



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



José Francisco Meza Ferrada

Diseño de un Sistema Rastreador de Antena para un RPAS (Sistema Aéreo Piloteado Remotamente)

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Electrónico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 25 de julio de 2017



Diseño de un Sistema Rastreador de Antena para un RPAS (Sistema Aéreo Piloteado Remotamente)

José Francisco Meza Ferrada

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Facultad de Ingeniería de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Francisco Pizarro Torres
Profesor Guía

Sr. Gonzalo Hernández Gutiérrez
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann
Secretario Académico

Valparaíso, 25 de julio de 2017

Esta tesis está dedicada a mi familia, pareja y amigos.

Agradecimientos

Agradecer a mi familia, mi padre José Meza, a mi hermana Claudia, a mi sobrina Rafaela y especialmente a mi madre Verónica Ferrada por todo su aliento, cariño y alegría que supo transmitirme a lo largo de este trayecto por la universidad. Agradecer de igual forma a mi tía Carmen Ferrada y a mi primo Jaime, por abrirme las puertas de su hogar y brindarme todo lo que fue necesario en aquel momento. A mis abuelos Francisco y Rosa, por todo el amor entregado incondicionalmente.

A mi pareja Francisca y a su familia, por darme su apoyo incondicional en la última etapa de la universidad, destacando la participación de su madre Mónica, quien me ayudo y brindo mucho apoyo para la realización de esta tesis.

A mis colegas de SISDEF, Rubén Olmedo, Gonzalo Hernández, Álvaro Arroyo y Boris Miranda, por su ayuda, apoyo y cordialidad durante el desarrollo de esta tesis, que gracias a ellos pude finalizar con éxito.

También agradecer a los amigos que hice en este paso por la universidad durante los años de carrera, que hicieron de este proceso un agrado.

De igual forma agradecer al profesor guía Francisco Pizarro quien supo entenderme en momentos que se escapaban de mis manos, también por sus conocimientos entregados en la realización de esta tesis.

Valparaíso, 25 de julio de 2017

José Meza Ferrada

Resumen

En la siguiente tesis se presenta un rastreador de antenas, diseñado para el RPAS (Sistema Aéreo Piloteado Remotamente) Chercán, un UAV (Unmanned Aerial Vehicle) creado por la empresa SISDEF Ltda. Este rastreador, cuyo propósito es mantener en todo momento el enlace de video entre la estación base y el UAV, funciona a través de la señal de video de 5.8 [GHz] que el UAV emite hacia la estación base. El método utilizado para realizar el rastreo, es a través de la medición y análisis de la intensidad de señal recibida o RSSI. Gracias a este método, no es necesario instalar ningún accesorio adicional sobre el UAV, logrando de esta forma utilizar éste rastreador en el UAV Chercán, así como también en otros UAVs que transmiten video en la frecuencia de 5.8 [GHz].

Para realizar el movimiento de este rastreador, se utilizan dos servomotores, los cuales le dan movimiento en los ejes vertical y horizontal, además se utiliza una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexible, siendo éste el encargado de procesar la información de RSSI y a la vez de enviar la señal de control a los servomotores para que estos se muevan.

Se creó además una base de prueba, para determinar a qué distancia se ubicaran las cuatro antenas que se instalarán sobre esta base, específicamente para determinar la distancia de unas con respecto a las otras. Estas antenas son las encargadas de recibir la señal de video. Utilizando como referencia las dimensiones de esta base de prueba, se logró diseñar una plataforma que contuviera esta base y en ella montar toda la electrónica y componentes que utilizaría el rastreador de antenas diseñado.

Mediante la realización de pruebas de banco, se pudo observar el funcionamiento mecánico de la plataforma y evidenciar si el software creado para este rastreador funcionaba de manera correcta. De igual forma, se realizaron pruebas de funcionamiento del rastreador con el UAV en vuelo, para observar si cumple el objetivo para el cual fue diseñado. De estas pruebas fue posible recolectar datos y con ello reflejar y registrar de mejor manera el comportamiento de los resultados obtenidos.

Palabras claves: UAV, DRON, RPAS, rastreador de antena, RSSI, receptor de video, 5.8 [GHz], código abierto.

Abstract

The following thesis presents an antenna tracker, designed for the RPAS (Remotely piloted aerial system) Chercán, a UAV (Unmanned Aerial Vehicle) created by the company SISDEF Ltda. This tracker, whose purpose is to maintain at all times the video link between the base station and the UAV, works through the video signal of 5.8 [GHz] that the UAV emits towards the base station. The method used to perform the tracking is through the measurement and analysis of the received signal strength or RSSI. Thanks to this method, it is not necessary to install any additional accessory on the UAV, in this way it is possible to use this tracker in the Chercán UAV, as well as in other UAVs that transmit video in the frequency of 5.8 [GHz].

To perform the movement of this tracker, two servomotors are used, which give movement in the vertical and horizontal axes, in addition an open-source electronic prototype platform (open-source) based on flexible hardware and software is used, this being the one in charge to process the information of RSSI and at the same time to send the signal of control to the servomotors so that these move.

A test base was also created to determine, to what distance the four antennas installed on this base will be located, specifically to determine the distance of some with respect to the others. These antennas are in charge of receiving the video signal. Using as a reference the dimensions of this test base, it was possible to design a platform that contained this base and in it assemble all the electronics and components that would be used by the designed antenna tracker.

By performing bench tests, we could observe the mechanical functioning of the platform and show if the software created for this tracker worked correctly. In the same way, tests were carried out on the tracker with the UAV in flight, to see if it fulfilled the objective for which it was designed. From these tests it was possible to collect data and with this reflect and record in a better way the behavior of the results obtained.

Key words: UAV, DRON, RPAS, antenna tracker, RSSI, video receiver, 5.8 [GHz], open source.

Índice general

Introducción.....	1
1 Antecedentes	4
1.1 Descripción detallada del problema	4
1.1.1 Configuraciones probadas.....	5
1.2 Estado del arte.....	6
1.2.1 Lobulo secuencial.....	6
1.2.2 Exploración cónica.....	7
1.2.3 Seguimiento por monopolso.....	8
1.2.4 Seguimiento por GPS	8
1.2.5 Seguimiento por RSSI	9
1.3 Soluciones en el mercado	9
1.3.1 MarcusUAV Corp.....	10
Antena Tracker de mediano alcance	10
Antena Tracker de largo alcance.....	11
1.3.2 Ebention	12
Veronte Tracker.....	12
1.3.3 MFD AAT Antena de seguimiento automático	12
1.3.4 Arkbird-AAT Antena de seguimiento automático	13
1.3.5 Wave Relay® Sistema de Antena de Seguimiento	14
1.4 Solucion propuesta en base al estado del arte	14
2 Solución y marco teórico	15
2.1 Solución propuesta.....	15
2.2 Funcionamiento del rastreador de antena	16
2.2.1 Resumen de componentes	18
2.3 Software de control.....	19
2.3.1 Módulo de lectura de valores RSSI	20
2.3.2 Módulo comparación y movimiento horizontal y vertical.....	21
2.3.3 Módulo límite de servo motores	22
2.3.4 Módulo de escritura	22

3 Desarrollo	23
3.1 Platarforma de pruebas	23
3.2 Determinacion de distancia entre antenas	24
3.2.1 Mediciones realizadas.....	24
3.3 Diseño de la estructura del rastreador de antena	27
3.4 Determinación de servo motor con el software	28
3.4.1 Cálculo de torque estático en el eje x.....	29
3.4.2 Calculo de torque estático en el eje y.....	31
3.5 Pruebas del software de control	32
3.6 Valor RSSI en Arduino	33
3.7 Medición de RSSI de cada receptor.....	35
3.7.1 Medición de valores de RSSI de los receptores de video	35
3.8 Montaje de componentes electrónicos sobre el prototipo	40
3.8.1 Diagrama eléctrico de componentes.....	41
3.8.2 Pruebas realizadas.....	41
3.8.3 Diagrama eléctrico final de componentes	42
3.8.4 Pruebas realizadas.....	43
3.9 Mejora de receptores	44
3.9.1 Receptor de video FR632	44
3.9.2 Medición de RSSI mínimo	45
3.9.3 Medición de RSSI máximo.....	45
3.10 Pruebas de banco.....	46
4 Resultados.....	47
Discusión y conclusiones	51
Acerca del trabajo realizado en SISDEF	51
Acerca de los objetivos	51
Acerca del desarrollo de la tesis.....	52
Trabajos futuros.....	53
Bibliografía	54
A Medición de valores de RSSI de receptores de video.....	56
A.1 Confección de tabla para recetor dos	56
A.2 Confección de tala de receptor tres	61
A.3 Confección de tabla para receptor cuatro.....	66

Glosario de términos

RPAS: Remotely Piloted Aircraft Systems, (Sistema Aéreo Piloteado Remotamente), con referencia a las aeronaves que pueden realizar vuelos controlados en forma remota sin asistencia de un piloto a bordo

UAV: Unmanned Air Vehicle, (Vehículo Aéreo no Tripulado), con referencia a las aeronaves que pueden realizar vuelos autónomos sin asistencia de un piloto a bordo.

DRON: del inglés DRONE, o zumbido como el producido por los abejorros. Término militar que se refiere a una Aeronave que vuela sin tripulación humana a bordo

UAS: Unmanned Aerial System, (Sistema aéreo o tripulado).

FPV: First Person View, (Visión en primera persona).

LoS: Line of Sight (Línea de Vista).

Introducción

A lo largo de la historia de la implementación de Sistemas Robóticos Aéreos (UAV) se han visto grandes avances, ya que todo esto parte en su genealogía desde la mirada militarizada de la realidad de esos años bajo otros contextos distintos a lo de la actualidad, pero que hoy en día se rescata un uso en provecho de los retos contemporáneos y que en la actualidad, en la industria, servicios públicos y defensa, existe una fuerte tendencia hacia la implementación de Sistemas Robóticos Aéreos (UAV) y Terrestres (UGV) no Tripulados.

El mercado ofrece una gran variedad de equipos UAV listos para volar tales como los Phantom, de la empresa DJI, que con solo encenderlo están listos para realizar las labores que se les quiera encomendar, los Parrot de la empresa del mismo nombre, la cual cuenta con distintos modelos también listos para desarrollar actividades acorde. Todos estos UAV están equipados principalmente con cámaras, pero por tratarse de sistemas cerrados, no permiten la integración de nuevos sensores o herramientas dedicadas para desarrollar e implementar servicios específicos.

La tendencia es pensar que sólo con el UAV es posible implementar una solución, pero éste es sólo parte de un sistema mayor (UAS) y necesariamente se deben considerar aspectos integrales que satisfagan los servicios específicos, principalmente la seguridad. Los UAV pueden volar de manera autónoma, utilizan sistemas de posicionamiento GPS y pueden ser programados para volar de un sitio a otro sin la intervención de un operador, por lo tanto desarrollan un trabajo eficaz a la hora de encomendar una responsabilidad.

Aunque empezaron a desarrollarse con fines militares hace ya más de 20 años, hoy en día es una tecnología que está empezando a abrirse camino en aplicaciones civiles, creando un mercado nuevo del cual se presume un crecimiento explosivo para los próximos años, todo esto se entiende en la medida que hay diversos campos de aplicación como por ejemplo fotografía, video, termografía, topografía, etc., habiendo por lo demás una extensa diversificación de áreas dentro de las cuales se encuentra, agricultura, minería, comunicaciones, defensa y seguridad, forestal, gestión de emergencia y catástrofes, medio ambiente, geodesia, inspección de infraestructuras, investigación y educaciones, construcción y vialidad, entre otras.

En esta tesis se centrará en el UAV Chercán, desarrollado íntegramente por la empresa Chilena SISDEF Ltda.¹, Este es un vehículo aéreo no tripulado, multi-rotor de despegue y aterrizaje vertical, pequeño, versátil, transportable, muy fácil de operar, diseñado como plataforma de apoyo polivalente para operaciones en el aire y controladas desde tierras.

Dentro de las descripciones generales del problema a investigar se tiene la idea de que hay formas de transmisión que dificultan la correcta fluidez del proceso, en este caso se apela a lo que es la forma de generar el enlace, esto se da en la medida que la transmisión online se va perdiendo a la hora que se aleja del punto de referencia o de trabajo que desarrolla la recepción de dicho video, este problema es de vital importancia, ya que el UAV Chercán se ha creado para cumplir con tareas como: servicios de Búsqueda y Geolocalización para realizar inspección en sectores siniestrados de difícil acceso, con el objetivo de realizar la confección de informes express, para activar planes de contingencia asociados a mitigar posibles emergencia de mayor magnitud, la confección de carta gráfica georreferenciada para recuperación de equipos siniestrados, levantamiento video/fotográfico del lugar siniestrado (archivo). Apoyo aéreo durante operaciones críticas, con el objetivo de realizar vuelos de reconocimiento y patrullajes preventivos, planificar rutas y planes de contingencia, conocer con anticipación eventuales riesgos en la ruta, entre otras; este no es un problema alejado de otras formas de transmisión propiamente tal ya que hay estudios que así lo confirman, por ejemplo [1], donde realizan trabajos de transmisión de video en la frecuencia de 2.4 [GHz] con UAV y les ocurre el problema de corte señal de transmisión y recepción, para esto crean un rastreador de antena basado en la señal de video de 2.4 [GHz].

A lo largo de diversas pruebas realizadas con el UAV y las distintas antenas del transmisor y receptor de video se fue encontrando una configuración óptima, es acá donde surgió un problema en la antena ubicada en la estación base, ya que tenía un haz muy estrecho, esto generó un inconveniente, cada vez que el UAV se salía de línea de vista (LoS) del haz perdía el rastro y dificultaba la comunicación de video hacia la estación base. Esto era suplido con la orientación manual de la antena hacía el UAV en movimiento. Para no realizar esta operación manualmente, que es un poco engorrosa y problemática si es que solo está el piloto del UAV es que se plantea desarrollar un rastreador de antena, basado en la señal de video, para así tener siempre el enlace de video activo.

El objetivo fundamental de esta tesis es diseñar y construir un sistema rastreador de antena para el RPAS (Sistema Aéreo Piloteado Remotamente) Chercán de SISDEF, para cumplir este objetivo fundamental se analizaron los componentes de sistemas de rastreo de antenas existentes en el mercado, realizando una comparación de prestaciones técnicas. Se definieron los componentes de comunicación a utilizar, receptores de video, antenas, transmisores de video. Como por ejemplo antena helicoidal de 5.8 [GHz], Arduino Uno, entre otros.

¹SISDEF Ltda., es una empresa chilena, creada el año 1983 para desarrollar soluciones de Ingeniería de Sistemas aplicados principalmente a la defensa, seguridad y al ámbito marítimo e industrial, constituyéndose en la actualidad como la principal empresa de Mando y Control e Integración de Sistemas en América Latina.

Dentro de las formas de implementación y evaluación de proyecto se definió el sistema de control, y se creó un software apto para satisfacer las necesidades que el rastreador debía cumplir, definiendo el hardware de control donde se iba a cargar el software, además de los actuadores que éste iba a controlar, dentro del diseño se creó una estructura que permitió la disposición de los componentes necesarios para el funcionamiento del rastreador de antena, realizando pruebas de funcionamiento de la parte mecánica como de la parte electrónica y ver si el resultado del rastreador de antena cumplió las expectativas esperadas.

1 Antecedentes

En este capítulo se presenta la descripción de manera detallada de la problemática, además las distintas formas de abordar el problema, con las teorías y métodos existentes para realizar el rastreo de sistemas aéreos. Dando como resultado una propuesta de solución al problema basado en el estado del arte.

1.1 Descripción detallada del problema

El UAV Chercán de SISDEF Ltda., es un cuadricóptero compacto que combina la capacidad de llevar cámaras de hasta 1.4 kilos con una autonomía de vuelo de 40 minutos. Puede alcanzar alturas superiores a los 1.000 metros, aunque normalmente no se le operará a más de 500 metros, y desplazarse en un radio de 3.5 kilómetros en relación a su operador. Es capaz de tomar fotografías a 1.5 kilómetros de distancia y detectar a una persona a una distancia de 700 metros, imágenes que puede transmitir en tiempo real a la pantalla FPV o al notebook del operador. Algunas de las principales tareas en las que se desempeña el UAV Chercán en donde es de vital importancia tener una buena transmisión de video son:

- Servicios de Topografía Aérea, donde se destacan:
 - Planos topográficos que permitan conciliar el avance al interior del rajo mina.
 - Control de volumen y análisis en botadero de mineral que ingresa a proceso planta.
 - Control de volumen y análisis en pilas de lixiviación.

- Servicios de Búsqueda y Geolocalización para realizar inspección en sectores siniestrados de difícil acceso, con el objetivo de:
 - Confección de informes express, para activar planes de contingencia asociados a mitigar posibles emergencia de mayor magnitud.
 - Confección de carta gráfica georreferenciada para recuperación de equipos siniestrados
 - Levantamiento video/fotográfico del lugar siniestrado (archivo).

- Apoyo aéreo durante operaciones críticas, con el objetivo de:
 - Realizar vuelos de reconocimiento y patrullajes preventivos.
 - Planificar rutas y planes de contingencia.
 - Conocer con anticipación eventuales riesgos en la ruta.

Para tener más alcance en la transmisión de video, se modificaron los componentes con los que se realiza la transmisión y recepción de video, pasando por varios componentes y distintas configuraciones.

Lista de componentes:

- Transmisores de video:
 - Iftron Mondo Stringer 500 [mW]
 - Iftron Mondo Xtream 1.5 [W].
- Antenas de transmisión:
 - Antena Omni-direccional 3 [dBi], Iftron.
 - Antena Omni-direccional 5 [dBi], Data Alliance.
- Receptor de video:
 - Iftron Yellow Jacket 5.8 Pro
- Antenas de recepción:
 - Antena direccional plana 11 [dBi], 5.8 [GHz], L-Com.
 - Antena Yagi 17 [dBi], L-Com.
 - Antena Omni-direccional 7 [dBi], Data Alliance.

Todos estos componentes se fueron utilizando e intercambiando con el propósito de obtener un mayor alcance.

1.1.1 Configuraciones probadas

Cabe mencionar que todas estas pruebas de configuraciones fueron realizadas por los ingenieros encargados de la construcción y desarrollo del Chercán, entregando como información para esta tesis las distintas combinaciones y resultados obtenidos.

1. Se utilizó el transmisor Iftron Mondo Stringer 500 [mW] conectado con la antena omni-direccional de 3 [dBi], en conjunto con el receptor Iftron Yellow Jacket 5.8 Pro y antena direccional plana 11 [dBi]. Esta confirmación logro transmitir video hasta un máximo de 1 [km], con la estación base alineada hacia el UAV y el UAV alineado con su parte posterior a la estación base ya que la antena de recepción de video está montada sobre ésta. Todo realizado en línea vista.
2. Transmisor Iftron Mondo Xtream 1.5 [W] con antena omni-direccional 3 [dBi] Iftron, en conjunto con el receptor Iftron Yellow Jacket 5.8 Pro y antena direccional plana 11 [dBi], esta configuración fue utilizada durante mucho tiempo, donde se verificó la recepción de video sobre 1 [km] y en ocasiones hasta 2 [km], pero con la estación base alineada hacia el UAV, y con UAV alineado de espaldas a la estación base, siempre en línea vista.

3. Transmisor Iftron Mondo Xtream 1.5 [W] con antena omni-direccional 5 [dBi], Data Alliance en conjunto con receptor Iftron Yellow Jacket 5.8 Pro y antena omni-direccional 7 [dBi], donde con esta configuración, se verifico buena recepción de video a 1 [km] de distancia, sin necesidad de estar alineando la estación base, pero con el UAV siempre apuntando su antena a la estación base, donde un pequeño cambio en su alineación significaba perder la recepción de video. Con esta configuración no era necesario alinear la estación base hacia el UAV.

