



Universidad Nacional  
**Federico Villarreal**

**FIEI / ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA  
ELECTRO-MECÁNICO DE APUNTE  
AUTOMÁTICO DE RADAR DE APERTURA  
SINTÉTICA PARA MODOS STRIPMAP,  
SPOTLIGHT Y SCAN**

Tesis para optar el título de **Ingeniero en Mecatrónica**

**AUTOR:**

**Ortecho Huamanchumo, Camilo Daniel**

**ASESOR:**

**Dr. Rodríguez Figueroa, José Julio  
PhD. Milla Bravo, Marco Antonio**

**JURADO:**

**Dr. Solis Fonseca, Justo Pastor  
Dr. Kaseng Solis, Freddy Lizardo  
Dr. Flores Masías, Edward José  
Dra. Romero Valencia, Mónica Patricia**

Lima – Perú

2019

## **DEDICATORIA**

*Este trabajo se lo dedico a mis padres, Miguel y Jessica, que estuvieron junto a mí, en las diversas caídas que pude tener, así como también a mis abuelos, José y Dalinda, que más que abuelos son mis padres también y por último se la dedico a mis hermanos, Katherine y Michael, que siempre los amaré por haber sido siempre tan buenos conmigo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primera instancia, agradecer a DIOS por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de brindarme su infinito amor y ayuda en cada obstáculo de la vida.

También me gustaría agradecer a mis padres Miguel y Jessica, mis hermanos Katherine y Michael que siempre me dieron su apoyo cuando más los necesité y que en el transcurso de desarrollo de esta tesis, me dieron su punto de vista para que pueda seguir mejorando.

Me parece importante agradecer al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica - CONCYTEC, que con su Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica - FONDECYT y mediante el N° de convenio del proyecto - PIAP-2-P-434-14, contribuyó al desarrollo del presente trabajo de tesis.

Para finalizar, un gran agradecimiento a mi asesor Dr. José Julio Rodríguez Figueroa, mi co-asesor PhD. Marco Antonio Milla Bravo, que me brindaron su apoyo constante en el desarrollo de este proyecto y por último al Ing. Edward Flores por su ayuda desinteresada que sin duda ha sido y será siempre parte de esta tesis.

# Índice general

<b>Resumen</b>	1
<b>Abstract</b>	2
<b>Capítulo I: Planteamiento del problema</b>	3
<b>Capítulo II: Marco Teórico</b>	14
<b>Capítulo III: Método</b>	28
<b>Capítulo IV: Resultados</b>	52
<b>Capítulo V: Discusión de resultados</b>	67
<b>Capítulo VI: Conclusiones</b>	72
<b>Capítulo VII: Recomendaciones</b>	73
<b>Referencias</b>	74
<b>Anexo 1: Matriz de Consistencia</b>	86
<b>Publicaciones</b>	87

## RESUMEN

La presente tesis describe el diseño de un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética multifuncional en el Radio Observatorio de Jicamarca.

El proyecto fue dividido en 3 etapas: diseño de la antena, diseño de la estructura mecánica de radar de apertura sintética y el diseño del sistema de control. Para corroborar que la antena estuviera bien diseñada, se simuló en un software CAD/FEM (Computer-Aided Design/Finite Element Method) y se obtuvo sus valores de ganancia y VSWR (Voltage Standing wave ratio - coeficiente de reflexión). Para la estructura mecánica, se realizó el análisis de esfuerzos a piezas críticas del sistema y se obtuvo el esfuerzo de Von Mises, la deformación y el factor de seguridad adecuado. Finalmente, para el sistema de control, se simuló la planta en Matlab y se obtuvo los parámetros  $K_p$  y  $T_i$  adecuados para el sistema.

En conclusión, el diseño de un radar de apertura sintética es de vital importancia ya que este tiene gran utilidad por su capacidad de medición a larga distancia y en cualquier condición climática, además de su operación multifuncional.

***Palabras Clave: Radar, Apertura Sintética, deformación, factor de seguridad, Control, Multifuncional***

## **ABSTRACT**

This thesis describes the design of a multifunctional synthetic aperture radar electro-mechanical system in the Jicamarca Radio Observatory.

The project was divided in three parts: antenna design, synthetic aperture radar mechanical structure design and control system design. The antenna was simulated in a CAD/FEM (Computer-Aided Design/Finite Element Method) software in order to verify the correct operation and its gain and VSRW (Voltage Standing wave ratio – reflection coefficient) values was obtained. For the mechanical structure, the effort analysis was made to critical parts of the system and the effort of Von Mises was obtained, deformation and the suitable safety factor for each piece. Finally, for the control system, the plant in Matlab was simulated and the Kp and Ti parameters suitable were obtained for the system.

In brief, the design of a synthetic aperture radar is important because of its usefulness and long-distance measurement capability. In addition to this, the radar can operate in any weather condition, besides to its different type of operation (multi-operational).

***Keywords: Radar, Synthetic Aperture, Spotlight, deformation, safety factor, Multi-operational***

# Capítulo I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### **1.1. Descripción y formulación del problema**

En el Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ), sede científica del Instituto Geofísico del Perú, ubicada en el departamento de Lima, tiene experiencia diseñando radares para distintas aplicaciones (estudios de la ionósfera, velocidad de las gotas de la lluvia, etc.). Una de sus últimas adquisiciones del ROJ es un radar de apertura sintética el cual se desea mejorar su capacidad radárica ( antena, estructura mecánica y sistema de control) que sirve para medir deslizamiento de tierra (Florentino, Charapaqui, De La Jara, & Milla , 2017) así como también puede ser usado para realizar estudios de variación de nieve (Martínez, 2008).

Los radares de apertura sintética (SAR pos sus siglas en inglés: *Synthetic Aperture Radar*) son sistemas de radiofrecuencia montados en un sistema con movimiento horizontal, que emiten una onda electromagnética (normalmente en altas frecuencias), que mediante barridos de frecuencia puede recrear una “imagen” del objeto en observación.

No obstante, la escasez de información para diseñar estos sistemas es bastante alta, teniendo como principales inconvenientes, su elevado precio de adquisición y su carencia de multifuncionalidad, por ese motivo, el diseño de un radar de apertura

sintética propio con diversos modos de apunte, permitirá sentar las bases ingenieriles para el desarrollo de este tipo de radares en el Perú.

La tesis muestra el proceso de diseño de un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética que tenga la capacidad de ser multifuncional (trabajar en modos Stripmap, Spotlight y Scan).

## **1.2. Antecedentes de la Investigación**

El diseño de un radar de apertura sintética se puede realizar de distintas maneras, dividiendo su desarrollo en la antena y el posicionador lineal. A continuación, se presenta algunos sistemas de radar de apertura sintética

La Universidad Pontificia Católica del Perú (PUCP) ha implementado un radar de apertura sintética que trabaja desde 2.135 GHz hasta 2.64 GHz, el cual tiene un posicionador lineal, tiene antenas de bocina diseñadas por ellos mismos y no cuenta con sistema de control de apunte. (ver Fig.1.1).

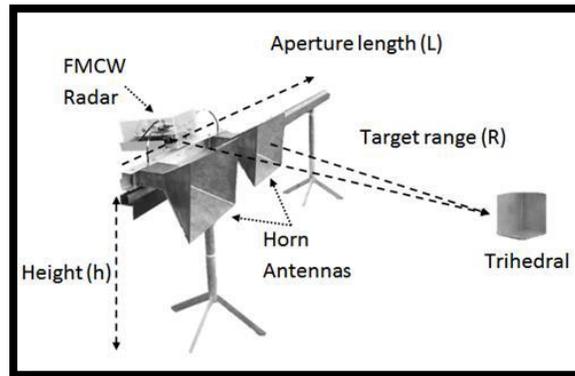


Fig. 1.1: Radar Apertura Sintética de la PUCP (Yarlequé, Alvarez, Martínez, & Platriez, 2016)

En el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, ha desarrollado un radar de apertura sintética en banda S (2 - 4 GHz) con una frecuencia central de 2.4 GHz, tiene un posicionador lineal de correa dentada, latas cilíndricas de café como antenas de bocina y no cuenta con sistema de control de apunte. (ver Fig.1.2).

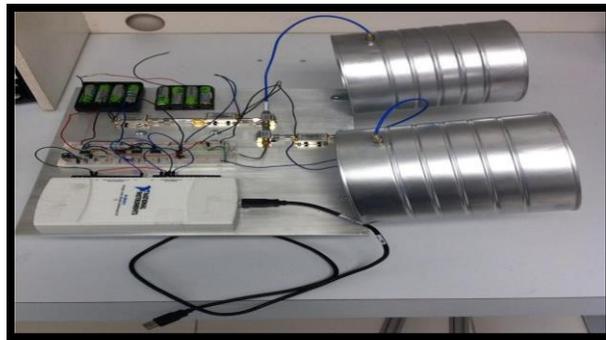


Fig. 1.2: Radar Apertura Sintética de la CICESE (Almanza, 2015)

El radio Observatorio de Jicamarca (ROJ) ha implementado un radar de apertura sintética en banda Ku (12 - 18 GHz) con una frecuencia central de 15 GHz, la cual está conformada por un posicionador lineal de correa dentada, antenas de bocina empernadas y no cuenta con sistema de control de apunte (ver Fig. 1.3).



Fig. 1.3: Radar del ROJ (Florentino, Charapaqui, De La Jara, & Milla , 2017)

## **1.3. PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema principal**

En base a lo anterior, se formula el siguiente problema:

- Con el diseño de un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética se mejorará la capacidad radárica de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca, 2016-2018.

### **1.2.2. Problemas secundarios**

Del problema principal se desglosan los siguientes problemas secundarios:

- Con el diseño de un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética se mejorará la capacidad de la antena de bocina de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca, 2016-2018.
- Con el diseño de un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética multifuncional se optimizará el rendimiento de la estructura mecánica de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca, 2016-2018.
- Con el diseño de un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética multifuncional se mejorará el rendimiento del sistema de control de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca, 2016-2018.

## **1.4. OBJETIVOS**

## **Objetivo general**

- Diseñar un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética para mejorar la capacidad radárica de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca entre los años 2016 al 2018.

## **Objetivos específicos**

- Mejorar la capacidad de la antena de bocina de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca mediante el diseño de un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética entre los años 2016-2018.
- Optimizar el rendimiento de la estructura mecánica de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca mediante el diseño un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética entre los años 2016 al 2018.
- Mejorar el rendimiento del sistema de control de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca mediante el diseño de un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética entre los años 2016-2018.

## **1.5. Marco Histórico**

### **Radar de Apertura Sintética**

En los años 50 o 60's desarrolladores de las universidades de Michigan e Illinois, acuñaron el concepto de radar de apertura sintética, también llamado en inglés "Synthetic Aperture Radar (SAR)", como la sintetización de una antena larga artificial, creada por el movimiento traslacional de las antenas, de las cuales se obtiene la información de fase y amplitud en ciertos intervalos de tiempo. (Martínez, 2008)

Se compone de un sistema generador de radiofrecuencia que a su vez actúa como el sistema de transmisión y recepción de la onda (VNA), un sistema de potencia (amplificador) y el sistema encargado de propagar la onda (las antenas), empotrado en un posicionador lineal.

## ✚ Modos de Sensado

### *Stripmap*

En la Fig.1.4 se muestra el modo Stripmap, el cual se diferencia por abarcar mayor cobertura en el sensado que el modo Spotlight pero menor cobertura que el modo Scan. (Martínez, 2008)

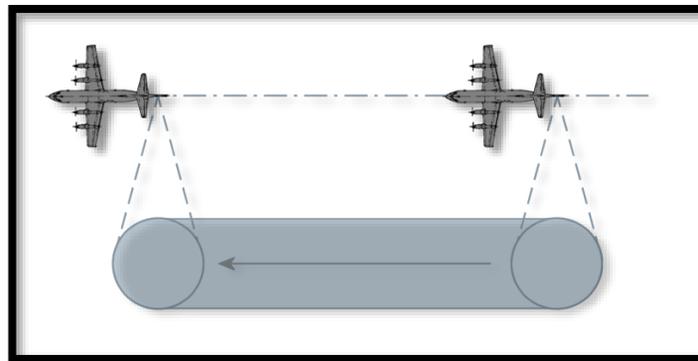


Fig. 1.4: Modo Stripmap (Martínez, 2008)

### *Spotlight*

En la Fig.1.5 se muestra el modo Spotlight, el cual se diferencia por tener los movimientos lineal y rotacional de las antenas para un apunte dirigido. Con este modo, se logra tener una mejor resolución del espacio sensado que con los otros dos modos pero abarca menor cobertura. (Martínez, 2008)

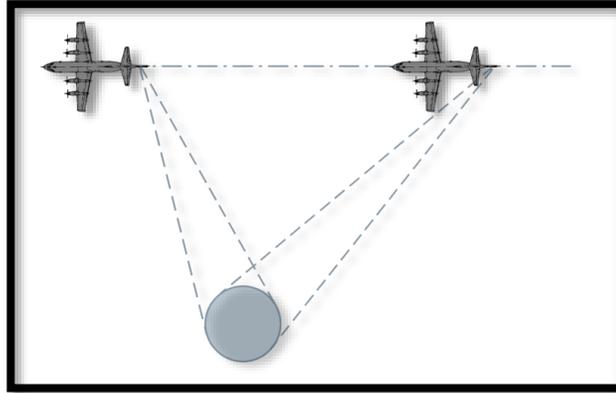


Fig. 1.5: Modo Spotlight (Martínez, 2008)

### *Scan*

En la Fig.1.6 se muestra el modo Scan, el cual realiza toma de datos con distintos puntos de enfoque para luego sintetizar todas las imágenes en una sola, logrando tener mayor cobertura que los otros dos modos pudiendo tener una baja resolución. (Martínez, 2008)

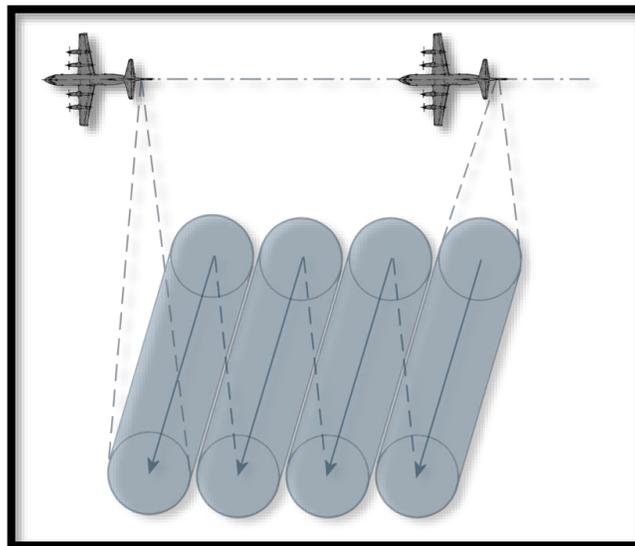


Fig. 1.6: Modo Scan (Martínez, 2008)

## **1.6. JUSTIFICACIÓN**

El desarrollo de este proyecto de tesis, busca brindar el conocimiento del proceso de diseño y el desarrollo de este tipo de sistemas en el Perú.

Es importante recalcar la multifuncionalidad del radar SAR, ya que con sus diferentes modos de sensado puede tomar mediciones a un nevado (modo Stripmap), mediciones a un punto definido del nevado (modo Spotlight) y mediciones a toda una cadena de nevados (modo Scan).

## **1.7. Viabilidad de la Investigación**

### **+ Viabilidad técnica**

#### **▪ Software**

En el desarrollo de esta investigación se utilizan programas de diseño, tales como, Autodesk Inventor y Feko, así como también, Matlab y C son los lenguajes de programación que se emplean en este proyecto y que el Radio Observatorio de Jicamarca cuenta con experiencia en estas herramientas y lenguajes de programación.

#### **▪ Hardware y Chasis mecánico**

Las piezas que se diseñan para la estructura del sistema de radar, pueden ser fabricadas en Perú, ya que se diseña de tal manera, que no se necesite utilizar maquinaria compleja.

Los componentes que se utilizan en el diseño del sistema de radar se obtienen por empresas que se encuentran en el mercado local. Estas empresas tienen la posibilidad de ejecutar algún servicio de importación, si fuese necesario.

Es importante recalcar, la contribución técnica del personal del Radio Observatorio de Jicamarca, los cuales están conformados por doctores, ingenieros y técnicos especializados en el desarrollo de este tipo de radares. En base a lo anterior, se concluye que el proyecto es técnicamente viable.

#### **Viabilidad operativa**

El sistema de radar de apertura sintética desarrollado en el Radio Observatorio de Jicamarca será utilizado en futuros proyectos de investigación.

#### **Viabilidad económica**

El Radio Observatorio de Jicamarca sede científica del Instituto Geofísico del Perú, tiene la capacidad económica para el diseño de este proyecto de tesis, gracias al financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica - CONCYTEC con su Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica - FONDECYT mediante el N° de convenio del proyecto - PIAP-2-P-434-14.

### **1.8. Alcances de la Investigación**

La tesis comprende el proceso de diseño de este tipo de radares, dividiéndolo en el diseño de las diferentes partes mecánicas del radar de apertura sintética (antenas, estructura mecánica y posicionador lineal), así como también, del algoritmo de control y se dejará la implementación para futuros trabajos.

En base a lo anterior, esta tesis abordará el diseño de la estructura mecánica del radar y de las antenas, así como la realización del algoritmo de control del sistema en el Radio Observatorio de Jicamarca.

### 1.9. Cronograma

A continuación, en la tabla 1.1 se muestra el cronograma de actividades del desarrollo de la tesis, el cual comprenderá desde el 15 de Julio del 2016 hasta el 15 de mayo del 2018

Tabla 1.1: Cronograma de Actividades

Actividades del Proyecto	Meses																							
	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	
Antena-Diseño CAD	■	■	■	■	■																			
Antena-Diseño CAD			■	■	■	■																		
Antena-Simulación				■	■	■	■																	
Antena-Planos					■	■	■	■	■															
Soporte y Cabeceo Diseño CAD							■	■	■	■														
Sistema Mecánico-Planos								■	■	■	■													
Modelamiento del Sistema									■	■	■	■												
Modelamiento del Sistema										■	■	■	■	■	■	■								
Sintonización-Control												■	■	■	■	■	■	■						
Sintonización-Control																	■	■	■	■	■	■	■	

## **1.10. Delimitaciones**

### **1.10.1. Delimitación Espacial**

El sistema de radar de apertura sintética se encuentra enfocado a la situación presente respecto del cambio climático y sus efectos en el deshielo de los nevados. El desarrollo del radar de apertura sintética y las pruebas experimentales se desarrollará en el Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ), sede científica del Instituto Geofísico del Perú.

### **1.10.2. Delimitación Temporal**

El desarrollo de la tesis se llevará a cabo desde el 15 de Julio del 2016 hasta el 15 de mayo del 2018, en el transcurso de este tiempo, se iniciarán una serie de actividades que nos permitan cumplir con la realización de la tesis.

### **1.10.3. Delimitación Conceptual**

La tesis abarca diversas áreas de la ingeniería, tales como, ingeniería mecánica, ingeniería electrónica, ingeniería informática e ingeniería de control.

# Capítulo II

## MARCO TEÓRICO

### **2.1. Fundamento teórico de la Investigación**

Los componentes mecánicos del radar de apertura sintética, son los siguientes:

- Antena de Bocina
- Tipos de transmisión mecánica
- Sistema de control

#### **2.1.1. Antena de Bocina**

Una antena es el encargado de transmitir la energía en forma de ondas electromagnéticas.

Las antenas de bocina se utilizan fundamentalmente en la región de microondas y físicamente se componen de una guía de onda, la bocina y su pin de alimentación.

Existe una gran diversidad de antenas de bocina, tales como, antenas de bocina que trabajen en el plano-E, antenas de bocina que trabajen en el plano-H, antenas de bocina piramidal y antenas cónicas. (Balanis, 2005)

A continuación, se presenta una antena de bocina piramidal y sus vistas en el plano eléctrico (Fig.2.1), el plano magnético (Fig.2.2) y su vista isométrica (Fig.2.3).

