

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO / INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

TÍTULO DE LA TESIS

Sistema estereotáctico para posicionamiento de antenas de ablación

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PRESENTA:

José Méndez María

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José de Jesús Agustín Flores Cuautle

CODIRECTOR DE TESIS

Dra. Citlalli Jessica Trujillo Romero

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	5
RESUMEN	10
ABSTRACT.....	12
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 INTRODUCCIÓN	14
1.2 PROBLEMÁTICA	16
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	17
1.4 HIPÓTESIS.....	18
1.5 OBJETIVO GENERAL.....	19
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1.7 PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	20
1.8 ESTADO DEL ARTE	21
1.8.1 Sistemas estereotácticos.....	21
1.8.2 Tipos de tratamientos para combatir los tumores óseos	25
1.9 ESTADO DEL CAMPO	28
CAPÍTULO II. Marco Teórico	30
2.1 Sistemas Estereotácticos.....	30
2.2 Sistema de posicionamiento	31
2.2.1 Bandas o correas dentadas	32
2.3 Motores a pasos.....	33
2.3.1 Tipos de funcionamiento en los motores paso a paso.....	34
2.3.2 Control de motores a pasos con controlador Pololu A4988	35
2.3.3 Modos de conexión de motores a pasos	37
2.4 Lenguaje de programación: <i>Python</i>	38

2.4.1 Protocolo StandardFirmata para la comunicación Arduino – <i>Python</i>	39
2.4.2 Interfaces graficas con <i>Qt designer</i>	40
2.6 Campos electromagnéticos.....	42
2.6.1 Espectro electromagnético	43
2.6.2 Permeabilidad Magnética o Clasificación de materiales magnéticos.....	44
Capitulo III Desarrollo	45
3. Desarrollo	45
3.1 Sistema estereotáctico de posicionamiento adaptado a las medidas específicas de la población mexicana.	45
3.2 Selección de materiales para la construcción del sistema estereotáctico de posicionamiento	49
3.3 Primer diseño	51
3.4 Segundo diseño	52
3.5 Tercer prototipo (Eje Theta).....	55
3.6 Tercer prototipo (Eje Z)	58
3.7 Prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento manufacturado.	62
3.8 Manufactura de PCB para pruebas finales.....	66
3.9 Interfaz Grafica.....	68
3.10 Metodología para las pruebas de precisión del prototipo.....	70
3.10.1 Prueba 1: Protocolo StandardFirmata y PyFirmata con sensores ultrasónicos.	70
3.10.2 Prueba 2: Tarjeta Raspberry Pi 3 + y Python.....	71
3.10.3 Prueba 3: Sensores Sharp infrarrojos modelo GP2Y0A41SK0F en Arduino (C++).....	72
3.10.4 Prueba 4: Sensores Sharp infrarrojos modelo GP2Y0A41SK0F con protocolo StandardFirmata y PyFirmata.....	74
3.10.5 Prueba 5: Sensores Sharp GP2Y0A41SK0F (4-30) cm Pololu con Arduino y Tarjeta Arduino DUE.....	75
CAPÍTULO IV. RESULTADOS	78

4.1 Prueba 1: Protocolo StandardFirmata y PyFirmata con sensores ultrasónicos.	78
4.2 Prueba 2: Tarjeta Raspberry Pi 3 + y Python.....	79
4.3 Prueba 3: Sensores Sharp infrarrojos modelo GP2Y0A41SK0F en Arduino (C++).....	80
4.4 Prueba 4: Sensor Sharp con el protocolo StandardFirmata y PyFirmata (<i>Python</i>)	83
4.5 Prueba 5: Sensores Sharp GP2Y0A41SK0F (4-30) cm Pololu con Arduino y Tarjeta Arduino DUE	85
4.5.1 Prueba 5 con tabilla de pruebas (Protoboard).....	85
4.5.1 Prueba 5 con PCB.	88
CONCLUSIONES	90
Trabajo Futuro – Recomendaciones.	91
REFERENCIAS.....	92

Fecha: Diciembre 2020

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 DIAGRAMA DE LOS PASOS QUE SE REALIZARAN PARA RESOLVER EL TEMA DE TESIS.	20
FIGURA 2 VISTA ISOMÉTRICA DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS PARA EL APOYO AL MONTAJE DEL MARCO ESTEREOTÁCTICO.	21
FIGURA 3 SE MUESTRAN LAS DIRECCIONES EN LAS CUALES EL SISTEMA SE PUEDE DESPLAZAR PARA CORREGIR UNA MALA COLOCACIÓN DEL MARCO ESTEREOTÁCTICO.	22
FIGURA 4 PROCESO QUE SE REALIZÓ EN LA EVALUACIÓN DEL MONTAJE DE UN MARCO ESTEREOTÁCTICO UTILIZANDO UN MODELO PHANTOM, PARA OBSERVAR LAS DISTORSIONES DEL SISTEMA DURANTE SU MONTAJE.	23
FIGURA 5 DISTORSIÓN DEL MARCO ESTEREOTÁCTICO DE LEKSELL DEBIDO A LA FIJACIÓN DEL PACIENTE. IMÁGENES SUPERIORES: VISTA SAGITAL Y CORONAL SIN DISTORSIÓN. IMÁGENES INFERIORES: VISTA SAGITAL Y CORONAL CON DISTORSIÓN. [4]	23
FIGURA 6 (A) SISTEMA ESTEREOTÁCTICO DISEÑADO PARA EL CRÁNEO DE UN CERDO. (B) SISTEMA ESTEREOTÁCTICO TRASLADADO AL CRÁNEO HUMANO. [8]	24
FIGURA 7 MARCO ESTEREOTÁCTICO REPORTADO EN [9] ENSAMBLADO CON SU GUÍA.	25
FIGURA 8 DISPOSITIVO AUXILIAR ESTEREOTÁCTICO [18],	28
FIGURA 9 SISTEMA ESTEREOTÁCTICO UTILIZADO EN NEUROCIRUGÍA.	30
FIGURA 10 (1) MARCO ESTEREOTÁCTICO REDONDO (SISTEMA ZAMORANO, INODED). (2) MARCO ESTEREOTÁCTICO ZD (INODED). (3) MARCO ESTEREOTÁCTICO DE LEKSELL.	31
FIGURA 11 MUESTRAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE POLEAS (A) PLANAS Y (B) TRAPEZOIDALES.	32
FIGURA 12 DISTRIBUCIÓN DE LAS MEDIDAS PARA SELECCIONAR UNA BANDA DENTADA CON RESPECTO A LA NORMATIVA ISO 5296.	33
FIGURA 13 MOTOR NEMA 17.	33
FIGURA 14 CONFIGURACIÓN DE LA BOBINA DE UN MOTOR UNIPOLAR Y BIPOLAR, RESPECTIVAMENTE.	35
FIGURA 15 DRIVER POLOLU A4899	36
FIGURA 16 PROCEDIMIENTO PARA LOCALIZAR Y SUBIR EL ARCHIVO STANDARDFIRMARTA A LA TARJETA ARDUINO.	39
FIGURA 17 DECLARACIÓN DE PYFIRMATA EN PYTHON.	40
FIGURA 18 PANTALLA PRINCIPAL DEL SOFTWARE QT DESIGNER PARA INTERFACES GRÁFICAS.	41
FIGURA 19 LISTA DE OBJETOS DISPONIBLES PARA EL DESARROLLO DE LA INTERFAZ (A) LISTA DE PROPIEDADES Y (B) LISTA DE EVENTOS.	41
FIGURA 20 (A) INTERFAZ GRÁFICA DISEÑADA Y DESARROLLADA EN QT DESIGNER (B) CÓDIGO DE LA INTERFAZ GRÁFICA DESPUÉS DE SU CONVERSIÓN A LENGUAJE PYTHON.	42
FIGURA 21 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO QUE CLASIFICA LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS SEGÚN SU FRECUENCIA Y LONGITUD DE ONDA.	43

FIGURA 22 EJES DISPONIBLES PARA LA COLOCACIÓN DE LA ANTENA DE MICROONDAS SOBRE LA PIERNA. .	46
FIGURA 23 SISTEMA ESTEREOTÁCTICO DE POSICIONAMIENTO ADAPTADO PARA LA LONGITUD DE LA PIERNA DE LA POBLACIÓN MEXICANA.	47
FIGURA 24 VISTA FRONTAL DEL SISTEMA ESTEREOTÁCTICO DE POSICIONAMIENTO, MOSTRANDO CON UN CÍRCULO AZUL EL LUGAR DONDE SE COLOCARÍA LA PIERNA.	47
FIGURA 25 ANTENAS DE 11 CM Y 17 CM CONSIDERADAS PARA LA ADAPTACIÓN DEL SISTEMA ESTEREOTÁCTICO DE POSICIONAMIENTO A SUS MEDIDAS FINALES.	48
FIGURA 26 PRESENTACIÓN DE LOS COMPONENTES Y PIEZAS UTILIZADAS PARA REALIZAR LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE R.	49
FIGURA 27 PRESENTACIÓN DEL PRIMER DISEÑO ADAPTANDO LAS IDEAS DEL AUTOR, SE MUESTRA TAMBIÉN UNA SIMBOLOGÍA QUE SE UTILIZA PARA REFERIRSE A LOS COMPONENTES O PIEZAS DEL DISEÑO.	52
FIGURA 28 VISTA FRONTAL DEL SEGUNDO DISEÑO.....	53
FIGURA 29 VISTA LATERAL DEL SISTEMA EN GENERAL EN EL SEGUNDO DISEÑO.....	54
FIGURA 30 DISEÑO PRESENTADO PARA LA TERCERA PROPUESTA O MODIFICACIÓN AL SISTEMA ESTEREOTÁCTICO DE POSICIONAMIENTO.....	55
FIGURA 31 (A) VISTA FRONTAL DE LA PIEZA A MANUFACTURAR EN NYLAMID XL EN FRESADORA. (B) PIEZA MANUFACTURADA.....	56
FIGURA 32 VISTA LATERAL DEL PROTOTIPO 3, INDICANDO LAS DIFERENTES PIEZAS UTILIZADAS PARA EL DESPLAZAMIENTO DE LA GUÍA LINEAL EN EL EJE THETA.	57
FIGURA 33 VISTA ISOMÉTRICA DEL DISEÑO, MOSTRANDO LA SECCIÓN QUE REALIZARA LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE THETA, MOSTRANDO LOS DIFERENTES MOVIMIENTOS (R) DEL MOTOR.	58
FIGURA 34 VISTA LATERAL SISTEMA (EJE Z), MOSTRANDO LOS COMPONENTES UTILIZADOS PARA EL DESPLAZAMIENTO DEL SISTEMA Y MEDICIÓN DE LA DISTANCIA RECORRIDA.	59
FIGURA 35 VISTA SUPERIOR DEL SISTEMA (Z, X), MOSTRANDO LA PRIMERA CONFIGURACIÓN UTILIZANDO LOS SENSORES ULTRASÓNICOS PARA LA MEDICIÓN DE LA DISTANCIA RECORRIDA.	60
FIGURA 36 SEGUNDA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA PARA EL DESPLAZAMIENTO DEL ARCO ESTEREOTÁCTICO (E) EN EL EJE Z.....	61
FIGURA 37 VISTA FRONTAL DEL SISTEMA EN TAMAÑO REAL, MOSTRANDO LOS DIFERENTES COMPONENTES QUE SE UTILIZARON PARA EL MISMO.....	61
FIGURA 38 VISTA ISOMÉTRICA DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA ESTEREOTÁCTICO DE POSICIONAMIENTO MOSTRANDO LOS COMPONENTES PARA SIMULAR LA COLOCACIÓN DE LA ANTENA EN EL EJE THETA.	62
FIGURA 39 ACONDICIONAMIENTO Y COLOCACIÓN DEL POTENCIÓMETRO PARA DETECTAR Y MEDIR LA PRECISIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS REALIZADOS EN EL EJE THETA.	63

FIGURA 40 VISTA EXPLOSIONADA DEL PROTOTIPO MOSTRANDO LOS COMPONENTES Y PIEZAS NECESARIAS PARA CONSTRUIR EL APARTADO DEL EJE THETA PARA REALIZAR LOS DESPLAZAMIENTOS EN ESTE EJE	64
FIGURA 41 VISTA LATERAL DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA ESTEREOTÁCTICO DE POSICIONAMIENTO MOSTRANDO LOS COMPONENTES Y PIEZAS QUE CONFORMAN LA SECCIÓN PARA EL DESPLAZAMIENTO DE LA ANTENA EN EL EJE Z.....	65
FIGURA 42 VISTA FRONTAL DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA ESTEREOTÁCTICO DE POSICIONAMIENTO MOSTRANDO LOS COMPONENTES QUE CONFORMAN LA SECCIÓN PARA EL DESPLAZAMIENTO DE LA ANTENA EN EL EJE Z.....	65
FIGURA 43 VISTA EXPLOSIONADA DEL EJE Z, MOSTRANDO LOS COMPONENTES Y PIEZAS QUE CONSTRUYEN EL SISTEMA PARA REALIZAR LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE THETA.	66
FIGURA 44 DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL PCB QUE SE UTILIZARA PARA LAS MEDICIONES FINALES DEL PROTOTIPO BUSCANDO MEJORAR LA PRECISIÓN GENERAL DEL SISTEMA.....	67
FIGURA 45 DISEÑO DE PCB'S TERMINADAS Y LISTAS PARA SU TRASLADO A LA PLACA FENÓLICA PARA SU ELABORACIÓN.....	67
FIGURA 46 PCB'S DE (A) ADQUISICIÓN DE DATOS Y (B) PARA EL CONTROL DE LOS MOTORES A PASOS.	68
FIGURA 47 INTERFAZ GRÁFICA UTILIZADA PARA LAS PRUEBAS FINALES DEL PROTOTIPO, DISEÑADA Y DESARROLLADA EN QT DESIGNER Y PROGRAMADA EN LENGUAJE PYTHON.....	69
FIGURA 48 DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA LA CONFIGURACIÓN DE MOTORES EN LA PRIMERA PRUEBA: 2 MOTORES A PASOS, 2 CONTROLADOR Y DOS SEÑALES INDEPENDIENTES.	71
FIGURA 49 ESQUEMA DE CONEXIONES ENTRE LOS MOTORES A PASOS PARA TENER UNA CONFIGURACIÓN EN SERIE PARA SU SINCRONIZACIÓN.....	72
FIGURA 50 DIAGRAMA SOBRE LA ADQUISICIÓN, FILTRADO, AMPLIFICACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL OBTENIDA DEL SENSOR SHARP EN LA SEGUNDA PRUEBA DEL EJE Z.....	73
FIGURA 51 DIAGRAMA MOSTRANDO ELEMENTOS INVOLUCRADOS PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS FINALES.....	77
FIGURA 52 RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS SENSORES ULTRASÓNICOS, COMPARÁNDOSE PARA MOSTRAR LA DIFERENCIA E INESTABILIDAD DE LAS MEDICIONES OBTENIDAS POR AMBOS SENSORES.	78
FIGURA 53 COMPARACIÓN DE LAS SEÑALES OBTENIDAS A TRAVÉS DE LOS SENSORES ULTRASÓNICOS, MOSTRANDO LAS AFECTACIONES DEL RUIDO A LA SEÑAL.	79
FIGURA 54 SEÑALES OBTENIDAS DESPUÉS DEL FILTRADO POR PROMEDIADO PARA ELIMINAR EL RUIDO EXCESIVO.	80
FIGURA 55 PRESENTACIÓN DE DATOS OBTENIDOS POR LOS SENSORES SHARP EN ARDUINO. (B) DATOS OBTENIDOS UTILIZANDO LAS ETAPAS DE FILTRADO ANALÓGICAS Y DIGITALES. (A) DATOS OBTENIDOS SIN ETAPA DE FILTRADO.	81

FIGURA 56 ECUACIONES CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES SHARP INFRARROJO GP2Y0A21YKFO QUE DESCRIBEN EL COMPORTAMIENTO DE LOS DESPLAZAMIENTOS DEL SISTEMA EN EL EJE Z. LA LÍNEA ROJA REPRESENTA LOS VALORES TEÓRICOS OBTENIDOS POR MEDIO DE LA ECUACIÓN PROPUESTA, LOS CÍRCULOS Y CUADRADOS NEGROS REPRESENTAN LOS VALORES EXPERIMENTALES, OBTENIDOS MEDIANTE MEDICIÓN DIRECTA.	82
FIGURA 57 GRAFICA MOSTRANDO LA DIFERENCIA ENTRE LAS POSICIONES FINALES OBTENIDAS POR LOS SENSORES Y LAS COORDENADAS TEÓRICAS.	83
FIGURA 58 GRAFICA Y ECUACIÓN CARACTERÍSTICA DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA, UTILIZANDO PYTHON PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS.	84
FIGURA 59 GRAFICAS QUE MUESTRAN LA DIFERENCIA ENTRE LA POSICIÓN ESPERADA O TEÓRICA Y LA POSICIÓN O VALOR EXPERIMENTAL.	85
FIGURA 60 GRAFICAS Y ECUACIONES CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA OBTENIDAS MEDIANTE LOS SENSORES SHARP CON UNA PROTECCIÓN EN CONTRA DE LA LUZ AMBIENTAL.	86
FIGURA 61 GRAFICAS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A TRAVÉS DE LA EVALUACIÓN DE LAS ECUACIONES OBTENIDAS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES. (A) ES EL ERROR TEÓRICO Y (C) ERROR EXPERIMENTAL DEL SENSOR 1. (B) ES EL ERROR TEÓRICO Y (D) EL ERROR EXPERIMENTAL DEL SENSOR 2.	87
FIGURA 62 GRAFICAS OBTENIDAS EN LAS PRUEBAS FINALES, MOSTRANDO EL ERROR OBTENIDO POR POSICIÓN, LA LÍNEA Y CUADRO NEGRO REPRESENTAN LOS DATOS OBTENIDOS POR EL SENSOR SHARP 1 Y EL CIRCULO Y LÍNEA ROJA PERTENECEN AL SENSOR SHARP 2.	88
FIGURA 63 RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS FINALES DESPUÉS DE EVALUAR LA PRECISIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE THETA.	89

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a mi asesor que me brindo su confianza para realizar este tema de tesis y me permitió ingresar, el Dr. Jose de Jesús Agustín Flores Cuautle. Me brindo su apoyo y me guio durante mi estancia en la Maestría en Ingeniería Electronica para poder terminar de desarrollar este tema de tesis. Sabía que siempre podía acercarme a él para cualquier cuestión o duda que tuviera y podría encontrar una respuesta.

A mi co-asesora la Dra. Citlalli Trujillo Romero, aun cuando se encontraba en otra ubicación encontraba la manera de apoyarme y guiarme en este tema de tesis.

A mis profesores del Instituto Tecnológico de Orizaba que me guiaron durante mis periodos de Licenciatura y Posgrado. Que me brindaron sus conocimientos y experiencias que me sirvieron generar las bases de mi desarrollo profesional.

A mis compañeros de maestría que junto a ellos podía relajarme, consultar dudas o problemas con los que sabía que ellos son expertos, que permitieron que mi instancia en la maestría fuera mas divertida y emocionante.

A mi familia que siempre estuvo brindándome su apoyo y me acompañaron en este largo camino hasta el final. Escucharon mis dudas, mis problemas y mis inquietudes y al final me brindaban su opinión que me permitía poder retomar el camino.

A Canela que siempre estuvo acompañándome en los momentos mas complicados. Que junto a ella he podido conseguir otro logro más.

Este tema va dedicado a las personas que siempre han confiado en mí: A mi madre, a mi tía Araceli que lamentablemente no se encuentra para poder verte este logro, pero espero que pueda verlo en donde se encuentre y a mi abuela Celia que siempre han dado su mejor esfuerzo para apoyarme y han procurado mi bienestar. Que sin su apoyo y guía simplemente me hubiera perdido en el camino. Y espero poder darles más alegrías y logros en el futuro.

RESUMEN

El cáncer óseo (osteosarcoma) es una enfermedad que afecta principalmente a las extremidades largas del cuerpo, como lo son brazos y piernas. Para combatir esta enfermedad se tienen métodos tradicionales como la cirugía o la quimioterapia, o bien los métodos mínimamente invasivos como la radioterapia y la termoterapia. En el área de termoterapias se encuentra la ablación térmica; la cual consiste en incrementar la temperatura del tumor entre los 60°C y los 100°C. Esto ocasiona necrosis coagulativa en las células y elimina su capacidad de reproducción. Una forma de generar ablación térmica es mediante antenas de microondas.

La terapia de ablación térmica ha mostrado resultados significativos en el tratamiento de diferentes tipos de tumor, pero uno de los principales problemas de esta técnica es la necesidad de colocar la antena sobre el punto quirúrgico con un alto grado de precisión. Si la antena de microondas no se posiciona de una manera precisa, es posible perder el objetivo (tumor) durante el tratamiento y afectar a tejido sano en lugar del tumor. Al momento de proponer cualquier sistema de posicionamiento, es necesario considerar una selección adecuada de los materiales a partir de los cuales se construirá dicho sistema. Esto debido a que el campo electromagnético generado por las antenas, al entrar en contacto con componentes o piezas metálicas del sistema, puede cambiar y provocar daños al paciente o al equipo de generación de las microondas.

En este sentido, se encuentran los sistemas estereotácticos, los cuales son instrumentos que tienen la capacidad de posicionar objetos sobre un punto específico con una gran precisión y mantener el objeto en una ubicación específica con una gran estabilidad. El problema de estos sistemas al integrarlos o adaptarlos a la ablación térmica, es que los sistemas estereotácticos están principalmente desarrollados para el campo de neurocirugía, los diseños se concentran principalmente en el cráneo humano. Un problema adicional es que estos sistemas están elaborados a base de materiales metálicos.

Por lo tanto, en esta tesis se propone el desarrollo de un sistema estereotáctico de uso específico para la implementación de tratamientos de tumores óseos mediante ablación térmica por microondas orientado a la pierna. Este sistema estereotáctico de posicionamiento tiene la característica de no interferir con el campo electromagnético que genera la antena de microondas.

En consecuencia, se propusieron diferentes tipos de materiales para elaborar las diferentes piezas que conforman al sistema estereotáctico de posicionamiento. Se investigaron las propiedades

electromagnéticas de algunos materiales para seleccionar los adecuados para la construcción del sistema de posicionamiento estereotáctico. Los materiales propuestos son: acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), ácido poliláctico (PLA), Nylamid XL y Politetrafluoroetileno (PTFE, teflón).

Se diseñó, desarrolló y evaluó un prototipo de un sistema estereotáctico de posicionamiento, adaptado a utilizarse sobre la pierna de un paciente, para la aplicación de ablación térmica mediante una antena de microondas. En este prototipo, debido a su escala reducida, se evaluaron únicamente dos ejes (Z, profundidad) y (Theta, ancho). El prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento propuesto, se adaptó a las medidas antropométricas de la población mexicana; sin embargo, el sistema tiene la capacidad de extrapolarse a diferentes partes del cuerpo o bien adaptarse a diferentes poblaciones. Para lograrlo, únicamente es necesario delimitar adecuadamente las dimensiones del sistema.

El prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento, utiliza motores a pasos para generar los desplazamientos y moverse en dirección de los ejes disponibles (Z, Theta). El prototipo tiene la capacidad de ser controlado mediante una interfaz gráfica. En dicha interfaz, se muestran también las mediciones obtenidas por los sensores que monitorean la precisión de los desplazamientos y también tiene la capacidad de exportar las mediciones obtenidas en formato (.xls) o (.csv). Los sensores se colocaron de manera estratégica en diferentes puntos del sistema estereotáctico de posicionamiento para adaptarlos y obtener los mejores resultados posibles.

Para evaluar la precisión de los desplazamientos realizados por el prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento en los ejes (Z, Theta), mediante la interfaz gráfica el usuario ingresara una coordenada o un valor numérico para que el sistema se mueva y se coloque sobre el punto deseado. Posteriormente los sensores realizan las mediciones para determinar en qué posición se encuentra y verificar si el prototipo fue capaz de posicionarse con precisión en el punto deseado.

Los mejores resultados obtenidos de las diferentes evaluaciones al prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento fueron: ± 1.52 mm para el eje Z y ± 1.52 mm para el eje Theta. Estos datos nos permitieron entender que los desplazamientos generados por los motores a pasos tienen una gran precisión.

Con estos resultados se llegó a la conclusión que el sistema estereotáctico de posicionamiento desarrollado en este tema de tesis tiene la capacidad de posicionarse con gran precisión sobre un

punto específico. También nos permitió observar la forma en que el sistema realiza los desplazamientos y las posibles modificaciones o mejoras que pueden realizarse sobre el sistema.

ABSTRACT

Bone cancer (sarcomas) is a disease that mainly affects the body's longest extremities: arms or legs. There are traditional methods such as surgery or chemotherapy or minimally invasive methods: radiotherapies and thermotherapies to combat this disease.

The thermal ablation uses microwave (MW) antennas; using an electromagnetic field generated by the antennas, the temperature is increased in a specific area for a particular time, eliminating cancer's reproductive capacity cells. This technique has minimal side effects when compared to traditional methods. This technique's drawback is the need to place the antenna on the surgical site with a high degree of precision and make a good selection of the materials. The system was built due to the electromagnetic field generated by the antennas. When in contact with metallic materials, they can alter the electromagnetic field, causing damage to the patient or the positioning system.

Stereotactic systems can place objects on a specific point with great precision and keep the object in a specific position with excellent stability. When these systems adapt to thermal ablation technique, the problem with stereotactic systems adapt mainly for neurosurgery; the designs concentrated in the human skull. The additional problem is that these systems are made based on metallic materials.

In this thesis, different materials were proposed to make the different pieces used to build the stereotactic positioning system. The materials proposed and investigated were: acrylonitrile butadiene styrene (ABS), polylactic acid (PLA), Nylamid XL, and Polytetrafluoroethylene (PTFE, Teflon).

A prototype of a stereotactic positioning system was designed, developed and evaluated, adapted to be used on the leg to apply thermal ablation using a microwave antenna. Due to its reduced scale, only two axes (Z, Theta) were evaluated in this prototype. The prototype of the stereotactic positioning system was adapted for the measurements of the Mexican population. The system can

extrapolate to different parts of the body and adapt to different populations. It is only necessary to delimit the dimensions of the system adequately.

In the section on the control of the stepper motors' movements, a graphical interface was developed and designed to enter a coordinate. The stereotactic positioning system is positioned at the indicated coordinate. The interface also exports the measurements obtained. CSV or. XLS format.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La presente investigación se enfoca a la aplicación de los sistemas estereotácticos en el campo médico. De manera particular, se incursiona en el uso de estos sistemas en la aplicación de algunas técnicas alternativas mínimamente invasivas para el tratamiento de tumores óseos. Una de las principales características de estos sistemas es la capacidad de posicionarse en un plano tridimensional e interpretar coordenadas proporcionadas por: resonancias magnéticas, tomografías, ultrasonidos, etc.

Esta investigación se realizó con el interés de generar un sistema de posicionamiento para ubicar adecuadamente una serie de antenas micro coaxiales diseñadas para el tratamiento de tumores óseos. Debido a las características específicas de la técnica de tratamiento, se deberá desarrollar un prototipo estereotáctico que se ajuste a las necesidades propias del tratamiento. La principal característica a tomar en cuenta es que el área de operación del prototipo no deberá de interferir con el campo de acción de las ondas electromagnéticas; es decir, que el prototipo deberá de construirse con materiales cuyas propiedades no causen interferencia con las ondas electromagnéticas de las antenas cuando estas últimas se encuentran activas.

En el capítulo I, se analizarán las bases fundamentales del trabajo de investigación; entre las cuales se encuentran los alcances y limitaciones de la investigación, los conceptos básicos necesarios para un entendimiento general acerca del tema de investigación y, por último, los avances más recientes sobre el tema de investigación. Sin embargo, en este último punto es importante mencionar que todo lo relacionado a sistemas estereotácticos se centra en aplicaciones para la parte superior del cuerpo, específicamente sobre la cabeza. Por lo tanto, la búsqueda bibliográfica nos servirá únicamente como referente para idear la aplicación aquí propuesta.

En el capítulo II, se presentan los conocimientos teóricos básicos necesarios para desarrollar el tema de tesis. Se presentan temas como una introducción a los sistemas estereotácticos y su funcionamiento, los materiales investigados con las características necesarias para su integración al sistema estereotáctico de posicionamiento. Se presenta la instrumentación desarrollada para lograr un desplazamiento fino del sistema propuesto: la cual consiste en utilizar las diferentes conexiones disponibles para los motores a pasos, serie o paralelo, para integrarlos y controlarlos mediante el

driver Pololu A4899. Se muestra el lenguaje de programación para el diseño de la interfaz gráfica para el control de los motores a pasos y el proceso de adquisición de datos.

