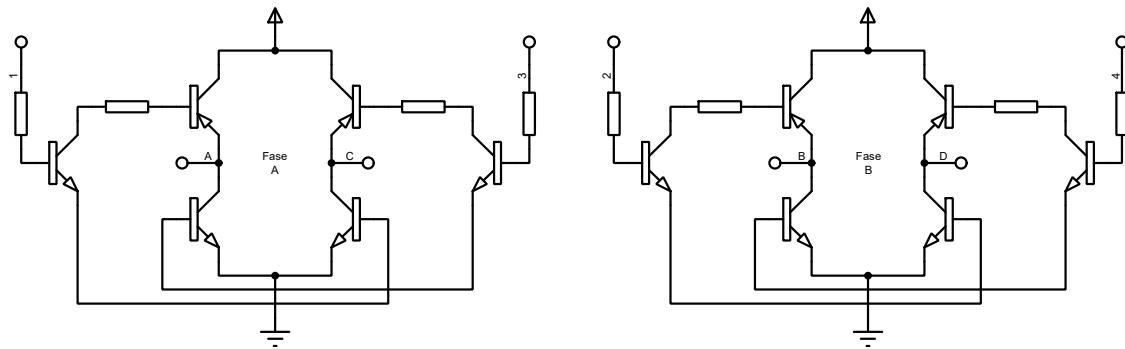


Figura 28. Puentes H de control de las dos fases del motor de pasos.

Para lograr hacer que el motor de pasos es necesario alimentar las terminales 1, 2, 3 y 4 con una determinada secuencia de pasos para que exista un orden lógico en el movimiento del eje del motor, las configuraciones más usuales son la de *paso completo* y *medio paso*, la primera se refiere a la activación de una bobina a la vez, es decir, para dar la secuencia completa serían cuatro pasos, mientras que en el segundo se necesitan ocho pasos para dar la secuencia completa, debido a que en esta dan *pasos intermedios*, la ventaja de usar esta última es porque el ángulo de paso se mejora, entonces se tiene una mayor resolución angular, por ejemplo, si el motor que estamos usando da $1.8^\circ/\text{paso}$, entonces en configuración de medio paso sería de 0.9° .

El medio por el que se aplican las secuencias de pasos es comúnmente por una plataforma basada en microcontroladores o microprocesadores, aunque también se podría probar de manera manual a través de switches para visualizar la

forma en que va avanzando el eje. Esta última manera podría servir para validar si está conectado correctamente, antes de pasarlo al sistema con microcontroladores.

A continuación, se presentan las tablas donde se establecen las secuencias para hacer que el motor se mueva en sentido horario. El número de terminal está hecho con respecto a la Figura 28.

Paso	Terminales			
	1	2	3	4
1	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado
2	Apagado	Encendido	Apagado	Apagado
3	Apagado	Apagado	Encendido	Apagado
4	Apagado	Apagado	Apagado	Encendido

Tabla 5. Secuencia de conmutación para pasos completos.

Paso	Terminales			
	1	2	3	4
1	Encendido	Apagado	Apagado	Apagado
2	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado
3	Apagado	Encendido	Apagado	Apagado
4	Apagado	Encendido	Encendido	Apagado
5	Apagado	Apagado	Encendido	Apagado
6	Apagado	Apagado	Encendido	Encendido
7	Apagado	Apagado	Apagado	Encendido
8	Encendido	Apagado	Apagado	Encendido

Tabla 6. Secuencia de conmutación para medios pasos.

Para continuar con los demás pasos basta con iterar la misma secuencia de pasos una vez que llega al octavo regresar al primero y así sucesivamente. Para

dar el sentido de giro de manera antihoraria lo que se necesita es mandar la secuencia de conmutación de manera contraria a la de la tabla correspondiente, según el tamaño de paso que se está dando.

Con respecto al puente H como método para hacer funcionar al motor de pasos, una medida común es utilizar un controlador o *driver* de motor de pasos ya comercial, en este están ya dentro estos puentes, con las conexiones necesarias para conectar las terminales del motor y enviarle las secuencias por medio de trenes de pulsos para indicar cada paso, así como señales digitales para el sentido de giro del eje del motor.

2.3.3.1.2. Selección de un motor de pasos

Comercialmente existe una gran variedad de motores con diferentes características entre sí, algunas muy parecidas, pero otras bastante diferentes, entonces resulta crucial aprender a elegir entre todos los disponibles, como en este caso nos estamos refiriendo a los motores de pasos específicamente, se comenzará por enlistar aquellas características para la elección de estos:

1. Requerimientos del par de operación de la aplicación. El par de velocidad debe ser lo bastante alto para acomodar el par y el requerimiento de velocidad de progresión. También las características par velocidad deben ser las adecuadas.
2. El ángulo de paso debe ser de una resolución lo bastante alta para proporcionar los incrementos de movimiento de salida requeridos.

Y a niveles generales, es decir, las características a considerar para cualquier motor independientemente de su tipo (cd, ac, de pasos, BLDC, etcétera) son las siguientes:

3. Acoplamiento de inercia. Tomar en cuenta el acoplamiento de transmisión de movimiento empleado en la aplicación, por ejemplo, si se están usando una transmisión por engranes, considerar la relación de estos.

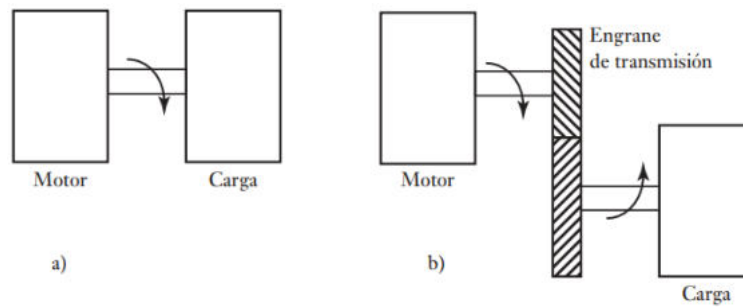


Figura 29. a) Motor girando una carga, b) Motor con engrane de transmisión girando una carga.

Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.

4. Requerimientos de par. Calcular el torque de la carga que se quiere mover y determinar qué par es el necesario ya con la consideración del acoplamiento de inercia.

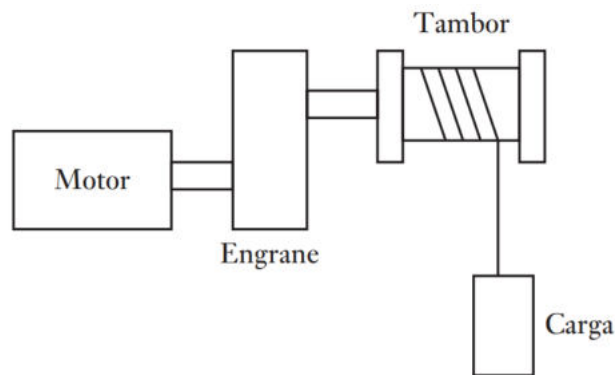


Figura 30. Motor levantando una carga. *Fuente: "Mecatrónica" de W. Bolton.*

5. Requerimientos de potencia. El motor debe estar apto para correr a la máxima velocidad requerida sin calentamiento excesivo.

Tomar en cuenta estos factores técnicos a la hora de elegir un motor asegura que la aplicación para la que está pensado usarse tenga una probabilidad de éxito muy grande, pues fundamentándose en cálculos y consideraciones físicas es mucho más fácil elegir con seguridad el motor idóneo, acorde a las necesidades del proyecto. Además, también un factor importante pero que no es técnico es el costo del motor, que se acople al presupuesto del proyecto.

2.3.4. Transductores y sensores

Unos elementos de suma importancia para un sistema automatizado son los sensores, tanto para el ingreso de datos para su procesamiento y como elemento de retroalimentación en un control de lazo cerrado, estos elementos son la comunicación entre el sistema y las señales del mundo natural. Existen varios tipos de sensores, y estos a su vez forman parte de un conjunto mucho más grande: los transductores. A continuación, se definen y ejemplifican los transductores y los sensores.

Los transductores pueden definirse como dispositivos que, al ser afectados por la energía de un sistema de transmisión, proporcionan energía en la misma forma o en otra a un segundo sistema de transmisión. La transmisión de energía puede ser eléctrica, mecánica, química, radiante o térmica. [20]

Con la definición anterior, tomando en cuenta que los transductores son simplemente aquellos elementos que transforman un tipo de energía en otro (o en la misma), acoplando por esta transmisión dos sistemas, podemos separar en dos categorías a los transductores: los de entrada y los de salida. Los transductores de salida se pueden ejemplificar con los actuadores, pues, por ejemplo, un motor eléctrico transforma la energía eléctrica en mecánica, un cilindro neumático o una electroválvula también son ejemplos de transductores de salida, en pocas palabras, este tipo de transductores son aquellos que interactúan con el mundo real a fin de provocar algún cambio.

Por su parte, a los transductores de entrada también les podemos llamar sensores, y como su nombre lo indica, estos se caracterizan por ser los que *sienten*, es decir, los que le entregan al sistema información del mundo exterior, estos interactúan con la naturaleza con la finalidad de conocer su estado. Comúnmente, debido a las aplicaciones de automatización, la mayoría de estos transductores tienen la característica de convertir la señal medida en una señal eléctrica, por

ejemplo, los sensores potenciométricos provocan un cambio en el valor de resistencia eléctrica conforme al cambio de posición del mismo.

Para ilustrar lo mencionado anteriormente, en la Figura 31 se muestra el diagrama de flujo que lleva un control de procesos, donde la entrada del mismo es el sensor, o transductor de entrada, mientras que la salida es el actuador, o transductor de salida.

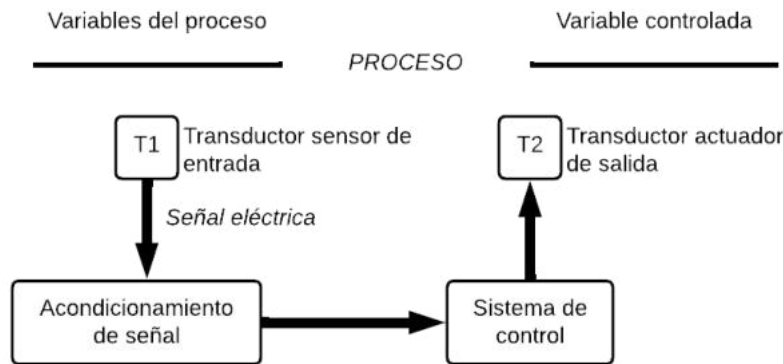


Figura 31. Control de procesos. Adaptada de: *"Instrumentación. Transductores e interfaz"* de B.R. Bannister y D.G. Whitehead.

Para este trabajo, los transductores de salida en que se centra son en los motores de pasos, explicados ya en la sección anterior, razón por la que, a partir de este momento, en esta sección habrá un enfoque especial sólo en los sensores.

Para explicar el funcionamiento de la mayoría de los transductores cabe resaltar que, aunque haya una inmensa cantidad de estos dispositivos en el mercado, todos se pueden reducir a dos maneras de clasificarlos, una podría ser el uso que se le da, esto es, aquellos que son para medir temperatura, presión, humedad, intensidad lumínica, entre otras variables naturales; otra manera de clasificación, y la que se usará para describir algunos sensores en este trabajo, es por medio de la variable eléctrica que se ve alterada ante diferentes estímulos naturales, como la resistencia eléctrica, capacitancia o la intensidad de campo magnético, a continuación se profundiza en esta clasificación. [21]

2.3.4.1. El sensor electromecánico

Este tipo de sensores son aquellos que a partir de un movimiento mecánico generan contacto entre dos placas metálicas, permitiendo de esta manera el flujo de corriente eléctrica, que a su vez cerrará un circuito. Además, podemos decir que este tipo de sensores son digitales debido que solo puede estar en dos estados (encendido o apagado) y no es continua su lectura.

Un ejemplo de estos sensores es el codificador de tacómetro, donde se emplean varios segmentos metálicos distribuidos alrededor de un disco con una especie de dedo metálico de contacto, para crear una serie de interruptores. El movimiento de los segmentos hace o corta el contacto y si se cuenta la serie resultante de pulsos eléctricos obtenemos una medida de la distancia recorrida. Por lo regular, la detección de posición angular se logra incluyendo en el disco varios juegos de contactos acomodados como en la Figura 32, que proporciona una combinación binaria. [21]

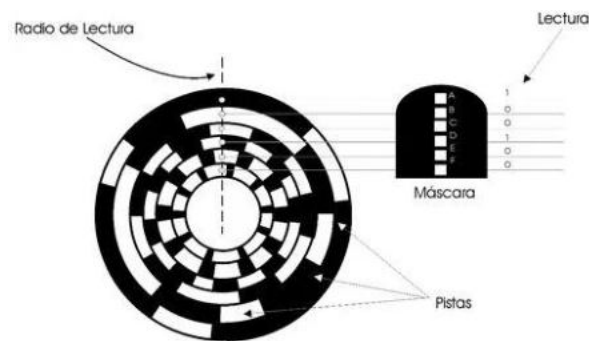


Figura 32. Estructura de un encoder absoluto. *Fuente: Contaval.*

Cabe resaltar que este sensor, aunque es un ejemplo interesante de esta clasificación, en la práctica cada vez tiene menos uso por los inconvenientes que causa el hecho de depender de un contacto mecánico, pues con el uso presenta desgaste físico, suciedad, corrosión, entre otros estados que no son deseados, así que comúnmente se usan encoders ópticos con el mismo principio de funcionamiento, pero usando un haz de luz en lugar del dedo metálico.

2.3.4.2. Resistencia

Los sensores resistivos, como su nombre lo indica, son aquellos, los cuales tienen por variable eléctrica la resistencia, esto quiere decir que ante el ingreso de algún tipo de energía a la que son sensibles la convierten en resistencia eléctrica. El ejemplo más simple de este tipo de sensores es el potenciómetro, el cual es un divisor de voltaje, pues es un arreglo de dos resistencias en serie con una derivación en medio de ambas (véase la Figura 33), los potenciómetros convierten la energía mecánica en una señal eléctrica y existen varios tipos de estos, como los rotativos y los lineales. [22]

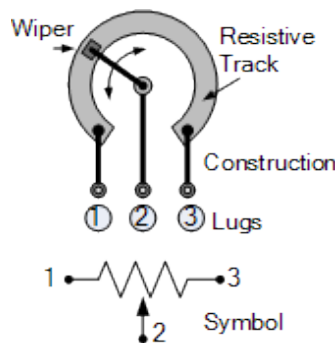


Figura 33. Representación de un potenciómetro rotativo y su símbolo. *Fuente: i-Ciencias.*

Otros ejemplos de sensores resistivos son los siguientes:

- *Fotorresistores:* Son sensibles a cambios en la intensidad de luz por medio de una placa semiconductor (normalmente CdSe).
- *Galga extensiométrica:* Aprovecha la descripción matemática de la resistencia eléctrica $R = \frac{\rho L}{A}$, de donde sabemos que, si el área y/o la longitud del material cambia, la resistencia eléctrica también lo hace.
- *Termistor NTC.* Este sensor está construido a base de un semiconductor (Ag_2S) aprovecha el hecho de que, a mayor temperatura, la resistencia en este dispositivo disminuye (esto justo por tratarse de un semiconductor).

2.3.4.3. Capacitancia

Este tipo de sensores convierten un cambio de la magnitud medida en un cambio en la capacitancia. Dado que un capacitor consiste básicamente en dos electrodos separados por un dieléctrico, el cambio de capacidad puede ocasionarse por el movimiento de uno de los electrodos, acercándose o alejándose del otro electrodo, o mediante cambios en el dieléctrico situado entre los dos electrodos fijos.

Existe una gran variedad de ejemplos de este tipo de sensores, incluso muchas de las pantallas táctiles de nuestros tiempos utilizan este principio de funcionamiento, aunque se pueden crear sensores capacitivos que midan presión, distancia, entre muchas variables más. [23]

2.3.4.4. Transductores electromagnéticos

A estos sensores también se les llama inductivos y se caracterizan por el hecho de aprovechar que las señales eléctricas se generan cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético o, inversamente, si un campo magnético corta al conductor. [21]

Convierten un cambio de la magnitud medida en un cambio de la autoinductancia de un devanado único. Los cambios de inductancia pueden efectuarse mediante cambios de flujo introducidos externamente en un devanado con un núcleo fijo o mediante el movimiento de un núcleo ferromagnético interior al devanado, tal como sucede en el transformador diferencial de variación lineal. [23]

Este principio se aplica en los detectores magnéticos de proximidad, cuando se necesita detectar objetos en movimiento, como los dientes del engrane de una revolvedora, por ejemplo. Este tipo de sensores es sumamente utilizado en ambientes industriales para el funcionamiento de las máquinas.

2.3.5. Acondicionamiento de señales y procesamiento de datos

Los sistemas de acondicionamiento de señal son circuitos que convierten los parámetros eléctricos de salida de los sensores en una señal eléctrica que se pueda medir fácilmente, o bien, con el nivel apropiado al que se necesita que estén para la siguiente etapa. La etapa del acondicionador de señal contiene todas las transformaciones que deben realizarse sobre las señales eléctricas que resultan en la salida del transductor, y que son previas al procesamiento de datos para extraer la información que se busca.

El conjunto sensor-acondicionador es el puente entre la variable física y la entrada del circuito electrónico que vaya a procesar la información, el cual, puede ser un circuito de conversión analógico a digital de un sistema embebido, como un microcontrolador o un microprocesador.

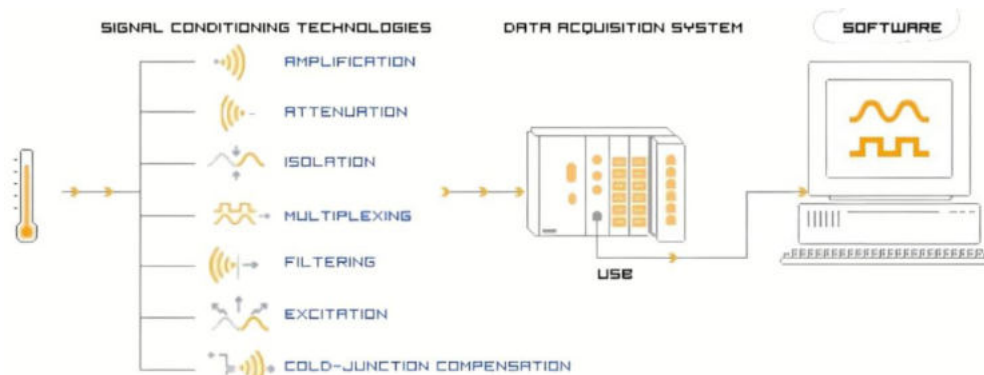


Figura 34. Diagrama de interfaz entre el sensor y el despliegue de la información en un software.