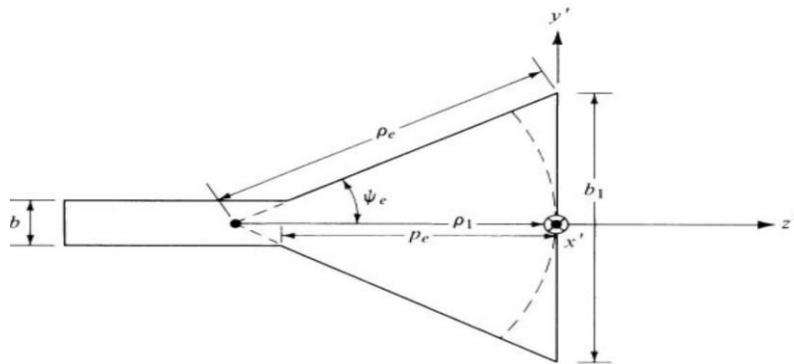


Fig. 2.1: Antena de bocina piramidal -Vista en el Plano E (Balanis, 2005)

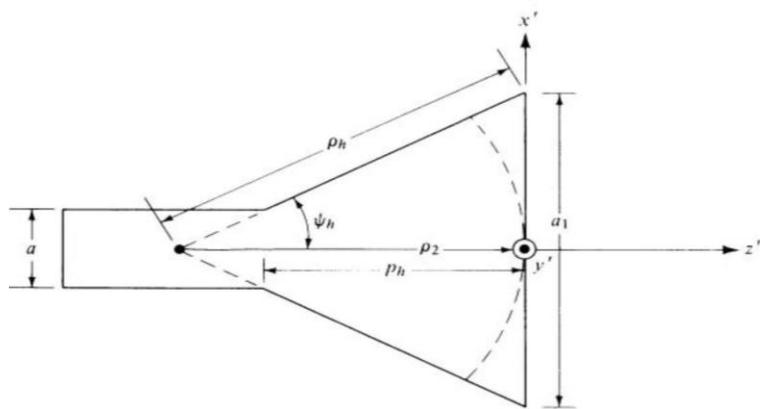


Fig. 2.2: Antena de bocina piramidal -Vista en el Plano H (Balanis, 2005)

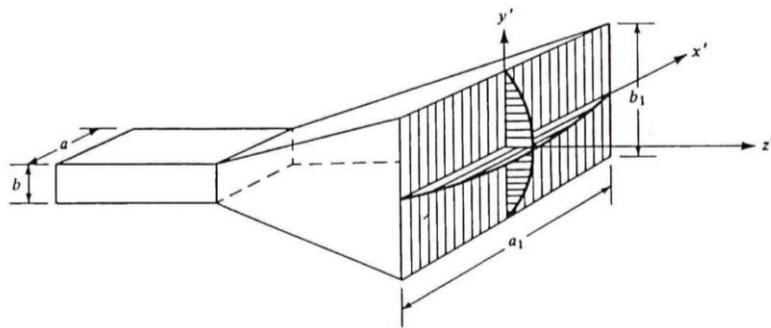


Fig. 2.3: Antena de bocina - Vista Isométrica (Balanis, 2005)

A su vez, en la tabla 2.1 se muestra los parámetros que intervienen para el diseño de la antena.

Tabla 2.1: Parámetros para el diseño de la antena

Variable	Descripción	Unidades
$f$	Frecuencia central	GHz
$G_0$	Ganancia	dB
$g$	Ganancia	Adimensional
$\chi$	Coficiente de calibración	Adimensional
$\lambda$	Longitud de onda	cm
$a$	Ancho de la guía de onda	cm
$b$	Largo de la guía de onda	cm
$c$	Altura de la guía de onda	cm
$a_1$	Distancia de la apertura en el plano Eléctrico	cm
$b_1$	Distancia de la apertura en el plano Magnético	cm
$\rho_e$	Distancia de la apertura al punto de alimentación en el plano Eléctrico	cm
$\rho_h$	Distancia de la apertura al punto de alimentación en el plano Magnético	cm
$P_e$	Distancia de la apertura al comienzo de la guía de onda en el plano Eléctrico	cm
$P_h$	Distancia de la apertura al comienzo de la guía de onda en el plano Magnético	cm

#### 2.1.1.1. Ecuaciones de diseño

Para diseñar la bocina de la antena, se debe encontrar los valores de los parámetros antes mencionados. A continuación, se muestra las ecuaciones de diseño. (Balanis, 2005)

$$\sqrt{2\chi - \frac{b}{\lambda}}^2 (2\chi - 1) = \left(\frac{G_0}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\chi}}} - \frac{a}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{G_0^2}{6\pi^3} \frac{1}{\chi} - 1\right) \quad (2.1)$$

$$G_0 = 10\log(g) \quad (2.2)$$

$$\lambda = c/f \quad (2.3)$$

$$\chi = \frac{g}{2\pi\sqrt{2\pi}} \quad (2.4)$$

$$\rho_e = \lambda\chi \quad (2.5)$$

$$\rho_h = \frac{g^2}{8\pi^3} \left(\frac{\lambda}{\chi}\right) \quad (2.6)$$

$$a_1 = \sqrt{3\lambda\rho_h} \quad (2.7)$$

$$b_1 = \sqrt{2\lambda\rho_e} \quad (2.8)$$

$$P_e = (b_1 - b) \left[ \left(\frac{\rho_e}{b_1}\right)^2 - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

$$P_h = (a_1 - a) \left[ \left(\frac{\rho_h}{a_1}\right)^2 - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

### 2.1.1.2. Procedimiento de diseño

- 1) Como primer paso, se convierte la ganancia ( $G_0$ ) de dB en un valor adimensional ( $g$ ) usando la ecuación 2.2.
- 2) Seguidamente se realiza el cálculo para hallar la longitud de onda ( $\lambda$ ) para una  $f = 5.3 \text{ GHz}$  usando la ecuación 2.3. Donde  $c$  es la velocidad de la luz.

- 3) Luego, se realiza el cálculo para encontrar el coeficiente de calibración  $\chi$  con la ecuación 2.4. Para que la bocina piramidal sea físicamente realizable,  $P_e$  y  $P_h$  deben ser iguales, por ello,  $\chi$  debe cumplir con la ecuación 2.1, si esto no se cumple, se debe variar el valor de  $\chi$ .
- 4) Se halla los valores para  $\rho_e$  y  $\rho_h$ , con las ecuaciones 2.5 y 2.6 , respectivamente.
- 5) Posteriormente, se realiza el cálculo para  $a_1$  y  $b_1$ , utilizando las ecuaciones 2.7 y 2.8, correspondientemente.
- 6) Por último, se halla el valor de  $P_e$  con la ecuación 2.9 y  $P_h$  con la ecuación 2.10, y se verifica que sean iguales en magnitud.

### **2.1.2. Tipos de transmisión mecánica**

#### **2.1.2.1. Transmisión mecánica por tornillo de bolas re-circulantes**

Este tipo de transmisión mecánica transforma movimiento rotativo en uno rectilíneo. El funcionamiento del tornillo de bolas se basa en el ciclo repetitivo que realizan las bolillas internas al llegar al final de la tuerca (nut) y regresar al principio. Este sistema de circulación se diseña especialmente para que las bolillas y el tornillo tengan un rozamiento despreciable, logrando de esta forma una insignificante pérdida de potencia por fricción. (Castiglione, 2011). En la Fig.2.4 se muestra este tipo de transmisión.

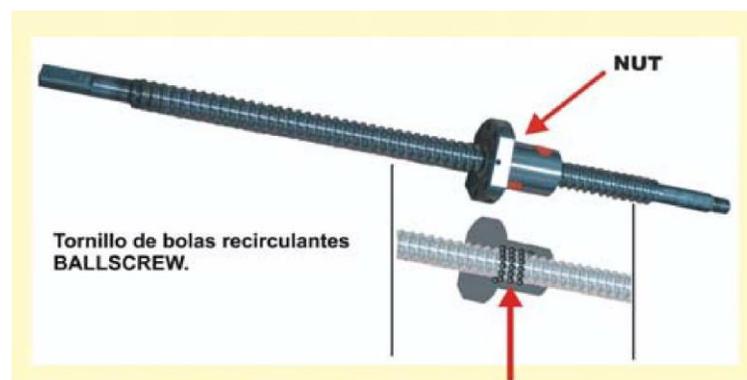


Fig. 2.4: Transmisión por tornillo de bolas (Castiglione, 2011)

#### **2.1.2.2. Transmisión mecánica por piñón y cremallera**

Este tipo de transmisión mecánica cuenta con cajas reductoras que se encuentren en sitios de fácil acceso para agilizar los programas de limpieza, lubricación y mantenimiento.

El funcionamiento del piñón y cremallera se basa en empotrar la estructura mecánica al piñón y que se comience desplazar a lo largo de la cremallera de precisión. Este sistema de piñón-cremallera ofrecen solidez y precisión en largos desplazamientos. (Castiglione, 2011)

En la Fig.2.5 se muestra este tipo de transmisión.

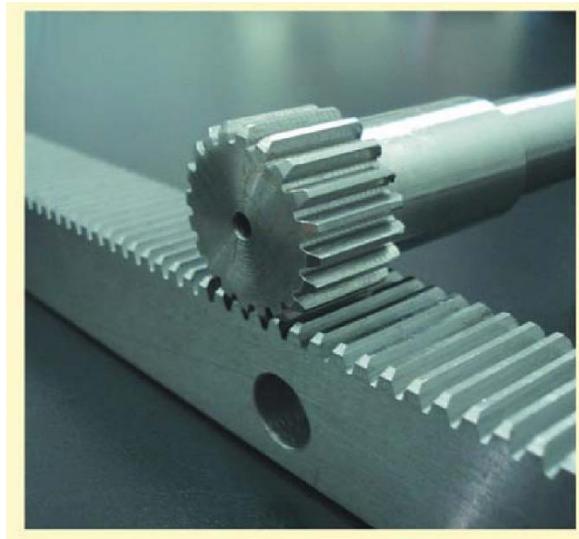


Fig. 2.5: Transmisión por piñón y cremallera (Castiglione, 2011)

#### **2.1.2.3. Transmisión mecánica por correa dentada**

Este tipo de transmisión mecánica se componen de una base mecánica empotrado en una correa de caucho con dientes trapezoidales. La correa dentada se utiliza también como un fusible mecánico y elemento absorbente de choques de transmisión. (Castiglione, 2011)

En la Fig. 2.6 se muestra este tipo de transmisión.

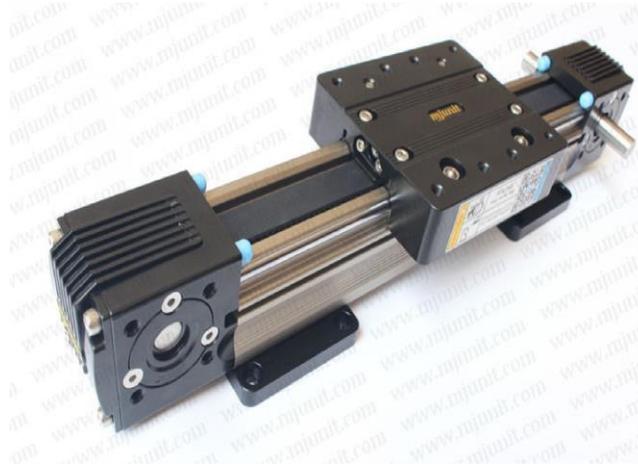


Fig. 2.6: Transmisión por correa dentada (Castiglione, 2011)

### 2.1.3. Sistema de control

Un sistema de control se define como una combinación de componentes que actúan conjuntamente y que cumplen un determinado objetivo. La planta es el objeto sobre el cual se ejecutan las acciones. Es el objeto que se desea controlar.

Se puede establecer que todo sistema de control en la vida real, presenta una “señal de entrada” que actúa sobre el mismo, una “señal de salida” generada por el sistema y una señal no deseada, llamada también como “perturbación” (ver Fig. 2.7). (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 1998)

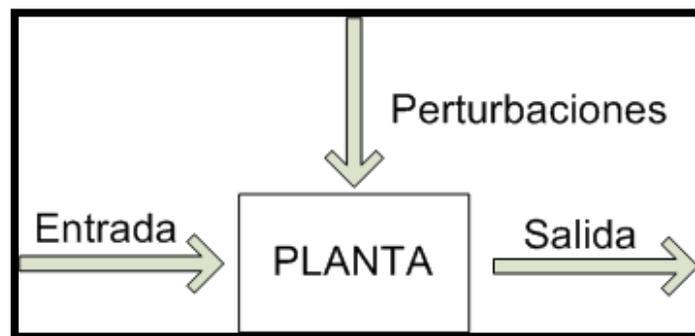


Fig. 2.7: Esquema de control (Fuente: el autor)

### **2.1.3.1. Identificación del sistema dinámico**

Existen dos tipos de identificación de la dinámica de un proceso, paramétrica y no paramétrica. Los modelos obtenidos se utilizan para simular su comportamiento, implementar la técnica de control, logrando predecir su comportamiento frente a ciertas perturbaciones. De esta manera, se asegura una correcta sintonización de los parámetros de control hacia la planta, ahorrándose tiempo y dinero.

a) Identificación paramétrica: El método de identificación paramétrica requiere tener un modelo predefinido (ARX,ARMAX) mediante cálculo de minimización de error entre el proceso y un modelo predefinido. (Lennart, 1987) Las técnicas que se utilizan para la identificación paramétrica, se presentan a continuación:

- Técnicas frecuenciales
- Técnicas temporales

b) Identificación no-paramétrica: Sucede lo contrario en el modelado no paramétrico, el cual se obtiene mediante pruebas experimentales al que se somete la planta frente a una cierta entrada. (Lennart, 1987) Las técnicas que se utilizan para la identificación no paramétrica, se presentan a continuación:

- Análisis de la respuesta temporal o transitoria
- Análisis de la respuesta frecuencial
- Análisis correlacional

- Análisis espectral

En esta tesis, se utilizará la identificación del sistema dinámico mediante el Análisis de la respuesta temporal o transitoria, la cual se procede a explicar a continuación.

### **2.1.3.2. Análisis de la respuesta temporal o transitoria**

En el análisis de la respuesta transitoria, se excita la planta con una entrada tipo escalón o impulso a lazo abierto y luego se procesa los datos para obtener el modelo de la planta. (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 1998)

A continuación, se explica detalladamente el procedimiento para la identificación de una planta.

- **Procedimiento de diseño:**

- 1) Excitar a la planta con una entrada tipo escalón a lazo abierto.
- 2) Almacenar la data.
- 3) Plotear la data en un determinado software (Matlab, Python, Labview).
- 4) Ubicar la zona lineal del sistema.
- 5) Aplicar las ecuaciones de diseño sea para un sistema de 1er orden (ver Subsección1) o de 2do orden (ver Subsección2).
- 6) Obtener la función de transferencia (F.T).
- 7) Plotear la gráfica de la F.T obtenida y comparar con la primera gráfica para verificar el grado de similitud.

Es importante diferenciar el análisis de la respuesta transitoria para un sistema de primer y de segundo orden. Es por ello, que se procede a explicar a continuación.

1. **Sistemas de primer orden:** Se denomina orden de un sistema al grado de su polinomio característico, es decir, por la cantidad de polos que presenta. En aplicaciones reales, estos sistemas de primer orden cuentan con un retardo en su estado transitorio, así como se muestra en la ecuación 2.11. (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 1998)

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{ke^{-T_m s}}{\tau s + 1} \quad (2.11)$$

Distintos métodos se utilizan para poder identificar los parámetros de la función de transferencia descrita anteriormente.

Según estudios realizados, el método de Cecil Smith para identificación de plantas de primer orden, es el que tiene una mejor performance. (Lennart, 1987) Este método utiliza los puntos en el 28.3 % y 63.2 % de la curva de respuesta, como se muestra en la Fig.2.8.

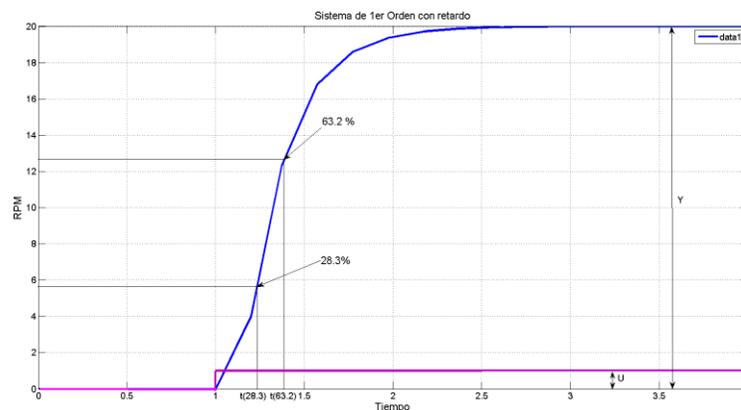


Fig. 2.8: Sistema de primer orden con retardo (Fuente: el autor)

○ **Ecuaciones de diseño:**

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta U} \quad (2.12)$$

$$t_{28} = T_m + \tau/3 \quad (2.13)$$

$$t_{63} = T_m + \tau \quad (2.14)$$

Donde:

- $Y(s)$  = Salida del sistema
- $X(s)$  = Entrada del sistema
- $k$  = Ganancia del sistema
- $\tau$  = Constante de tiempo del sistema (tao)
- $T_m$  = Retardo o tiempo muerto del sistema
- $\Delta Y$  = Variación de la salida del sistema
- $\Delta U$  = Variación de la entrada del sistema

**2. Sistemas de segundo orden:** Los sistemas de segundo orden tienen mayor presencia en los sistemas industriales. A continuación, en la ecuación 2.15 se presenta la función de transferencia de un sistema de segundo orden.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.15)$$

Donde:

- $k$  = Ganancia propia del sistema
- $\omega_n$  = Frecuencia natural no amortiguada
- $\zeta$  = Factor de amortiguamiento

En la Fig. 2.9 y en la tabla 2.2 se presenta la clasificación de los sistemas de segundo orden según el factor de amortiguamiento.

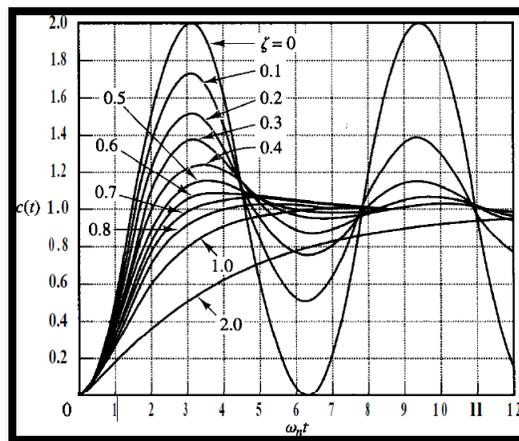


Fig. 2.9: Sistemas de segundo orden (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 1998)

Tabla 2.2: Clases de sistemas de segundo orden

Clase	Rango
Subamortiguado	$0 < \zeta < 1$
Criticamente Amortiguado	$\zeta = 1$
Sobreamortiguado	$1 < \zeta$

### 2.1.3.3. Técnicas de control

En los sistemas de control de lazo cerrado, existen diversas técnicas de control, para lograr que la salida del sistema se asemeje en su totalidad a la referencia. A continuación, se presentan algunas técnicas de control.

- 1) Control ON-OFF: Los controladores ON-OFF se definen como sistemas simples, debido a que su mecanismo de actuación se basa en un control de dos posiciones, razón por la cual se utilizan en su mayoría en sistemas de calentamiento domésticos. (D. Seborg, 2010)
- 2) Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID): Los controladores PID actualmente son los más utilizados en la industria, debido a sus ventajas de la combinación de las acciones proporcional, integral y derivativa. A continuación, en la ecuación 2.22 se muestra la función de transferencia de un controlador PID en el plano Laplaciano.

$$\frac{C(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.16)$$

Seguidamente, en la tabla 2.3 se muestra las ventajas y desventajas de cada acción del control PID. (Arnález, 2014)

Tabla 2.3: Ventajas y desventajas de cada acción del control PID

Acciones de Control	Ventajas	Desventajas
Proporcional ( $K_p$ )	Aproxima la salida del sistema al set point.	No elimina el error en estado estacionario, causa sobreimpulso.
Integral ( $T_i$ )	Elimina el error en estado estacionario.	Produce lentitud en la respuesta del sistema.
Derivativo ( $T_d$ )	Prevé variaciones del error en estado estacionario.	Amplifica el ruido y no puede trabajar independientemente.

3) Control basado en Lógica Difusa: La lógica difusa se define como una lógica multivaluada que permite representar matemáticamente la incertidumbre. Se caracteriza por tener un conjunto de variables de entrada y salida que se encuentran en relación con un conjunto de variables lingüísticas con un determinado grado de pertenencia. (Lee, 1990)

Una de sus variaciones del control PID, es el control PI la cual se utilizará en esta tesis debido a que cumple con los requerimientos de diseño y es más preciso comparado con el control ON-OFF y con menor peso computacional que el control por Lógica Difusa.