En el capítulo III, se muestran los diseños realizados en Autodesk Fusion 360 y su proceso para desarrollar el prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento; así como la adaptación a las medidas de una población específica. Se presenta el proceso de manufactura de las piezas involucradas en la construcción del prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento, su ensamblaje y se presenta la descripción de su funcionamiento. De igual manera, se presentan y describen los sensores utilizados así como el acondicionamiento necesario para la adquisición de datos, su integración con la interfaz gráfica y la exportación de datos. Por último, se presentan las pruebas preliminares realizadas al prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento. Con esto, se evaluó la capacidad con la que el sistema realiza los desplazamientos en los ejes disponibles; la plataforma y lenguaje de programación y sus afectaciones al funcionamiento del sistema y por último la precisión de los desplazamientos.

En el capítulo IV, se presentan los resultados obtenidos después de evaluar la precisión de los desplazamientos realizados por el prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento, después de corregir todas las observaciones y mejorar el funcionamiento del sistema.

1.2 PROBLEMÁTICA

El cáncer es una de las enfermedades con una alta tasa de mortalidad en el mundo [1], por lo cual, se han investigado y desarrollado nuevas alternativas de tratamiento para combatirlo de una manera eficiente. Los tratamientos más comunes son la quimioterapia, la cirugía y la radioterapia. Sin embargo, actualmente existen técnicas clasificadas como mínimamente invasivas y no invasivas. Estas técnicas utilizan principalmente las microondas, radiofrecuencia y ultrasonido. Una de las técnicas que utiliza microondas para su funcionamiento es la ablación térmica, en esta técnica es necesario el uso de antenas. En términos generales, la ablación térmica mediante antenas de microondas consiste en generar un campo electromagnético, este campo eleva la temperatura en las inmediaciones de la antena alcanzando temperaturas en un rango de 60 °C a 100 °C durante un tiempo determinado.

En este tema de tesis nos enfocaremos a la técnica que utiliza antenas microcoaxiales para lograr la ablación del tejido tumoral. Actualmente, en el Instituto Nacional de Rehabilitación-Luis Guillermo Ibarra Ibarra, se está desarrollando un sistema de antenas microcoaxiales para el tratamiento de tumores óseos. Por lo tanto, es necesaria la propuesta y el desarrollo de un sistema estereotáctico para el posicionamiento de la/las antenas en un plano r , θ , z . Es importante mencionar que la ablación térmica es una técnica mínimamente invasiva y no genera efectos secundarios en el paciente en comparación con los tratamientos más comunes, como la quimioterapia. A pesar de las ventajas de esta técnica respecto a algunas otras, es posible encontrar algunos inconvenientes en cuanto al método de aplicación. Es decir, debido al tamaño y a la estructura de las antenas es necesario contar con un sistema de posicionamiento externo que permita guiar y fijar a la antena en la posición deseada. Además, en este caso el sistema de posicionamiento estereotáctico no debe de interferir con el campo de acción de las antenas; esto debido a que el sistema de posicionamiento podría provocar alguna alteración en el funcionamiento de las antenas. Dichas alteraciones podrían deberse principalmente a las propiedades electromagnéticas de los materiales a partir de los cuales se construirá el sistema estereotáctico. Se deben de evitar principalmente materiales metálicos, que puedan causar una interferencia electromagnética con el campo electromagnético que generan las antenas micro coaxiales.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El cáncer es una de las enfermedades con mayor tasa de mortalidad [1], debido a ello se cuentan con varias alternativas para su tratamiento, estas pueden dividirse en invasivas, mínimamente invasivas y no invasivas [2]. Entre las técnicas mínimamente invasivas se encuentran los tratamientos de ablación térmica con microondas para el tratamiento de diferentes tipos de cáncer [2][3]. Este tipo de tratamiento se aplica particularmente a través de antenas microcoaxiales. El uso de este tipo de antenas genera la necesidad de disponer de medios adecuados de posicionamiento que no interfieran con el campo de radiación electromagnética de las antenas, y al mismo tiempo proporcionen precisión en el posicionamiento de la antena. Por lo tanto, es necesario un sistema de posicionamiento que tenga tanto la capacidad de adaptarse a la aplicación, como proporcionar una gran estabilidad y precisión al posicionar la antena sobre un punto específico.

Es de gran importancia desarrollar un sistema estereotáctico debido a su importancia en los diversos tratamientos médicos en los cuales es necesario localizar el blanco quirúrgico o posicionarse en un punto específico con gran precisión. Por lo tanto, la presente investigación buscará desarrollar un sistema de posicionamiento estereotáctico para su uso en el tratamiento de tumores óseos mediante ablación térmica utilizando antenas microcoaxiales. Este dispositivo será útil para la comunidad médica en el servicio de tumores óseos del Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra

1.4 HIPÓTESIS

Es posible desarrollar un sistema estereotáctico de posicionamiento, para un arreglo de antenas microcoaxiales para el tratamiento de tumores óseos mediante ablación térmica, que cuente con un control que permita definir los ángulos y profundidades de inserción de cada antena, y que no interfiera con el campo electromagnético generado por las antenas.

1.5 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y desarrollar un sistema estereotáctico de posicionamiento tridimensional (r , Θ , Z) que no modifique el campo electromagnético generado por las antenas de microondas cuando se utilice en el tratamiento de ablación térmica.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un diseño de un sistema estereotáctico de posicionamiento. Esto con la finalidad de analizar las diferentes opciones para manufacturar los diferentes componentes o piezas utilizadas como su manera de ensamblaje. Mediante estos diseños también es posible analizar como el sistema de posicionamiento estereotáctico realizara los desplazamientos necesarios para el posicionamiento de la antena.
- Construir un prototipo de un sistema estereotáctico de posicionamiento, para evaluar la precisión de los desplazamientos y analizar posibles modificaciones. Esto serviría para validar el diseño y realizar una adaptación del prototipo a un sistema adaptado a las medidas de la población mexicana.
- Desarrollar un programa para un posicionamiento tridimensional para el control de la dirección y magnitud de los desplazamientos del sistema de posicionamiento estereotáctico.

1.7 PROPUESTA DE SOLUCIÓN.

El proceso propuesto para el desarrollo de este tema de tesis se muestra en la Figura 1. La primera etapa por realizar consiste en realizar una revisión bibliográfica para obtener la información acerca de los conceptos básicos, como también, los diferentes tipos de sistemas estereotáticos y sus aplicaciones. En la segunda etapa se realizará el diseño de un prototipo estereotático que cumpla con las características que se establecieron al principio de este proyecto. Este diseño se realizará en un software de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) Autodesk Fusion 360.

Posteriormente, en la tercera etapa se realizará la revisión del diseño para verificar que cumpla con las condiciones establecidas anteriormente. Al finalizar esta etapa, procederíamos a la cuarta etapa que consiste en elaborar el prototipo físico y, por último, la etapa de pruebas eliminares para evaluar la capacidad del prototipo del sistema estereotático de posicionamiento.

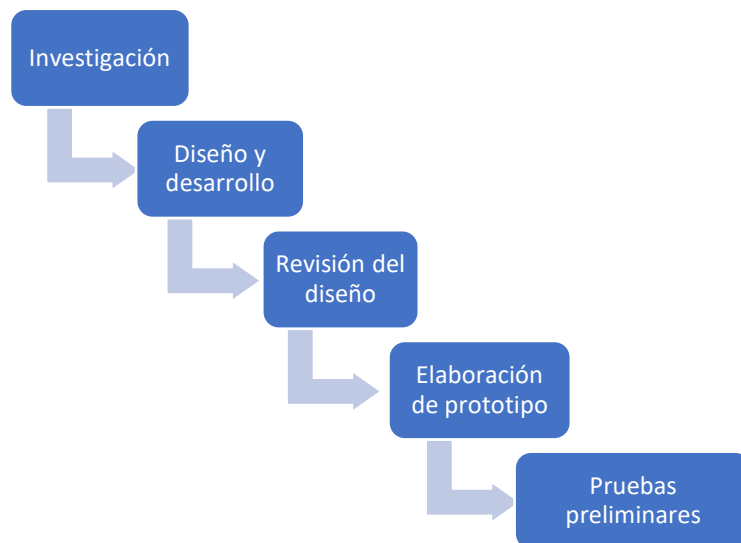


Figura 1 Diagrama de los pasos que se realizaran para resolver el tema de tesis.

1.8 ESTADO DEL ARTE

1.8.1 Sistemas estereotácticos

Un sistema estereotáctico es una herramienta dentro de la neurocirugía utilizada para diversos procedimientos quirúrgicos o para el tratamiento de cierto tipo de enfermedades. Este tipo de sistemas es una gran alternativa debido a la facilidad con la que pueden ser manipulados por el personal médico, como también dirigirse con gran precisión a las coordenadas específicas del blanco quirúrgico. Este tipo de sistemas están orientados principalmente al cráneo.

Miranda y colaboradores [4] reportan la fabricación y funcionamiento de un marco estereotáctico que tiene como objetivo el asistir en la colocación de un instrumento estereotáctico en el cráneo, este marco funciona mediante movimientos en el plano "x, y", es decir, realiza únicamente movimientos horizontales y verticales. El material reportado para la construcción del sistema fue PVC espumoso. El objetivo del prototipo fue registrar y corregir los desplazamientos horizontales y verticales durante el montaje de algún instrumento en el cráneo, por ejemplo: un marco estereotáctico. En la Figura 2 se muestra que el sistema está conformado por dos contenedores (1), dos laminas graduadas en milímetros (3) y un perno (2). Se puede también observar la dirección de los desplazamientos que realizara el sistema, (D1) para el desplazamiento vertical y (D2) para el horizontal.

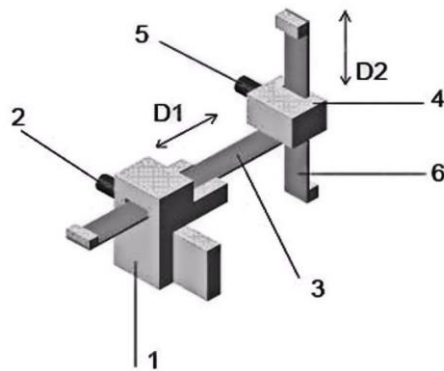


Figura 2 Vista isométrica de los componentes utilizados para el apoyo al montaje del marco estereotáctico.

En la Figura 3 se muestra el sistema ensamblado al marco estereotáctico para el montaje final.

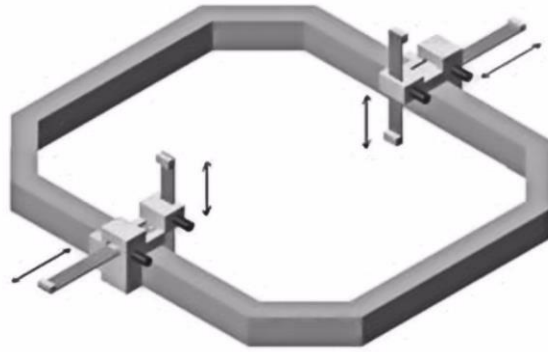


Figura 3 Se muestran las direcciones en las cuales el sistema se puede desplazar para corregir una mala colocación del marco estereotáctico.

Carballo-Barreda y colaboradores [5] reportaron el desarrollo de un atlas computarizado estereotáctico Shaltenbrand y Wahren para la planificación de neurocirugías funcionales guiadas por imágenes. Los resultados fueron positivos debido a que lograron reducir el número de trayectos realizados para poder posicionarse en el punto deseado y también una mejora en la exactitud de la localización del primer blanco quirúrgico. Esta investigación se realizó como un complemento al sistema de planificación STASSIS.

En ocasiones los marcos estereotácticos han sido investigados por varios objetivos diferentes, por ejemplo, el marco estereotáctico de *Leksell*, este dispositivo fue analizado por Alptekin y colaboradores [6] para verificar las variaciones que se pueden presentar si el marco no se encuentra posicionado correctamente, en este caso particular se utilizó el marco estereotáctico de *Leksell* tipo G, en conjunto con un localizador N para la planificación y localización del sistema. Los resultados obtenidos fueron que si el marco no se encuentra posicionado de una manera isométrica (sin desviaciones, inclinaciones, giros, etc.), la precisión en los ejes X y eje Y, no se ve afectada de una manera significativa. Pero en el caso del eje Z se observó un error significativo como una variación en los cálculos de planificación teóricos y experimentales. En la Figura 4 se puede apreciar el sistema descrito.



Figura 4 Proceso que se realizó en la evaluación del montaje de un marco estereotáctico utilizando un modelo Phantom, para observar las distorsiones del sistema durante su montaje.

En el caso de Renier y Massager [7], de igual manera se utilizó el marco estereotáctico de *Leksell* tipo G, esta investigación posee una similitud con el caso anteriormente descrito. Uno de los objetivos de la investigación fue verificar si el marco estereotáctico presentaba alguna afectación o deformación mecánica durante su colocación. Esta investigación busco el impacto de las deformaciones que se presentaron durante la fijación del marco en los procedimientos quirúrgicos. Dentro de estos procedimientos se consideraron la radiocirugía estereotáctica (GammaKnife), estimulación cerebral profunda (DBS) y biopsias cerebrales estereotácticas. En la Figura 5 se presenta las posibles deformaciones que se pueden presentar en el marco estereotáctico de *Leksell* al fijarse en el cráneo del paciente.

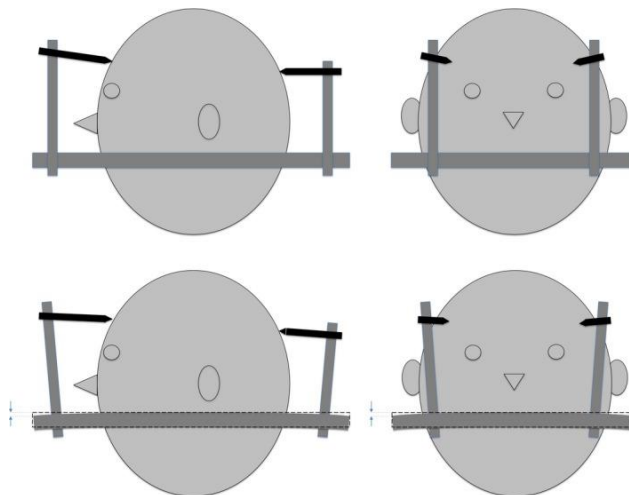


Figura 5 Distorsión del marco estereotáctico de *Leksell* debido a la fijación del paciente. Imágenes superiores: vista sagital y coronal sin distorsión. Imágenes inferiores: vista sagital y coronal con distorsión. [4]

En la literatura disponible se encuentran más investigaciones realizadas al marco estereotáctico de Leksell, en particular sobre la estabilidad del marco en el área de la radiocirugía, caso particular de *Gamma Knife* [8]. Por otro lado, también se encuentra publicada una investigación realizada por Takamitsu [9] utilizando el marco de *Leksell* para las biopsias craneales profundas, reportando resultados satisfactorios en un rango que se encuentra desde los ganglios basales a tronco encefálico y por último se encuentra publicada una investigación de Nakasawa [10] donde se analizó el marco para evaluar las distorsiones que provocan el uso de diferentes tipos de tornillos para la fijación del marco en el cráneo, el método que ocuparon para la comprobación fue la comparación de las imágenes obtenidas por la resonancia magnética (MR) en diferentes escalas.

Incluso se encuentran investigaciones relacionadas a los marcos estereotácticos en el área de la medicina veterinaria, como es el caso de Edwards y colaboradores [11] en donde se reporta el desarrollo y experimentación de un sistema de posicionamiento estereotáctico ajustable, reutilizable y compatible a la planeación estereotáctica guiada por la resonancia magnética de imágenes (MRI), este sistema utilizado en primera instancia en cerdos para la experimentación y posteriormente en un cadáver humano esto se muestra en la Figura 6.

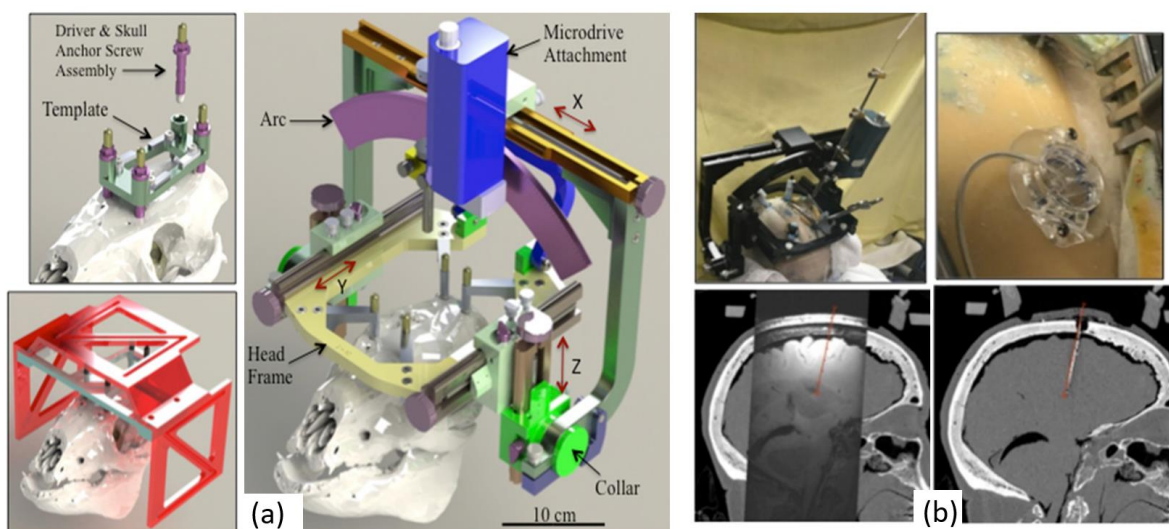


Figura 6 (a) Sistema estereotáctico diseñado para el cráneo de un cerdo. (b) Sistema estereotáctico trasladado al cráneo humano. [8]

En otra aplicación reportada por Squires [12] se desarrolló de un marco estereotáctico para procedimientos mínimamente invasivos en caninos, la guía de este sistema es por resonancia de

magnética de imágenes, con el objetivo de proporcionar a los veterinarios un sistema capaz de realizar biopsias cerebrales con un sistema que proporcione una gran precisión al ubicar el blanco quirúrgico y de bajo costo. En la Figura 7 se muestran diferentes vistas del sistema estereotáctico desarrollado, se muestra en (a) una vista frontal del arco estereotáctico, (b) se muestra una vista frontal de marco Z y, por último, en (c) se presenta una vista lateral del marco Z como la dirección que puede tomar con respecto al eje X

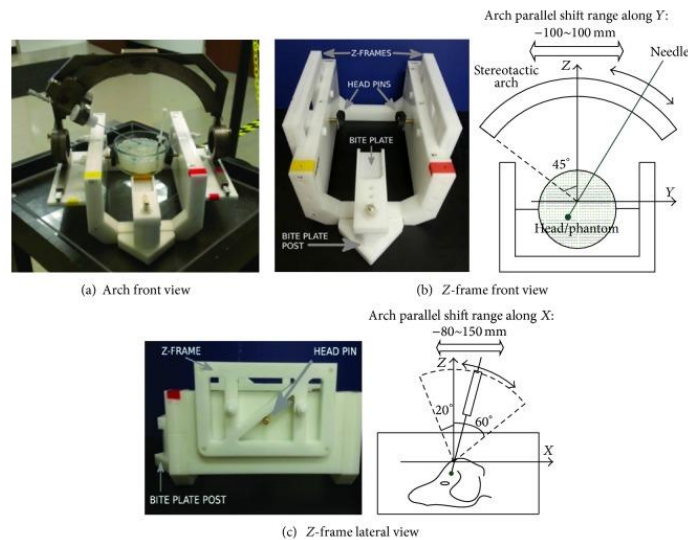


Figura 7 Marco estereotáctico reportado en [9] ensamblado con su guía.

1.8.2 Tipos de tratamientos para combatir los tumores óseos

El cáncer se define como la división descontrolada de las células en un tejido. Las células cancerígenas se comportan de manera diferente a las células sanas, debido a que, las células sanas son capaces de cumplir con su función y posteriormente morir, las células cancerígenas no mueren y siguen produciendo células anormales [13]; las cuales en algunas situaciones se movilizan a otras partes del cuerpo, a este comportamiento de las células se le conoce como metástasis.

El avance en las técnicas de tratamiento para combatir el cáncer nos ha dejado diferentes tipos de técnicas; cirugías, quimioterapias y radiocirugías, por mencionar algunas. Actualmente, los tratamientos para el cáncer de hueso (cáncer óseo) están limitados a la cirugía, la radioterapia, quimioterapia y combinación de ellas.

Trujillo y colaboradores [14] mencionan algunas de las técnicas alternativas utilizadas para el tratamiento de tumores óseos empleado procedimientos mínimamente invasivos. Dentro de estas técnicas se encuentra la ablación térmica, que consiste en elevar la temperatura de una zona específica por un tiempo determinado. La ablación térmica puede utilizarse con radiofrecuencia, microondas y ultrasonido, en la Tabla 1 se presenta de manera comparativa las ventajas y desventajas de cada modalidad de la ablación térmica. Este procedimiento no genera un daño generalizado a todo el cuerpo en comparación a la quimioterapia. Esto es porque la ablación térmica se aplica en una zona específica.

Tabla 1 Tabla comparativa de las ventajas y desventajas de la ablación térmica aplicada de diferentes maneras[14].

Aplicación	Ventajas	Desventajas
Ablación térmica por ondas de Radio Frecuencia (RF)	<ol style="list-style-type: none"> 1. No genera molestias a los pacientes durante su aplicación. 2. Puede combinarse con otros tratamientos para generar un mejor resultado. 3. El paciente requiere poco tiempo de recuperación. 4. Posibilidad de tratar pacientes los cuales no pueden ser sometidos a cirugías. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Puede generar ligeras quemaduras. 2. No es posible aplicarse en zonas donde los tejidos u órganos son sensibles a altas temperaturas. 3. Requiere un sistema sofisticado de planeación. 4. No se puede observar el volumen que se quemó durante el tratamiento.
Ablación térmica por microondas	<p>Comparte las mismas ventajas que la ablación térmica por RF.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Cuenta con un mayor rango de temperatura. 2. Abarca una mayor área para el tratamiento. 3. El tratamiento requiere menor tiempo de aplicación. 	<p>Comparte las mismas desventajas que la ablación térmica por ondas de radio frecuencia.</p>
Ablación térmica por ultrasonido.	<ol style="list-style-type: none"> 1. No genera daños durante su aplicación 	<p>Comparte las mismas desventajas que la ablación</p>

	<p>al paciente (técnica no invasiva)</p> <p>2. Puede repetirse el tratamiento hasta lograr el resultado deseado</p>	<p>térmica por ondas de radio frecuencia.</p> <p>1. Se requiere de variar lo parámetros de tiempo y energía para lograr un mejor resultado.</p>
--	---	---

Esto se logra mediante el uso de antenas que son colocadas en el área de interés con gran precisión debido a que sus trayectorias regularmente se encuentran basadas en imágenes obtenidas a través de: tomografías computarizadas o resonancia magnética.

Por otro lado Fernández y colaboradores [15] mencionan las siguientes desventajas con respecto a la rehabilitación mediante ablación térmica: La ablación incompleta, recurrencia de aplicaciones, resultados deficientes comparados con otros tipos de tratamientos convencionales y daño en los tejidos causados a por las temperaturas a las cuales el tratamiento es realizado.

En el caso de las antenas de ablación, Pinilla [16] reportó el diseño y comportamiento teórico de un modelado de antenas que se planean aplicarse para el tratamiento de tumores óseos mediante ablación térmica. Para ello se utilizaron dos tipos de antenas de microondas; la de doble ranura y la de doble ranura con recubrimiento. El objetivo de la investigación fue enfocar las ondas electromagnéticas (EM) hacia el tumor, evitando afectar el tejido sano circundante. En la patente US2005049486 [17] se menciona que el método con microondas resulta ser el método más eficaz para el tratamiento de tumores óseos.

1.9 ESTADO DEL CAMPO

Martínez en su documento de patente [18] se describe la invención de un equipo estereotáctico que tiene como objetivo hacer tratamientos de neurocirugía; tomar biopsias de tumores, remover quistes cerebrales o problemas derivados de la enfermedad de Parkinson. Este equipo está conformado por un marco de referencian que se encuentra colocado en el cráneo y se encuentra fijado mediante tres tornillos, un brazo rotatorio que puede colocarse en el área de la lesión y que permite localizar el área en un sólo cuadrante.

Por otro lado, Gale [19] inventó un dispositivo para centrar el marco estereotáctico en el cráneo durante su montaje, únicamente cuenta con movimientos horizontales y verticales. Este dispositivo se diseñó principalmente para proporcionar asistencia durante la cirugía debido a que su característica principal es el registro y corrección de desplazamientos (x, y).

Carol [20] menciona la implementación de un equipo estereotáctico que resulta un complemento para la implantación precisa de algún instrumento (electrodo de registro, electrodo de estimulación, un instrumento de biopsia, un catete o similares) en un área específica del cerebro del paciente. Este dispositivo puede incluir un marco para asegurarse con la cabeza de paciente, en algunos casos puede tener forma de “u” como lo muestra la Figura 8. Este dispositivo también puede incluir una guía unida entre ambos lados del cuerpo del dispositivo para mover un instrumento sobre el área del objetivo, esta guía tiene la capacidad de fijarse en una posición específica para facilitar la inyección del instrumento en el área del objetivo.

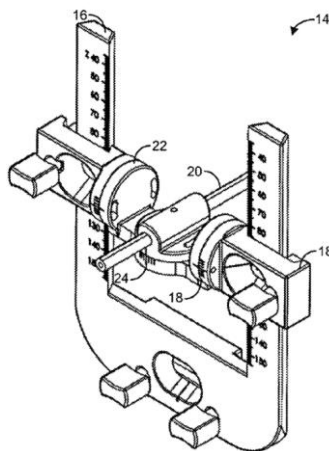


Figura 8 Dispositivo auxiliar estereotáctico [18],

Por último, en *Modern stereotactic neurosurgery* [21] se describe un dispositivo como también un método para mostrar la ruta más óptima entre un objetivo seleccionado y así ser capaz de guiar los

instrumentos quirúrgicos. Este sistema está conformado por un sistema de visualización de imágenes, un brazo articulado y un sistema estereotáctico. Los subsistemas se acoplan entre sí, el sistema de visualización de imágenes es capaz de identificar el objetivo dentro del cerebro del paciente y proyectar una trayectoria para desplazarse desde la posición externa al objetivo. El cirujano después de evaluar la trayectoria puede bloquear el sistema estereotáctico y conservar la última posición en la cual el sistema se encuentra posicionado.

CAPÍTULO II. Marco Teórico

Se pretende desarrollar un sistema con la capacidad de posicionarse de manera precisa sobre un blanco específico dentro de la pierna. Para el desarrollo del sistema, es necesaria la adquisición de los diferentes conocimientos mecánicos, electrónicos, propiedades de los materiales, así como el conocimiento para el procesamiento de señales y elaboración de interfaces graficas.

2.1 Sistemas Estereotácticos

Un sistema estereotáctico puede definirse como la herramienta utilizada en neurocirugía para la localización del blanco quirúrgico o también para la realización de biopsias de lesiones en el cráneo donde se requiere una gran precisión para su localización. Este tipo de sistemas se encuentran de igual manera en aplicaciones terapéuticas como lo son: implantes, radiocirugías, tratamiento de hematomas, por mencionar algunas, la Figura 9 muestra un ejemplo del uso de un sistema estereotáctico durante una cirugía.

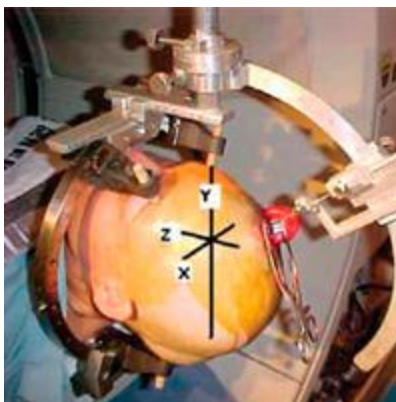


Figura 9 Sistema estereotáctico utilizado en neurocirugía.

Este tipo de sistemas generalmente se encuentran conformados por las siguientes piezas[22]:

1. Marco estereotáctico: este marco puede variar según el autor, ejemplos de ello son: redondo (sistema Zamorano), rectangular (MICROMAR), cuadrado (*Leksell*), oblongo (sistema *stereoflex*). Estos marcos se fijan al cráneo de diferentes maneras, en el caso general de la neurocirugía se colocan puntas o torres de materiales que no causen interferencias con los diversos tipos de estudios e instrumentos utilizados durante la operación.
2. Cascos, localizadores o sistemas de referencias.
3. Guía estereotáctica: es un soporte que tiene la capacidad de deslizarse sobre el marco.
4. Instrumentación

5. Sistema de planificación.

Cualquier sistema estereotáctico actual puede clasificarse de 4 diferentes maneras posibles[23], sistema de coordenadas polares, sistema de arco centrado o radiante, sistema de arco cuadrante y sistema de coordenadas no polares, en la figura 10 se muestran tres de los sistemas más comunes.