4. Transmisor Iftron Mondo Xtream 1.5 [W] con antena omni-direccional 3 [dBi], Iftron en conjunto con receptor Iftron Yellow Jacket 5.8 Pro y antena Yagi 17 [dBi], con esta configuración de verifico buena recepción de video cuando el UAV estaba en el haz de la antena de recepción, solo se requería alinear siempre la estación base hacia el UAV, en cuanto se perdía esta alineación, se perdía la recepción de video.
Con esta configuración se obtuvo el mayor alcance más de 2 [km], pero siempre se tuvo el problema de estar alineado la estación base de forma manual hacia el UAV, mientras éste estaba en movimiento.

Gracias a la última configuración mencionada, se vió la necesidad de automatizar el proceso de alineación de la estación base hacia el UAV, donde se planteó el desafío de diseñar y construir un sistema rastreador de antena para el RPAS (Sistema Aéreo Piloteado Remotamente) Chercán de SISDEF, capas de posicionar de manera automática la antena de recepción de video en dirección al UAV.

1.2 Estado del arte

El seguimiento de objetos es importante para los radares militares así como muchos radares civiles. En los radares militares, el seguimientos es responsable del control de fuego y dirección de misiles, de hecho, girar un misil es casi imposible sin un seguidor de objetivos apropiado. Los sistemas de radar comerciales, como los radares de control de tráfico civil en aeropuertos, debe utilizar seguimiento como medio de control de entrada y salida de aviones [2].

1.2.1 Lobulo secuencial

Esta es una de las primeras técnicas de seguimiento que se utilizó por la primera generación de sistemas de radar. Es un mecanismo muy sencillo de utilizar.

Se utilizan dos antenas que emiten haz de radiación separados por un pequeño ángulo. Estas antenas emiten un haz al mismo instante. Si el objetivo se encuentra en el centro de las dos antenas (Figura 1-1), el retorno de la señal no tendrá una variación de amplitud. Pero si el objetivo se mueve a uno de los dos lados de las antenas, la señal de retorno tendrá una diferencia en la amplitud, donde la de mayor amplitud es donde se encuentra el objetivo (Figura 1-2). Con este parámetro se acciona los motores para siempre tener una diferencia de amplitud igual a cero [3].

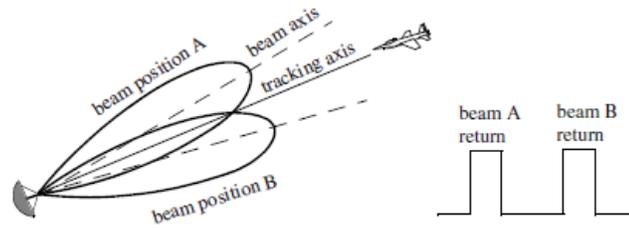


Figura 1-1: Objetivo en el centro de las antenas [3].

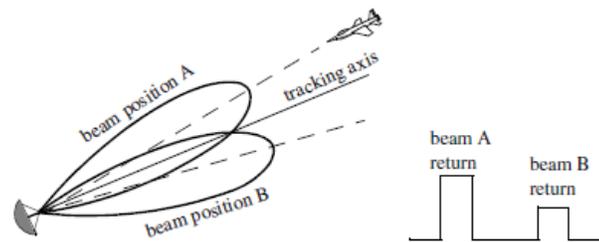


Figura 1-2: Objetivo desplazado hacia la antena A [3].

1.2.2 Exploración cónica

Los sistemas exploración cónica funcionan enviando una señal ligeramente desplazada del eje óptico de la antena, empezando entonces a rotar el alimentador de la señal haciendo que el lóbulo gire alrededor de la línea del eje (Figura 1-3). Un objetivo centrado en éste estará siempre ligeramente iluminado por el lóbulo, proporcionando una fuerte señal de retorno. Si el objetivo se encuentra en uno de los extremos del eje principal se encontrará iluminado únicamente cuando el lóbulo esté apuntando en esa dirección, resultando un balance de señal general muy bajo (o bien una ráfaga rápida si la rotación es lo suficientemente lenta). Esta señal variable alcanzará un máximo cuando la antena rote en la dirección del objetivo. Si se mueve la antena en esa dirección con la intención de buscar un máximo, un objetivo podrá ser automáticamente detectado [3].

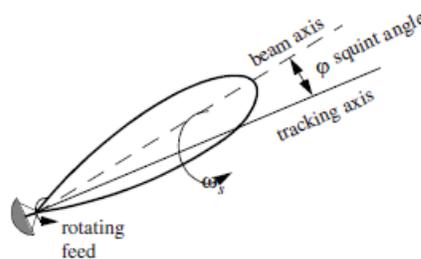


Figura 1-3: Exploración Cónica [3].

1.2.3 Seguimiento por monopolso

El seguimiento por monopolso es similar en construcción a los sistemas de escaneo cónico, pero añaden una característica adicional.

En lugar de enviar la señal como tal se divide el haz en partes y después se envían dos señales al exterior en posiciones ligeramente diferenciadas. Cuando se reciben las señales reflejadas se amplifican por separado y se comparan entre sí, indicando que dirección posee un retorno mayor, y de esta manera la posición relativa del objetivo respecto al eje de la antena. Dado que la comparación se realiza durante un pulso, que dura habitualmente unos pocos microsegundos, los cambios en la posición del objetivo no afectarán a la comparación. Con esta información se puede determinar hacia qué lugar debe dirigirse la antena para que la señal reflejada tenga en todos los sentidos la misma intensidad de señal. Normalmente la señal se divide en cuatro (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), para así tener cubierto los cuatro planos del eje. Si el objetivo se encuentra en el medio de los cuatro lóbulos, no habrá diferencia de intensidad de señal [3].

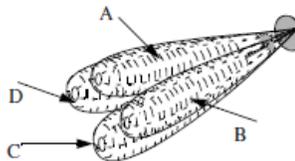


Figura 1-4: Patrón de un monopolso dividido en cuatro [3].

1.2.4 Seguimiento por GPS

Este método utiliza los datos de GPS entregados por el UAV, a través de los datos de telemetría. Con estos datos es posible mover los motores de la antena para poder apuntar hacia donde se encuentra el objetivo. Además se puede utilizar un módulo de GPS junto a la antena para proporcionar la posición de la antena, esto le da una mayor exactitud al momento de posicionar la antena [4].



Figura 1-5: Seguimiento por GPS.

1.2.5 Seguimiento por RSSI

Este método de seguimiento es muy parecido al seguimiento por monopolso, con la diferencia que este método no emite señal para realizar el seguimiento, sino que utiliza el RSSI proporcionado por un dispositivo. Para poder utilizar este tipo de seguimiento es necesario utilizar dos dispositivos provistos con RSSI, para así poder realizar una comparación y ver cual tiene mayor intensidad y orientar hacia ese lugar la antena, tratando de mantener una diferencia entre los dos RSSI casi nula [1].



Figura 1-6: Seguidor por RSSI

1.3 Soluciones en el mercado

En el mundo de los UAVs existen varios sistemas de rastreo, se mencionarán algunos de estos sistemas y se realizará una pequeña descripción de su funcionamiento.

1.3.1 MarcusUAV Corp

La empresa Marcus UAV Corp. ha desarrollado su propio UAV, con el cual da servicio a empresas como fotometría, levantamiento de terreno, entre otras opciones [5].

Marcus UAV ha creado su propio sistema de antena tracker compatible solo con UAV. Este sistema es presentado en dos formatos:

1. Antena Tracker de mediano alcance.
2. Antena Tracker de largo alcance.

Antena Tracker de mediano alcance

El sistema de antena tracker de mediano alcance de Marcus UAV Corp. (Figura 1-7) está diseñado para proporcionar lo último en portabilidad. Este sistema de seguimiento permite una transmisión de alta calidad de vídeo y telemetría, entre el UAV y la estación de control en tierra.

El sistema ha demostrado la capacidad de proporcionar vídeo en tiempo real de calidad en un rango de hasta 9 millas.

El funcionamiento de esta antena tracker es a través de los datos de telemetría transmitidos desde el UAV que se encuentra en vuelo. Un receptor en tierra, con una antena omnidireccional de 8 [dBi] recibe los datos de telemetría y acciona el mecanismo para que la antena receptora apunte hacia el UAV.

Esta antena tracker está diseñada para soportar altas ráfagas de viento. El mecanismo encargado de realizar el movimiento horizontal/vertical está asegurado a un trípode extremadamente robusto y resistente. El trípode se puede elevar para su funcionamiento, mientras que este no se ocupa, puede reducirse para su fácil transporte.

El software necesario para su funcionamiento viene incluido. La antena tracker puede ser configurada en menos de 5 minutos, quedando lista para su funcionamiento.



Figura 1-7: Antena tracker de mediano alcance [5].

Antena Tracker de largo alcance

Esta antena tracker de largo alcance permite transmitir video de alta definición y telemetría hasta 30 millas. Consta con un GPS integrado y una brújula electrónica que le permite obtener su ubicación y saber hacia qué dirección apuntar mientras el UAV se encuentra en vuelo, incluso si la antena tracker está montada sobre un barco y/o un vehículo en movimiento [5]. Todo el sistema está montado sobre un trípode de fibra de carbono de peso ligero para facilitar su transporte.

Para poner en marcha la antena, basta con solo conectar el puerto de telemetría que se encuentra en controlador de vuelo y al instante la antena empezara a recibir los datos de telemetría, con los cuales podrá direccionar la antena hacia el UAV.



Figura 1-8: Antena Tracker de largo alcance [5].

1.3.2 Ebention

Empresa relacionada con el desarrollo y construcción de componentes UAVs. Cuenta con dos divisiones: Veronte, pilotos automáticos y equipos para sistemas no tripulados, y NM&, desarrollando plataformas no tripuladas listas para operar [6].

Veronte Tracker

Esta división cuenta con una antena de seguimiento (Figura 1-9) alto rendimiento diseñada específicamente para las aplicaciones más exigentes. Los actuadores integrados permiten apuntar la antena con una precisión única y de forma completamente autónoma. La altura y la orientación dada a la antena hacen el dispositivo perfecto para operaciones de largo alcance.

El diseño del sistema se ha centrado en desarrollar un producto altamente flexible, compatible con configuraciones personalizadas. La plataforma integra una antena GPS y permite fijar una o dos antenas para el enlace de video o datos de acuerdo a las necesidades del operador. El sistema es compatible tanto con antenas tipo patch como parabólicas, para obtener el mejor rendimiento durante la operación. El trípode es intercambiable y regulable en altura, de acuerdo a la misión requerida.

Desmontable en tres partes para facilitar su transporte y almacenamiento. El trípode es completamente desmontable mediante el mecanismo de liberación rápida. Desenroscando la antena, se podrá almacenar la plataforma de movimiento. Un maletín de transporte personalizado puede ser adquirido con el sistema a fin de facilitar su transporte [6].



Figura 1-9: Antena de Seguimiento Veronte [6].

1.3.3 MFD AAT Antena de seguimiento automático

Este sistema de antena de seguimiento automático (Figura 1-10) se diseñó para resolver el problema de recibir imagen en tiempo real de buena calidad.

Para poder utilizar ese dispositivo es necesario instalar un módulo de TeleFlyOSD en el UAV, este módulo viene incluido en el sistema de antena de seguimiento. Este dispositivo lee los datos de GPS y envía la información por el canal de audio del transmisor de video. Con esta información recibida por la antena receptora de video ubicada en tierra, el controlador integrado procesa los datos de GPS recibidos y mueve los servos hacia donde se dirige el UAV.

Basta con posicionar el MDF AAT en cualquier parte y este empezara a funcionar, ya que no necesita un trípode para ser montado, puede ser posicionado directamente en el suelo y funcionara de todas formas [7].



Figura 1-10: Antena de Seguimiento Automático [7].

1.3.4 Arkbird-AAT Antena de seguimiento automático

Este sistema de seguimiento automático, presenta el mismo funcionamiento que el modelo expuesto en 1.3.3. A través de un módulo de OSD que captura la información de GPS proporcionado por el UAV, esta información es transmitida por el canal de audio hacia el receptor de video ubicado en tierra. Al recibir la información, un controlador procesa la información de GPS y direcciona la antena hacia lugar donde se encuentra el UAV [8].



Figura 1-11: Antena de Seguimiento Automático Arkbird [8].

1.3.5 Wave Relay® Sistema de Antena de Seguimiento

Wave Relay es un sistema de antena de seguimiento que se basa en la comunicación MANET, esta comunicación es capaz de transmitir voz datos y videos. Este sistema cuenta con un radio Router Quad el cual es el encargado de controlar la dirección de movimiento. Al ser un componente de MANET este sistema de seguimiento actúa como extensión de la red existente y permite mayores distancias.

Este sistema está realizado para sistemas de comunicación basados en MANET, normalmente utilizados por las fuerzas armadas [9].

Es de fácil armado y transporte, utilizando una maleta para su almacenamiento y transporte.



Figura 1-12: Sistema de Antena de seguimiento Wave Relay [9].

1.4 Solucion propuesta en base al estado del arte

Una vez revisadas y analizadas las opciones de sistemas que hay, actualmente, disponibles en el mercado, considerando las restricciones de espacio y peso que impone el diseño del UAV, se tomó la decisión de realizar el rastreador de antena, a través de la técnica de Received Signal Stranght Indication (RSSI) o Indicador de Fuerza de la Señal Recibida, en español, ya que con esta técnica no es necesario instalar algún dispositivo extra sobre el UAV, dando la facilidad de ocupar este rastreador de antena en cualquier UAV que transmita video en 5.8 [GHz].

2 Solución y marco teórico

En este punto, además de la solución propuesta, se darán a conocer todos los componentes que se utilizarán para desarrollar el sistema rastreador de antena que se ha elegido. Además se expondrá su algoritmo de funcionamiento.

2.1 Solución propuesta

Al realizar el rastreador de antenas por RSSI, su funcionamiento será a través del enlace de video. Éste enlace será de video análogo de 5.8 [GHz], con lo cual se evitará utilizar otro sistema de comunicación entre el UAV y la estación base.

Teniendo presente que el rastreador de antenas será utilizado en el UAV Chercán, fabricado por la empresa SISDEF (ver Figura 2-1), el que ya cuenta con un enlace de video análogo de 5.8 [GHz].



Figura 2-1: UAV Chercán, Fabricado por SISDEF [10].

Por otra parte, sobre el UAV se encuentra un transmisor de video Iftron Mondo Xstream 1.5 [W], el cual utiliza una antena omni-direccional de 3 [dBi] o 5 [dBi]. En la estación base el receptor de video es un Iftron Yellow Jacket 5.8 Pro (ver Figura 2-2).



Figura 2-2: Transmisor Iftron Mondo Xtream 1.5 [W] [11], Receptor Iftron Yellow Jacket 5.8 [GHz] Pro [12].

El valor o los valores del indicador de RSSI se procesaran en una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexible en este caso será Arduino uno, donde mediante un algoritmo, comparara la intensidad de la señal entre las antenas de los receptores de video y éste dará la instrucción a los servo motores de moverse para que el sistema rastreador de antena se posicione en la dirección donde la antena tenga la mayor intensidad de señal, tratando de que la diferencia entre las intensidades de las señales sean cercano a cero o cero.

2.2 Funcionamiento del rastreador de antena

La señal emitida por el transmisor de video ubicado sobre el UAV, será recibida por los receptores de video, que estarán distribuidos en forma de cruz como muestra la Figura 2-3. Al tener esta configuración se asegura de tener cubierto el plano horizontal y vertical.

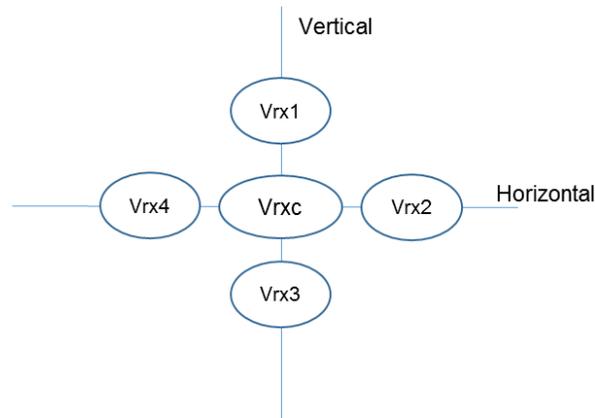


Figura 2-3: Distribución de receptores con sus antenas.

Para realizar la comparación de la potencia de señal recibida de cada receptor, se conectará esta señal entregada por el receptor a un módulo de procesamiento, en este caso un Arduino uno. Éste será el encargado de procesar el voltaje entregado por los cuatro módulos receptores. Esta potencia al ser una señal analógica será conectada a los pines de entrada o salida analógica del Arduino, como se muestra en la Figura 2-4.

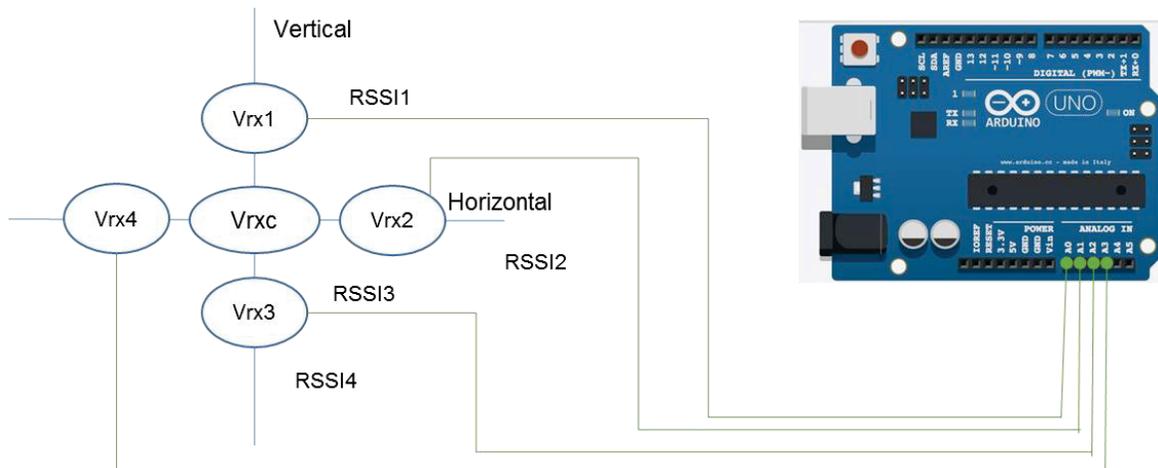


Figura 2-4: Conexión de RSSI con Arduino.

Un algoritmo será el encargado de realizar la comparación de las cuatro potencias recibidas. El fin del algoritmo será mantener siempre constante la misma potencia de recepción en las cuatro antenas helicoidales.

Si la antena que está ubicada a la derecha tiene mayor potencia de señal recibida que la que está ubicada en la izquierda, el algoritmo tendrá que accionar un motor, el que moverá el arreglo de antenas hasta que la potencia de la antena de la izquierda sea igual o parecida a la potencias de la antena de la derecha. Lo mismo pasará con las antenas receptoras ubicadas arriba y abajo, ya que si una de las dos tiene mayor potencia de señal recibida que la otra, el algoritmo tendrá que accionar un motor para mover el arreglo de antenas hasta que ambas tengan la misma o similar potencia de señal recibida. Para lo anterior se utilizarán dos servos motores, los cuales serán accionados por el Arduino, el cual cuenta con salidas pwm que permitirán un manejo más fácil de ellos.

Así mismo, el Arduino será el encargado de accionar la pantalla display donde se mostrará información y datos relevante para el usuario, tales como, nivel de RSSI de cada módulo receptor, dirección en que se estará moviendo el rastreador de antena, entre otros.