Fuente: Logicbus.

Existen varias razones por las que las señales de salida del sensor deben ser acondicionadas:

- Cuando la señal eléctrica que es función de la magnitud que se mide no está en términos de voltaje o corriente, suele ser conveniente utilizar un circuito que realice la conversión a este tipo de señal.

Así, por ejemplo, en sensores resistivos, es normal que se utilice un circuito de puente para convertir el valor de resistencia a voltaje, o si el sensor es de tipo capacitivo o inductivo y se monta como parte de un oscilador, la magnitud de salida es en frecuencia y debe utilizarse un convertidor de frecuencia a voltaje.

- Para incrementar la relación señal-ruido hasta niveles adecuados. En este caso, el acondicionamiento implica:
 - Amplificar las señales hasta niveles que sean muy superiores al nivel de ruido eléctrico aleatorio.
 - Filtrar las señales para eliminar ruido introducido por interferencia eléctrica.
- Si el sensor presenta una respuesta no lineal a los cambios de la magnitud física medida. En este caso, con el fin de tener una medida suficientemente significativa, hay que realizar un proceso de linealización mediante circuitos específicos como con el uso de amplificadores operacionales. [23]

Por su parte, los sistemas de procesamiento de señales son aquellas plataformas en donde se interpretan las señales de entrada, que son las señales que ya se acondicionaron, estos sistemas pueden ser microprocesadores o microcontroladores.

2.3.6. Sistemas de control automático

Un sistema de control automático puede definirse como la unión de subsistemas y procesos que tienen el fin de controlar las salidas de los procesos. Un ejemplo de estos sistemas que se usa en la vida cotidiana de toda persona puede ser un horno, el cual produce calor como resultado del flujo de combustible. En este proceso los subsistemas, llamados válvulas de combustible y actuadores de válvulas de combustible, se usan para regular la temperatura de una habitación al controlar la salida de calor del horno. En su forma más sencilla, un sistema de control produce

una salida o respuesta para una entrada o estímulo dado, como se muestra en la Figura 35. [24]

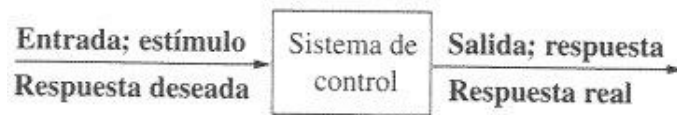


Figura 35. Forma básica de un sistema de control. *Fuente: Sistemas de Control para Ingeniería de Norman Nise.*

Los sistemas de control pueden dividirse en dos tipos: en lazo abierto (no retroalimentados) o en lazo cerrado (retroalimentados). El primer tipo de control, el de lazo abierto sólo tiene dos elementos, el controlador y el proceso controlado, en este caso, una señal de entrada o comando se aplica al controlador, cuya salida actúa como señal actuante; la señal actuante controla el proceso controlado de tal forma que la variable controlada se desempeñe de acuerdo a los estándares preestablecidos. En los casos más simples, el controlador puede ser un amplificador, unión mecánica, filtro u otro elemento de control. En los casos más complejos, el controlador puede ser una computadora tal como un microcontrolador.

Lo que hace falta en el sistema de control de lazo abierto para que sea más exacto y adaptable es una retroalimentación desde la salida hacia la entrada del sistema (Figura 36), esto con la finalidad de conocer el error del estado actual del controlador con respecto a la señal que se esperaba, haciendo que el controlador pueda provocar cada vez un error menor, este tipo de sistemas son los de lazo cerrado. [25]



Figura 36. Diagrama de bloques de sistema en lazo cerrado. *Fuente: Research Gate.*

2.3.7. Protocolos de comunicación serial

En algunas ocasiones el uso de un solo dispositivo para controlar un mecanismo o algún sistema no basta, ya sea porque se tiene que extender por dos o más estaciones el control, esto quiere decir, que un controlador principal tiene que mandar señales a otros secundarios y estos a su vez realicen otros efectos en sus respectivas estaciones; o bien, se necesita comunicar dos o más elementos donde uno de ellos (el principal) es un controlador y los secundarios pueden ser indicadores o actuadores y por medio de la comunicación serial se les envía directamente la señal de control. Para el proyecto actual, el enfoque es sobre el primero de los casos descritos, y a continuación se presenta uno de los protocolos más usuales de comunicación y que a su vez es el empleado en este trabajo, el UART.

2.3.7.1. UART

Las siglas de UART significan Receptor-Transmisor Asíncrono Universal (del inglés Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). Este es un protocolo de comunicación de hardware y la característica de asíncrono hace referencia a que no necesita de una señal de reloj para sincronizar los bits de salida del dispositivo transmisor al receptor.

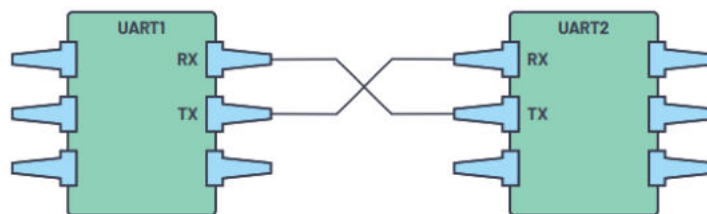


Figura 37. Diagrama de conexión del protocolo UART. *Fuente: UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter.*

Este protocolo de comunicación de hardware es ampliamente utilizado por sistemas embebidos, microcontroladores y computadoras para lograr comunicación entre dos dispositivos, utiliza sólo dos cables para transmitir y recibir datos, que son

los marcados como RX (Receptor) y TX (Transmisor) en el diagrama mostrado en la Figura 37, lo que lo hace sumamente cómodo para trabajar con menos cableado en cuanto a la comunicación, el conector que comúnmente se utiliza para este tipo de comunicación es el RS-232.

La manera de transmisión de datos es en manera de paquetes desde el transmisor hacia el receptor a través de las líneas de hardware correspondientes. Un paquete consiste en un bit de inicio, el dato transmitido, un bit de paridad y bits de finalización.

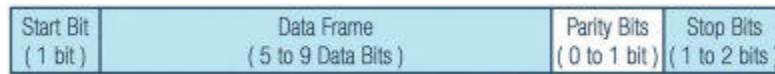


Figura 38. Arquitectura de un paquete en UART. *Fuente: UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter.*

Donde el bit de inicio, como su nombre lo indica, abre la comunicación, cuando no existe comunicación iniciada, este bit está en bajo, pero cuando se da la transición de bajo a alto, es cuando se leen los datos del data frame y se envían hacia el receptor, el data frame, es simplemente el dato que se requiere mandar de un dispositivo al otro.

El bit de paridad es aquél que nos indicará si el dato enviado efectivamente llegó de manera coherente al segundo dispositivo, pues este puede ser modificado por la radiación electromagnética o largas distancias de transmisión. Finalmente, los bits de finalización son aquellos que cierran la comunicación a partir del cambio de estado de estos de bajo a alto. [26]

Capítulo 3. Planteamiento del problema

3.1. Identificación

La investigación radioastronómica normalmente se hace empleando antenas parabólicas, sin embargo, es posible utilizar otro tipo de antenas, como las Yagi-Uda, debido a su asequibilidad y utilidad en estas aplicaciones. Sin embargo, para usar todo tipo de antenas se necesita contar con estructuras que sirvan como monturas para la manipulación y orientación de estas.

En el Instituto de Radioastronomía y Astrofísica de la UNAM Morelia se hacen observaciones radioastronómicas usando distintos tipos de antenas, entre ellos las Yagi-Uda, y al tratarse de aplicaciones académicas, resulta importante contar con monturas de bajo costo, que sea posible ser construida en el mismo instituto y que faciliten su uso entre los estudiantes e investigadores, mediante la automatización de la misma.

3.2. Justificación

El tipo de antena a ser utilizada en el presente trabajo es una opción asequible y útil para detectar señales en el espectro del radio para aplicaciones académicas y que no demandan las características de un plato parabólico, pero una limitante es la inexistencia de monturas especializadas para el control de la posición de este tipo de antenas, como sí las hay para las parabólicas, pero que no son adaptables a las Yagi-Uda, por lo que resulta de gran beneficio contar con un sistema hecho a medida con las especificaciones para el propósito deseado, así como también contar con los planos y recursos necesarios para replicar el modelo y para poder hacer actualizaciones del sistema.

3.3. Alcance

En el presente trabajo se abarcará el diseño mecánico y el del sistema de control

automático de la montura, tomando en cuenta las contribuciones de torque que existen con base en los movimientos y pesos de los elementos, considerando los pesos de acuerdo a las densidades de los materiales usados.

Se elegirán los materiales idóneos para la aplicación y también los elementos a usar, tales como los motores con las características necesarias para provocar el movimiento de las antenas y las dimensiones necesarias de la montura; asimismo se elige una plataforma de procesamiento de datos adecuada y se desarrolla un sistema de control automático para el control del mecanismo, la validación del sistema es a través de simulaciones y en los resultados se expondrán los planos del ensamble de la montura y las conexiones eléctricas necesarias para su funcionamiento, así como los códigos cargados en los microcontroladores para el control del motor que será la fuente de movimiento. Se deja como trabajo a futuro la construcción física del mecanismo, mismo que será sustentado por los resultados obtenidos aquí.

Capítulo 4. Objetivos

4.1. Objetivo general.

Diseñar la estructura mecánica e implementar ingeniería de control automático para un sistema mecatrónico capaz de elevar en coordenadas celestes horizontales (medida angular) un arreglo de antenas Yagi-Uda, a partir de la medida ingresada por el usuario, con la finalidad de ser usado como elemento para la creación de un radiointerferómetro con aplicaciones radioastronómicas a un nivel didáctico.

4.2. Objetivos específicos.

- Diseñar el mecanismo de movimiento en un eje por medio de diseño mecánico asistido por computadora (CAD).
- Analizar las relaciones mecánicas de los elementos del sistema para elegir el motor con las características necesarias.
- Definir los elementos necesarios para la construcción del mecanismo, como tubos, ejes, motores, drivers y engranajes.
- Elegir la plataforma de control y procesamiento de datos.
- Diseñar el sistema de control automático de la posición angular deseada de las antenas.
- Simular y validar el sistema mecánico y el de control para descartar posibles errores.

Capítulo 5. Metodología

En el presente trabajo se desarrolló el diseño de una montura automatizada para un par de antenas *Yagi-Uda*, esto con la intención de ser utilizadas como una alternativa a bajo costo y de construcción a medida para aplicaciones académicas de radioastronomía en el Instituto de Radioastronomía y Astrofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México campus Morelia. Se desarrollaron varios modelos de monturas hechos con ayuda de un software de diseño mecánico, una con movimiento *altazimutal* (que combina el movimiento azimutal y el altitudinal) y otra solo con movimiento altitudinal (véase la sección 2.1.3), así como considerando diferentes materiales. Tales modelos se describen a continuación, y también las consideraciones mecánicas, como las tomadas en cuenta para la elección del motor a utilizar. Finalmente se muestra el desarrollo de un sistema de control automático proporcional, el cual, a partir de una entrada de datos, el cual es el ángulo deseado, se procesa la información en un microcontrolador con la retroalimentación de un sensor que mide la posición angular actual de las antenas y a partir de esto envía las señales correspondientes a un controlador de motor de pasos para que este a su vez se mueva, posicionando en el lugar angular deseado a las antenas.

5.1. Desarrollo del sistema mecánico

El diseño mecánico se desarrolló empleando el software SolidWorks, en el que, con ayuda del análisis de los movimientos, se crearon las piezas necesarias para unir las en un ensamblaje a fin de crear la actuación deseada. La validación de estos movimientos se desarrolló bajo animaciones del sistema y exámenes de colisiones aplicados a los movimientos de los modelos.

Las piezas cruciales para la montura son: las bases para atornillar las antenas, el eje sobre el que estarán montadas las antenas, mismo que será el que girará para lograr el movimiento altitudinal de las mismas; la montura en sí misma que contenga una plataforma útil para contener en ella el o los motores que se utilizarán para el movimiento, así como el sistema de control y que en general, todo

esto se acople a la necesidad de estar en un mástil a una altura considerable con respecto al suelo.

Teniendo en cuenta todos estos factores, se llegó a un primer boceto del sistema, mostrado en la Figura 39.

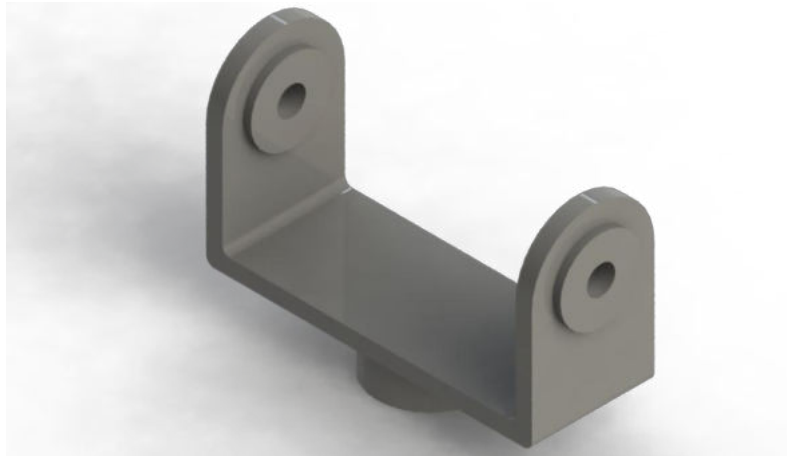


Figura 39. Boceto primario de la montura para antenas Yagi-Uda.

En este modelo todavía no se consideran materiales ni tamaños, sólo los aspectos esenciales para la creación del movimiento y funcionalidad de la montura. En las próximas secciones se profundiza en la elección de los elementos más puntuales de los modelos para cada tipo de movimientos (altazimutal y altitudinal).

5.1.1. Modelo propuesto para movimiento altazimutal

Para el movimiento altazimutal se hizo el diseño que se presenta en la Figura 40, adaptando el boceto de la Figura 39, en este diseño se agregan dos espacios, para colocar en cada uno de ellos un motor para cada movimiento.

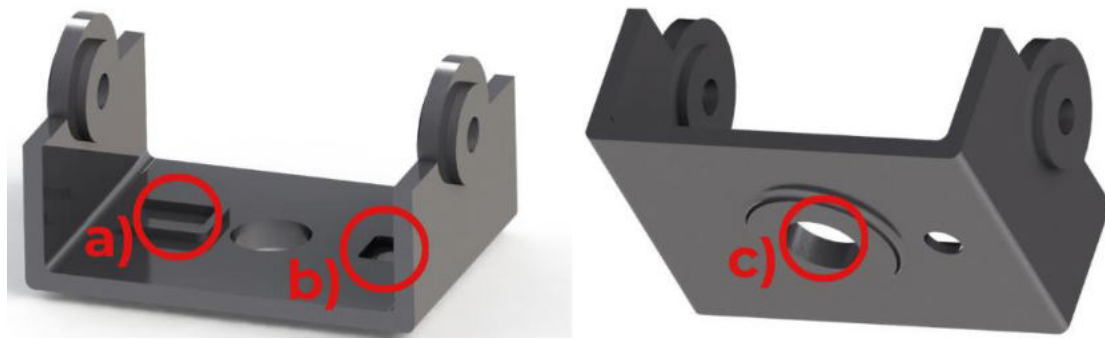


Figura 40. Diseño de montura para movimiento altazimutal.

El círculo *a)* corresponde al espacio para el motor que genera el movimiento azimutal, mientras que el *b)* es el encargado del altitudinal. Finalmente, el indicado por el círculo *c)* es el orificio destinado al mástil. Para una mejor visualización de medidas y perspectivas se muestra en la Figura 41 el plano en el que se describen todas estas características del modelo.

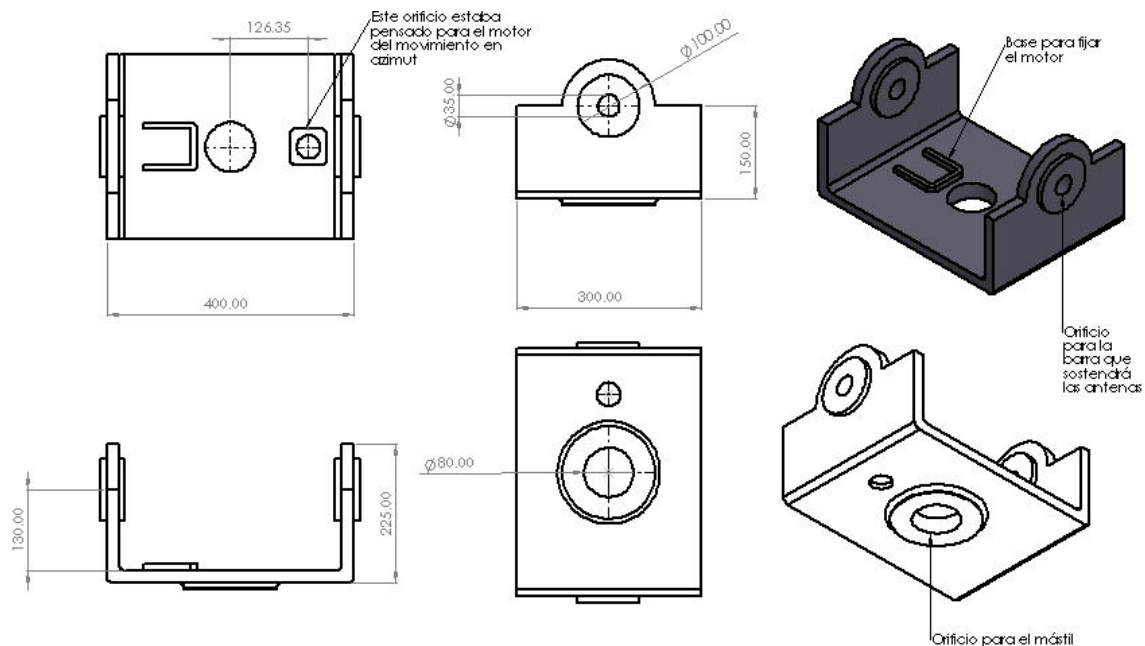


Figura 41. Plano del modelo CAD de la montura altazimutal.