Los conceptos teóricos expuestos con anterioridad se utilizan para el diseño de la antena de bocina, el diseño de la estructura mecánica del radar, elegir el tipo de transmisión y el desarrollo del sistema de control, todo esto en el capítulo siguiente.

# Capítulo III

## MÉTODO

### **3.1. Tipo de Investigación**

El siguiente trabajo de investigación será de tipo aplicada, el nivel es descriptivo por lo tanto no se requiere de una hipótesis (Sabino, 1992) ya que solo se describe el proceso de diseño del sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética multifuncional.

### **3.2. Ámbito temporal y espacial**

#### **3.2.1. Ámbito temporal**

El desarrollo de la tesis fue llevado a cabo desde el 15 de Julio del 2016 hasta el 15 de mayo del 2018, en el transcurso de este tiempo, se iniciaron una serie de actividades que nos permitieron cumplir con la realización de la tesis.

#### **3.2.2. Ámbito espacial**

El sistema de radar de apertura sintética se encuentra enfocado a la situación presente respecto del cambio climático y sus efectos en el deshielo de los nevados. El diseño del radar de apertura sintética se desarrolló en el Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ), sede científica del Instituto Geofísico del Perú.

### **3.3. Variables e indicadores**

#### **3.3.1. Variable independiente**

- X1: El diseño de un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética multifuncional.

### 3.3.2. Variable dependiente

- Y1: Capacidad radárica

### 3.4. Operacionalización de variables e indicadores

**VARIABLE INDEPENDIENTE:** EL DISEÑO DE UN SISTEMA ELECTRO-MECÁNICO DE APUNTE AUTOMÁTICO DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA MULTIFUNCIONAL

Tabla 3.1: Operacionalización de la variable independiente

<b>DEFINICIÓN CONCEPTUAL</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>
Es un sistema que utiliza ondas electromagnéticas para poder realizar mediciones de velocidad, desplazamiento, etc.	Determinación de los requerimientos de diseño	Requerimientos de radiofrecuencia, mecánicos, de control.
	Propuesta del sistema mecatrónico	Diagrama de la propuesta del sistema mecatrónico.
	Diseño del sistema	Estructura que considera tres aspectos: diseño de la antena, de la estructura mecánica y del sistema de control.
	Pruebas de simulación	Pruebas en el software FEKO, Inventor y Matlab.

**VARIABLE DEPENDIENTE:** CAPACIDAD RADÁRICA

Tabla 3.2: Operacionalización de la variable dependiente

DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
La capacidad se mide en el rendimiento de la antena, de la estructura mecánica y el sistema de control.	Capacidad de la antena de bocina	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Valor de VSWR &lt; 2.</li> <li>▪ Valor de ganancia &gt;15 dBi.</li> </ul>
	Rendimiento de la estructura mecánica	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Deformación máxima &lt; 1mm.</li> <li>▪ Factor de seguridad &gt;2.</li> </ul>
	Rendimiento del sistema de control	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tiempo de establecimiento &lt;5s.</li> <li>▪ Error en estado estacionario nulo</li> <li>▪ Sobreimpulso &lt; 5%</li> </ul>

### 3.5. Población y muestra

#### **Población:**

La población está compuesta por todos los sistemas electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética que existen en las instituciones de investigación peruanas, algunas presentadas en los antecedentes.

#### **Muestra:**

La muestra está constituida por el sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética para modos Stripmap, Spotlight y Scan del Radio Observatorio de Jicamarca, siendo un muestreo por conveniencia debido a la facilidad de acceso del dispositivo.

### 3.6. Instrumentos y fuentes

- Instrumentos

  - ✚ Software Feko, Inventor y Matlab

- Fuente Primaria

  - ✚ Opiniones del personal CIELO del Radio Observatorio de Jicamarca

- Fuentes Secundarias

  - ✚ Tesis

  - ✚ Publicaciones

  - ✚ Libros y documentos en internet

  - ✚ Datasheets de proveedores

### 3.7. Procedimientos

La presente investigación se desarrolló en varias etapas.

Etapa 1: Se identificó los requerimientos del sistema, tales como, frecuencia de trabajo, factor de seguridad, deformación, parámetros de control (tiempo de establecimiento, respuesta al cambio, error en estado estacionario, etc). A esta sección se le nombró ***Requerimientos de diseño.***

Etapa 2: Se dividió el sistema en diversos subsistemas, tales como, Subsistema de energía, de interacción con el usuario, de desplazamiento, de sensores y de control y dirección. A esta sección se le nombró ***Sistema Mecatrónico.***

Etapa 3: Se refiere al diseño de la antena de bocina piramidal y de la estructura mecánica del radar SAR. Esta se hizo a través de softwares CAD/FEM para su simulación y la generación de los planos del radar SAR. A esta sección se le llamó *Diseño de la antena y de la estructura mecánica del radar SAR*.

Etapa 4: Finalmente se realizó la identificación de la planta, así como el algoritmo de control. Esta sección se le nombró *Diseño del sistema de control del radar SAR*.

### **3.8. Análisis de Datos**

Luego de computar los requerimientos en los instrumentos, se obtienen los datos para el correcto diseño de antena (VSWR y ganancia), la estructura mecánica (Tensión de Von Mises, deformación y factor de seguridad) y el sistema de control (tiempo de establecimiento, sobreimpulso y error en estado estacionario). Los resultados de estos datos se presentan en gráficas de líneas para su comparación e interpretación.

### **3.9. Requerimientos de diseño**

Dentro de las consideraciones que se establecen en el diseño del mecanismo, se encuentran requerimientos de radiofrecuencia, mecánicos y de control, los cuales se detallan a continuación.

#### **3.9.1. Requerimientos de radiofrecuencia**

- 1) La antena de bocina piramidal debe trabajar en banda C (4 - 7 GHz). (Martínez, 2008)
- 2) En el radar SAR, la antena de bocina piramidal debe tener una ganancia próxima a los 20 dBi, ya que esto representa mayor ganancia y directividad, respecto a las antenas comerciales. (AINFO Inc., 2016)

3) La antena de bocina piramidal debe tener un VSWR menor que 2. (AINFO Inc., 2016)

### **3.9.2. Requerimientos mecánicos**

- 1) Las piezas diseñadas (antena y estructura mecánica) deben tener un factor de seguridad mayor a 2 y una deformación menor a 1 milímetro. (Rothbart, 2006)
- 2) En el radar SAR, la estructura mecánica debe permitir un movimiento rotacional discreto y lineal. (Florentino, Charapaqui, De La Jara, & Milla , 2017)

### **3.9.3. Requerimientos de control**

- El sistema debe tener un tiempo de establecimiento menor a 6s. (Florentino, Charapaqui, De La Jara, & Milla , 2017)
- El sistema debe tener un error en estado estacionario nulo. (Florentino, Charapaqui, De La Jara, & Milla , 2017)
- El sistema debe tener un sobreimpulso menor al 5%. (Florentino, Charapaqui, De La Jara, & Milla , 2017)

## **3.10. Sistema Mecatrónico**

### **Diagrama de funcionamiento del sistema mecatrónico**

A continuación, se presenta la propuesta del diagrama de funcionamiento del sistema mecatrónico propuesto para esta tesis.

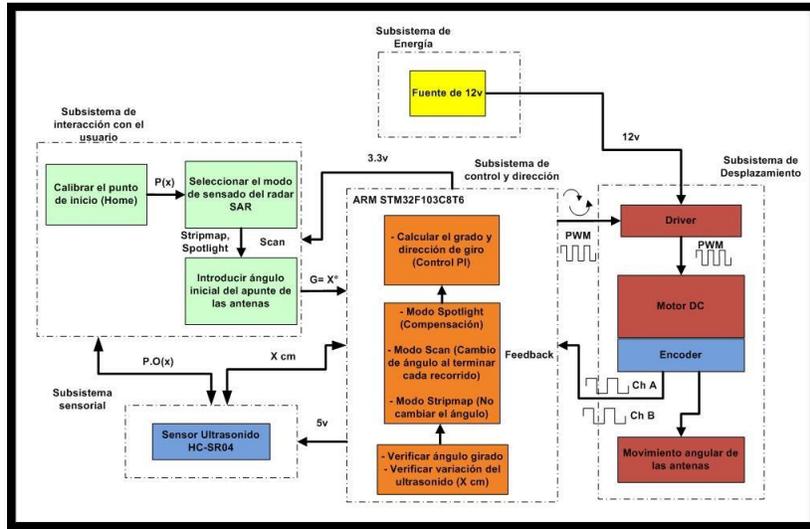


Fig. 3.1: Propuesta del sistema mecatrónico (Fuente: el autor)

En la Fig. 3.1 se muestra el total de los subsistemas que integra el sistema mecatrónico. El color amarillo señala al subsistema de energía, el color verde al subsistema con el usuario, el color naranja al subsistema de control y dirección, el color azul al subsistema sensorial y el color rojo señala al subsistema de desplazamiento.

**El subsistema de energía** es el encargado de brindar la energía a los componentes del sistema mecatrónico. Se conectará una fuente de 12V que alimentará al driver, y este al motor DC. Ya que el sensor ultrasonido será alimentado por el microcontrolador.

**El subsistema de interacción con el usuario** es el encargado de consultar al usuario acerca de las condiciones de inicio, el modo de sensado y el ángulo de apunte de las antenas. Es

importante recalcar que estas condiciones son programadas en el microcontrolador al inicio del recorrido.

**El subsistema de desplazamiento** es el encargado del movimiento del prototipo, éste recibirá la información del controlador central para poder realizar el apunte dirigido de las antenas. El motor DC recibirá los pulsos PWM del microcontrolador.

**El subsistema de sensores** es el encargado de limitar y corroborar que el apunte de las antenas sea correcto. Las señales emitidas por el sensor ultrasonido y el encoder serán almacenadas en el microcontrolador, el cual realizará la retroalimentación.

**El subsistema de control y dirección** se basa principalmente en recibir los datos emitidos por los sensores, procesar la información, realizar la retroalimentación y enviar señales de control al motor DC para controlar el ángulo de giro de las antenas.

### **3.11. Diseño del sistema mecánico del radar SAR**

#### **3.11.1. Diseño de la antena de bocina piramidal**

##### **3.11.1.1. Guía de Onda**

En este proyecto de tesis, se diseñará una antena de bocina piramidal y se utilizará una guía de onda estándar para la frecuencia requerida (5.3 GHz). Por lo tanto, se toma las dimensiones de la guía de onda rectangular  $LB - 159 - 20$  de la empresa *AINFOINC* (Fig.3.2), la cual trabaja en banda C (4.9 - 7.05 GHz) y que tiene las siguientes medidas:  $a=4.0386$  cm(largo) y  $b=2.0193$  cm(ancho).

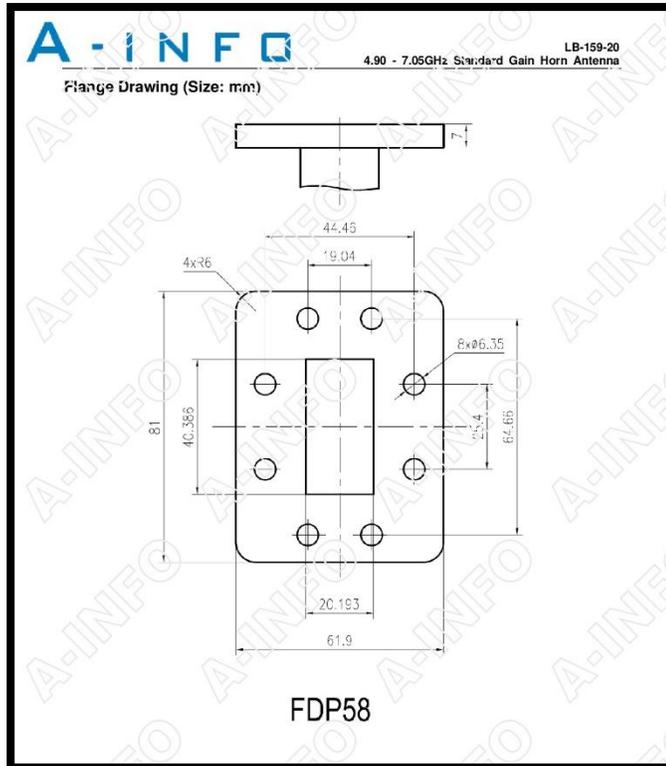


Fig. 3.2: Guía de onda que trabaja de 4.90 - 7.50 GHz (AINFO Inc., 2016)

### 3.11.1.2. Bocina piramidal

Utilizando las dimensiones de la guía de onda y cumpliendo con los requerimientos impuestos con anterioridad, se procede a utilizar las ecuaciones descritas en la sección 2.1.1 para calcular las dimensiones de cada sección de la bocina.

Teniendo los siguientes datos como parámetros iniciales:

- $a = 4.039$  cm (largo)
- $b = 2.019$  cm (ancho)
- $c = 3.8$  cm (altura)
- $G_0 = 20$  dB
- $c = 3 \times 10^8$  - Velocidad de la luz

- $f = 5.3 \text{ GHz}$

Se aplican las siguientes ecuaciones para encontrar los valores de  $g$ ,  $\lambda$  y  $\chi$ .

$$G_0 = 10\log(g)$$

$$20 = 10\log(g)$$

$$g = 100$$

$$\lambda = c/f$$

$$\lambda = 3 \times 10^8 / 5.3 \times 10^9$$

$$\lambda = 5.66 \text{ cm}$$

$$\chi = \frac{g}{2\pi\sqrt{2\pi}}$$

$$\chi = \frac{100}{2\pi\sqrt{2\pi}}$$

$$\chi = 6.349$$

Con la siguiente ecuación se prueba si el valor que se determinó para  $\lambda$  es el indicado, ya que los valores de  $P_e$  y  $P_h$ .

$$\sqrt{2\chi - \frac{b}{\lambda}}^2 (2\chi - 1) = \left( \frac{G_0}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\chi}} - \frac{a}{\lambda}} \right)^2 \left( \frac{G_0^2}{6\pi^3} \frac{1}{\chi} - 1 \right)$$

Al realizar el cálculo, se llega a la conclusión que los valores para  $P_e$  y  $P_h$  no son iguales, por lo tanto se necesita alterar el valor de  $\lambda$ , de tal manera que el valor correcto es  $\lambda = 6.6325$ .

Luego se aplican las siguientes ecuaciones para encontrar los valores de  $\rho_e$ ,  $\rho_h$ ,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $P_e$  y  $P_h$ .

$$\rho_e = \lambda \chi$$

$$\rho_e = 5.66 \times 6.6325$$

$$\rho_e = 37.54 \text{ cm}$$

$$\rho_h = \frac{g^2}{8\pi^3} \left( \frac{\lambda}{\chi} \right)$$

$$\rho_h = \frac{100^2}{8\pi^3} \left( \frac{5.66}{6.6325} \right)$$

$$\rho_h = 34.40 \text{ cm}$$

$$a_1 = \sqrt{3\lambda\rho_h}$$

$$a_1 = \sqrt{3 \times 5.66 \times 34.40}$$

$$a_1 = 24.17 \text{ cm}$$

$$b_1 = \sqrt{2\lambda\rho_e}$$

$$b_1 = \sqrt{2 \times 5.66 \times 37.54}$$

$$b_1 = 20.61 \text{ cm}$$

$$P_e = (b_1 - b) \left[ \left( \frac{\rho_e}{b_1} \right)^2 - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$P_e = (20.61 - 2.019) \left[ \left( \frac{37.54}{20.61} \right)^2 - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$P_e = 29.61 \text{ cm}$$

$$P_h = (a_1 - a) \left[ \left( \frac{\rho_h}{a_1} \right)^2 - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$P_h = (24.17 - 4.039)\left[\left(\frac{34.40}{24.17}\right)^2 - \frac{1}{4}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$P_h = 29.61 \text{ cm}$$

En la tabla 3.3 se muestra los parámetros obtenidos.

Tabla 3.3: Parámetros de diseño

Parámetros	$\rho_e$	$\rho_h$	$P_e$	$P_h$	$a_1$	$b_1$
Resultados	37.54 cm	34.40cm	29.61cm	29.61cm	24.17cm	20.61cm

A continuación, en la Fig. 3.3 se muestra la antena de bocina piramidal que trabajará a 5.3 GHz.

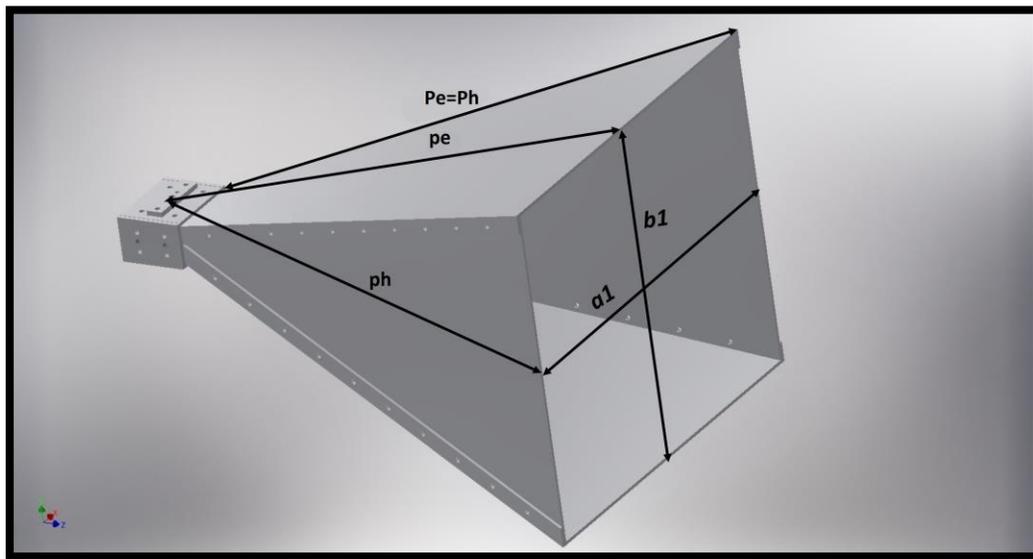


Fig. 3.3: Estructura mecánica de la antena de bocina (Fuente: el autor)

### **3.11.2. Diseño de la estructura mecánica del Radar SAR**

En esta subsección se realiza el diseño de la estructura mecánica del Radar SAR, el cual tendrá diversas funciones, tales como, soporte, cabeceo, movimiento horizontal y movimiento rotacional de las antenas. A continuación, se explicará detalladamente cada parte del sistema mecánico del radar.

#### **3.11.2.1. Mecanismo de soporte y cabeceo**

Se realiza primero el diseño del mecanismo que se encarga de la sujeción, soporte y cabeceo de las antenas, y se muestra en la Fig. 3.4 en su vista isométrica.

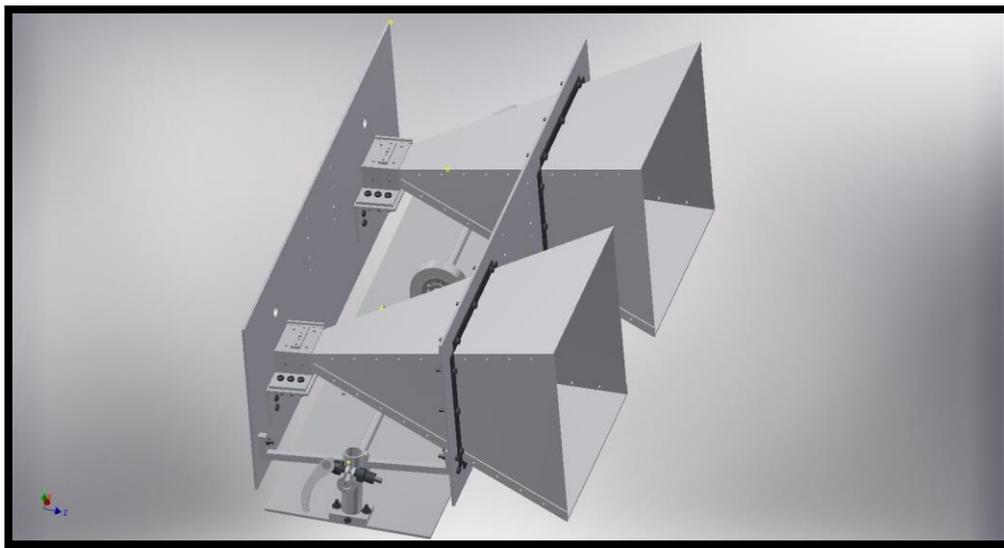


Fig. 3.4: Mecanismo de soporte y cabeceo de las antenas (Fuente: el autor)

Este mecanismo tiene como primera función sujetar las antenas de bocina, ya que, al iniciar su recorrido longitudinal, el radar presenta vibraciones por la inercia de inicio y parada del motor a

pasos. Se utiliza la sujeción por perno y con láminas de caucho, este último es importante, ya que reduciría el impacto de las vibraciones y realizaría una sujeción por fricción.