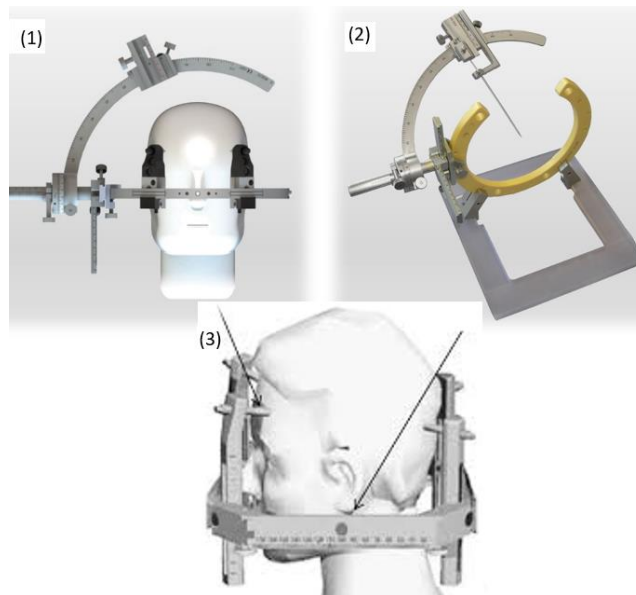


Figura 10 (1) Marco estereotáctico redondo (Sistema Zamorano, Inoded). (2) Marco estereotáctico ZD (Inoded). (3) Marco estereotáctico de Leksell.

2.2 Sistema de posicionamiento

Los sistemas de posicionamiento son utilizados para la colocación de una herramienta o instrumento en una posición o coordenada específica, este tipo de sistemas pueden ser utilizados en el sector industrial o de investigación, como también se pueden emplear diferentes mecanismos para generar los desplazamientos del sistema estereotáctico para posicionarse sobre el objetivo o punto de interés.

En el caso particular de este tema de tesis, se consideró construir un prototipo en el cual los desplazamientos se realizarán por medio de un arreglo de bandas dentadas o también conocidas como correas dentadas las cuales estarán sujetas a un sistema de poleas o rieles, esto es para desplazarse sobre el eje Theta. En el caso del eje Z, se plantea utilizar como referencia los sistemas de posicionamiento de maquinarias como las CNC o fresadoras.

2.2.1 Bandas o correas dentadas

Las bandas o correas son consideradas como herramientas de transmisión, son de constitución flexible, estas correas se acoplan a poleas solidas o engranes con el objetivo de transmitir pares de giro. Su constitución flexible permite cierta libertad mecánica al momento de su montaje. Estas también poseen un comportamiento de amortiguador, debido a su capacidad de reducir la vibración que se encuentra entre los ejes de transmisión. Entre sus desventajas se encuentra la imposibilidad de garantizar una estabilidad de transmisión constante entre ejes, debido principalmente a una deficiente colocación entre correa y polea, o problemas en el tensado de la correa.

Las correas se clasifican de la siguiente manera, Figura 11:

- Correas planas
- Correas trapezoidales “V”
- Correas dentadas o síncronas (timing belts)

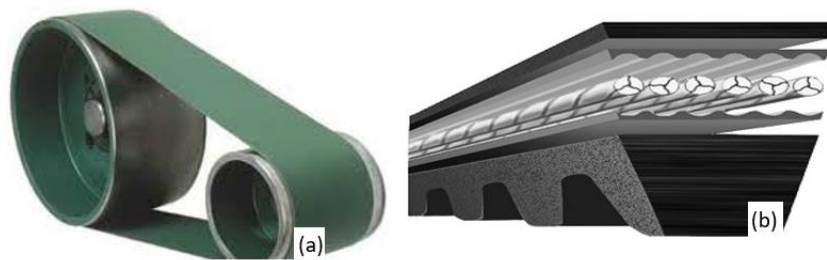


Figura 11 Muestras de los diferentes tipos de poleas (a) planas y (b) trapezoidales.

Las correas que cuentan con un mayor ámbito de aplicación son las correas dentadas o síncronas, debido a su capacidad de transmisiones compactas y su diámetro reducido. Estas correas cuentan con un menor riesgo de deslizamiento sobre la polea debido a su dentado que proporciona una mayor flexibilidad que le permite adaptarse de manera óptima a poleas de diámetros reducidos. Este tipo de correas son utilizadas en aplicaciones en donde se requiera exactitud al posicionar un objeto, en aquellas aplicaciones en las cuales no sea posible un mantenimiento regular como la lubricación o engrase de los componentes, este tipo de correas síncronas es una opción. Las bandas dentadas también se encuentran presentes en el sector automotriz o sector industrial.

En la Tabla 1, se presentan las diferentes medidas que se pueden encontrar de bandas dentadas para aplicaciones de una escala reducida.

Tabla 2 Ejemplo de dimensiones de correas síncronas según norma ISO/5296.

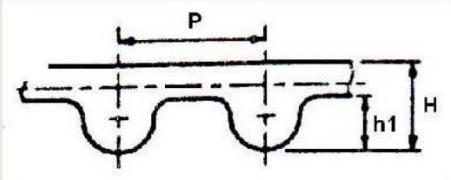
Dimensiones para correas sincronas de perfil curvilíneo HTD		
		
Paso, P mm	H mm	h1 mm
3	2,40	1,20
5	3,80	2,10
8	5,60	3,40
14	10,00	6,10

Figura 12 Distribución de las medidas para seleccionar una banda dentada con respecto a la normativa ISO 5296.

2.3 Motores a pasos

Es un dispositivo electromecánico que funciona a través de una señal de pulsos eléctricos los cuales son transformados a desplazamientos angulares, es decir, es capaz de moverse una cantidad determinada de grados, paso o medio paso, dependiendo de la entrada.

La característica principal de esos dispositivos electromecánicos es su capacidad de poder moverlos un paso a la vez cuando reciben un pulso eléctrico, este movimiento es diferente con el tipo del motor que se seleccione, en el caso específico del motor modelo Nema 17 (Mirar Figura 17) el giro es de 1.8° por cada paso. También tienen la capacidad de quedar fijos (enclavados) en una posición específica cuando una o más de sus bobinas se encuentran recibiendo algún pulso eléctrico o cuando se encuentran totalmente libres de estos.

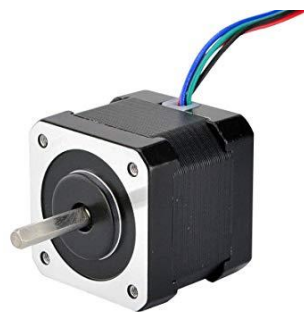


Figura 13 Motor Nema 17.

2.3.1 Tipos de funcionamiento en los motores paso a paso

Existen diferentes tipos de motores a pasos como lo son el motor de reluctancia variable, el motor de magnetización permanente, y el motor híbrido[24]. Los motores de reluctancia variable consisten en un rotor multipolar de hierro y un estator devanado, este último podría estar laminado. Sus bobinados se encuentran arreglados de tal manera que tengan 120° entre cada par de ellos. Su funcionamiento se da cuando uno o más dientes cercanos al rotor son atraídos a las bobinas energizadas. Cuando el motor no se encuentra energizado su par estático es cero.

Una de las características principales dentro de este tipo de motores es su rápida respuesta, pero tienen como desventaja una baja inercia con lo cual la carga es pequeña, es por eso por lo que este tipo de motores están orientados a aplicaciones donde no se requiere demasiado torque.

Los motores a pasos híbridos o también llamados motores de reluctancia variable e imán permanente, están conformados por un rotor de imán permanente y un estator dentado. Este tipo motor cuenta con una alta precisión, el ángulo mínimo que puede proporcionar por movimiento es 1.8° .

Por último, los motores a pasos de imán permanente se encuentran conformados por un estator de polos devanados y los polos del rotor son imanes permanentes, estos motores pueden mantener un cero en algunos de sus pares cuando no se encuentran energizados. El ángulo de rotación se puede configurar por el número de polos en el estator. Según la literatura dependiendo de su construcción es posible obtener pasos angulares de 7.5 , 11.25 , 15 , 18 , 45 o 90° . En este último, se divide en dos tipos de motores de imán permanente: Unipolares y Bipolares, en la Figura 14 se presenta como se encuentran conectadas las bobinas internamente.

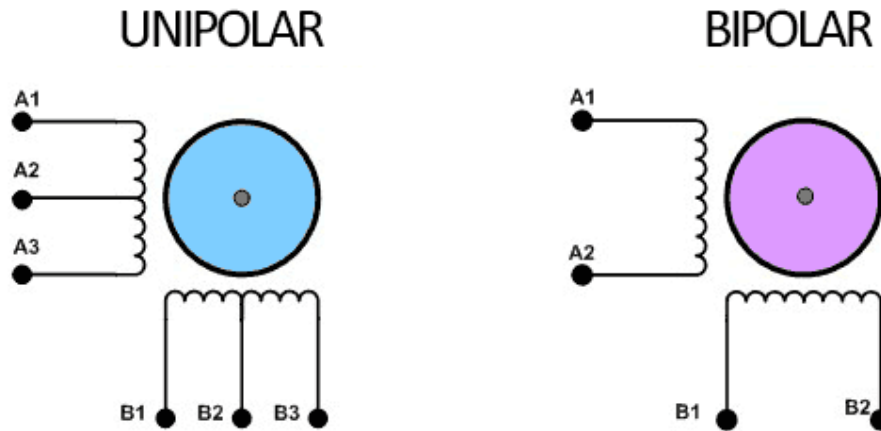


Figura 14 Configuración de la bobina de un motor unipolar y bipolar, respectivamente.

Los motores unipolares cuentan en promedio con 5 o 6 terminales dependiendo de su conexión interna, regularmente 4 terminales son las que reciben los pulsos eléctricos que determinaran la duración y la secuencia. Este tipo de motores son más simples de caracterizar que su contraparte bipolar.

Los motores bipolares tienen 4 terminales de salida, estos motores son más difíciles de controlar debido a que requieren del cambio en la dirección del flujo de corriente. La corriente se pasa por las bobinas con una secuencia adecuada para realizar los movimientos que se requieran en ese momento, por lo cual es necesario un dispositivo que controle estos cambios. Algunos de los controladores disponibles son: A4899, TB6560, TB6060. Las diferencias de los controladores anteriormente mencionados se encuentran en la cantidad de motores que pueden controlar, la corriente máxima de operación y la temperatura de operación.

2.3.2 Control de motores a pasos con controlador Pololu A4988

El circuito Pololu A4988 es un controlador para motores a pasos, es decir, el dispositivo genera los pulsos requeridos en la secuencia adecuada para su funcionamiento, entre sus características se encuentran una protección contra un aumento drástico de corriente y temperatura. También puede considerarse un dispositivo de tamaño compacto debido a sus medidas, 20.32mm de largo y 15.24

mm de ancho. En la Figura 15 se presenta el Driver Pololu A4899 para el control de motores a pasos y establecer diferentes modos de configuración.

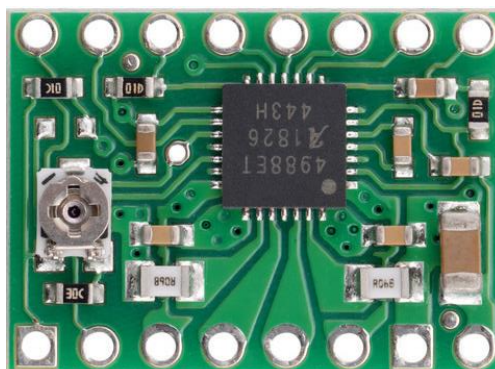


Figura 15 Driver Pololu A4899

El dispositivo tiene un amplio rango de alimentación en cuestión de voltaje, y con respecto a la corriente; puede manejar 1A por fase y 2A si se agrega un disipador de calor, debido a que, un aumento en la corriente que pase por el dispositivo ocasionará un aumento considerable de temperatura de la cual se pueden derivar en daños en el dispositivo. En la Tabla 2, se presenta las características eléctricas importantes para el manejo del Driver Pololu A4899 proporcionado por la página oficial del fabricante.

Tabla 3 Especificaciones técnicas relevantes controlador Pololu A4899.

Voltaje de alimentación (V)	8 – 35 V
Corriente (A)	1A por fase y 2A con disipador de calor
Modos de Operación	5
Temperatura	-55 °C a 150 °C
Motores por chip	1

El circuito Pololu A4899 cuenta con 5 modos de operación disponibles los cuales deben configurarse para seleccionar la mejor opción para alguna aplicación determinada. La Tabla 3 muestra los diferentes modos de operación y la forma correcta de configurarlos, estos datos son proporcionados por el fabricante [16].

Tabla 4 Configuración para la selección de resolución del A4899.

MS1	MS2	MS3	Resolución de paso
Low	Low	Low	1
High	Low	Low	½
Low	High	Low	¼
High	High	Low	1/8
High	High	High	1/16

2.3.3 Modos de conexión de motores a pasos

La conexión de los motores a pasos varía dependiendo de la aplicación, en ocasiones es necesario utilizar más de un motor para una determinada aplicación. Por ejemplo, el controlador Pololu A4899 tiene la capacidad de controlar un motor a pasos, pero considerando una aplicación que requiere un número mayor de motores a pasos, un solo controlador podría no tener la capacidad de proporcionarnos los resultados que requerimos. Una consideración adicional sería la sincronización de motores, debido a que, si utilizamos una configuración de dos motores a pasos y dos controladores, podrían tener una diferencia entre paso y paso y obtendríamos un error que se acumularía provocando fallas en el sistema en general. Un problema adicional por considerar sería el caso de compartir la misma señal de un controlador para dos motores a pasos, por lo cual, tendríamos un problema debido a que, por las impedancias de ambos motores tendríamos una pérdida de voltaje, lo que provocaría que ambos motores no funcionaran de una manera óptima.

En consideración a las observaciones anteriores, se presentan dos alternativas para la conexión de motores a pasos para reducir el número de componentes involucrados y lograr su mejor manejo.

Tipos de conexiones disponibles:

- **Serie:** En esta configuración sería posible la manipulación de dos motores con un solo controlador, únicamente deberíamos aumentar el voltaje de nuestra fuente de alimentación. Por ejemplo, si ocupamos una alimentación de 12 V, deberíamos de aumentar a 24 V, con esta modificación mantendríamos la corriente de 1 A, para ambos motores. En caso de necesitar una menor corriente no tendríamos la necesidad de aumentar el voltaje de alimentación.
- **Paralelo:** En esta configuración es posible conectar dos motores a un solo controlador, pero el amperaje que ingresa debería ser el doble para que ambos funcionen de una manera adecuada, pero esta configuración no es viable debido a que el controlador podría no ser

capaz de manejar un alto valor de corriente. Por otro lado, en esta configuración si uno de los motores a pasos presentase una falla durante su operación puede provocar un daño colateral al segundo motor y al driver.

2.4 Lenguaje de programación: *Python*

Python es un lenguaje de programación interpretado, multiparadigma y multiplataforma utilizado principalmente en: Big Data, Inteligencia artificial (IA), Data Science, frameworks de pruebas y desarrollo web. Esta desarrollado bajo una licencia de código abierto.

Se explica más detalladamente las características de Python en la siguiente lista:

- Interpretado: Python “interpreta” el código escrito por el programador, es decir, lee una línea de código, la traduce y ejecuta a la vez. Repite este proceso hasta finalizar todo el código.
- Multiparadigma: Admite el uso de varios modelos de programación como lo son: la programación orientada a objetos, programación imperativa y programación funcional.
- Multiplataforma: Se puede programar y ejecutar Python en las plataformas Unix, Linux, MacOS y Windows, básicamente es un lenguaje portable que puede utilizarse en cualquier sistema operativo.
- Variables: Python es de tipado dinámico, permite que una variable tome valores de distinto tipo (int, float, double) o esta se adapta a lo que escribamos.

Python actualmente es muy utilizado para el Análisis de datos (Data Analysis) y Machine learning [REF], pero Python se puede utilizar para diferentes áreas, como lo son:

- Web Development (Back – end con Django)
- Machine Learning
- DevOps

2.4.1 Protocolo StandardFirmata para la comunicación Arduino – Python

StandardFirmata es un protocolo de comunicación genérico basado en Firmata empleado para que una computadora establezca una comunicación con los microcontroladores. Es decir, si el usuario desea controlar la placa Arduino desde un PC u otro dispositivo, y que toda la programación se encuentre en este mismo, dejando a la placa Arduino únicamente para la ejecución de las ordenes o procedimientos que se encuentre en el programa.

Básicamente, este protocolo de comunicación convierte al Arduino en un servidor (recibirá solicitudes y tiene la capacidad de enviar datos) y el computador del usuario funcionará como un cliente (enviará las solicitudes al Arduino y recibirá los datos que provienen de este). Este tipo de comunicación es utilizada cuando el Arduino requiere conectarse o comunicarse con otro dispositivo o una interfaz gráfica de usuario.

En la Figura 16, se presenta el procedimiento para encontrar el programa que nos permite utilizar Firmata en la aplicación de Arduino. Se ingresa a Archivo>Ejemplos>Firmata>StandardFirmata, este último es el que se subirá (Figura 15, Círculo rojo) a la placa de Arduino.

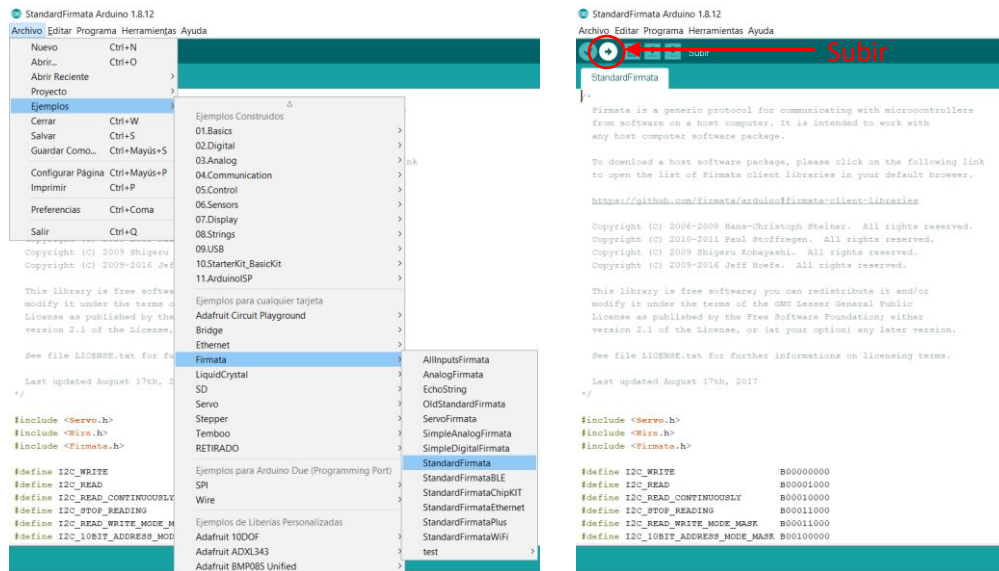
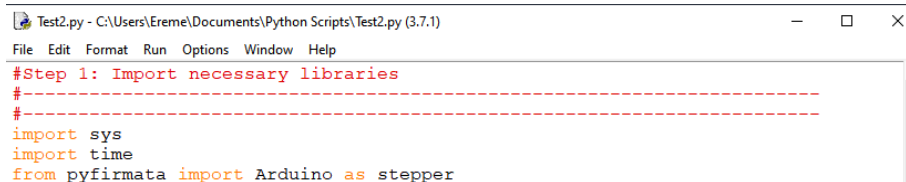


Figura 16 Procedimiento para localizar y subir el archivo StandardFirmata a la Tarjeta Arduino.

Python tiene una librería que tiene la capacidad de comunicarse con el protocolo StandardFirmata, se le conoce como PyFirmata. Con dicha librería, a través del IDLE de Python (versiones 2.7 y

posterior), es posible manipular la tarjeta de Arduino mediante lenguaje *Python* en lugar de utilizar C++ originalmente en el IDE de Arduino. Con PyFirmata es posible utilizar todos los puertos, analógicos y digitales, como también la generación y control de señales PWM entre otras funciones. En la Figura 17 se presenta la declaración de la librería PyFirmata para comunicarse con el protocolo StandardFirmata, se está utilizando el IDLE por defecto de Python, pero se pueden utilizar otros compiladores de código como Anaconda, Pycharm y Visual Code.



```
Test2.py - C:\Users\Ereme\Documents\Python Scripts\Test2.py (3.7.1)
File Edit Format Run Options Window Help
#Step 1: Import necessary libraries
#-----
#-----
import sys
import time
from pyfirmata import Arduino as stepper
```

Figura 17 Declaración de PyFirmata en Python.

2.4.2 Interfaces graficas con *Qt designer*

Qt designer es un software enfocado en el desarrollo de elaboración de interfaces gráficas para usuarios (GUI), esto mediante la librería PyQt5 de *Python*, su enfoque principal es el rápido desarrollo de interfaces graficas de forma similar a Visual Studio en Windows, pero a diferencia de este no es un IDE, por lo cual no tiene la facilidad de depurar y compilar las aplicaciones que se generen mediante PyQt5. En la Figura 18 se presenta la interfaz por defecto cuando se genera un nuevo archivo en Qt designer.

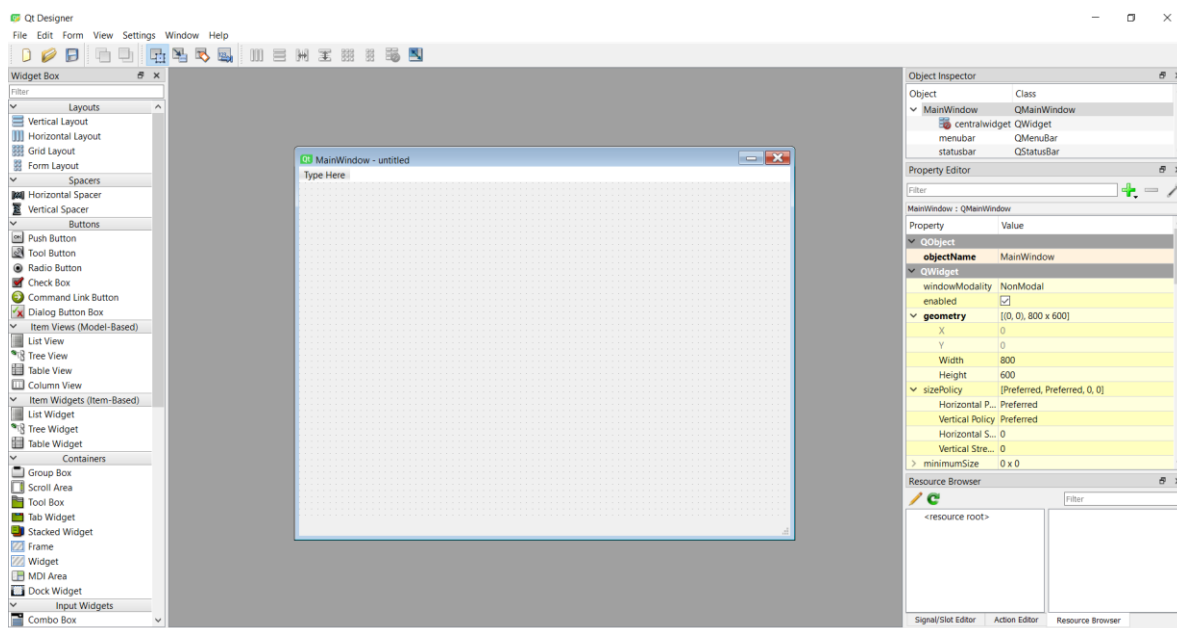


Figura 18 Pantalla principal del software Qt designer para interfaces graficas.

El desarrollo o creación de las interfaces en *Qt designer* es sencillo debido a que comparten una similitud con el proceso realizado en Visual Studio para elaborarlal. En *Qt designer* es posible adaptar los Widgets a los requisitos de nuestra aplicación tanto en el apartado visual como funcional. En la Figura 18 se presenta una lista de los Widgets que podemos seleccionar para desarrollar nuestra interfaz gráfica en el aspecto visual y un apartado mostrando las propiedades de los objetos o Widgets que estamos utilizando.

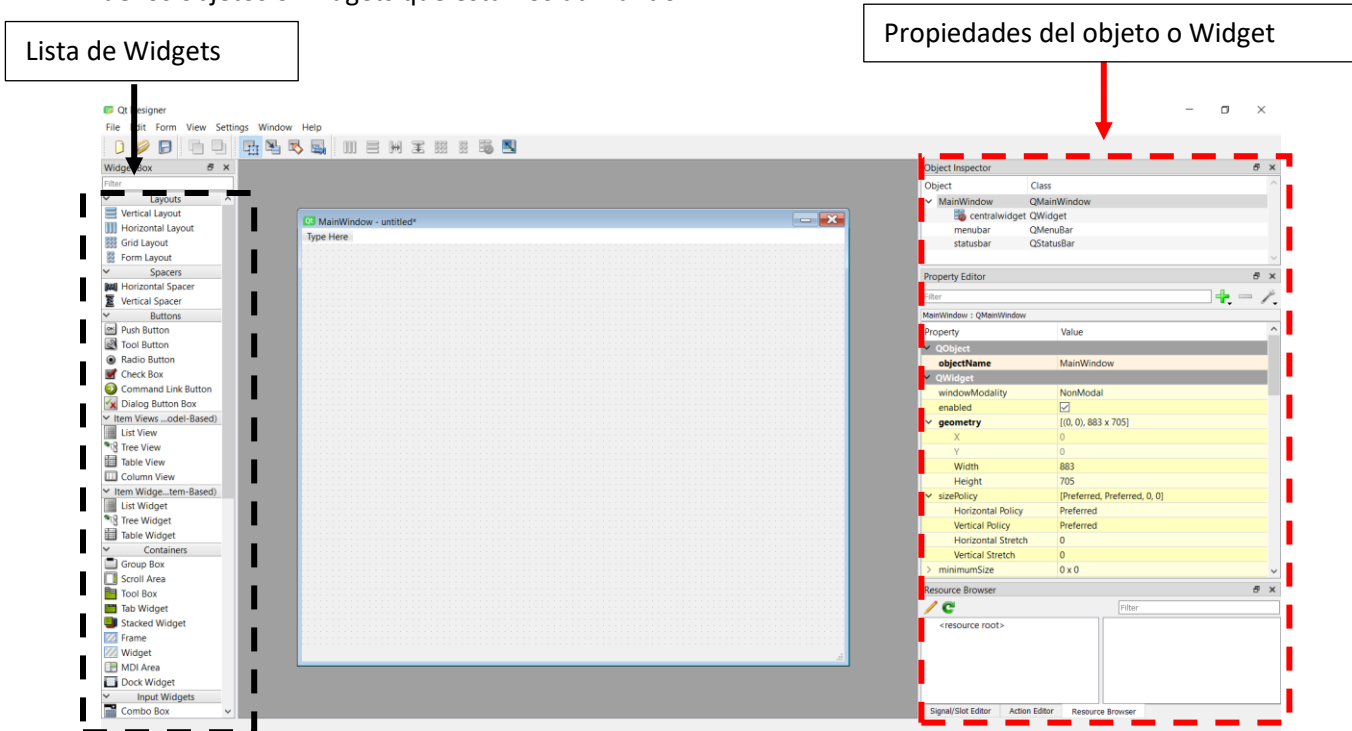


Figura 19 Lista de objetos disponibles para el desarrollo de la interfaz (A) lista de propiedades y (B) lista de eventos.

La programación para las interfaces graficas desarrolladas en *Qt designer* es una programación orientada a eventos en lenguaje *Python*, es decir, dependiendo de las acciones del usuario y los eventos que realice cuando se encuentre manejando la interfaz, se realizaran determinadas acciones. Por ejemplo, si el usuario oprime un botón, este último es un evento que la interfaz detectará mediante una declaración en el software para realizar una acción determinada.

Uno de los puntos a considerar al utilizar *Qt designer* es que el archivo que genera por default es uno con extension *.ui* y algunos programas detectan a dicho archivo en lenguaje HTML. Esto no permite su manipulacion en *Python*, debido a esto, es necesario convertir el archivo de *.ui* a *.py*.

Para este proceso es necesario ingresar una línea de código a la consola de nuestro computador o en la terminal del editor de código que estemos utilizando.

Se presenta la línea de código necesaria para realizar la conversión de archivos, .ui a .py.

```
pyuic5 input.ui (Archivo generado por Qt designer)
```

```
- o output.py (Archivo convertido en Python)
```

En la Figura 19 se presenta una interfaz gráfica desarrollada en Qt Designer (a) y en (b) se muestra el archivo final en Python después de la conversión utilizando la línea de código anteriormente presentada, para la asignación de la programación de eventos.