Para este modelo se eligió como material de construcción el tereftalato de polietileno modificado con glicol, también conocido como PETG, utilizando como método de construcción la impresión en 3D. El material fue elegido debido a que en

comparación de otros como el PLA y ABS que son los más comunes para aplicaciones de prototipado rápido, el PETG cuenta con características que lo posicionan entre el PLA y el ABS de manera que las mejores características de cada uno, como la resistencia, temperatura de fundición y nivel de toxicidad se unen en el PETG.

A continuación, se muestra una tabla comparativa entre estos tres materiales, a partir de la cual se podrán ver los beneficios y debilidades de cada uno.

Características	Material		
	PLA	ABS	PETG
	175 – 200 °C	230 – 250 °C	230 – 265 °C
Temperatura de extrusión	Sin necesidad de calentar la cama de impresión	Con cama de impresión entre 90 – 110 °C	Sin necesidad de calentar la cama de impresión
Densidad	1.24 gr/cm ²	1.04 gr/cm ²	1.27 gr/cm ²
Resistencia y durabilidad	Media – Baja	Media – Alta	Media – Alta
Toxicidad y olor	Poco olor y ninguna toxicidad	Olor considerable y cierta toxicidad	No tiene olor ni toxicidad
Desventajas	Tiende a deformarse rápidamente en situaciones de mucho calor	Se liberan humos tóxicos al imprimirse	Es más difícil de imprimir debido a la adherencia a la cama de impresión

Tabla 7. Tabla comparativa entre materiales de impresión PLA vs. ABS vs. PETG. *Con información de: AII3DP.*

El diseño ya ensamblado con todos los elementos que lo componen, como los motores y el sistema de acoplamiento de engranes es el mostrado en la Figura 42. Una precisión importante es conocer la relación de engranes que hay en el sistema; ya que la altura del motor es de 57.3 mm (véase el anexo A) y la distancia vertical de la superficie de la plataforma al centro del orificio para el eje de montaje de las antenas es de 130 mm (véase Figura 41), se puede calcular que del centro del eje del motor (que se encuentra en medio del cuerpo del motor) al centro del eje de las antenas es de 101.35 mm y considerando que el piñón (el engrane conductor) es de 22 dientes, para alcanzar la altura requerida se necesita un engrane conducido de 79 dientes, considerando los engranes con un módulo 2. Esto nos da una relación de engranes de 3.59, por lo tanto, la velocidad del motor se verá reducida en esa proporción, así como también el torque se verá incrementado en la misma proporción. Por su parte, el engrane conducido en la parte de abajo, que hace posible el movimiento azimutal tiene una relación de engranes de 4.73, debido a que, como se indica en el plano, la distancia entre el centro del orificio para el motor y el del mástil (donde está el engrane más grande) es de 126.35 mm, y como el piñón de ese motor también es de 22 dientes, el engrane grande tiene que tener 104 dientes.

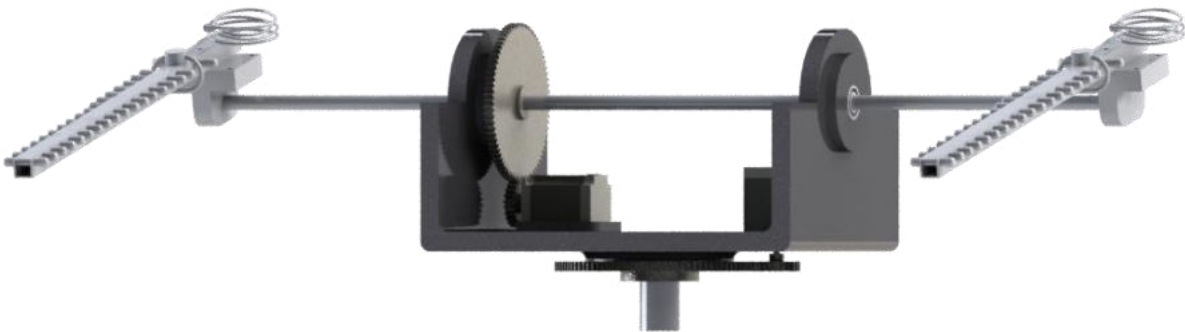


Figura 42. Ensamblaje del modelo altazimutal.

El movimiento altitudinal, como se puede ver fácilmente en la Figura 42, se logra mediante la transmisión de engranes, del piñón al engrane más grande, teniendo en cuenta que este último se encuentra fijo con la barra que funge como

montaje para las antenas, haciendo que tanto el sentido como el torque con que se mueve el engrane conducido sea el mismo en las antenas.

Para el movimiento azimutal, que se ilustra en la Figura 43 es un poco más complejo, pues, el motor se encuentra orientado hacia la parte de abajo para poder acoplar los dos engranes, este movimiento se basa en que el engrane más grande se encuentra fijo al mástil y el que hace el movimiento es el piñón conectado al eje del motor, entonces la acción que ejerce este es trasladarse a través del engrane más grande.



Figura 43. Movimiento azimutal del sistema.

Este sistema es de gran utilidad en aplicaciones donde se requiere posicionar exactamente en las dos coordenadas celestes horizontales, sin embargo, a niveles del sistema de control sería más complicado, debido a que se tienen que controlar independientemente la posición de dos motores.

5.1.2. Modelos propuestos para movimiento altitudinal

Existen ocasiones en las que el movimiento azimutal no resulta especialmente trascendente a la hora de orientar las antenas y sólo es necesario el altitudinal. En esta sección se tratará el mecanismo que se enfoca en este tipo de movimiento únicamente. La principal ventaja de este sobre el altazimutal es que, si la aplicación no requiere el movimiento azimutal, el mecanismo sólo necesitará un motor,

facilitando el control de movimiento. A continuación, se presenta el mecanismo propuesto para este movimiento.

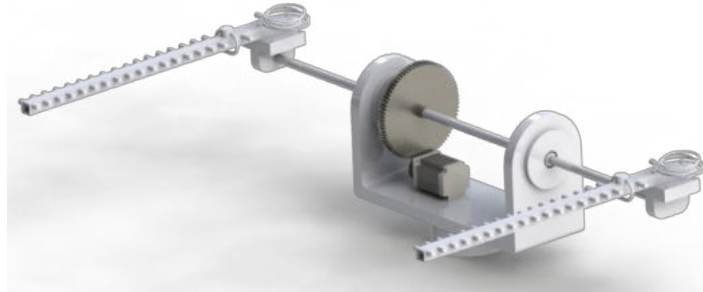


Figura 44. Modelo inicial del mecanismo con movimiento altitudinal.

En la Figura 44 se muestra el diseño inicial para el mecanismo altitudinal. Como se ve, este está basado directamente en el de la Figura 39, agregándole el elemento del motor, los engranes de transmisión de movimiento, el eje de montura de las antenas y las antenas mismas, la relación de engranes es el mismo que el del mecanismo altazimutal y el material de construcción también es PETG.

Sin embargo, con el mecanismo de la Figura 44, e incluso con el de la Figura 42, el hecho de estar creados con PETG, es decir, con un tipo de plástico, a la larga podría traer consigo algunos problemas aunque el material sea resistente, debido a que al estar a la intemperie durante mucho tiempo, añadiéndole el peso que debería estar soportando haría que la estructura tenga altas probabilidades de degradación, razón por la que conviene sustituir tal material por otros más duraderos y resistentes, como el acero o el aluminio, disminuyendo lo mayor posible el uso de plástico en su construcción.

En la Figura 45 se muestra un modelo propuesto que contiene metal como material principal para la estructura que soporta el eje de la montura de las antenas, así como la parte que se conecta directamente al mástil, en este modelo sólo hay dos piezas creadas con PETG, la plataforma sobre la que van puestos los elementos de control (driver y circuito de control) y el motor, y los elementos que soportan al eje de la montura de las antenas.

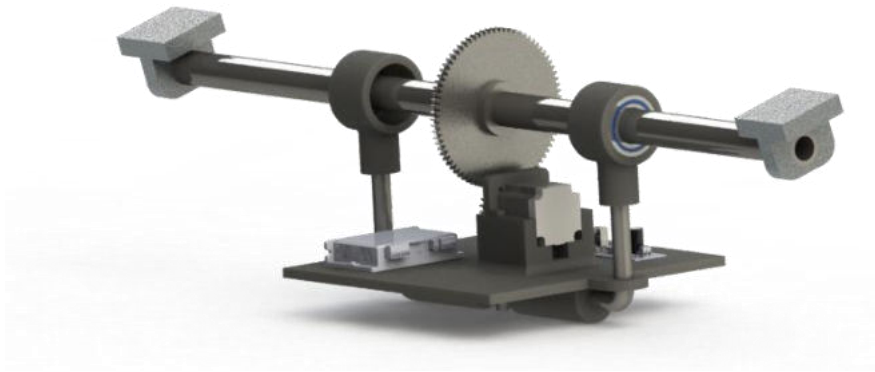


Figura 45. Montura altitudinal empleando metales para su construcción.

Una ventaja de este modelo también es que si en lugar de elegirse PETG o algún otro polímero como material de construcción para las partes anteriormente mencionadas, podría fácilmente maquinarse con ayuda de una máquina de control numérico (torno CNC) en algún material también metálico, como el aluminio, sin tener que utilizar una gran cantidad de este material.

Una precisión importante a hacer es que la plataforma de soporte para el motor y los elementos de control no tiene contribución a la hora de soportar el peso del mecanismo, pues, como se ve en la Figura 46, tal plataforma está siendo soportada por los tubos de la estructura. Además, la forma completa de la montura ayuda a que los tubos y cada elemento se mantenga en su lugar sin moverse, a excepción, claro está, del eje de las antenas, el cual atraviesa dos rodamientos, uno de cada extremo y ayuda a que este rote de acuerdo a la rotación transferida al engrane conducido.



Figura 46. Vista inferior de la montura altitudinal.

Hasta el momento se ha hablado de esta montura sólo a nivel general, tanto en su estructura, como en su funcionamiento y ventajas, sin embargo, al ser esta la que más elementos contiene, resulta a su vez, ser también la que más explicación requiere, por esta razón la próxima sección se enfocará en la profundización de cada elemento que compone al modelo, junto con los planos correspondientes y las medidas utilizadas.

5.1.3. Estudios mecánicos y de colisiones

Con la finalidad de validar totalmente y conocer las características específicas del modelo que se presenta se hicieron exámenes mecánicos virtuales al ensamblaje del sistema. Por un lado, un análisis de interferencias mecánicas, el cual se muestra en la Figura 47 y donde se puede observar que no hay interferencias, lo que nos dice que, entonces, los movimientos del mecanismo están totalmente libres a la manera en que nos es necesario.

En caso de tener interferencias lo que nos querría decir es que algunos elementos o bien, chocan entre ellos haciendo que no se puedan mover como es debido, o que se traslapan un elemento con otro, imposibilitando su construcción en físico.

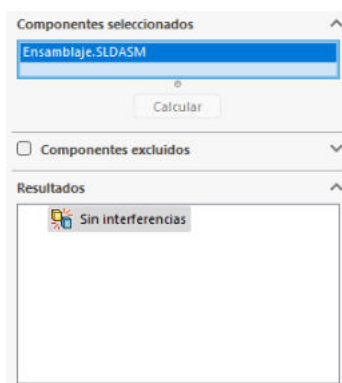


Figura 47. Análisis de interferencias mecánicas del sistema.

Por otro lado, se llevaron a cabo análisis estructurales, de los que podemos sacar información relevante con respecto al modelo, en este caso, se hicieron los

análisis a la plataforma de la montura, en las siguientes imágenes se puede observar que le hacen falta dos partes, esto es debido a que los salientes con los que cuenta son los lugares donde irán los elementos como el driver del motor y el circuito de control, los datos de la masa de carga para analizar el modelo fue de aproximadamente 200 N.

En la Figura 48 se muestran las regiones en las que el modelo experimenta mayor estrés, entendiéndose como mayor o menor la escala de colores que está del lado izquierdo de la imagen.

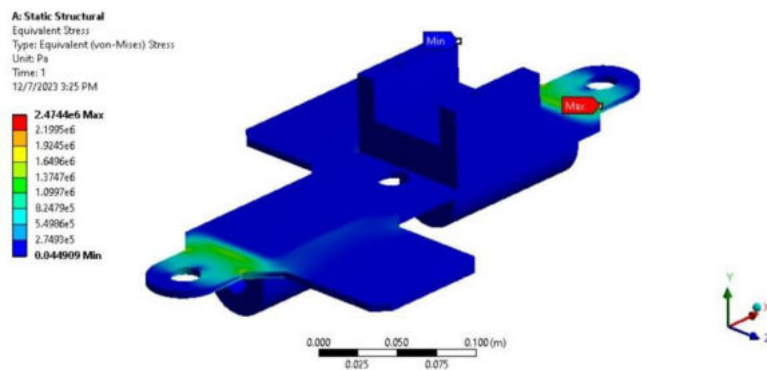


Figura 48. Análisis estructural de estrés.

Por su parte, en la Figura 49 se muestra la deformación que presenta el modelo en presencia del peso aplicado, como se puede ver, prácticamente en su totalidad no existen deformaciones críticas. Estos datos son para la pieza creada con PETG.

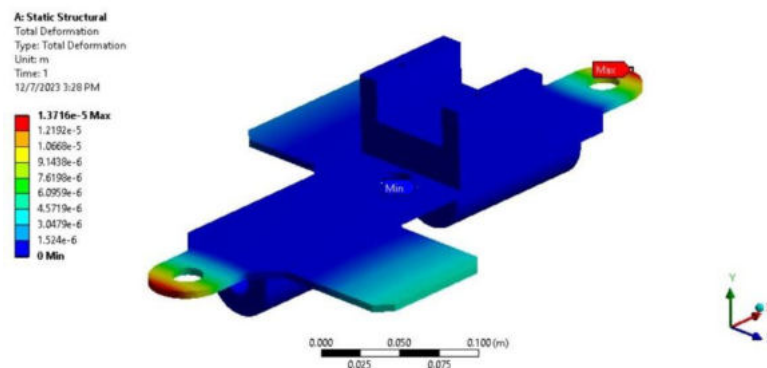


Figura 49. Análisis estructural de deformación.

5.1.4. Comparación de modelos de monturas

Para tener una visión más general con respecto a los tres modelos de mecanismo presentados en esta sección, se muestra en la Tabla 8 un resumen de algunos datos comparativos de cada modelo, esto con la finalidad de ver las diferencias y semejanzas entre cada uno.

La tabla puede ayudar a elegir la montura que mejor se acople a las necesidades de las aplicaciones para las que la queremos.

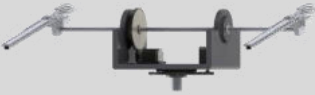
<i>Características</i>	<i>Modelos</i>		
			
Material	PETG	PETG	Metal
Demanda de equipo para la fabricación	Media	Media	Alta
Soporte para cargas de alto peso	Medio	Medio	Alto
Ejes de movimiento	2 (Altazimutal)	1 (Altitudinal)	1 (Altitudinal)
Dimensiones	403.95 × 300 × 249.47 (mm)	400 × 300 × 225 (mm)	400 × 150 × 225 (mm)

Tabla 8. Cuadro comparativo de características entre los tres modelos de monturas.

5.1.5. Elección del acoplamiento de movimiento y del motor de pasos

Algo importante a mencionar con respecto al diseño de la montura es, tanto las razones para decidir un cierto tipo de acoplamiento de movimiento con las especificaciones que tiene, así como también las razones para elegir las características, especialmente la especificación de par de cierto motor de pasos y por qué se terminó eligiendo el modelo comercial que se propone utilizar, en esta sección se tratarán estos temas.

5.1.6.1. Acoplamiento de movimiento

El tipo de movimiento que se quiere alcanzar a partir del movimiento rotacional del eje del motor, es, también rotacional, pero con un torque superior y que la relación de engranajes también sea la adecuada para que la distancia entre los centros de los engranes sea la necesaria para poder acoplar el eje de las antenas y el del motor.

A partir de los planos vemos que la distancia entre los centros de los ejes es de 100.46 mm, que es aproximadamente 100 mm, tomando en cuenta valores enteros, y ya que el módulo de los engranes utilizados es 2, entonces sabemos que la suma de la cantidad de dientes de cada engrane (el piñón y el engrane conducido) debe dar como resultado 100 (véase *Ecuación 5*), la elección es 22 y 78 dientes respectivamente para obtener una relación de engranes de ~ 3.6 (véase *Ecuación 2*), no se eligió la configuración de 20 y 80 con una relación de engranes de 4 debido a que es común que los motores de pasos comerciales tengan un tamaño de paso de 1.9° , que en configuración de medio paso se reduciría a 0.9° y ya con la relación de engranes, sería la misma con respecto al desplazamiento angular, por tal motivo con una relación de 3.6 el desplazamiento sería de 0.25° , valor que es más fácilmente manipulable en comparación de los 0.225° de la otra configuración, estos valores se obtienen a partir de la *Ecuación 2*, donde el movimiento angular también se ve afectado por la relación mecánica, es decir, que con un paso del motor de 0.9° por paso y una relación de 3.6, el desplazamiento final será de $\frac{0.9^\circ}{3.6} = 0.25^\circ$.

Con este acoplamiento de movimiento además de hacer más fino el desplazamiento angular del motor también eleva en la misma proporción el par motor del elemento que genera el movimiento rotacional, es decir, del motor, haciendo posible que se pueda mover una carga mucho más grande que si no tuviera ningún tipo de acoplamiento.

5.1.6.2. Motor de pasos

Para determinar las características que tiene que cumplir el motor de pasos elegido para el sistema se hicieron varios cálculos considerando los torques producidos por cada uno de los elementos, considerando dimensiones y peso de los elementos

Para comenzar el análisis tomemos como punto de partida el diagrama que se muestra en la Figura 50, en donde se aprecian tres torques, uno de ellos con sentido contrario al de los otros dos, estos interactúan entre sí contribuyendo a un torque total de los tres. Asignémosle valores a cada uno de los torques para ilustrarlo de mejor manera.

Consideremos que el torque *a)* tiene unos 30 Nm, para el *b)* 70 Nm y finalmente el *c)* de 40 Nm, con estos valores podemos decir que el sistema completo se encuentra en equilibrio, debido a que la suma de torques da como resultado cero, ya que dos de ellas suman 70 Nm y van en sentido opuesto al torque de 70 Nm, cancelándose entre sí.

