

# ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE TRACKER SATELITAL PARA EL LARFYM

Octubre 2025

---

## Informe Final PPS

---

**Tutores:**

Laboratorio: Ing. Federico Dadam.  
Carrera: Ing. José Luis Amado.

**Autor:** Moutón, Alfonso  
**Matrícula:** 43547054

## Indice

<b>1 Introducción</b>	<b>5</b>
1.1 Objetivos . . . . .	5
1.1.1 Objetivos generales . . . . .	5
1.1.2 Objetivos específicos . . . . .	5
<b>2 Relevamiento e inventariado del laboratorio</b>	<b>6</b>
<b>3 Formas de obtención de posición</b>	<b>8</b>
3.1 Obtención de datos satelitales . . . . .	8
3.2 Modelos para estimar trayectorias . . . . .	9
<b>4 Análisis de los Actuadores</b>	<b>10</b>
4.1 Estado Actual y Mantenimiento . . . . .	10
4.1.1 Pruebas de laboratorio . . . . .	14
<b>5 Determinación de la electrónica</b>	<b>19</b>
5.1 Microcontrolador . . . . .	19
5.1.1 ESP32-DOWDQ6 . . . . .	19
5.2 Sensores . . . . .	20
5.2.1 Encóder magnético . . . . .	20
5.2.2 Potenciómetro . . . . .	21
5.2.3 Acelerómetro 9 DoF . . . . .	22
5.2.4 Reed Switch . . . . .	23
5.2.5 GPS . . . . .	23
5.3 Electrónica de potencia . . . . .	24
5.3.1 L298N . . . . .	24
5.3.2 DRV8801 . . . . .	25
5.3.3 BTS7960 . . . . .	26
5.3.4 DVR8812 . . . . .	28
5.3.5 L6205 . . . . .	29
<b>6 Diseño de partes mecánicas</b>	<b>31</b>
6.1 Modelado mecánico de los actuadores . . . . .	31
6.1.1 Diseño de las piezas para la plataforma . . . . .	33
6.1.2 No linealidad en la elevación . . . . .	36
<b>7 Trabajos de referencia</b>	<b>38</b>
7.1 Plataforma móvil portable . . . . .	38
7.2 Plataforma móvil para radioaficionados . . . . .	38
7.3 Tracker de la ISS de escritorio . . . . .	39

7.4 Tracker satelital autónomo . . . . .	40
<b>8 Conclusiones</b>	<b>41</b>

## Listas de Figuras

1	Ejemplo del inventariado . . . . .	6
2	Placas de RF obtenidas en el desensamble de equipos . . . . .	7
3	Parte del aluminio obtenido de los equipos . . . . .	7
4	Comparación de modelos. . . . .	10
5	Etiqueta correspondiente al actuador lineal. . . . .	10
6	Etiqueta correspondiente al actuador rotacional. . . . .	11
7	Actuador rotacional utilizado para el movimiento en azimuth. . . . .	11
8	Identificación de los elementos de la placa de control del actuador rotacional. . . . .	12
9	Estado del actuador rotacional previo al mantenimiento. . . . .	12
10	Tapa protectora diseñada e impresa en 3D. . . . .	13
11	Actuador lineal utilizado para el movimiento en elevación. . . . .	13
12	Diagrama de conexión de la bornera . . . . .	14
13	Prueba de laboratorio realizada con un actuador. . . . .	15
14	Medición de la corriente pico del motor CC. . . . .	15
15	Medición del tiempo de crecimiento del transitorio. . . . .	16
16	Medición del tiempo de establecimiento del transitorio. . . . .	16
17	Medición de la relación pulso/Azimuth. . . . .	17
18	Visualización de los datos en el puerto serie. . . . .	17
19	Estadísticas de los datos obtenidos del actuador para Azimuth. . . . .	18
20	Esquema de bloques del microcontrolador . . . . .	20
21	Valores máximos absolutos del IC L298N. . . . .	24
22	Características eléctricas del IC L298N. . . . .	25
23	Valores máximos absolutos del IC DRV8801. . . . .	26
24	Esquema de aplicación recomendado del IC DRV8801. . . . .	27
25	Valores máximos absolutos del IC BTS7960. . . . .	28
26	Esquema recomendado para conformar un puente completo con el IC BTS7960. . . . .	28
27	Protección contra sobre-tensión del IC BTS7960 . . . . .	28
28	Características generales del IC DVR8812 . . . . .	29
29	Condiciones de operación recomendadas del L6205. . . . .	30
30	Bomba de carga requerida para el funcionamiento del L6205. . . . .	30
31	Croquis del actuador rotacional. . . . .	31
32	Croquis del actuador lineal. . . . .	32
33	Vista Isométrica del actuador rotacional en <i>SolidWorks</i> . . . . .	32
34	Vista Isométrica del actuador lineal en <i>SolidWorks</i> . . . . .	33
35	Pieza base de la plataforma. . . . .	34
36	Piezas laterales que conforman el eje de elevación. . . . .	34
37	Eje de fijación del actuador lineal. . . . .	35

38	Vista previa del ensamblaje completo de la plataforma. . . . .	35
39	Dimensiones geométricas del sistema en elevación. . . . .	36
40	Identificación de los ángulos relevantes en el sistema. . . . .	36
41	Relación no lineal entre el desplazamiento del actuador y el ángulo de elevación. . . . .	37
42	Montura de antena portable. . . . .	38
43	Montura para radioaficionados. . . . .	39
44	Seguidor de escritorio para satélites LEO [1]. . . . .	39
45	Tracker satelital autónomo de ClearSkyAST. . . . .	40
46	Prototipo con las piezas impresas para determinar la factibilidad realizado en el laboratorio . . . . .	42

# 1 Introducción

En el presente informe se documenta el desarrollo de las actividades experimentales realizadas en el Laboratorio de Radiofrecuencias y Microondas (LARFyM) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. Este trabajo se enmarca como una extensión y complemento del Proyecto Integrador titulado “*Sistema de Recepción Satelital Meteorológico para Banda L basado en Radio Definida por Software*”, desarrollado por M. Cherino y E. Marclé.

El eje central de este estudio es la evaluación de la factibilidad de implementar un soporte motorizado de antenas, denominado *Tracker Satelital*, capaz de realizar el seguimiento y apuntamiento automático de satélites en órbita baja. Para tal fin, se analizarán actuadores actualmente en desuso en el laboratorio, con el objetivo de determinar su estado operativo y su potencial para ser reutilizados en el sistema.

Asimismo, se realizarán pruebas experimentales orientadas a caracterizar el comportamiento mecánico y eléctrico de los actuadores, identificar posibles limitaciones y realizar tareas de mantenimiento en los mismos.

Los resultados y análisis presentados en este informe constituyen la base preliminar para la futura tesis de grado, orientada al diseño e implementación de un sistema completo de seguimiento satelital.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivos generales

- Evaluar la viabilidad de implementar físicamente un sistema de apuntamiento y seguimiento automático de antenas para recepción satelital.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Relevar y documentar los elementos necesarios para su construcción y puesta en funcionamiento.
- Verificar el estado de los actuadores disponibles y ejecutar las tareas de mantenimiento necesarias.
- Caracterizar mecánica y eléctricamente los actuadores seleccionados.
- Avanzar en el diseño preliminar del sistema mecánico y si es posible su concreción.

## 2 Relevamiento e inventariado del laboratorio

Se llevó a cabo y se siguió con el relevamiento general y ordenamiento de los equipamientos, instrumentos, herramientas, elementos de radiofrecuencia, receptores satelitales, SDR's, filtros, atenuadores, amplificadores, moduladores, microcontroladores, antenas, etc. que estaban presentes, dispersos en el laboratorio sin clasificar; Para cada elemento se registraron imágenes que permiten constatar su estado actual, su nueva ubicación específica en los armarios, estantes y cajas correspondientes y ordenados dependiendo de su funcionalidad. Además, se en el inventariado se colocó el número de serie, su fabricante, hojas de datos, modelo, estado y cualquier información relevante para el usuario, asegurando su acceso libre y conocimiento del mismo dentro del laboratorio para futuros proyectos y o trabajos. Evitando futuros gastos innecesarios y pérdidas de tiempo al buscar tales elementos. Toda esta información está documentada y disponible en una hoja de cálculo en línea Figura 1.

A	B	C	D	E	F	G	H	I
Ubicación	Status	Grupo	Elemento	Marca	Modelo	Cantidad	Nº de serie	Características
2. Armario 1/Estante 1	Disponible	Instrumentos/RF	Generador de funciones	GH-Hitech	AGC-2125	1	-	0.1 Hz a 25 MHz / Resolución: 0.1 Hz / Sample Rate: 20 MS/seg
3. Armario 1/Estante 1	Disponible	Equipamiento/Digital	Kit de Evaluación	Analog Devices	Ev-ADF4380-EB1Z	1	190174-3	Frequency synthesizer consisting of an integrated PLL and VCO
4. Armario 1/Estante 1	Disponible	Equipamiento/Digital	Kit de Evaluación	Analog Devices	Ev-ADF4350EB2Z	1	13532	frequency synthesizer
5. Armario 1/Estante 1/C-L-02	Disponible	Instrumentos/RF	SDR	Analog Devices	ADALM-PLUTO	1	-	Rango Frecuencias: 325 MHz a 3800 MHz / Ancho de Banda: 20 MHz / Sample Rate: 65.2 kS/s - 61.44 MS/s / Resolución: 12 bits
6. Armario 1/Estante 1/C-L-02	Disponible	Instrumentos/RF	SDR	RTL-SDR	RTL-SDR V3	1	-	Rango Frecuencias: 100 kHz a 1768 MHz / Ancho de Banda: 3.2 MHz / Sample Rate: 3.2 MS/s / Resolución: 8 bits
7. Armario 1/Estante 1/C-L-02	Disponible	Equipamiento/Digital	Kit de Evaluación	Analog Devices	ADALM-PLUTO	1	1044735411960	Cable Usb micro, 2xAntena SMA, Cable SMA Macho Trough
8. Armario 1/Estante 1/C-L-02	Disponible	Equipamiento/Digital	Microcontrolador	NXP	LPC1769	1	W0-0516-134	-
9. Armario 1/Estante 1/C-L-02	Disponible	Equipamiento/Digital	Kit de Evaluación	RTL-SDR	RTL-SDR	1	-	Cable Usb mini, antena SMA+extensor
10. Armario 1/Estante 1/C-L-02	Disponible	Instrumentos/Propósito/General	Antena de alta ganancia de elevación	JVI	10-SF20	1	-	Elevación:
11. Armario 1/Estante 1/C-L-02	Disponible	Instrumentos/RF	Satellite Finder	ZenekO	NanoVNA SAA-2N V2.1	20100948	-	Receptor Satelital LNB RCVR9
12. Armario 1/Estante 1/C-L-02/CajaVNA	Disponible	Instrumentos/RF	Analizador vectorial de redes digital	ZeekO	50 kHz a 3 GHz	-	-	-
13. Armario 1/Estante 2	Disponible	Instrumentos/RF	Analizador de espectro	GW-Instek	GSP-827	1	eh181295	Rango de Frec: 9 kHz - 2.7 GHz / Span: 2 kHz - 2.5 GHz / Input: -100 dBm a +20 dBm
14. Armario 1/Estante 2	Disponible	Equipamiento/Propósito/General	Fuente de alimentación	Zurich	DF1720SB5A	1	-	0 a 30 V / 5 A
15. Armario 1/Estante 2/CajaOscilloscopio	Disponible	Instrumentos/Propósito/General	Osciloscopio digital	Tektronix	TDS1091B	1	C956642	2 canales / Ancho de banda: 40 MHz / Sample Rate: 500 MS/seg
16. Armario 1/Estante 3	Disponible	Instrumentos/RF	Rómetro	Leader	LPM-885	1	70134	Rango de Frec: 1.8 MHz a 54 MHz / Impedancia: 50 Ohms / Potencia: 10W a 500W / Rango SWR: 1 a 10
17. Armario 1/Estante 3	Disponible	Instrumentos/RF	Rómetro	Rexox	W560	1	5600514	Entrenamiento en HF: 59 MHz, 144 MHz, 430 MHz / Ancho de banda: 1.6 MHz
18. Armario 1/Estante 3	Disponible	Equipamiento/Propósito/General	Fuente de alimentación	zurich	-	1	VA140521963	525 MHz / Potencia: 3W a 200W
19. Armario 1/Estante 3	Disponible	Equipamiento/Propósito/General	Fuente de alimentación	Zurich	-	1	VA140521964	-
20. Armario 1/Estante 3	Disponible	Instrumentos/RF	Signal Level Meter	Textron	Spectrum 600	1	7069	-
21. Armario 1/Estante 3/C-L-02	Disponible	Instrumentos/Propósito/General	Millivoltímetro AC	Leader	LMV-186A	1	150uV-500V	100uV-300V (150uV-500V) 10Hz-200kHz