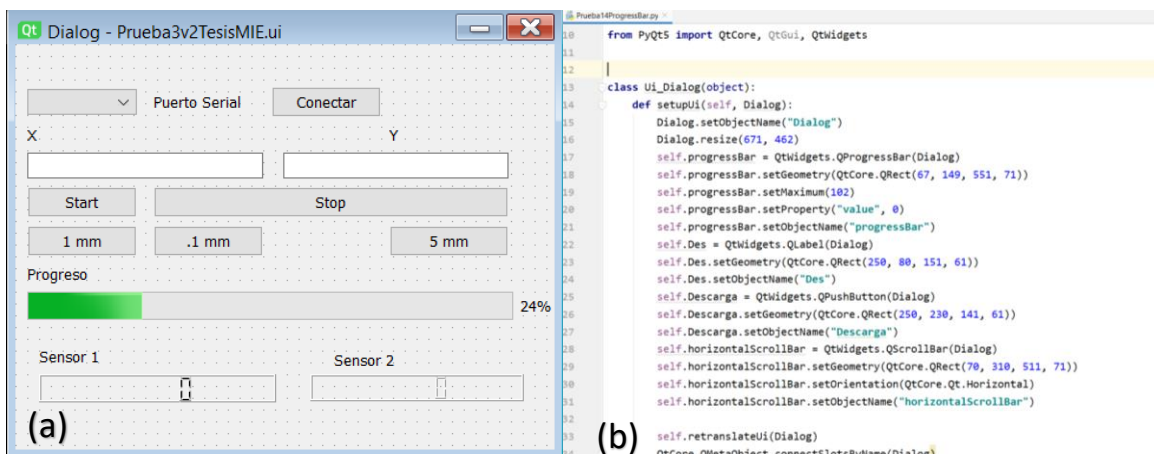


Figura 20 (a) Interfaz gráfica diseñada y desarrollada en Qt designer (b) Código de la interfaz gráfica después de su conversión a lenguaje Python.

2.6 Campos electromagnéticos

Los campos eléctricos tienen su origen en las diferencias de voltaje: entre mayor sea la diferencia de voltaje, mayor será la fuerza del campo eléctrico. Por otro lado, los campos magnéticos tienen su origen en las corrientes eléctricas, su relación es igual a la del campo eléctrico y la diferencia de potencial. Entre mayor sea la corriente eléctrica, mayor será la fuerza del campo electromagnético.

Una de las variables que caracterizan a los campos electromagnéticos [25] es su frecuencia o su respectiva longitud de onda. La frecuencia del campo electromagnético determinara los efectos que se presentan en ciertos tipos de organismos. Esta determina el número de ciclos por segundo u oscilaciones de la onda electromagnética. La relación entre la longitud de onda y la frecuencia es: cuanto más alta sea la frecuencia, la longitud de onda será más corta.

2.6.1 Espectro electromagnético

Las ondas electromagnéticas son capaces de trasladarse a través del vacío, en comparación de las ondas mecánicas que requieren un medio para poder hacerlo. La radiación electromagnética puede referirse como el conjunto de ondas eléctricas y magnéticas que se desplazan por el movimiento de cargas eléctricas que puede tener un objeto con propiedades metálicas, como una antena. Las ondas electromagnéticas, pueden ser moduladas (controlando la amplitud, fase y frecuencia de la onda) para aplicarse en diversos procesos o técnicas.

En la Figura 21 se presenta las clasificaciones de las ondas electromagnéticas por medio de la frecuencia, esta clasificación también es conocida como espectro electromagnético.

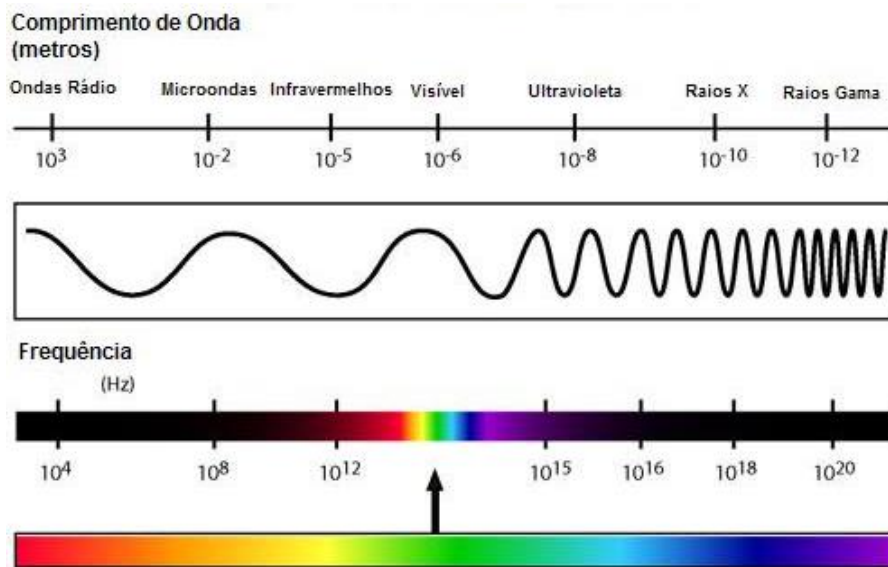


Figura 21 Espectro electromagnético que clasifica las ondas electromagnéticas según su frecuencia y longitud de onda.

2.6.2 Permeabilidad Magnética o Clasificación de materiales magnéticos.

Las ondas electromagnéticas se comportan de diferente manera dependiendo del tipo de material en que entren en contacto. En algunos casos el material puede generar un cambio o interferencia a un campo electromagnético o incluso aun cuando un material entre en contacto con un campo, el campo electromagnético no presentara ningún cambio.

La forma en que se clasifican los materiales es por medio del valor de la susceptibilidad magnética o permeabilidad magnética (μ), permiten clasificar a los materiales de acuerdo con sus propiedades y comportamientos magnéticos. La permeabilidad magnética es la capacidad que tienen los materiales, medios o sustancias de afectar y ser afectados por campos magnéticos, así como convertirse en la fuente de esos, es decir, tener la capacidad de producirlos sin la necesidad de una corriente externa. Son altamente permeables, ya que pueden ser afectados por los campos magnéticos sin mucho esfuerzo. En el caso de los materiales paramagnéticos su reacción ante los campos magnéticos es prácticamente nula y en los materiales diamagnéticos, estos repelen el campo magnético.

En los materiales diamagnéticos, su disposición de electrones produce una anulación general de los efectos de los campos magnéticos. Los materiales paramagnéticos son similares a los materiales diamagnéticos. Por último, los materiales ferromagnéticos son fácilmente afectados por los campos eléctricos. Estos atraen el campo magnético hacia su interior.

Un material es considerado como no magnético si $\mu = 1$, de lo contrario es magnético. El vacío, el aire y los materiales con $\mu = 1$ son no magnéticos. El valor de μ para clasificar a los materiales queda de la siguiente manera: diamagnético $\mu \leq 1$, paramagnético $\mu \geq 1$ y ferromagnético si $\mu \gg 1$ [26].

Tabla 5 Ejemplos de materiales clasificados con respecto al valor de su permeabilidad magnética. [24]

Permeabilidad magnética		
Diamagnéticos ($\mu \leq 1$)	Paramagnéticos ($\mu \geq 1$)	Ferromagnéticos ($\mu \gg 1$)
Mercurio	Aire	Cobalto
Plata	Aluminio	Níquel
Agua	Platino	Hierro dulce
Plásticos	Manganeso	Hierro al silicio

Capitulo III Desarrollo

3. Desarrollo

En este capítulo se presentan los procedimientos realizados para el diseño, desarrollo, construcción y selección de materiales para el prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento. Se revelarán las diferentes propuestas de diseño, estas se encuentran elaboradas en un software de diseño CAD (Autodesk Fusion 360) para simular el desplazamiento y colocación de la antena en los ejes (Theta, R, Z). Posteriormente, se presentó un prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento y una adaptación de este para el objetivo principal de este trabajo de tesis.

3.1 Sistema estereotáctico de posicionamiento adaptado a las medidas específicas de la población mexicana.

Se presentan las direcciones que el sistema de posicionamiento estereotáctico podría realizar los desplazamientos sobre un plano tridimensional (R, Theta, Z). Se presenta en la Figura 22 las direcciones que el sistema estereotáctico de posicionamiento podría desplazarse sobre la pierna.

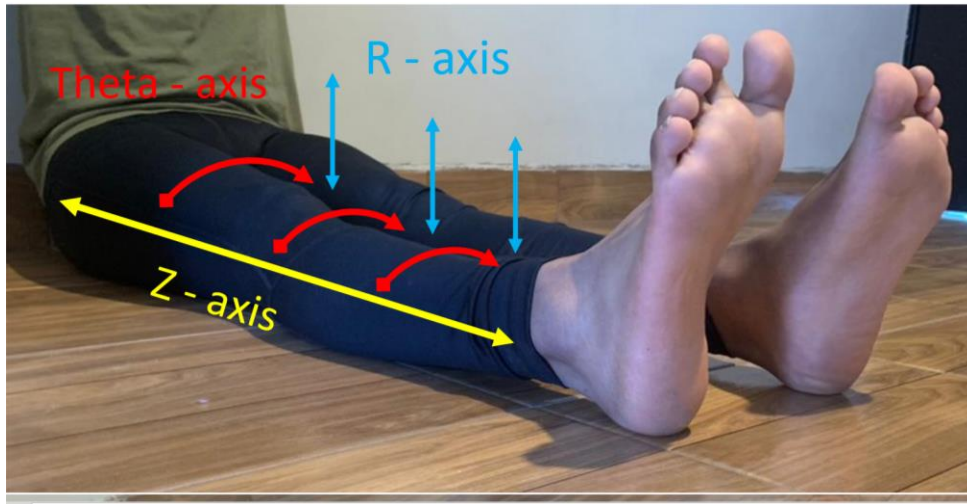


Figura 22 Ejes disponibles para la colocación de la antena de microondas sobre la pierna.

El prototipo del sistema de posicionamiento se adaptó a los requisitos de su aplicación final, el posicionamiento de antenas de ablación térmica para el tratamiento de tumores óseos ubicados en la pierna. Los puntos más importantes para esta adaptación fueron los siguientes:

- Estatura del usuario: La longitud de la pierna se encuentra relacionada a la estatura del individuo. Considerando datos avalados por la INEGI [24], la estatura promedio de la población mexicana, es de 1.64 m para hombres y uno 1.58 m en mujeres. Tomando en consideración estos datos se estableció una longitud de 70 cm para colocar la antena a lo largo de la longitud de la pierna, este valor es el que cubrirá todo el eje Z. En la Figura 23 se presenta el sistema adaptado a la longitud requerida.

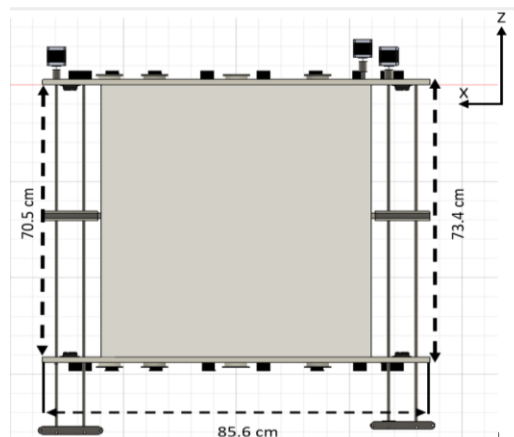


Figura 23 Sistema estereotáctico de posicionamiento adaptado para la longitud de la pierna de la población mexicana.

- **Peso:** El peso del usuario también es un factor importante en la delimitación de las medidas para la adaptación del sistema estereotáctico de posicionamiento a la población mexicana. Esto se debe a que enfermedades como el sobrepeso y obesidad pueden causar deformaciones a diferentes partes del cuerpo, la anchura o diámetro de la pierna se ven afectadas por estas enfermedades. En este problema se consideró una circunferencia de pierna máxima permisible de 40 cm. En la Figura 24 se presenta el arco estereotáctico con una escala graduada y en el centro de este mediante un círculo (1) se hace referencia al lugar en donde se colocaría la pierna. Esta sería el área que cubriría el eje Theta (flechas negras) para la colocación de la antena (2).

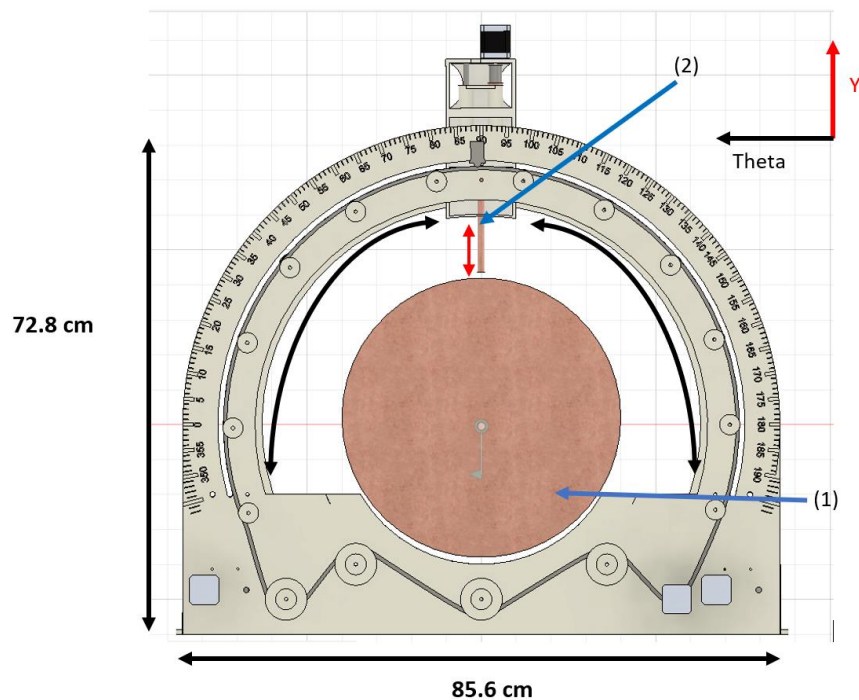


Figura 24 Vista frontal del sistema estereotáctico de posicionamiento, mostrando con un círculo azul el lugar donde se colocaría la pierna.

- **Longitud de las antenas de microondas para la aplicación de ablación térmica:** Las antenas que se consideraron (Figura 25) miden 11 cm y 17 cm. Estas antenas su posición en el eje Y

se ajustara mediante un dispositivo tipo jeringa La profundidad de la antena se puede ajustar dependiendo del diámetro de la pierna y de la antena que se utilice, por ejemplo: En el caso de colocar una pierna que mide 40 cm de diámetro y se utilice una antena de 17 cm, el sistema puede ajustar el rango (10cm) de inserción de la antena.



Figura 25 Antenas de 11 cm y 17 cm consideradas para la adaptación del sistema estereotáctico de posicionamiento a sus medidas finales.

Se presenta el apartado (Mirar Figura 26) del sistema estereotáctico de posicionamiento para realizar el ajuste de altura de la antena de microondas. En la Figura 26 se presentan los componentes y piezas necesarios para desplazar la antena en dirección del eje R. Se empleo un sistema estilo jeringa para ajustar la altura de la antena de microondas mediante el control de un motor a pasos.

En la Figura 33 se muestra: (6) arco estereotáctico auxiliar, (9) motor a pasos NEMA 17, (10) acople de 8 mm a 5 mm, (11) guía lineal 8 mm, (12) sujetador de antena, (13) antena de microondas, (14) tuerca dentada y husillo 8 mm (15).

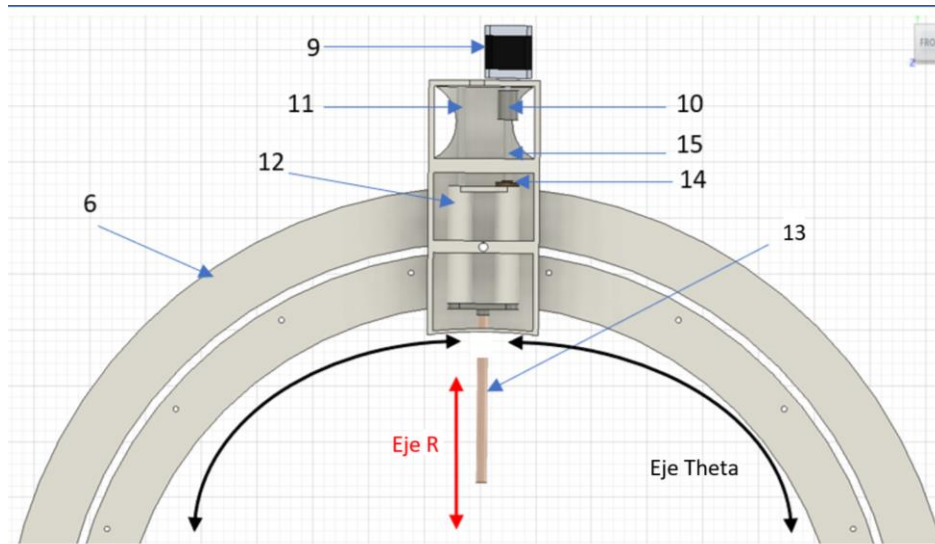


Figura 26 Presentación de los componentes y piezas utilizadas para realizar los desplazamientos en el eje R.

3.2 Selección de materiales para la construcción del sistema estereotáctico de posicionamiento

En consideración de la clasificación de los materiales magnéticos (Mirar Tabla 4), se investigó que tipos de materiales cuentan con un valor de permeabilidad magnética lo suficientemente pequeña para no alterar los campos electromagnéticos generados por las antenas de microondas. Por esa razón, se seleccionaron materiales plásticos para la manufactura de las piezas que se utilizaran para la construcción del sistema estereotáctico. Sin embargo, es necesario seleccionar plásticos que cumplan con las propiedades mecánicas necesarias para la construcción del sistema. Las propiedades mecánicas que se tomaron en cuenta para la selección de los materiales son: dureza, facilidad de maquinado, facilidad de adquisición (compra)

Tomando como base los datos de la tabla X, que los materiales con una permitividad magnética lo suficientemente pequeña para no afectar los campos electromagnéticos son los plásticos. Por esa razón se prefieren los plásticos para la construcción del sistema. Sin embargo, no cualquier plástico cubren las propiedades necesarias para construir el sistema, tienen que cubrir las propiedades mecánicas requeridas para la construcción. Entre las propiedades mecánicas, dureza, facilidad de maquinado, facilidad de acceso (facilidad de compra.). Para tener la capacidad de producir el

sistema de una manera masiva en un futuro. A continuación, se analizarán algunas propuestas de materiales para revisar sus propiedades mecánicas como comerciales.

Entre los materiales actuales para el ámbito científico se encuentran los considerados, plásticos de ingeniería, estos son desarrollados a partir de moléculas orgánicas gigantes y que permiten reemplazar materiales metálicos convencionales con satisfactorios resultados.

Algunas de las ventajas generales con las que cuentan este tipo de materiales generalmente son: Menor peso (comparado con los metales), no requieren mantenimiento, no se oxidan, poseen una gran resistencia contra la corrosión, pueden ser auto lubricados. A continuación, se muestran algunos de los materiales sugeridos que podrían ser utilizados para la construcción del prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento como algunas de sus características:

- **Polipropileno**

El polipropileno (PP) es un polímero termoplástico este se obtiene a través de un proceso de polimerización del propileno, tiene una considerable resistencia contra solventes químicos, álcalis y ácidos.

Algunas de sus características y ventajas son: tener una gran relación costo-materia, resistencia a temperaturas menores a 160° Celsius, variedad de aplicaciones (Automotriz y Medicina), resistente contra la humedad y poseer la normatividad higiénica emitida por la FDA.

- **Nylamid XL (Nylon) = Extra Lubricado (verde)**

Integrante de la familia de las poliamidas (PA), este material contiene una lubricación en base de aceite para reducir de esta manera los coeficientes de fricción si este material entra en contacto con otros materiales.

Alguna de sus características o ventajas adicionales es: su alta resistencia térmica (95° a 110° Celsius en promedio), resistencia al desgaste, cuenta con propiedades dieléctricas y mecánicas, resistente al impacto (puede absorber impactos que pueden llegar a fracturar a los dientes de una polea dentada metálica), buena maquinabilidad (fácil de moldear con herramientas), resistencia a la abrasión (soporta el contacto con otros materiales) y cuenta con una certificación higiénica.

- **PTFE (Teflón)**

El teflón es considerado un polímero con una alta resistencia, una de sus principales características es que es resistente a los diferentes solventes, al mismo tiempo posee un coeficiente de fricción reducido, esto es, mientras menor sea su coeficiente de fricción mayor será la facilidad de este para deslizarse sobre otros cuerpos. Desde el punto de vista eléctrico es considerada como una molécula inerte o sin polaridad lo cual lo hace un excelente aislante. Las características del teflón desde el punto de vista mecánico son similares a las de un polímero de media densidad, considerando que se encuentre en temperatura ambiente.

Debido a que es un material inerte, el teflón es también un material antiadherente. Con estas propiedades se vuelve un material muy resistente contra los productos químicos, como lo son los disolventes orgánicos, ácidos y bases concentradas o diluidas. Es estable en un amplio rango de temperaturas de -240° hasta los 260° C.

3.3 Primer diseño

En el primer diseño se realizó un sistema que incluía un arco estereotáctico o guía curvada (Figura 27, A) para el desplazamiento y colocación de la antena en el eje Theta, esta decisión de incluir un arco fue considerando el objetivo del tema de tesis el cual se enfoca en un sistema para el posicionamiento en el área de la pierna. Esta última se puede considerar como un objeto cilíndrico (Figura 27, ii) debido a que posee una circunferencia y longitud. Esto con la finalidad de mantener la mayor área de trabajo disponible para la colocación de la antena. El incluir un arco estereotáctico al sistema de posicionamiento es la mejor opción, debido a que teóricamente se obtendría un rango de 0 a 180 grados disponibles para la colocación de la antena. Se consideró que el movimiento estaría a cargo de un sistema conformado por: motores a pasos (Figura 27, B), poleas dentadas, bandas dentadas y una superficie plana como base (Figura 27, C) para este primer diseño. El objetivo del primer diseño fue evaluar las opciones y simular los movimientos que el sistema realizaría para colocar la antena en el eje Theta, como el rango disponible para la colocación de esta. En la Figura 27 se muestra una vista lateral (i) y una vista frontal (ii) del diseño propuesto.

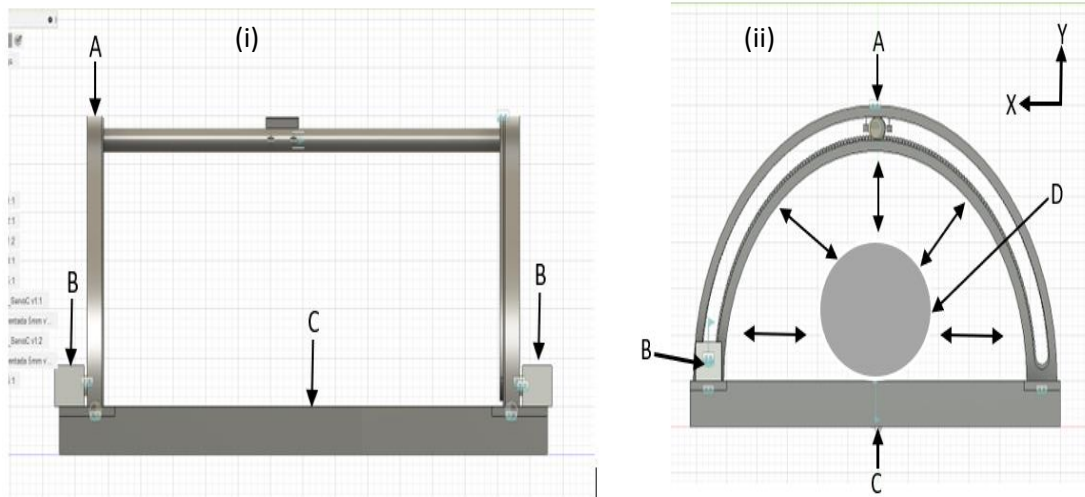


Figura 27 Presentación del primer diseño adaptando las ideas del autor, se muestra también una simbología que se utiliza para referirse a los componentes o piezas del diseño.

En este primer diseño se identificaron los siguientes puntos importantes para considerarse como modificaciones posteriores:

- La base: La base plana (Figura 27, C) podría provocar incomodidad al usuario debido a que esta no se ajusta de una manera adecuada a la pierna. Debido a esto se realizaron modificaciones a la base considerando que el usuario debería colocar la pierna sobre el sistema estereotáctico de posicionamiento durante un tiempo aproximado de 20 minutos.
- Desplazamientos: Se observó que los desplazamientos generados por el sistema son viables mediante los motores a pasos, poleas y bandas dentadas, pero se observó que la banda dentada no podría mantener una forma uniforme y es necesario el uso de algún canal, guía o sujetador para mantener un agarre, forma y tensiones adecuadas para generar un desplazamiento limpio y sin pérdida de pasos.

3.4 Segundo diseño

En este segundo diseño en el apartado de la base se realizó una curvatura para resolver el problema de la incomodidad cuando el paciente use el sistema por largos periodos de tiempo. En la Figura 28 se muestra una vista frontal del segundo diseño propuesto. En esta misma Figura 28, se presenta la forma que se modificó el arco estereotáctico (A) para el desplazamiento, estabilidad y tensión de la banda dentada. Al arco estereotáctico se le anexo un canal (E) para evitar la deformación de la banda

dentada y mantener una tensión estable. Esto con la finalidad de desplazar la guía lineal (B) en el eje Theta

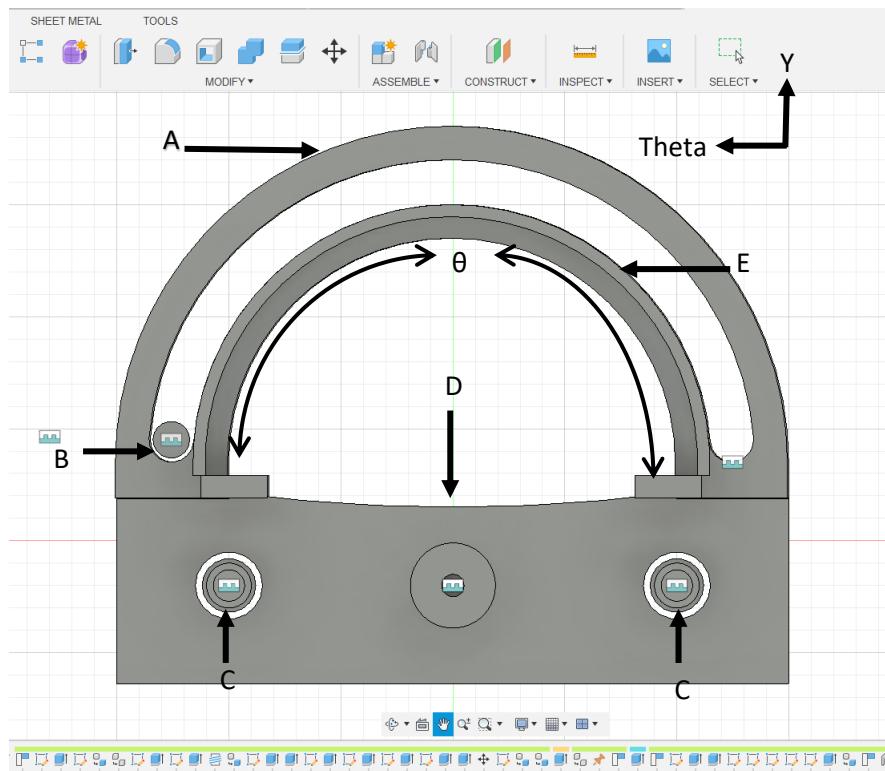


Figura 28 Vista frontal del segundo diseño

Esta propuesta cuenta con un par de poleas dentadas que se encuentran colocadas a los extremos (Figura 28, E) y a través de ella se colocara la banda dentada, esto con la finalidad de mantener la tensión necesaria para un movimiento adecuado, como también desplazar la guía lineal (Figura 28, B) a través del eje Theta.

Como se planteó anteriormente el desplazamiento de la guía lineal a lo largo del arco estereotático estará a cargo de un motor a pasos Nema 17 (Figura 28, D). Se utilizará un motor a pasos con el objetivo de sincronizar los movimientos de las poleas dentadas en ambos lados del sistema. Este es un método más sencillo, en comparación a utilizar dos motores a pasos y posteriormente sincronizarlos para que no tengan una diferencia de pasos.