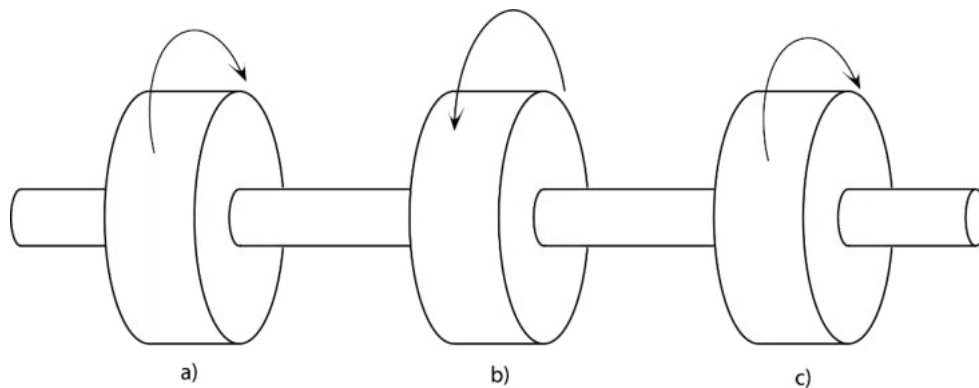


Figura 50. Bosquejo de contribución de torques a través de un eje.

El diagrama anterior nos sirve para tener una idea más clara a la hora de tomar en cuenta la contribución de torques de cada uno de los elementos que conforman el sistema, esto es, el eje y las dos antenas. Para calcular el torque producido por las antenas se consideró el diagrama de la Figura 51.

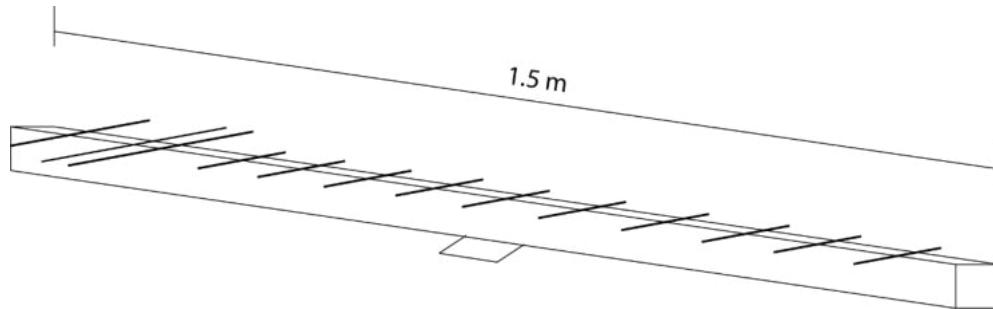


Figura 51. Bosquejo de la estructura de las antenas.

Con esta figura tenemos el dato de que tienen las antenas una longitud de 1.5 m, pero como las antenas estarían sujetadas de la parte media del cuerpo de las mismas consideramos que el brazo de palanca tendrá una longitud de la mitad del total de la antena, es decir, 0.75 m. Además, sabemos que el peso aproximado de cada antena es de 1 kg, por lo que podemos calcular que el peso de cada una de las antenas es de 9.81 N, sabiendo esto tenemos los datos suficientes para poder calcular el momento de torsión de la antena, el cual es de 7.36 Nm, debido a que

$$\tau = W * d = (9.81 \text{ Nm})(0.75 \text{ m}) = 7.36 \text{ Nm} \quad (7)$$

Sin embargo, sabemos que el sistema se compone de dos antenas, por lo que la contribución de ambas será de 14.72 Nm, que es el doble que la contribución de una sola antena.

Otro aspecto que se debe considerar es que no sólo son las antenas las que se deben poder mover con el motor, sino también el eje, el cual puede estar construido en aluminio o en acero, para esto se consideraron los dos materiales, los cuales tienen una densidad de 2.7 gr/cm^3 y 8.03 gr/cm^3 respectivamente, y tomando en consideración que sea un tubo no hueco de 3.5 cm de diámetro de sección transversal con una longitud de un metro se tiene que la masa para cada

material es de 2.6 kg para el de aluminio y 7.7 kg para el de acero, motivo por el que se obtiene lo siguiente:

$$\tau_{Al} = (25.5 \text{ N})(0.0175 \text{ m}) = 0.44625 \text{ Nm} \quad (8)$$

$$\tau_{Acero} = (75.54 \text{ N})(0.015 \text{ m}) = 1.32 \text{ Nm} \quad (9)$$

Con estos datos podemos concluir un intervalo de torques a considerar que debe ser capaz de mover el motor, tal intervalo es $\tau_{necesario} = (15.17, 16.04) \text{ Nm}$, sin embargo, por seguridad y garantizar de que, en efecto, el motor pueda mover la carga tomaremos como torque necesario sin acoplamiento de movimiento el doble del torque mayor, esto sería $\tau = 32.08 \text{ Nm}$. Considerando el acoplamiento de movimiento mediante engranes, el cual tiene un módulo de 3.6, el torque necesario del motor es de $\tau_{motor} = 8.9 \text{ Nm}$.

El motor propuesto para esta aplicación fue el modelo 23H530-28045 de la marca Stepper Online, el cual genera un par máximo de $\sim 18 \text{ Nm}$ a una velocidad de 300 r.p.m (véase el Anexo B), este motor resulta una buena opción para emplearse, debido a que, como se puede apreciar, a una velocidad buena para la aplicación de nuestro proyecto, este puede generar el doble de par necesario para mover los elementos del sistema, y de hecho, hasta una velocidad de aproximadamente 70 r.p.m todavía es capaz de mover el sistema con un par cercano a los 8.9 Nm que se concluyeron anteriormente.

5.2. Desarrollo del sistema de control

Para el presente proyecto debe ser posible controlar, mediante una entrada de datos el mecanismo descrito en la sección anterior, es por esto que se desarrolló un sistema de control para el mecanismo, el cual está basado en el uso de un microcontrolador PIC16F887 de *Microchip*, en el que están cargadas las instrucciones necesarias para lograr el movimiento del motor que será la fuente de movimiento del mecanismo.

Para empezar la creación del sistema de movimiento se comenzó por hacer que el motor de pasos pueda moverse sin el microcontrolador, es decir, sólo con la entrada manual de las secuencias para la activación de bobinas, para esto se hizo empleo de dos puentes H para cada par de bobinas del motor, como se muestra en la Figura 52.

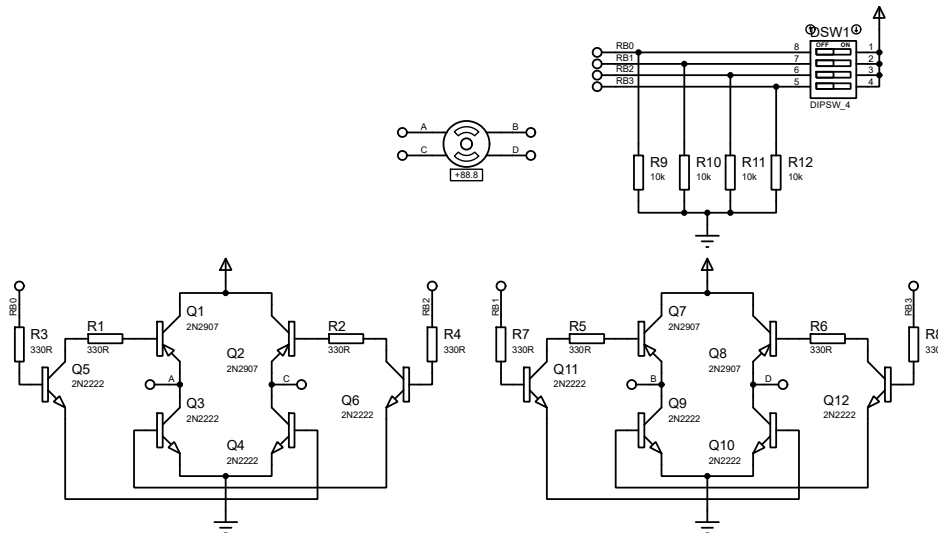


Figura 52. Control manual de un motor de pasos.

De esta manera, a partir de la combinación ingresada mediante los interruptores de las entradas *RB0*, *RB1*, *RB2* y *RB3* se activan las bobinas del motor de pasos y producen el movimiento correspondiente, tales combinaciones se pueden consultar en la sección 2.3.3.1.1. Control de un motor de pasos del marco teórico de este trabajo.

Seguido a lo anterior se introdujo entonces el microcontrolador para que este genere la secuencia de pasos correspondiente, exactamente la configuración que se está siguiendo es la de medio paso. El circuito formado ahora tiene como entrada dos switches, uno para que cuando esté en alto gire el eje del motor en sentido horario, mientras esté apagado el contrario, y viceversa, cuando el otro está en alto y el primero en bajo se moverá en sentido antihorario. La Figura 53 ilustra lo mencionado de una mejor manera.

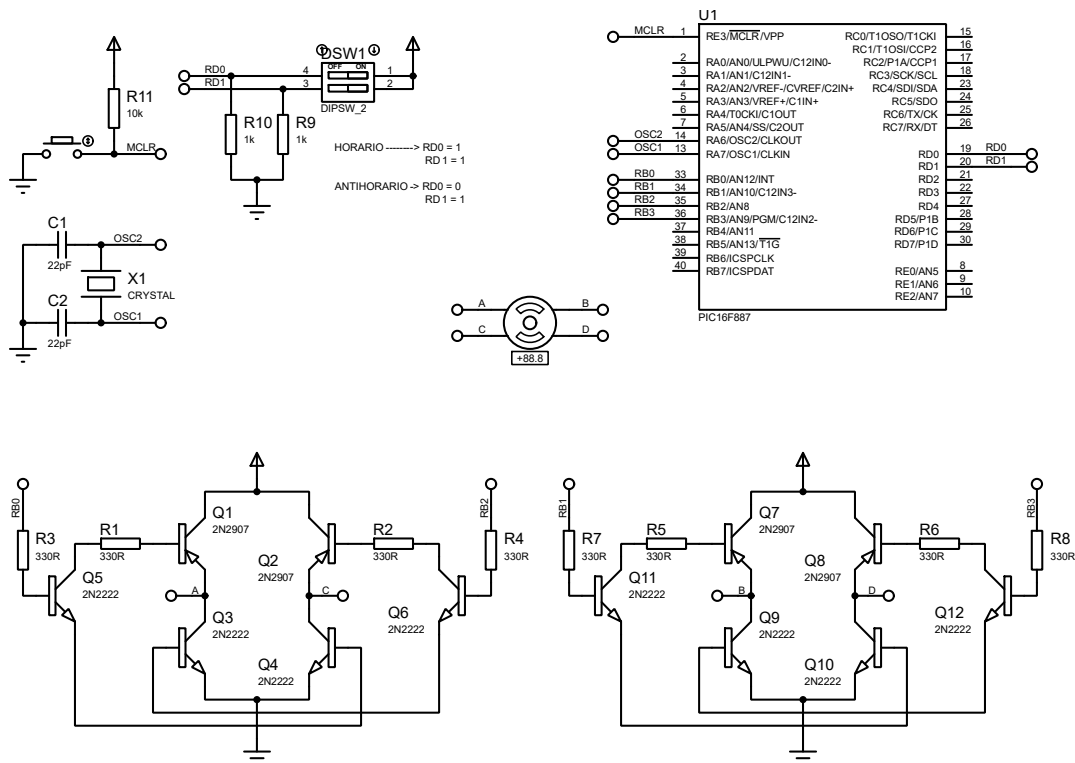


Figura 53. Control de dirección del motor de pasos usando el PIC16F887.

En el Anexo C se muestra el código de programación cargado al microcontrolador, en el que a partir de la entrada que se tenga en el puerto D, envía las señales correspondientes a la secuencia de pasos para el motor por el puerto B.

Una vez teniendo listos los aspectos primordiales del programa para el movimiento del sistema, lo cual es el movimiento del eje del motor y que a su vez, este mismo pueda moverse rotacionalmente tanto en un sentido como en el contrario, se pasó a la creación de un programa capaz de contar los pasos y que los muestra en una pantalla LCD, dentro de este despliegue de datos también se encuentra la conversión de cada paso en el desplazamiento angular correspondiente, en la Figura 54 se muestra el circuito con la pantalla LCD, así como con los controles de cambio de movimiento y para detener el avance del motor, por otra parte, en el Anexo D se encuentra el código de programación cargado al microcontrolador y que ambas partes (el circuito y el código) serán explicados a continuación.

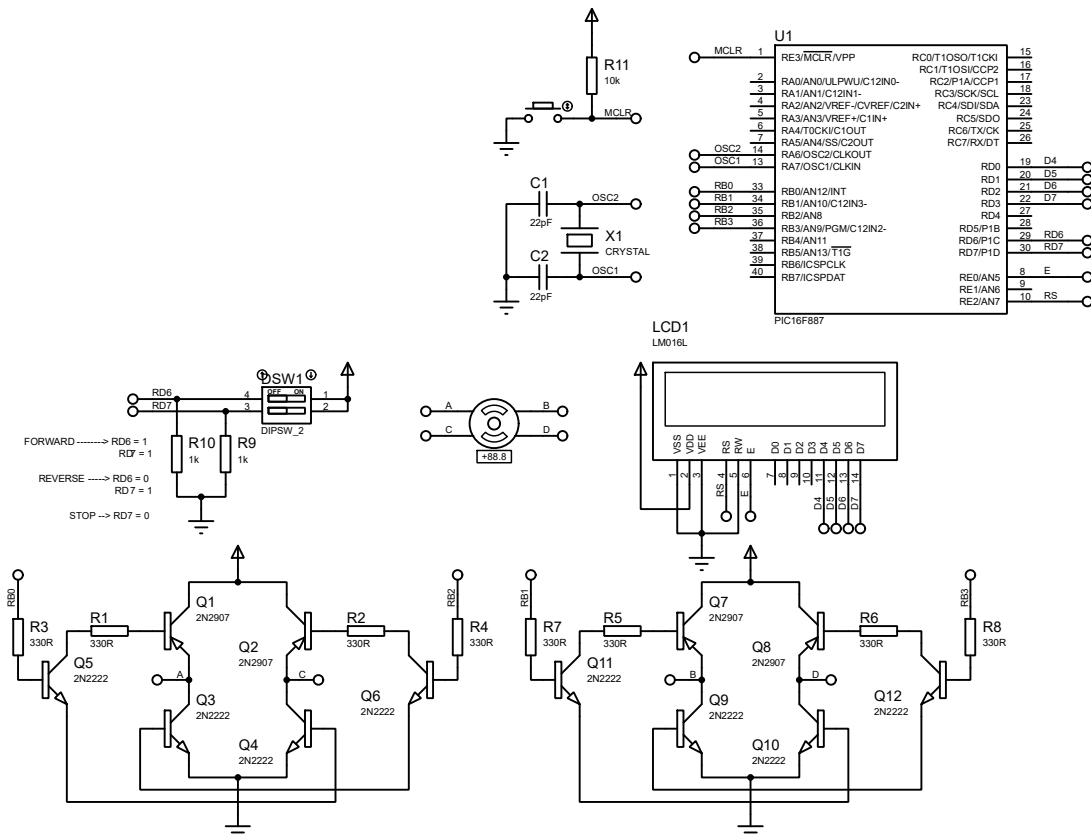


Figura 54. Control de sentido, paro y conteo de pasos del motor.

La diferencia sustancial que existe en el circuito de la Figura 54 con respecto al de la Figura 53 es que en este se añade una pantalla LCD en la que se muestra el número de pasos que se han dado por el motor, así como también la conversión de los pasos en lo equivalente en movimiento angular. Al igual que en el circuito anterior, sólo hay dos interruptores que controlan el movimiento del motor, pero en este caso, no representan uno para el movimiento horario y otro para el movimiento antihorario, en este caso uno de ellos es para este fin, es decir, cuando está en alto se refiere al sentido horario, mientras que se encuentra en bajo es el sentido antihorario y sólo se hacen estos movimientos en caso de que el otro switch se encuentre en alto, pues de lo contrario no se enviará señal alguna para que el motor se mueva, manteniéndolo en estado de paro. Es de esta manera que se elegirá en este circuito el ángulo deseado, pues una vez que se llegue al ángulo deseado el usuario encenderá el switch de paro y se mantendrá en ese estado, y si se requiere aumentar o disminuir, basta con volver a ponerlo en alto.

Sin embargo, este sistema de posicionamiento, aunque es funcional, no resulta del todo cómodo al momento de usarse, pero funciona como un acercamiento al sistema de control que se requiere. Hasta este momento, el control de la posición angular se está llevando a cabo en lazo abierto, a continuación, se presenta el desarrollo para aplicar este sistema a un control en lazo cerrado.

La primera característica que debe tener un sistema en lazo cerrado es, justamente, el elemento de retroalimentación que cierra el lazo, el cual, en este caso será un sensor potenciométrico que dará como resultado el valor angular en que se encuentran las antenas. Además, como el controlador del motor se encontrará a una altura considerable, se necesita una solución para que el establecimiento del set point se encuentre a una altura aceptable para que una persona al nivel del piso pueda hacer este cambio sin necesidad de subir hasta la altura de las antenas. Por esta razón, se optó por utilizar dos microcontroladores comunicados mediante un protocolo de comunicación serial, y donde uno de ellos se encargue de recibir el dato del set point y mostrarlo en una pantalla LCD, y envía el dato al otro microcontrolador, el cual estará sensando la posición angular actual y al hacer la diferencia entre la posición actual y la deseada determinará el sentido de giro del motor, entonces enviará los pulsos necesarios de movimiento hasta que la posición sea la deseada, es decir, que el error sea cero, en la Figura 55 se muestra el diagrama de bloques de este sistema.

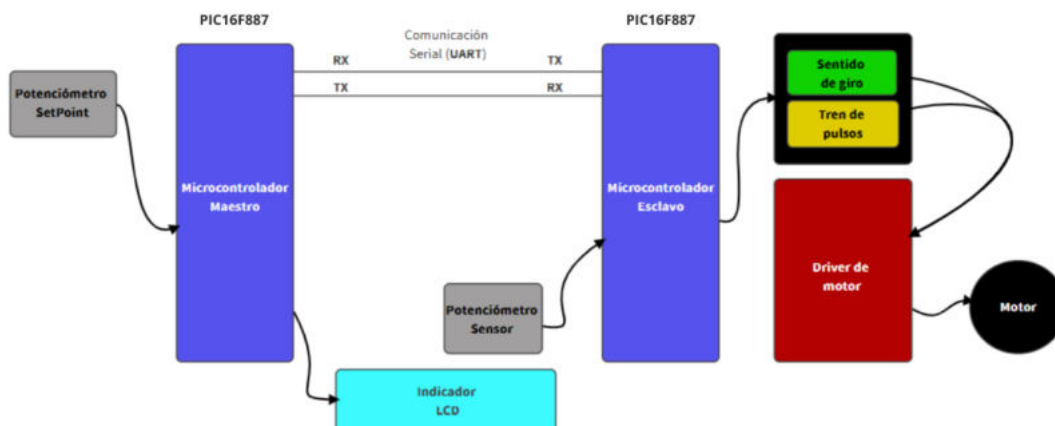


Figura 55. Diagrama de conexión del sistema de control automático para el posicionamiento angular de las antenas.