Figura 1: Ejemplo del inventariado

Dado que muchos elementos poseen considerable antigüedad, resultó difícil obtener información actualizada en línea; en estos casos, se registraron las características más importantes mediante observación directa.

Asimismo, se llevaron a cabo tareas de mantenimiento de los equipos y el desensamblado como se ve en la siguiente Figura 2 o separación de componentes de aquellos elementos que ocupaban un espacio significativo, optimizando así la organización y disponibilidad del laboratorio. Cada elemento fué separado en cajas dependiendo de su función y los metales (aluminio-cobre) tal como la Figura 3 de ejemplo, los disipadores y el blindaje serán utilizados para obtener nuevos equipos para el laboratorio.



Figura 2: Placas de RF obtenidas en el desensamble de equipos



Figura 3: Parte del aluminio obtenido de los equipos

## 3 Formas de obtención de posición

### 3.1 Obtención de datos satelitales

El seguimiento de satélites requiere conocer su posición y trayectoria en tiempo real o próxima a tiempo real. Una de las formas más comunes de obtener esta información es mediante los *Two-Line Elements* (TLE/2LE), un formato estandarizado que describe la órbita de un satélite en términos de parámetros orbitales [2].

Los TLE constituyen un conjunto de parámetros orbitales codificados en dos líneas de texto que permiten calcular la posición y velocidad de un satélite en cualquier instante mediante modelos matemáticos, los cuales pueden ser robustos o más simplificados [3].

Cada dato en los *Two-Line Elements* incluye:

- ★ Número de satélite
- ★ Época del TLE
- ★ Inclinación orbital
- ★ Ascensión recta del nodo ascendente
- ★ Excentricidad
- ★ Argumento del perigeo
- ★ Anomalía media
- ★ Número de revoluciones por día

Existen diversas páginas y servicios *Application Programming Interface* (API's) que publican estos datos de forma gratuita y actualizada. Durante el transcurso del día, los satélites pueden modificar su órbita debido a perturbaciones o maniobras; por esta razón es necesario obtener información actualizada.

- **CelesTrak**: organiza TLE por tipo de satélite (comunicaciones, GPS, meteorológicos, estaciones espaciales, etc.). Los datos se actualizan varias veces al día y están disponibles en texto plano [4].

- **Space-Track**: base de datos administrada por la Fuerza Espacial de EE.UU., con acceso gratuito tras registro, que proporciona TLE recientes e históricos [2].

- **Heavens-Above**: ofrece TLE de satélites visibles desde ubicaciones determinadas [5].

También existen los *Three-Line Elements* (3LE), que incluyen información adicional para modelos más avanzados y sofisticados.

En este sistema se utilizarán los **TLE** proveídos por la API de **Celestrak**, ya que los mismos provienen de bases confiables (**NORAD** "North American Aerospace Defense Command") y su uso es libre e ilimitado, además de la forma de obtenerlos resulta más fácil, lo cual permite hacer uso para pruebas del laboratorio con un margen de error aceptable.

### 3.2 Modelos para estimar trayectorias

Para determinar la posición futura de un satélite a partir de TLE u otros datos orbitales, se utilizan modelos que simulan la dinámica orbital bajo la influencia de perturbaciones. Los principales son:

- **SGP4 (Simplified General Perturbations 4)**: Modelo estándar para satélites en órbita baja (LEO). Considera el achatamiento terrestre, arrastre atmosférico y resonancias orbitales. Ofrece rapidez y precisión suficiente [3].
- **SDP4 (Simplified Deep Space Perturbations 4)**: Utilizado en órbitas medias y geoestacionarias (MEO/GEO). Incluye perturbaciones de largo plazo por gravedad lunar/solar y presión de radiación [3].
- **Modelos numéricos de integración**: Alta precisión, resuelven las ecuaciones de movimiento incluyendo múltiples efectos perturbativos, a costa de mayor tiempo de cálculo.

Otros modelos como SGP8 y SDP8 ofrecen mejoras en precisión pero requieren más recursos de cálculo al integrar más perturbaciones al modelo matemático.

El modelo de predicción adoptado para este proyecto es el **SGP4**, debido a su balance entre eficiencia y exactitud, suficiente para el seguimiento visual y aplicaciones de seguimiento terrestre; El modelo presenta un error inicial de aproximadamente **1 km**, que aumenta de **1 a 3 km por día**. Es por esto que, agencias como la **NASA** y **NORAD** actualizan frecuentemente los datos para evitar su deriva [3].

Se recomienda siempre emplear TLE recientes para minimizar errores. El modelo SGP4 es aplicable a satélites con períodos orbitales menores a **225 minutos**.

Para información completa sobre el modelo matemático de predicción, se recomienda consultar el documento oficial de NORAD [3].

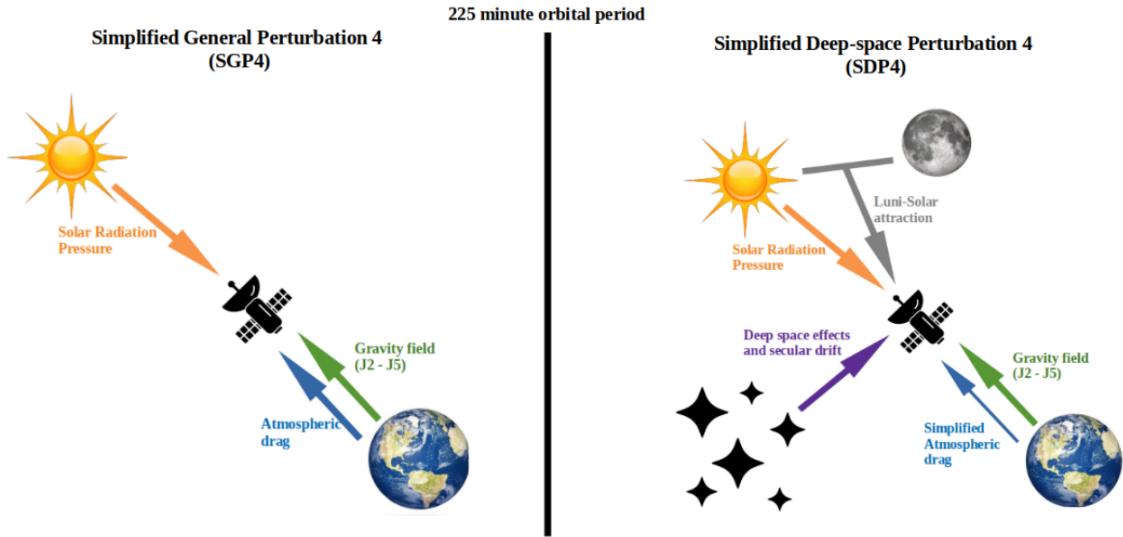


Figura 4: Comparación de modelos.

## 4 Análisis de los Actuadores

### 4.1 Estado Actual y Mantenimiento

Los actuadores evaluados en el laboratorio se encuentran actualmente fuera de servicio. Aunque fueron diseñados para operación en exteriores y para soportar cargas elevadas, su estado general puede considerarse aceptable. Se observan signos de oxidación superficial que no comprometen su funcionamiento; sin embargo, las etiquetas identificadorias presentan un deterioro significativo debido al prolongado período de inactividad, lo que dificulta su correcta lectura.

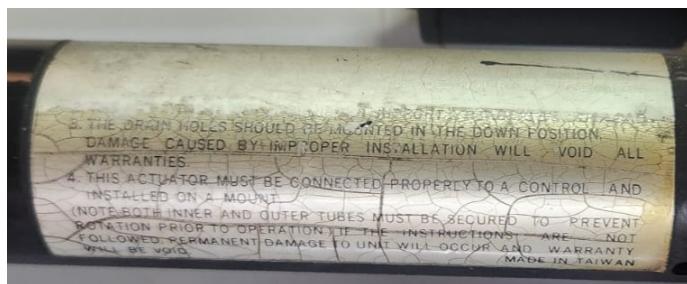


Figura 5: Etiqueta correspondiente al actuador lineal.

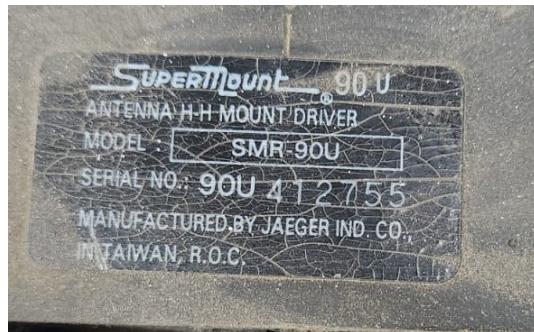


Figura 6: Etiqueta correspondiente al actuador rotacional.

Ambos actuadores emplean un motor de corriente continua de alta velocidad, acoplado a una caja reductora de construcción robusta (empleando sistemas de reducción planetarios), lo que les permite movilizar cargas de magnitud considerable.

### Actuador Rotacional

El actuador rotacional, modelo **SMR-90U** de la marca **SuperMount**, posee un rango de movimiento de horizonte a horizonte. A partir de las pruebas realizadas en laboratorio (Detallados más adelante), se determinó que su tensión nominal de funcionamiento es de 36 V.



Figura 7: Actuador rotacional utilizado para el movimiento en azimuth.

Este actuador cuenta con una placa electrónica con borneras para el conexionado y diversos componentes, tal como se aprecia en la Figura 8. La unidad no poseía su tapa protectora original, elemento fundamental para garantizar la protección mecánica, evitar la filtración de agua y prevenir la corrosión de los contactos eléctricos.