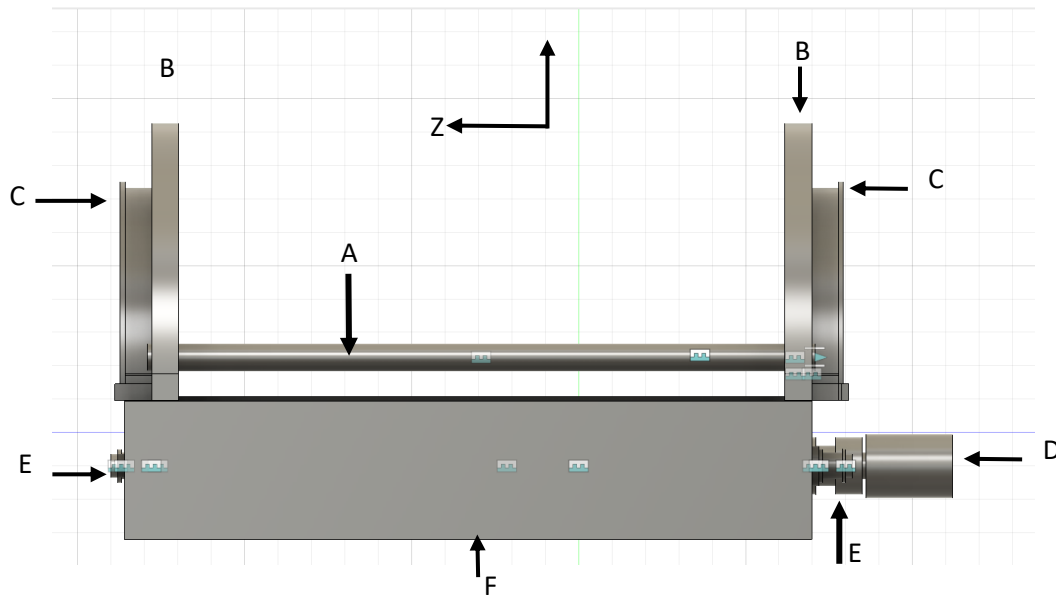


Figura 29 Vista lateral del sistema en general en el segundo diseño.

Este diseño se manufacturo para identificar las fallas mecánicas que el sistema presentara para el desplazamiento de la banda dentada. Para la manufactura de algunas piezas complejas del sistema estereotáctico de posicionamiento se empleó la técnica de impresión de piezas mediante una impresora 3D utilizando PLA como material, este fue el caso del arco estereotáctico.

Una vez construido este sistema se evaluó el desplazamiento de la banda dentada, se utilizó un programa desarrollado en *Python* mediante el protocolo de comunicación StandardFirmata y PyFirmata, en conjunto de la tarjeta Arduino Due. La finalidad de esta prueba es generar un desplazamiento a través del eje Theta, para evaluar el desplazamiento de la banda dentada y verificar problemas de perdida de torque, posible desincronización en ambos lados del sistema y alguna pérdida de pasos.

Observaciones de la prueba:

- Guía curvada (arco estereotáctico): El canal de la guía curvada para la banda dentada tuvo la capacidad de mantener adecuadamente la banda dentada, pero a su vez aumento la fricción en ciertas partes provocando un mayor esfuerzo para el motor a pasos, provocando una pérdida de pasos durante el desplazamiento de la banda dentada.
- Poleas dentadas: Mantuvieron una forma y tensión adecuada de la banda dentada, pero en el caso específico entre el contacto de la polea dentada que se encuentra fijada en el motor a pasos, cuando el motor generaba un movimiento para desplazar la banda dentada, se

identificó que la tensión de la banda dentada disminuía en esa sección, perdiendo el contacto con la polea dentada, provocando una pérdida importante de pasos.

- Vibración del motor: Debido a la alta fricción que se generaba en la parte del canal de la guía curvada, el motor requería realizar un mayor esfuerzo para mover la banda dentada provocando una vibración, esta última causaba que el motor se moviera involuntariamente de su posición, por lo cual, se consideró diseñar unos sujetadores para mantener al motor a pasos en una posición estable, aunque se generen vibraciones.

Considerando los puntos anteriores se prosiguió a realizar una nueva modificación (Mirar Figura 30), en esta nueva modificación se realizaron los siguientes cambios:

- Se realizó una reubicación del motor a pasos, debido a la observación de un experto en diseño mecánico, menciono que es necesario tener un agarre por lo mínimo de 90 grados entre la banda y polea dentada.
- El carril que servía de guía para la banda dentada se cambió por un conjunto de rodillos de libre deslizamiento, de esta manera no se generaría una fricción adicional.

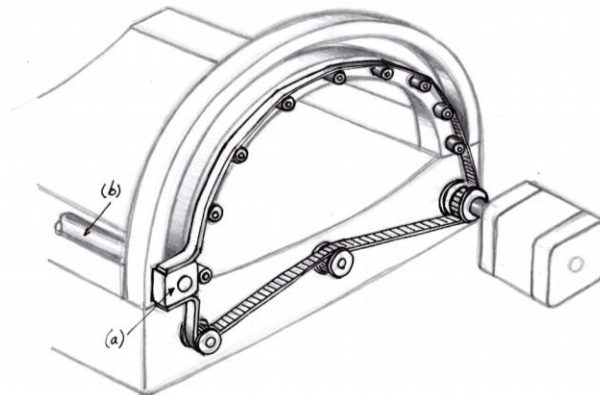


Figura 30 Diseño presentado para la tercera propuesta o modificación al sistema estereotáctico de posicionamiento

3.5 Tercer prototipo (Eje Theta)

En consideración de las nuevas modificaciones al sistema estereotáctico de posicionamiento en general, se procedió a la elaboración del tercer prototipo.

Se manufacturo en una única pieza la guía curvada (arco) y la base (Figura 31), esto con la finalidad de obtener una pieza con una mayor rigidez y estabilidad mecánica, debido a que esta pieza

soportará el peso de diferentes piezas que conforman el sistema de desplazamiento en el eje Theta. El material en el que se elaboró esta nueva pieza fue Nylamid XL (Verde), esto se debe a que en la capa externa del material se encuentra lubricado, reduciendo de manera considerable la fricción generada por el contacto de piezas, como su gran estabilidad y resistencia mecánica del material. Anteriormente las piezas se fabricaban mediante la técnica de impresión 3D, pero al aumentar la complejidad, grosor y tamaño se presentan dos consecuencias. (1) El tiempo de impresión 3D de la pieza aumentaría considerablemente. (2) El material utilizado también aumentaría, durante la impresión se puede requerir de 'soportes' para sostener algunos puntos o zonas de la pieza, aumentando el material desperdiciado.

En el proceso de manufactura para la elaboración de la pieza en Nylamid XL (Verde) fue requerida una fresadora, debido a la presentación del material con la cual se contaba (placas). Utilizando las diversas opciones (perfilado, vaciado) que manejan para el procesamiento de este tipo de materiales. Se utilizó el proceso de perfilado para obtener el perímetro exterior (Mirar Figura 31) (1)(2) de la pieza. En el caso de la opción de vaciado se utilizó para variar el espacio (Mirar Figura 31)(3) libre donde se desplazará la guía lineal. La placa que se utilizó para la elaboración tiene un grosor de 1.4 cm. Un paso adicional es la exportación del modelo que se encuentra en el Software CAD a un formato .dwg, que sería una visualización 2D de la pieza que se desea manufacturar. La Figura 24 presenta un arco estereotáctico integrado en una única pieza, manufacturada en Nylamid XL mediante el proceso anteriormente descrito.

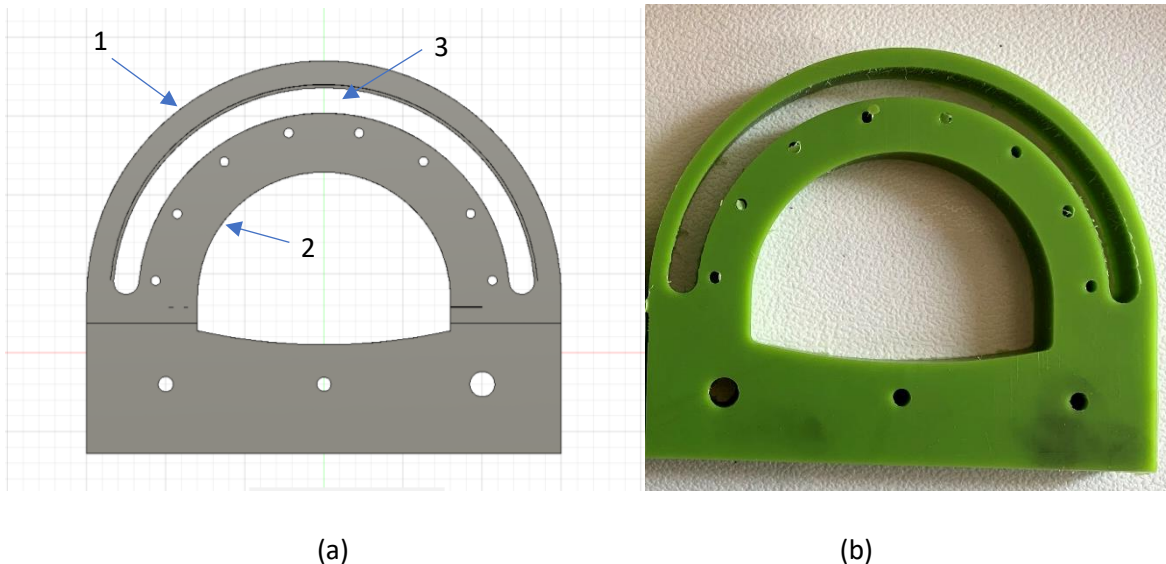


Figura 31 (a) Vista frontal de la pieza a manufacturar en Nylamid XL en fresadora. (b) Pieza manufacturada

Las piezas manufacturadas anteriormente, fueron utilizadas para construir el sistema de desplazamiento para el eje Theta. En la Figura 32, se presenta un gráfico detallando las piezas y componentes utilizados para el desplazamiento de la guía lineal a través del eje Theta. En esta sección se utilizó un motor a pasos acoplado (B1) a una guía lineal (A1) que atraviesa el sistema a través del eje Z y esta trasladará el movimiento del motor para ambos lados del sistema, sobre los extremos de la guía lineal (A1) se encuentran colocadas un par de poleas dentadas fijadas mediante prisioneros (C1, G1) que giraran en sincronización al movimiento del giro del motor y a través de estas poleas dentadas la banda dentada se desplazará. La banda dentada se desplazará sobre los rodillos locos dentados (F1) que se encuentran fijos a la guía curvada mediante tornillos (D1) con la finalidad de desplazar la guía lineal (A2) a lo largo del Eje Theta, en un rango de 0 a 180 grados teóricos.

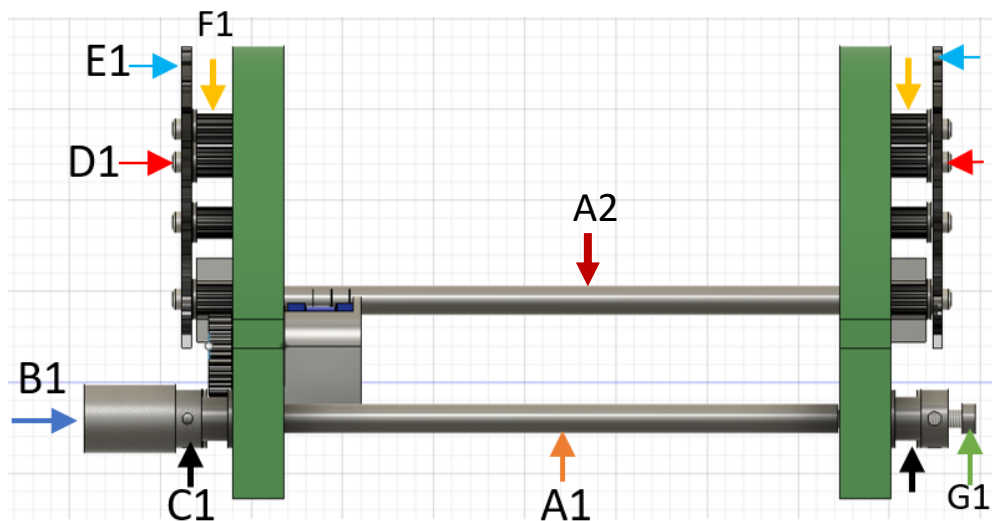


Figura 32 Vista lateral del prototipo 3, indicando las diferentes piezas utilizadas para el desplazamiento de la guía lineal en el Eje Theta.

En la Figura 33 se muestra mediante la referencia (R) los movimientos del motor para desplazar la guía lineal (A2) a través del eje Theta, visto desde una perspectiva lateral.

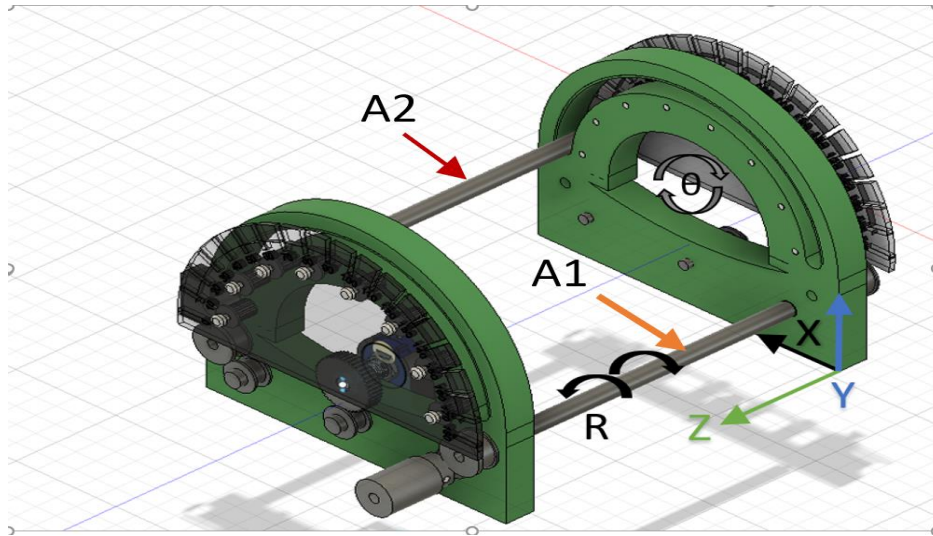


Figura 33 Vista isométrica del diseño, mostrando la sección que realizara los desplazamientos en el eje Theta, mostrando los diferentes movimientos (R) del motor.

3.6 Tercer prototipo (Eje Z)

El sistema que anteriormente se describió fue para el movimiento de la sección angular, eje Theta. En este apartado se presentará la forma en la que se desplazará el sistema a lo largo del eje Z y las diferentes configuraciones que fueron presentadas.

En la Figura 34, se muestra la vista lateral del sistema que está conformado por: un motor a pasos NEMA 17 (A) que se encuentra unido a un husillo (F) mediante un acople (B) y en el extremo posterior izquierdo se encuentra colocado un rodamiento (K) que se encuentra fijado a la base mediante el sujetador (J), este último elemento se colocó con la finalidad de evitar una posible deformación o desviación del husillo o tornillo sin fin. La pieza que se desplazará a lo largo del eje Z será el arco estereotáctico auxiliar (E) que se encuentra colocado sobre unos sujetadores (D) y estos a su vez se encuentran unidos al husillo (F) mediante una tuerca dentada (C). El arco estereotáctico auxiliar (E) junto con los sujetadores (D) se desplazarán sobre la longitud del husillo (F) cuando los motores a pasos generen un desplazamiento, el objetivo es desplazar el arco estereotáctico auxiliar (E) a lo largo del espacio interno del sistema o el espacio (M), porque este a su vez soportará el sistema de inserción o sistema que ajustará la altura de la antena sobre el Eje R. Esto se describirá a más a detalle en capítulos posteriores. El sistema estará siendo supervisado por unos sensores ultrasónicos que se encuentran colocados viendo directamente al sujetador (D) y estos se encuentran fijados a la base por un sujetador específico para estos sensores (I).

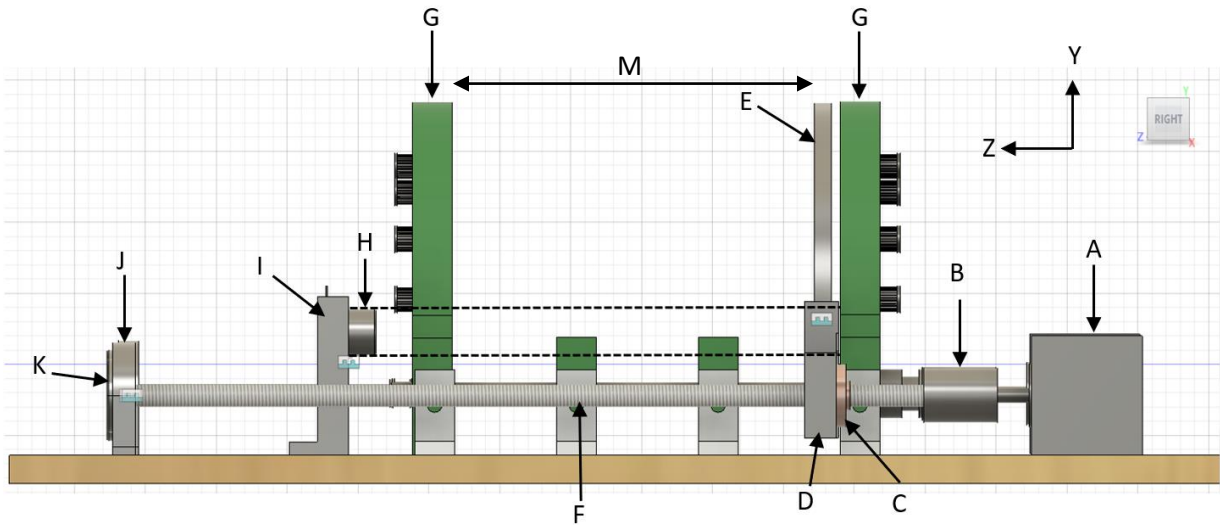


Figura 34 Vista lateral sistema (Eje Z), mostrando los componentes utilizados para el desplazamiento del sistema y medición de la distancia recorrida.

En la Figura 35 se muestra el sistema de desplazamiento del Eje Z, desde el ángulo de vista superior (Z, X). Para este eje se utilizaron dos motores, esto se debió a varias consideraciones. Una de ellas fue el peso de la sección que ajustará la altura de la antena sobre el eje Y, este peso podría en el primer caso causar una deformación o desvió si se utiliza únicamente un motor a pasos, como también se consideraron los diferentes puntos de apoyo que el sistema necesitará para distribuir el peso y tener un movimiento uniforme. La configuración y localización de piezas es similar a la Figura 27. Esta es la primera configuración que se consideró para el eje Z.

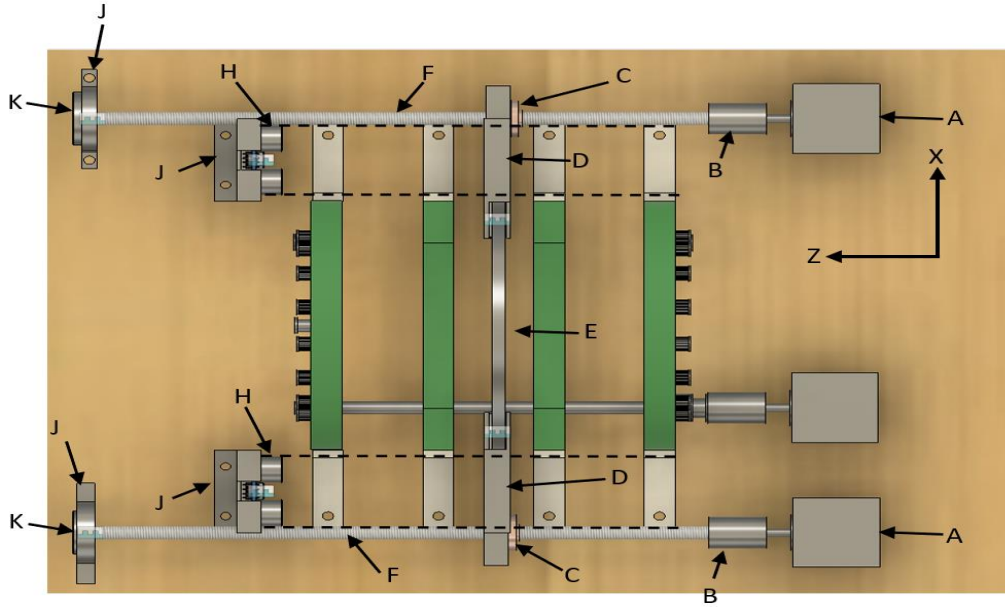


Figura 35 Vista superior del sistema (Z, X), mostrando la primera configuración utilizando los sensores ultrasónicos para la medición de la distancia recorrida.

Un punto por considerar fue que en esta configuración se utilizaron sensores ultrasónicos para la medición de la distancia que se desplazó el sistema estereotáctico por cada movimiento del motor, o, dicho de otra manera, para supervisar en que coordenada se encuentra el sistema.

En la segunda configuración únicamente se cambiaron los sensores ultrasónicos por sensores infrarrojos Sharp (C) y sus respectivos soportes, esta se puede observar en la Figura 36.

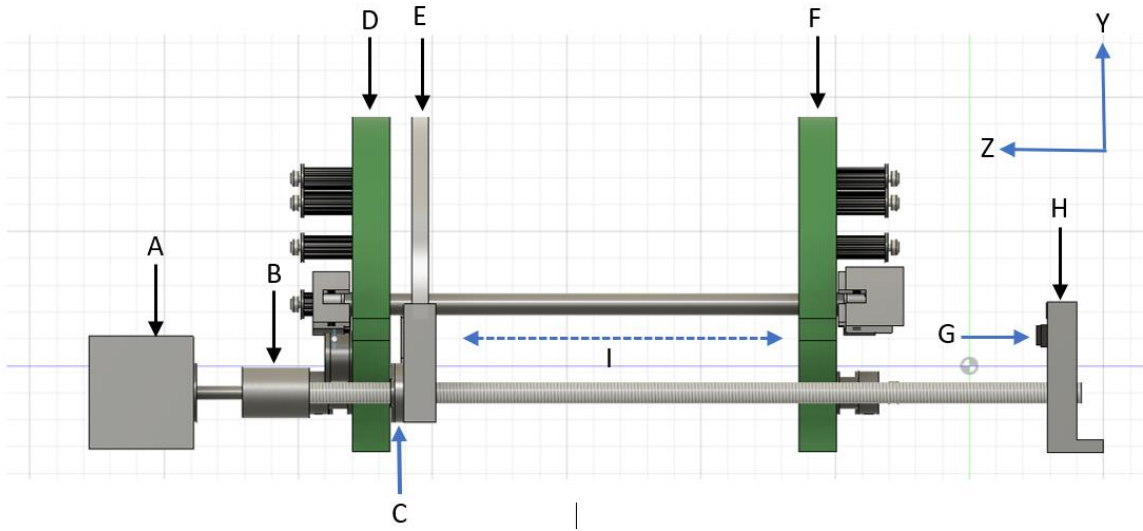


Figura 36 Segunda configuración del sistema para el desplazamiento del arco estereotáctico (E) en el eje Z.

En la Figura 37, se muestra mediante un par de líneas punteadas el área a donde se dirige el sensor infrarrojo Sharp (C) para posteriormente realizar la medición de la distancia que se desplazó el arco estereotáctico auxiliar (G) con respecto al eje Z.

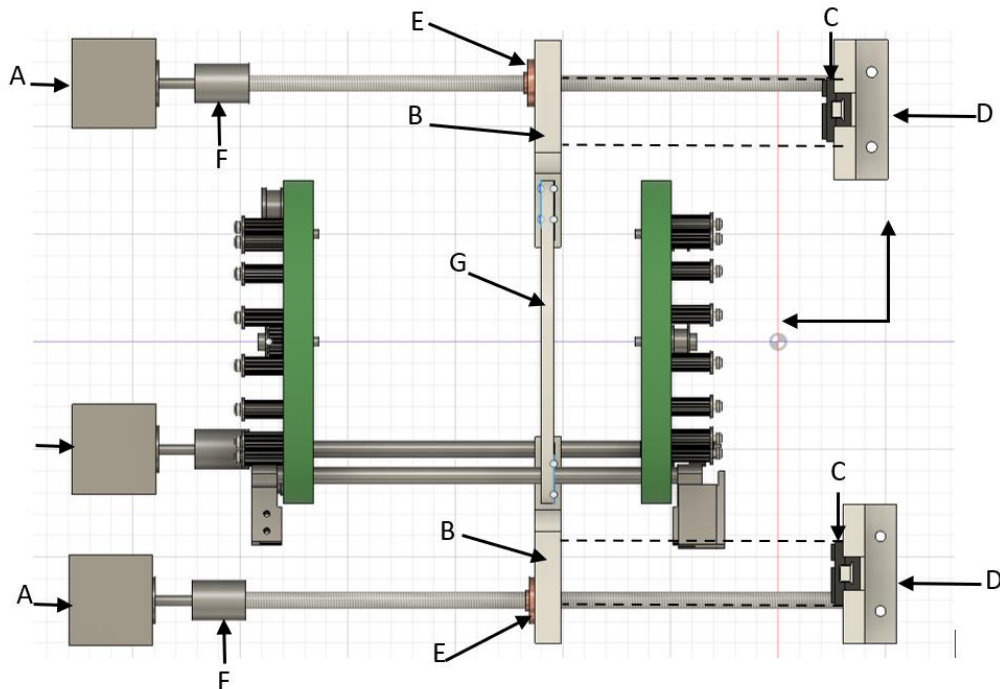


Figura 37 Vista frontal del sistema en tamaño real, mostrando los diferentes componentes que se utilizaron para el mismo

3.7 Prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento manufacturado.

Se presenta el prototipo del sistema estereotactico de posicionamiento construido y utilizado para la realizacion para las diferentes pruebas para evaluar los desplazamientos en los ejes (Z, Theta) como para el sistema de medicion.

En la Figura 38 Se presenta la seccion del sistema estereotactico de posicionamiento para el desplazamiento de la antena en el eje Theta. En la misma Figura 38 se muestra los componentes y piezas utilizadas para desplazar la guia lineal (8) en direccion al eje Theta.

Los componentes y piezas que se ocuparon para la construccion del prototipo fueron: (1)motor a pasos NEMA 17, (2) acople 5mm a 8mm, (3) polea dentada, (4)polea loca dentada, (5)rodillo de libre deslizamiento o polea dentada, (6)tornillo de fijacion, (7)banda dentada, (8) guia lineal, (9)sujetador de guia lineal y banda dentada, (10)sujetador de motor, (11)indicador de posicion, (12)localizador.

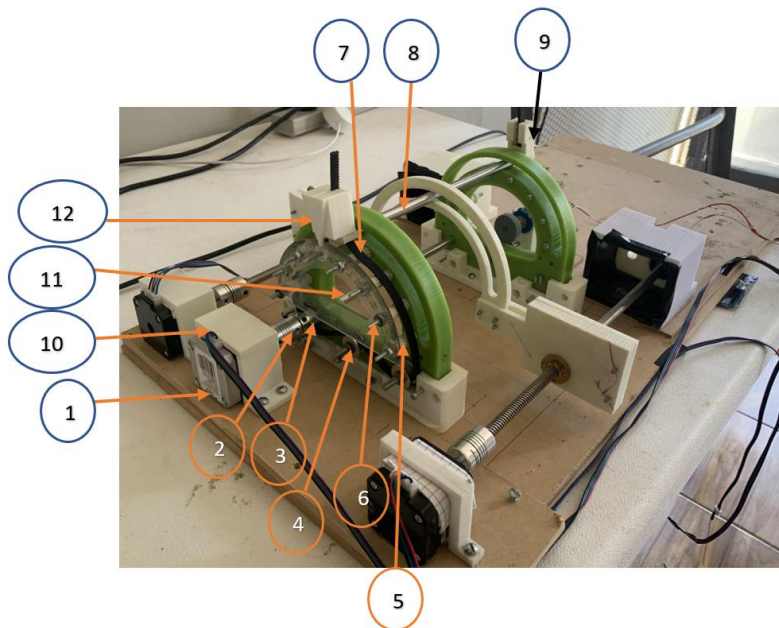


Figura 38 Vista isométrica del prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento mostrando los componentes para simular la colocación de la antena en el eje Theta.

En la Figura 39 se presenta el acondicionamiento del potenciómetro (13) con una polea dentada o engrane (14) colocada en su flecha para que este sea capaz de detectar los cambios de posición o desplazamientos de la banda dentada (7) cuando esta desplaza a la guía lineal (8) en dirección del eje Theta. Posteriormente, mediante un acondicionamiento de la señal, obtenemos la posición final en grados (°).