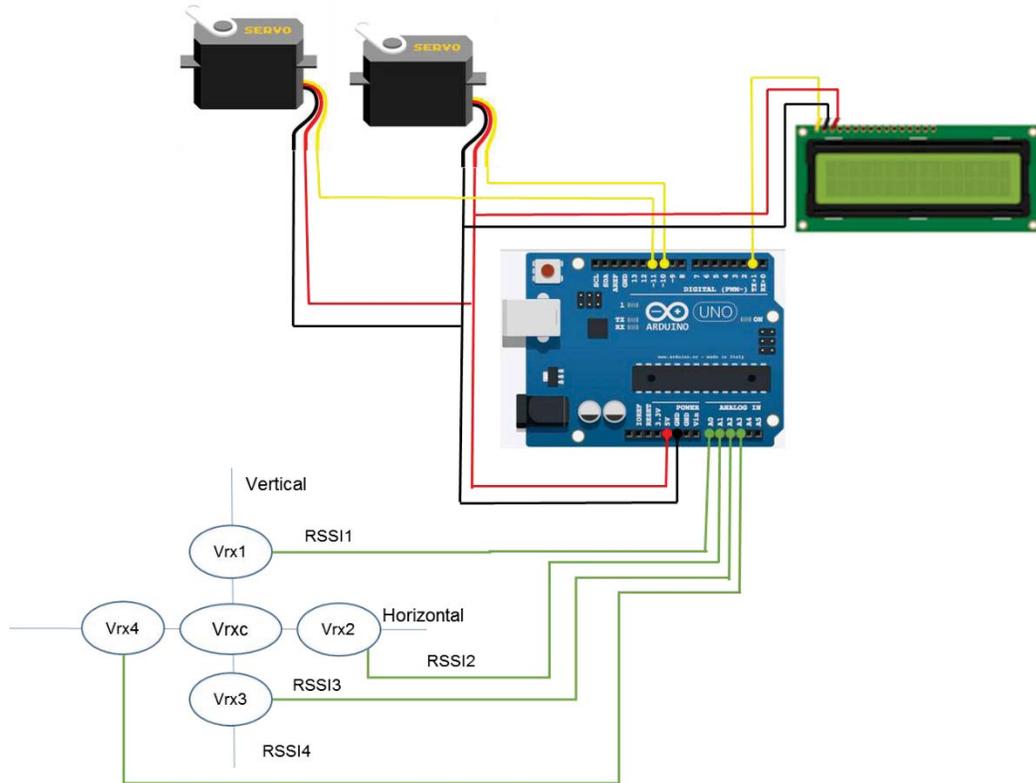


Figura 2-5: Interconexión de módulos receptores, servo motores y pantalla display, con Arduino.

Los servomotores serán los encargados de mover el sistema rastreador de antena y serán accionados automáticamente desde el Arduino, tras la decisión tomada por el algoritmo (Figura 2-5). Se utilizarán dos servos motores de 180° de giro, donde uno se moverá en forma horizontal y el otro de forma vertical.

El utilizar dos servos de 180° de giro, se podrá detectar el error de movimiento en la horizontal que se producirá si el servo del eje vertical pasa los 90°, debido a que el movimiento horizontal será contrario al movimiento que tenía antes de pasar los 90°. Para lograr esto, será necesario introducir en el algoritmo una línea de código, la que permitirá que al momento de pasar los 90°, el movimiento del motor del horizonte sea invertido.

2.2.1 Resumen de componentes

Con la información antes descrita, se puede crear esta tabla de resumen con la cantidad de componentes necesarios para la creación del sistema rastreador de antenas.

Tabla 2-1: Lista de componentes.

Componente	Cantidad
Receptor de video 5.8 [GHz]	4
Servo motor de alto torque	2
Arduino Uno	1
LCD Display, serial enabled 20x4	1
Antena Helicoidal 5.8 [GHz]	4

2.3 Software de control

El sistema rastreador de antena para que pueda funcionar, necesita de un sistema que se encargue de este proceso. El software de control es el encargado de iniciar todos los valores y variables necesarias para que el sistema pueda funcionar, como se aprecia en el diagrama de flujo (Figura 2-6). Contiene un número de módulos necesarios para procesar información y de esta forma el rastreador de antenas pueda funcionar. (Figura 2-7).

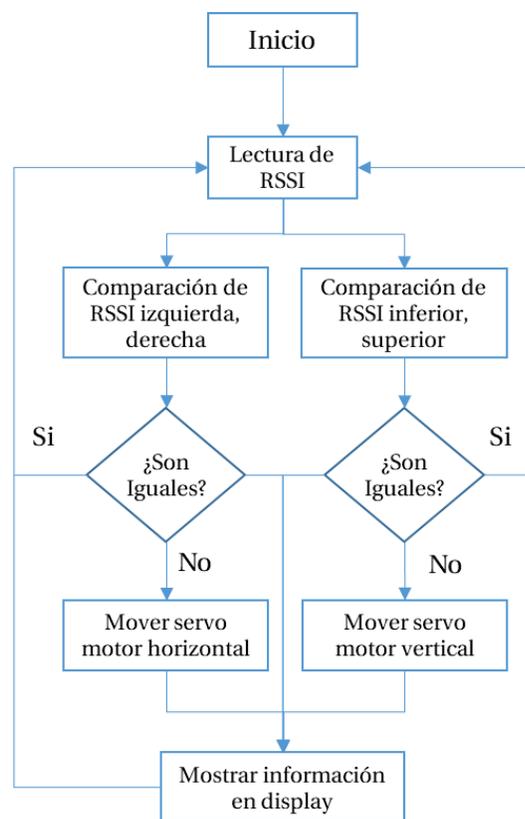


Figura 2-6: Diagrama de flujo.



Figura 2-7: Sistema de control.

El software de control mirado de más cerca se muestra en la Figura 2-8, donde se puede ver que los módulos interconectados en conjunto hacen que todo el sistema pueda funcionar y procesar toda la información que es necesaria para el funcionamiento.

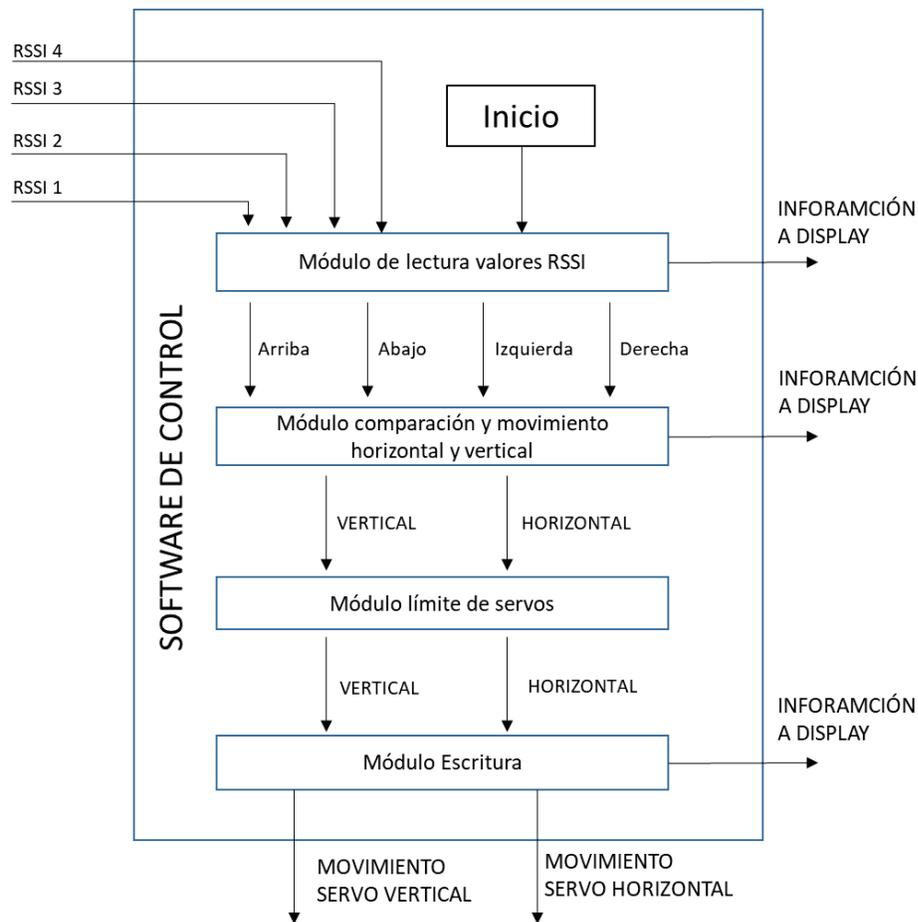


Figura 2-8: Sistema de control modular.

2.3.1 Módulo de lectura de valores RSSI

El rastreador de antenas cuenta con cuatro receptores de video. Cada receptor tiene un pin que entrega información de la intensidad de la señal o RSSI. Esta información será tomada por el módulo de lectura de valores RSSI asignando cada valor de RSSI a una variable del módulo de lectura. Cada variable corresponde a una dirección en el plano cartesiano, esto es arriba, abajo, izquierda, derecha. Además el mismo módulo se encargará de enviar la información de los valores asignados a las variables, para ser mostrados en un display.

La salida del módulo son los valores asignados a las variables de dirección recién mencionadas (Figura 2-9).



Figura 2-9: Modulo de lectura de valores RSSI

2.3.2 Módulo comparación y movimiento horizontal y vertical

Módulo encargado de decidir en qué dirección se moverá el rastreador de antena. Toma los valores entregados por el módulo de lectura de valores RSSI y realiza una comparación entre los valores de arriba-abajo e izquierda-derecha, determinando en qué dirección se deberá mover según el resultado que se obtenga de la comparación.

Este módulo también tiene como función cambiar el sentido de movimiento horizontal si es que el movimiento vertical pasa por su centro de movimiento. Para ejemplificar de mejor forma esta función, si el movimiento horizontal va hacia la derecha y el movimiento vertical pasa por su centro de movimiento, el sentido horizontal se invierte y empieza a girar hacia la izquierda.

La salida del módulo de comparación y movimiento, es la dirección en que se moverá el rastreador de antena, esta información de movimiento horizontal y vertical también es enviada para que sea mostrada por un display por el mismo modulo (Figura 2-10).



Figura 2-10: Módulo Comparación y Movimiento Horizontal y Vertical

2.3.3 Módulo límite de servo motores

Módulo encargado de que los servo motores no actúen más allá del rango al cual están hechos. Este módulo obtiene los valores de salida del módulo movimiento horizontal y vertical y los compara con el valor mínimo y máximo para cada servo motor.

El valor vertical es comparado con el valor mínimo y valor máximo que puede tomar esa variable y si el valor vertical corresponde a un valor menor que el mínimo se le asigna el valor mínimo que puede tomar y si el valor es mayor al valor máximo, se le asigna el valor máximo que puede tomar. De igual manera pasa con el valor horizontal donde se realiza la misma comparación antes descrita.

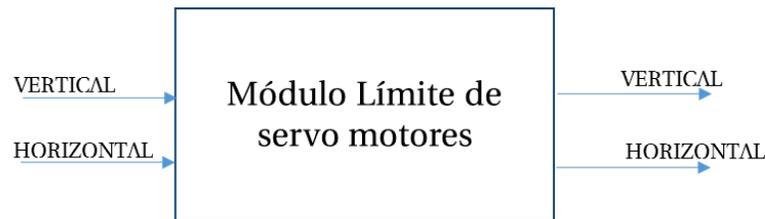


Figura 2-11: Modulo Límite de servo motores

2.3.4 Módulo de escritura

Módulo encargado de enviar la información hacia los servo motores para que se puedan mover, la información es obtenida desde el módulo límite de servo motores el cual tiene los valores de movimiento de cada servo motor. Esta información también es enviada para ser mostrada en un display.



Figura 2-12: Módulo Escritura.

3 Desarrollo

En este capítulo se describirá como se realizó la plataforma de prueba donde irán instaladas las antenas, gracias a esto se pudo determinar de qué porte será la maqueta entera del rastreador y así poder determinar los servomotores que se utilizarán en el movimiento del rastreador de antena, Además de las mediciones y pruebas realizadas para ver el desempeño mecánico de este mismo.

3.1 Platarforma de pruebas

Es necesario utilizar una plataforma de prueba donde se instalarán las antenas. Para decidir de qué porte será la base de prueba, se tomó en consideración la longitud de onda $[\lambda]$ de las antenas.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{5.8 \times 10^9} = 0.05172 [m] \quad (3-1)$$

Para que las antenas funcionen de forma separada y no como un arreglo de antenas y que, además, no exista interferencia entre ellas, es recomendable que estén separadas a 4λ ; información consultada al profesor guía, razón por la cual se eligió una base cuadrada de 40×40 [cm], cuya superficie permite realizar mediciones a distintas distancias entre antenas.

En el centro de la base, se pegó un velcro en forma de cruz (Figura 3-1), lo que facilitó el movimiento de las entenas, además se cuadrículó para tener las distinta medidas equidistantes desde el centro hacia los extremos.

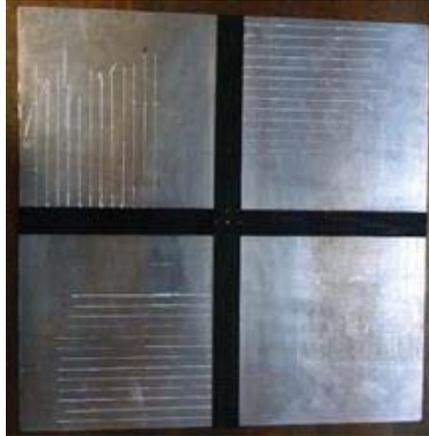


Figura 3-1: Base de prueba.

3.2 Determinacion de distancia entre antenas

Definir a qué distancia tienen que estar las antenas, para que éstas funcionen, cada una, como una antena por sí sola y no como un arreglo, se realizaron medidas y se hicieron pruebas de ensayo y error para determinar esto.

Estas mediciones fueron realizadas en la Universidad Federico Santa María, con un instrumento llamado Vector Network Analyzer. (VNA) marca R&S ZVL. Con un rango de frecuencia de 9 [kHz] a 13.6 [GHz].

Es un instrumento capaz de analizar las propiedades de la radiofrecuencia, especialmente aquellas propiedades asociadas con la reflexión y la transmisión de señales eléctricas, conocidas como parámetros de dispersión (Parámetros-S).



Figura 3-2: R&S ZVL Vector Network Analyzer [13].

3.2.1 Mediciones realizadas

Para definir la distancia a la cual se ubicarán en forma definitiva las cuatro antenas, se realizaron diferentes mediciones a distintas distancias, desde el centro de la base al centro de las antenas.

- Lo primero que se realizó, fue medir el parámetro $|S_{11}|$ que mide la relación de onda que es reflejada en comparación con la cantidad de potencia que se está aplicando en el puerto uno [14] de cada antena. Este parámetro también es conocido como el coeficiente de reflexión.



Figura 3-3: Antena

El resultado de la mediciones de las cuatro antenas, nos arrojó que todas están adaptadas para la frecuencia de 5.8 [GHz], obteniendo un valor menor a -10 [dB].

- Lo segundo realizado, fue medir el parámetro $|S_{21}|$; que permite medir la relación de onda recibida en el puerto 2 en comparación con la enviada por el puerto 1 [14], también conocido como coeficiente de transmisión directa, entre cada antena a una distancia de 7 [cm] desde el centro de la base al centro de cada antena. Ver Figura 3-4 .

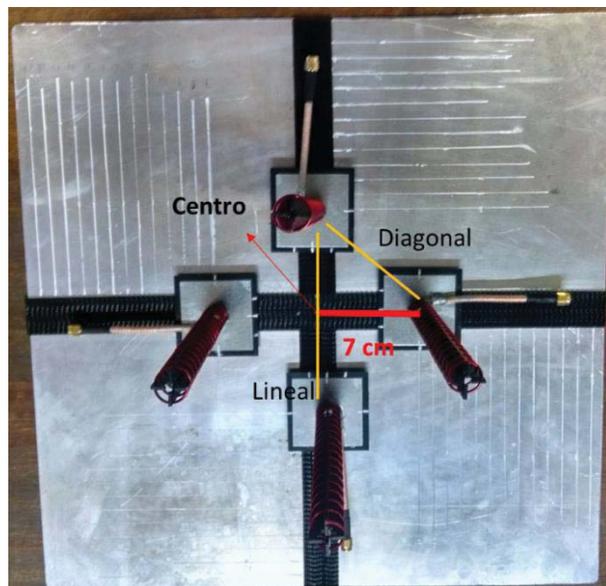


Figura 3-4: Base con disposición de antenas a 7 (cm).

El resultado obtenido a esta distancia fue de -40 [dB] entre cada antenna lineal y de -30 [dB] entre cada antenna diagonal.

- La tercera medición realizada, fue medir el parámetro $|S_{21}|$ a una distancia de 10 [cm] desde el centro de la base al centro de cada antenna. Ver Figura 3-5

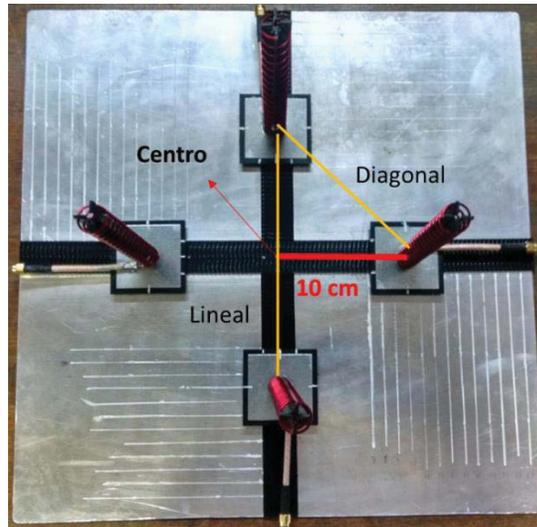


Figura 3-5: Base con disposición de antenas a 10 (cm).

El resultado obtenido a esta distancia fue -40 [dB] entre cada antenna diagonal y de -50 [dB] entre cada antenna lineal.

- La cuarta medición realizada, fue medir el parámetro $|S_{21}|$ a una distancia de 17 [cm] desde el centro de la base al centro de cada antenna. Ver Figura 3-6

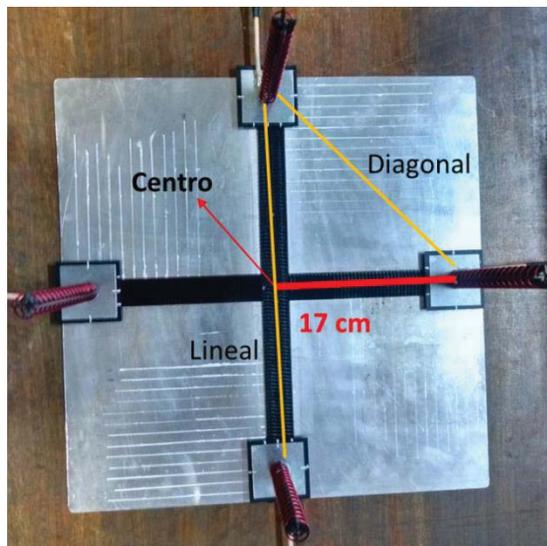


Figura 3-6: Base con disposición de antenas a 17 (cm).

El resultado obtenido a esta distancia fue -50 [dB] entre cada antena diagonal y de -55 [dB] entre cada antena lineal.

El resumen de los datos obtenidos se detalla en la Tabla 3-1:

Tabla 3-1: Resumen de datos obtenidos.

Parámetro	Distancia [cm]	Valor [dB]	Valor entre antenas lineales [dB]	Valor entre antenas diagonales [dB]
S11	-	-10 a -20	-	-
	7	-	-40	-30
S21	10	-	-50	-40
	17	-	-55	-50

Gracias a estos datos obtenidos, se tomó la decisión de posicionar las antenas a una distancia de 17 [cm] desde el centro de la plataforma hasta el centro de cada antena, asegurándose que la potencia recibida por la antena 2 en comparación a la 1 es muy pequeña, obteniendo así un funcionamiento unitario de cada antena.