Para su recuperación se realizaron las siguientes tareas:

- Limpieza de la placa electrónica con alcohol isopropílico para eliminar restos y residuos acumulados.
- Diseño e impresión 3D de una nueva tapa protectora.
- Limpieza y lubricación de los engranajes reductores mediante la aplicación de grasa de litio.

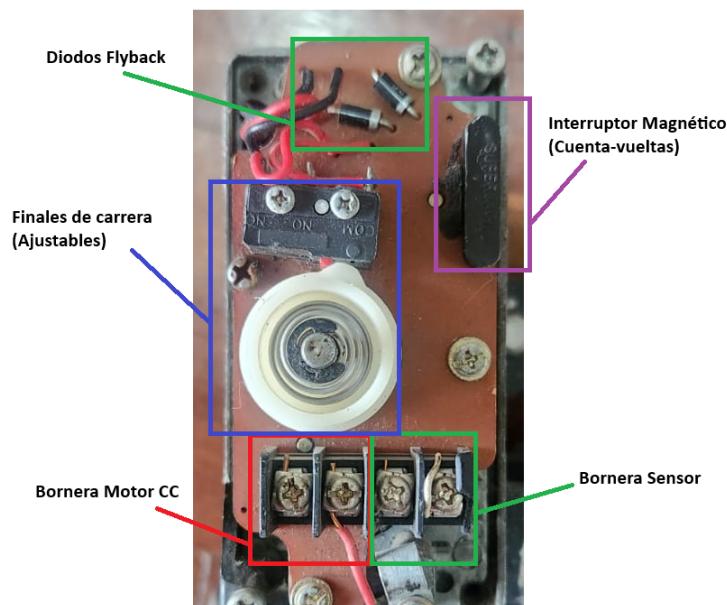


Figura 8: Identificación de los elementos de la placa de control del actuador rotacional.



Figura 9: Estado del actuador rotacional previo al mantenimiento.



Figura 10: Tapa protectora diseñada e impresa en 3D.

### Actuador Lineal

El actuador (Figura 11) fue fabricado en Taiwán y no se encontraron hojas de datos disponibles ni en línea ni en el laboratorio. Según la información indicada en su etiqueta, el fabricante recomienda su utilización en antenas parabólicas de fibra de vidrio o de malla metálica, con una carga máxima de 500, lb (226.8, kg). Asimismo, el actuador no está diseñado para soportar esfuerzos de flexión ni cargas laterales. Dentro del mismo se encontró un diagrama acerca de las conexiones de la bornera como se aprecia en la Figura 12.



Figura 11: Actuador lineal utilizado para el movimiento en elevación.

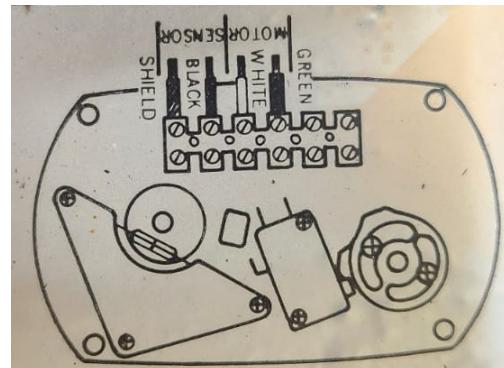


Figura 12: Diagrama de conexiónado de la bornera

#### 4.1.1 Pruebas de laboratorio

Se llevaron a cabo pruebas de laboratorio con el objetivo de estimar la tensión y la corriente nominales de funcionamiento de los actuadores con motores de corriente continua. A partir de la investigación bibliográfica y de fuentes en línea, se determinó que las tensiones de alimentación comerciales para este tipo de motores suelen encontrarse en los rangos de 24V, 36V y 48V.

Con esta referencia, se dispusieron dos fuentes de tensión del laboratorio conectadas en serie para obtener los niveles requeridos. Durante los ensayos se monitorearon parámetros como la corriente consumida, el nivel sonoro del motor y la temperatura alcanzada durante el funcionamiento.

De esta manera, se estableció (Figura 13) que la tensión de operación adecuada para ambos actuadores es de 36 V. Asimismo, la corriente de consumo bajo la carga del conjunto de engranajes reductores se estimó en aproximadamente 300mA, pudiendo incrementarse hasta valores cercanos a 800mA al aplicarse una mayor carga mecánica.



Figura 13: Prueba de laboratorio realizada con un actuador.

Mediante un resistor *shunt* de  $2\Omega$  colocado en serie con el motor y alimentándolo con su tensión nominal de  $36V$ , se utilizó un osciloscopio en su función de *trigger one-shot* para medir el transitorio de corriente del motor de corriente continua (CC). Se caracterizó el pico de corriente, el consumo nominal (sin carga) y los tiempos de crecimiento y establecimiento del transitorio.

La corriente pico durante el arranque del motor, mostrada en la Figura 14, se calcula como:

$$I_{peak} = \frac{3.16V}{2\Omega} = 1.58A$$

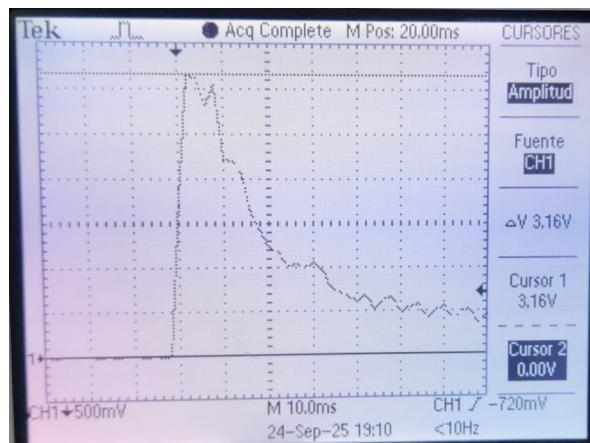


Figura 14: Medición de la corriente pico del motor CC.

El tiempo de crecimiento del transitorio (de 10% a 90% del valor final) se obtuvo como  $t_c = 3 \text{ ms}$ , Figura 15, mientras que el tiempo de establecimiento se muestra en la Figura 16.

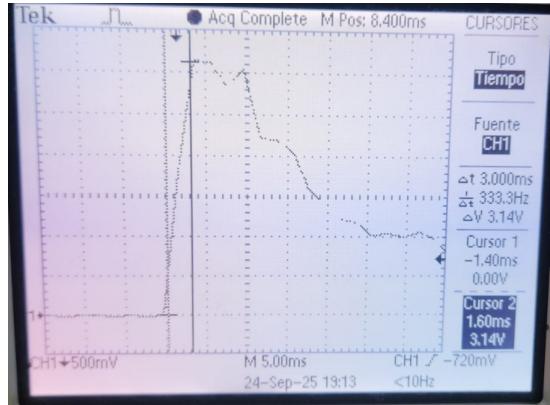


Figura 15: Medición del tiempo de crecimiento del transitorio.

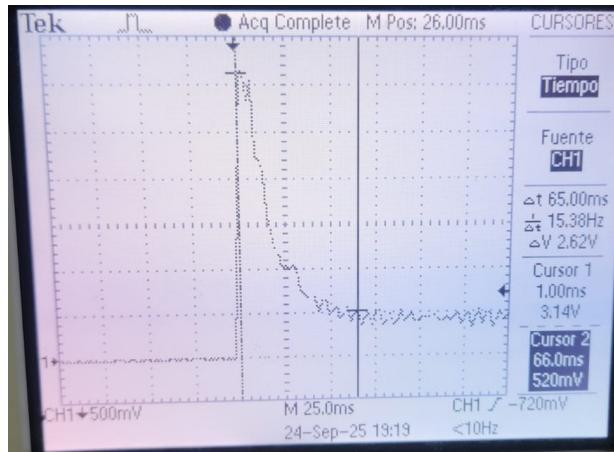


Figura 16: Medición del tiempo de establecimiento del transitorio.

Para determinar la relación entre los pulsos del *Reed Switch* interno del actuador y los grados en Azimuth, se desarrolló un programa en un microcontrolador. Se utilizó un encóder magnético *MT6701*, junto con un imán provisto por el fabricante, colocado en el eje del actuador. Además, se implementó un sistema de antirrebote por software para el conteo de pulsos y un relé que activa el motor CC para realizar las mediciones, mostrando en pantalla, mediante puerto serie, los grados y pulsos en intervalos determinados, como se observa en las Figuras 17 y 18.

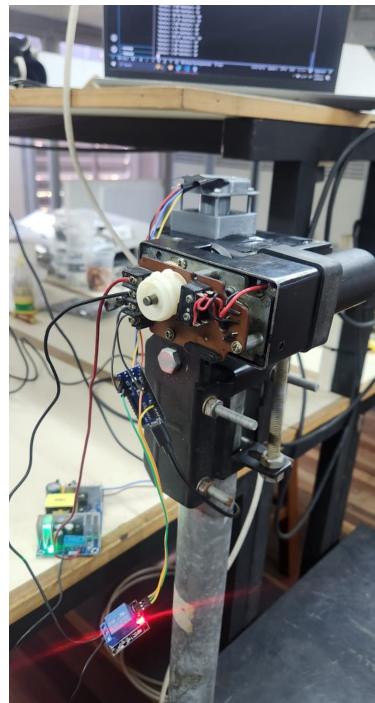


Figura 17: Medición de la relación pulso/Azimuth.

Theta/s:	Vuelta/s:
3.87	19
3.82	20
3.91	19
3.80	19
3.89	20
3.85	19
3.85	19
3.82	20
3.85	19
3.87	19
3.85	20
3.82	19
3.85	20
3.89	19
3.82	19
3.89	20
3.85	19
3.91	20

Figura 18: Visualización de los datos en el puerto serie.

El procedimiento se repitió obteniendo datos cada 1, 5 y 10 segundos para realizar un análisis estadístico, Figura 19.

1 Segundo		5 Segundos		10 Segundos	
Azimuth/Vuelta	0,2028	Azimuth/Vuelta	0,2063	Azimuth/Vuelta	0,2028
Desviación Abs	0,0061	Desviación Abs	0,0086	Desviación Abs	0,0033
Desviación Rel	3,01%	Desviación Rel	4,19%	Desviación Rel	1,65%
Azimuth/s	3,908717949	Azimuth/s	3,975586207	Azimuth/s	3,918647059
Desviación Abs	0,0685	Desviación Abs	0,1707	Desviación Abs	0,0613
Desviación Rel	1,75%	Desviación Rel	4,29%	Desviación Rel	1,57%

Figura 19: Estadísticas de los datos obtenidos del actuador para Azimuth.

Se seleccionaron los datos con menor desviación, determinando que la resolución mínima alcanzable en Azimuth es de  $0.2^\circ$  y que la velocidad angular máxima del eje, sin carga, es de  $3.9^\circ/s$ .

Se realizó un procedimiento similar en el actuador lineal, pero debido a la dificultad de medir distancias en un microcontrolador, se procedió contar las vueltas en un tiempo determinado y con un calibre, realizando marcas se procedió a medir la distancia recorrida, dando por resultado una resolución de  $0.85mm$  por paso.