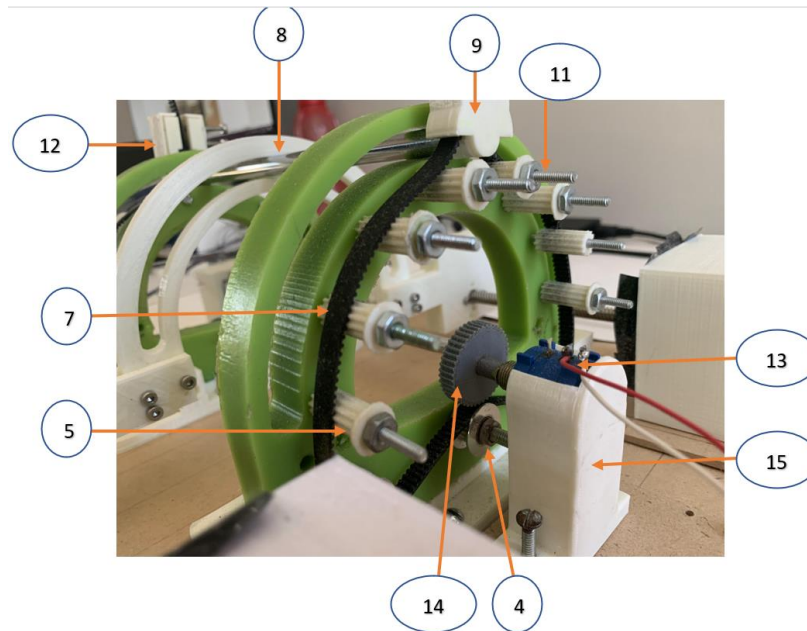


Figura 39 Acondicionamiento y colocación del potenciómetro para detectar y medir la precisión de los desplazamientos realizados en el eje Theta.

En la Figura 40 se presentan, en una vista explosionada, los componentes y piezas utilizados para la construcción del prototipo en el eje Theta. Las piezas que se presentan son: (1) base principal, (2) arco estereotáctico auxiliar, (3) motor a pasos NEMA 17, (4) acople de 8 mm a 5 mm, (5) tensores de banda dentada, (6) sujetados de banda dentada y guía lineal, (7) indicador de posición, (8) tornillos de fijación, (9) polea loca dentada, (10) guía lineal 8 mm, (11) acople dentado, (12) tornillo de fijación, (13) polea loca dentada, (14) base de potenciómetro, (15) potenciómetro multivuelta de precisión, (16) guía lineal y (17) polea dentada para potenciómetro multivuelta.

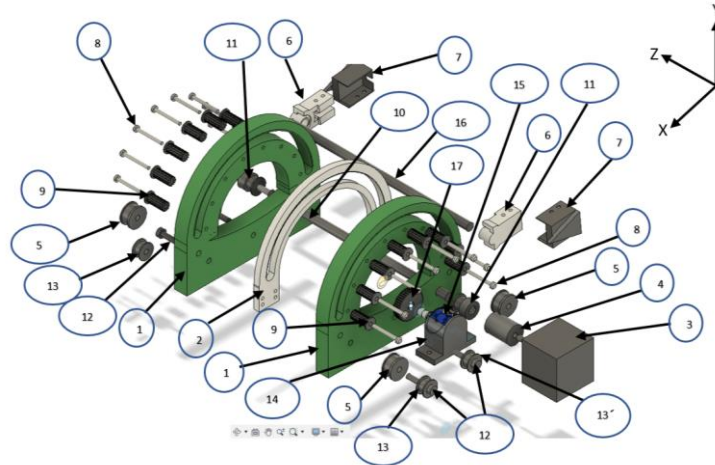


Figura 40 Vista explosionada del prototipo mostrando los componentes y piezas necesarias para construir el apartado del eje theta para realizar los desplazamientos en este eje

La Figura 41 muestra la seccion del prototipo del sistema estereotactico de posicionamiento indicando que el arco estereotactico auxiliar (2) se desplazara en direccion (Flecha naranja) del Eje Z, simulando el posicionamiento de la antena. Este sistema corresponde a la segunda configuracion para el posicionamiento de la antena en eje Z presentado en capitulos anteriores.

Los componentes que se utilizaron para la construccion de esta seccion del prototipo fueron: (1) sujetador de motor a pasos, (2) motor a pasos NEMA 17, (3) acople 5 mm a 8mm, (4) husillo o tornillo roscado, (5) sujetador de arco estereotactico auxiliar, (6) tuerca dentada, (7) arco estereotactico auxiliar y (8) sensor Sharp infrarrojo con cubierta.

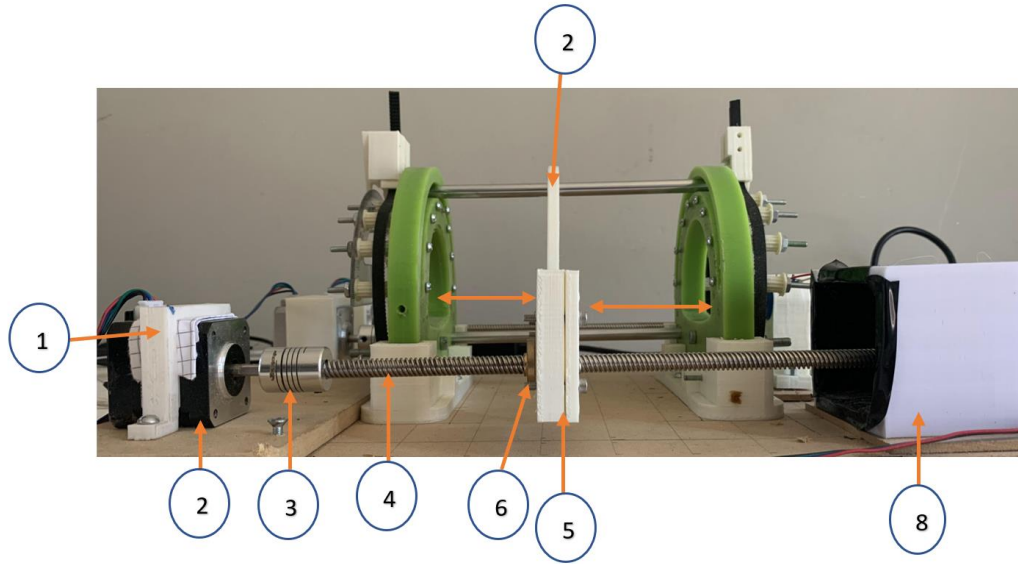


Figura 41 Vista lateral del prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento mostrando los componentes y piezas que conforman la sección para el desplazamiento de la antena en el eje Z.

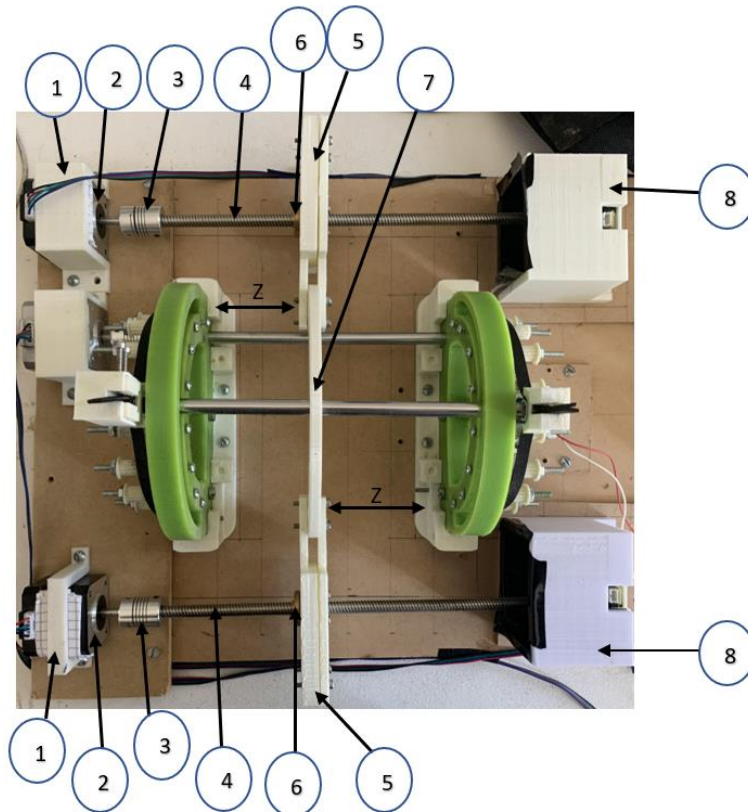


Figura 42 Vista Frontal del prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento mostrando los componentes que conforman la sección para el desplazamiento de la antena en el eje Z.

En la Figura 43 se presentan, en una vista explosionada, los componentes utilizados para la construcción del apartado del Eje Z del prototipo del sistema estereotactico de posicionamiento. Las piezas que se muestran en la imagen son: (1) motor a pasos NEMA 17, (2) acople de 8 a 5mm, (3) sujetados de arco estereotactico auxiliar, (4) arco estereotactico auxiliar, (5) husillo 8 mm x 300 mm, (6) balero, (7) sensor sharp infrarrojo modelo, (8) sujetador de balero y sensor sharp y (9) tuerca dentada.

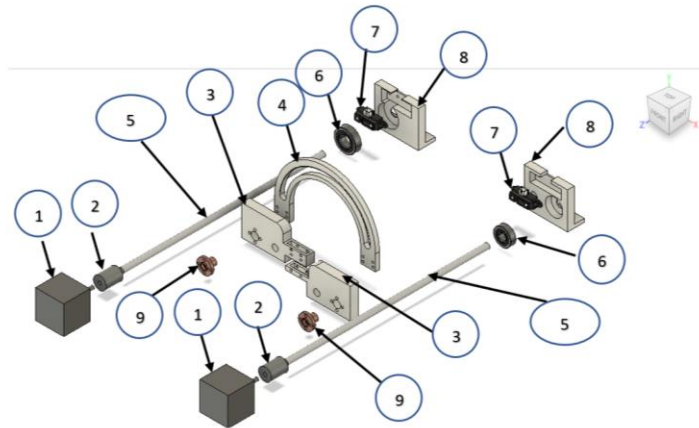


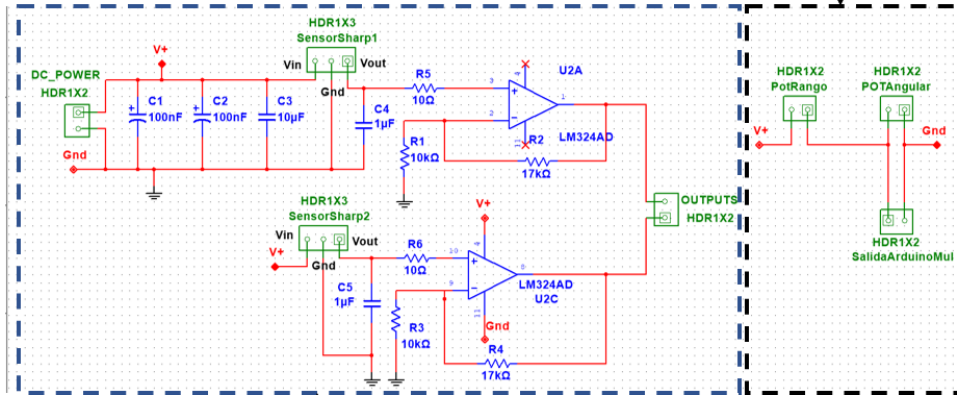
Figura 43 Vista explosionada del eje Z, mostrando los componentes y piezas que construyen el sistema para realizar los desplazamientos en el eje Theta.

3.8 Manufactura de PCB para pruebas finales

En este apartado se explica el procedimiento de diseño y manufactura de los diseños PCB mediante el software NI Multisim 14.0 para su diseño electrónico y posteriormente su traslado a NI Ultiboard 14.0.

En primera instancia en NI Multisim 14.0 se realizó el circuito electrónico y se seleccionaron los diferentes componentes que lo conforman, debido a que algunos componentes no se encuentran en la base de datos del software se realizaron algunas adaptaciones. Este fue el caso de los sensores Sharp infrarrojo y del controlador Pololu A4899. Este último se requirió diseñarse e integrarse a la base de datos de Multisim, esto para que sus medidas y distancia entre pines tengan las mismas al controlador físico, debido a que posteriormente se trasladara este diseño a NI Ultiboard 14.0. En la Figura 44 se presentan los circuitos eléctricos que se trasladaran a NI Ultiboard 14.0 para el proceso final de diseño de PCB.

(2) Arreglo de potenciómetros para la medición de la posición angular en el eje Theta



(1) Sensores Sharp para la medición de los desplazamientos realizados en el eje Z.

Figura 44 Diagrama eléctrico del PCB que se utilizara para las mediciones finales del prototipo buscando mejorar la precisión general del sistema.

En un NI Ultiboard 14.0, se realizaron los diseños de los PCB que se imprimirían para colocarse sobre las placas de cobre (fenólicas). Se ajusto los componentes para que el diseño final fuera el más compacto posible y de esta manera utilizar la menor cantidad de placa posible. En la Figura 45 se muestran los diseños de PCB que se manufacturaran e integraran al sistema estereotáctico de posicionamiento.

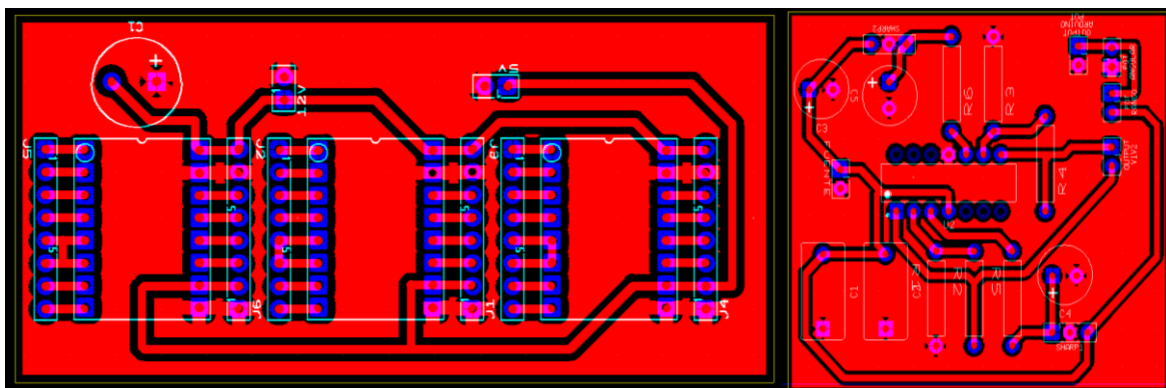


Figura 45 Diseño de PCB's terminadas y listas para su traslado a la placa fenólica para su elaboración.

En el caso de la placa de drivers para el control de motores a pasos sus medidas finales fueron 50 x 50 mm, en el caso de la tarjeta de adquisición de datos para los sensores infrarrojos Sharp quedo 50 x 40 mm. En la figura 46 se presentan las PCB manufacturadas.

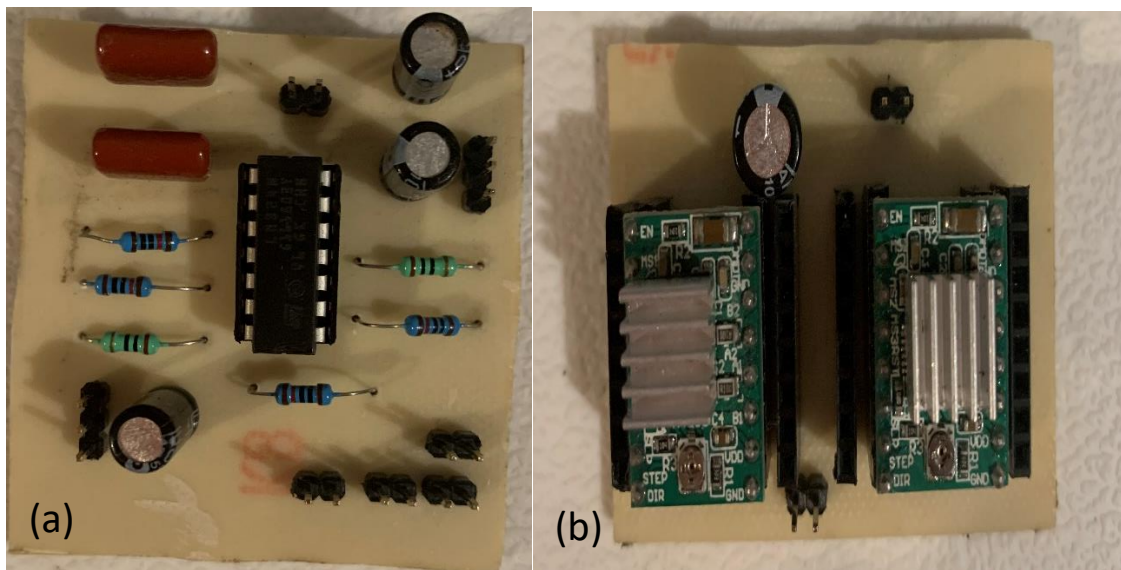


Figura 46 PCB's de (a) adquisición de datos y (b) para el control de los motores a pasos.

3.9 Interfaz Grafica

La interfaz gráfica se elaboró mediante el software Qt designer, este software es similar a Visual Studio de Microsoft, pero a diferencia de este último nos entrega un archivo que puede programarse mediante lenguaje Python. De igual manera que la programación en C#, esta programación es una a base de eventos, dependiendo de las acciones que realice el usuario, se desencadenará una acción específica. La comunicación entre ellos se realiza mediante el protocolo PyFirmata y StandardFirmata.

Esta interfaz gráfica está diseñada y desarrollada en tres secciones: (1) Control de los motores a pasos, (2) Visualización de la posición actual del sistema en los ejes (Theta, Z) y (3) Exportación de datos, en la Figura 47 se presenta la caratula de la interfaz gráfica mostrando las tres secciones anteriormente mencionadas.

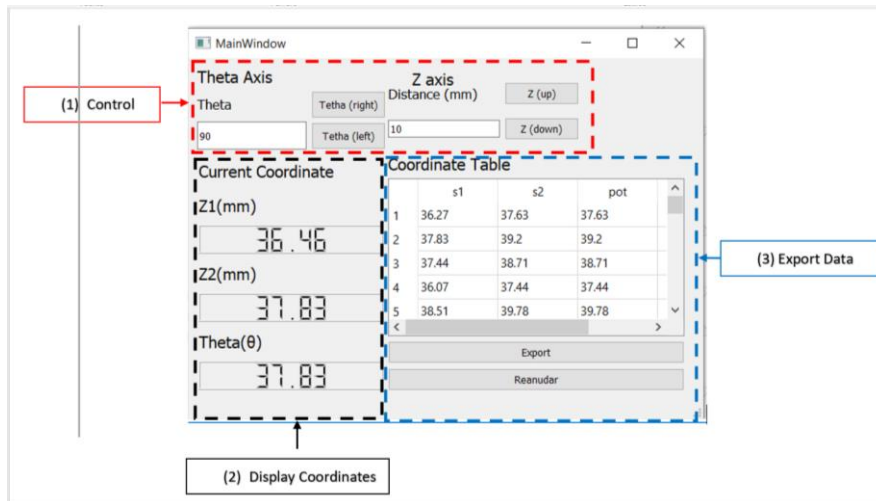


Figura 47 Interfaz gráfica utilizada para las pruebas finales del prototipo, diseñada y desarrollada en Qt designer y programada en lenguaje Python

La sección (1) o sección de control, controla el movimiento de los motores a pasos, para que estos realicen la cantidad de pasos necesarios para desplazarse o posicionarse en la coordenada que el usuario ingresó. En el caso del eje Theta, su desplazamiento es en un rango de 0 a 180 grados, o bien este se desplaza sobre el perímetro de una circunferencia con desplazamientos de derecha a izquierda y viceversa, por lo tanto, se colocaron los botones (Theta- right) y (Theta-left). Para el eje Z, debido a que su desplazamiento se realiza sobre el espacio interno del sistema de posicionamiento, se colocaron los botones (Z-back) y (Z-forward) para retroceder o avanzar la distancia que el usuario determine según sea el caso.

La sección (2) o sección de visualización de coordenadas o posición actual, muestra visualmente el valor obtenido en tiempo real por los sensores, se muestran los valores obtenidos por los dos sensores Sharp para el eje Z y el potenciómetro para el eje Theta. De esta manera se puede evaluar la precisión con la que sistema realiza los desplazamientos o la capacidad de este mismo para posicionarse sobre una coordenada o posición en específica.

La sección (3) es la sección de exportación de datos, en esta sección se almacena las mediciones obtenidas por los tres sensores y se almacena en una tabla, cuando se realice el total de mediciones o finalice la prueba correspondiente se pueden exportar los datos obtenidos por estas. El formato en que se exporta es (.xls), también puede exportar los datos en formato (.CSV) para analizar y procesar los datos con herramientas como Pandas o en ambientes como Jupyter.

3.10 Metodología para las pruebas de precisión del prototipo.

Se realizaron varios tipos de pruebas utilizando diferentes plataformas de programación y adquirió de datos. En cada uno de los apartados posteriores se presentan los procedimientos realizados, las observaciones y correcciones que se llevaron en cada una de las pruebas. De esta manera, para mejorar la precisión de los desplazamientos del prototipo como la precisión de los sensores para determinar la posición del prototipo en los ejes (Z, Theta).

3.10.1 Prueba 1: Protocolo StandardFirmata y PyFirmata con sensores ultrasónicos.

El primer eje sometido a pruebas para evaluar la precisión de los desplazamientos generados y controlados por los motores a pasos fue el eje Z, en esta primera prueba se utilizaron los sensores ultrasónicos. (Figura 34) (Configuración 1, Eje Z). Se utilizó una tarjeta Arduino Due con el programa de comunicación StandardFirmata de Arduino. Este programa nos permite utilizar los puertos analógicos y digitales de la placa de Arduino utilizando *Python*. Con el programa StandardFirmata es posible programar en *Python* y trasladar el programa a un microcontrolador, como si se estuviera programando en Arduino. Se consideró utilizar *Python* debido a la creciente importancia de este lenguaje de programación sobre diferentes sectores y su alto impacto, algunas de ellas son: Data Science, Machine Learning, Inteligencia Artificial, etc.

El procedimiento para evaluar la precisión de los desplazamientos fue el siguiente: Primero mediante un Script en *Python* se programó avanzar 2 cm por sección, considerando que el área disponible era 12 cm, posteriormente los datos adquiridos por los sensores ultrasónicos se exportaron en un formato .xls para su procesamiento y finalmente se graficaron los datos con las posiciones finales y se evaluaron la precisión del prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento para desplazar el arco estereotáctico auxiliar como del sensor ultrasónico de verificar que se encuentre en la coordenada o distancia anteriormente definida por el usuario. En esta prueba se utilizó la configuración de dos motores a pasos, 2 controladores A 4899 y dos señales independientes. Los controladores A4899 se configuraron en la modalidad 1/8 de paso, esta configuración transforma los 200 pasos que se requieren por default para que el motor a pasos

realice una vuelta a 800 pasos, aumentando de esta manera la precisión de los desplazamientos. En la Figura 48 se presenta la configuración descrita anteriormente.

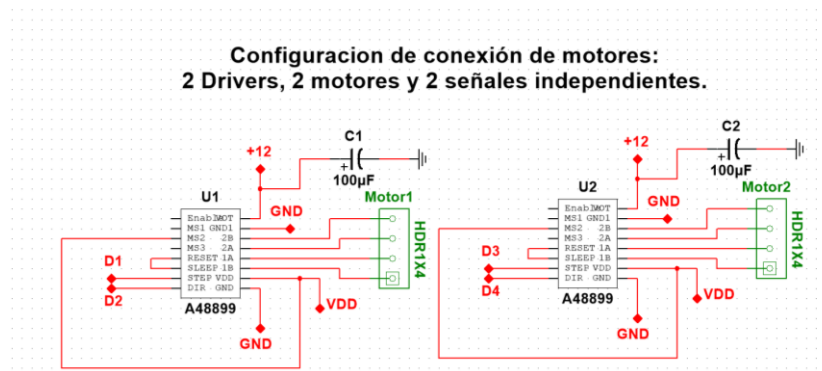


Figura 48 Diagrama de conexiones para la configuración de motores en la primera prueba: 2 motores a pasos, 2 controlador y dos señales independientes.

3.10.2 Prueba 2: Tarjeta Raspberry Pi 3 + y Python.

En esta segunda prueba mediante el uso de la tarjeta de Raspberry Pi 3 +, se trasladó el programa de la primera prueba al ambiente de Raspberry con *Python*, como el programa de la primera se encontraba desarrollado de igual manera en *Python* únicamente se requirió anexar los comandos y referencias de la tarjeta de Raspberry Pi 3 +. Uno de los ‘inconvenientes’ de usar el ambiente de Raspberry de la manera tradicional es el uso obligatorio de un monitor, ratón y teclado adicional, aunque se puede configurar la tarjeta de una manera que ocupen el ratón, pantalla y teclado del computador del usuario utilizando la red Wifi local, aunque para la primera configuración es necesario conectarla a un monitor, teclado y ratón independientes.

Se siguió la metodología anteriormente descrita: Mediante un Script desarrollado en *Python* los motores moverán la pieza sujetadora a una distancia de 2 cm, posteriormente los sensores ultrasónicos verificarán la distancia que se desplazaron las piezas, se exportarán los datos a un archivo (.CSV) para su procesamiento y análisis en Jupyter, esta última aplicación que se encuentra en el Ambiente de Anaconda para *Python*.

La decisión de utilizar el ambiente de Anaconda, específicamente Jupyter, es la integración entre el lenguaje en que se está desarrollando la aplicación, el lenguaje de la interfaz gráfica y el lenguaje que se estará utilizando para realizar el procesamiento de datos. Jupyter es una aplicación con una gran cantidad de herramientas, librerías, documentación, etc. Por ejemplo: Pandas es una de las librerías más potentes y ampliamente utilizada, para el procesamiento y manejo de datos en tablas en Python. Como también se encuentran librerías para la representación gráfica de los datos con una amplia variedad de opciones y modelos (Seaborn, Matplotlib).

Un cambio adicional que se realizó durante esta segunda prueba fue un cambio en las conexiones entre el controlador y los motores. En esta prueba se realizó una conexión (Figura 49) de motores en serie para sincronizarlos y de esta manera, evitar una diferencia de pasos entre ambos motores. La configuración final para los motores durante esta prueba fue: 2 motores a pasos, 1 controlador y 1 señal de control.

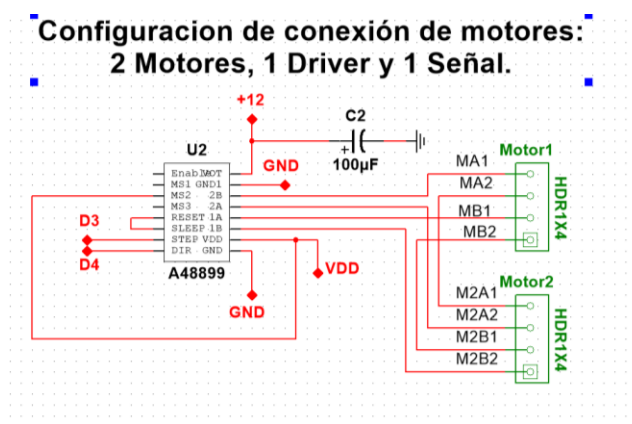


Figura 49 Esquema de conexiones entre los motores a pasos para tener una configuración en serie para su sincronización.

3.10.3 Prueba 3: Sensores Sharp infrarrojos modelo GP2Y0A41SK0F en Arduino (C++)

En esta tercera prueba, en la búsqueda de alternativas para seleccionar el sensor y el lenguaje de programación para medir la precisión de los desplazamientos generados del sistema estereotáctico de posicionamiento. En el eje Z, se decidió realizar una serie de pruebas en la plataforma Arduino programado en lenguaje (C++) utilizando el sensor Sharp infrarrojo modelo GP2Y0A21YKF0 que tiene un rango 10 cm a 80 cm.

En base a la experiencia obtenida por las pruebas con el sensor ultrasónico, se decidió utilizar el filtro de media exponencial digital, también se anexo un filtro pasa bajas electrónico entre la fuente

de alimentación y el sensor para reducir el ruido generado por la fuente de alimentación. Una consideración adicional fue que se observó que la salida analógica del sensor Sharp se encontró por debajo a lo reportado por el fabricante [27] , 1.3 V en lugar de 2.4 V para la posición de 0 cm, por lo tanto, se decidió implementar una etapa de amplificación de la señal mediante un amplificador no inversor con el operacional LM324N.

En la Figura 50 se presenta un diagrama con las etapas del proceso para la adquisición de datos. Este proceso está conformado por un filtro analógico, una amplificación de señal y un procesamiento de datos aplicando el filtro de media exponencial.