3.3 Diseño de la estructura del rastreador de antena

Para diseñar el soporte del rastreador de antena, se utilizó el software llamado Solidworks. Este software permite realizar figuras en 3D, dando la posibilidad de dibujar el prototipo de rastreador de antena. Además nos permite visualizar de mejor forma cómo será el modelo final, sin haberlo construido. Esto es de gran ayuda ya que se pueden realizar cambios y ver cómo afecta en el diseño.

Gracias a la plataforma de prueba utilizada para la instalación de las antenas, se tomó como referencia sus medidas para así crear el prototipo que contuviera las medidas de la plataforma, lo que nos arrojó como medidas de diseño los siguientes valores de la Tabla 3-2:

Tabla 3-2: Dimensiones del prototipo.

Altura [mm]	Largo [mm]	Ancho [mm]
431.30	630	630

Donde altura está representado por dY en color verde en la Figura 3-7.

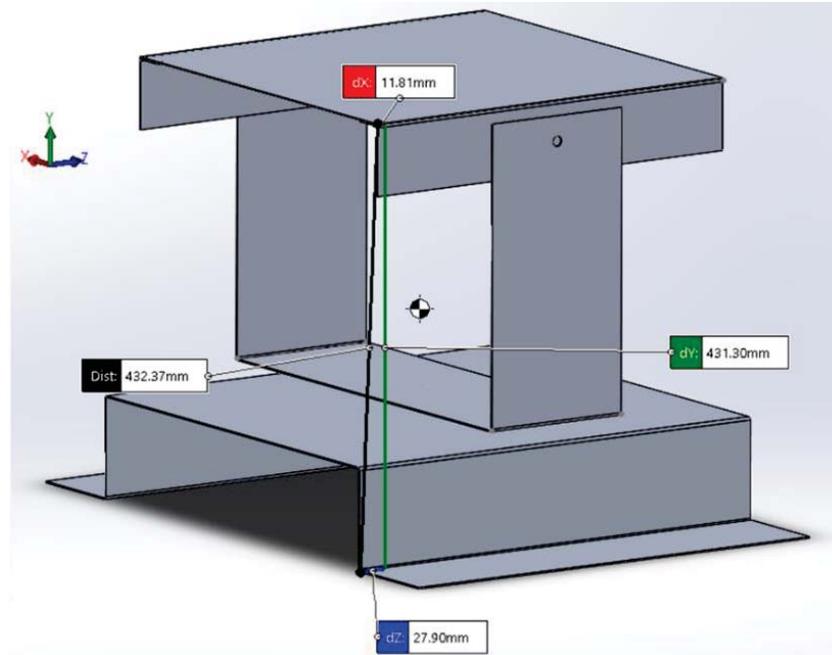


Figura 3-7: dY altura del rastreador de antena.

El largo y ancho están representados por dX en color rojo como se ve en la Figura 3-8 y tienen el mismo valor, ya que la base es cuadrada.

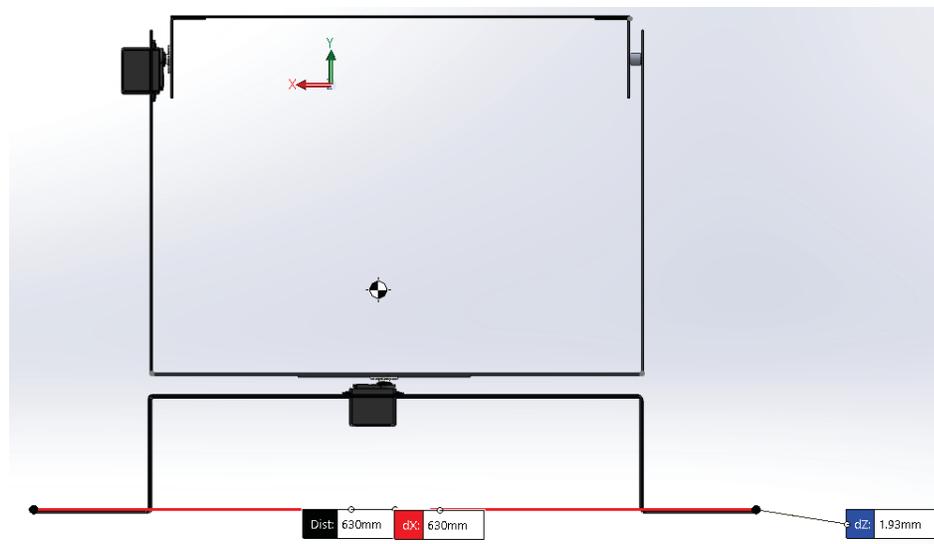


Figura 3-8: Largo y ancho del rastreador de antena.

3.4 Determinación de servo motor con el software

Para determinar el servo motor que se utilizara en el sistema rastreador de antena, es necesario calcular el torque estático que hay en los puntos de rotación que tendrá el rastreador. Donde los datos necesarios para el cálculo son masa [kg] y distancia [cm].

$$\text{Torque estatico} = \text{masa [kg]} * \text{distancia [cm]} \quad (3-2)$$

Para esto hacemos uso del software que cuenta con una herramienta que permite utilizar material real considerando sus condiciones físicas, como es el aluminio, donde se puede obtener un peso cercano al real del prototipo y las distintas distancias que hay desde el eje de rotación al centro de masa, donde la rotación esperada por cada eje es de 180°. Con estos datos se podrá calcular el toque estático necesario para poder hacer girar los puntos de rotación que el rastreador de antenas tendrá.

3.4.1 Cálculo de torque estático en el eje x

Para calcular el torque estático el eje x, se necesita conocer la distancia perpendicular al eje de rotación y la masa que tiene la plataforma que sostiene ese eje. Para esto se utilizó la información que proporciona el software.

En la Figura 3-9 se muestran las distancias que hay desde el eje de rotación hasta el centro de masa de esta plataforma. El valor que se utilizará es $dY = 26.01$ [mm].

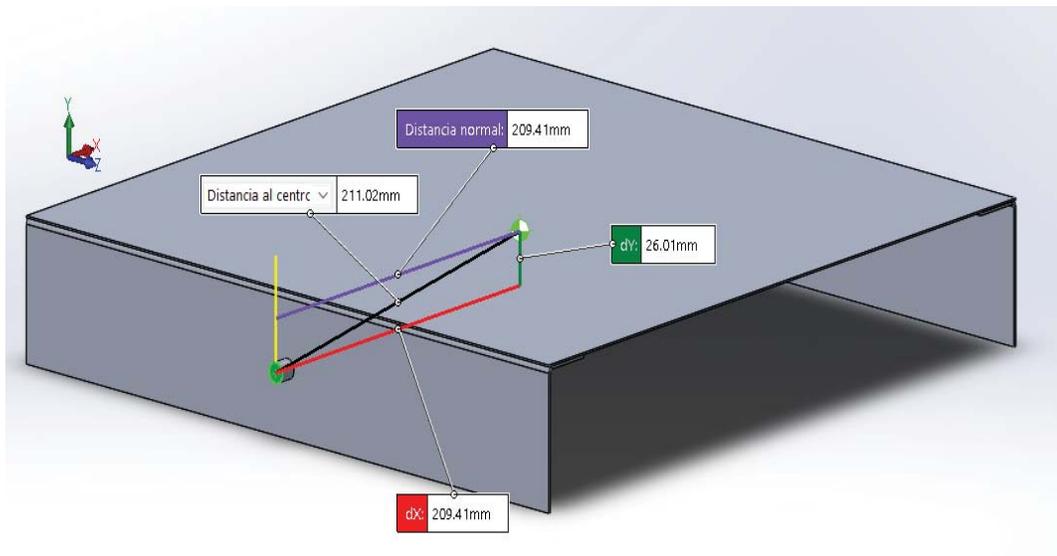


Figura 3-9: Distancias desde el eje de rotación hasta el centro de masa de la plataforma.

Además, el software permite encontrar o mostrar un valor aproximado de la masa que esta plataforma tendría. Como se aprecia en la Figura 3-10, este valor es de 0.75 [kg].

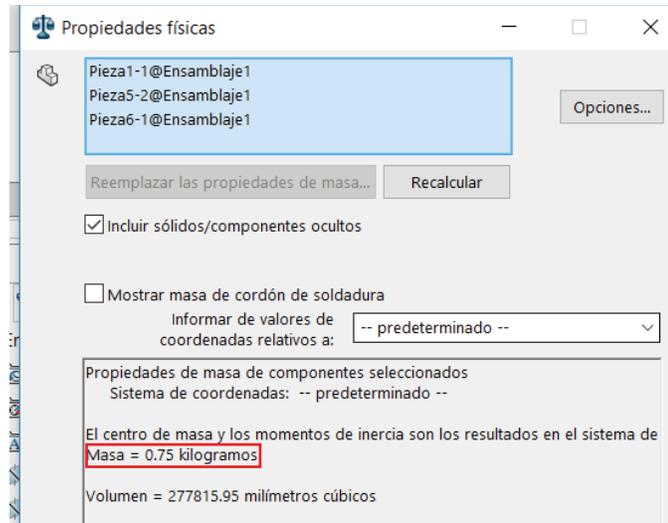


Figura 3-10: Masa de la plataforma.

Sobre esta plataforma van montados los cuatro receptores de video, donde cada uno tiene una masa de 0.085 [kg] [15].

Tabla 3-3: Masa de receptores

Dispositivo	Masa unidad [kg]	Masa conjunto (4 unidades) [kg]
Receptor de video	0.085	0.34

Además cada receptor lleva una antena helicoidal que tiene una masa de 0.00085 [kg] [16].

Tabla 3-4: Masa de las antenas.

Dispositivo	Masa unidad [kg]	Masa conjunto (4 unidades) [kg]
Antena helicoidal	0.00085	0.0034

En la parte posterior de la plataforma está instalado un Arduino uno, con una masa de 0.025 [kg] [17].

Con estos cuatro valores se puede calcular el torque estático (3-3).

$$\text{Torque estatico} = (\text{masa plataforma} + \text{masa receptores} + \text{masa antenas} + \text{masa arduino})[\text{kg}] * \text{distancia}[\text{cm}] \quad (3-3)$$

$$\text{Torque estatico} = (0.75 + 0.34 + 0.0034 + 0.025)[\text{kg}] * 2.601[\text{cm}]$$

$$\text{Torque estatico} = 2.909 [\text{kg cm}]$$

Este valor es utilizado como referencia para seleccionar el servomotor. Teniendo presente que se trata de un prototipo, las variables dinámicas se pueden absorber sobre-dimensionando el torque

estático unas 3 o 4 veces para tener la seguridad de que las variables dinámicas no afectarán el funcionamiento óptimo del servomotor.

En atención a lo anterior, el servomotor seleccionado para este eje de rotación, es un servo motor de 12 [kg·cm] de 180° de giro. Con una velocidad de giro de 0.17/60 [s/grados] a 4.8 [V] sin carga [18].

3.4.2 Calculo de torque estático en el eje y

Al igual que en el cálculo del torque estático el eje x, para el eje y se necesita conocer la distancia perpendicular al eje de rotación y la masa que tendrá la plataforma que sostiene ese eje. Para esto se utilizó la información que proporciona el software.

En la Figura 3-11, se muestran las distancias que hay desde el eje de rotación hasta el centro de masa de esta plataforma. La distancia que se utilizara es $dX = 16.86$ [mm].

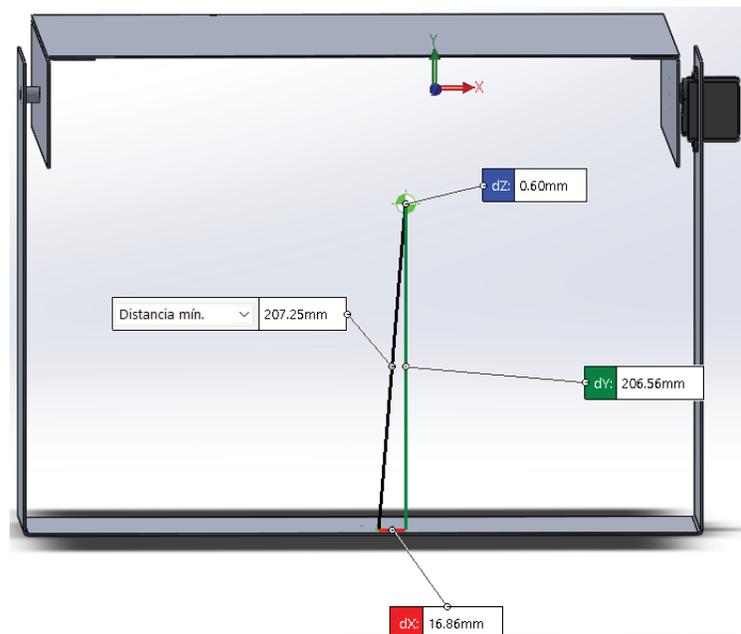


Figura 3-11: Distancias desde el eje de rotación hasta el centro de masa de la plataforma.

Además, el software permite determinar un valor aproximado de la masa que esta plataforma tendría. Como se aprecia en la Figura 3-12, este valor es de 1.66 [kg].

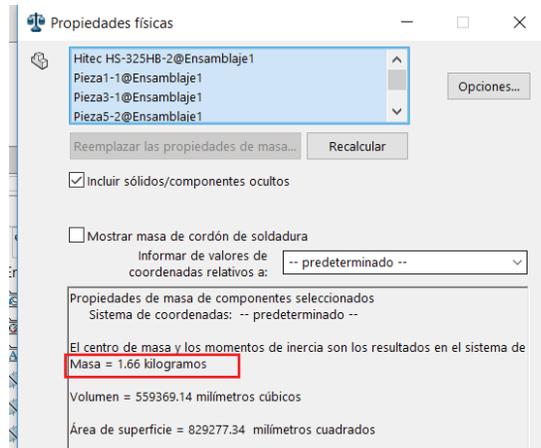


Figura 3-12: Masa de plataforma.

A esta masa hay que sumarle la de los receptores, las antenas y la masa del Arduino.

Con estos dos valores se puede calcular el torque estático (3-4).

$$\text{Torque estatico} = (\text{masa plataforma} + \text{masa receptores} + \text{masa antenas} + \text{masa arduino})[\text{kg}] * \text{distancia}[\text{cm}] \quad (3-4)$$

$$\text{Torque estatico} = (1.66 + 0.34 + 0.0034 + 0.025)[\text{kg}] * 1.686[\text{cm}]$$

$$\text{Torque estatico} = 3.4198 [\text{kg cm}]$$

Este valor es utilizado como referencia para seleccionar el servomotor. Nuevamente considerando que se trata de un prototipo, las variables dinámicas se pueden absorber sobredimensionando el torque estático unas 3 o 4 veces para tener la seguridad de que las variables dinámicas no afecten el funcionamiento óptimo del servomotor.

En consecuencia el servomotor seleccionado para este eje de rotación, es un servomotor de 20 [kg-cm] de 180° de giro. Con una velocidad de giro de 0.16 / 60 [s/grados] a 5 [V] sin carga [19].

Si el rastreador de antena necesita realizar cambios bruscos debido a que el UAV realizó cambios de dirección, esto se corrige en el programa que se carga a Arduino, ya que es este módulo el que controla la velocidad y el sentido de movimiento de los servomotores.

Toda la información de la determinación de los servo motores a utilizar, fue consultada al ingeniero mecánico de la empresa SISDEF, donde el avaló los resultados aquí obtenidos.

3.5 Pruebas del software de control

Para saber si el software de control estaba funcionando de buena forma, se realizaron distintas pruebas.

- Prueba de software mediante arreglo:

La primera prueba en realizarse fue cargar un arreglo de números, donde se realizaron 4 arreglos distintos para así emular las cuatros señales de RSSI, con esto se quería comprobar si es que el software funcionaba de buena forma con estos valores cargados en el código.

- Prueba de software mediante potenciómetros:

Para poder evaluar de mejor forma es que se realizó una evolución en las pruebas, donde se agregaron potenciómetros como fuentes de las señales de RSSI, con estas entradas se podría emular de mejor forma las señales de RSSI y así poder apreciar el desempeño del software analizando valores en tiempo real.

Con las dos pruebas realizadas se pudo apreciar que el software funcionaba de buena forma, tanto con valores precargados y valores en tiempo real.

3.6 Valor RSSI en Arduino

En éste punto se detallará como Arduino lee los valores de RSSI en sus entradas analógicas.

- Receptor de video RC832:

El receptor de video RC832 (Figura 3-13), es un receptor de 40 canales, el cual permite recorrer toda la banda de los 5.8 [GHz]. Para la selección de canales y frecuencias distintas, se utilizan los botones de FR y CH para seleccionar la banda deseada.



Figura 3-13: Receptor RC832

En su interior cuenta con un módulo receptor rx5808 (Figura 3-14), donde el pin 6 de izquierda a derecha corresponde al pin RSSI. El voltaje de este pin es de 0.70 [V] a 1.9 [V].



Figura 3-14: rx5808 con pin RSSI.

- Valores en Arduino:

Arduino cuenta con seis entradas analógicas, estas entradas utilizan un convertidor análogo digital de 10 bit, con un voltaje de referencia de 5 [V]. Un voltaje de 0 [V], corresponde a 0 en el Arduino y un voltaje de 5 [V], corresponde a 1023.

Al recibir información el receptor de video, el valor observado en la pantalla serial de Arduino (Figura 3-15), muestra un valor de 397, que transformado a voltaje nos da 1.90 [V].

```

COM3 (Arduino/Genuino Uno)
RSSI IZQ: 386,96%
RSSI IZQ: 389,97%
RSSI IZQ: 394,99%
RSSI IZQ: 397,100%
RSSI IZQ: 397,100%
RSSI IZQ: 397,100%
RSSI IZQ: 395,99%
RSSI IZQ: 392,98%
RSSI IZQ: 388,96%
RSSI IZQ: 385,95%
RSSI IZQ: 385,95%
RSSI IZQ: 385,95%
RSSI IZQ: 385,95%
RSSI IZQ: 386,96%
RSSI IZQ: 386,96%
RSSI IZQ: 386,96%

```

Figura 3-15: Máximo valor RSSI.

Al apagar el transmisor de video y ver el voltaje que tiene el pin RSSI en la pantalla serial del Arduino, esta muestra un valor de 145, que en voltaje sería de 0.70 [V].

```

COM3 (Arduino/Genuino Uno)
RSSI IZQ:163, 9%
RSSI IZQ:163, 9%
RSSI IZQ:162, 9%
RSSI IZQ:161, 8%
RSSI IZQ:159, 8%
RSSI IZQ:161, 8%
RSSI IZQ:155, 6%
RSSI IZQ:153, 5%
RSSI IZQ:152, 5%
RSSI IZQ:152, 5%
RSSI IZQ:153, 5%
RSSI IZQ:152, 5%
RSSI IZQ:152, 5%
RSSI IZQ:152, 5%
RSSI IZQ:152, 5%
RSSI IZQ:150, 4%
RSSI IZQ:154, 6%
RSSI IZQ:150, 4%
RSSI IZQ:151, 5%
RSSI IZQ:151, 5%
RSSI IZQ:155.

```

Figura 3-16: Mínimo valor de RSSI.

3.7 Medición de RSSI de cada receptor

Realizar una medición de los voltajes de RSSI a cada receptor es importante, ya que esto nos ayudará a determinar si estos valores cambian al momento en que cada receptor empiece a funcionar.

3.7.1 Medición de valores de RSSI de los receptores de video

Teniendo presente que el valor de RSSI es un voltaje análogo que puede ser medido con tester, la medición de los valores de RSSI de cada receptor se realizó con el fin de determinar si este valor era afectado por distintas variables.