## 5 Determinación de la electrónica

### 5.1 Microcontrolador

El microcontrolador seleccionado debe ser capaz de cumplir con las siguientes funciones principales:

- Realizar la adquisición de datos de los sensores y calcular los ángulos relativos de la antena.
- Implementar el modelo de predicción orbital **SGP4** para satélites de órbita baja.
- Obtener los datos **TLE**, ya sea mediante ingreso manual del usuario o consulta a servicios externos mediante API's de libre acceso.
- Ejecutar el control en lazo cerrado del sistema.
- Generar las señales de mando para la electrónica de potencia encargada de accionar los actuadores.
- Disponer de una interfaz de usuario que permita tanto la visualización de información como el ingreso de parámetros relevantes (por ejemplo, compensaciones de ángulo o el posible ingreso de TLE).

#### 5.1.1 **ESP32-DOWDQ6**

Para este proyecto se selecciona la placa de desarrollo **NODEMCU DEVKIT V1.0**, basada en el microcontrolador **ESP32-D0WDQ6**. Este dispositivo integra un CPU *dual-core* Tensilica Xtensa LX6 de 32 bits, con una frecuencia de reloj de hasta 240 MHz y un rendimiento de hasta 600 DMIPS (*Million Instructions Per Second*). Estas características lo hacen adecuado para ejecutar el modelo de predicción orbital, mientras que el segundo núcleo puede asignarse a tareas secundarias o de bajo consumo.

Entre sus ventajas adicionales se destacan su bajo costo y la disponibilidad de diversos periféricos, como se ilustra en la Figura 20. La conectividad inalámbrica mediante WiFi 802.11 b/g/n/e/i (hasta 150 Mbit/s en 2.4 GHz) permite implementar un servidor web como **HMI** (*Human Machine Interface*), facilitando al usuario la visualización de datos relevantes y la introducción de parámetros, tales como TLEs o compensaciones de ángulos, según las condiciones de operación o el tipo de antena utilizada.

Asimismo, la placa cuenta con memoria **ROM** integrada, que permite almacenar datos de interés incluso tras el reinicio del dispositivo.

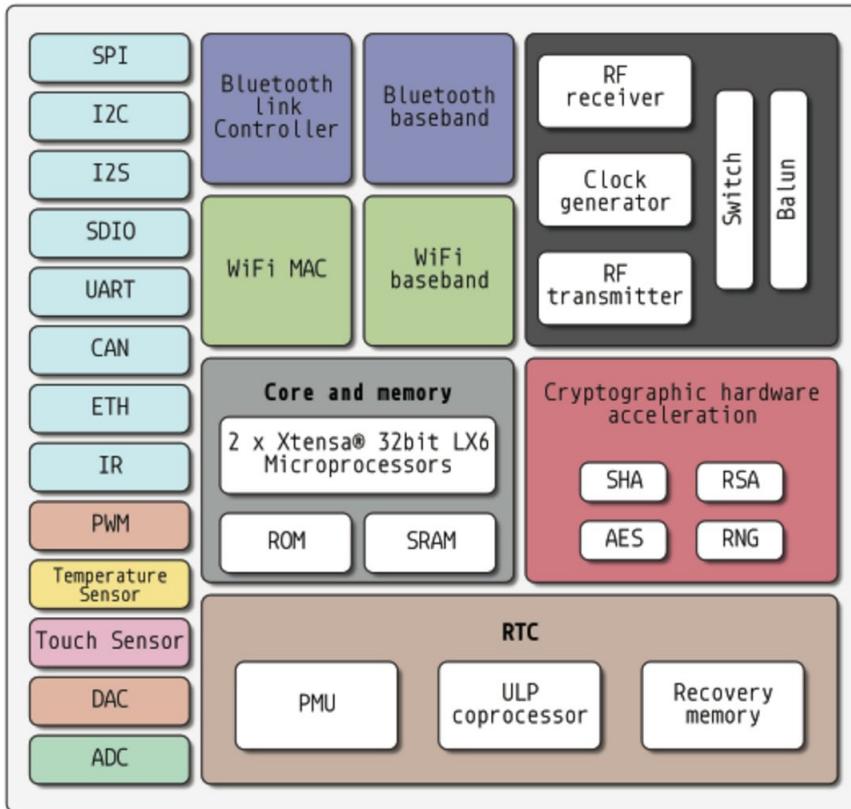


Figura 20: Esquema de bloques del microcontrolador

## 5.2 Sensores

Para determinar los ángulos de elevación y azimut, que luego serán utilizados en lazo cerrado por el microcontrolador, pueden emplearse diversos métodos de sensado. A continuación se presentan y analizan las principales alternativas:

### 5.2.1 Encóder magnético

Una opción consiste en adosar un imán al eje de rotación, debidamente centrado respecto al circuito integrado sensor, y colocado a la distancia especificada en la hoja de datos.

Los principales **beneficios** de utilizar este método para obtener ángulos absolutos son:

- Alta precisión y resolución angular.
- Ausencia de piezas mecánicas en contacto, lo que reduce desgaste.

- Adecuados para altas velocidades de rotación.
- Disponibilidad de interfaces de comunicación digitales (I2C, SPI, PWM, etc.).

Las **desventajas** de este método en esta aplicación son:

- Baja disponibilidad en el mercado argentino.
- Mayor dificultad de montaje en el eje de azimut.
- Necesidad de algoritmos de calibración.
- Requiere entorno con materiales diamagnéticos para evitar distorsiones del campo magnético.
- Es necesario definir un punto de referencia ( $0^\circ$  en azimut y elevación) mediante un final de carrera o calibración inicial.
- Susceptibilidad al ingreso de humedad o agua si se exponen a la intemperie.

Ejemplos de alternativas comerciales:

- **MT6701**: Resolución de 14 bits, salida ABI/I2C/SPI, bajo consumo.
- **AS5600**: Resolución de 12 bits, salida analógica o I2C, compacto y económico.
- **MT6825**: Resolución de hasta 18 bits, interfaz digital de alta velocidad, mayor precisión.

### 5.2.2 Potenciómetro

Otra opción es colocar potenciómetros en cada eje, de manera que la resistencia varíe en función del ángulo. Es necesario utilizar potenciómetros lineales de alta precisión.

**Beneficios:**

- Bajo costo y amplia disponibilidad.
- Fácil integración en hardware (lectura analógica directa).
- Precisión dependiente de la calidad del potenciómetro y de la resolución del ADC.

**Desventajas:**

- Desgaste mecánico por fricción de los contactos.
- Requiere sellado adecuado para evitar deterioro en intemperie.

- Colocación más invasiva en el eje de azimut.
- Necesidad de ajuste inicial en los ángulos de referencia.
- Mayor susceptibilidad al ruido eléctrico.

### 5.2.3 Acelerómetro 9 DoF

Una alternativa más completa consiste en utilizar un módulo de unidad de medición inercial (IMU), que puede instalarse directamente en la parte trasera de la antena en corcordancia al ángulo de máxima directividad. El magnetómetro permite obtener el norte magnético y, mediante correcciones con modelos y la ubicación GPS, calcular el norte geográfico para el ángulo de azimut. El giroscopio y el acelerómetro permiten estimar el vector gravedad y así definir la elevación.

Este enfoque es más complejo, ya que requiere procesamiento adicional en el microcontrolador (filtros, algoritmos de fusión sensorial como Kalman o Madgwick) y en algunos casos conexión a internet para corrección de declinación magnética.

#### Beneficios:

- Independencia del instalador: autocalibración posible.
- Instalación sencilla, con solo fijar el módulo.
- Posibilidad de uso en plataformas móviles.

#### Desventajas:

- Mayor complejidad de firmware y procesamiento.
- Problemas en movimientos con aceleraciones bruscas.
- Costo superior al de opciones simples.
- Necesidad de encapsulado hermético contra la intemperie.
- Deriva de ángulos si no se aplican algoritmos de corrección.

#### Ejemplo de módulos comerciales:

- **MPU9250:** Acelerómetro, giroscopio y magnetómetro triaxiales; comunicación I2C/SPI.
- **LSM9DS1:** IMU 9 DoF con bajo consumo y buena estabilidad térmica.
- **BNO085:** Incluye fusión sensorial integrada en hardware, entrega ángulos directamente.

#### 5.2.4 Reed Switch

En los actuadores analizados se dispone de un interruptor magnético interno que actúa como cuentavueltas, junto con finales de carrera. Estos ya vienen protegidos para trabajar en condiciones adversas.

##### Beneficios:

- Costo nulo (integrados en los actuadores).
- Resistencia ambiental elevada.
- Implementación sencilla.

##### Desventajas:

- Requiere ajuste preciso de finales de carrera.
- El sistema debe realizar una rutina inicial de calibración (similar a un control numérico).
- Necesidad de un sistema anti-rebote ya sea por software/hardware o combinados.
- La relación vueltas-ángulo debe calibrarse con exactitud.

#### 5.2.5 GPS

El uso de un módulo GPS es esencial para calcular los ángulos de seguimiento satelital mediante modelos matemáticos, ya que proporciona la ubicación actual de la plataforma. En el caso de plataformas fijas, puede obviarse si las coordenadas se ingresan por software pero requiere un mayor nivel de interacción del usuario y, por lo tanto, es más propenso a ingresos erróneos.

##### Ventajas:

- Reduce la intervención del instalador (coordenadas determinadas de forma automática).

##### Desventajas:

- Incrementa el costo total del sistema.
- Requiere tiempo inicial de fijado para obtener la posición.
- Una correcta colocación de la antena GPS es indispensable.

Ejemplos de módulos comerciales:

- **u-blox NEO-6M:** Bajo costo, buena sensibilidad y fácil integración.
- **u-blox NEO-M8N:** GNSS multiconstellación (GPS, GLONASS, Galileo), mayor precisión.
- **u-blox ZED-F9P:** GPS/GNSS multibanda con corrección RTK, precisión centimétrica.

### 5.3 Electrónica de potencia

Como requerimiento de la electrónica de potencia, se establece la necesidad de controlar una carga de tipo RLE, con una tensión nominal de  $V_o = 36\text{ V}$  y una corriente nominal de  $I_o = 1\text{ A}$ . El motor de corriente continua deberá ser capaz de soportar cambios en el sentido de giro, así como variaciones en su velocidad mediante la aplicación de técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM) u otros métodos, empleando módulos comerciales disponibles en el mercado actual. El controlador de potencia requerido deberá ser del tipo *H-bridge* (puente en H).

#### 5.3.1 L298N

El circuito integrado **L298N** incorpora internamente dos puentes H, lo que permite el control bidireccional de dos motores de corriente continua. Su estructura está basada en transistores bipolares (BJT), lo cual presenta ciertas desventajas en comparación con tecnologías más modernas basadas en MOSFET. Entre estas limitaciones se destacan su menor eficiencia, producto de la caída de tensión de saturación en los transistores ( $V_{CE_{SAT}} \approx 1.2\text{ V}$ ), así como la corriente adicional necesaria para su polarización.

De acuerdo con su hoja de datos [6], las principales características eléctricas y valores máximos absolutos se muestran en la Figura 21 y la Figura 22.