La segunda función del mecanismo es realizar un movimiento de cabeceo, de esta manera, el radar detecta un objetivo que se encuentre por debajo o encima de él. Se utiliza rodajes para permitir el movimiento angular de las antenas y una abrazadera tija de sillín de liberación rápida, para bloquear el movimiento angular después de haber escogido el ángulo adecuado de las antenas.

Se muestra el análisis de esfuerzos en la sección 4.1.2.

### **3.11.2.2. Mecanismo de compartimiento**

Se realiza el diseño del mecanismo que se encarga de contener los dispositivos para el apunte de las antenas. A continuación, en la Fig. 3.5 se muestra la vista isométrica del compartimiento.

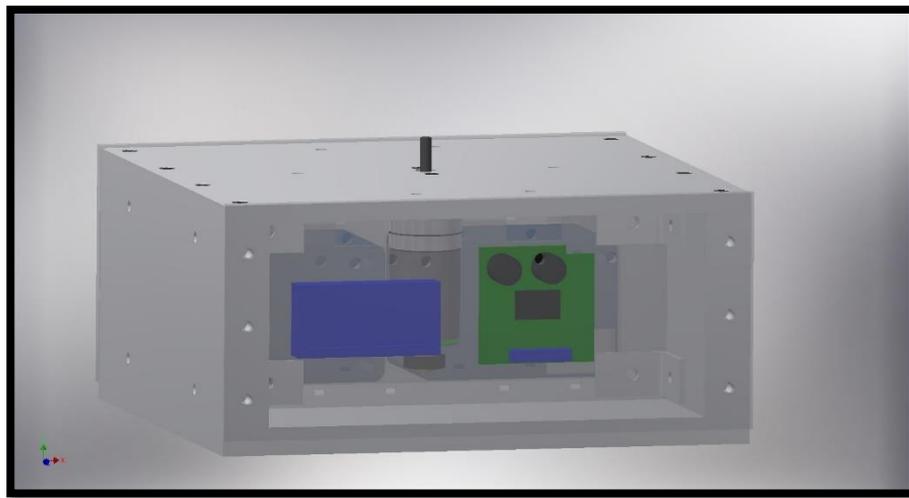


Fig. 3.5: Mecanismo de compartimiento (Fuente: el autor)

Este mecanismo tiene como función principal, proteger los componentes electrónicos del sistema de control, los cuales se encargan de controlar el apunte de las antenas. Se realiza el diseño modular, para que se pueda acoplar al mecanismo de movimiento lineal con el que cuenta el Radio Observatorio de Jicamarca.

Se muestra el análisis de esfuerzos en la sección 4.1.2.

### 3.11.2.3. Mecanismo de posición lineal

Como se mencionó anteriormente, esta sección compara los mecanismos de transmisión por 2correa dentada y por husillo de bolas. En la tabla 3.4 se muestra la comparación de los mecanismos mencionados anteriormente. (Castiglione, 2011)

Tabla 3.4: Tipos de transmisión mecánica (Castiglione, 2011)

Tipos de transmisión mecánica		
Parámetros	Husillo de bolas	Correa dentada
Resistencia a la suciedad	Alta	Alta
Precisión	Alta	Alta
Facilidad de instalación	Alta	Media
Fuerza de Carga	Alta	Media
Vida útil	Alta	Media
Mantenimiento	Media	Media
Atenuación del factor de ruido	Baja	Alta

Cabe destacar que la característica más importante para seleccionar el tipo de transmisión, recae en la velocidad mínima de operación que se desplazan los radares SAR.

Para este trabajo de tesis, se evaluará los mecanismos a una velocidad de 1 cm/s (ver tabla 3.5), debido a que es la velocidad de trabajo del radar SAR del Radio Observatorio de Jicamarca.

Tabla 3.5: Complicidad de los mecanismos de transmisión

Tipos de transmisión mecánica	Adecuación del sistema a 1 cm/s
Husillo de bolas	Alta
Correa dentada	Alta

Se considera que la transmisión por husillo de bolas es el más adecuado para el movimiento lineal en base a que cumple con la mayoría de los requisitos satisfactoriamente. A continuación, en la Fig.3.6 se muestra la transmisión por husillo de bolas, así como la estructura de posición en su vista isométrica.

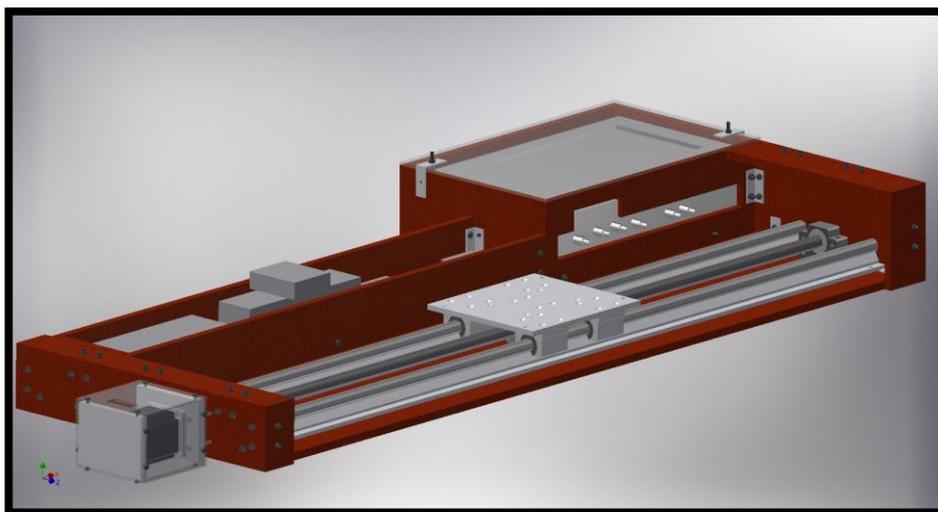


Fig. 3.6: Mecanismo de posición lineal (Fuente: el autor)

Se presenta el sistema completo en la Fig. 3.7.

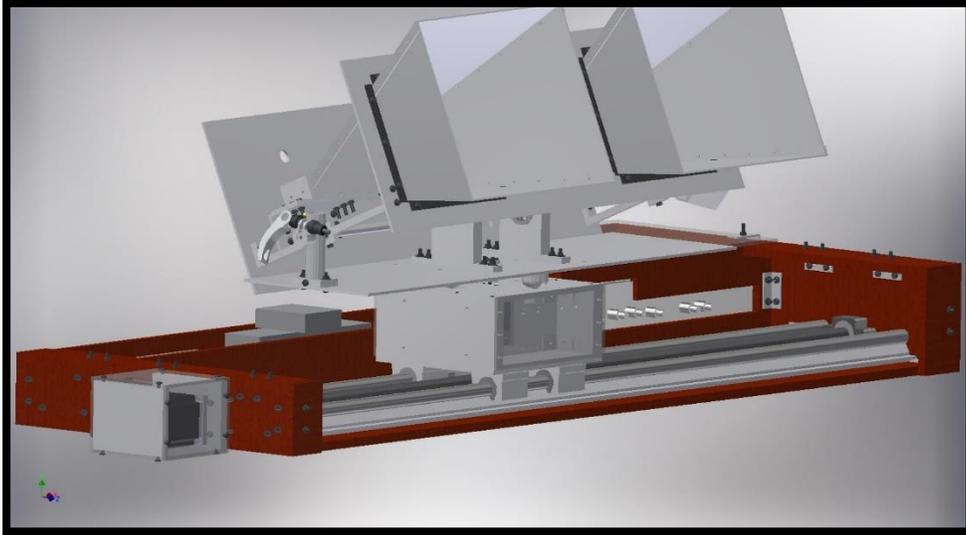


Fig. 3.7: Sistema completo (Fuente: el autor)

### 3.9.1. Planos del sistema mecánico del radar SAR

En esta subsección se presenta los planos de ensamble del sistema mecánico del radar SAR, y se detallan la cantidad de elementos con su respectivo material. En la Fig. 3.8 se muestra el plano de ensamble de la antena.

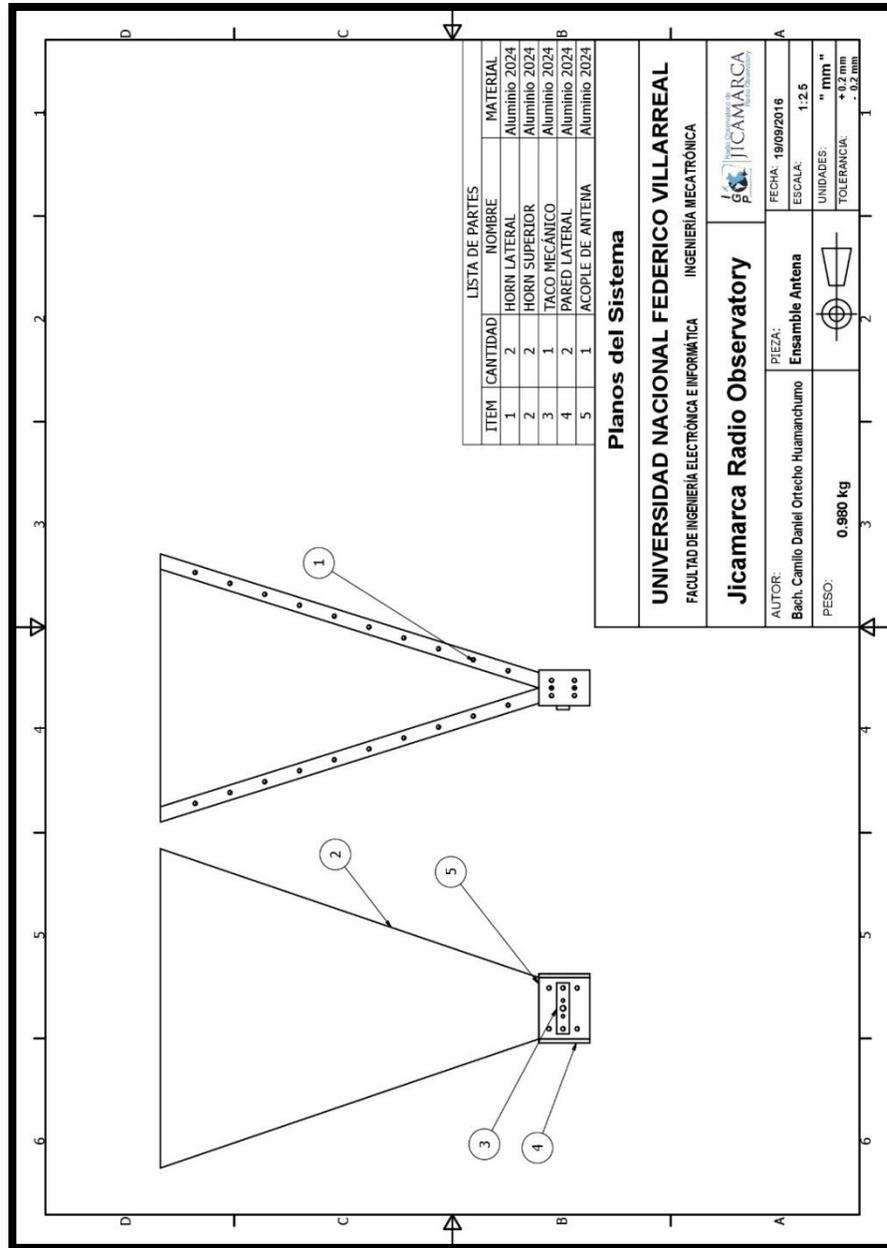


Fig. 3.8: Plano del ensamble de la antena (Fuente: el autor)

En la Fig. 3.9 se muestra el plano de ensamble del mecanismo de soporte y cabeceo de las antenas.

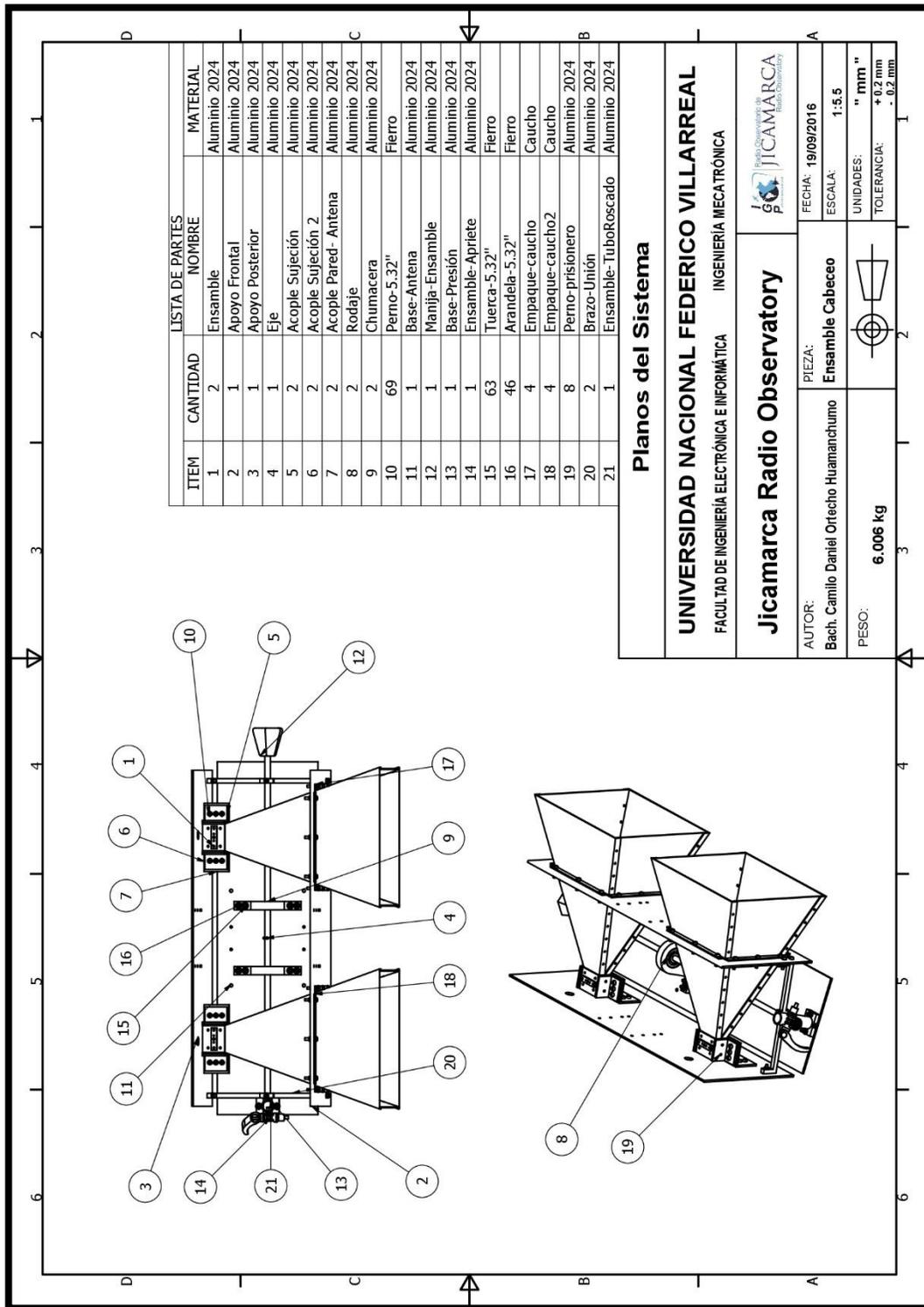


Fig. 3.9: Plano del mecanismo de soporte y cabeceo de las antenas (Fuente: el autor)

En la Fig. 3.10 se muestra el plano de ensamble del mecanismo de compartimiento.

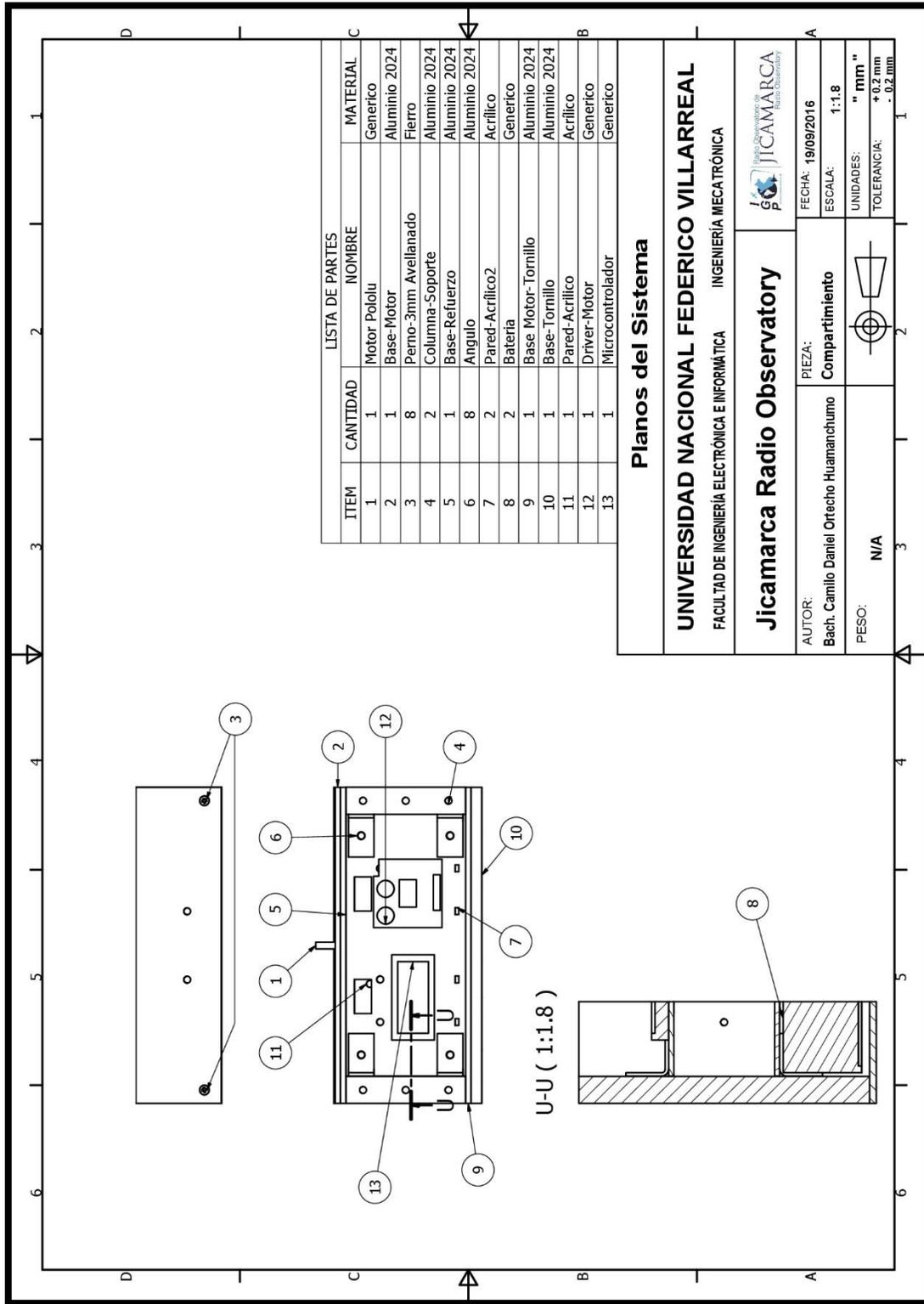


Fig. 3.10: Plano del mecanismo de compartimiento (Fuente: el autor)

En la Fig. 3.11 se muestra el plano de ensamble del mecanismo de transmisión lineal.