Las variables medidas fueron:

- Tiempo: La medición de esta variable permitió analizar el comportamiento del receptor en un determinado tiempo (sesenta minutos). Además permitió ver si en ese tiempo de funcionamiento afectaba al valor de RSSI.
- Temperatura: La medición de esta variable demostró si la temperatura aumentaba en el receptor de video a medida que pasaba el tiempo y si ésta alza de temperatura afectaba al valor de RSSI.
- Valor o voltaje máximo de RSSI: medición del valor de RSSI con el transmisor de video encendido.
- Valor o voltaje mínimo de RSSI: medición del valor de RSSI con el transmisor de video apagado.

Para empezar las mediciones se estableció un tiempo máximo, este valor fue de sesenta minutos. Durante ese tiempo se realizaron mediciones de las restantes variables, señaladas en párrafo anterior, donde la rutina fue:

1. Medir la temperatura de cada receptor y medir la temperatura ambiente.
2. Medir el RSSI mínimo, con transmisor de video apagado.
3. Encender transmisor de video y medir RSSI máximo.

Pasado cinco minutos se volvieron a repetir las mismas mediciones hasta completar los sesenta minutos. Con la información obtenida, se confecciono la Tabla 3-5:

Tabla 3-5: Valores obtenidos de las mediciones.

Tiempo [s]	Voltaje Max [V]	Voltaje Min [V]	Temperatura [°C]
0	1,692	0,776	27
300	1,694	0,776	27,7
600	1,677	0,774	27,8
900	1,678	0,774	27,6
1200	1,675	0,776	27,4
1500	1,683	0,775	27,3
1800	1,680	0,773	28
2100	1,681	0,774	28,1
2400	1,676	0,774	27,6
2700	1,671	0,774	28,2
3000	1,678	0,775	28,6
3300	1,678	0,774	27,6
3600	1,676	0,774	28,5

Para apreciar de mejor forma la información de Tabla 3-5, se confeccionaron los siguientes gráficos:

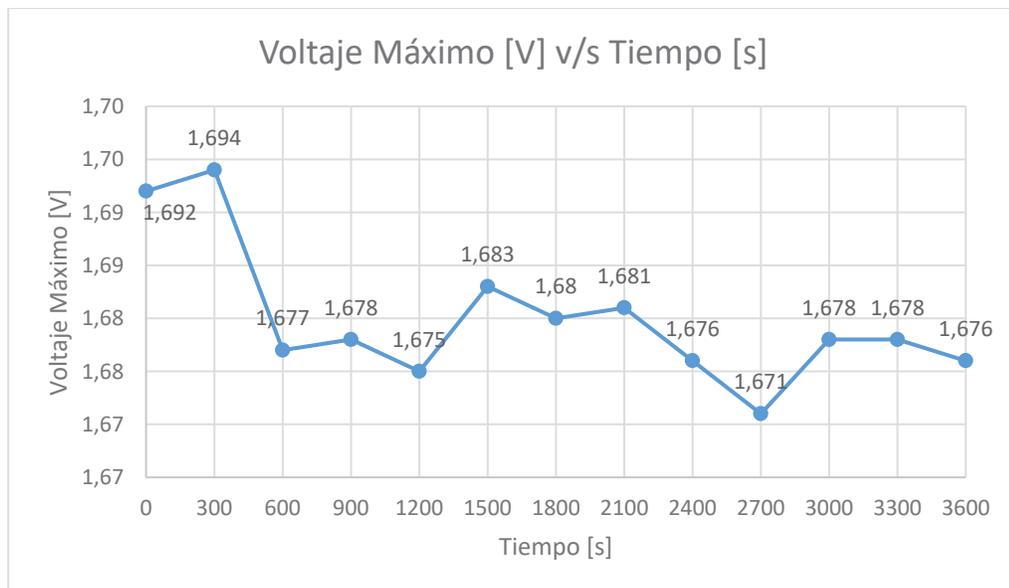


Figura 3-17: Variación de voltaje máximo con respecto al tiempo transcurrido.

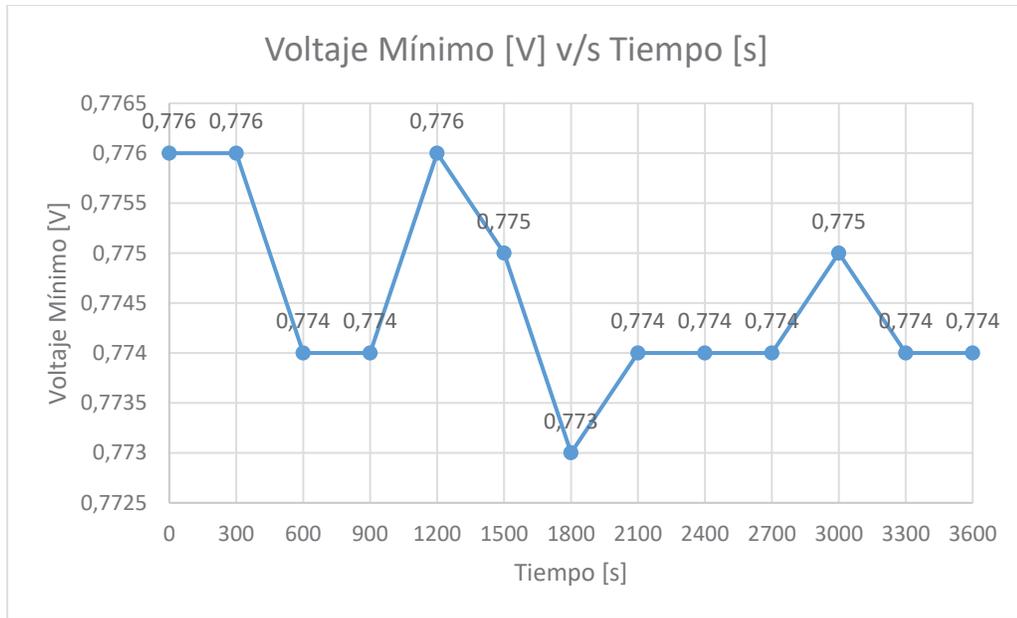


Figura 3-18: Variación de voltaje mínimo con respecto al tiempo transcurrido.

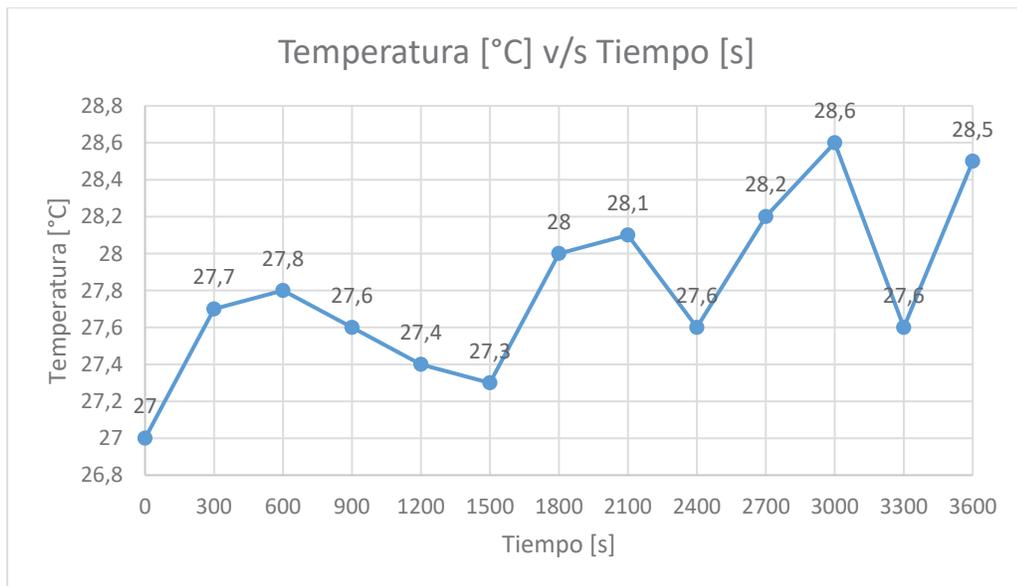


Figura 3-19: Variación de la temperatura con respecto al tiempo transcurrido.

Para conocer la variación de las variables en términos porcentuales, se consideró el valor de la medición cero como valor de referencia y se expresaron los valores de voltaje máximo, voltaje mínimo y temperatura como porcentaje, obteniendo como resultado los valores de la Tabla 3-6:

Tabla 3-6: Valores en términos de porcentaje

Tiempo [s]	Voltaje Max [%]	Voltaje Min [%]	Temperatura [%]
0	0,00	0,00	0,00
300	0,12	0,00	2,59
600	-0,89	-0,26	2,96
900	-0,83	-0,26	2,22
1200	-1,00	0,00	1,48
1500	-0,53	-0,13	1,11
1800	-0,71	-0,39	3,70
2100	-0,65	-0,26	4,07
2400	-0,95	-0,26	2,22
2700	-1,24	-0,26	4,44
3000	-0,83	-0,13	5,93
3300	-0,83	-0,26	2,22
3600	-0,95	-0,26	5,56

Para apreciar de mejor forma los resultados de la Tabla 3-6 se realizaron los siguientes gráficos:

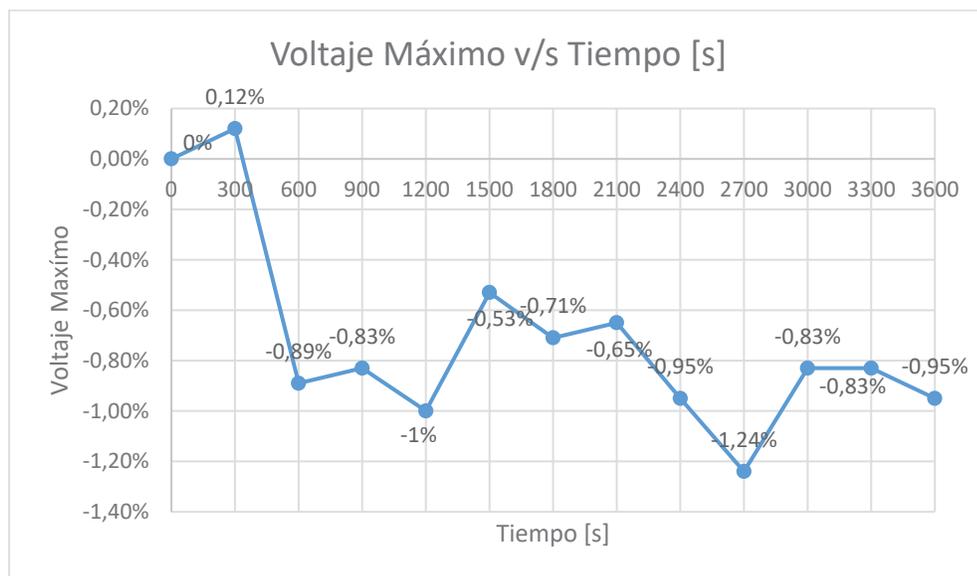


Figura 3-20: Variación del voltaje máximo en porcentaje con respecto al tiempo transcurrido.

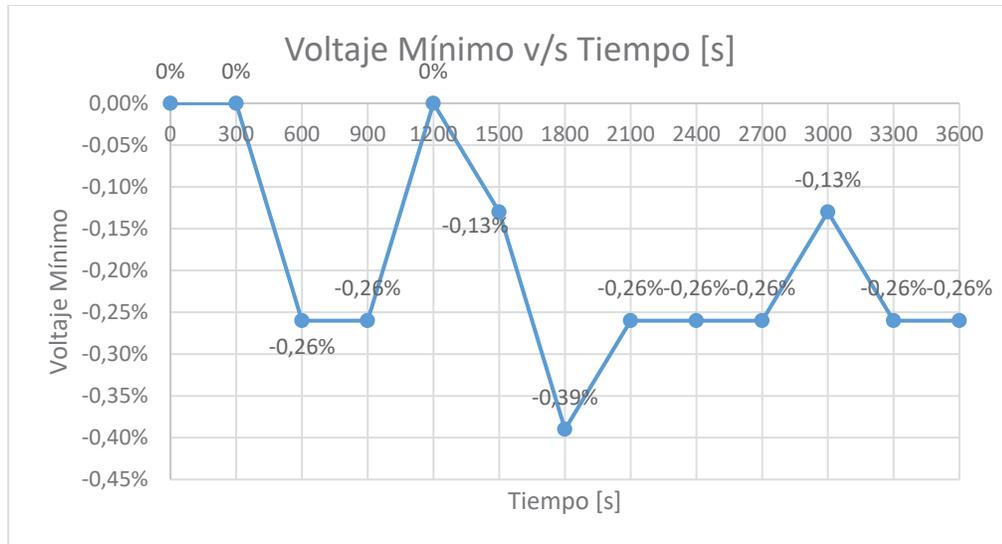


Figura 3-21: Variación de voltaje mínimo en porcentaje con respecto al tiempo transcurrido.

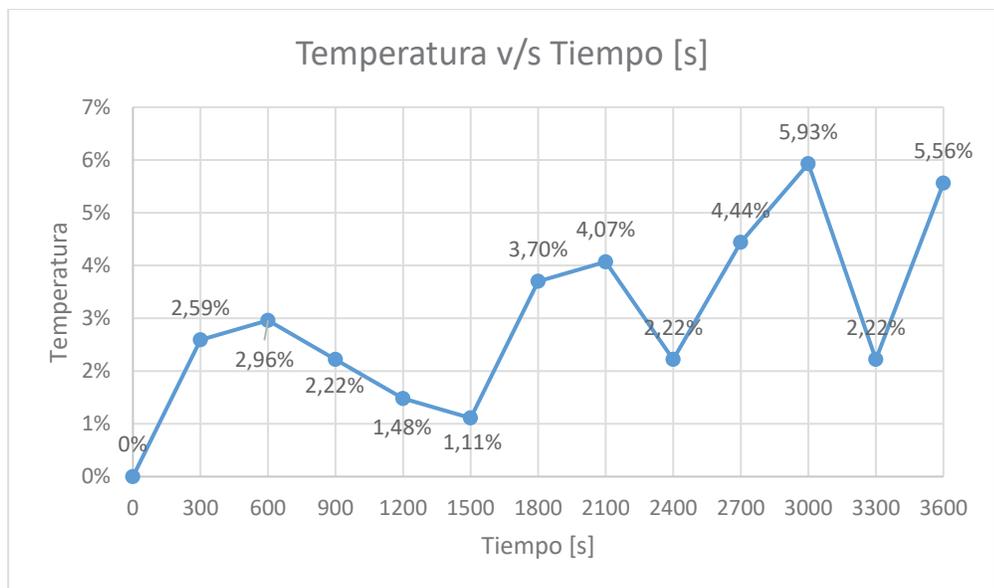


Figura 3-22: Variación de la temperatura en porcentaje con respecto al tiempo transcurrido.

Con la información dispuesta en los gráficos, se puede observar que la variación de voltaje máximo no es constante, donde la mayor variación alcanza tan solo un 1.24% del valor original. Además tomando en cuenta la variable temperatura, se puede ver que esta variable no afecta los resultados de las mediciones, ya que presenta una variación que no es lineal a medida que avanza el tiempo de funcionamiento.

Lo mismo sucede con la variable de voltaje mínimo, donde su mayor variación es de un 0.39% y no corresponde a la misma medición en donde la variable temperatura alcanzó su mayor alza.

Estas mediciones demuestran que las variaciones de los valores de voltaje mínimo y voltaje máximo son muy pequeñas. Con el fin de eliminar o minimizar estas variaciones, se promediaron las mediciones de cada receptor y se calculó un valor de voltaje máximo y voltaje mínimo para cada receptor. De esta forma se asegura que los valores más altos o más bajos que se puedan medir, estén limitados por estos promedios de valores.

El voltaje máximo y voltaje mínimo promedio de la Tabla 3-5 es de:

Tabla 3-7: Voltajes promedio

Voltaje Máximo [V]	Voltaje Mínimo [V]
1.680	0.745

Para saber cuáles son los valores que leerá Arduino en sus entradas análogas, se debe realizar una conversión análoga digital con la ecuación (3-5), señalada a continuación:

$$\text{valor leído por arduino} = (\text{Voltaje de rssi} * 1023) / 5 \quad (3-5)$$

De la ecuación (3-5) el valor está dividido por 5, este número es el valor de voltaje de referencia que tiene el convertidor análogo digital. Cabe destacar que el Arduino viene por defecto con esta referencia de voltaje.

De esta forma los valores de voltaje máximo y voltaje mínimo en términos de lectura del Arduino nos quedaría como:

$$\text{Voltaje máximo} = (1.629 * 1023) / 5 \quad (3-6)$$

$$\text{Voltaje máximo} = 344$$

$$\text{Voltaje mínimo} = (0.704 * 1023) / 5 \quad (3-7)$$

$$\text{Voltaje mínimo} = 158$$

Estos valores son utilizados en el código de Arduino para establecer los límites que tendrá cada entrada análoga.

La información de los valores medidos y gráficos confeccionados, correspondientes a los otros tres receptores faltantes, se encuentran en apéndice A, de modo de no repetir la misma información en el desarrollo del informe.

3.8 Montaje de componentes electrónicos sobre el prototipo

También es necesario conocer la distribución y ubicación que los componentes electrónicos tendrán sobre la plataforma, para tomar la decisión de las posiciones que estos elementos tendrán sobre el prototipo, por lo que en las líneas siguientes de este punto se expondrá al respecto y se describirá la experiencia obtenida, con sus aciertos y problemas presentados.

3.8.1 Diagrama eléctrico de componentes

El diagrama que se muestra a continuación en la Figura 3-23, es el que se utilizó para interconectar la primera configuración de componentes electrónicos.

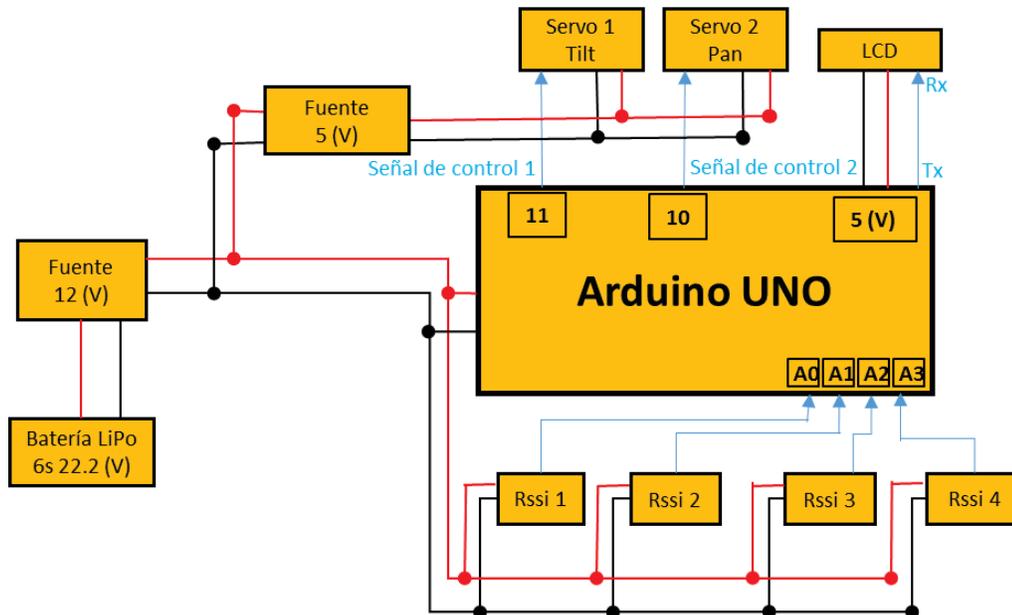


Figura 3-23: Primer diagrama de interconexión electrónica.