<b>L298</b>			
<b>ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS</b>			
<b>Symbol</b>	<b>Parameter</b>	<b>Value</b>	<b>Unit</b>
$V_S$	Power Supply	50	V
$V_{SS}$	Logic Supply Voltage	7	V
$V_I, V_{EN}$	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
$I_O$	Peak Output Current (each Channel) - Non Repetitive ( $t = 100\mu\text{s}$ ) - Repetitive (80% on -20% off; $t_{on} = 10\text{ms}$ ) - DC Operation	3 2.5 2	A A A
$V_{sens}$	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
$P_{tot}$	Total Power Dissipation ( $T_{case} = 75^\circ\text{C}$ )	25	W
$T_{op}$	Junction Operating Temperature	-25 to 130	°C
$T_{stg}, T_J$	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	°C

Figura 21: Valores máximos absolutos del IC L298N.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_s = 42V$ ;  $V_{SS} = 5V$ ,  $T_j = 25^\circ C$ ; unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_s$	Supply Voltage (pin 4)	Operative Condition	$V_{IH} + 2.5$	46	46	V
$V_{SS}$	Logic Supply Voltage (pin 9)		4.5	5	7	V
$I_S$	Quiescent Supply Current (pin 4)	$V_{en} = H; I_L = 0$ $V_I = L$ $V_I = H$		13 50	22 70	mA mA
		$V_{en} = L$ $V_I = X$			4	mA
$I_{SS}$	Quiescent Current from $V_{SS}$ (pin 9)	$V_{en} = H; I_L = 0$ $V_I = L$ $V_I = H$		24 7	36 12	mA mA
		$V_{en} = L$ $V_I = X$			6	mA
$V_{IL}$	Input Low Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		-0.3		1.5	V
$V_{IH}$	Input High Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		2.3		$V_{SS}$	V
$I_{IL}$	Low Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	$V_I = L$			-10	$\mu A$
$I_{IH}$	High Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	$V_I = H \leq V_{SS} - 0.6V$		30	100	$\mu A$
$V_{en} = L$	Enable Low Voltage (pins 6, 11)		-0.3		1.5	V
$V_{en} = H$	Enable High Voltage (pins 6, 11)		2.3		$V_{SS}$	V
$I_{en} = L$	Low Voltage Enable Current (pins 6, 11)	$V_{en} = L$			-10	$\mu A$
$I_{en} = H$	High Voltage Enable Current (pins 6, 11)	$V_{en} = H \leq V_{SS} - 0.6V$		30	100	$\mu A$
$V_{CEsat(H)}$	Source Saturation Voltage	$I_L = 1A$ $I_L = 2A$	0.95	1.35 2	1.7 2.7	V V
$V_{CESsat(L)}$	Sink Saturation Voltage	$I_L = 1A$ (5) $I_L = 2A$ (5)	0.85	1.2 1.7	1.6 2.3	V V
$V_{CESol}$	Total Drop	$I_L = 1A$ (5) $I_L = 2A$ (5)	1.80		3.2 4.9	V V
$V_{sens}$	Sensing Voltage (pins 1, 15)		-1 (1)		2	V

Figura 22: Características eléctricas del IC L298N.

Esta opción resulta muy incómoda, ya que para el control del motor con una tensión nominal de  $36V$ , se debe alimentar con una tensión aproximada de  $38V$ ; No obstante esto representa solamente una disminución del  $\approx 12\%$  de la tensión nominal de trabajo, lo cual no representa mucha variación y su precio/disposición en el mercado hace que esta opción sea una de las más interesantes para la aplicación.

### 5.3.2 DRV8801

El circuito integrado **DRV8801** incorpora un único puente H, por lo que, en aplicaciones que requieran controlar dos motores, es necesario emplear dos dispositivos. A diferencia del L298N, este controlador está basado en transistores MOSFET de canal N, lo que se traduce en una mayor eficiencia al reducir la caída de tensión interna y las pérdidas de conmutación.

Entre sus principales características dadas por el fabricante [7] puestas en la Figura 23 se destacan las múltiples protecciones integradas, que aportan robustez al sistema, se aporta también un esquemático con la configuración recomendada del mismo en la Figura 24.

- Protección por subtensión en  $V_{BB}$  (Undervoltage Lockout, UVLO).
- Protección por subtensión de la bomba de carga (Charge Pump Undervoltage, CPUV).

- Protección contra sobrecorriente (Overcurrent Protection, OCP).
- Protección contra cortocircuito a la alimentación (Short-to-Supply).
- Protección contra cortocircuito a tierra (Short-to-Ground).
- Alerta por sobretemperatura (Overtemperature Warning, OTW).
- Apagado automático por sobretemperatura (Overtemperature Shutdown, OTS).
- Pin de indicación de fallos (nFAULT) para comunicación directa con un microcontrolador.

Asimismo, el DRV8801 admite el rango completo del ciclo de trabajo de modulación por ancho de pulso (PWM), lo que permite un control preciso de la velocidad del motor.

#### 6.1 Absolute Maximum Ratings

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)<sup>(1)</sup>

		MIN	MAX	UNIT
V <sub>BB</sub>	Load supply voltage <sup>(2)</sup>	-0.3	40	V
V <sub>CP</sub> and CP2	Charge Pump Voltage	-0.3	V <sub>BB</sub> +17V	V
	Output current	-2.8	2.8	A
V <sub>Sense</sub>	Sense voltage	-500	500	mV
V <sub>BB</sub> to OUTx			36	V
OUTx to SENSE			36	V
V <sub>DD</sub>	PHASE, ENABLE, MODE, MODE1, MODE2, nSLEEP and nFAULT <sup>(2)</sup>	-0.3	7	V
	Continuous total power dissipation		See <a href="#">Section 6.4</a>	
T <sub>A</sub>	Operating free-air temperature	-40	85	°C
T <sub>J</sub>	Maximum junction temperature		150	°C
T <sub>stg</sub>	Storage temperature	-40	125	°C

Figura 23: Valores máximos absolutos del IC DRV8801.

Como única acotación, en sus características, la tensión de funcionamiento del mismo resulta muy justa para la aplicación (36V).

#### 5.3.3 BTS7960

El circuito integrado **BTS7960** implementa internamente una configuración de *Half-Bridge* (medio puente), y no un puente completo como el requerido en esta aplicación. No obstante, existen módulos comerciales que integran dos dispositivos BTS7960 para conformar un puente completo y así permitir el control bidireccional de un motor de corriente continua.

Este dispositivo está conformado por un MOSFET canal N y un MOSFET canal P, lo que le otorga una mayor eficiencia en comparación con arquitecturas basadas en BJT. Además, incorpora un conjunto de protecciones que incrementan su robustez y fiabilidad:

### 9.2 Typical Application

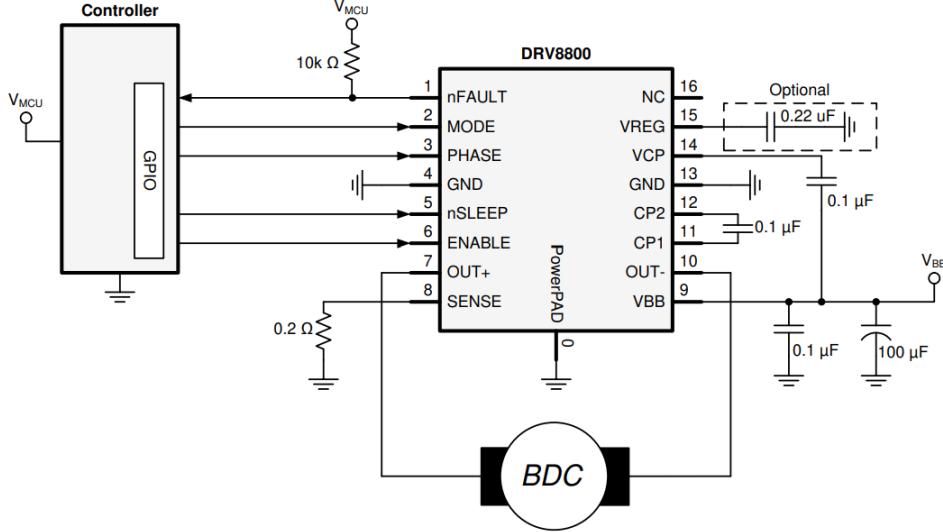


Figure 9-1. DRV8800 Typical Application Schematic

Figura 24: Esquema de aplicación recomendado del IC DRV8801.

- Protección contra sobrecorriente (Overcurrent Protection, OCP).
- Protección contra sobretemperatura (Overtemperature Shutdown, OTP).
- Protección contra cortocircuito a tierra (Short-to-Ground).
- Protección contra cortocircuito a la alimentación (Short-to-Supply).
- Protección por subtensión (Undervoltage Lockout, UVLO).

Las características más relevantes mencionadas en la hoja de datos [8] del fabricante *Infineon* están dadas en la Figura 25 y un esquema recomendado para implementar un puente completo en la Figura 26

La corriente que puede manejar este módulo con respecto a la de nuestra aplicación resulta muy elevada, sin embargo, es una opción muy viable debido a su bajo costo y disponibilidad en el mercado actual respecto de otras opciones.

Indagando un poco más en la hoja de datos, se encuentra que el IC **no es una opción viable** para el proyecto, ya que si bien la máxima tensión admitida de alimentación es de 45V esta lo toma como una sobretensión y procede a proteger el módulo tal y como se especifica a continuación en la Figura 27. Siendo su aplicación más utilizada en motores de corriente continua de hasta 24V.

### 3 Maximum Ratings

$-40^{\circ}\text{C} < T_j < 150^{\circ}\text{C}$  (unless otherwise specified)

Pos	Parameter	Symbol	Limits		Unit	Test Condition
			min	max		
<b>Electrical Maximum Ratings</b>						
3.0.1	Supply voltage	$V_{\text{VS}}$	-0.3	45	V	
3.0.2	Logic Input Voltage	$V_{\text{IN}}$ $V_{\text{INH}}$	-0.3	5.3	V	
3.0.3	HS/LS continuous drain current	$I_{\text{D(HS)}}$ $I_{\text{D(LS)}}$	-40	40 <sup>1)</sup>	A	$T_C < 85^{\circ}\text{C}$ switch active
3.0.4	HS pulsed drain current	$I_{\text{D(HS)}}$	-60	60 <sup>1)</sup>	A	$T_C < 85^{\circ}\text{C}$
3.0.5	LS pulsed drain current	$I_{\text{D(LS)}}$	-60	60 <sup>1)</sup>	A	$t_{\text{pulse}} = 10\text{ms}$
3.0.6	Voltage at SR pin	$V_{\text{SR}}$	-0.3	1.0	V	
3.0.7	Voltage between VS and IS pin	$V_{\text{VS}} - V_{\text{IS}}$	-0.3	45	V	
3.0.8	Voltage at IS pin	$V_{\text{IS}}$	-20	45	V	

Figura 25: Valores máximos absolutos del IC BTS7960.