Como se puede observar, el microcontrolador maestro es el que se encargará de recibir el dato de Set Point, es decir, del ángulo deseado para las antenas, y como ayuda visual para el usuario habrá una pantalla LCD que mostrará el valor angular ingresado, para este caso, el control de set point será un potenciómetro de precisión multivuelta por, como su nombre lo indica, la precisión proporcionada en la variación de sus valores.

Una vez ingresado el valor de ángulo, inmediatamente se envía por comunicación UART al microcontrolador esclavo, el cual, ya se encuentra midiendo la posición angular de las antenas y al calcular la diferencia con respecto al set point generará los valores necesarios de ingreso al controlador del motor de pasos para que este se mueva hasta la posición angular deseada.

Para el desarrollo del programa que estará alojado en el microcontrolador es necesario tomar ciertos criterios en cuenta, principalmente para el ingreso de datos, el cual, al ser por medio de elementos analógicos como son los potenciómetros, es necesario utilizar el módulo de convertidor analógico a digital (ADC) del microcontrolador. Para determinar el ángulo al que se encuentran los potenciómetros, la primera precisión es que debemos conocer el porcentaje en que se encuentran los potenciómetros, para esto, nos guiamos con la descripción que se presenta a continuación:

$$\%P = \frac{V_{in}}{V_{m\acute{a}x}} \times 100 \quad (10)$$

Donde V_{in} hace referencia al voltaje de entrada y $V_{m\acute{a}x}$ es el voltaje de alimentación. Pero como el ADC convierte el nivel de voltaje con respecto al de alimentación en un nivel numérico y discreto que se encuentra entre el 0 y 255 en este caso, debido a que el módulo de conversión de analógico a digital es de 8-bit, podríamos entender estos dos términos como V_{in} el valor actual del ADC y $V_{m\acute{a}x} = 255$ (Si se usara otro microcontrolador este valor cambiaría a razón de $2^n - 1$, donde n es la cantidad de bits), entonces, reescribiéndolo en estos términos, tenemos que:

$$\%P = \frac{100}{255} V_{ADC} \quad (11)$$

De esta manera, si el potenciómetro está en su nivel más alto, el resultado será 100, mientras que, si está en el más bajo será 0.

Este es uno de los elementos fundamentales para el sistema que se desarrolló, después de esto lo que se desarrolló fue una descripción que establezca una relación del ángulo con respecto al porcentaje en que se encuentra el potenciómetro. En este caso, los límites de movimiento de las antenas se establecieron de -45° a 45° , sin embargo, este rango podría modificarse fácilmente. Aprovechando que el potenciómetro utilizado es lineal, se hizo una ecuación de recta para obtener la expresión matemática que gobierne el valor del ángulo deseado con respecto al porcentaje del potenciómetro.

En la Figura 56 se muestra el bosquejo de la recta que se utilizó para establecer dicha expresión, donde se relaciona el ángulo de inclinación con respecto al porcentaje en que se encuentra el potenciómetro.

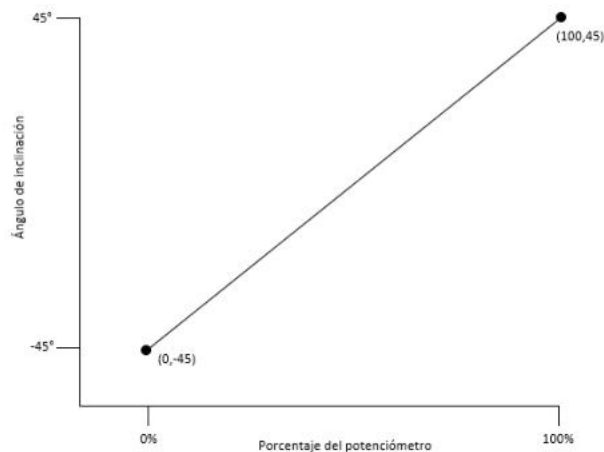


Figura 56. Bosquejo de recta para encontrar la expresión matemática de ángulo respecto a porcentaje de potenciómetro.

Teniendo en cuenta la información anterior, donde cabe aclarar que el cero de las antenas, es decir, cuando la inclinación es nula se encuentra cuando el

potenciómetro está justamente al 50% de su posición, entonces, se puede encontrar la ecuación de la recta que describe el comportamiento del ángulo de inclinación.

$$y - 45 = \left(\frac{45 + 45}{100} \right) (x - 100)$$

$$y - 45 = \frac{9}{10} (x - 100)$$

$$y = \frac{9}{10} x - 45 \quad (12)$$

En donde x representa el ángulo de inclinación (por lo que se reemplazará por α) e y es el porcentaje del potenciómetro (se reemplazará por %P). Entonces la expresión quedaría como

$$\alpha(\%P) = \frac{9}{10} (\%P) - 45 \quad (13)$$

Mientras que en términos del valor que estará leyendo el convertidor de analógico a digital la expresión en el microcontrolador es

$$\alpha(V_{ADC}) = \frac{9}{10} \left(\frac{100}{255} V_{ADC} \right) - 45 \quad (14)$$

Esta es la expresión que se puede encontrar en el código cargado en el microcontrolador en la línea de código que indica:

$$p = 0.9 * (ADRESH * 0.3922) - 45;$$

En donde el comando ADRESH es la información contenida en el ADC, y el valor 0.3922 corresponde a la equivalencia de $\frac{100}{255}$.

Una vez haciendo estas conversiones a fin de conocer el ángulo al que se desean tener las antenas, por medio de una comunicación serial UART se comunica el microcontrolador primario con otro secundario, enviándole, justamente, el valor obtenido de la fijación del set point angular. De esta manera, el microcontrolador secundario, que se encuentra midiendo la posición angular actual de las antenas realiza una diferencia entre el valor deseado y el valor actual para encontrar el error de posiciones, y, a partir de esto se generan los pulsos necesarios para hacer mover el motor para reducir tal error a cero, el movimiento del motor de pasos se hace mediante un driver de motor de pasos, el cual, en su etapa de control necesita el ingreso de dos señales, una de ellas que determina el sentido de giro y la otra que corresponde a la recepción de pulsos que representan los pasos del mismo, específicamente en el sentido de giro, un estado de voltaje bajo significa un giro en sentido horario, mientras que el estado alto es el sentido de giro antihorario.

Sabiendo esto, se presupone que en el momento que se monte el mecanismo se hará de tal manera que, como ya se dijo antes, el valor de cero grados de inclinación es estando las antenas totalmente horizontales, esto quiere decir, con el sensor de retroalimentación estando al 50% de su avance total. De esta manera el avance horario o antihorario será consistente con el valor ingresado como deseado.

Una ventaja muy importante de hacerlo de esta manera es que, sin importar que el sistema sea desenergizado, al volverlo a conectar, la posición actual no se perderá, debido al sensor de retroalimentación, que, al ser un potenciómetro, el valor que le mande al ADC no será reiniciado, descalibrando la medición, y al medir el error que tiene de acuerdo al valor actual y al set point no es necesario redirigirlo a la posición cero cada vez que se vuelva a energizar.

Capítulo 6. Resultados

El presente trabajo se puede dividir en dos partes que forman su totalidad, la primera de ellas es el diseño mecánico de la montura en sí, el cual abarca el diseño de cada una de las piezas que conforman el modelo, así como los ensamblajes creados con herramientas CAD y los análisis mecánicos correspondientes. Y la segunda, que es el desarrollo del sistema de control para el movimiento de la montura, que abarca los circuitos electrónicos y los programas cargados en el microcontrolador utilizado para el control de movimiento.

Para la parte mecánica, con base en la Tabla 8, se eligió el tercer modelo (Figura 57) como el más indicado para la aplicación a la que se está destinando el modelo, debido a que cuenta con una mayor resistencia tanto en peso como en cuanto a la degradación, debido a que el principal material del que está construido es en metal, debido a la estructura general. Este modelo sólo cuenta con un eje, el altitudinal, sin embargo, ese movimiento es suficiente para la aplicación, y, además, sólo necesita de un motor.

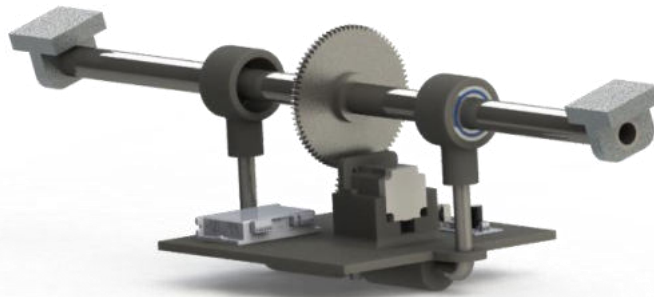


Figura 57. Modelo de montura elegido.

6.1. Modelo a profundidad

Para dar un panorama general del mecanismo presentado es prudente mostrar el plano general del mismo (Figura 58), en el que se muestran algunas de las medidas más importantes, tales como las de los tubos, los cuales tienen un diámetro de $\frac{3}{4}$ ”, el diámetro del eje de las antenas, el cual es de 35 mm y que la relación de engranes

para la transmisión de movimiento es de 3.6, debido a que, en este modelo, la distancia del centro del eje del motor al del engrane conducido es de 100.46 mm $\approx$ 100 mm, teniendo un piñón de 22 dientes y un engrane conducido de 78 dientes, ambos, de módulo 2.

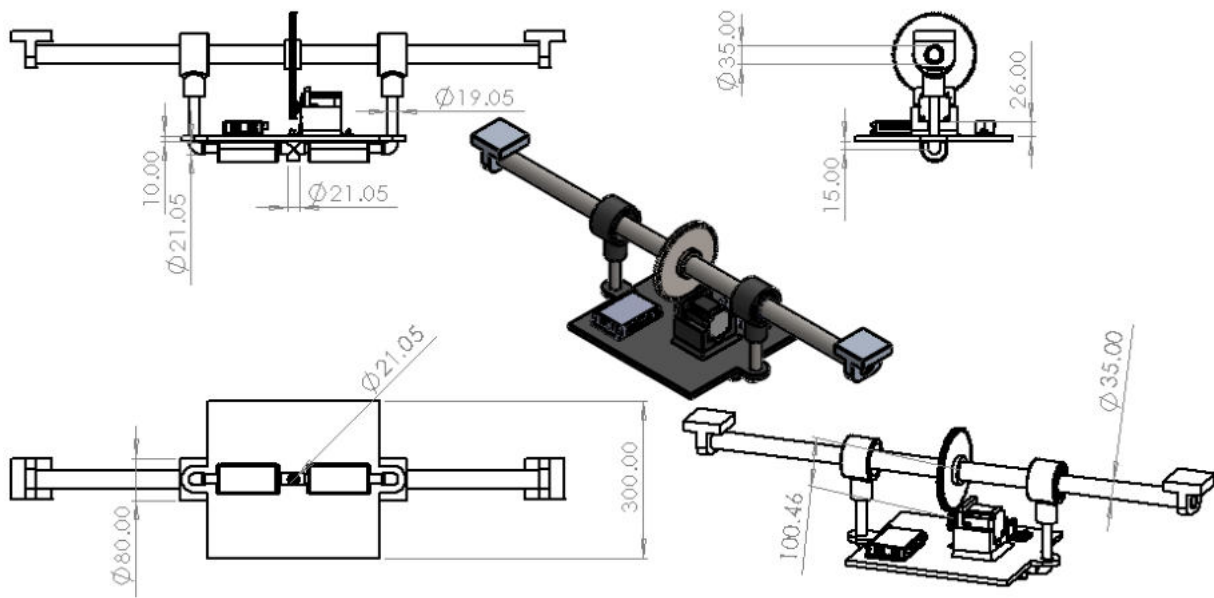
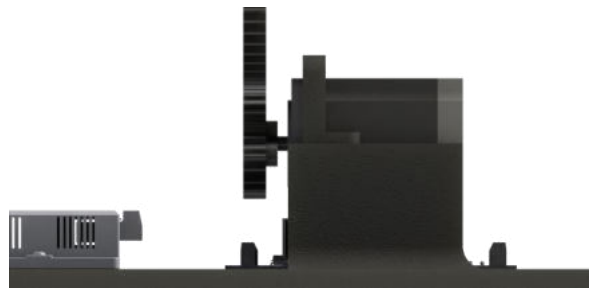


Figura 58. Plano general del mecanismo.

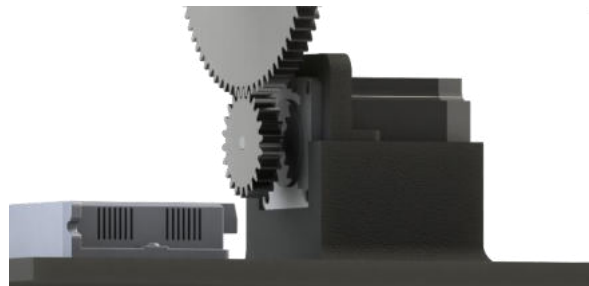
6.1.1. Base para el motor

El primero de los elementos a explicar de este modelo está construida sobre la plataforma para el circuito de control, tal elemento es un soporte para el motor de pasos, que garantice su lugar fijo y que las vibraciones que este pueda llegar a tener no interfieran en el correcto funcionamiento del sistema.

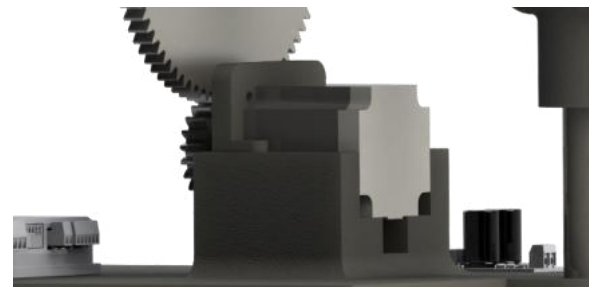
Esta base para el motor está construida como una plataforma que se eleva a una distancia necesaria para que el piñón conectado al eje del motor al acoplarse con el engrane conducido tenga una distancia entre centros de aproximadamente cien milímetros, así como para evitar colisiones del piñón con la plataforma general y que se obstruya su movimiento.



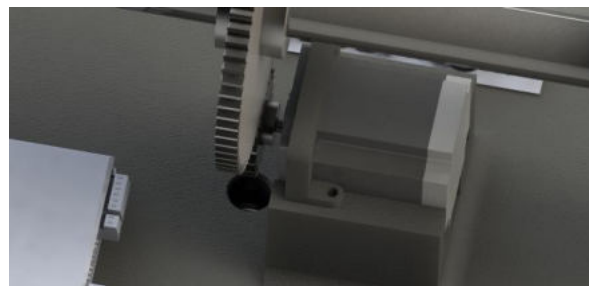
a)



b)



c)



d)

Figura 59. Distintas vistas de la base para el motor de pasos.

En la Figura 59 se muestran algunas vistas de la base descrita anteriormente, como se puede apreciar, por la parte superior del motor se muestra una pieza que lo rodea, esta tiene por función fijarlo totalmente a la base que se encuentra por

debajo de él. Esta pieza se fija al motor y a la base mediante tornillos, aprovechando que el motor tiene orificios, como se muestra en a) se hizo la pieza de forma que también tuviera orificios alineados a los del motor. Por su parte, en la base también se hicieron estos para garantizar un agarre más confiable y con esto disminuir las posibilidades de desplazamiento del motor generadas por la vibración producida por el mismo al momento de estar en funcionamiento.

6.1.2. Plataforma general

La idea para la existencia de este elemento es el de sostener a los dispositivos esenciales para el funcionamiento del sistema, el motor de pasos (a través del soporte mencionado anteriormente), el controlador del motor y el circuito de control que enviará las señales correspondientes al controlador del motor a través de un microcontrolador montado en esta placa de circuito.

Con esta información se podría terminar la explicación de este elemento, sin embargo, normalmente se pensaría que esta parte es la que soporta el peso de toda la estructura, cosa que en los primeros mecanismos propuestos sí pasaría, razón por la que es oportuno mostrar en esta sección el elemento para explicar su diseño, el cual no soporta más peso que el de los dispositivos mencionados anteriormente que sostiene (motor, driver y circuito).

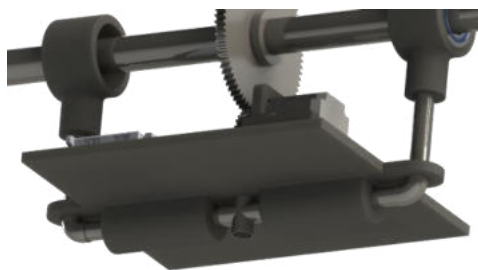


Figura 60. Acercamiento a la parte inferior de la plataforma.

En la Figura 60 se observa cómo la estructura de la plataforma es la que se acopla a la estructura tubular de la montura con ayuda de las pestañas laterales y los orificios inferiores. De esta manera, la plataforma resulta ser cargada por la estructura y no al revés, es decir, que sea la plataforma la que tenga que estar

cargando a la estructura. La gran ventaja de que la plataforma esté de esa manera, además de los esfuerzos ejercidos sobre esta es que si en un intento de actualización de la montura donde sea necesario el reemplazo sólo de la plataforma se podría retirar sin necesidad de alterar la estructura base tubular de la montura.

6.1.3. Soportes para el eje de las antenas

Un elemento de suma importancia son los soportes que contendrán y permitirán el movimiento del eje de las antenas, el cual es mostrado en la Figura 61. Tales soportes tienen el mismo funcionamiento que una chumacera, de hecho, si lo vemos de esa manera, son dos chumaceras, puesto que el elemento interno que es acoplado con el eje de las antenas es un rodamiento, el cual facilita el movimiento del eje al reducir la fricción que habría sin estos.

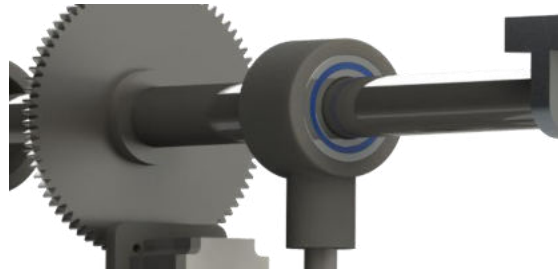


Figura 61. Soportes del eje de las antenas.