3.8.2 Pruebas realizadas

Mientras se realizaban pruebas de funcionamiento con todos los componentes conectados y funcionando en conjunto [20] con esta interconexión de componentes (Figura 3-24.), pero sin aún realizar la prueba del rastreador de antena propiamente tal, se produjo la falla de la fuente de poder de 12 [V] y 2 [A] que se estaba utilizando para alimentar todo el sistema. La falla se produjo como resultado de la sobre carga que esta fuente de poder estaba recibiendo, debido a que la sumatoria del consumo de los cuatro receptores de video, cada uno de 200 [mA] a 12 [V], más el consumo del Arduino que en estado estacionario es de 47 [mA], el consumo del servo motor de 15 [kg·cm] que es de 500 [mA] a 900 [mA] y el del servomotor de 20 [kg·cm] que es de 600 [mA] a 1000 [mA], sobrepasó el límite de corriente que podía entregar la fuente de 12 [V].

Al producirse la falla, ésta afectó a los receptores de video, dejando inutilizable la señal de RSSI, esto se comprobó con la medición del voltaje entregado por la señal, ya que ésta no arrojaba ningún cambio al momento de encender o apagar el transmisor de video. Cabe destacar que solo tres de los cuatro receptores quedaron recibiendo y mostrando video, pero no así la señal de RSSI. Además se produjo la falla de las entradas análogas del Arduino, desde la A1 hasta la A4, dejándolas inoperativas.

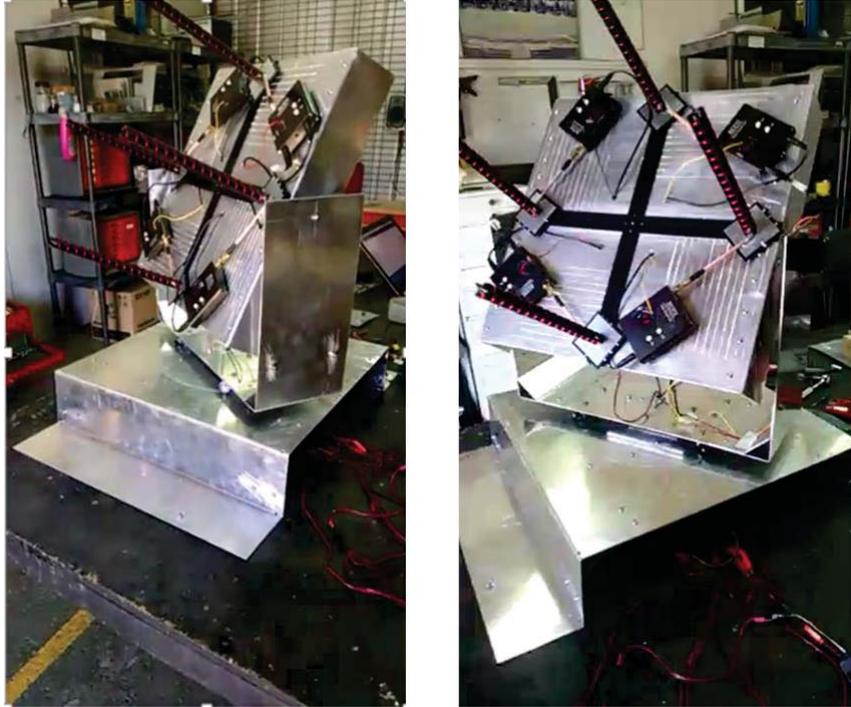


Figura 3-24: Prototipo de rastreador de antena funcionando.

Para continuar realizando pruebas de funcionamiento, se contaba con dos receptores de repuesto, que dio la posibilidad de realizar pruebas sólo en un eje.

3.8.3 Diagrama eléctrico final de componentes

Para no tener el mismo problema mencionado en el punto 3.8.1, se optó por dividir las cargas para asegurarse de no sobrepasar el consumo de la corriente máxima entregada por las fuentes de poder, quedando el nuevo diagrama de interconexión como se muestra en la Figura 3-25.

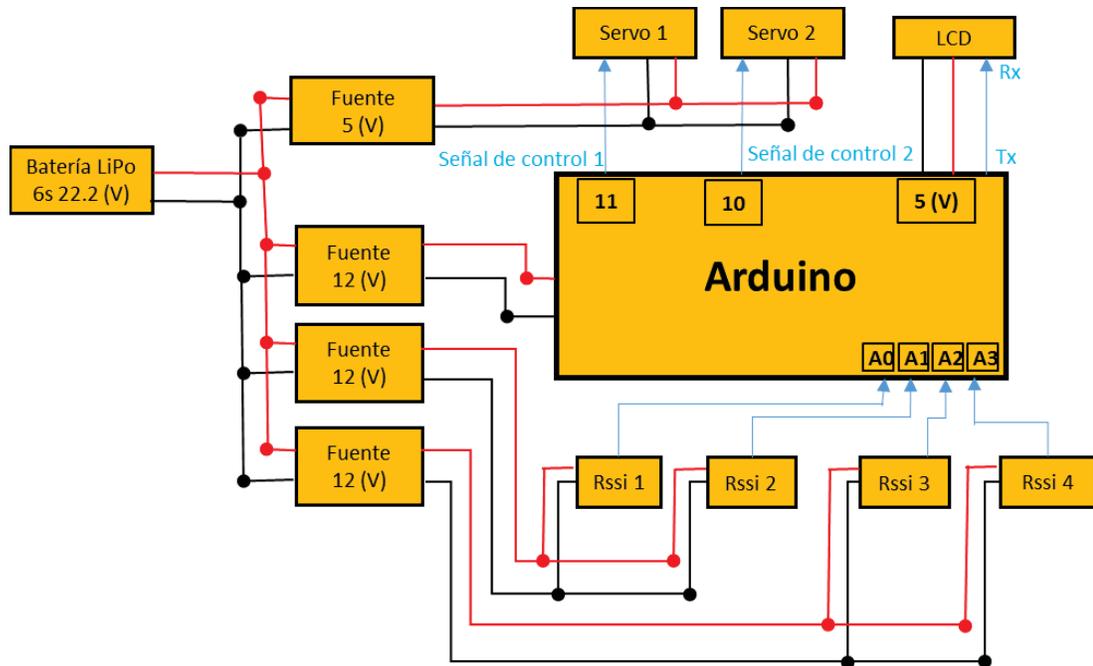


Figura 3-25: Diagrama definitivo de interconexión.

Con esta nueva configuración se aseguró que los componentes electrónicos quedarían protegidos y así no presentarían los mismos problemas antes mencionados.

3.8.4 Pruebas realizadas

Se instalaron los dos receptores que se tenían guardados y se continuaron realizando pruebas de funcionamiento mecánico para probar la nueva interconexión de los componentes y así asegurarse que no se fuera a producir un problema nuevamente (Figura 3-26).

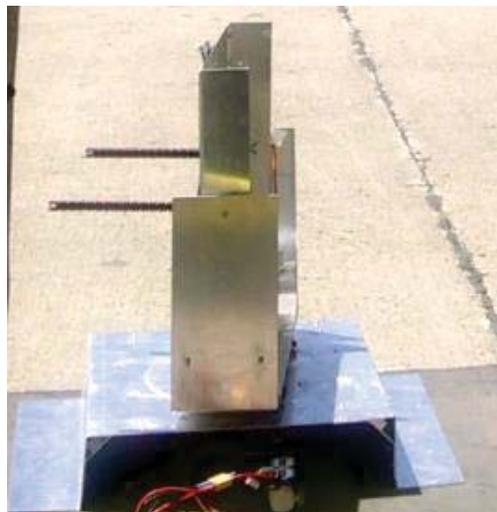


Figura 3-26: Prototipo de rastreador de antena con dos receptores y antenas.

Para poder terminar el proyecto, se encargaron nuevos componentes para así poder realizar las pruebas de funcionamiento del rastreador de antenas y de esta forma poner fin a este desafío.

3.9 Mejora de receptores

Al encargar los nuevos receptores de videos se optó por unos con diversidad, ya que estos darían la posibilidad de tener dos módulos receptores de video en un mismo aparato. Gracias a esto se tendrían tan solo dos receptores de video montados en el rastreador y no la misma cantidad como se plateo anteriormente.

3.9.1 Receptor de video FR632

FR632 es un receptor de video de diversidad de 32 canales que trabaja a una frecuencia de 5.8 [GHz], es capaz de realizar auto búsqueda de frecuencia, tiene una pantalla donde es posible observar el canal y la frecuencia que se está utilizando. Cuenta con dos botones seleccionadores, scan/group y power/chanel. Además cuenta con tres salidas de video, receptor a, receptor b y ambas señales mezcladas y un conector de alimentación de 6-24 [V].



Figura 3-27: Receptor FR632.

El funcionamiento de la diversidad en este receptor es intercambiar de módulos de recepción al que tenga mejor señal de recepción de video. En nuestro caso serán utilizados en forma independientes, como si fueran dos receptores de videos distintos. Gracias a esto tendremos dos receptores de video en un solo aparato, reduciendo el tamaño, el número de componentes y el peso en nuestro rastreador.

Como se observa en la Figura 3-28 , tiene dos módulos receptores de video, de donde es posible utilizar los pines voltaje de RSSI.

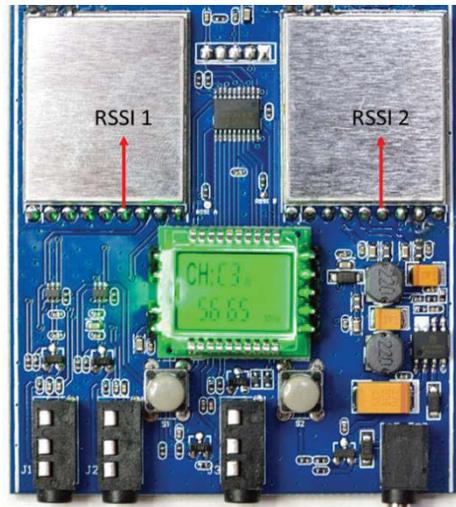


Figura 3-28: Módulos de videos con RSSI.

En estos pines fueron soldados unos cables para tener acceso a estos valores y así poder conectarlos al Arduino.

3.9.2 Medición de RSSI mínimo

Para realizar la medición del RSSI mínimo que entregaba cada receptor, se utilizó el Arduino y el software creado para mover el rastreador de antena. Con esto se pudo observar por pantalla serial cual era el valor que entregaba el Arduino después de realizar la conversión análoga digital del voltaje entregado por el pin de RSSI del receptor de video. Así se obtuvo el valor numérico exacto del voltaje cuando el receptor estaba encendido pero sin recibir la señal desde el transmisor de video.

El valor numérico observado en pantalla después de pasar por el Arduino y ser transformado por el convertidor análogo digital fue de 100[-]. Cabe destacar que el voltaje entre los dos módulos del mismo receptor varía un poco para poder realizar la diversidad entre los módulos receptores, si no existiera esa diferencia nunca se podría intercambiar entre los módulos al que tenga mejor señal. Es por esto que el valor de los dos módulos se dejó fijado en 100[-], donde en el software de funcionamiento se tuvo que agregar un offset para compensar esta diferencia entre los módulos y así tener siempre en ambos el mismo valor de RSSI mínimo.

Este procedimiento se realizó para los dos receptores nuevos, donde el segundo receptor tuvo un valor 105[-], de igual forma se agregó un offset para este par de módulos.

3.9.3 Medición de RSSI máximo

Al igual que con la medición del RSSI mínimo, se realizó la misma operación, pero esta vez con un transmisor de video encendido, para así saber cuál sería el valor de RSSI máximo cuando se tuviera el transmisor muy cerca del receptor de video.

Se pudo visualizar en la pantalla serial que el valor de RSSI que arrojaba el Arduino después de la conversión era de 250 [-] para el primer receptor, donde un módulo tenía una pequeña diferencia con respecto al otro, donde esta diferencia se suplió agregando un offset al software del rastreo, igual que para el valor de RSSI mínimo, se creó un offset en el programa del rastreador. En el caso del segundo receptor el valor observado también fue de 250[-], donde también un módulo difería con respecto al otro, de igual forma se utilizó un offset para suplir esa diferencia.

3.10 Pruebas de banco

Luego de instalar los nuevos receptores de video (Figura 3-29), se volvieron a realizar pruebas de la parte mecánica, para probar si estos receptores funcionaban de buena forma con el resto de componentes electrónicos. De igual forma que las pruebas realizadas en el punto 3.8.2 y 3.8.4, estas pruebas fueron exitosas, donde se pudo apreciar el buen funcionamiento en conjunto.

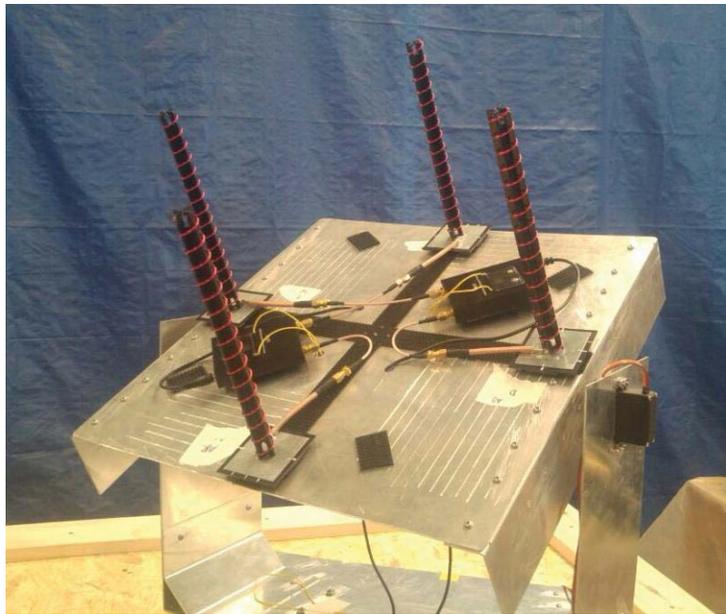


Figura 3-29: Plataforma con receptores nuevos.

4 Resultados

Los resultados del trabajo realizado, fueron medidos o enfocados desde el punto de vista de si el rastreador de antenas, lograba o no lograba en primer lugar rastrear al transmisor de video cuando se le hicieron pruebas en banco. En segundo lugar y más relevante, si el rastreador de antenas pudo o no pudo rastrear al UAV cuando este se encontraba en vuelo.

Al realizar esta prueba de banco (Figura 4-1), se ocuparon los dos receptores de video que no sufrieron daño, con esto se pudo probar el desempeño del rastreador solo en un eje. Para ello se utilizó un transmisor de video el cual emitía señal, como si este estuviera en el UAV, para así proceder a simular el movimiento que éste tendría si estuviera en vuelo, lo anterior con el fin de visualizar si es que el rastreador de antenas era capaz de seguir al transmisor a poca distancia [21].



Figura 4-1: Simulación de vuelo de UAV

En el transcurso de la realización de esta prueba, se observó que el rastreador presentaba un comportamiento errático al momento de tratar de rastrear al transmisor. Analizada la situación

se determinó que dicho comportamiento se debió a que la prueba se realizó en un ambiente cerrado, como es el galpón de metal cerrado donde se llevó a cabo esta prueba de banco. Lo indicado, provocó que la señal del transmisor revotara en las paredes del galpón, haciendo que el rastreador no identificara en la forma debida y esperada, a cuál de las antenas le estaba llegando la señal de mayor intensidad, emitida por el transmisor de video.

Posteriormente, con la llegada de los nuevos receptores de video, con los que se pudo montar de forma definitiva el rastreador de antena, se procedió a realizar pruebas con el UAV en vuelo [22].



Figura 4-2: Pruebas en vuelo.

Esta prueba demostró que el rastreador de antenas era capaz de seguir el objetivo en vuelo. No obstante lo anterior y debido a que la antena que el transmisor de video tenía instalada en el UAV es omnidireccional en el plano horizontal, el rastreador no era capaz de seguir al objetivo a una distancia menor de 200 [m]. Pasado esa distancia el rastreador se comportaba de una forma más estable, pero aun con algunos problemas en el seguimiento, cuando se empezaba a alejar el UAV. Mientras más lejos se encontraba el UAV, el rastreador se comportaba de mejor manera y era capaz de seguir el objetivo fluidamente.

Para comprobar y demostrar el buen funcionamiento del rastreador, se volvió a realizar una prueba de banco, pero esta vez al aire libre, donde se utilizó un transmisor de video el cual simuló el movimiento del UAV en vuelo. Gracias a esta prueba en un lugar abierto, se logró obtener los datos que Arduino estaba procesando, tales como los valores de RSSI y los ángulos de cada servo

motor. Con el registro de estos datos fue posible confeccionar gráficos y así poder observar y verificar el comportamiento del rastreador.

Como se puede apreciar en la gráfica de la Figura 4-3, en negro se muestra el valor del ángulo del servo motor horizontal, que cambia a medida que los valores de RSSI van aumentando o disminuyendo. Además se puede apreciar que el rastreador de antenas empezó con un ángulo de 60° en su servo motor horizontal y se mantuvo más o menos constante hasta que el valor de RSSI de la derecha (en color naranja) empezó a aumentar y el ángulo del servo motor empezó a disminuir con el objetivo de mover el rastreador hacia la derecha, para así poder tener el mismo valor de RSSI en la izquierda (en color azul) y en el caso contrario, cuando el valor de RSSI izquierdo era mayor al valor de RSSI derecho, el valor del ángulo empezó a aumentar.

De igual forma en el gráfico de la Figura 4-4 se observa como el ángulo del servo motor vertical se modifica a medida que los valores de RSSI van cambiando. Se observa claramente, que a medida que el valor de RSSI arriba va aumentando (en color azul), el ángulo del servo motor empieza a disminuir (en color negro) para así poder tener el mismo valor de RSSI abajo.

Cabe destacar lo que ocurre cuando el ángulo del servo motor horizontal (Figura 4-4) está por debajo de su valor medio (80°). Al ocurrir esto el ángulo del servo motor vertical se ve afectado, empezando a girar en el sentido contrario, esto se puede apreciar en la gráfica de la Figura 4-3 en el rango de muestras del 540 al 897, donde se ve claramente que el valor de RSSI derecho es mayor al valor de RSSI izquierdo y el servo motor disminuye su ángulo, al contrario de lo que ocurría en el caso anterior, donde este ángulo aumentaba. De igual manera sucede cuando el valor del RSSI izquierdo es mayor al valor de RSSI derecho, el ángulo del servo motor empieza a disminuir.

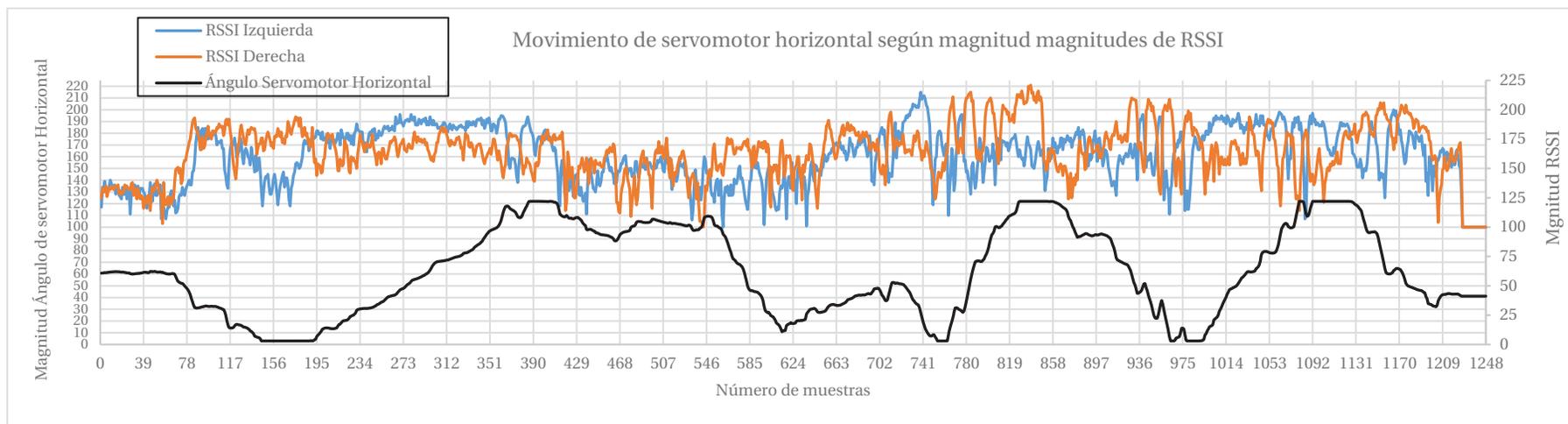


Figura 4-3: Movimiento de servo motor horizontal.