#### 6.1 Application Example

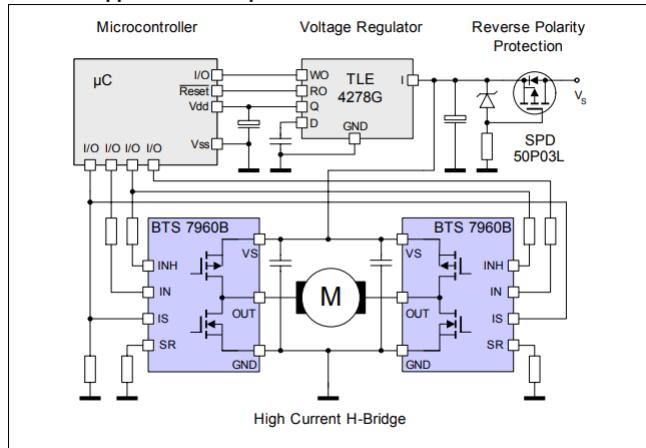


Figure 11 Application Example: H-Bridge with two BTS 7960B

Figura 26: Esquema recomendado para conformar un puente completo con el IC BTS7960.

#### Over Voltage Lock Out

5.3.4	Switch-ON Voltage	$V_{\text{OV(ON)}}$	27.8	–	–	V	$V_S$ decreasing
5.3.5	Switch-OFF Voltage	$V_{\text{OV(OFF)}}$	28	–	30	V	$V_S$ increasing
5.3.6	ON/OFF hysteresis	$V_{\text{OV(HY)}}$	–	0.2	–	V	–

Figura 27: Protección contra sobre-tensión del IC BTS7960

#### 5.3.4 DVR8812

Se trata de un circuito integrado *IC* de *Texas Instruments* [9] que contiene dos puentes H con control de corriente interno, su aplicación resulta un poco más compleja que las anteriores opciones debido a tal característica del control de corriente,

en cuanto a sus características dadas por el fabricante, Figura 28 podemos visualizar que la tensión de funcionamiento y corriente, se encuentran acordes a las características de nuestra carga.

DUAL-BRIDGE MOTOR CONTROLLER IC	
Check for Samples: <a href="#">DRV8812</a>	
FEATURES	APPLICATIONS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dual-H-Bridge Current-Control Motor Driver           <ul style="list-style-type: none"> <li>– Capable of Driving a Bipolar Stepper or <b>Two DC Motors</b></li> <li>– Two-Bit Winding Current Control Allows Up to Four Current Levels</li> <li>– Low MOSFET On-Resistance</li> <li>• <b>1.6-A Maximum Drive Current at 24 V, 25°C</b></li> <li>• Built-In 3.3-V Reference Output</li> <li>• Industry-Standard Parallel Digital Control Interface</li> <li>• <b>8-V to 45-V Operating Supply Voltage Range</b></li> <li>• Thermally Enhanced HTSSOP and QFN Surface Mount Packages</li> </ul> </li> </ul>	
DESCRIPTION	
<p>The DRV8812 provides an integrated motor driver solution for printers, scanners, and other automated equipment applications. The device has two H-bridge drivers, and can drive a bipolar stepper motor or two DC motors. The output driver block for each consists of N-channel power MOSFET's configured as full H-bridges to drive the motor windings. The DRV8812 is capable of driving up to 1.6-A of output current (with proper heatsinking, at 24 V and 25°C).</p> <p>A simple <b>parallel digital control interface</b> is compatible with industry-standard devices. Decay mode is programmable.</p> <p>Internal shutdown functions are provided for over current protection, short circuit protection, under voltage lockout and overtemperature.</p> <p>The DRV8812 is available in a 28-pin HTSSOP package with PowerPAD™ and in a 28-pin QFN package PowerPAD™ (Eco-friendly: RoHS &amp; no Pb/Br).</p>	

Figura 28: Características generales del IC DVR8812

### 5.3.5 L6205

El integrado L6205 de *STMicroelectronics* [10] implementa dos puentes H basados en tecnología DMOS, soportando tensiones de 8 V a 52 V y corrientes de hasta 2,8 A en corriente continua, con picos de hasta 5,6 A, como se muestra en la Figura 29.

El dispositivo cuenta con protecciones integradas frente a picos de corriente y sobrefecha, garantizando un funcionamiento seguro bajo condiciones exigentes. Para su correcto funcionamiento, requiere de algunos componentes externos, entre los cuales se incluye una bomba de carga necesaria para generar la tensión del MOSFET superior, tal como se ilustra en la Figura 30.

**RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS**

Symbol	Parameter	Test Conditions	MIN	MAX	Unit
$V_s$	Supply Voltage	$V_{SA} = V_{SB} = V_s$	-8	52	V
$V_{OD}$	Differential Voltage Between $V_{SA}$ , OUT1 <sub>A</sub> , OUT2 <sub>A</sub> , SENSE <sub>A</sub> and $V_{SB}$ , OUT1 <sub>B</sub> , OUT2 <sub>B</sub> , SENSE <sub>B</sub>	$V_{SA} = V_{SB} = V_s$ ; $V_{SENSE_A} = V_{SENSE_B}$		52	V
$V_{SENSE_A}$ , $V_{SENSE_B}$	Voltage Range at pins SENSE <sub>A</sub> and SENSE <sub>B</sub>	(pulsed $t_W < t_{rr}$ ) (DC)	-6 -1	6 1	V
$I_{OUT}$	RMS Output Current			2.8	A
$T_j$	Operating Junction Temperature		-25	+125	°C
$f_{sw}$	Switching Frequency			100	KHz

Figura 29: Condiciones de operación recomendadas del L6205.

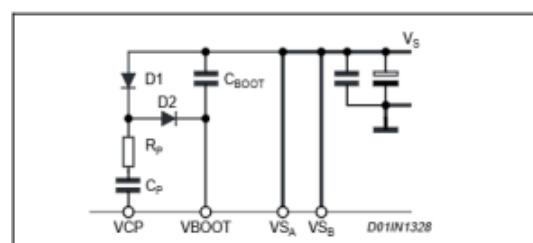


Figura 30: Bomba de carga requerida para el funcionamiento del L6205.

## 6 Diseño de partes mecánicas

### 6.1 Modelado mecánico de los actuadores

Con el fin de establecer las dimensiones iniciales de los actuadores empleados en el sistema, se realizaron croquis estimativos que permitieron definir los parámetros geométricos fundamentales. Estos se presentan en las Figuras 31 y 32.

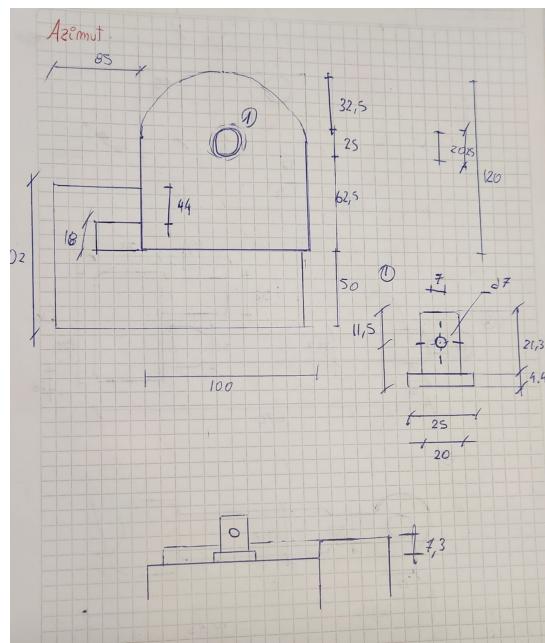


Figura 31: Croquis del actuador rotacional.

Posteriormente, se realizó el modelado tridimensional de los actuadores mediante el software *SolidWorks*. Esta etapa tuvo como objetivo principal el diseño detallado de las piezas mecánicas necesarias para su implementación, así como la realización de estudios de movimiento y validaciones geométricas previas a la fabricación. Los modelos obtenidos se presentan en las Figuras 33 y 34.

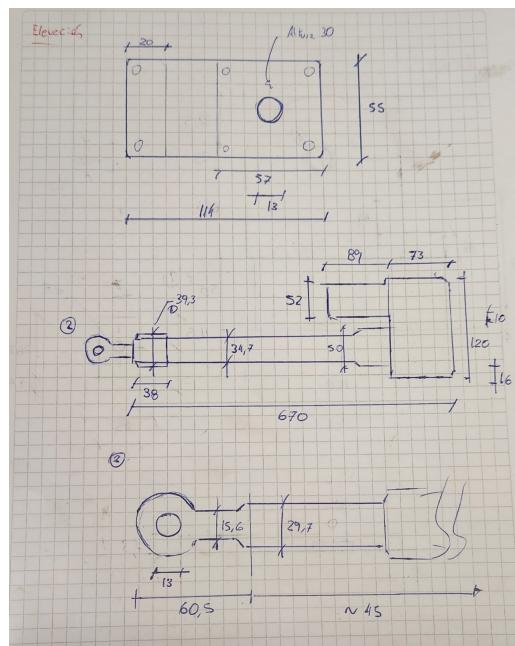
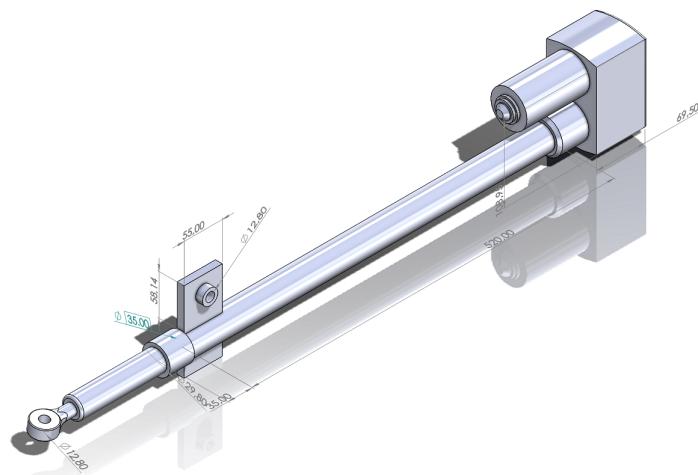


Figura 32: Croquis del actuador lineal.

Figura 33: Vista Isométrica del actuador rotacional en *SolidWorks*.

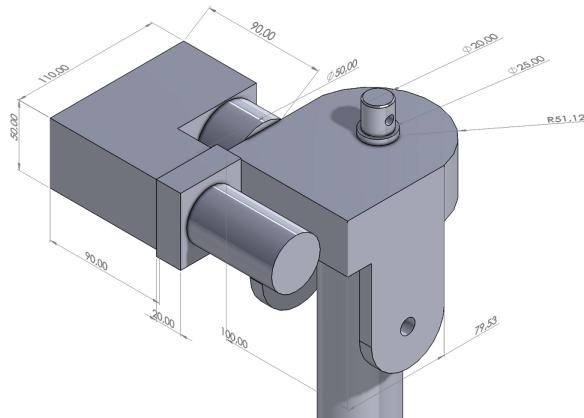


Figura 34: Vista Isométrica del actuador lineal en *SolidWorks*.