Esta chumacera/soporte está hecha pensando en que simplemente se acople sobre el tubo que se encuentra debajo de ella en el modelo, sin embargo, también podría ser usada una chumacera comercial en lugar de la mostrada aquí, pues la finalidad y utilidad es la misma en ambos casos.

6.1.4. Bases para montar las antenas

Debido a que el eje para la rotación de las antenas es cilíndrico y las antenas tienen un cuerpo con una forma transversal cuadrada es necesario contar con un elemento que acople estas dos formas, razón por la que resulta importante una base para las antenas, en este caso se tiene el diseño mostrado en la Figura 62.

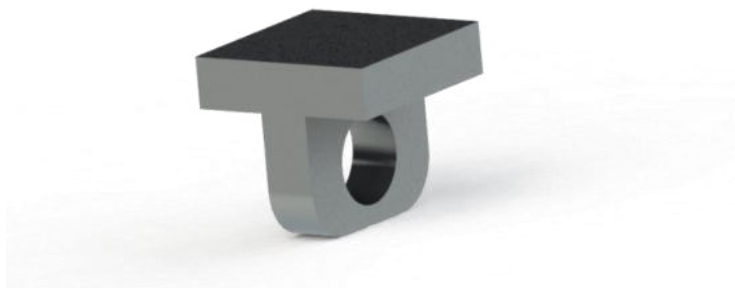


Figura 62. Cople entre el eje y las antenas.

El montaje de esta pieza sería atornillando el cuerpo de las antenas a la cara plana del elemento, de esta manera se fijaría correctamente, mientras que para unir la pieza al eje de rotación también se podría hacer atornillándolo, aprovechando que el tubo que funge como eje es hueco, o bien, podría soldarse, sin embargo, esto no sería lo más recomendable, puesto que en caso de tener que desmontar la montura resultaría muy difícil e impráctico tener los elementos soldados.

6.1.5. Acoplamiento del eje de las antenas al engrane conducido

Una duda importante que salta al momento de observar el modelo puede ser la manera en la que serán acoplados los diferentes elementos del sistema unos con otros, especialmente el engrane conducido con el eje de movimiento de las antenas, pues, como se dijo en el apartado anterior, resultaría impráctico tener las piezas soldadas si en un futuro se quisiera actualizar el sistema y esto implicara el desmontaje de algunas piezas, por esta razón, la solución para esto sería unir los elementos mediante tornillos.

En el caso del engrane conducido de 78 dientes tendría que tener un cubo doble que sobresalga por ambas caras del mismo y que en cada lado tenga dos orificios alineados uno con otro a fin de poder atravesar un tornillo de lado a lado donde quede por la parte de en medio el tubo que funge como eje de movimiento para las antenas, de un lado se ingresa el tornillo y por el otro extremo se fija con ayuda de una tuerca.

El mismo principio de unión tienen los otros elementos, para fijar el piñón al motor también se emplea un tornillo que se aprieta mediante un orificio en el cubo del piñón al eje del motor. Por su parte los elementos metálicos de unión podrían ser acoplados mediante una rosca en estos mismos, prescindiendo de esta manera totalmente de la soldadura.

6.1.6. Sistema de control automático

Para la parte de la electrónica, se desarrolló un sistema de control automático basado en el uso de microcontroladores. Para este sistema, la entrada de datos es a partir de un potenciómetro que determina el set point en términos angulares comprendidos entre -45° y 45° de inclinación. Este dato será cargado al microcontrolador principal, el cual cuenta con una pantalla LCD para indicar el valor angular de set point.

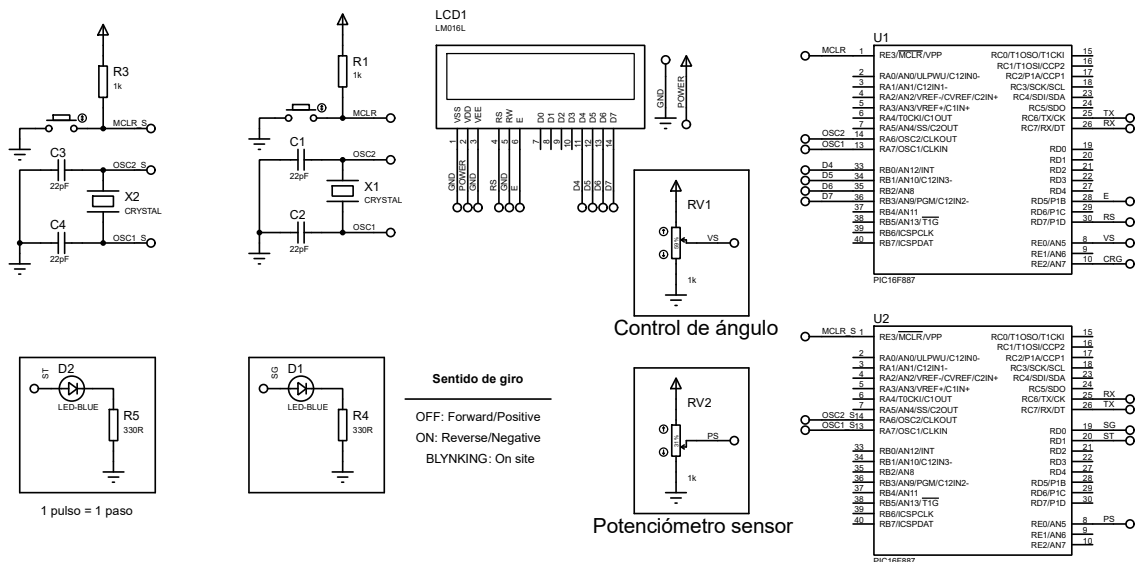


Figura 63. Esquemático del sistema de control para el control de pasos.

Como se muestra en la Figura 63, la entrada de datos es por medio del potenciómetro designado como “Control de ángulo” y la retroalimentación al sistema es por medio del “Potenciómetro sensor”. Está dividido en dos partes el sistema de control, por medio de la comunicación serial UART de dos microcontroladores, esto

a causa de la necesidad de que la entrada de datos pueda encontrarse en una posición y la conexión al motor en otra que será a una altura mayor.

Dependiendo de la posición angular actual y el valor deseado se hará una diferencia que designará el sentido de giro del motor de pasos y enviará el tren de pulsos necesario para hacer girar al motor. Esto es, si la diferencia $Valor\ actual - Valor\ deseado < 0$, hace falta un avance positivo, tomaremos esto como un giro horario. Mientras que si $Valor\ actual - Valor\ deseado > 0$ quiere decir que el avance que se necesita es negativo, siguiendo la lógica tendremos que hacer un giro en sentido antihorario; Por el contrario, si $Valor\ actual - Valor\ deseado = 0$ quiere decir que no hay error, es decir, que el ángulo en el que se encuentran las antenas es el mismo al que se requieren, entonces no debe haber movimiento alguno, o dicho de otra manera, el tren de pulsos no contribuye al movimiento, una vez cuando pase esto, el led indicador del sentido de giro se programó para que una vez estando en el sitio haga un parpadeo, acción que no afecta en lo absoluto al avance del motor, debido a que el tren de pulsos tiene una amplitud nula, es decir, que no produce pasos el motor.

A continuación, se muestran las señales generadas desde el microcontrolador secundario para el control del motor, en cada uno de los casos posibles. Para esto, recordemos que un driver de motor de pasos como el que estamos utilizando se controla con dos señales, tanto el sentido de giro (donde una señal de voltaje bajo es equivalente al sentido de giro horario, mientras que una señal en alto representa el sentido antihorario) y por otro lado, para lograr que el motor gire se tienen que aplicar pulsos, donde cada uno de ellos representa un paso (o un avance del motor dependiendo la configuración, la cual puede ser hasta de micropaso correspondiente a $\frac{1}{32}$ de paso), por esta razón, mientras se esté enviando un tren de pulsos continuo, el motor se encontrará girando en el sentido definido por la entrada correspondiente, a una velocidad inversamente proporcional a la frecuencia con que se están aplicando los pulsos encargados de enviar la señal de paso al controlador.

Caso A: El ángulo deseado es mayor al ángulo actual (sentido de giro horario)

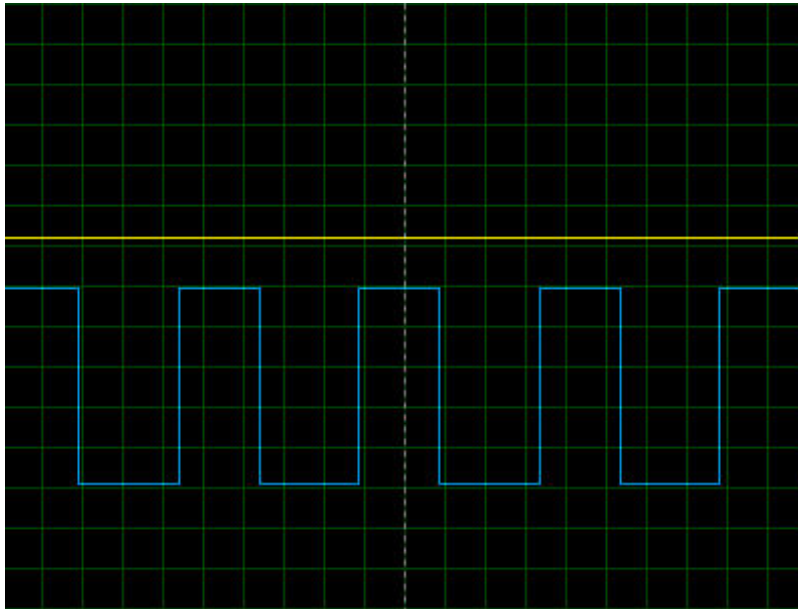


Figura 64. Tren de pulsos y señal de sentido de giro horario.

Caso B: El ángulo deseado es menor al ángulo actual (sentido de giro antihorario)

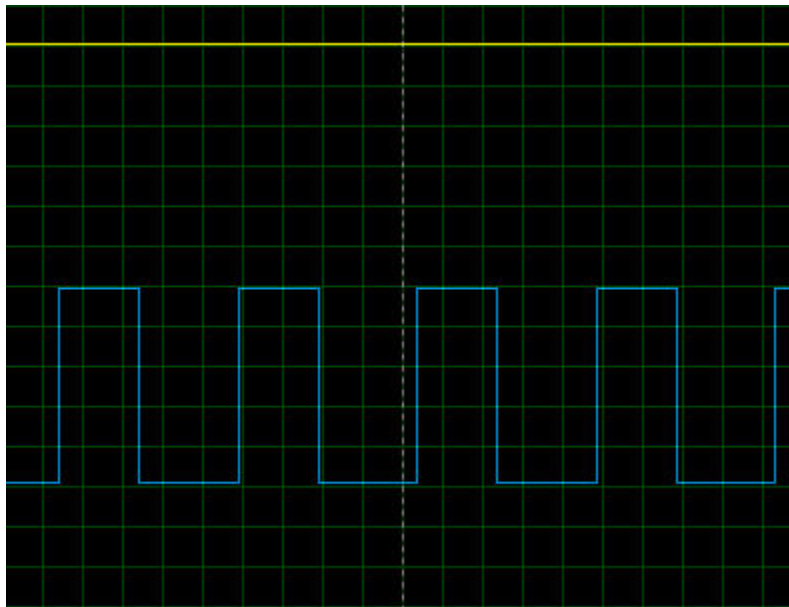


Figura 65. Tren de pulsos y señal de sentido de giro antihorario.

Caso C: El ángulo deseado y el ángulo actual son el mismo, es decir, ha llegado al ángulo de set point.

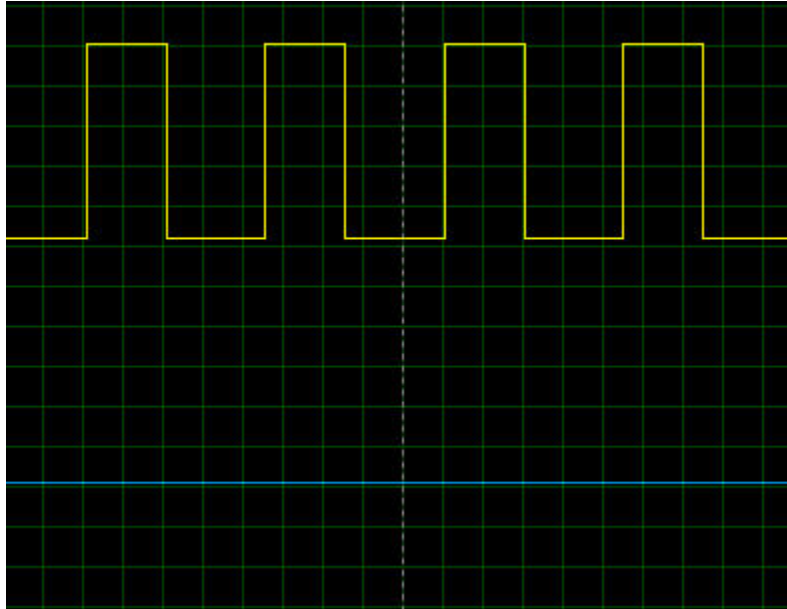


Figura 66. Tren de pulsos nulo y sentido de giro cambiante como indicador de posición deseada alcanzada.

En el último de los casos se puede observar que el sentido de giro se encuentra alternante, esto es meramente para usar esta señal como indicador, que además de que vaya hacia el controlador del motor de pasos también se pueda ver a través de un LED indicador para saber si el motor está girando en sentido horario, anti horario o si ya se encuentra en el lugar indicado por el set point, que esta señal se encuentre cambiante no altera de ninguna manera el sistema, pues, mientras el tren de pulsos que controla la energización de las bobinas sea nulo, el movimiento también lo será.

6.1.7. Otras precisiones importantes

Un aspecto importante a tomar en cuenta en el modelo del diseño que se presenta es la manera de alimentar el circuito de control de movimiento y el controlador del motor, pues se puede ver en todas las imágenes presentadas que la fuente de alimentación no es contemplada a ponerse sobre la plataforma principal. Esto es

debido a que, primeramente, la plataforma es demasiado pequeña para la fuente, además de que resultaría sin mucha utilidad tener la fuente a un nivel tan elevado, lo mejor sería tenerla lo más abajo posible para poder hacer cualquier arreglo eléctrico que tenga que ver con la alimentación, incluso la entrada al sistema tendría que estar junto con la fuente, pues estos son los elementos que deben estar en contacto directo y accesible con el usuario.

Ya que la altura a la que están las antenas es de unos cuantos metros sobre el suelo, para conectar la alimentación y la entrada del sistema de control a un nivel más bajo se necesita usar unos cables largos, sin embargo, sería poco práctico sacar los cables por un costado, ya que la idea es tapar la plataforma con una especie de domo a fin de proteger los elementos de la lluvia y el sol, pues se encontrará en exteriores nuestro modelo. Entonces para esto es que se dejó un orificio en el centro de la plataforma, como se muestra en la Figura 59.d), que a su vez está alineado con el lugar destinado para acoplar el mástil, para pasar por dentro del mismo los cables de conexión hacia la caja eléctrica que contendrá los elementos de alimentación eléctrica y la entrada de control del ángulo de las antenas, metiendo los cables de conexión por dentro del mástil se garantiza que no estén por la parte externa del sistema, protegiéndolos de deterioro causado por la intemperie.

Capítulo 7. Análisis de Resultados

El objetivo principal del presente trabajo es el diseño de una montura con la posibilidad de transferir un movimiento altitudinal angular a un par de antenas que se encuentran sobre los extremos de un eje a través del movimiento de un motor, el cual, a su vez, se encuentra siendo accionado por un sistema de control automático al que el usuario ingresa el dato deseado de posición angular y por medio de una retroalimentación proporcionada por un sensor se calcula el error de la posición actual con respecto a la posición deseada con la finalidad de disminuirlo a cero, es decir, hasta llegar a la posición especificada por el usuario.

Una consideración importante a tomar en cuenta es que el trabajo desarrollado se encuentra en la etapa de diseño, es decir, no se encuentra implementado de manera física, sin embargo, con la guía del diseño mecánico, tomando en cuenta materiales, piezas y ensamble, así como del circuito de conexión y especificaciones mecánicas del motor y relaciones de potencia presentados en este documento, además de algunas adiciones que se dejan como trabajo a futuro, la construcción física e implementación del mismo es alcanzable.

7.1. Diseño mecánico

El modelo mecánico diseñado es el representado en la Figura X; el movimiento ejercido es altitudinal angular y es guiado por medio de un motor de pasos. Debido a que el torque calculado que se ejerce por los elementos a moverse sobre el eje es de aproximadamente 16.04 Nm y considerando que la relación de potencia presente por los engranes es de 3.6 y tomando un margen de seguridad del doble de torque soportado por el motor de pasos, se concluye en que el torque necesario que debe ejercer el motor para poder producir el movimiento debe ser de, como mínimo, 8.9 Nm (Estos datos son calculados en la sección 5.1.6.1. Elección del acoplamiento de movimiento y del motor de pasos, ubicada en la Metodología); Estas características se satisfacen e incluso se superan con el uso del motor correspondiente a la hoja de datos del Anexo B.

Con respecto al modelo diseñado, este se encuentra pensado para albergar en la plataforma inferior el motor actuador sobre una base que lo fija para evitar movimientos y vibraciones bruscas que puedan desalinear el sistema de transferencia de movimiento, además del controlador del motor y el circuito de control encargado de enviar las señales correspondientes al controlador del motor, y saliendo de los extremos de esta plataforma se encuentran dos brazos salientes, mismos que serán el soporte para el eje de rotación de las antenas, por la parte baja del modelo se puede observar un hueco circular en el medio de uno de los tubos que conforman el diseño, esto es para poder colocar un mástil con la intención de elevar la distancia a la que se encuentran las antenas, sobre este mástil es donde se puede colocar la parte del ingreso del set point o ángulo deseado, esto es posible debido a que el sistema de control se encuentra dividido en dos, ya que la base son dos microcontroladores siendo comunicados, pero uno de ellos recibe la información del set point (el que estaría en el mástil), mientras el segundo (situado en la plataforma) se encarga de enviar las señales necesarias para que el motor se mueva los pasos necesarios en el sentido de giro correcto hasta alcanzar la posición requerida, es este el microcontrolador al que llegará la señal de retroalimentación del ángulo actual.