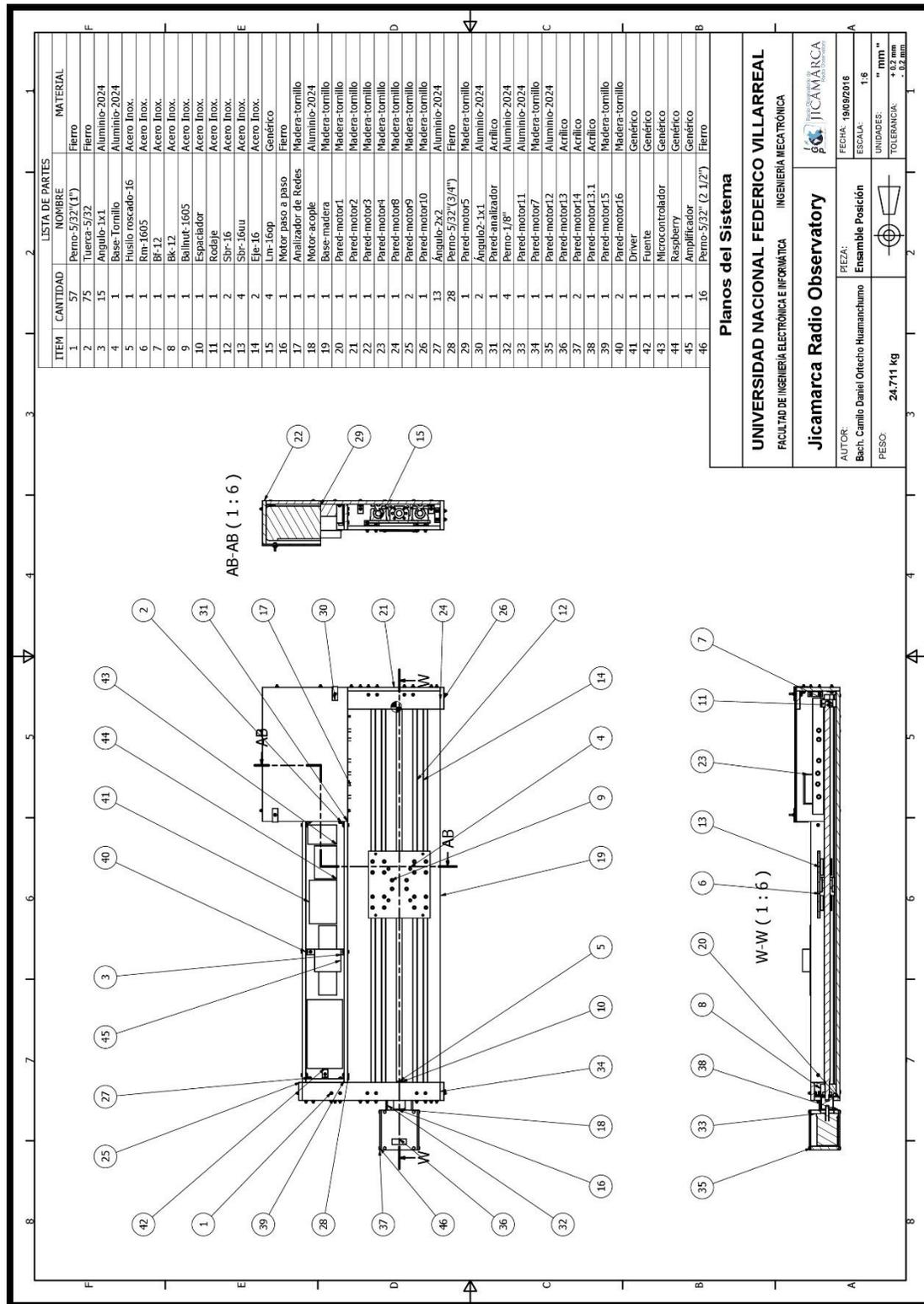


Fig. 3.11: Plano del mecanismo de posición lineal (Fuente: el autor)

### **3.12. Diseño del sistema de control del radar SAR**

#### **3.12.1. Identificación de la planta**

La función de transferencia se obtuvo de los parámetros del motor enviados por el proveedor.

El cual nos indica el valor de ganancia del sistema.

$$K = 0.502$$

Así como también, los valores de los tiempos en  $T_{28,3}$ : 28.3% y  $T_{63,2}$ : 63.2% de la respuesta estacionaria

- $T_{28,3} = 0.163$
- $T_{63,2} = 0.188$

$$t_{28} = T_m + \tau/3$$

$$t_{63} = T_m + \tau$$

$$\tau = 0.03$$

$$t_{63} = T_m + \tau$$

$$t_m = 0.15$$

Con estos parámetros se formula la función de transferencia (F.T) de velocidad de nuestra planta.

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{0.502e^{-0.15s}}{0.03s + 1}$$

Sin embargo; el objetivo es realizar el control de apunte de las antenas, lo cual se traduce en control de posición. Para ello y según por conocimientos de física, la posición es la derivada de la velocidad. Por lo tanto, se multiplica por un integrador a la F.T formulada.

$$\theta(s) = \frac{0.502e^{-0.15s}}{V(s)} = \frac{0.502e^{-0.15s}}{0.03s^2 + 1}$$

$$G(s) = \frac{16.73e^{-0.15s}}{s^2 + 33.3s}$$

Luego se realiza la discretización de la planta aplicando la definición de la transformada Z mediante un retenedor de orden cero, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$F(z) = (1 - z^{-1})x(Z(f(s)))$$

Para sistemas discretos, resulta necesario encontrar la frecuencia de muestreo adecuada. De esta manera, se aplica la teoría de Nyquist, que indica que la frecuencia de muestreo ( $f_m$ ) debe ser como mínimo el doble de la frecuencia de ancho de banda (-3dB). (Ogata, Discrete time control systems, 1996) En la Fig. 3.12 se muestra la gráfica de bode de la planta a lazo cerrado.

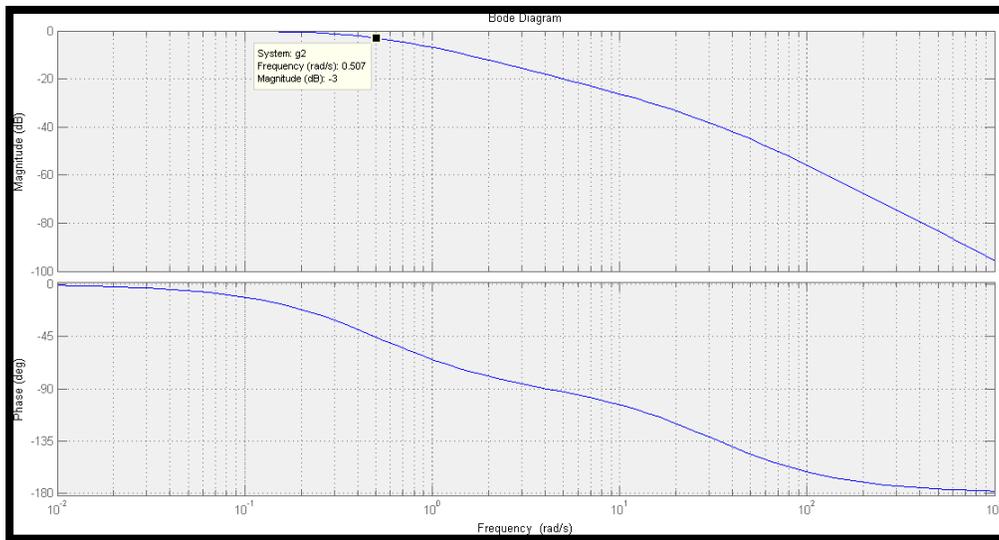


Fig. 3.12: Diagrama de Bode de la planta (Fuente: el autor)

Según la gráfica anterior, la frecuencia a -3dB sería 0.507 rad/s, que serían a su vez, 0.08 Hz. De esta manera, la frecuencia mínima de muestreo sería 0.16 Hz, y hallando la inversa de la frecuencia se obtiene el periodo máximo de muestreo (tm) que sería 12.5 segundos. Se escoge un periodo de muestreo de 5 ms para tener una reconstrucción fielmente de la señal analoga. A continuación, se muestra el proceso de discretización.

$$G(z) = (1 - z^{-1})x(Z(\frac{16.73}{s^2 + 33.3s}))$$

$$G(z) = (1 - z^{-1})x(Z(\frac{16.73}{s^2 + 33.3s} \times \frac{1}{s}))$$

$$G(z) = (1 - z^{-1})x(Z(\frac{A}{s} + \frac{B}{s + 33.3}))$$

$$G(z) = \frac{0.000198z + 0.0001873}{z^2 + 1.847z + 0.846}$$

### 3.12.2. Esquema de Control

En la Fig.3.13 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control empleado en esta tesis.

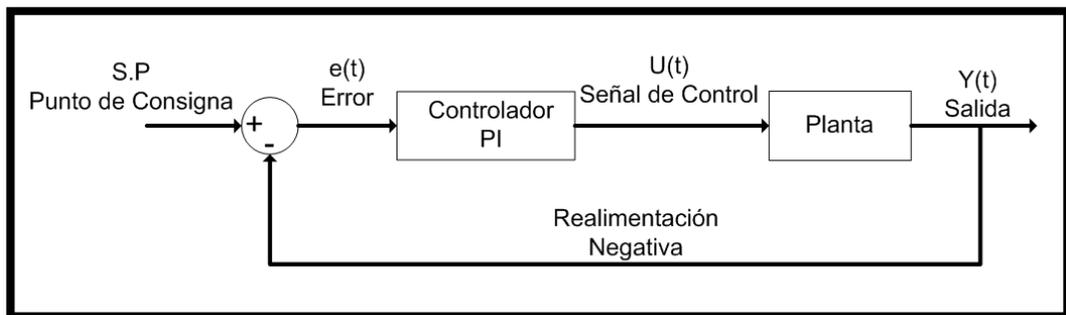


Fig. 3.13: Diagrama de Bloques (Fuente: el autor)

# Capítulo IV

## RESULTADOS

En esta sección se muestra los resultados del desarrollo de la investigación del capítulo anterior.

Para demostrar que los resultados son los esperados, se presentan a continuación:

- Análisis de la Antena (VSWR y ganancia) y análisis de esfuerzos (deformación máxima y factor de seguridad).
- Análisis de la respuesta del sistema de control (tiempo de establecimiento menor a los 5s, error en estado estacionario nulo y sobreimpulso menor al 5%).

A su vez, se presenta el análisis de los datos de la encuesta (Anexo 2) realizada a los ingenieros especializados del Radio Observatorio de Jicamarca (2016-2018). Finalmente se presenta el análisis de fiabilidad del instrumento empleado en esta tesis.

### **4.1. Análisis de los resultados**

#### **4.1.1. Caracterización de las antenas**

En esta subsección se presenta los resultados simulados y prácticos de los distintos parámetros de la antena de bocina.

##### **4.1.1.1. VSWR**

Es una función del coeficiente de reflexión, que describe la potencia reflejada de la antena, en las mediciones si el VSWR se asemeja a 1, significa que irradia toda la potencia.

En las siguientes imágenes, se puede observar el parámetro VSWR que se obtuvo con el software Feko (simulado) (Fig.4.1).

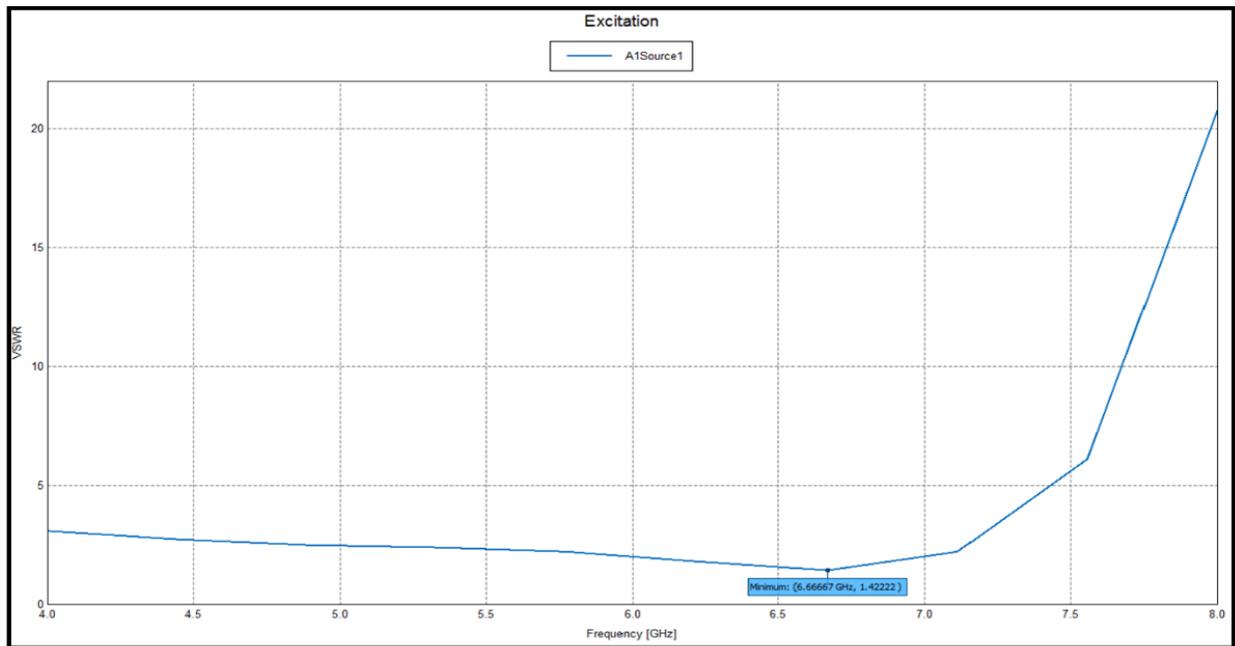


Fig. 4.1: Parámetro VSWR simulado con Feko (Fuente: el autor)

Se puede visualizar que el mínimo de VSWR es menor que 2, cumpliendo nuestro requerimiento y estableciendo el diseño de la antena como aceptable.

#### 4.1.1.2. Ganancia

Se define como la relación de la intensidad en una dirección dada, a la intensidad de radiación que se obtendría si la potencia aceptada por la antena fuera irradiada isotrópicamente.

En la siguiente imagen, se puede observar la ganancia que se obtuvo con el software Feko (simulado) (Fig. 4.2)

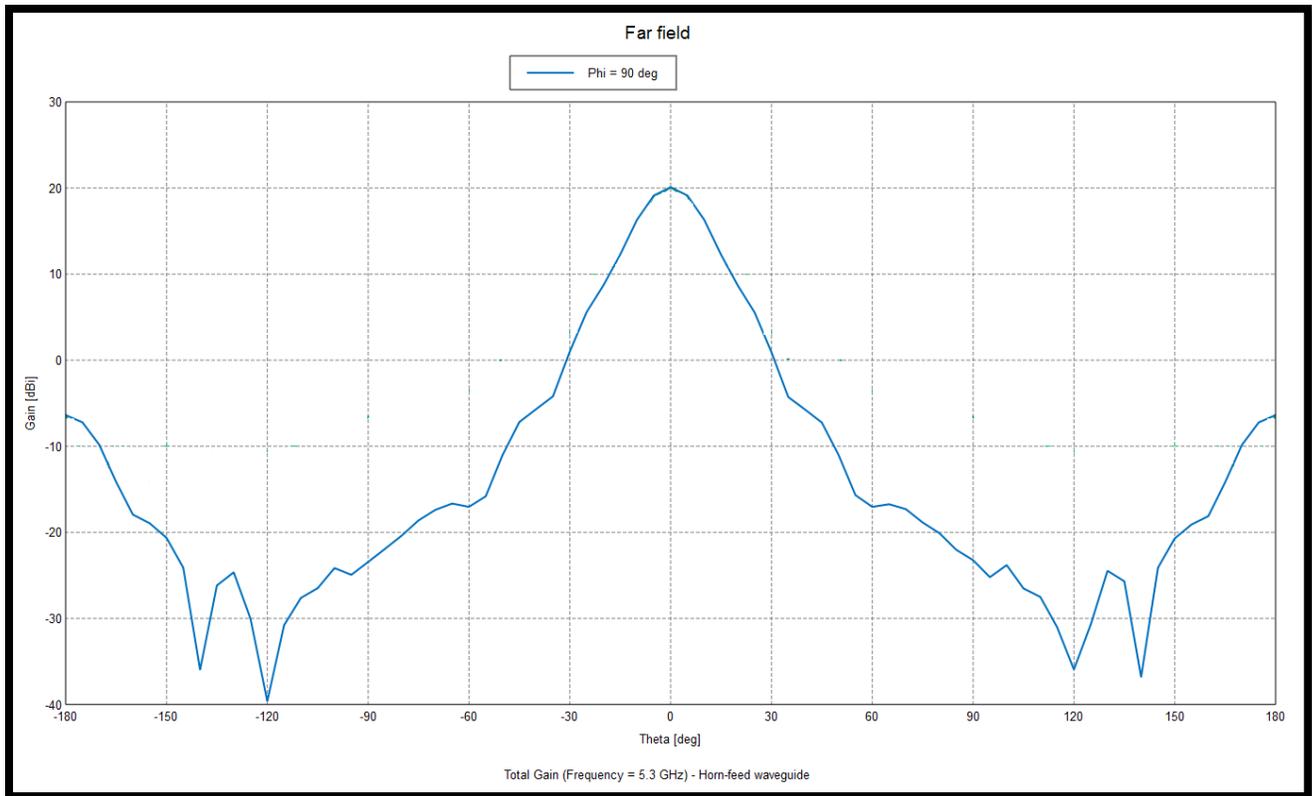


Fig. 4.2: Ganancia del dipolo sin chasis (Fuente: el autor)

Se puede visualizar que la mayor cantidad de ganancia es 20 dBi, cumpliendo de esta manera el requerimiento planteado y estableciendo el diseño de la antena como aceptable. A continuación, se presenta las antenas implementadas (Fig. 4.3)



Fig. 4.3: Antenas implementadas en el ROJ (Fuente: el autor)

#### **4.1.2. Análisis de simulación de esfuerzos y deformaciones**

En esta subsección se presenta el análisis de esfuerzos y deformaciones de piezas críticas, para obtener su comportamiento de resistencia de materiales frente a fuerzas externas, se utiliza el método de elementos finitos.

Resulta necesario hallar la carga última o esfuerzo admisible ( $\sigma_{ult}$ ) que puede soportar una pieza, la cual se encuentra estrechamente relacionada con el factor de seguridad ( $N_{ult}$ ) y el esfuerzo de carga actual ( $\sigma_w$ ). Para esto se utiliza la ecuación 4.2 que se presenta a continuación

$$N_{ult} = \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_w} \quad (4.21)$$

##### ▪ *Análisis de la estructura - Base Antena*

Esta estructura se encarga de soportar las antenas y su mecanismo de cabeceo (chumaceras, eje y planchas de sujeción). Las fuerzas que se le aplica es de 57 N, que resulta del peso de las antenas y el mecanismo de cabeceo, y un momento de 2.1 N.m, que resulta del torque de parada del motor DC.

- Esfuerzo de Von Mises

En la Fig. 4.4, se puede observar que el máximo esfuerzo de Von Mises es de 27.26 MPa aproximadamente.

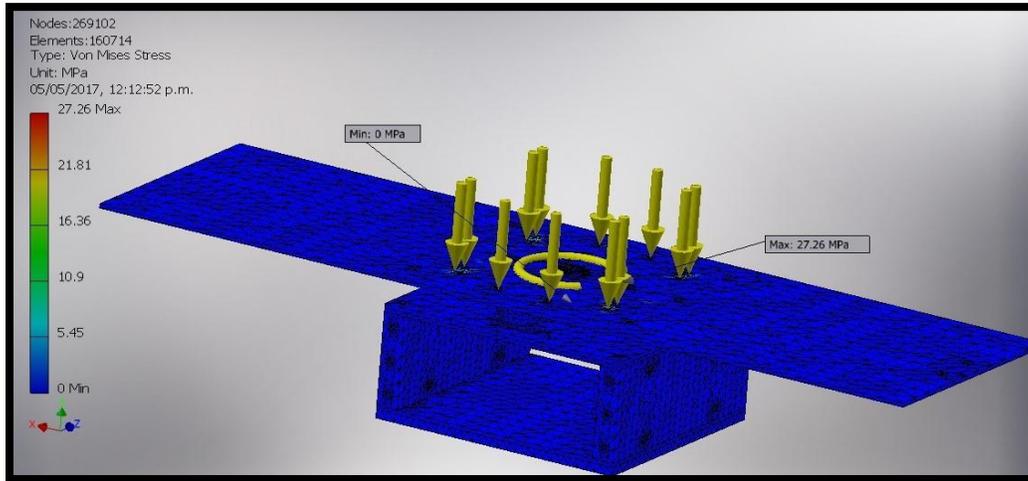


Fig. 4.4: Análisis de Esfuerzos Von Mises - Base Antena (Fuente: el autor)

- Deformación

En la Fig. 4.5, se observa que la máxima deformación se da en los extremos de la plancha de aluminio y es de 0.05414 mm.