### 6.1.1 Diseño de las piezas para la plataforma

En este apartado se presenta el diseño de las piezas que conformarán la plataforma. Dichas piezas fueron concebidas para ser *mecanizadas* en aluminio, atendiendo a los requerimientos de resistencia mecánica y capacidad de carga. Sin embargo, con el objetivo de realizar pruebas preliminares en laboratorio, se optará por la *impresión 3D* de los prototipos, lo que permitirá validar la geometría y funcionalidad antes de la fabricación definitiva.

La estructura comienza con una base (Figura 35) que posibilita el movimiento en *azimuth*, dimensionada de acuerdo con el eje del actuador lineal previamente modelado. Este eje será fijado mediante un perno pasante. Para minimizar rozamientos y evitar holguras en la articulación por efectos de torsión mecánica, se incorpora en la parte inferior un rodamiento de empuje (rulemán crapodina axial).

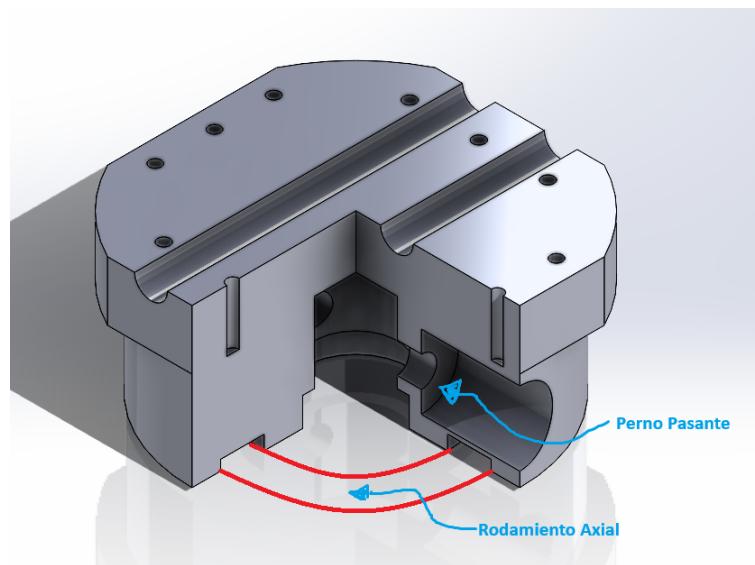


Figura 35: Pieza base de la plataforma.

Sobre esta base se disponen dos paredes laterales (Figura 36) que conforman el eje de rotación en elevación de la plataforma de la antena. Dichas paredes integran, además, un sistema de grampas ajustables que permiten regular las dimensiones y asegurar el anclaje del actuador lineal, mostrado en la Figura 37.

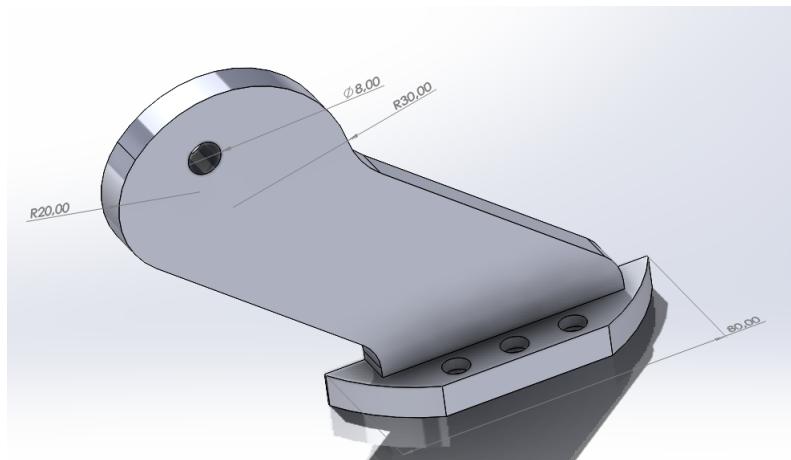


Figura 36: Piezas laterales que conforman el eje de elevación.

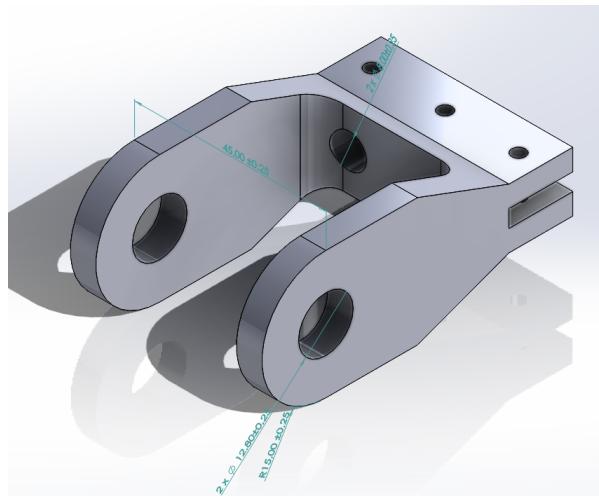


Figura 37: Eje de fijación del actuador lineal.

Finalmente, al integrar estas piezas con otros componentes estructurales, se obtiene el ensamblaje completo de la plataforma (Figura 38). El sistema ofrece un grado de libertad en *azimuth* de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  y en *elevación* de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , conformando así una semiesfera de cobertura orientada al cielo.

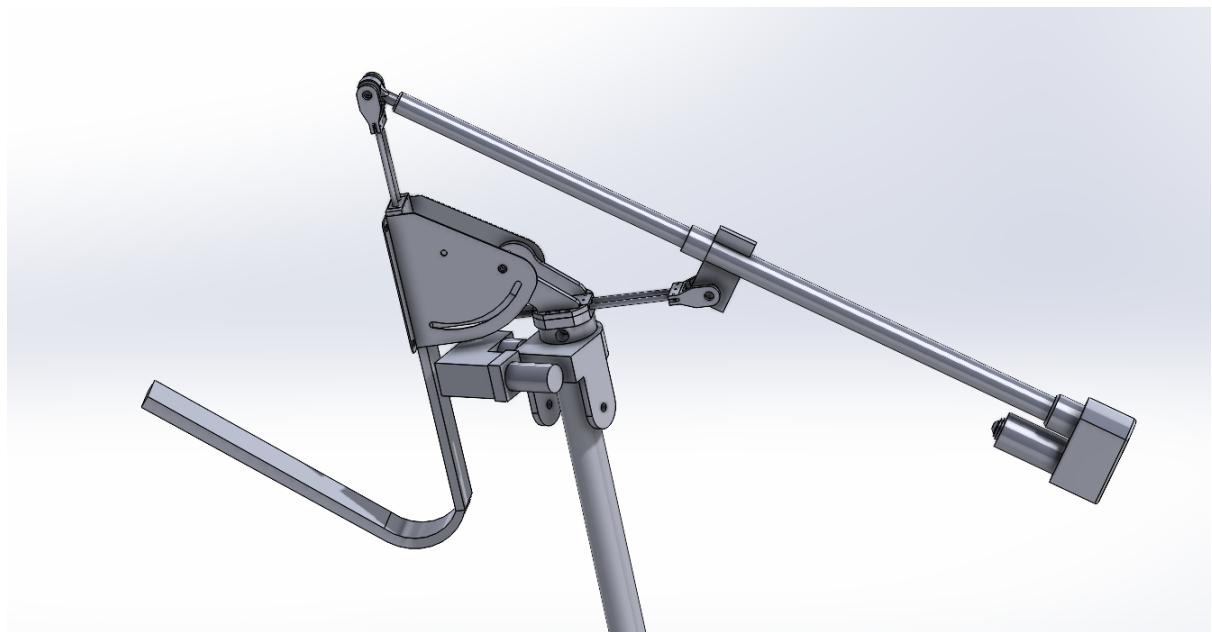


Figura 38: Vista previa del ensamblaje completo de la plataforma.

### 6.1.2 No linealidad en la elevación

Para determinar la función que relaciona el desplazamiento lineal del actuador con el ángulo de *elevación* de la plataforma, se parte del modelado de las dimensiones físicas y de los ejes móviles involucrados, tal como se muestra en la Figura 39.

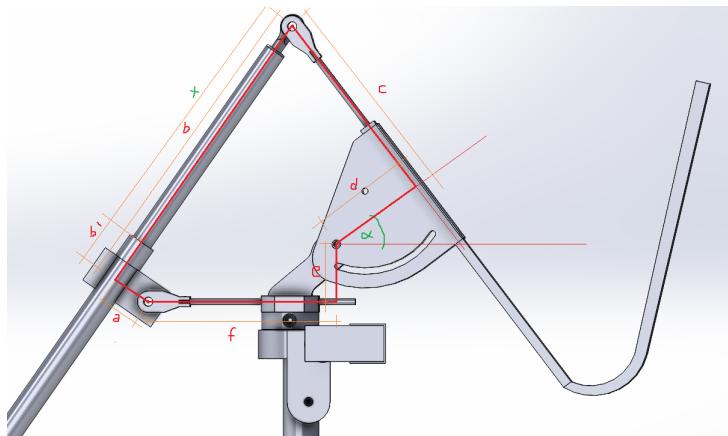


Figura 39: Dimensiones geométricas del sistema en elevación.

A partir de dicha representación, se construyen las hipotenusas correspondientes a los triángulos rectángulos formados, identificando además los ángulos característicos del sistema. En particular, se destaca en color verde el ángulo de elevación  $\alpha$ , como se ilustra en la Figura 40.

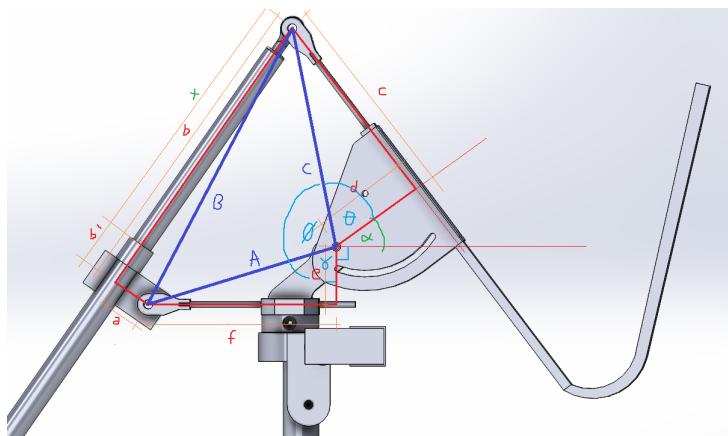


Figura 40: Identificación de los ángulos relevantes en el sistema.

A partir de la geometría definida, se obtienen las siguientes expresiones matemáticas:

$$\begin{aligned}
A &= \sqrt{f^2 + e^2} \\
B &= \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{a^2 + (b' + x)^2} \\
C &= \sqrt{d^2 + c^2} \\
\theta &= \tan^{-1} \left( \frac{c}{d} \right) \\
\phi &= \cos^{-1} \left( \frac{A^2 + C^2 - B^2}{2AC} \right) \\
\gamma &= \tan^{-1} \left( \frac{f}{e} \right) \\
\alpha &= 270^\circ - \tan^{-1} \left( \frac{c}{d} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{f}{e} \right) - \cos^{-1} \left( \frac{f^2 + e^2 + d^2 + c^2 - a^2 - (b' - x)^2}{2\sqrt{(f^2 + e^2)(d^2 + c^2)}} \right)
\end{aligned} \tag{1}$$

De esta forma, se establece una relación no lineal entre la posición del actuador lineal y el ángulo de elevación de la plataforma. Sustituyendo las dimensiones físicas reales del sistema y representando gráficamente la función obtenida, se arriba a la Figura 41.