7.2. Sistema de control

Para controlar el movimiento del mecanismo presentado se sigue la lógica de la Figura X, donde se puede apreciar que la plataforma de control está constituida por dos microcontroladores que se comunican mediante el protocolo UART, donde uno de ellos es el encargado de fijar el set point del sistema de control, es decir, el ángulo que se requiere, por medio de una entrada analógica de un potenciómetro, tal medición que es interpretada por el módulo ADC del primer microcontrolador es enviada hacia el otro microcontrolador, el cual, tiene como entrada un sensor potenciométrico que retroalimentará al sistema con la posición actual de la inclinación de las antenas, con estos datos, el sistema es capaz de calcular el error que existe entre la posición deseada y la posición actual, naturalmente, si la

diferencia de posiciones es cero, querrá decir que el ángulo en que se encuentran las antenas es el mismo que fue requerido por el usuario, en cualquiera de los otros dos casos, al ser la diferencia negativa o positiva se determinará el sentido de giro que el motor tomará y se mantendrá enviando la señal de movimiento paso por paso hasta que la posición sea cero, o dicho de otra manera, que la diferencia de valores entre la posición actual y la posición deseada sea igual a cero.

Tanto el diseño mecánico como el sistema de control presentados tienen, desde luego, áreas de oportunidad en que pueden mejorar e incluso expandirse, sin embargo, y conforme al alcance proyectado para el presente trabajo, aquellas mejoras pueden quedar como trabajo a futuro, mismas que serán presentadas en la siguiente sección, donde algunas de estas son la mejora en el diseño para la protección del mecanismo debido a que se tiene pensado posicionarse en la intemperie, así como la modificación del protocolo de comunicación usado, puesto que en el trabajo presentado se usa UART para la comunicación de microcontroladores, sin embargo, este protocolo, aunque funcional para el alcance actual, resulta limitado para el momento en que se agreguen más arreglos de antenas que necesiten estar interconectados entre sí, es decir, que de una misma entrada de set point, la información vaya hacia todos los módulos del sistema completo y todos los arreglos se muevan al mismo ángulo, el protocolo de comunicación ideal para esta finalidad puede ser I2C. Varias mejoras se pueden implementar, incluso la adición de Internet de las Cosas, mismas que pueden irse añadiendo y perfeccionando en trabajos futuros sobre esta misma base.

Capítulo 8. Conclusiones y trabajo a futuro

En este trabajo se presentaron los diseños correspondientes a la estructura mecánica y del circuito de control de movimiento para el mecanismo de control de ángulo de inclinación para un par de antenas Yagi-Uda, con la finalidad de usarse para aplicaciones radioastronómicas. La montura final que se reporta en este trabajo se puede entender como un modelo preliminar para el diseño completo del mecanismo, debido a las mejoras que se le pueden implementar, sin embargo, resulta ser una buena alternativa de construcción propia para contar con una montura para aplicaciones de radioastronomía en un ambiente académico, para hacer prácticas observacionales, sin la necesidad de tener problemas con la búsqueda de una montura comercial, o bien, hacerlo de forma manual, pues los diseños presentados en este trabajo están hechos pensando en que sean contruidos con materiales de fácil acceso, y sólo una pequeña parte tendría que ser contruida por medio de técnicas como la impresión 3D, usando como material de construcción el PETG, el cual, mediante un análisis resultó ser el material más indicado para esta aplicación en comparación con el PLA y el ABS, o bien, creadas con metal por medio del maquinado CNC, tales elementos son la plataforma de la base, el soporte del eje de movimiento de las antenas y los soportes para las antenas.

Por la parte mecánica estos trabajos a futuro son la creación de un domo protector para la base y los elementos de movimiento y control que se encuentran en la plataforma, esto ya que la montura debe estar a una altura considerable con respecto al suelo, sometida a la intemperie, lo que podría provocar una importante degradación y fallas en tales elementos. La forma de la plataforma cumple perfectamente con los objetivos, sin embargo, se podría optimizar para minimizar el desperdicio de material en áreas que no se usan para sostener nada, pero manteniendo las características mecánicas de esfuerzo con que se cuenta, es decir, sin afectar el soporte de carga que tiene.

Por la parte del sistema de control automático, la principal mejora que se deja como trabajo a futuro es la implementación del protocolo I²C para la comunicación entre microcontroladores, esto debido a que, al momento de usar más de un arreglo de antenas con la misma entrada de datos, el actual protocolo UART queda limitado para estas funciones, pues la comunicación es uno a uno, mientras que en I²C es de uno a muchos, queriendo esto decir que con una sola entrada de datos se puede enviar a varios receptores que son los microcontroladores encargados de enviar las señales a cada uno de los drivers de los motores de los diferentes arreglos de antenas, hasta el momento solo se puede controlar un solo arreglo, sin embargo, para los alcances que tiene el proyecto hasta este punto es suficiente. Y refiriéndonos a la entrada de datos, esta parte puede mejorar en dos diferentes formas, actualmente el ingreso de datos es de manera potenciométrica, pero esta podría reemplazarse por una entrada numérica por medio de un teclado matricial, e incluso, una mejora interesante sería la implementación de Internet de las Cosas, donde los datos puedan ser ingresados de manera remota, enviando via comunicación inalámbrica de Wi-Fi la señal necesaria que sea ingresada al microcontrolador y este envíe tal dato a los demás microcontroladores esclavos a fin de mover las antenas a la inclinación deseada.

Finalmente, queda como trabajo a futuro la construcción física del sistema con base en los materiales, planos, circuitos y resultados obtenidos en este trabajo aplicando los cambios, modificaciones y acoplamientos necesarios para la aplicación. Además, viendo en cuanto al futuro del proyecto conviene que, una vez teniendo la montura hecha de forma física y funcional se comiencen a hacer observaciones con ayuda de las antenas Yagi-Uda, esto es, adentrarse en el uso de este tipo de antenas y el procesamiento de las señales que se producen ante las ondas de radio que se reciben, interpretarlas computacionalmente y luego desarrollar proyectos referentes a la interferometría, donde las monturas desarrolladas físicamente ayudarán para tener varios arreglos y que sea posible usarlos como los elementos de un radiointerferómetro usando este tipo de antenas.

Bibliografía

- [1] S. Lizano y L. F. R. Jorge, La astronomía en México antes y después de la Conquista, Ciudad de México: El Colegio Nacional, 2022.
- [2] M. P. Sierra, El universo y Galileo, Ciudad de México: El Colegio Nacional, 2020.
- [3] W. N. Christiansen y J. A. Höbom, Radiotelescopes, Cambridge, Great Britain: Cambridge University Press, 1969.
- [4] H. Karttunen, P. Kröger, H. Oja, M. Poutanen y K. J. Donner, Fundamental Astronomy, Fifth ed., New York: Springer, 2007.
- [5] I. R. Peña, Astronomía Elemental, vol. I, Valparaíso, Chile: Editorial USM, 2013.
- [6] P. Grego y D. Mannion, Galileo and 400 Years of Telescopic Astronomy, London: Springer, 2010.
- [7] J. Fierro, «La formación de los sistemas planetarios,» de *La Evolución en la Astronomía*, México, D.F., El Colegio Nacional, 2006, pp. 3-16.
- [8] G. Baume, La esfera celeste, La Plata, Argentina: Editorial de la Universidad de La Plata, 2014.
- [9] Madrid Deep Space Communication Complex, «Radio Astronomía,» National Aeronautics and Space Administration, [En línea]. Available: <https://acortar.link/c806sg>. [Último acceso: 27 Agosto 2023].
- [10] J. M. Marr, R. L. Snell y S. E. Kurtz, Fundamentals of Radio Astronomy. Observational Methods, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2016.

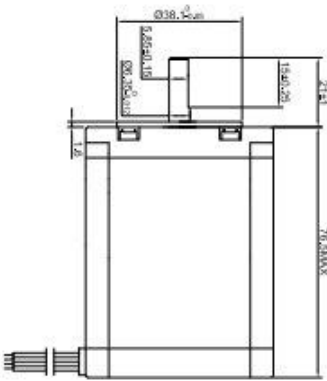
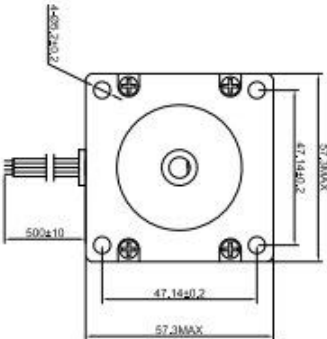
- [11] I. W. T. Sullivan, *The Early Years of Radio Astronomy. Reflections Fifty Years After Jansky's Discovery*, Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 1984.
- [12] C. B. Rodríguez Garza, «Construcción de un Interferómetro de dos elementos,» Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas. Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 2010.
- [13] J. A. Ruiz de la Herrán Villagómez, «Radioastronomía: Redescubriendo el Universo,» 23 Octubre 2015. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=OjVcOuf7IFI&t=312s>. [Último acceso: 29 Agosto 2023].
- [14] E. Hecht, *Optics*, England: Pearson, 2017.
- [15] A. d. R. Mendoza Ponce, *Construcción de un Radiotelescopio Basado en Tecnología de Televisión Satelital*, Morelia, Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2009.
- [16] A. Gallerani y G. Minarelli, «A multiplying interferometer for 1.3 GHz using two Yagi antennas,» *Measurement Science and Technology. IOPscience*, pp. N41-N46, 2007.
- [17] H. D. Hooton, *Antenas para Radioaficionados*, Buenos Aires, Argentina: Arbó, 1969.
- [18] W. Bolton, *Mecatrónica. Sistemas de Control Electrónico en la Ingeniería Mecánica y Eléctrica*, Sexta ed., Ciudad de México: Alfaomega, 2017.
- [19] P. E. Tippens, *Física. Conceptos y aplicaciones*, Ciudad de México: McGraw-Hill, 2020.

- [20] W. D. Cooper y A. D. Helfrick, Instrumentación Técnica Moderna y Técnicas de Medición, México, D.F.: Pearson Educación, 1991.
- [21] B. Bannister y D. Whitehead, Instrumentación. Transductores e interfaz, Estados Unidos: Addison-Wesley Iberoamérica, 1994.
- [22] C. D. Johnson, Process Control Instrumentation Technology, Eight ed., United States of America: Pearson, 2014.
- [23] M. G. Miguel y E. M. Bolado, Instrumentación Electrónica: Sensores y acondicionadores de señal, Santander, Cantabria: Editorial Universidad Cantabria, 2015.
- [24] N. S. Nise, Sistemas de Control para Ingeniería, México, D.F.: Editorial Patria, 2006.
- [25] B. C. Kuo, Sistemas de Control Automático, Séptima ed., Naucalpan de Juárez, Estado de México: Prentice-Hall, 1996.
- [26] E. Peña y M. G. Legaspi, «UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter,» *Analog Devices*, vol. 54, nº 4, 2020.
- [27] F. J. Lockman, Radio Astronomy: Observing the Invisible Universe, United States of America: The Great Courses, 2017.

Anexos

Anexo A. Ficha técnica del motor de pasos Stepper Online 23HE30-2804S

SPECIFICATION	CONNECTION
AMPS/PHASE	BIPOLAR 2.80
RESISTANCE/PHASE(Ohms)@25°C	1.13±10%
INDUCTANCE/PHASE(mH)@1kHz	5.40±20%
HOLDING TORQUE(Nm)@1Hz	1.85(16.39)
STEP ANGLE(°)	1.80
STEP ACCURACY(NON-CUMUL)	±5.00%
ROTOR INERTIA(g-cm²)	440.00
WEIGHT(kg)lb	—
TEMPERATURE RISE:MAX.30°C (MOTOR STANDSTILL;FOR 2PHASE ENERGIZED)	
AMBIENT TEMPERATURE -10°C-50°C(14°F-122°F)	
INSULATION RESISTANCE 100 MΩmin (UNDER NORMAL TEMPERATURE AND HUMIDITY)	
INSULATION CLASS B 130°C(266°F)	
DIELECTRIC STRENGTH 500VAC FOR 1MIN.(BETWEEN THE MOTOR COILS AND THE MOTOR CASE)	
AMBIENT HUMIDITY MAX.85%(NO CONDENSATION)	

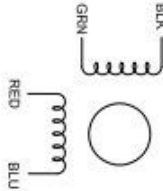


TYPE OF CONNECTION (EXTERN)				MOTOR	
PIN NO	BIPOLAR	LEADS	WINDING		
1	A+ —	BLK	A+ —		
2	A- —	GRN	A- —		
3	B+ —	RED	B+ —		
4	B- —	BLU	B- —		

FULL STEP 2 PHASE EX. WHEN FACING MOUNTING END (X)

STEP	A+	B+	A-	B-
1	+	+	-	-
2	-	+	+	-
3	-	-	+	+
4	+	-	-	+

CW ↑ CCW ↓



APVD

CHKD

DRN

SIGNATURE

DATE

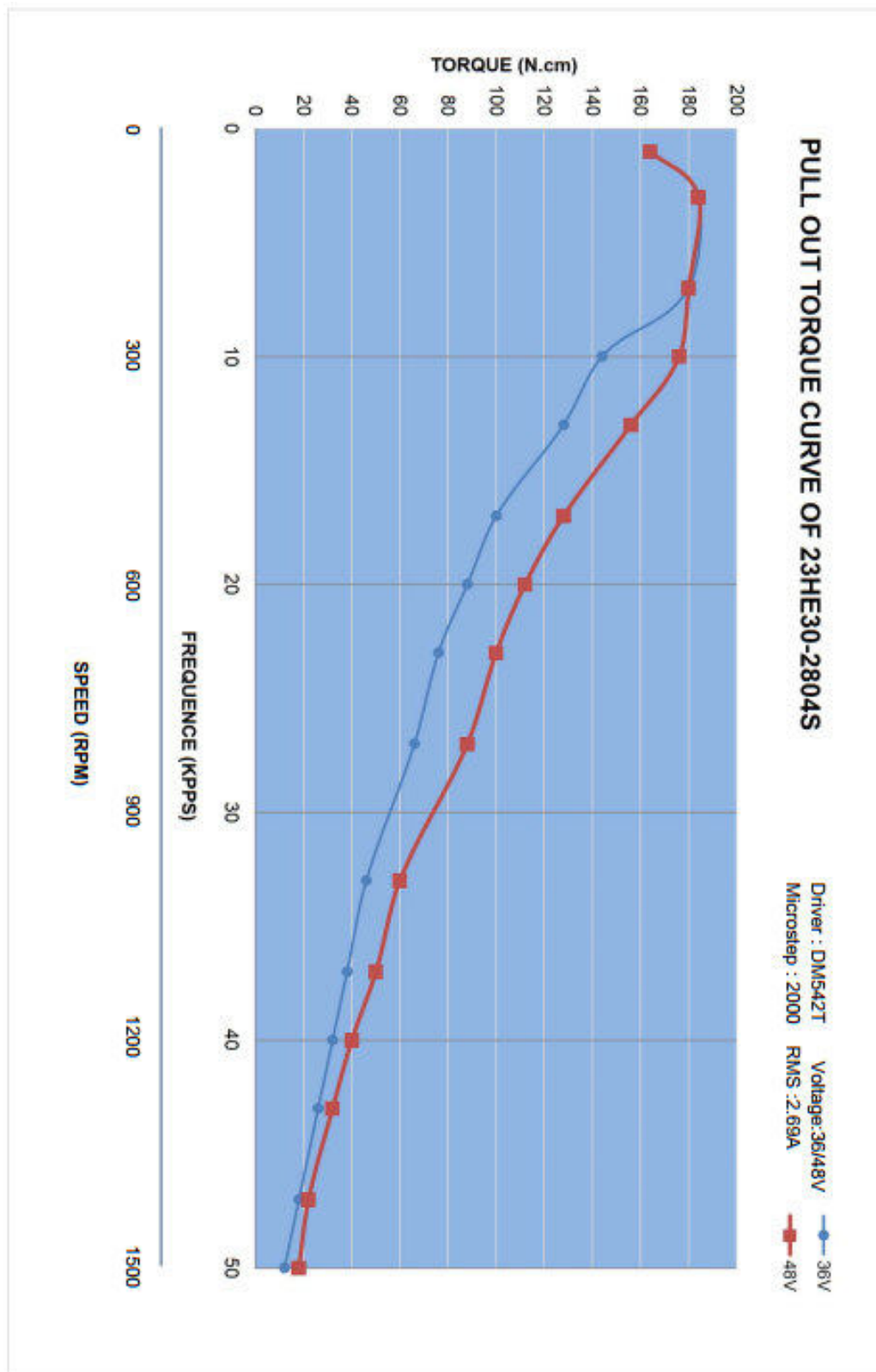
10.30.2020

STEPPER MOTOR

23HE30-2804S

SCALE 1:1.5

Anexo B. Curva de torque del motor de pasos



Anexo C. Código en C cargado al microcontrolador PIC16F887 para el control de sentido de giro del motor de pasos

```
/*
 * File:   sentido_motor_bipolar.c
 * Author: Luis Alberto López Durán
 *
 * Created on 17 de septiembre de 2023, 05:12 PM
 */

// PIC16F887 Configuration Bit Settings

// 'C' source line config statements

// CONFIG1
#pragma config FOSC = XT      // Oscillator Selection bits (XT oscillator:
                             // Crystal/resonator on RA6/OSC2/CLKOUT and RA7/OSC1/CLKIN)
#pragma config WDTE = OFF     // Watchdog Timer Enable bit (WDT disabled
                             // and can be enabled by SWDTEN bit of the WDTCON register)
#pragma config PWRTE = OFF    // Power-up Timer Enable bit (PWRT disabled)
#pragma config MCLRE = ON     // RE3/MCLR pin function select bit
                             // (RE3/MCLR pin function is MCLR)
#pragma config CP = OFF       // Code Protection bit (Program memory
                             // code protection is disabled)
#pragma config CPD = OFF      // Data Code Protection bit (Data memory
                             // code protection is disabled)
#pragma config BOREN = ON     // Brown Out Reset Selection bits (BOR
                             // enabled)
#pragma config IESO = ON      // Internal External Switchover bit
                             // (Internal/External Switchover mode is enabled)
#pragma config FCMEN = ON     // Fail-Safe Clock Monitor Enabled bit
                             // (Fail-Safe Clock Monitor is enabled)
#pragma config LVP = ON       // Low Voltage Programming Enable bit
                             // (RB3/PGM pin has PGM function, low voltage programming enabled)

// CONFIG2
#pragma config BOR4V = BOR40V // Brown-out Reset Selection bit (Brown-
                             // out Reset set to 4.0V)
#pragma config WRT = OFF      // Flash Program Memory Self Write Enable
                             // bits (Write protection off)

// #pragma config statements should precede project file includes.
// Use project enums instead of #define for ON and OFF.

#include <xc.h>
#define _XTAL_FREQ 4000000
```

```
void main(void) {
    int CONT = 0;
    float MEDIO_PASO[8] = {0b0001,
                           0b0011,
                           0b0010,
                           0b0110,
                           0b0100,
                           0b1100,
                           0b1000,
                           0b1001};

    TRISD = 0b11111111; //Configura el puerto D
    PORTD = 0b00000000;
    TRISB = 0b00000000; //Configura el puerto B
    PORTB = 0b00000000;

    while (RD1 == 1) {
        if(RD0 == 1) {

            while((CONT < 8)&&(CONT >= 0)&&(RD0 == 1)&&(RD1 == 1))
            {
                PORTB = MEDIO_PASO[CONT];
                __delay_ms(125);
                CONT++;
            }

            if(CONT > 7) {
                CONT = 0;
            }

        }
        else {

            while((CONT < 8)&&(CONT >= 0)&&(RD0 == 0)&&(RD1 == 1))
            {
                PORTB = MEDIO_PASO[CONT];
                __delay_ms(125);
                CONT--;
            }

            if(CONT < 0){
                CONT = 7;
            }

        }
    }

    return;
}
```