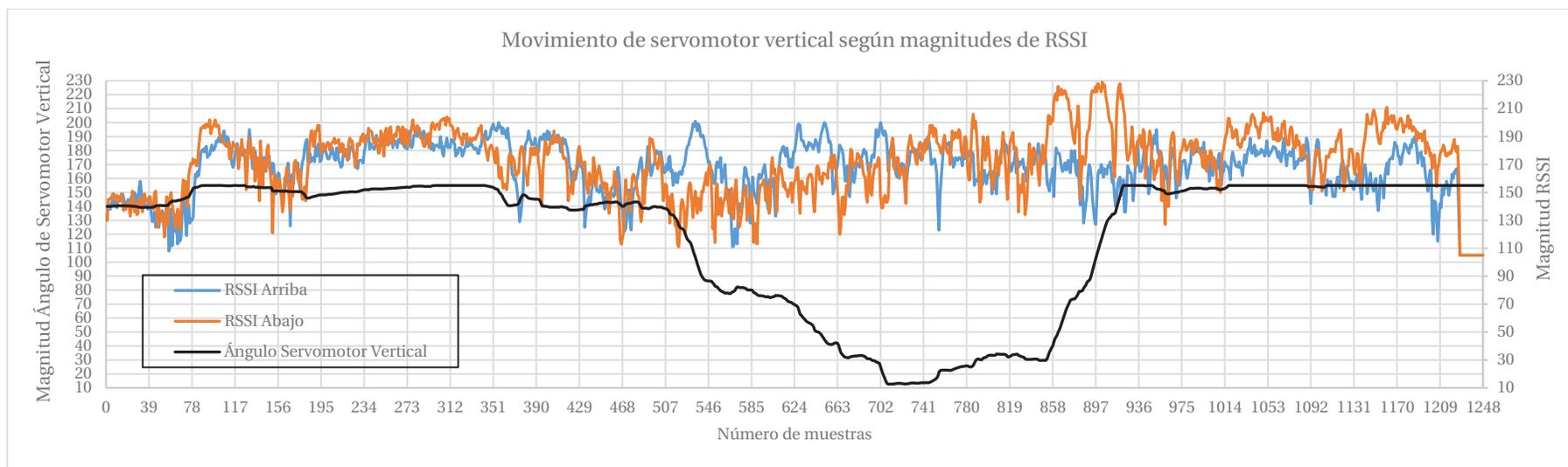


Figura 4-4: Movimiento de servo motor vertical.

Discusión y conclusiones

Acerca del trabajo realizado en SISDEF

La oportunidad de desarrollar esta tesis en una organización como SISDEF, permitió entender que una empresa está inserta y trabaja en una determinada industria.

Conocer además, como es trabajar en una empresa y aprender sobre los procesos y actividades involucradas en la realización de distintos tipos de proyectos.

A continuación se señala un ejemplo de lo mencionado: Para encargar y adquirir algún componente y/o material requerido para el proyecto, se debió realizar varios pasos o actividades relacionadas con dicho proceso, partiendo por la emisión de una solicitud de material (SDM), la que debió seguir un proceso de tramitación, aceptación, visaciones y registros, hasta llegar a la autorización final de dicha solicitud de material. Esos pasos o actividades permitieron generar o “colocar” una orden de compra (OC) que respaldara la compra final del componente y/o material.

En consecuencia, se puede concluir, que tomarse el tiempo para el conocer y seguir los procesos establecidos en una organización, facilitan o allanan el camino hacia la obtención de los objetivos buscados y que los procesos definidos e implementados, por lo general, son una valiosa herramienta para poder realizar cualquier tipo de proyecto dentro de una empresa.

Acerca de los objetivos

El objetivo fundamental de esta tesis fue “Diseñar y Construir un Sistema Rastreador de Antena para el RPAS Chercán de SISDEF”. Como se observó durante el desarrollo de esta tesis, se logró realizar un rastreador mediante la técnica de RSSI, donde el resultado final fue que el rastreador logró seguir al RPAS por medio de la señal de video. Lo indicado permite dar por cumplido el objetivo fundamental de la tesis.

Por otra parte, para cumplir con el objetivo fundamental de la tesis, se realizaron varias fases o tareas. Entre otras, se analizaron las formas de implementación y evaluación del proyecto, los componentes de sistemas de rastreo de antenas existentes en el mercado, se efectuó una comparación de prestaciones técnicas, se definieron los componentes de comunicación a utilizar

(receptores de video, antenas, transmisores de video, como por ejemplo la antena helicoidal de 5.8 [GHz], Arduino Uno), etc.

Dentro de las formas de implementación y evaluación del proyecto, se definió el sistema de control y se creó un software apto para satisfacer las necesidades que el rastreador debía cumplir, se definió el hardware de control donde se iba a cargar el software, además de los actuadores que éste iba a controlar. Dentro del diseño, se consideró la creación de una estructura que permitiera la disposición de los componentes necesarios para el buen funcionamiento del rastreador de antena.

También, se realizaron pruebas de funcionamiento de la parte mecánica y de la parte electrónica, tanto en terreno y como de laboratorio. Pruebas, las cuales permitieron comprobar y ver el resultado del rastreador de antena, determinándose que esta cumplió las expectativas esperadas.

Por último se hace presente, que las pruebas de transmisión de video, que permitirían validar el objetivo específico relacionado con la transmisión permanente de video desde el UAV hacia la estación base, quedaron pendientes de realización. Lo anterior debido a que por razones de fuerza mayor, no fue posible disponer en el momento en que se realizaron las pruebas del rastreador, del tiempo suficiente y necesario, tanto del UAV como del operador de vuelo.

Acerca del desarrollo de la tesis

Del desarrollo de la presente Tesis se puede recomendar y concluir que:

Es de suma importancia tener un buen software de control que responda a las necesidades requeridas, para que el rastreador de antenas realice su función en forma eficiente.

Tras realizar las pruebas de software, mediante las formas mencionadas en el punto 3.5, se logró apreciar que el software funciona de la forma deseada, pero aún faltan requerimientos que cubrir, como por ejemplo, la pérdida de señal.

Utilizar el software Solidworks fue un acierto, debido a que gracias a éste, se pudo realizar la maqueta en 3D, proporcionando una vista más certera de cómo quedaría el prototipo. Además permitió obtener la información necesaria, para calcular con facilidad el torque requerido para hacer girar la plataforma y así elegir los servomotores adecuado para el torque calculado.

El utilizar nuevos receptores de diversidad de video, permitió no utilizar tanto equipo sobre el rastreador, lo que sin duda es una mejora. Esto ayudó a disminuir el peso total, al utilizar solamente dos receptores de video en lugar de cuatro, como fue la configuración inicial.

Se estima necesario hacer presente que el deseo de terminar el proyecto y el exceso de confianza (plazos de entrega, condiciones de tiempo para las pruebas, la disponibilidad del UAV, cumplir con el objetivo lo antes posible, etc.) en que el sistema funcionaría bien a la primera, hizo tal vez que no se tomaran las mejores decisiones e implicó cometer errores como el que repercutieron en atrasos en el desarrollo del proyecto. No obstante lo anterior, se estima que la experiencia

obtenida y los inconvenientes e imponderables presentados a la fecha fueron parte del aprendizaje necesarios en el desarrollo de la presente tesis.

La mediciones para determinar los valores máximos y mínimos de RSSI que van en el programa de Arduino, permitió darse cuenta de la importancia de efectuar las mediciones en el ambiente adecuado, preferentemente en espacios abiertos para evitar distorsiones y rebotes de señales.

Trabajos futuros

Con el propósito de validar el objetivo específico relacionado con la transmisión permanente de video desde el UAV hacia la estación base, será conveniente realizar en el futuro las pruebas de transmisión y recepción de video para lo cual ya se han hecho gestiones con SISDEF y se espera poder concretar las pruebas y validar el modelo todas vez que el UAV, usado para el desarrollo y pruebas, regrese de comisión en Collahuasi. Lo anterior para verificar si la transmisión se puede mejorar con respecto a lo que se tiene en la actualidad.

Sería recomendable, en relación a las pruebas de software, mencionadas anteriormente, seguir trabajando en el desarrollo del software, y/o en futuras mejoras que se puedan realizar con otra tesis complementaria a ésta.

Teniendo presente el gran aumento de los UAV en el mercado, se podría perfeccionar este rastreador, incorporándole mejoras en su parte mecánica como también en la electrónica, tales como:

- Cambio de servo motores.
- Rediseñar el rastreador de antena.
- Cambiar las antenas receptoras.
- Mejorar el sistema de control del rastreador.

Bibliografía

- [1] J. Gustafsson y F. Henriksson, «UAV Tracking Device using 2.4 GHz Video Transmitter,» 2005.
- [2] B. L. GEZER, «Multi-beam digital antenna for radar,communications, and UAV tracking based on off-the-shelf wireless technologies,» 2006.
- [3] B. R. Mahafza, «Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB,» CHAPMAN & HALL/crc, 2000, p. Capitulo 11.
- [4] M. F. Bahat y T. Filik, «GPS-based Antenna Tracking and Signal Beamforming System for Small UAV Platform».
- [5] «MarcusUAV,» [En línea]. Available: <http://www.marcusuav.com/targettrackingantenna/>. [Último acceso: 04 2016].
- [6] «EMBENTION,» [En línea]. Available: <http://products.embention.com/veronte/gimbal-y-tracking/tracker.html>. [Último acceso: 04 2016].
- [7] «Hobby-Wing,» [En línea]. Available: <http://www.hobby-wing.com/mfd-12ch-aat.html>. [Último acceso: 04 2016].
- [8] «Fox hobby,» [En línea]. Available: <http://www.foxhobby.com/arkbirdaat-auto-antenna-tracker-p-1918.html>. [Último acceso: 04 2016].
- [9] «PERSISTENT SYSTEMS,» [En línea]. Available: www.persistentsystems.com. [Último acceso: 04 2016].
- [10] SISDEF Ltda., «Sisdef,» [En línea]. Available: http://www.sisdef.cl/uploads/articulo_20151228101322_Folleto%20Chercan-PRO2000HDv2.5.pdf. [Último acceso: 10 05 2016].

-
- [11] «RS radiocontrol-sports,» [En línea]. Available: <http://radiocontrol-sports.com/fpv-systems/5-8ghz-transmitters/iftron-mondo-extreme-5-8ghz.html>. [Último acceso: 10 05 2016].
- [12] «IFFRONTECH.COM,» [En línea]. Available: http://www.iffrontech.com/product_info.php?products_id=190. [Último acceso: 10 05 2016].
- [13] «rohde-schwarz,» [En línea]. Available: https://www.rohde-schwarz.com/us/product/zvl-productstartpage_63493-9014.html. [Último acceso: 7 3 2017].
- [14] R. H. Aquino, «Colección de Tesis digitales Universidad de las Américas Puebla,» 2008. [En línea]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_a_r/capitulo2.pdf.
- [15] PersonalDrones, «PersonalDrones,» 08 2013. [En línea]. Available: http://www.personal-drones.net/wp-content/uploads/2013/08/RC832_English.pdf. [Último acceso: 23 02 2017].
- [16] ReadyMadeRc, «ReadyMadeRc,» [En línea]. Available: https://www.readymaderc.com/store/index.php?main_page=product_info&cPath=11_45_49_97&products_id=255. [Último acceso: 23 02 2017].
- [17] Arduino, «Arduino,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. [Último acceso: 23 02 2017].
- [18] Tectronix, «Tectronix,» [En línea]. Available: <http://www.tectronix.cl/servo-mg996.html>. [Último acceso: 23 02 2017].
- [19] Altronics, «Altronics,» [En línea]. Available: <https://altronics.cl/servo-digital-ds3218-180?search=servo>. [Último acceso: 23 02 2017].
- [20] J. Meza Ferrada, «Video prueba de funcionamiento 1,» [En línea]. Available: <https://drive.google.com/file/d/0B9oDcPZ5MpPdb0ZaeFVEV3dTUGM/view?usp=sharing>.
- [21] J. Meza Ferrada, «Video Pruebas de rastreador 2,» [En línea]. Available: <https://drive.google.com/file/d/0B9oDcPZ5MpPdT3NraXIET0FBNTQ/view?usp=sharing>.
- [22] J. Meza Ferrada, «Video Prueba de rastreador 3,» [En línea]. Available: <https://drive.google.com/file/d/0B9oDcPZ5MpPda1I2Tno5cGY4SGM/view?usp=sharing>.

A Medición de valores de RSSI de receptores de video

Información obtenida de las mediciones hechas a los tres receptores restantes.

A.1 Confección de tabla para receptor dos

La Tabla A-1 se confecciono con los valores obtenidos de la medición del receptor dos.

Tabla A-1: Valores obtenidos de las mediciones del receptor dos.

Tiempo [s]	Voltaje Max [V]	Voltaje Min [V]	Temperatura [°C]
0	1,635	0,705	28,3
300	1,644	0,706	28,7
600	1,622	0,704	28,1
900	1,624	0,705	28
1200	1,626	0,705	28,1
1500	1,63	0,704	28,1
1800	1,629	0,701	28,2
2100	1,628	0,703	28,4
2400	1,626	0,705	28,1
2700	1,624	0,705	28,2
3000	1,637	0,702	28,5
3300	1,629	0,705	29,4
3600	1,624	0,705	29,7

Para apreciar de mejor forma la información de la Tabla A-1 se confeccionaron los siguientes gráficos:

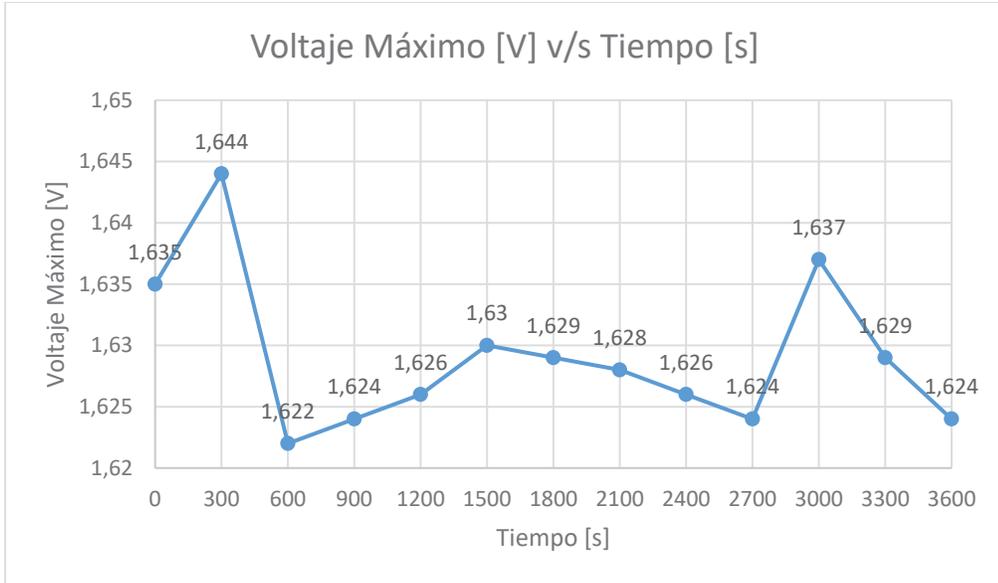


Figura A-1: Variación de voltaje máximo con respecto al tiempo transcurrido.

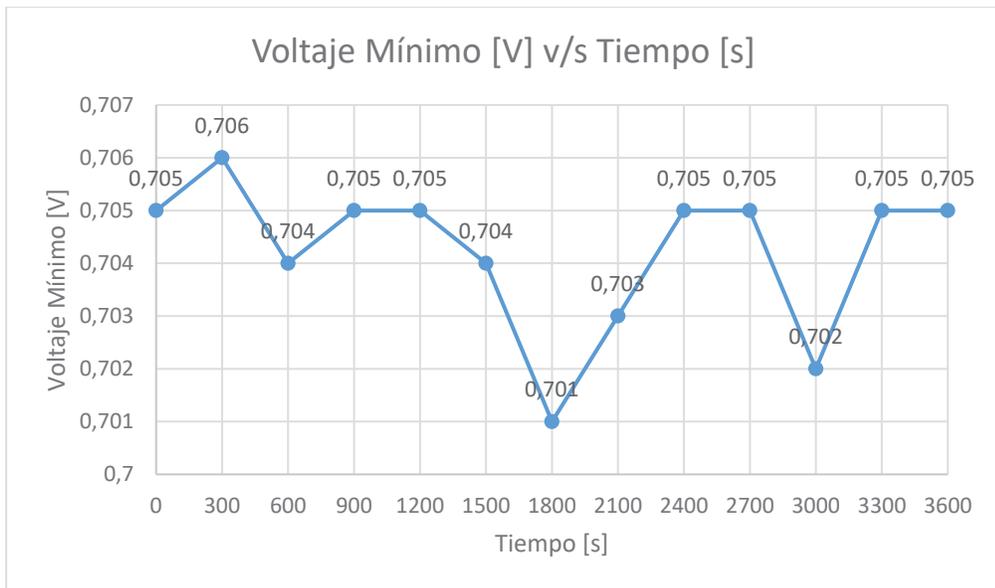


Figura A-2: Variación de voltaje mínimo con respecto al tiempo transcurrido.

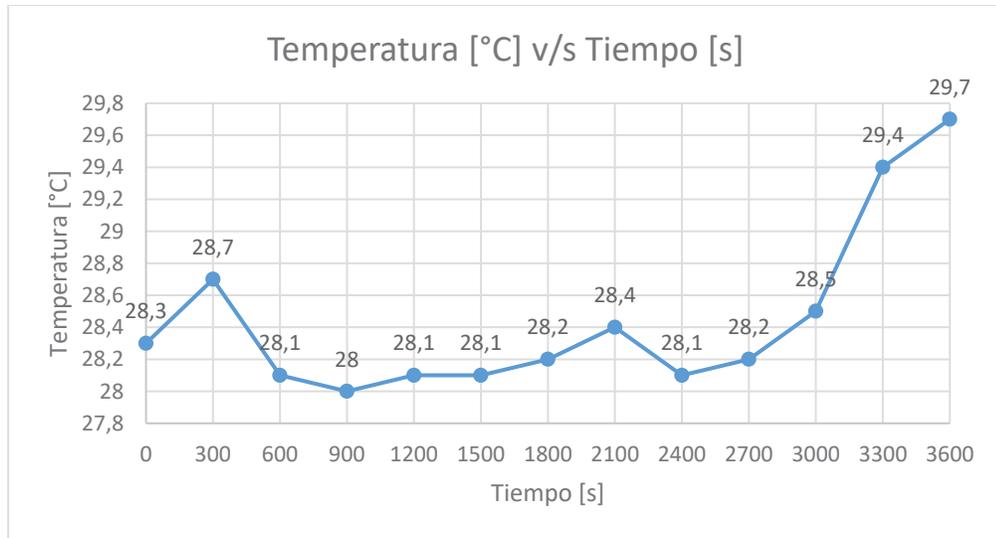


Figura A-3: Variación de la temperatura con respecto al tiempo transcurrido.

Para saber cuánto es la variación que existe en término de porcentaje; donde el valor de la medición cero es el valor de referencia, se pasaron los valores de voltaje máximo, voltaje mínimo y temperatura a porcentaje, dando como resultado los valores de la Tabla A-2:

Tabla A-2: Valores en términos de porcentaje.