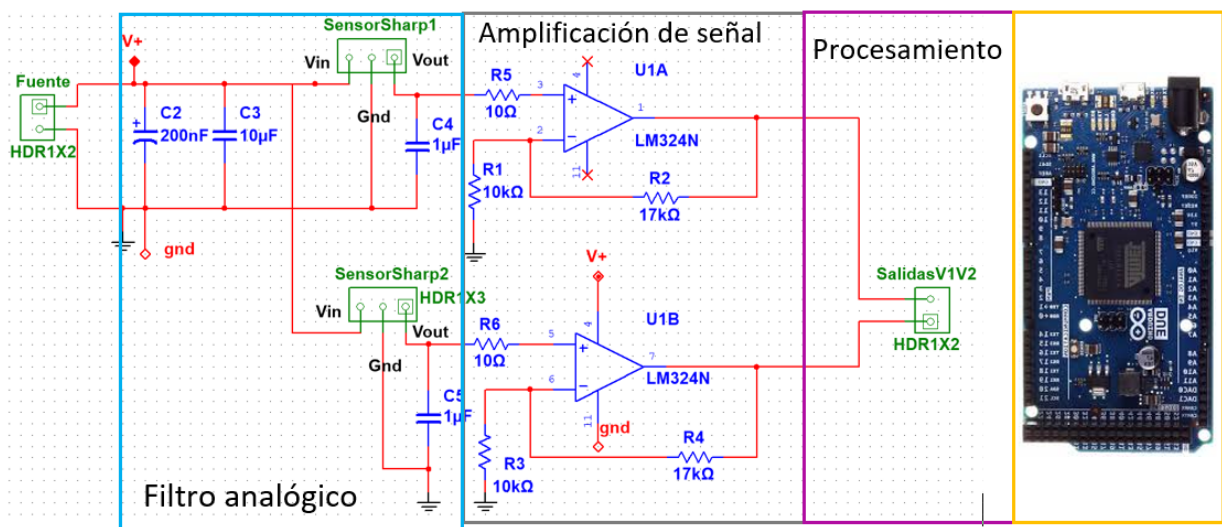


Figura 50 Diagrama sobre la adquisición, filtrado, amplificación y procesamiento de la señal obtenida del sensor Sharp en la segunda prueba del Eje Z.

Cuando se terminaron de incluir los acondicionamientos necesarios para el funcionamiento ideal en esta prueba se prosiguió a la caracterización del sensor Sharp infrarrojo para el área específica del sistema en la que realizaran los desplazamientos. Esto con el objetivo de obtener la ecuación característica del comportamiento del sistema estereotáctico de posicionamiento, de esta manera es posible mejorar la precisión de los sensores, debido a que únicamente funcionaran para un área y rango determinado. Este procedimiento consistió en realizar una cantidad controlada de pasos generados por los motores a pasos y controlados por el usuario, con la finalidad de desplazar el arco estereotáctico auxiliar (Figura 36) (E) y mediante los sensores Sharp infrarrojos (Figura 36) (G) obtener el valor específico para cada posición.

En esta prueba y posteriores se anexará un filtro de media móvil exponencial, expresada con la ecuación 1, con el objetivo de mejorar la calidad de los datos obtenidos por los sensores infrarrojos y de esta manera eliminar el ruido persistente.

$$A_n = \alpha * M + (1 - \alpha) * A_{n-1} \quad (1)$$

- $A_n =$ *Nuevo valor*
- $\alpha =$ *Factor de suavizado*
- $A_{n-1} =$ *Valor Anterior*
- $M =$ *Valor actual*

Esta ecuación es utilizada en aplicaciones donde es requerido un filtro digital para separar las cantidades excesivas de ruido o en sistemas que son muy sensibles a señales que cambian repentinamente de valor. La desventaja es que es necesario un tiempo de estabilización cuando ingresa un nuevo valor, el filtro debe procesar y adaptarse al nuevo valor. El valor del factor de suavizado α afecta de dos maneras al comportamiento del filtro: (1) entre menor sea el valor de α incrementara el tiempo que le toma al filtro adaptarse cuando este recibe un nuevo valor. (2) Entre menor sea el valor de α , el filtro eliminara el ruido, pero esto puede provocar que durante el filtrado confunda un nuevo valor con ruido de tal manera que lo eliminaría. Por último, se muestra en la ecuación 2, la sentencia que se utilizó para declarar en el programa en lenguaje C++ la ecuación del filtro de media móvil exponencial.

$$adc_{filtrado} = (\alpha * adc_{raw}) + ((1 - \alpha) * adc_{filtrado}) \quad (2)$$

3.10.4 Prueba 4: Sensores Sharp infrarrojos modelo GP2Y0A41SK0F con protocolo StandardFirmata y PyFirmata.

En esta cuarta prueba se empleó el protocolo de comunicación StandardFirmata de Arduino en su implementación para programar la tarjeta Arduino Due en lenguaje Python en conjunto con la librería PyFirmata. Esta última tiene problemas en manejar sensores digitales, esto se debe a la latencia generada por el proceso de comunicación de Arduino, PyFirmata y el sensor ultrasónico. En consideración al punto anterior, en esta prueba, se utilizará el sensor Sharp infrarrojo modelo GP2Y0A21YKF0, debido a que este sensor cuenta con una salida analógica. Por cada cambio de

posición del sistema, el sensor Sharp infrarrojo GP2Y0A21YKF0 tendrá una variación de voltaje en su señal de salida. En esta prueba, se integró el sistema de control de motores y el sistema de adquisición de datos en una única tarjeta. De esta manera, se disminuyó el número de dispositivos empleados en el control de desplazamientos y adquisición de datos del sistema de posicionamiento estereotáctico. En esta prueba nuevamente se realizó la respectiva caracterización de los sensores Sharp infrarrojos, esto se debió a que *Python* escala los valores de 0 a 1, a diferencia que en Arduino que depende de la resolución de los ADC de las tarjetas, ejemplo: 8 bits (1023) en el Arduino UNO y 12 bits (4045) para el Arduino DUE. Como se mencionó en la Prueba 3, que se utilizaría la ecuación del filtro exponencial móvil para el tratamiento de los datos obtenidos por los sensores Sharp infrarrojos. A continuación, se muestra la ecuación utilizada en *Python* para la aplicación del filtro digital:

$$adcf = (\alpha * adc_raw1) + ((1 - \alpha) * adcf)(3)$$

3.10.5 Prueba 5: Sensores Sharp GP2Y0A41SK0F (4-30) cm Pololu con Arduino y Tarjeta Arduino DUE

En esta quinta prueba se ocupó el sensor Sharp modelo GP2Y0A41SK0F que tiene un rango de operación de 4 a 30 cm. Este cambio con respecto a las pruebas anteriores se realizó con la finalidad de mejorar la precisión de las mediciones. El área en que se desplazará el sistema estereotáctico de posicionamiento es de 15 cm, ± 2 cm, seleccionamos un sensor con un rango menor de medición, pero con una resolución mayor, ya que el objetivo principal de las pruebas es verificar la precisión de los desplazamientos.

Una modificación más fue la selección y el ajuste del ADC de la tarjeta de Arduino Due, debido a que en la primera prueba se utilizó la configuración por defecto, 8 bits para el ADC (1023) valores. Pero el Arduino Due tiene un ADC de 12 bits, es decir, puede distribuir 5v en 4095 valores. Mejorando de esta manera la resolución del ADC y en consecuencia la precisión del sistema, teóricamente hablando.

En una investigación más profunda sobre el funcionamiento de los sensores Sharp infrarrojos y las diferencias que puedan tener con respecto a lo declarado por el fabricante en su hoja datasheet. En [27] se recomienda utilizar un recubrimiento para que los sensores no entren en contacto con la luz ambiental o artificial, ya que pueden alterar su comportamiento del mismo. En la Figura 45 se muestra al sensor Sharp infrarrojo GP2Y0A41SK0F con un recubrimiento para protegerlo de la luz que se encuentre en el ambiente. Con la finalidad de observar si los datos obtenidos cambian significativamente cuando los sensores infrarrojos no entran en contacto con alguna luz que cause alguna interferencia.

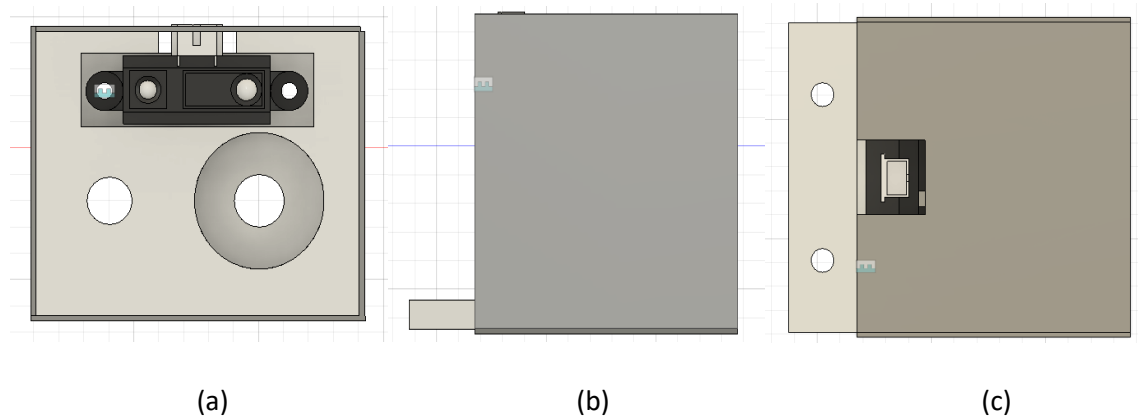


Figura 45 Sensor Sharp con cubierta incluida para la protección del sensor contra la luz ambiental. Vista (a) Frontal (b) Lateral (c) Superior

Una diferencia adicional con respecto a la prueba anterior es la caracterización de ambos sensores Sharp, en la prueba anterior se ocupó la misma ecuación para el tratamiento de los datos y convertir los datos obtenidos por los sensores en distancia. Este proceso de caracterización se realizó para verificar si los sensores pudiesen tener un comportamiento diferente entre ellos y sus posibles afectaciones a la obtención de los datos finales. Por último, en la Figura 51 se presenta un diagrama representado la forma en que quedó el prototipo y las tarjetas de adquisición de datos.

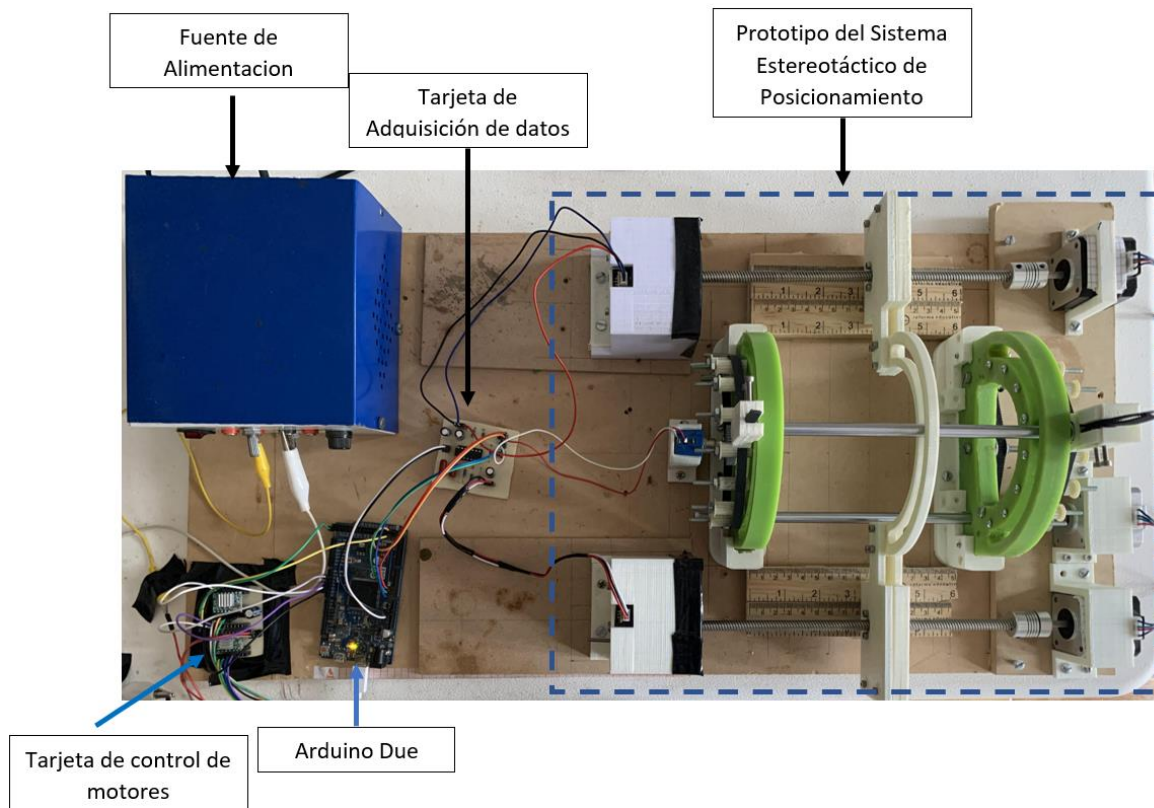


Figura 51 Diagrama mostrando elementos involucrados para la realización de las pruebas finales.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las diferentes pruebas que se realizaron para verificar la precisión de los desplazamientos generados por el prototipo del sistema estereotáctico. En la sección de Metodología se explicó las particularidades de cada una de las pruebas realizadas, los procedimientos y modificaciones que se realizaron en cada una de las pruebas.

4.1 Prueba 1: Protocolo StandardFirmata y PyFirmata con sensores ultrasónicos.

En la Figura 52 se presentan los resultados obtenidos en la primera prueba. Se puede observar el ruido que se mantiene de manera persistente sobre los datos adquiridos afectando al procesamiento de datos posterior. Observando estos datos se decidió de cambiar de plataforma para mejorar la calidad de la adquisición de datos.

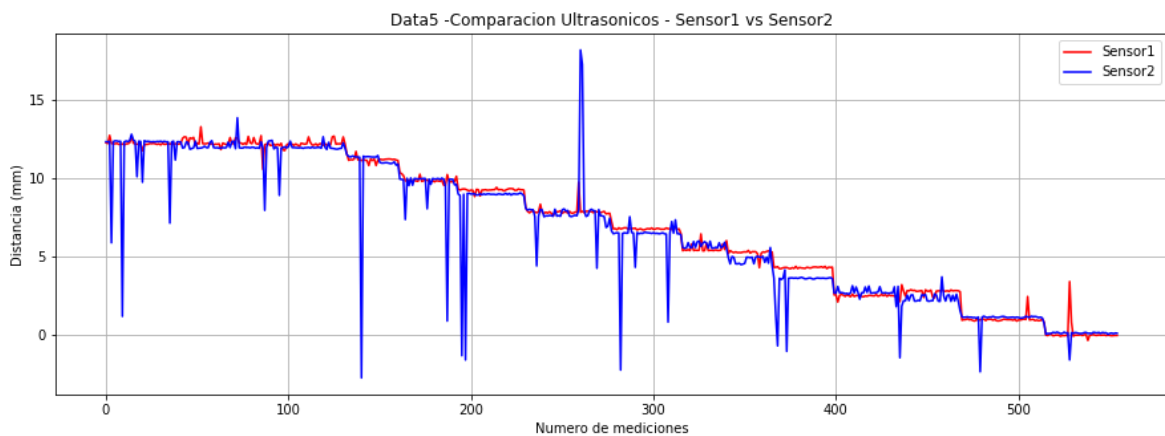


Figura 52 Resultados obtenidos con los sensores ultrasónicos, comparándose para mostrar la diferencia e inestabilidad de las mediciones obtenidas por ambos sensores.

Una investigación posterior se encontró que el protocolo de comunicación StandardFirmata de Arduino cuenta con ciertas limitaciones en el uso de sensores digitales con puertos digitales y que se está intentando de realizar una “operación en tiempo real” con un sistema operativo que no opera en tiempo real. Esto es porque los programas en *Python* pueden ocupar la memoria, tarjeta gráfica y procesador del computador. En el periodo de tiempo de recepción, envío y procesamiento

de datos se provoca una alteración al valor final afectando a los datos. En comparación que cuando se ocupan los microcontroladores de la manera tradicional en donde se ocupa la memoria y procesador internos. Debido a esta situación la primera adquisición de datos proporcionó resultados erróneos y se replanteó la necesidad de cambiar de sensor o ambiente de programación para el uso de sensores de medición de distancia con salida digital.

En el movimiento generado por los motores a pasos, se detectó una desincronización entre ambos motores, afectando que el desplazamiento no se realizaba de manera uniforme, por lo tanto, se planteó cambiar la configuración de motores.

4.2 Prueba 2: Tarjeta Raspberry Pi 3 + y Python.

En esta segunda prueba se obtuvo como resultado los datos presentados en (Figura 53) y observamos que el sensor captó cada cambio de posición de la pieza cuando esta se desplazaba a lo largo del eje Z. En la misma Figura 53 se observa una cantidad de ruido considerable en los datos obtenidos, este ruido se presenta de manera más significativa en algunas zonas específicas de los datos, mostrando visualmente la inestabilidad del sensor ultrasónico para la medición de los desplazamientos del sistema durante esta prueba preliminar.

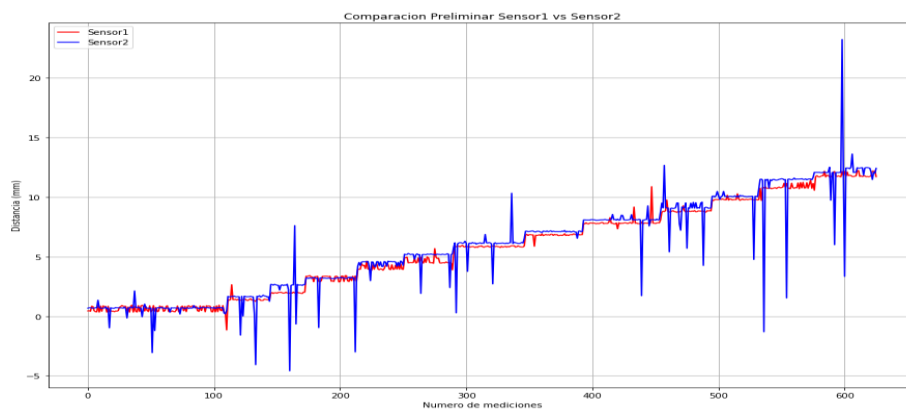


Figura 53 Comparación de las señales obtenidas a través de los sensores ultrasónicos, mostrando las afectaciones del ruido a la señal.

En un intento por reducir el ruido presente en los datos obtenidos, se realizó un promediado que funcionaría como un filtro para separar o disminuir el ruido que se presenta durante las mediciones. El filtro aplicado no tuvo un efecto importante debido a que en unas secciones del muestreo de

datos presentan grandes variaciones afectando considerablemente el promediado. En la Figura 54 se presentan los datos filtrados mediante un promedio de 5.

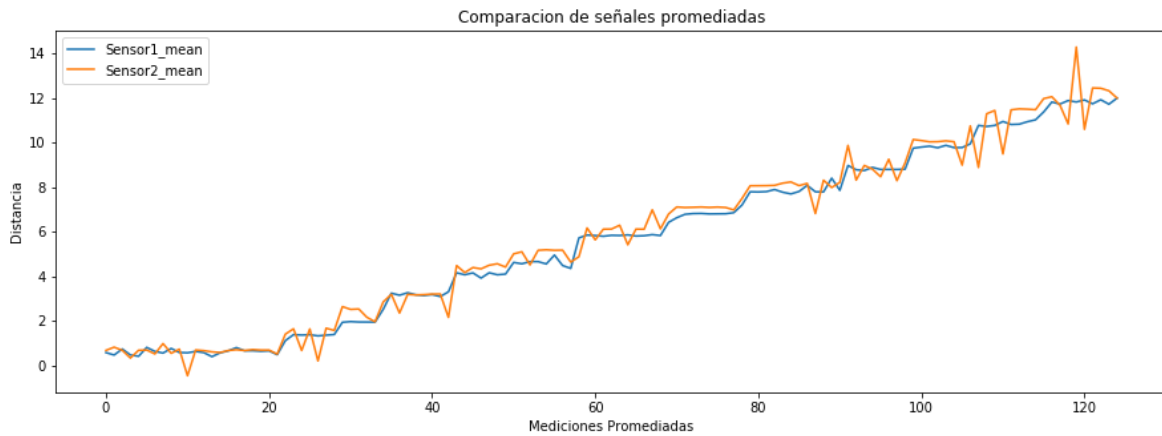
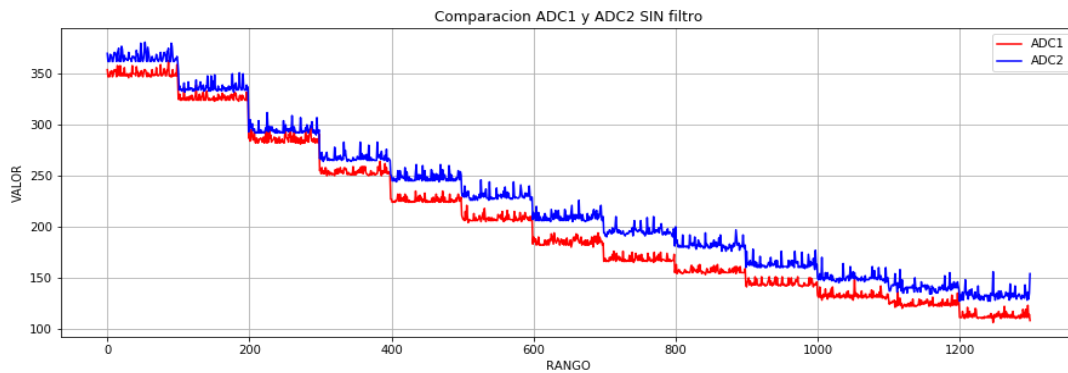


Figura 54 Señales obtenidas después del filtrado por promediado para eliminar el ruido excesivo.

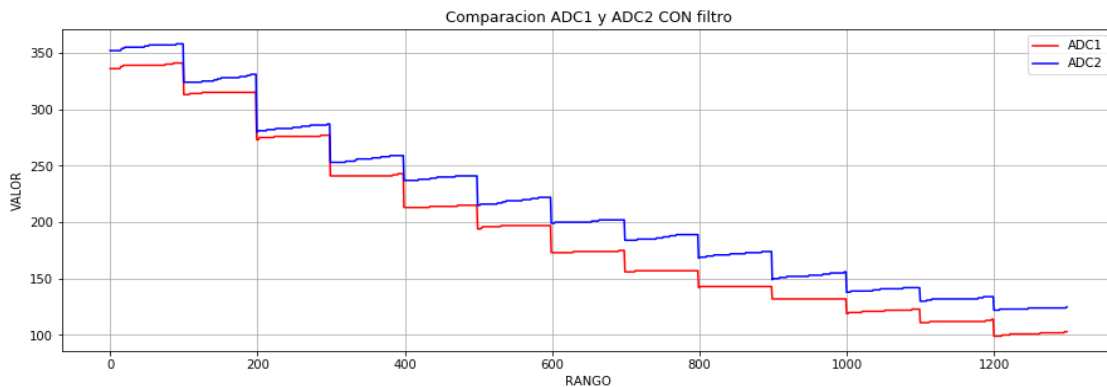
Se observa en la Figura 54 que el filtrado por promediado no fue capaz de eliminar el ruido en la señal (Sensor2_mean). Este ruido sigue presente en la señal afectando a la posición final medida por los sensores. De esta manera se determinó cambiar de sensores para mejorar la precisión del sistema, en la medición de la posición del eje Z. Por último, la configuración de motores de conexión en serie demostró ser la mejor opción debido ya que no se observó una diferencia entre la inicialización de los motores como los pasos realizados por los mismo. Se decidió ocupar esta configuración para las pruebas posteriores.

4.3 Prueba 3: Sensores Sharp infrarrojos modelo GP2Y0A41SK0F en Arduino (C++)

En esta tercera prueba se resolvieron las observaciones y fallas presentadas en la prueba 2, mejorando la capacidad de adquisición de datos por parte del prototipo. Primero se presenta la mejora en la adquisición de datos por parte del sistema utilizando la nueva plataforma y lenguaje de programación. En la Figura 55 se presenta una diferencia entre la adquisición de datos aplicando diferentes etapas de filtrado. En la Figura 55 (a) se presentan los datos obtenidos sin ningún tipo de tratamiento o filtrado y en la Figura 55 (b) los datos aplicándose el filtro de media exponencial móvil.



(a)



(b)

Figura 55 Presentación de datos obtenidos por los sensores Sharp en Arduino. (b) Datos obtenidos utilizando las etapas de filtrado analógicas y digitales. (a) Datos obtenidos sin etapa de filtrado.

En la Figura 55 se puede observar la diferencia notable entre aplicar filtros digitales o analógicos en la adquisición de datos. Esto nos permitió seguir a la siguiente etapa de la prueba, consistió en la caracterización de los sensores para obtener las ecuaciones características del comportamiento de estos mismos. En la Figura 56 se presentan las ecuaciones obtenidas del proceso de caracterización de los sensores. Esto se realizó para incrementar la precisión de los sensores en un rango específico de medición.

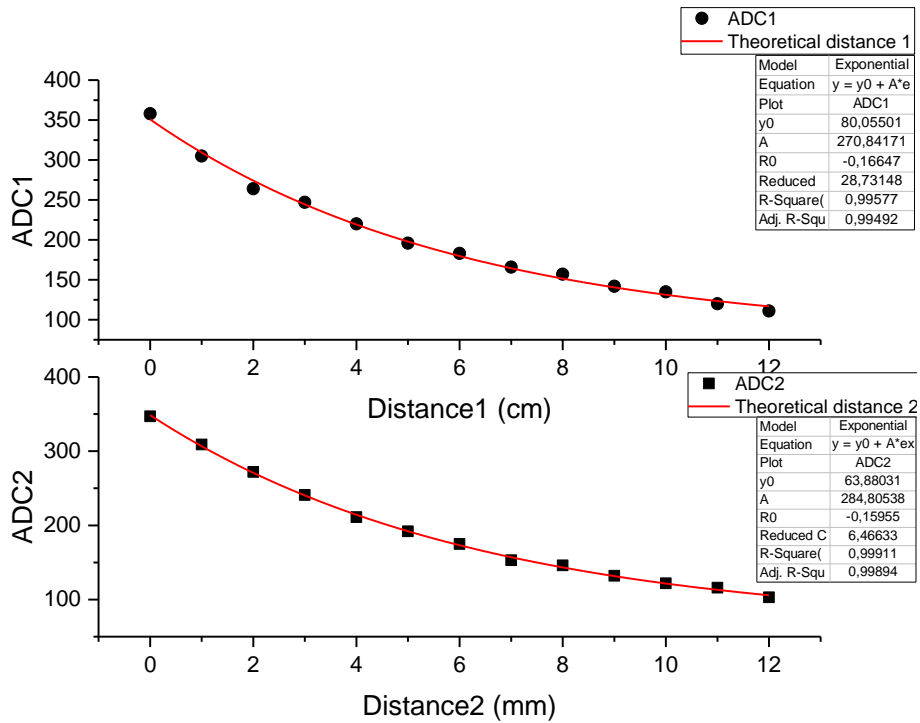


Figura 56 Ecuaciones características de los sensores Sharp infrarrojo GP2Y0A21YKF0 que describen el comportamiento de los desplazamientos del sistema en el eje Z. La línea roja representa los valores teóricos obtenidos por medio de la ecuación propuesta, los círculos y cuadrados negros representan los valores experimentales, obtenidos mediante medición directa.

En la última parte de la prueba de evaluación de la precisión de los desplazamientos, en el Eje Z, se almacenaron los datos en formato (.xls) y posteriormente se procesaron los datos obtenidos para obtener las posiciones finales. En la tabla 6, se muestran las posiciones finales obtenidas en centímetros y en la Figura 42 se enfatiza en mostrar la diferencia entre los valores reales obtenidos por los sensores Sharp infrarrojos (Mirar) (Círculo rojo- sensor1) (Círculo verde-sensor 2) con respecto a los valores teóricos.

Tabla 6 Posiciones finales de la evaluación de la segunda configuración.