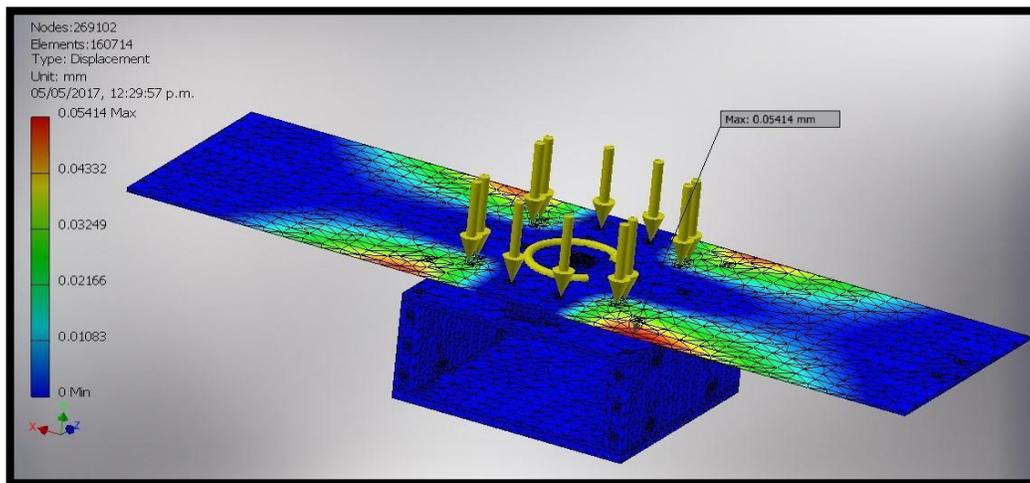


Fig. 4.5: Análisis de Esfuerzos Deformación - Base Antena (Fuente: el autor)

- Factor de seguridad

Por último, en la Fig. 4.6 , se observa que el factor de seguridad de diseño es de 10.09. Con este valor, se aplica la ecuación 4.2 para encontrar la fuerza admisible, el cual es de 575.13 N.

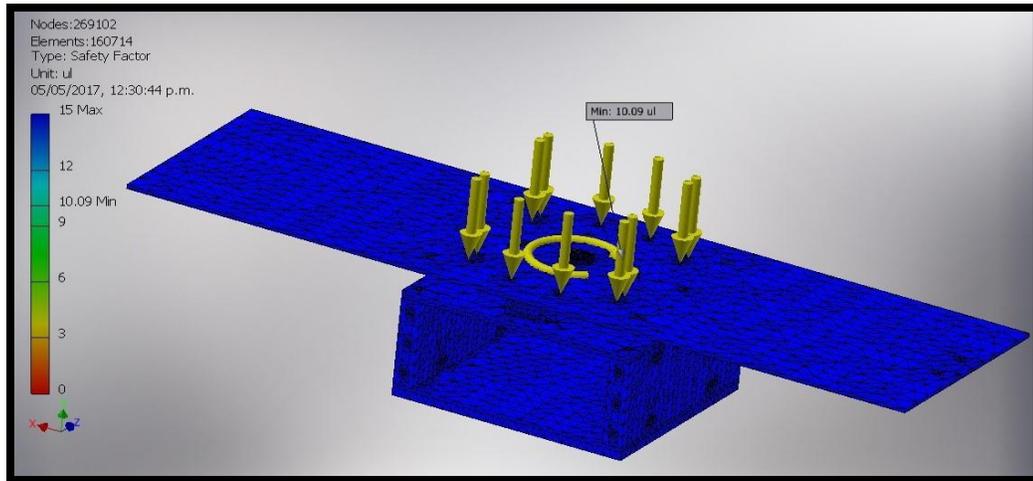


Fig. 4.6: Análisis de Esfuerzos Factor de seguridad - Base Antena (Fuente: el autor)

En resumen, se asegura la vida útil de la pieza “Base Antena”, debido a que el factor de seguridad es mayor a 2 (específicamente 13.14), por lo tanto, la pieza no llega a sobrepasar su límite de resistencia.

#### ▪ Análisis de la estructura - Base Motor

Esta estructura se encarga de sujetar y proteger el motor DC. La fuerza que se le aplica es de 60 N, que resulta del peso del mecanismo de soporte y cabeceo.

La importancia del análisis de esta pieza es evitar que la plancha denominada “Base Motor” no se pandeé al sujetar al motor DC.

- Esfuerzo de Von Mises

En la Fig. 4.7, se puede observar que el máximo esfuerzo de Von Mises es de 20.51 MPa aproximadamente.

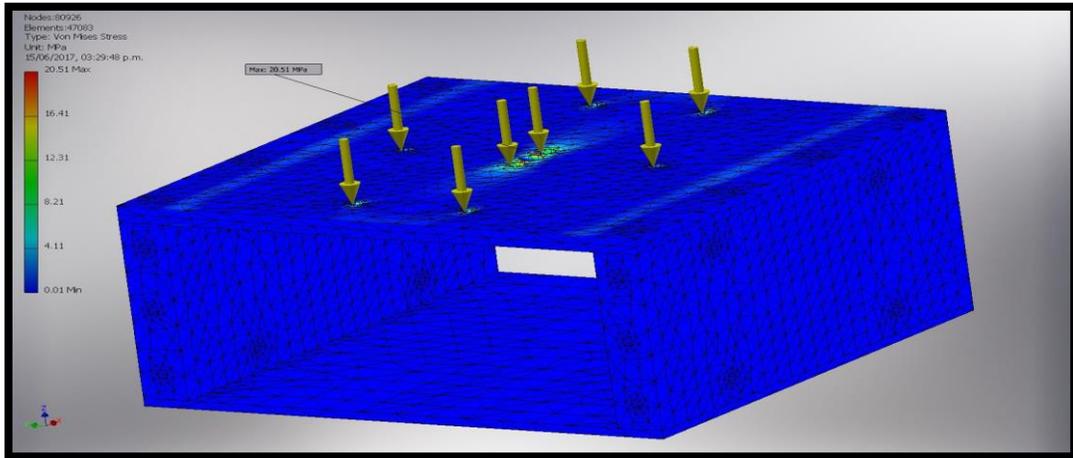


Fig. 4.7: Análisis de Esfuerzos Von Mises - Base Motor (Fuente: el autor)

- Deformación

En la Fig. 4.8, se observa que la máxima deformación se da en los extremos de la plancha de aluminio y es de 0.03747 mm.

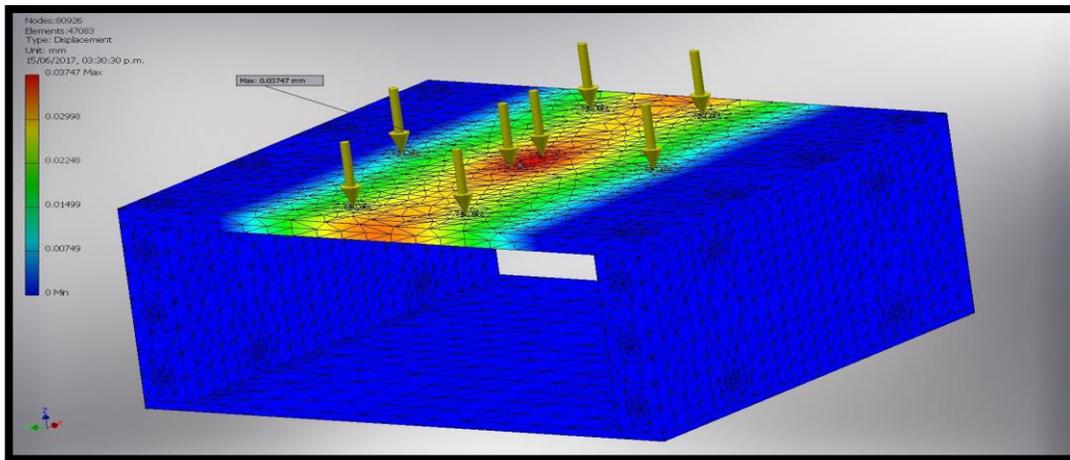
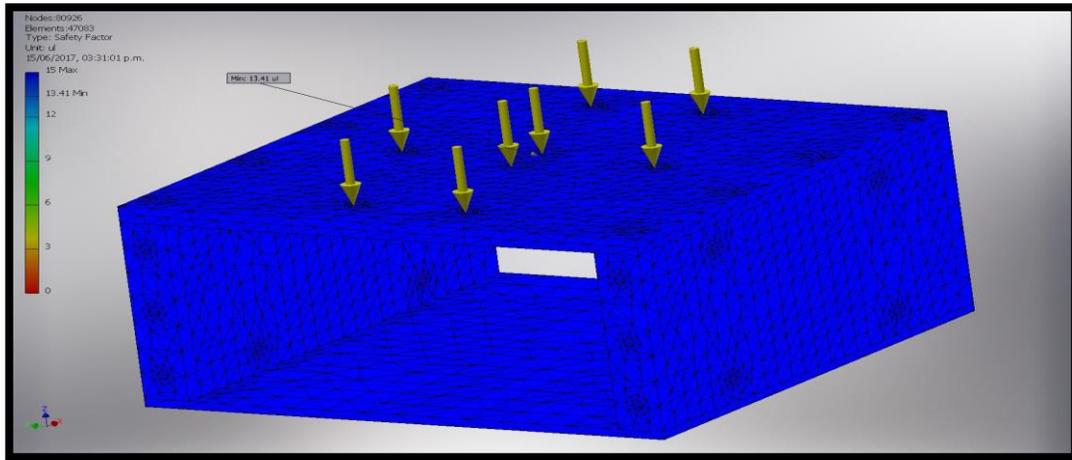


Fig. 4.8: Análisis de Esfuerzos Deformación - Base Motor (Fuente: el autor)

- Factor de seguridad

Por último, en la Fig. 4.9, se observa que el factor de seguridad de diseño es de 13.41. Con este valor, se aplica la ecuación 4.2 para encontrar la fuerza admisible, el cual resulta de 804.6



N.

Fig. 4.9: Análisis de Esfuerzos Factor de seguridad - Base Motor (Fuente: el autor)

En resumen, se asegura la vida útil de la pieza “Base Motor”, debido a que el factor de seguridad es mayor a 2 (específicamente 13.41), por lo tanto, la pieza no llega a sobrepasar su límite de resistencia.

#### ▪ Análisis de la pieza - Columna Soporte

Esta pieza se encarga de sostener el mecanismo de sujeción y cabeceo y al motor DC. La fuerza que se le aplica es de 66 N que resulta del mecanismo mencionado con anterioridad. La importancia del análisis de esta pieza, radica en asegurar que el bloque metálico denominado “Columna Soporte” resista el peso del mecanismo mencionado anteriormente, de esta manera no colapsará el sistema mecánico del radar.

- Esfuerzo de Von Mises

En la Fig.4.10, se puede observar que el máximo esfuerzo de Von Mises es de 58.99 MPa aproximadamente.

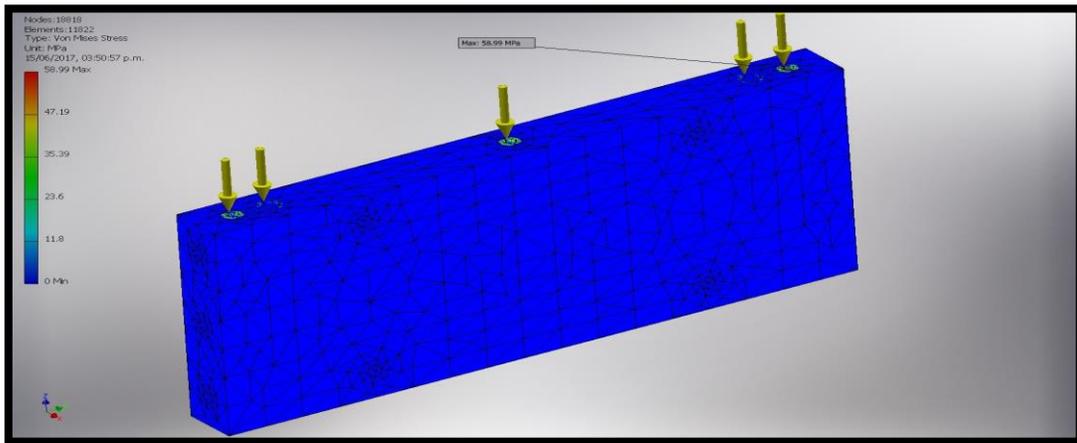


Fig. 4.10: Análisis de Esfuerzos Von Mises - Columna Soporte (Fuente: el autor)

- Deformación

En la Fig.4.11 se observa que la máxima deformación se da en los extremos de la plancha de aluminio y es de 0.000637 mm.

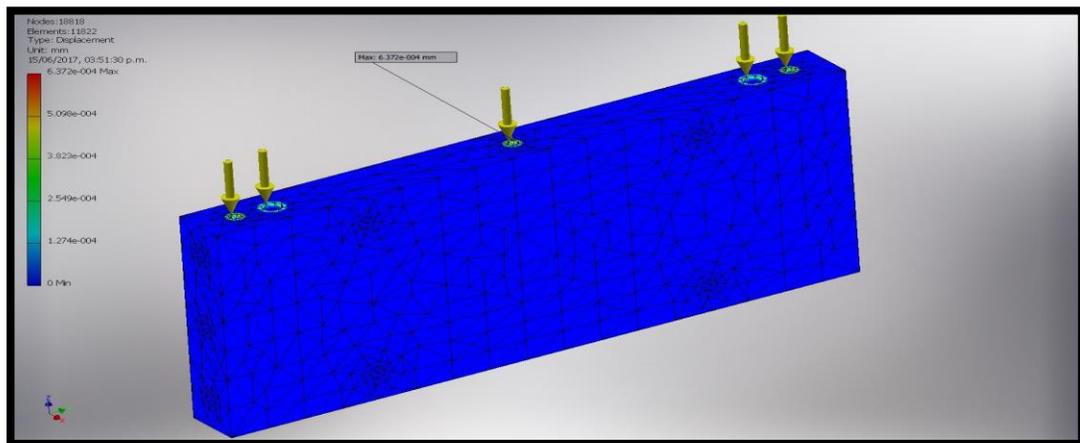


Fig. 4.11: Análisis de Esfuerzos Deformación - Columna Soporte (Fuente: el autor)

- Factor de seguridad

Por último, en la Fig.4.12, se observa que el factor de seguridad de diseño es de 4.66. Con este valor, se aplica la ecuación 4.2 para encontrar la fuerza admisible, el cual resulta de 307.56 N.

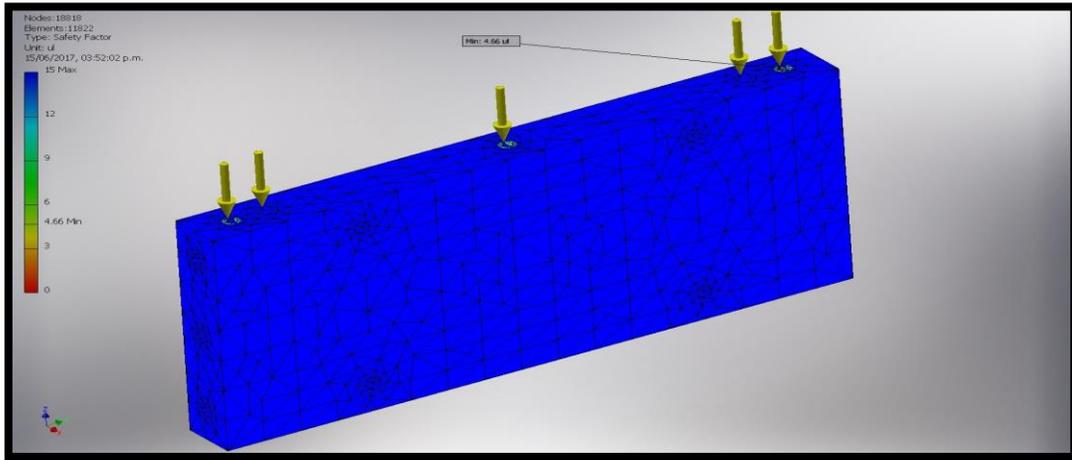


Fig. 4.12: Análisis de Esfuerzos Factor de seguridad - Columna Soporte (Fuente: el autor)

En resumen, se asegura la vida útil de la pieza “Base Motor”, debido a que el factor de seguridad es mayor a 2 (específicamente 4.66), por lo tanto, la pieza no llega a sobrepasar su límite de resistencia.

#### ▪ Análisis de la pieza - Base Tornillo

Esta pieza se encarga de sujetar y proteger el motor DC y que soporte una fuerza de 91 N, resultante de los mecanismos de soporte y cabeceo y compartimiento.

Se realiza el análisis de esta pieza para asegurar que la plancha denominada “Base Tornillo” no sufra deformaciones, de esta manera se evita alguna acción de balanceo del radar.

- Esfuerzo de Von Mises

En la Fig. 4.13, se puede observar que el máximo esfuerzo de Von Mises es de 18.37 MPa aproximadamente.

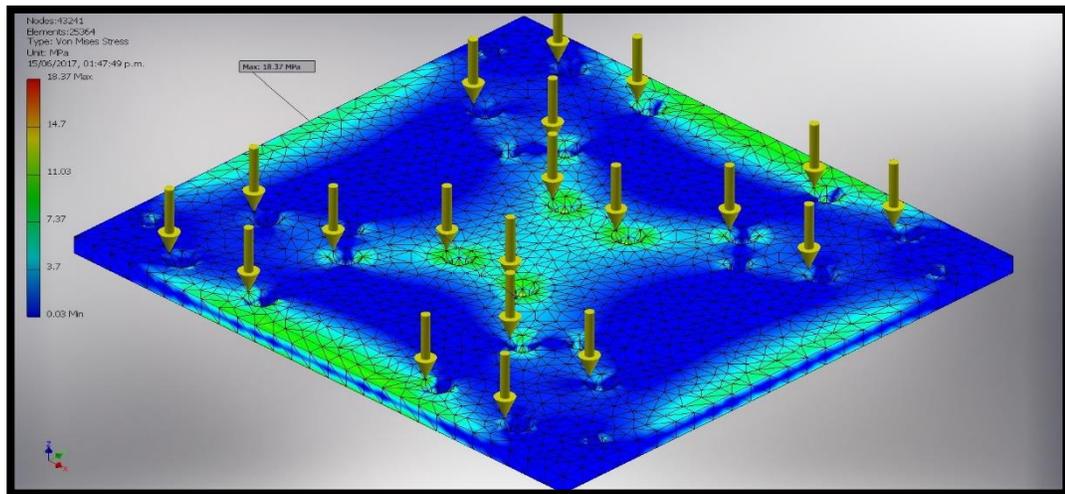


Fig. 4.13: Análisis de Esfuerzos Von Mises - Base Tornillo (Fuente: el autor)

- Deformación

En la Fig. 4.14, se observa que la máxima deformación se da en los extremos de la plancha de aluminio y es de 0.051 mm.

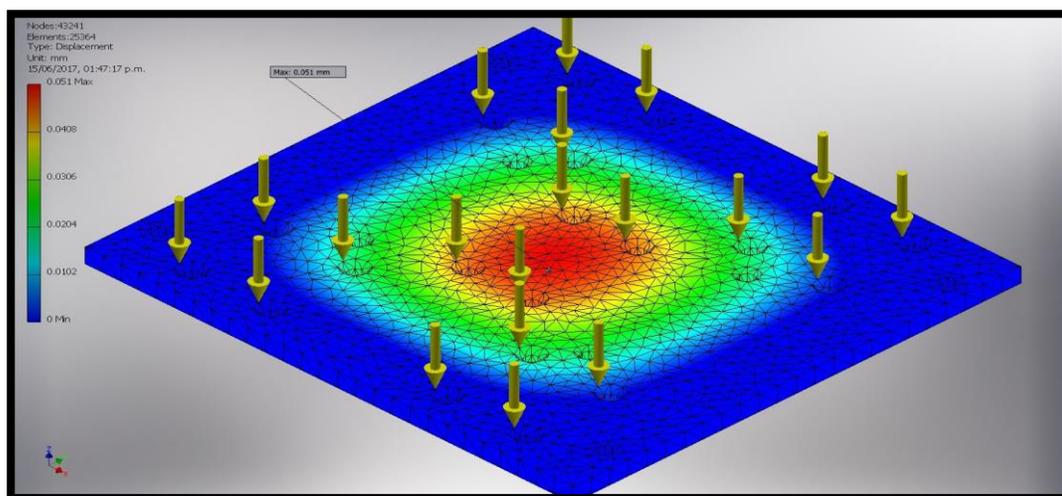


Fig. 4.14: Análisis de Esfuerzos Deformación - Base Tornillo (Fuente: el autor)

- Factor de seguridad

Por último, en la Fig. 4.15, se observa que el factor de seguridad de diseño es de 14.97. Con este valor, se aplica la ecuación 4.2 para encontrar la fuerza admisible, el cual es de 1362.27 N.