Anexo D. Código en C cargado al microcontrolador PIC16F887 para el control de giro y conteo de pasos del motor

```
/*
 * File:   pasos_motor_bipolar.c
 * Author: Luis Alberto López Durán
 *
 * Created on 17 de septiembre de 2023
 */

// PIC16F887 Configuration Bit Settings

// 'C' source line config statements

// CONFIG1
#pragma config FOSC = XT      // Oscillator Selection bits (XT oscillator:
                             // Crystal/resonator on RA6/OSC2/CLKOUT and RA7/OSC1/CLKIN)
#pragma config WDTE = OFF     // Watchdog Timer Enable bit (WDT disabled
                             // and can be enabled by SWDTEN bit of the WDTCON register)
#pragma config PWRTE = OFF    // Power-up Timer Enable bit (PWRT disabled)
#pragma config MCLRE = ON     // RE3/MCLR pin function select bit
                             // (RE3/MCLR pin function is MCLR)
#pragma config CP = OFF       // Code Protection bit (Program memory
                             // code protection is disabled)
#pragma config CPD = OFF      // Data Code Protection bit (Data memory
                             // code protection is disabled)
#pragma config BOREN = ON     // Brown Out Reset Selection bits (BOR
                             // enabled)
#pragma config IESO = ON      // Internal External Switchover bit
                             // (Internal/External Switchover mode is enabled)
#pragma config FCMEN = ON     // Fail-Safe Clock Monitor Enabled bit
                             // (Fail-Safe Clock Monitor is enabled)
#pragma config LVP = ON       // Low Voltage Programming Enable bit
                             // (RB3/PGM pin has PGM function, low voltage programming enabled)

// CONFIG2
#pragma config BOR4V = BOR40V // Brown-out Reset Selection bit (Brown-
                             // out Reset set to 4.0V)
#pragma config WRT = OFF      // Flash Program Memory Self Write Enable
                             // bits (Write protection off)

// #pragma config statements should precede project file includes.
// Use project enums instead of #define for ON and OFF.

#include <xc.h>
#include <stdio.h>
```

```
#include <stdlib.h>
#define _XTAL_FREQ 4000000

//Señales de control de la LCD
#define LCD_RS RE2
#define LCD_RW RE1
#define LCD_EN RE0
#define LCD_DATA PORTD

#define LCD_STROBE()((LCD_EN = 1), (LCD_EN = 0))

void lcd_write(unsigned char c)
{
    __delay_us(40);
    LCD_DATA = ((c >> 4) & 0x0F);
    LCD_STROBE();
    LCD_DATA = (c & 0x0F);
    LCD_STROBE();
}

void lcd_clear(void)
{
    LCD_RS = 0;
    lcd_write(0x1);
    __delay_ms(2);
}

void lcd_puts(const char *s)
{
    LCD_RS = 1;
    while(*s)
        lcd_write(*s++);
}

void lcd_goto(unsigned char pos)
{
    LCD_RS = 0;
    lcd_write(0x80+pos);
}

void lcd_init()
{
    char init_value;
    init_value = 0x3;
    TRISE = 0;
    TRISD = 0;
    LCD_RS = 0;
    LCD_EN = 0;
    LCD_RW = 0;
```

```
    __delay_ms(15);
    LCD_DATA = init_value;
    LCD_STROBE();
    __delay_ms(5);
    LCD_STROBE();

    __delay_us(200);
    LCD_STROBE();
    __delay_us(200);
    LCD_DATA = 2;
    LCD_STROBE();
    lcd_write(0x28);
    lcd_write(0xF);
    lcd_clear();
    lcd_write(0x6);
}

void main(void) {

    unsigned char MEDIO_PASO[8] = {0b0001,
                                   0b0011,
                                   0b0010,
                                   0b0110,
                                   0b0100,
                                   0b1100,
                                   0b1000,
                                   0b1001};

    ANSEL = 0;
    ANSELH = 0;
    TRISD = 0b11111111; //Configura el puerto D
    PORTD = 0b00000000;
    TRISB = 0b00000000; //Configura el puerto B
    PORTB = 0b00000000;

    int CONT = 0;
    int p = 0;
    char pasos[8];
    char angulo[8];
    lcd_init();

    lcd_goto(0x00);
    lcd_puts("ANG:");
    lcd_goto(0x40);
    lcd_puts("STP:");

    while (RE3 == 0){

        if(RD7 == 1) {
```

```

/*lcd_goto(0x00);
lcd_puts("ANG:");
lcd_goto(0x40);
lcd_puts("STP:");*/

    if(RD6 == 1) {

        while((CONT < 8)&&(CONT >= 0)&&(RD6 == 1)&&(RD7 == 1))
        {
            PORTB = MEDIO_PASO[CONT];
            __delay_ms(1000);
            CONT++;
            p++;
            lcd_goto(0x05);
            lcd_puts("_____");
            lcd_goto(0x05);
            sprintf(angulo, "%.2f", p*0.9);
            lcd_puts(angulo);
            lcd_goto(0x0D);
            lcd_puts("deg");

            lcd_goto(0x45);
            lcd_puts("_____");
            lcd_goto(0x45);
            lcd_puts(itoa(pasos, p, 10));
        }

        if(CONT > 7) {
            CONT = 0;
        }

    }
    else {

        while((CONT < 8)&&(CONT >= 0)&&(RD6 == 0)&&(RD7 == 1))
        {
            PORTB = MEDIO_PASO[CONT];
            __delay_ms(1000);
            CONT--;
            p--;
            lcd_goto(0x05);
            lcd_puts("_____");
            lcd_goto(0x05);
            sprintf(angulo, "%.2f", p*0.9);
            lcd_puts(angulo);
            lcd_goto(0x0D);
            lcd_puts("deg");
        }
    }
}

```

```
        lcd_goto(0x45);
        lcd_puts("_____");
        lcd_goto(0x45);
        lcd_puts(itoa(pasos, p, 10));
    }

    if(CONT < 0){
        CONT = 7;
    }

}

else{

    lcd_goto(0x05);
    lcd_puts("_____");
    lcd_goto(0x05);
    sprintf(angulo, "%.2f", p*0.9);
    lcd_puts(angulo);
    lcd_goto(0x0D);
    lcd_puts("deg");

    lcd_goto(0x45);
    lcd_puts("_____");
    lcd_goto(0x45);
    lcd_puts(itoa(pasos, p, 10));

    __delay_ms(1000);

}

}

return;
```

Anexo E. Código cargado al microcontrolador maestro (recepción del set point y de envío de datos de posición deseada al microcontrolador esclavo por protocolo UART)

```
/*
 * File:   control_angular.c
 * Author: Luis Alberto López Durán
 *
 * Created on 19 de mayo de 2024, 05:25 PM
 */
// PIC16F887 Configuration Bit Settings
// 'C' source line config statements
// CONFIG1

#pragma config FOSC = XT      // Oscillator Selection bits (XT oscillator:
// Crystal/resonator on RA6/OSC2/CLKOUT and RA7/OSC1/CLKIN)
#pragma config WDTE = OFF     // Watchdog Timer Enable bit (WDT disabled
// and can be enabled by SWDTEN bit of the WDTCON register)
#pragma config PWRTE = OFF    // Power-up Timer Enable bit (PWRT disabled)
#pragma config MCLRE = ON     // RE3/MCLR pin function select bit
// (RE3/MCLR pin function is MCLR)
#pragma config CP = OFF       // Code Protection bit (Program memory
// code protection is disabled)
#pragma config CPD = OFF      // Data Code Protection bit (Data memory
// code protection is disabled)
#pragma config BOREN = ON     // Brown Out Reset Selection bits (BOR
// enabled)
#pragma config IESO = ON      // Internal External Switchover bit
// (Internal/External Switchover mode is enabled)
#pragma config FCMEN = ON     // Fail-Safe Clock Monitor Enabled bit
// (Fail-Safe Clock Monitor is enabled)
#pragma config LVP = OFF      // Low Voltage Programming Enable bit
// (RB3/PGM pin has PGM function, low voltage programming enabled)
// CONFIG2
#pragma config BOR4V = BOR40V // Brown-out Reset Selection bit (Brown-
// out Reset set to 4.0V)
#pragma config WRT = OFF      // Flash Program Memory Self Write Enable
// bits (Write protection off)

// #pragma config statements should precede project file includes.
// Use project enums instead of #define for ON and OFF.

#include <xc.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
```

```
#ifndef _XTAL_FREQ
#define _XTAL_FREQ 2000000
#endif
#include <htc.h>

//Señales de control de la LCD
#define LCD_RS RD7
#define LCD_RW RD6
#define LCD_EN RD5
#define LCD_DATA PORTB
#define LCD_STROBE()((LCD_EN = 1), (LCD_EN = 0))

void inicializa_uart(void);
void envio_uart(char a);
char leer_uart(void);

void lcd_write(unsigned char c)
{
    __delay_us(40);
    LCD_DATA = ((c >> 4) & 0x0F);
    LCD_STROBE();
    LCD_DATA = (c & 0x0F);
    LCD_STROBE();
}

void lcd_clear(void)
{
    LCD_RS = 0;
    lcd_write(0x1);
    __delay_ms(2);
}

void lcd_puts(const char *s)
{
    LCD_RS = 1;
    while(*s)
        lcd_write(*s++);
}

void lcd_goto(unsigned char pos)
{
    LCD_RS = 0;
    lcd_write(0x80+pos);
}

void lcd_init()
{
    char init_value;
    //ADCON1 = 0x06;
```

```
    init_value = 0x3;
    TRISB = 0;
    TRISD = 0;
    LCD_RS = 0;
    LCD_EN = 0;
    LCD_RW = 0;
    __delay_ms(15);
    LCD_DATA = init_value;
    LCD_STROBE();
    __delay_ms(5);
    LCD_STROBE();

    __delay_us(200);
    LCD_STROBE();
    __delay_us(200);
    LCD_DATA = 2;
    LCD_STROBE();
    lcd_write(0x28);
    lcd_write(0xF);
    lcd_clear();
    lcd_write(0x6);
}

void main(void) {
    double p;
    char x[8];
    lcd_init();

    //SE CONFIGURA PUERTO COMO ENTRADA

    TRISA = 0b11111111;
    TRISB = 0b00000000;
    TRISC = 0b00000000;
    TRISD = 0b00000000;
    TRISE = 0b11111111;

    PORTB = 0b00000000;
    PORTC = 0b00000000;
    PORTD = 0b00000000;

    //SE CONFIGURA PUERTO COMO ENTRADA ADC

    ANS5 = 1;
    ANS7 = 0;

    // SE SELECCIONA EL CANAL

    CHS0 = 1;
    CHS1 = 0;
```

```
CHS2 = 1;
CHS3 = 0;

//REFERENCIAS DE VOLTAJE

VCFG0 = 0;
VCFG1 = 0;

//REPRESENTACIÓN DEL RESULTADO

ADFM = 0;

//FUENTE DE RELOJ

ADCS0 = 1;
ADCS1 = 0;

//SE HABILITA EL ADC

ADON = 1;

inicializa_uart();

PORTC = leer_uart();
__delay_ms(10);
envio_uart(0x00);
__delay_ms(10);

for(;;)
{
    lcd_clear(); //SE LIMPIA LA LCD
    GO_DONE = 1; //INICIA LA CONVERSIÓN A/D
    while(GO_DONE == 1) //ESPERA A QUE TERMINE LA CONVERSIÓN
    {
    }
    PORTD = ADRESH;
    p = 0.9*(ADRESH*0.3922)-45;
    lcd_goto(0x02);
    sprintf(x,"%1f",p);
    lcd_puts("Ang. altitude");
    lcd_goto(0x44);
    lcd_puts(x);
    lcd_puts(" deg");

    __delay_ms(100);
}

return;
```

```
}  
  
void inicializa_uart(void) {  
    TRISCbits.TRISC6 = 0;  
    TRISCbits.TRISC7 = 1;  
    SPBRGH = 0;  
    SPBRG = 32;  
    TXSTAbits.SYNC = 0;  
    RCSTAbits.SPEN = 1;  
    TXSTAbits.TX9 = 0;  
    RCSTAbits.RX9 = 0;  
    RCSTAbits.CREN = 1;  
    TXSTAbits.TXEN = 1;  
}  
  
void envio_uart(char a){  
    while(TXSTAbits.TRMT == 0);  
    TXREG = a;  
}  
  
char leer_uart(void){  
    char a;  
    while(PIR1bits.RCIF == 0);  
    {  
        PIR1bits.RCIF = 0;  
        a = RCREG;  
    }  
    return a;  
}
```

Anexo F. Código cargado al microcontrolador esclavo

```
/*
 * File:   control_angular_salve.c
 * Author: Luis Alberto López Durán
 *
 * Created on 26 de mayo de 2024, 11:12 PM
 */

// PIC16F887 Configuration Bit Settings
// 'C' source line config statements

// CONFIG1
#pragma config FOSC = XT      // Oscillator Selection bits (XT oscillator:
// Crystal/resonator on RA6/OSC2/CLKOUT and RA7/OSC1/CLKIN)
#pragma config WDTE = OFF     // Watchdog Timer Enable bit (WDT disabled
// and can be enabled by SWDTEN bit of the WDTCON register)
#pragma config PWRTE = OFF    // Power-up Timer Enable bit (PWRT disabled)
#pragma config MCLRE = ON     // RE3/MCLR pin function select bit
// (RE3/MCLR pin function is MCLR)
#pragma config CP = OFF       // Code Protection bit (Program memory
// code protection is disabled)
#pragma config CPD = OFF      // Data Code Protection bit (Data memory
// code protection is disabled)
#pragma config BOREN = ON     // Brown Out Reset Selection bits (BOR
// enabled)
#pragma config IESO = ON      // Internal External Switchover bit
// (Internal/External Switchover mode is enabled)
#pragma config FCMEN = ON     // Fail-Safe Clock Monitor Enabled bit
// (Fail-Safe Clock Monitor is enabled)
#pragma config LVP = OFF      // Low Voltage Programming Enable bit
// (RB3/PGM pin has PGM function, low voltage programming enabled)

// CONFIG2
#pragma config BOR4V = BOR40V // Brown-out Reset Selection bit (Brown-
// out Reset set to 4.0V)
#pragma config WRT = OFF      // Flash Program Memory Self Write Enable
// bits (Write protection off)

// #pragma config statements should precede project file includes.
// Use project enums instead of #define for ON and OFF.

#include <xc.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#ifndef _XTAL_FREQ
```

```
#define _XTAL_FREQ 2000000
#endif

#include <htc.h>

void inicializa_uart(void);
void envio_uart(char a);
char leer_uart(void);

void main(void) {

    double angle = 0;
    double current_angle = 0;

    TRISD = 0x00;
    TRISE = 0b11111111;

    PORTD = 0x00;

    //SE CONFIGURA PUERTO COMO ENTRADA ADC

    ANS5 = 1;
    ANS7 = 0;

    // SE SELECCIONA EL CANAL

    CHS0 = 1;
    CHS1 = 0;
    CHS2 = 1;
    CHS3 = 0;

    //REFERENCIAS DE VOLTAJE

    VCFG0 = 0;
    VCFG1 = 0;

    //REPRESENTACIÓN DEL RESULTADO

    ADFM = 0;

    //FUENTE DE RELOJ

    ADCS0 = 1;
    ADCS1 = 0;

    //SE HABILITA EL ADC

    ADON = 1;
```

```

inicializa_uart();

for(;;){

    GO_DONE = 1; //INICIA LA CONVERSIÓN A/D
    while(GO_DONE == 1) //ESPERA A QUE TERMINE LA CONVERSIÓN
    {
    }

    current_angle = (0.9*(ADRESH*0.3922)-45);
    angle = (0.9*(leer_uart())*0.3922-45);
    if(angle-current_angle >= 0.5){
        PORTD = 0b00000010;
        __delay_ms(100);
        PORTD = 0b00000000;
        __delay_ms(100);
    }
    else{
        if(angle-current_angle <= -0.5){
            PORTD = 0b00000011;
            __delay_ms(100);
            PORTD = 0b00000001;
            __delay_ms(100);
        }
        else{
            PORTD = 0b00000001;
            __delay_ms(100);
            PORTD = 0b00000000;
            __delay_ms(100);
        }
    }
    __delay_ms(10);
    envio_uart(0xFF);
    __delay_ms(10);
}

return;
}

void inicializa_uart(void) {

    TRISCBits.TRISC6 = 0;
    TRISCBits.TRISC7 = 1;
    SPBRGH = 0;
    SPBRG = 32;
    TXSTABits.SYNC = 0;
    RCSTABits.SPEN = 1;
    TXSTABits.TX9 = 0;
    RCSTABits.RX9 = 0;
}

```

```
    RCSTAbits.CREN = 1;
    TXSTAbits.TXEN = 1;
}

void envio_uart(char a){
    while(TXSTAbits.TRMT == 0);
    TXREG = a;
}

char leer_uart(void){
    char a;
    while(PIR1bits.RCIF == 0);
    {
        PIR1bits.RCIF = 0;
        a = RCREG;
    }

    return a;
}
```

En el enlace que se muestra a continuación, se pueden consultar todos los archivos presentados en este trabajo, desde los modelos CAD, códigos de los programas de los microcontroladores y la simulación del sistema de control.

https://drive.google.com/drive/folders/1NCW_B02bICSDuUgGnE6m-_qWl8UOQirt?usp=sharing