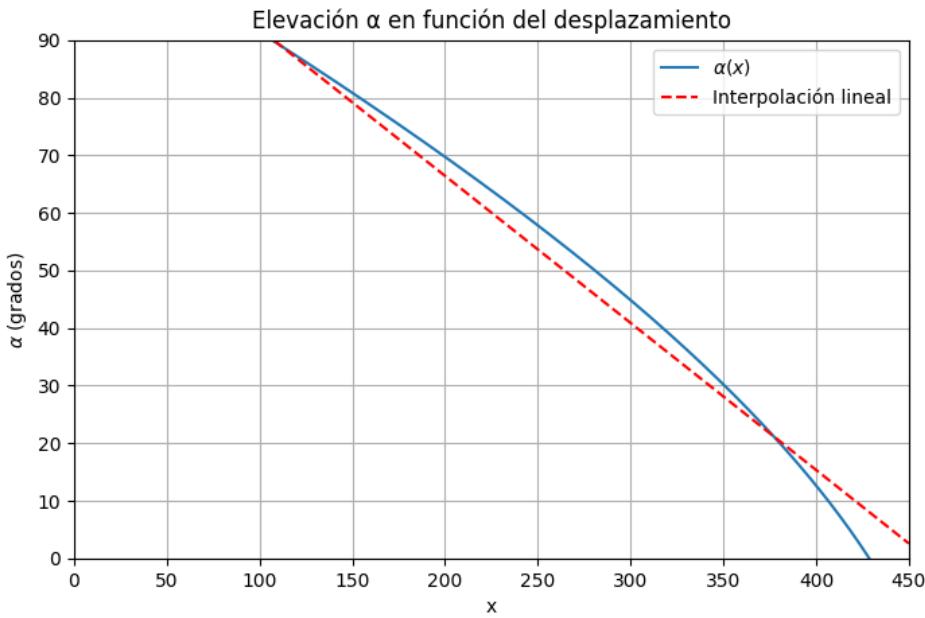


Figura 41: Relación no lineal entre el desplazamiento del actuador y el ángulo de elevación.

## 7 Trabajos de referencia

En esta sección se describen algunos desarrollos previos analizados como referencia para la construcción del prototipo. Estos trabajos presentan diferentes enfoques mecánicos, electrónicos y de control, que sirven como base comparativa y de inspiración para la propuesta de este proyecto.

### 7.1 Plataforma móvil portable

En el trabajo presentado en [11] se propone una plataforma móvil conformada principalmente por motores paso a paso acoplados a cajas reductoras. Esta configuración permite un control preciso de los ángulos de azimuth y elevación, soportando una carga máxima de hasta 10 kg. En la Figura 42 se observa un ejemplo con una antena tipo Yagi instalada sobre la montura.



Figura 42: Montura de antena portable.

El trabajo detalla el procedimiento de puesta en marcha, que incluye la alineación de la montura con el norte verdadero y el horizonte mediante una aplicación móvil externa al sistema. Para el cálculo de la trayectoria se emplea el software *Gpredict*, que ejecuta modelos avanzados en un sistema operativo externo, mientras que el microcontrolador únicamente se encarga del control de los motores paso a paso. De esta manera, la mayor carga computacional es derivada al software de apoyo.

### 7.2 Plataforma móvil para radioaficionados

El trabajo descrito en [12] presenta un sistema similar al anterior, aunque con un diseño mecánico más complejo. En este caso, la reducción se logra mediante un sistema de poleas en lugar de cajas reductoras. Al igual que el trabajo anterior, se

emplean motores paso a paso como actuadores principales. La Figura 43 muestra la estructura de esta montura.



Figura 43: Montura para radioaficionados.

### 7.3 Tracker de la ISS de escritorio

Este proyecto de carácter recreativo [1] consiste en un seguidor de escritorio orientado al rastreo de la Estación Espacial Internacional (ISS). No integra sistemas de recepción de señales y emplea motores paso a paso de bajo tamaño, sin capacidad significativa de carga. La Figura 44 ilustra su diseño.



Figura 44: Seguidor de escritorio para satélites LEO [1].

## 7.4 Tracker satelital autónomo

El desarrollo documentado en [13], basado en [14], constituye el proyecto más completo entre los analizados. Se implementa utilizando un microcontrolador ESP32, que ejecuta el modelo predictivo SGP4, y como actuadores se emplean servomotores de alto torque. La implementación general puede observarse en la Figura 45.



Figura 45: Tracker satelital autónomo de ClearSkyAST.

Este trabajo resulta particularmente relevante ya que la estimación de la trayectoria satelital se procesa íntegramente en el microcontrolador, lo que reduce la dependencia de software externo. Además, incorpora una interfaz web que permite al usuario ingresar los parámetros de los elementos orbitales (TLE) y supervisar el sistema en tiempo real.

## 8 Conclusiones

El desarrollo de un prototipo de *Tracker Satelital* para el Laboratorio de Radiofrecuencias y Microondas, utilizando los actuadores disponibles, se considera factible según las siguientes observaciones obtenidas durante el curso de desarrollo:

- Los actuadores se encuentran en correcto funcionamiento.
- Sus características son adecuadas para aplicaciones en satélites de órbita baja (LEO).
- Sus dimensiones y propiedades mecánicas permiten su implementación, considerando ciertas restricciones.

Respecto a la elección de la electrónica, se empleará el **reed switch** o cuentavueltas magnético de cada actuador. Esto impone límites en la resolución máxima alcanzable: en azimut se obtienen  $0.2^\circ$  constantes, mientras que en elevación la resolución es variable debido a la **no-linealidad** entre el desplazamiento lineal del actuador y el ángulo (relacionada con el diseño mecánico y las características trigonométricas). La peor resolución será de  $0.5^\circ$  a un ángulo de elevación de  $0^\circ$ ; sin embargo, esta situación rara vez se presenta debido a obstáculos en la línea de visión del satélite. Por lo tanto, se considera más representativa la resolución a elevación de  $20^\circ$ , que alcanza unos  $0.3^\circ$ .

Se seleccionará la placa de desarrollo **NODEMCU DEVKIT V1.0**, basada en el microcontrolador **ESP32-D0WDQ6**, por las siguientes razones:

- Capacidad de procesamiento suficiente para implementar el modelo de predicción **SGP4**.
- Posibilidad de desarrollar una interfaz hombre-máquina mediante un servidor web integrado.
- Bajo costo y amplia disponibilidad en el mercado.

En cuanto a la electrónica de potencia, los motores de corriente continua de cada actuador operan nominalmente a  $36V$ . Debido a la dificultad de encontrar módulos comerciales MOSFET para este rango de tensión, se opta por el circuito integrado **L6205**, que presenta las siguientes ventajas:

- Disponibilidad y bajo costo.
- Soporte para tensiones de alimentación de hasta  $52V$ .
- Fácil integración en un circuito impreso PCB (encapsulado Power DIL20).
- Capacidad de hasta  $5.6A$  pico y  $2.4A$  continuo.

- Protecciones integradas contra sobrecorriente y sobretemperatura.

Este CI permite el uso de una resistencia de *shunt* para la medición indirecta de corriente, lo que facilita el monitoreo del estado del actuador mediante el microcontrolador. Para ello, es necesario colocar un amplificador operacional en configuración no inversora, como interfaz de impedancia entre la resistencia y la entrada de ADC del microcontrolador (para contribuir lo menos posible a la medición) y amplificar las señales proporcionales a la corriente a niveles de entrada adecuados para la máxima resolución del ADC.

Se utilizará un módulo GPS **u-blox NEO-6M**, seleccionado por su bajo costo y precisión adecuada para la aplicación.

Durante el desarrollo, se imprimieron piezas en 3D para evaluar la factibilidad del prototipo. No obstante, debido a la carga mecánica, torsiones y exposición a condiciones ambientales (humedad, temperatura, radiación UV), se recomienda fabricar las piezas definitivas en aluminio, con posibilidad de implementar algunas en PETG debido a su resistencia a condiciones ambientales desfavorables.

Se coloca a continuación una prueba realizada en el laboratorio (Figura 46), donde se realizó el movimiento de ambos ángulos de interés utilizando el IC L6205 como interfaz de potencia, se verificó el control de velocidad y dirección.



Figura 46: Prototipo con las piezas impresas para determinar la factibilidad realizado en el laboratorio

## Referencias

- [1] T. user f2knpw, “Iss and leo satellites tracker (thing #4625420),” Thingiverse, unknown, accessed: 2025-09-19; <https://www.thingiverse.com/thing:4625420>.
- [2] Space-track. Accedido: Septiembre 2025. [Online]. Available: <https://www.space-track.org>
- [3] Space-track tle documentation. Accedido: Septiembre 2025. [Online]. Available: <https://celestrak.org/NORAD/documentation/spacetrk.pdf>
- [4] Celestrak - satellite information. Accedido: Septiembre 2025. [Online]. Available: <https://www.celestrak.com>
- [5] Heavens-above. Accedido: Septiembre 2025. [Online]. Available: <https://www.heavens-above.com>
- [6] STMicroelectronics, “L298N dual full-bridge driver — datasheet,” <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/download/22440/STMICROELECTRONICS/L298N.html>, –, consultado: fecha de acceso.
- [7] “DRV880x dmos full-bridge motor drivers — datasheet,” <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8800.pdf?ts=1758286867626>, 2008, rev. K, julio 2008; revisado marzo 2021; consultado: fecha de acceso.
- [8] I. Technologies, “BTS7960 novalithic half-bridge driver — datasheet,” [https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/10/57/infineon-bts7960-ds-en.pdf?folderId=db3a304412b407950112b43945006d5d](https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/10/57/infineon-bts7960-ds-en.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b43945006d5d), –, consultado: septiembre 2025.
- [9] T. Instruments, “Drv8812 hoja de datos del controlador de motor paso a paso,” 2014, accedido: 2025-09-21. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/DRV8812>
- [10] STMicroelectronics, “L6205 hoja de datos del controlador,” 2003, accedido: 2025-09-25. [Online]. Available: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/22532/STMICROELECTRONICS/L6205/1619/1/L6205.html>
- [11] wuxx, “Anrunner,” <https://github.com/wuxx/AntRunner>, 2020, Último acceso: 10 de septiembre de 2025.
- [12] Instructables, “Antenna rotator controller: Azimuth & elevation,” <https://www.instructables.com/Antenna-RotatorController-Azimuth-Elevation>, 2020, Último acceso: 10 de septiembre de 2025.
- [13] C. S. Institute, “Antenna steering toolkit (ast),” <https://www.clearskyinstitute.com/ham/AST>, 2020, Último acceso: 10 de septiembre de 2025.

- [14] E. Downey, “Autonomous Satellite Tracker,” *QEX*, no. 289, pp. 3–10, May/Jun. 2016. [Online]. Available: <https://www.clearskyinstitute.com/ham/AST/>. Accessed: Sep. 19, 2025.