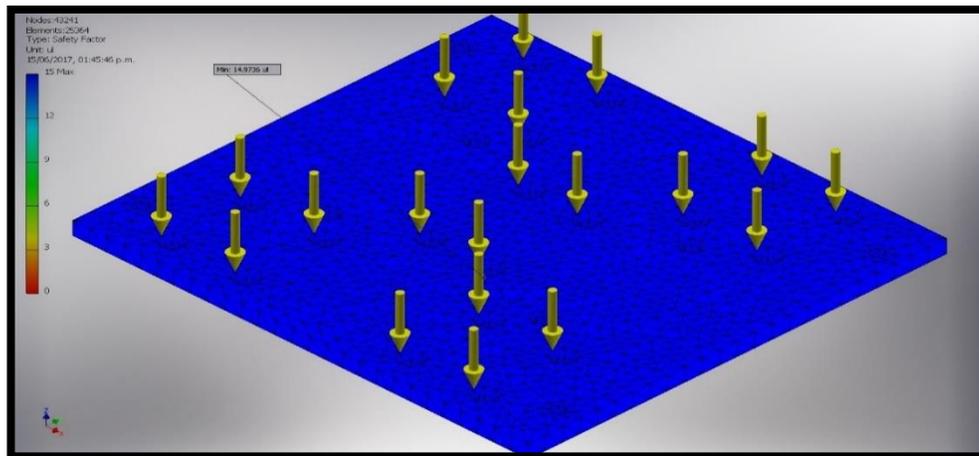


Fig. 4.15: Análisis de Esfuerzos Factor de seguridad - Base Tornillo (Fuente: el autor)

En resumen, se asegura la vida útil de la pieza “Base Tornillo”, debido a que el factor de seguridad es mayor a 2 (específicamente 14.97), por lo tanto, la pieza no llega a sobrepasar su límite de resistencia.



Fig. 4.16: Mecanismo de soporte y cabeceo con las antenas implementadas(Fuente: el autor)

### 4.1.3. Análisis de las curvas de control

Para encontrar el control adecuado para el sistema se simula el control PID y PI a lazo cerrado.

A continuación, en la Fig. 4.17 se muestra el tipo de control PID.

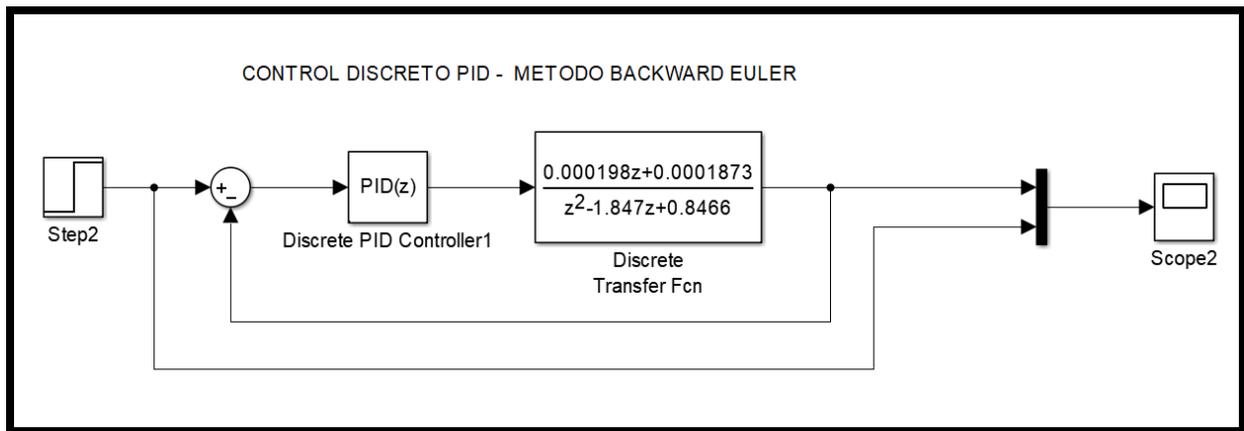


Fig. 4.17: Control Discreto PID (Fuente: el autor)

Así como también, en la Fig. 4.17 se muestra el tipo de control PI.

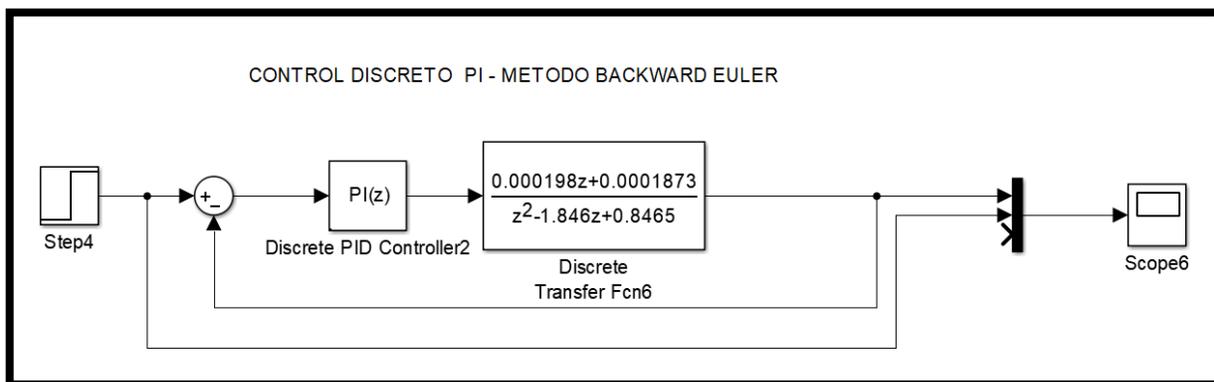


Fig. 4.17: Control Discreto PI (Fuente: el autor)

De los cuales se obtienen sus curvas de respuesta para un control PI y PID en la Fig. 4.18.

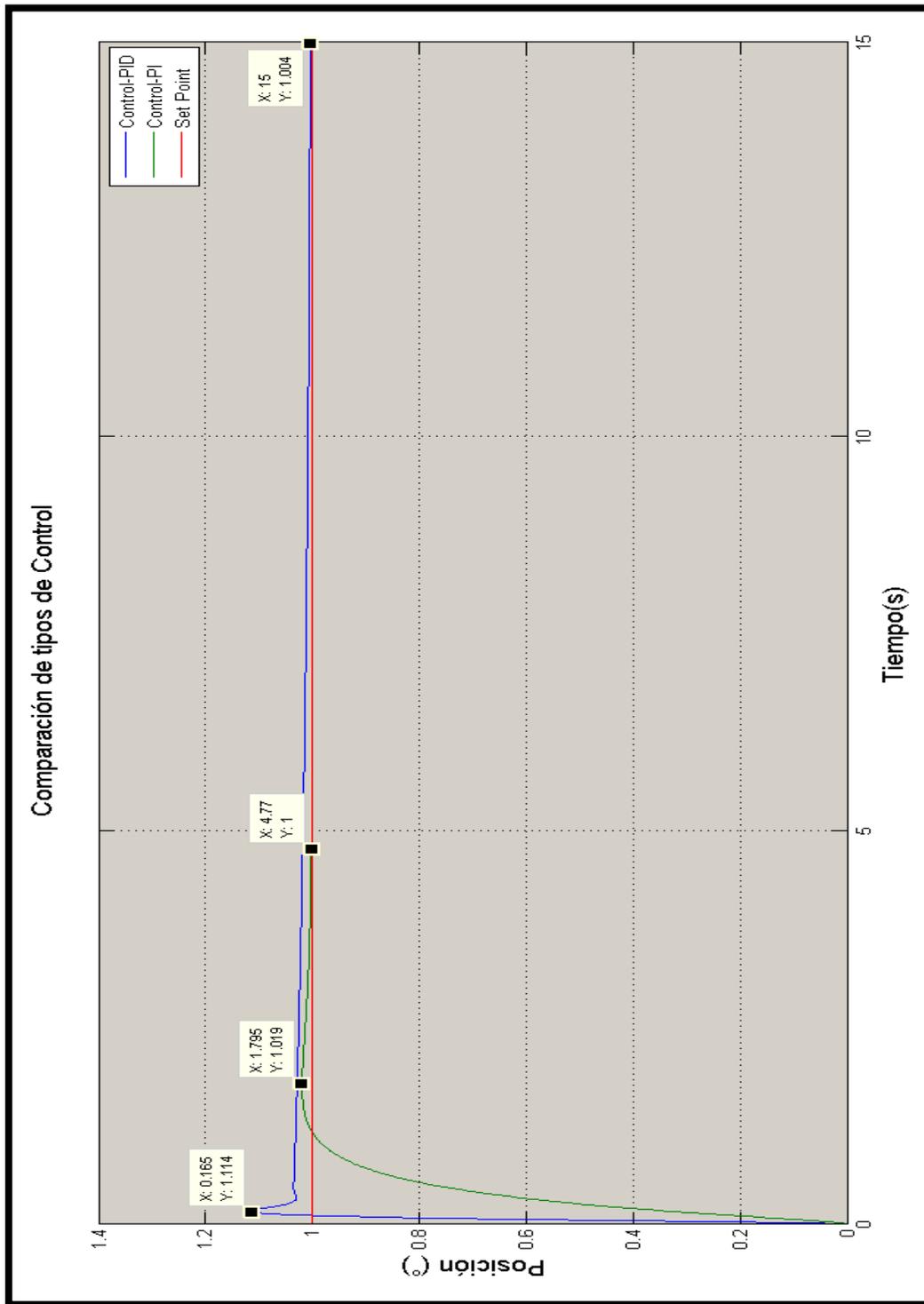


Fig. 4.18: Control Discreto PI (Curva Amarilla) - Control Discreto PID (Curva Celeste)

(Fuente: el autor)

Según la gráfica anterior se puede notar el control PI discreto tiene mejor resultado que el PID.

- $K_p = 12.735$

- $K_i = 8.946$

Se aplica estos parámetros a la F.T de un controlador PI paralelo discreto discretizado por el método Backward-Euler.

$$G_p(z) = K_p + K_i \times t_s \times \frac{z}{z-1}$$

$$G_p(z) = 12.735 + 8.946 \times 0.005 \times \frac{z}{z-1}$$

$$G_p(z) = \frac{12.79z - 12.735}{z-1}$$

Recordando lo siguiente:

$$C(z) = G_p(z) \times E(z)$$

Donde:

- $C(z)$ : Señal de control
- $E(z)$ : Error

Se procede a colocar la ecuación de control en potencias negativas de Z y luego se le aplica la transformada inversa de Z en valores de K para convertirlo a ecuaciones en diferencias.

$$\frac{C(z)}{E(z)} = \frac{12.79z - 12.735}{z-1}$$

$$C(z) \times (z-1) = E(z) \times (12.79z - 12.735)$$

$$C(z) \times (1 - z^{-1}) = E(z) \times (12.79 - 12.735z^{-1})$$

$$C(z) - C(z)(z^{-1}) = 12.79E(z) - 12.735E(z)z^{-1}$$

$$C(k) = C(k-1) + 12.79 \times E(k) - 12.735E(k-1)$$

A continuación, se presenta la forma de implementar (para futuros trabajos) la ecuación de diferencias en el microcontrolador.

*ei=sp-posicion; // Diferencia entre el SP y la posición actual.*

*e[2]=e[1]; //(e[1]: estado anterior)*

*e[1]=e[0]; //(e[1]: estado anterior)*

*e[0]=ei; //(e[0]: estado actual)*

*c[1]=c[0]; // (c[0]: estado actual, c[1]: estado anterior)*

*c[0]=c[1]+12.779\*e[0]-12.735\*e[1]; // Ecuación en diferencias.*

*if(c[0]>100){c[0]=100;} // Se limita la señal de control.*

*if(c[0]<-100){c[0]=-100;} //Se limita la señal de control.*

*U=c[0]\*655.35; // Se realiza el escalamiento, ya que la resolución del microcontrolador para una señal PWM es de 16 bits.*

*digitalWrite(dir,HIGH); //Se define el sentido del motor (Horario).*

*pwmWrite(motpwm,abs(U)); // Se envía el pulso PWM.*

*delay(50); // Se coloca el periodo de muestreo, para este ejemplo se utiliza la*

## 4.2. Resultados del análisis de los datos

### Del software Feko:

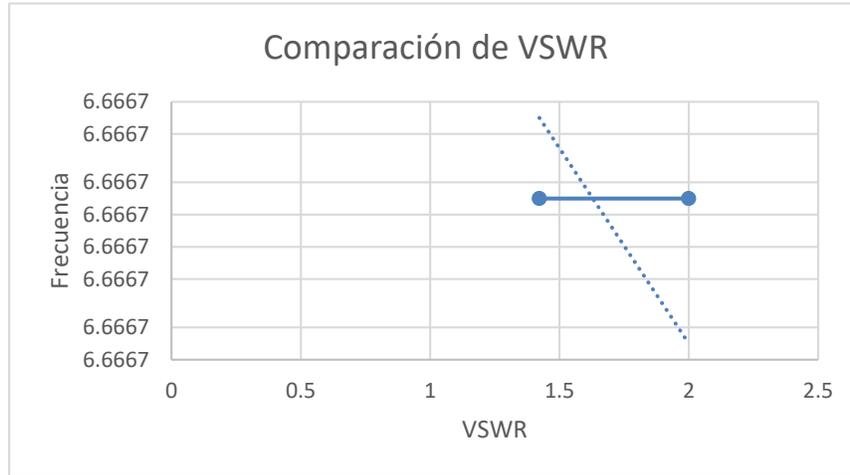


Fig. 4.19: Comparación de VSWR ideal y obtenido (Fuente: el autor)

Según el gráfico, entre el VSWR ideal ( $<2$ ) y el obtenido (1.422), se puede notar que se encuentra en el rango requerido en este trabajo de investigación.

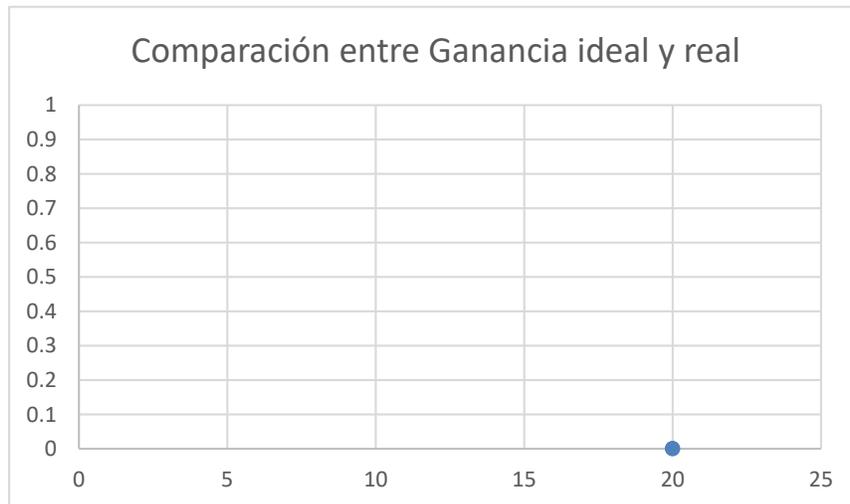


Fig. 4.20: Comparación de ganancia ideal y obtenido (Fuente: el autor)

Según el gráfico, entre la ganancia ideal (20dBi) y el obtenido (20dBi), se puede deducir que se llegó a lo requerido en este trabajo de investigación.

**Del software Inventor:**

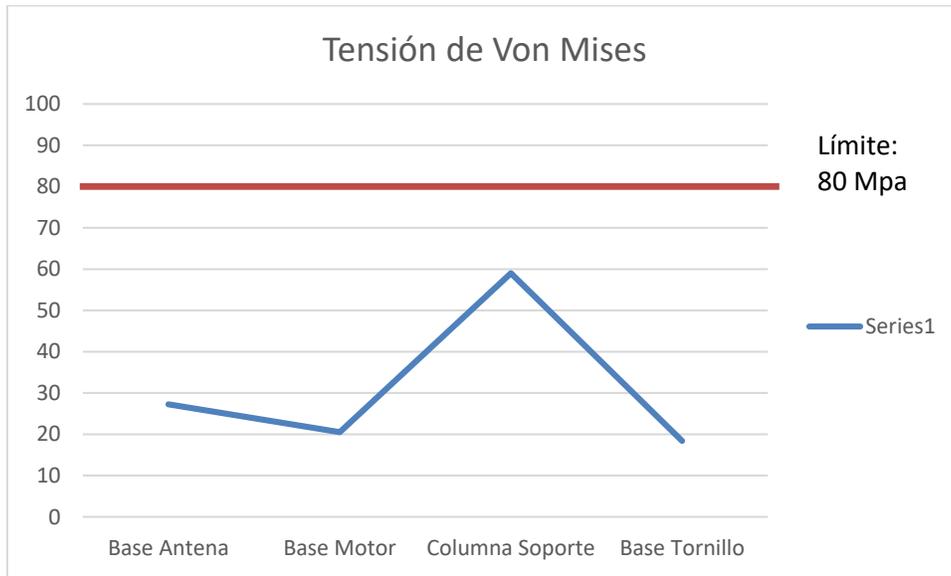


Fig. 4.21: Comparación de la Tensión de Von Mises para todas las piezas diseñadas (Fuente: el autor)

En cuanto a la Tensión de Von Mises de cada pieza simulada, se puede deducir que ninguno sobrepasa el límite de fluencia del material (Aluminio 6061: 80 -100 Mpa). Por lo tanto, no existirá deformación permanente.

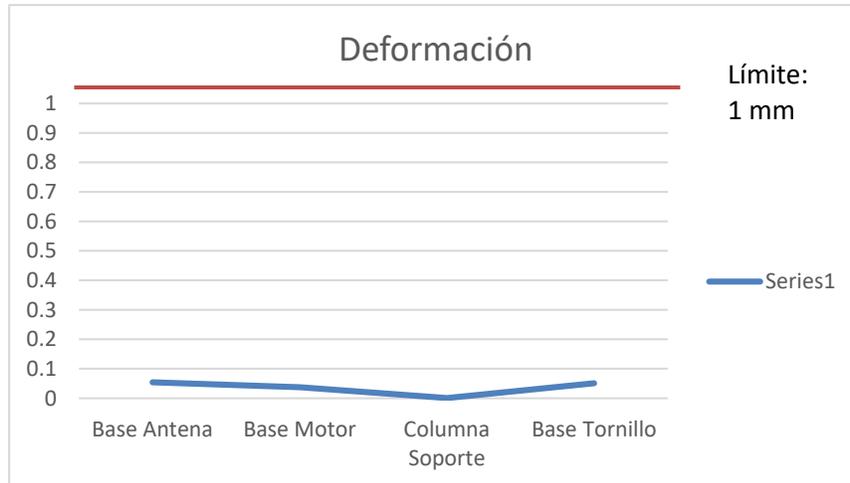


Fig. 4.22: Comparación del factor Deformación para todas las piezas diseñadas (Fuente: el autor)

En cuanto a la Deformación de cada pieza simulada, se puede deducir que ninguno cuenta con una deformación relevante y a su vez, no sobrepasan el requerimiento impuesto por el proyecto ( $< 1\text{mm}$ ).