DT	DS1	DS2
0	-0.3176	-0.4761
1	0.4442	0.5016
2	1.7572	2.1
3	3.0932	3.2725
4	4.296	4.0446
5	5.1435	5.0632
6	6.3735	6.0435
7	7.3978	6.8804
8	8.3187	7.8275
9	9.11	9.1427
10	9.9541	10.112
11	10.7591	10.8015
12	11.782	11.5694

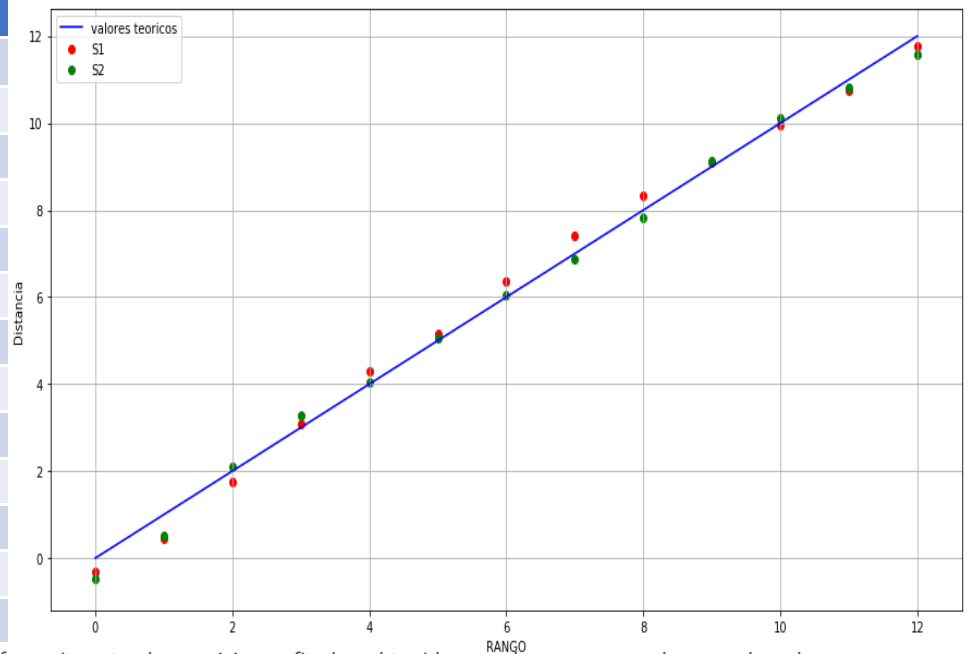


Figura 57 Grafica mostrando la diferencia entre las posiciones finales obtenidas por los sensores y las coordenadas teóricas.

4.4 Prueba 4: Sensor Sharp con el protocolo StandardFirmata y PyFirmata (Python)

Se presentan los resultados obtenidos en la Prueba 4, utilizando los sensores Sharp infrarrojos con el protocolo StandardFirmata y PyFirmata. Primero se presenta la ecuación obtenida por el proceso de caracterización de los sensores Sharp debido a que el manejo de datos en Python es diferente con respecto a otras plataformas de programación. Esta ecuación se presenta en la Figura 56.

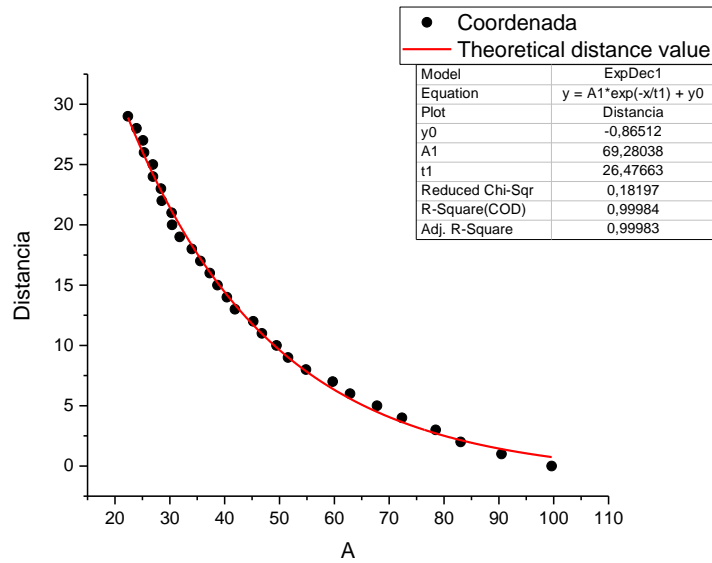


Figura 58 Grafica y ecuación característica del comportamiento del sistema, utilizando Python para la adquisición de datos.

Posteriormente la ecuación obtenida en la Figura 58, se adaptó al apartado de procesamiento de datos para obtener la variable de interés (mm). Después de este procedimiento se procedió a evaluar la precisión de los desplazamientos generados por el prototipo. En la Figura 59 se presentan los resultados finales obtenidos de la prueba 4. En la Figura 59 se presenta la diferencia entre la posición esperada y la posición final obtenida por los sensores, esta diferencia es el error que se tiene por cada posición y se observa la tendencia del comportamiento de los sensores Sharp infrarrojos.

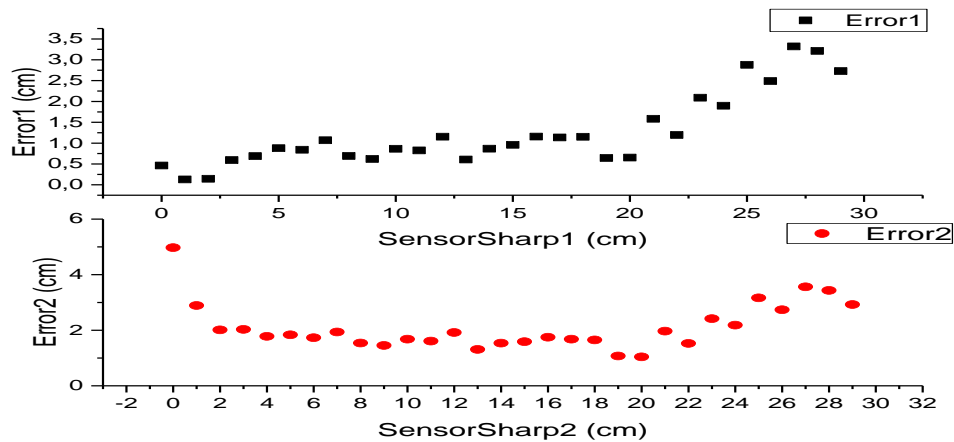


Figura 59 Graficas que muestran la diferencia entre la posición esperada o teórica y la posición o valor experimental.

Después de analizar los datos y evaluar el error obtenido en esta prueba superaban ampliamente el error máximo tolerable para el sistema ($\leq 1\text{mm}$), se realizó un cambio de sensores y plataforma de programación. Debido a que en la primera prueba realizada con los sensores Sharp en Arduino se obtuvieron mejores resultados a los de esta segunda prueba.

4.5 Prueba 5: Sensores Sharp GP2Y0A41SK0F (4-30) cm Pololu con Arduino y Tarjeta Arduino DUE

Los resultados obtenidos por la Prueba 5 están divididos en dos etapas. Primero se muestran los resultados obtenidos utilizando el circuito (Mirar Figura 50) en una tablilla de pruebas. En la segunda etapa de la prueba 5 se utilizarán las PCB manufacturadas (Mirar Figura 46) para la adquisición de datos.

4.5.1 Prueba 5 con tablilla de pruebas (Protoboard)

En la Figura 60 se presentan las ecuaciones obtenidas del proceso de caracterización de ambos sensores en esta prueba 5.

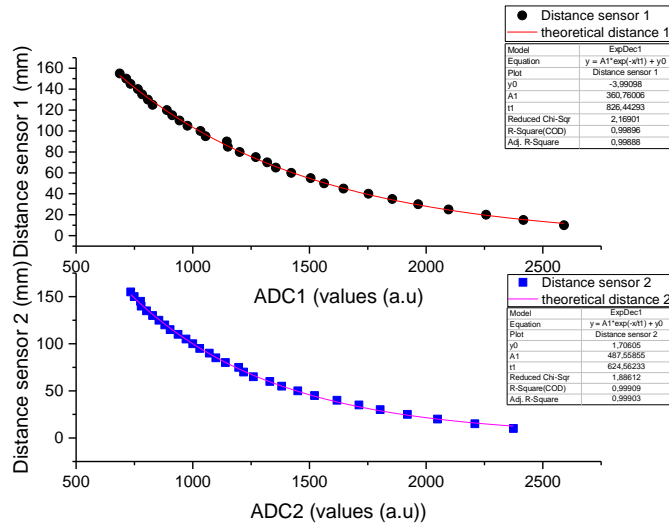


Figura 60 Graficas y ecuaciones características del sistema obtenidas mediante los sensores Sharp con una protección en contra de la luz ambiental.

Posteriormente, se adaptó la ecuación obtenida (mirar Figura 60) anteriormente para el tratamiento de los datos obtenidos por el ADC y convertirlos en la variable de interés (mm).

Para el análisis de datos se realizó una comparación entre las distancias obtenidas mediante la utilización de ecuación obtenida en la caracterización y el valor teórico para de esta manera obtener el error teórico. Esto se aplicó para ambas ecuaciones y dicho procedimiento se realizó también para los valores experimentales obtenidos en esta prueba.

En la Figura 61 se muestra el error por posición cada una de las posiciones evaluadas, (a) y (b) representan el error que nos proporciona la ecuación característica del sistema (Mirar Figura 60) para el sensor1 y sensor 2, respectivamente. En el caso de las gráficas (c) y (d) representan el error experimental para los sensores 1 y 2, respectivamente.

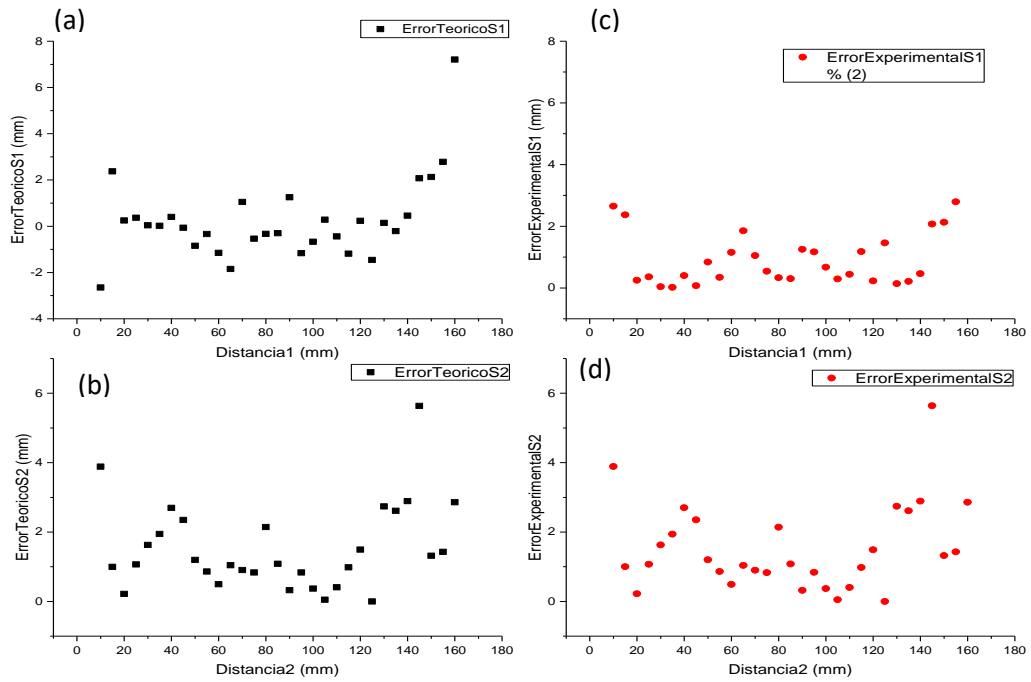


Figura 61 Graficas de los resultados obtenidos a través de la evaluación de las ecuaciones obtenidas de la caracterización de los sensores. (a) Es el error teórico y (c) error experimental del sensor 1. (b) Es el error teórico y (d) el error experimental del sensor 2.

En esta prueba tomando únicamente en consideración el error de las coordenadas prácticas para ambos casos, se logró acercarse en gran medida al error máximo tolerable ± 1 mm para nuestro sistema. Pero en algunas secciones del sistema, el error máximo individual entre posición teórica y real puede llegar a ser de 7 mm para el sensor Sharp infrarrojo 1 y 3.89 mm para el sensor Sharp infrarrojo 2. Con estas observaciones llegamos a la siguiente conclusión para el comportamiento general de los sensores Sharp infrarrojos: entre mayor sea la distancia entre el sensor y el objeto, el error entre las mediciones tendrá una tendencia en aumento. Otro punto que se consideró fue las interferencias que pueden provocar los componentes electrónicos al ser utilizados en una tablilla de pruebas, anteriormente no se manufacturo un PCB debido a que el error promedio del sistema en general era considerable, pero en este caso, el error promedio no se encuentra lejos de nuestro error máximo permitido, por lo tanto, la elaboración de un PCB para esta configuración tiene más sentido.

4.5.1 Prueba 5 con PCB.

En el capítulo anterior se presentaron los resultados de las pruebas preliminares realizadas con tablillas de pruebas (Protoboard). Con la integración de las tarjetas PCB's se esperaba mejorar los resultados obtenidos anteriormente, porque con este método se espera eliminar el ruido o interferencia generado el cableado de las conexiones.

En los resultados obtenidos en esta segunda etapa de la prueba 5, se observó que el error se mantuvo en el mismo rango que en las mediciones obtenidas previamente. En la Figura 62 se presentan las gráficas de dos pruebas realizadas al prototipo. En el caso de la prueba 1, se obtuvo un error promedio de ± 1.40 mm para el sensor Sharp 1 y ± 1.45 mm para el sensor Sharp 2. Para la prueba 2, se obtuvo un error promedio ± 1.38 mm para el sensor Sharp 1 y ± 1.26 mm para el sensor Sharp 2.

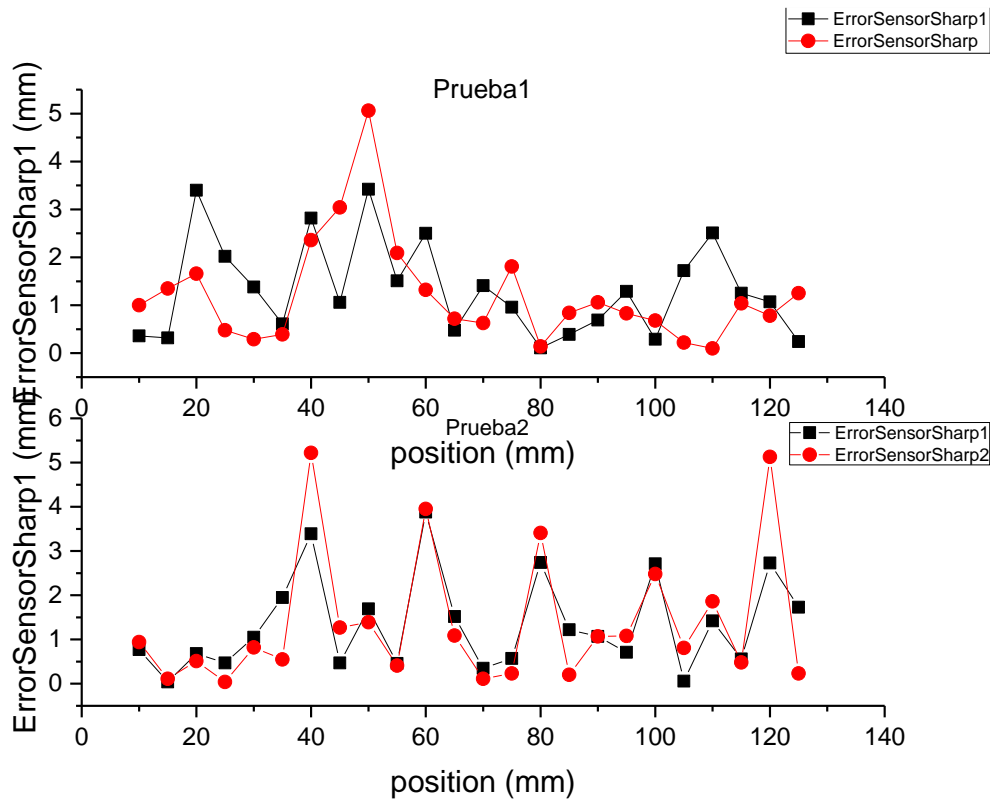


Figura 62 Graficas obtenidas en las pruebas finales, mostrando el error obtenido por posición, la línea y cuadro negro representan los datos obtenidos por el sensor Sharp 1 y el círculo y línea roja pertenecen al sensor Sharp 2

El error no disminuyo de manera notable en las pruebas finales, se mantuvo en el rango de ± 1.2 mm a ± 1.6 mm. Anteriormente se había establecido que el error máximo que se esperaba obtener era de ± 1 mm.

En el caso de las mediciones finales con respecto al eje Theta, sucedió una situación similar, no se obtuvo una diferencia notable entre los resultados obtenidos anteriormente y estos últimos.

En la Figura 63, se presentan los resultados obtenidos de tres pruebas realizadas para medir la precisión de los desplazamientos en el eje Theta. Se puede observar en la Figura 63 que el sistema se comporta de una manera estable durante la adquisición de datos, únicamente en ciertas posiciones el sistema se comporta de una manera inestable o el error obtenido es excesivamente grande. En promedio, el error obtenido en las pruebas se encuentra en $\pm 2.71^\circ$. El rango de medición fue de 20° a 175° debido al contacto entre diferentes piezas, que no fue posible abarcar los 180° .

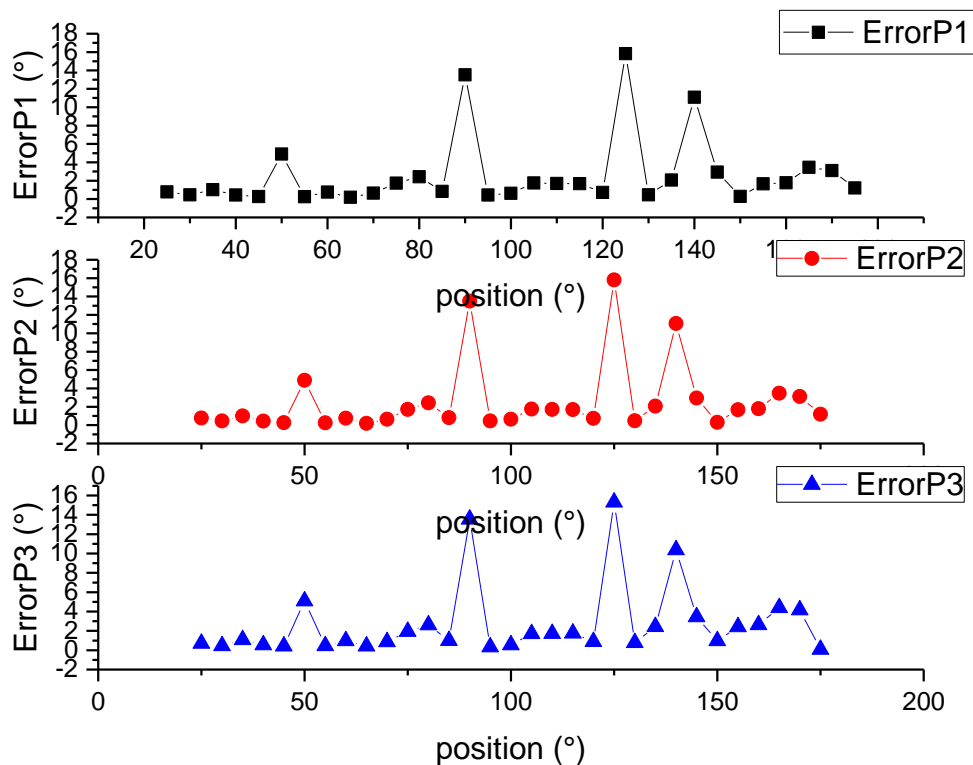


Figura 63 Resultados obtenidos de las pruebas finales después de evaluar la precisión de los desplazamientos en el eje Theta.

CONCLUSIONES

Se diseño, elaboro y evaluó un prototipo de un sistema estereotáctico de posicionamiento para el posicionamiento de antenas de ablación térmica. Se verifico que los desplazamientos realizados por el prototipo se realizan con una gran precisión y se verifico que el diseño realizado es viable para la aplicación de ablación térmica.

Se elaboro un sistema de posicionamiento estereotáctico adaptado a la población mexicana, se tomó como referencia el prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento y se adaptó a las medidas promedio (estatura) del mexicano.

El sistema estereotáctico de posicionamiento generado en este tema de tesis, es una nueva opción a considerar para el posicionamiento de las antenas de microondas para la técnica de ablación térmica, considerando que este tipo de sistemas se desarrollan principalmente para el área de neurocirugía, principalmente para la colocación de electrodos en el cráneo humano. Este sistema puede extrapolarse a diferentes partes del cuerpo o a diferentes poblaciones del mundo, únicamente se requieren las medidas específicas o referencias para adaptarlo.

No fue posible elaborar el sistema estereotáctico de posicionamiento estereotáctico re escalado a la población mexicana debido a la contingencia sanitaria COVID-19. Debido a las recomendaciones de la SSP, las instalaciones del instituto tecnológico de Orizaba cesaron sus labores, provocando que fuera imposible acceder al equipo y materiales que se encuentran en el laboratorio de Automatización del departamento de Maestría de ingeniería Electronica del instituto.

Trabajo Futuro – Recomendaciones.

Como puntos mejorables al sistema presentado en este tema de tesis o adaptaciones necesarias para mejorar su funcionamiento;

- Construir un prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento, con mayores dimensiones. Esto con la finalidad de verificar la capacidad de los desplazamientos con piezas a una mayor escala.
- Buscar nuevos sensores para la medición de la precisión de los desplazamientos realizados en el eje Z y Theta. Los sensores Sharp infrarrojos proporcionaron grandes resultados, pero se recomienda buscar sensores que puedan reducir el error obtenido en un rango de ± 1 mm. En el caso del eje Theta, el acondicionamiento del potenciómetro multivuelta fue funcional, pero debido a la escala de la aplicación su precisión estuvo comprometida.
- Pruebas de un prototipo del sistema estereotáctico de posicionamiento utilizando las antenas y que estas se encuentren activas.
- Validar con pruebas simuladas en algún tipo de Software de análisis de materiales, el comportamiento del sistema estereotáctico de posicionamiento cuando alguno de sus componentes entre en contacto con el campo electromagnético generado por las antenas de microondas.

REFERENCIAS

- [1] “• Tipos de cáncer más mortales en el mundo en 2020 | Statista.” <https://es.statista.com/estadisticas/636256/mortalidad-por-cancer-muertes-a-nivel-mundial-por-tipo/> (accessed Mar. 08, 2021).
- [2] American Cancer society, “Técnicas de cirugía menos invasivas para el cáncer,” *Cirugía del cáncer*, pp. 1–5, 2019, [Online]. Available: <https://www.cancer.org/es/tratamiento/tratamientos-y-efectos-secundarios/tipos-de-tratamiento/cirugia/tecnicas-quirurgicas-especiales.html>.
- [3] M. B. M. Carbonell Ruiz DJ, Ocete Ocete A, Lloret Estañ F, Rodríguez Sánchez D, Puertas Sales A, “Ablación termal con Microondas , experiencia inicial en un centro sobre 27 casos,” *Epos Seram*, vol. S-1128, pp. 1–28, 2014.
- [4] J. J. N. Miranda, S. M. Jiménez, A. M. Martínez, A. Mario, A. Vanegas, and J. J. A. Gallegos, “Sistema para centrar el marco estereotáctico en el cráneo,” vol. 11, no. 4, pp. 310–312, 2006.
- [5] M. Carballo-Barreda, R. Rodríguez-Rojas, A. Torres-Montoya, and G. López-Flores, “Atlas computarizado para la planificación de neurocirugías estereotácticas funcionales guiadas por imágenes,” *Neurocirugia*, vol. 18, no. 6, pp. 478–484, 2014, doi: 10.1016/s1130-1473(07)70254-3.
- [6] O. Alptekin *et al.*, “Stereotactic accuracy and frame mounting: A phantom study,” *Surg. Neurol. Int.*, vol. 10, no. 67, pp. 1–7, 2019, doi: 10.25259/SNI-88-2019.
- [7] C. Renier and N. Massager, “Targeting inaccuracy caused by mechanical distortion of the Leksell stereotactic frame during fixation,” *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, vol. 20, no. 5, pp. 27–36, 2019, doi: 10.1002/acm2.12576.
- [8] A. Rojas-Villabona, K. Miszkiel, N. Kitchen, R. Jäger, and I. Paddick, “Evaluation of the stability of the stereotactic Leksell Frame G in Gamma Knife radiosurgery,” *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, vol. 17, no. 3, pp. 75–89, 2016, doi: 10.1120/jacmp.v17i3.5944.
- [9] Takamitsu Fujimaki *et al.*, “SURG-21. BIOPSIA ESTEREOTÁCTICA PARA LESIONES CEREBRALES ASENTADAS PROFUNDAS MEDIANTE EL SISTEMA DE MARCO ESTEREOTÁCTICO LEKSELL |

Neurooncología | Oxford Academic,” *Neuro. Oncol.*, vol. 21, no. Supplement_6, pp. 244–244, Nov. 2019, Accessed: 26-Mar-2020. [Online]. Available: https://academic.oup.com/neuro-oncology/article-abstract/21/Supplement_6/vi244/5619164?redirectedFrom=fulltext.

- [10] H. Nakazawa *et al.*, “Geometric accuracy of 3D coordinates of the Leksell stereotactic skull frame in 1.5 Tesla- and 3.0 Tesla-magnetic resonance imaging: A comparison of three different fixation screw materials,” *J. Radiat. Res.*, vol. 55, no. 6, pp. 1184–1191, 2014, doi: 10.1093/jrr/rru064.
- [11] C. A. Edwards *et al.*, “A novel re-attachable stereotactic frame for MRI-guided neuronavigation and its validation in a large animal and human cadaver model,” *J. Neural Eng.*, vol. 15, no. 6, 2018, doi: 10.1088/1741-2552/aadb49.
- [12] A. D. Squires, Y. Gao, S. F. Taylor, M. Kent, and Z. T. H. Tse, “A Simple and Inexpensive Stereotactic Guidance Frame for MRI-Guided Brain Biopsy in Canines,” *J. Med. Eng.*, vol. 2014, pp. 1–7, 2014, doi: 10.1155/2014/139535.
- [13] Instituto Nacional de Cáncer, “¿ Qué es el cáncer ?,” *Tipos cáncer [Última Actual. 9 febrero 2015, Acceso 11 diciembre 2015]*, pp. 1–6, 2015, [Online]. Available: <http://www.cancer.gov/espanol/cancer/que-es>.
- [14] G.-M. C.J. Trujillo Romero, G. Rico-Martínez, J, “Thermal ablation : an alternative to bone cancer .,” vol. 7, pp. 36–47, 2018.
- [15] J. G. Fernández, “Ablación mediante radiofrecuencia versus microondas en el tratamiento de tumores renales de pequeño tamaño (T1a<4cm),” Universidad de Valladolid, 2017.
- [16] B. Pinilla, F. Luján, and L. Leija, “Antenas Micro-Coaxiales de Doble Ranura y Doble Ranura con Recubrimiento Para Tratar Tumores Óseos : Modelado Teórico .,” *Congreso Nac. Ing. Biomédica-CNIB2017*, pp. 3–6, 2017.
- [17] C. T. L. Carlos, “US2005049486.pdf,” 2005.
- [18] A. M. Martínez, J. J. A. Gallegos, and J. J. N. Miranda, “DISPOSITIVO PARA CENTRAR EL MARCO ESTEREOTACTICO EN EL CRANEO DUARANTE SU MONTAJE.,” A61B1/05, 2006.
- [19] J. Gale and A. Shawan, “(12) Patent Application Publication (10) Pub . No .: US 2016 / 0317241 A1,” 2016.

- [20] I. M. Carol, P. A. Us, J. L. Day, O. H. Us, E. G. Miller, and R. J. Riker, "United States Patent (10) Patent No .: (45) Date of Patent ;," 2002.
- [21] L. LD, "Modern Stereotactic Neurosurgery," *Bost. Martinus Nijhoff Publ.*, pp. 145–168, 1988.
- [22] G. EM and N. BS, "Historical development of stereotactic frames. Textbook of stereotactic and funcional neurosurgery.," *Gildenb. P*, no. McGraw-Hill, 1998.
- [23] R. L. S., "Principles and Practice of Stereotactic Radiosurgery," *New York Springer*, 2008.
- [24] "Pololu - Portador de controlador de motor paso a paso A4988." <https://www.pololu.com/product/1182> (accessed Jan. 09, 2020).
- [25] E. G. S. R. Castillo, P. R. C. Aranibar, M. G. S. Polar, L. V. G. Fuentes, and E. Z. Bolaños, "Aplicaciones y Teoría de Ingenieria de Microondas," *Clim. Chang. 2013 - Phys. Sci. Basis*, vol. 53, no. 9, pp. 1–30, 2014, [Online]. Available: https://www.cambridge.org/core/product/identifiier/CBO9781107415324A009/type/book_part.
- [26] M. N. O. Sadiku, *Elementos de electromagnetismo*. OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2003.
- [27] Luz Yolanda Toro Suarez, "Sensor Sharp GP2Y0A21YK0F." pp. 1–27, 2015.