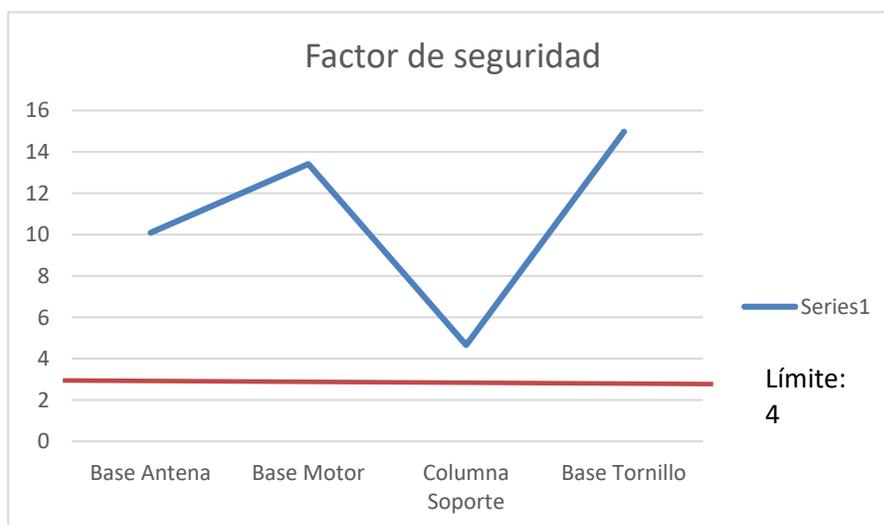


Fig. 4.23: Comparación del Factor de seguridad para todas las piezas diseñadas (Fuente: el autor)

En cuanto al Factor de seguridad de cada pieza simulada, se puede deducir que todas cumplen con un factor de seguridad según el requerimiento del proyecto ( $>4$ ).

### Del software Matlab:

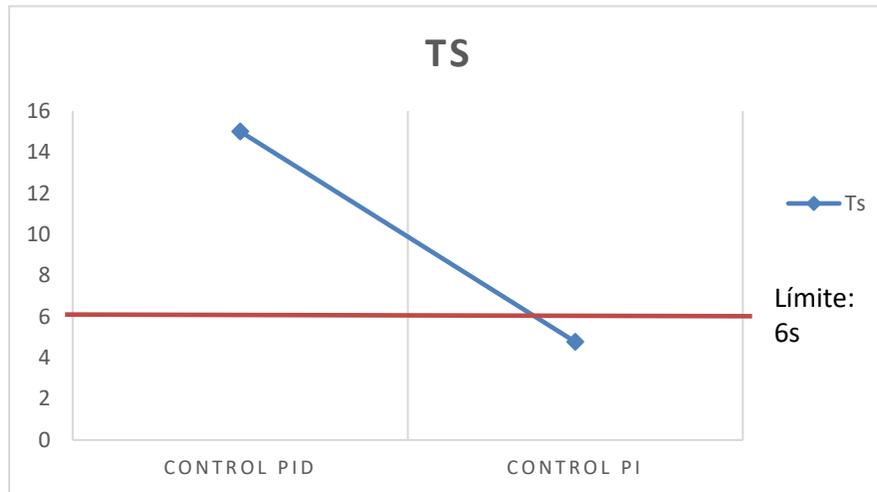


Fig. 4.24: Comparación del TS de los sistemas de control (Fuente: el autor)

Según la gráfica del Tiempo de establecimiento (TS), se puede comprobar que el control PI cumple con el requerimiento ( $<6s$ ). Por lo tanto, es el sistema de control elegido.

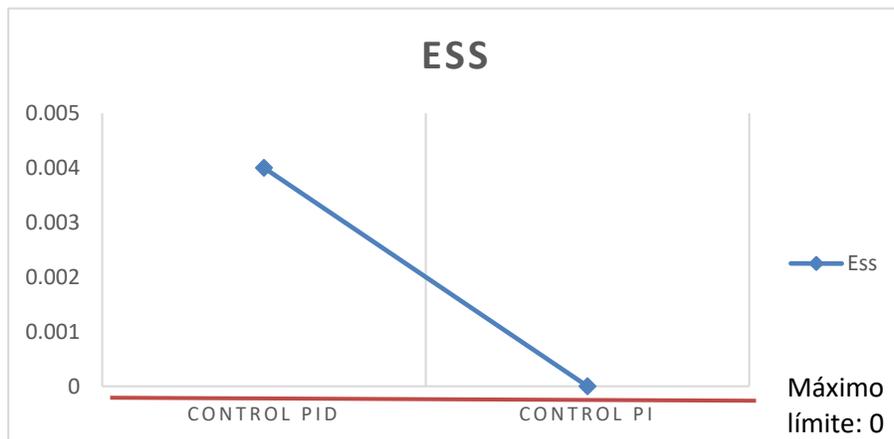


Fig. 4.25: Comparación del Ess de los sistemas de control (Fuente: el autor)

Según la gráfica del Error en Estado Estacionario (Ess), se puede deducir que el control PI cumple con el requerimiento impuesto en esta tesis (Error: nulo).

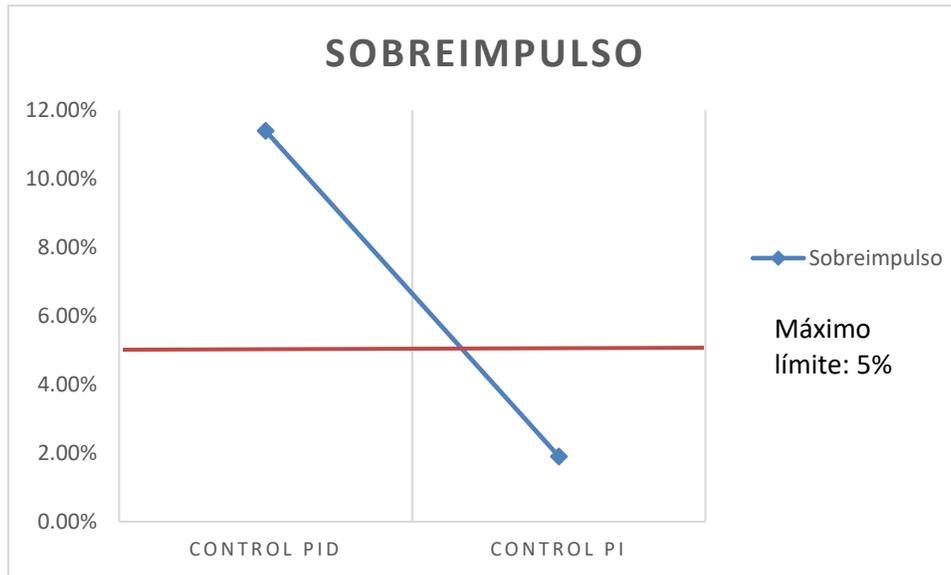


Fig. 4.26: Comparación del Sobreimpulso de los sistemas de control (Fuente: el autor)

Según la gráfica del Sobreimpulso, se puede deducir que el control PI cumple con el requerimiento impuesto en esta tesis (Sobreimpulso <5%).

# Capítulo V

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- En relación a los estándares de diseño de una antena de bocina, la empresa Ainfoinc ofrece sus antenas con parámetros de 10,15 y 20 dB de ganancia y un máximo de VSWR de 1.315 (AINFO Inc., 2016); con lo cual la capacidad de la antena de bocina diseñada estaría en sus estándares de calidad, pues se obtuvo una ganancia de 20 dBi y un VSWR máximo de 1.42 Los resultados se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Resultados de los parámetros de la antena (FEKO)

Parámetros obtenidos	Respuesta adecuada para la banda C (4 - 7 GHz)
	VSWR = 1.42 a 6.666 GHz
	Ganancia = 20 dBi

- De acuerdo, Harold A. Rothbart en su manual “*Mechanical Design Handbook*” plantea que el valor típico de factor de diseño de seguridad para estructuras que no operarán en condiciones severas van desde 1 (en contra del rendimiento) para aeronaves es de 3 y para recipientes a presión es de 10 (Rothbart, 2006); con lo cual el rendimiento de la estructura mecánica diseñada encajaría en sus estándares de calidad, con un factor de seguridad mayor a 4 y una deformación menor a 1mm. Como se muestra en la siguiente tablas 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5.

Tabla 5.2: Resultados del análisis de esfuerzos - Base Antena

Tipo de Análisis	Resultados
Tensión de Von-Mises	27.26 MPa
Desplazamiento	0.05414 mm
Factor de seguridad	10.09
Fuerza admisible	575.13 N

Tabla 5.3: Resultados del análisis de esfuerzos - Base Motor

Tipo de Análisis	Resultados
Tensión de Von-Mises	20.51 MPa
Desplazamiento	0.03747 mm
Factor de seguridad	13.41
Fuerza admisible	804.6 N

Tabla 5.4: Resultados del análisis de esfuerzos - Columna Soporte

Tipo de Análisis	Resultados
Tensión de Von-Mises	58.99 MPa
Desplazamiento	0.000637 mm
Factor de seguridad	4.66
Fuerza admisible	307.56 N

Tabla 5.5: Resultados del análisis de esfuerzos - Base Tornillo

Tipo de Análisis	Resultados
Tensión de Von-Mises	18.37 MPa
Desplazamiento	0.051 mm
Factor de seguridad	14.97
Fuerza admisible	1362.27 N

- En relación con los estándares para el sistema de control, el PhD. Marco Antonio Milla Bravo, director del Radio Observatorio de Jicamarca, uno de los autores de *“Implementation of a ground based synthetic aperture radar (GB-SAR) for landslide monitoring: system description and preliminary results.”*, sostiene que el sistema de radar necesita tener un tiempo de establecimiento menor a los 5s y un error en estado estacionario nulo (Florentino, Charapaqui, De La Jara, & Milla, 2017), de lo contrario, se presentarían errores en el procesamiento; con lo cual el rendimiento del sistema de control encajaría en sus estándares pues se logró un sistema de control con un tiempo de establecimiento: 4.77 s y un error en estado estacionario nulo. A continuación, se presenta la función de transferencia de la planta (tabla 5.6) y las diferencias de los controladores simulados (tabla 5.7).

Tabla 5.6: Resultados de la identificación de sistemas

Función de transferencia	Resultados
Dominio de Laplace	$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{0.502e^{-0.15s}}{0.03s^2 + s}$
Dominio Z	$\frac{\theta(z)}{V(z)} = \frac{0.000198z + 0.0001873}{z^2 - 1.847z + 0.8466}$

Tabla 5.7: Comparación de tipos de control

Tipos de Control	Resultados
<i>Control PID</i>	Tiempo de establecimiento > 15s Error en estado estacionario: +0.004 Sobreimpulso: 11.4%
<i>Control PI</i>	Tiempo de establecimiento: 4.77s Error en estado estacionario: Nulo Sobreimpulso: 1.9%

# Capítulo VI

## CONCLUSIONES

- Se logró diseñar un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética que mejorará la capacidad radárica de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca en el 2016- 2018.
- Se logró mejorar la capacidad de la antena de bocina de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca en el intervalo del 2016-2018. Del cual se obtuvo parámetros aceptables de VSWR y ganancia (1.42 y 20 dBi, respectivamente).
- Se logró optimizar el rendimiento de la estructura mecánica de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca, del cual se obtuvo una deformación menor a 1mm y un factor de seguridad mayor a 2.
- Se logró optimizar el rendimiento del sistema de control de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca en el intervalo del 2016-2018. Del cual se obtuvo un sistema de control que cumplió con error en estado estacionario nulo, tiempo de establecimiento menor a los 5s y un sobreimpulso menor al 5%.

# Capítulo VII

## RECOMENDACIONES

Asimismo, se tienen las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda utilizar planchas de aluminio 6061 para la implementación de la estructura mecánica y la antena, debido a que la simulación fue realizada con este material.
- Para implementar el sistema de control, se recomienda sobredimensionar el motor DC de tal manera, que el torque nominal que entregue el motor sobrepase a lo necesario, asegurando la vida del actuador.
- Para las pruebas de procesamiento, se debe verificar que la separación de las antenas es la adecuada, si no es así, se debe alejar las antenas hasta obtener resultados confiables, esto se puede comprobar al plotear imágenes de reflectividad y obtener resultados de acuerdo a lo esperado.

## REFERENCIAS

AINFO Inc. (19 de Mayo de 2016). *A-INFO*. Obtenido de A-INFO:

[http://www.ainfoinc.com/en/pro\\_pdf/new\\_products/antenna/Standard%20Gain%20Horn%20Antenna/tr\\_LB-159-20.pdf](http://www.ainfoinc.com/en/pro_pdf/new_products/antenna/Standard%20Gain%20Horn%20Antenna/tr_LB-159-20.pdf)

Almanza, J. E. (2015). *Desarrollo de un prototipo de radar de apertura sintética e implementación de algoritmos de reducción de ruido en imágenes de radar*. Ensenada, Baja California: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

Arnáez, E. (2014). *Enfoque práctico del control moderno*. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas S.A.C.

Balanis, C. (2005). *Antenna Theory - Analysis and Design*. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc.

Castiglione, N. (2011). Transmisión del movimiento a los ejes de los cnc-routers. *Revista Letre-ros*.

D. Seborg, T. E. (2010). *Process Dynamics and Control*. John Wiley and Sons, Inc.

Florentino, A., Charapaqui, S., De La Jara, C., & Milla, M. (2017). Implementation of a ground based synthetic aperture radar (GB-SAR) for landslide monitoring: system description and preliminary results. *IEEEExplore Digital Library*, 4.

Hernández, R., Fernandez, C., & Baptista, P. (2003). *Metodología de la Investigación*. México: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A.

Lee, C. C. (1990). Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller – part i. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol 20, NO. 2.

Lennart, L. (1987). *SYSTEM IDENTIFICATION: Theory for the User*. Prentice-Hall, Inc.

- Márquez, K. E., & Hernández, H. A. (2011). *Construcción de un radar de apertura sintética de baja potencia y de bajo costo*. El Salvador: Universidad De El Salvador.
- Martínez, A. (2008). *Snow cover monitoring techniques with GB-SAR*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Ogata, K. (1996). *Discrete time control systems*. Prentice Hall.
- Ogata, K. (1998). *Ingeniería de Control Moderna*. Prentice Hall.
- Ortecho, D., Milla, M., Charapaqui, S., Arboleda, E., Florentino, A., & De La Jara, C. (2018). Design and implementation of a mechanical system for a ground based synthetic aperture radar with automatic antenna pointing: Preliminary results. *Ieeexplore Digital Library*, 1-4.
- Rothbart, H. A. (2006). *Mechanical Design Handbook*. McGraw-Hill Professional.
- Sabino, C. (1992). *El proceso de Investigación*. Bogotá: Panamericana.
- Yarlequé, M. A., Alvarez, S., Martínez, H. J., & Platriez, M. (2016). Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging based on low-cost FMCW radar for mini-UAVs. *IEEE ANDESCON*, 3.

# Anexo 1: Matriz de Consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIA																			
Título: Diseño de un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética para modos Stripmap, Spotlight y Scan Autor: Camilo Daniel Ortecho Huamanchumo																			
Problema	Objetivos	Variables e Indicadores	Metodología																
<p><b>Problema Principal</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>☑ Con el diseño de un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética se mejorará la capacidad radárica de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca, 2016-2018.</li> </ul> <p><b>Problemas Secundarios</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>☑ Con el diseño de un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética se mejorará la capacidad de la antena de bocina de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca, 2016-2018.</li> <li>☑ Con el diseño de un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética multifuncional se optimizará el rendimiento de la estructura mecánica de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca, 2016-2018.</li> <li>☑ Con el diseño de un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética multifuncional se mejorará el rendimiento del sistema de control de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca, 2016-2018.</li> </ul>	<p><b>Objetivo general</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>☑ Diseñar un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética para mejorar la capacidad radárica de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca entre los años 2016 al 2018.</li> </ul> <p><b>Problemas Secundarios</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>☑ Mejorar la capacidad de la antena de bocina de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca mediante el diseño de un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética entre los años 2016-2018.</li> <li>☑ Optimizar el rendimiento de la estructura mecánica de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca mediante el diseño un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética entre los años 2016 al 2018.</li> <li>☑ Diseñar un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética multifuncional para mejorar el rendimiento del sistema de control en el Radio Observatorio de Jicamarca, 2016-2018.</li> <li>☑ Mejorar el rendimiento del sistema de control de los sistemas SAR en el Radio Observatorio de Jicamarca mediante el diseño de un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética entre los años 2016-2018.</li> </ul>	<p><b>Variables Independiente:</b></p> <p>X1: El diseño de un sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética multifuncional</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Dimensiones</th> <th>Indicadores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Determinación de los requerimientos de diseño</td> <td>Requerimientos de radiofrecuencia, mecánicos, de control.</td> </tr> <tr> <td>Propuesta del sistema mecatrónico</td> <td>Diagrama de la propuesta del sistema mecatrónico.</td> </tr> <tr> <td>Diseño del sistema</td> <td>Estructura que considera tres aspectos: diseño de la antena, de la estructura mecánica y del sistema de control.</td> </tr> <tr> <td>Pruebas de simulación</td> <td>Pruebas en el software FEKO, Inventor y Matlab.</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>Variables Dependiente:</b></p> <p>Y1: Capacidad radárica</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Dimensiones</th> <th>Indicadores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Capacidad de la antena de bocina</td> <td>☑ Deformación máxima &lt; 1mm. ☑ Factor de seguridad &gt;2. ☑ Valor de VSWR &lt; 2. ☑ Valor de ganancia &gt;15 dBi.</td> </tr> <tr> <td>Rendimiento de la estructura mecánica</td> <td>☑ Tiempo de establecimiento &lt;5s. ☑ Error en estado estacionario nulo ☑ Sobreimpulso &lt; 5%</td> </tr> </tbody> </table>	Dimensiones	Indicadores	Determinación de los requerimientos de diseño	Requerimientos de radiofrecuencia, mecánicos, de control.	Propuesta del sistema mecatrónico	Diagrama de la propuesta del sistema mecatrónico.	Diseño del sistema	Estructura que considera tres aspectos: diseño de la antena, de la estructura mecánica y del sistema de control.	Pruebas de simulación	Pruebas en el software FEKO, Inventor y Matlab.	Dimensiones	Indicadores	Capacidad de la antena de bocina	☑ Deformación máxima < 1mm. ☑ Factor de seguridad >2. ☑ Valor de VSWR < 2. ☑ Valor de ganancia >15 dBi.	Rendimiento de la estructura mecánica	☑ Tiempo de establecimiento <5s. ☑ Error en estado estacionario nulo ☑ Sobreimpulso < 5%	<p><b>Tipo de Investigación</b> Aplicada</p> <p><b>Nivel de Investigación</b> Descriptivo</p> <p><b>Población</b> Todos los sistemas electro-mecánicos de apunte automático de radar de apertura sintética que existen en las instituciones de investigación peruanas</p> <p><b>Muestreo</b> Por conveniencia</p> <p><b>Muestra</b> Sistema electro-mecánico de apunte automático de radar de apertura sintética para modos Stripmap, Spotlight y Scan del Radio Observatorio de Jicamarca</p>
Dimensiones	Indicadores																		
Determinación de los requerimientos de diseño	Requerimientos de radiofrecuencia, mecánicos, de control.																		
Propuesta del sistema mecatrónico	Diagrama de la propuesta del sistema mecatrónico.																		
Diseño del sistema	Estructura que considera tres aspectos: diseño de la antena, de la estructura mecánica y del sistema de control.																		
Pruebas de simulación	Pruebas en el software FEKO, Inventor y Matlab.																		
Dimensiones	Indicadores																		
Capacidad de la antena de bocina	☑ Deformación máxima < 1mm. ☑ Factor de seguridad >2. ☑ Valor de VSWR < 2. ☑ Valor de ganancia >15 dBi.																		
Rendimiento de la estructura mecánica	☑ Tiempo de establecimiento <5s. ☑ Error en estado estacionario nulo ☑ Sobreimpulso < 5%																		

## **PUBLICACIONES**

Con el objetivo de contribuir a la comunidad científica, algunos de los resultados de esta tesis se encuentran publicados en el paper que se presenta a continuación.

### **IEEEXPLORER® DIGITAL LIBRARY**

Ortecho, D., Milla, M., Charapaqui, S., Arboleda, E., Florentino, A., y De La Jara, C., 2018, "Design and implementation of a mechanical system for a ground based synthetic aperture radar with automatic antenna pointing: Preliminary results" DOI: 10.1109/ECON.2017.8247302

#### ***Abstract:***

*Melting of the snow covering the Andes mountains is a negative result of climate change. It affects the ecosystem that surrounds the snow peaks causing the loss of water resources the human life. Motivated by this situation, scientists are studying the variation of snow throughout seasons in the Andes. In order to contribute with this type of measurements, the Geophysical Institute of Peru is developing at the Jicamarca Radio Observatory a portable Synthetic Aperture Radar (SAR) system that would be utilized to measure the variation of dry snow in the snow-capped mountains in Peru. The system will work in C-band and it will be able to operate in two different modes: Stripmap and Spotlight. In this work, we are presenting the SAR's design, specifically, the advances in the development of the horn antennas and the mechanical structure of the radar.*