Tiempo [s]	Voltaje Max [%]	Voltaje Min [%]	Temperatura [%]
0	0,00	0,00	0,00
300	0,55	0,14	1,41
600	-0,80	-0,14	-0,71
900	-0,67	0,00	-1,06
1200	-0,55	0,00	-0,71
1500	-0,31	-0,14	-0,71
1800	-0,37	-0,57	-0,35
2100	-0,43	-0,28	0,35
2400	-0,55	0,00	-0,71
2700	-0,67	0,00	-0,35
3000	0,12	-0,43	0,71
3300	-0,37	0,00	3,89
3600	-0,67	0,00	4,95

Para apreciar de mejor forma los resultados de la Tabla A-2 se realizaron los siguientes gráficos:

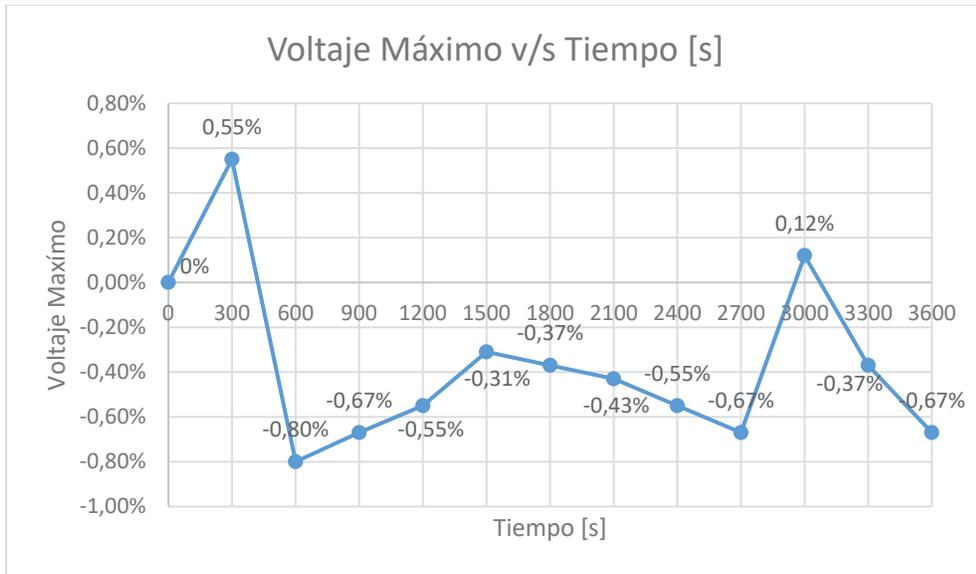


Figura A-4: Variación del voltaje máximo en porcentaje con respecto al tiempo transcurrido.

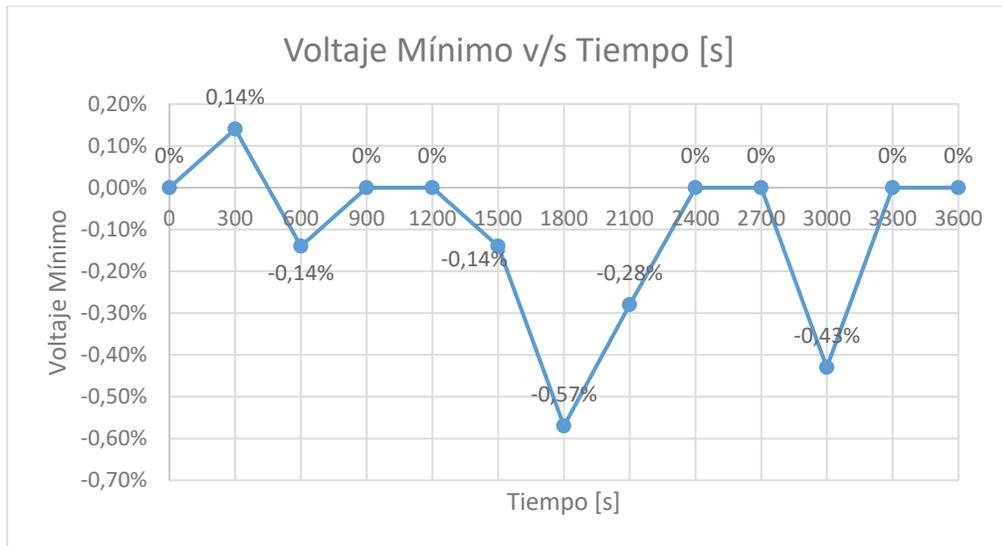


Figura A-5: Variación de voltaje mínimo en porcentaje con respecto al tiempo transcurrido.

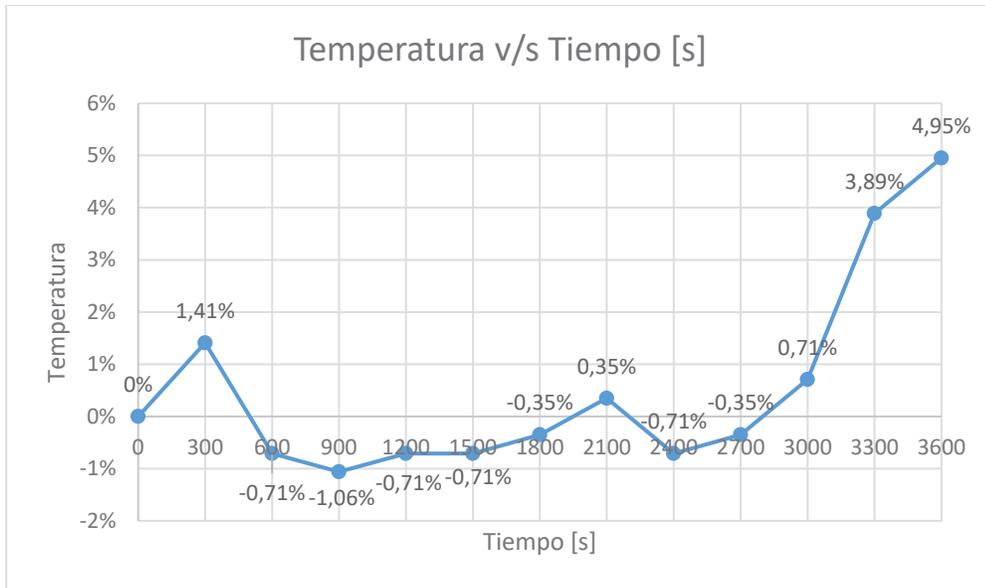


Figura A-6: Variación de la temperatura en porcentaje con respecto al tiempo transcurrido.

Con la información dispuesta en los gráficos, se puede observar que la variación de voltaje máximo no es constante, donde la mayor variación alcanza tan solo un 0.55% del valor original. Además tomando en cuenta la variable temperatura, esta variable no afecta los resultados de las mediciones, ya que esta tiene una variación que no es lineal a medida que avanza el tiempo de funcionamiento.

Lo mismo pasa con la variable de voltaje mínimo, donde su mayor variación es de un 0.57% y no corresponde a la misma medición en donde la variable temperatura alcanzo su mayor alza.

Estas mediciones demuestran que las variaciones de los valores de voltaje mínimo y voltaje máximo son muy pequeñas. Con el fin de que no existan estas variaciones, se promediaron las mediciones de cada receptor y se calculó un valor de voltaje máximo y voltaje mínimo para cada receptor. De esta forma se asegura que los valores más altos o más bajos que se puedan medir estén limitados por estos promedios de valores.

El voltaje máximo y voltaje mínimo promedio de la Tabla A-1 es de:

Tabla A-3: Voltajes promedio

Voltaje Máximo [V]	Voltaje Mínimo [V]
1.629	0.704

Para saber cuáles son los valores que leerá el Arduino en sus entradas análogas, se debe realizar una conversión análoga digital con la ecuación ((A-1):

$$\text{valor leído por arduino} = (\text{Voltaje de rssi} * 1023) / 5 \tag{A-1}$$

De la ecuación (A-1)(3-5) el valor está dividido por 5, este número es el valor de voltaje de referencia que tiene el convertidor análogo digital. Cabe destacar que el Arduino viene por defecto con esta referencia de voltaje.

De esta forma los valores de voltaje máximo y voltaje mínimo en términos de lectura del Arduino nos quedaría como:

$$\text{Voltaje máximo} = (1,629 * 1023)/5 \quad (\text{A-2})$$

$$\text{Voltaje máximo} = 333$$

$$\text{Voltaje mínimo} = (0,704 * 1023)/5 \quad (\text{A-3})$$

$$\text{Voltaje mínimo} = 144$$

A.2 Confección de tala de receptor tres

La Tabla A-4 se confecciono con los valores obtenidos de la medición del receptor tres.

Tabla A-4: Valores obtenidos de las mediciones receptor tres.

Tiempo [s]	Voltaje Max [V]	Voltaje Min [V]	Temperatura [°C]
0	1,742	0,779	27
300	1,753	0,77	27,6
600	1,734	0,761	27,8
900	1,729	0,76	27,9
1200	1,728	0,758	27,7
1500	1,729	0,765	28,3
1800	1,727	0,764	28,3
2100	1,724	0,758	28
2400	1,728	0,762	28,5
2700	1,726	0,763	28
3000	1,735	0,761	28,9
3300	1,728	0,758	28,6
3600	1,728	0,764	28,9

Para apreciar de mejor forma la información de la Tabla A-4 se confeccionaron los siguientes gráficos:

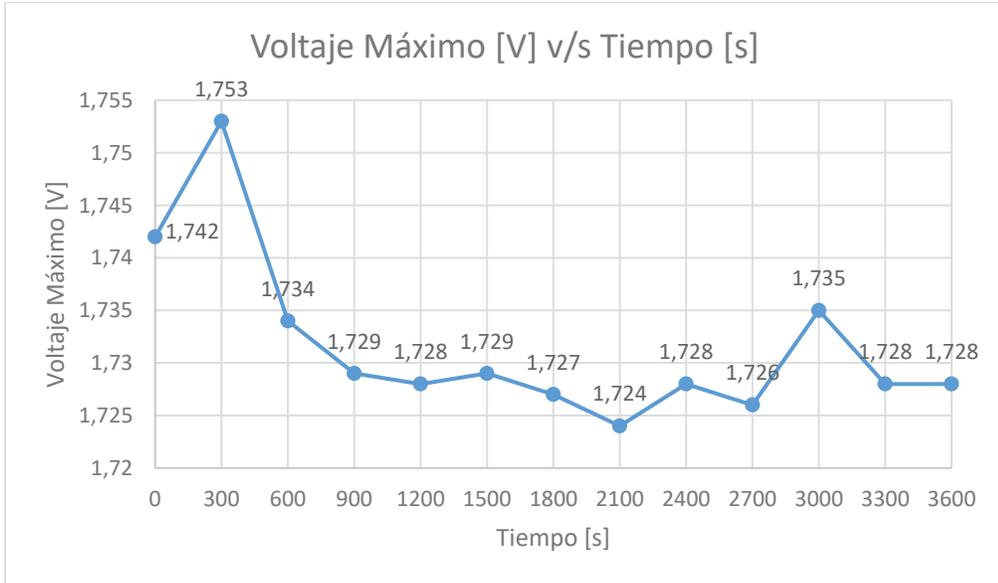


Figura A-7: Variación de voltaje máximo con respecto al tiempo transcurrido.

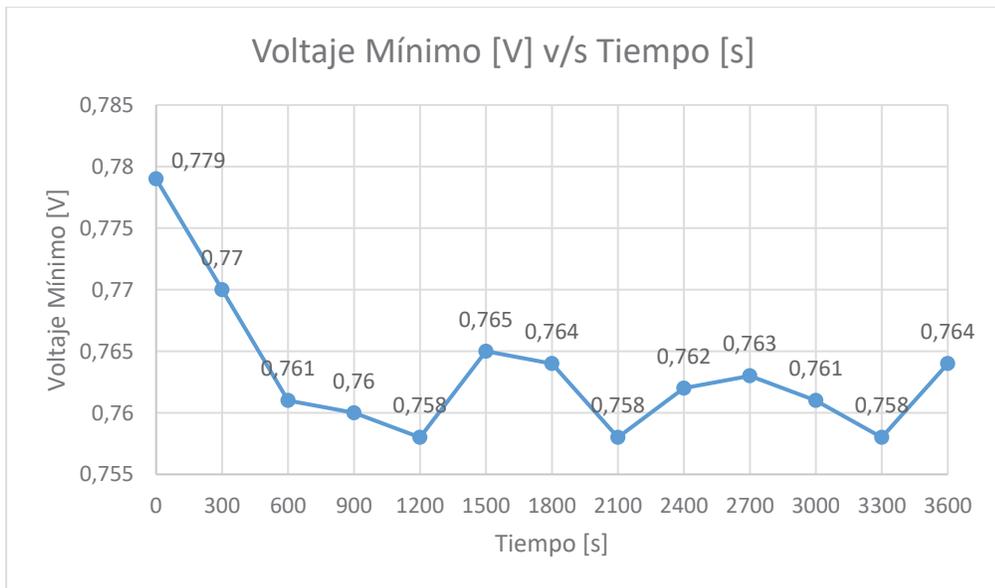


Figura A-8: Variación de voltaje mínimo con respecto al tiempo transcurrido.

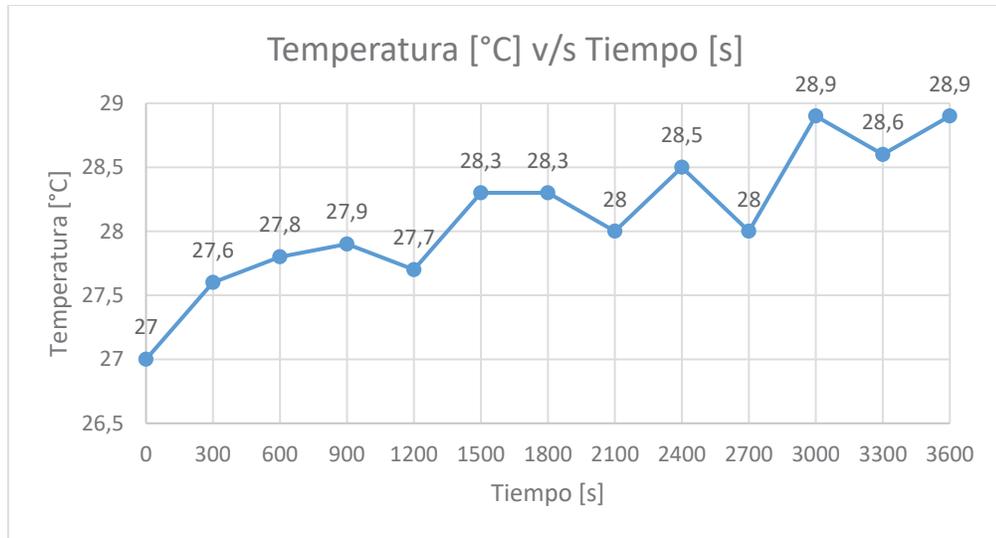


Figura A-9: Variación de la temperatura con respecto al tiempo transcurrido.

Para saber cuánto es la variación que existe en término de porcentaje; donde el valor de la medición cero es el valor de referencia, se pasaron los valores de voltaje máximo, voltaje mínimo y temperatura a porcentaje, dando como resultado los valores de la Tabla A-5:

Tabla A-5: Valores en términos de porcentaje.

Tiempo [s]	Voltaje Max [%]	Voltaje Min [%]	Temperatura [%]
0	0,00	0,00	0,00
300	0,63	-1,16	2,22
600	-0,46	-2,31	2,96
900	-0,75	-2,44	3,33
1200	-0,80	-2,70	2,59
1500	-0,75	-1,80	4,81
1800	-0,86	-1,93	4,81
2100	-1,03	-2,70	3,70
2400	-0,80	-2,18	5,56
2700	-0,92	-2,05	3,70
3000	-0,40	-2,31	7,04
3300	-0,80	-2,70	5,93
3600	-0,80	-1,93	7,04

Para apreciar de mejor forma los resultados de la Tabla A-5 se realizaron los siguientes gráficos:

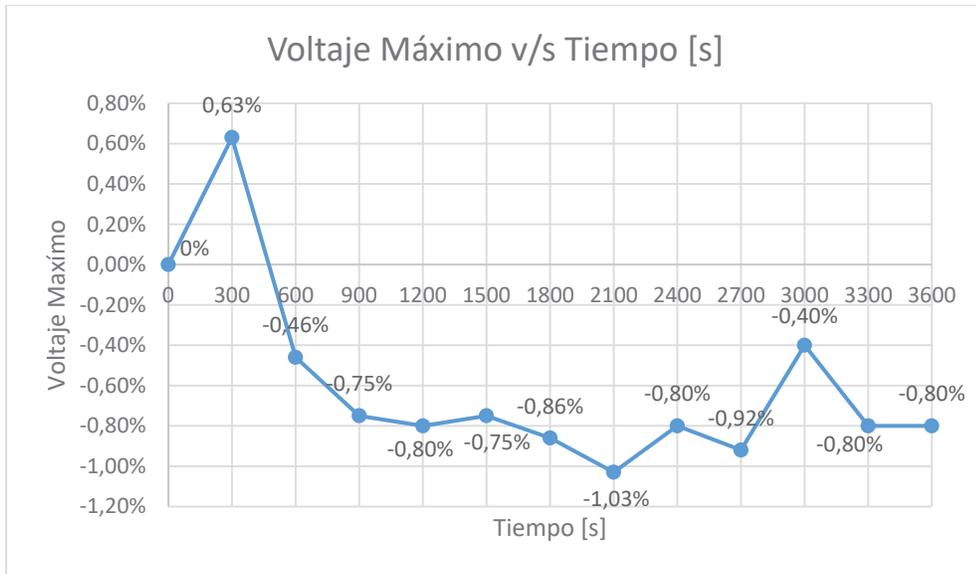


Figura A-10: Variación del voltaje máximo en porcentaje con respecto al tiempo transcurrido.

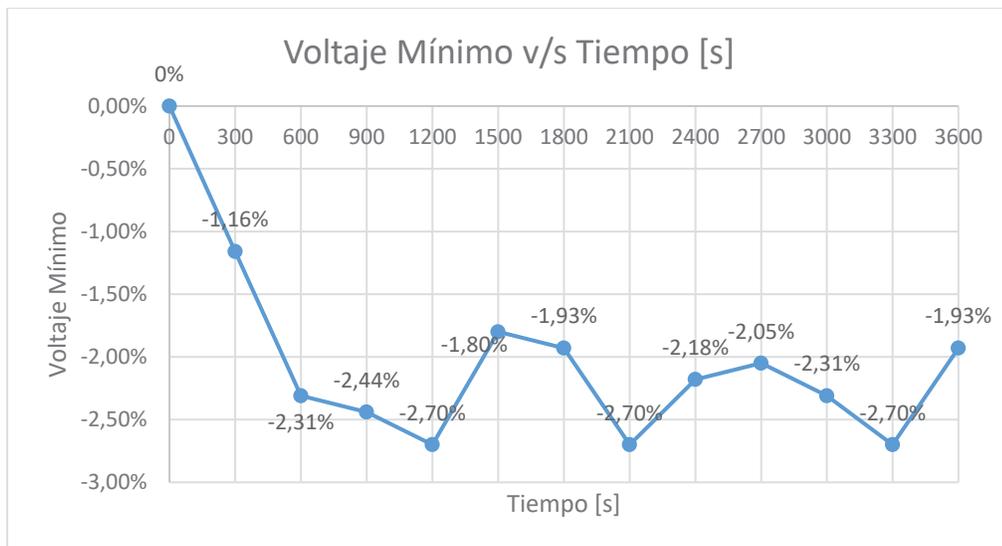


Figura A-11: Variación de voltaje mínimo en porcentaje con respecto al tiempo transcurrido.

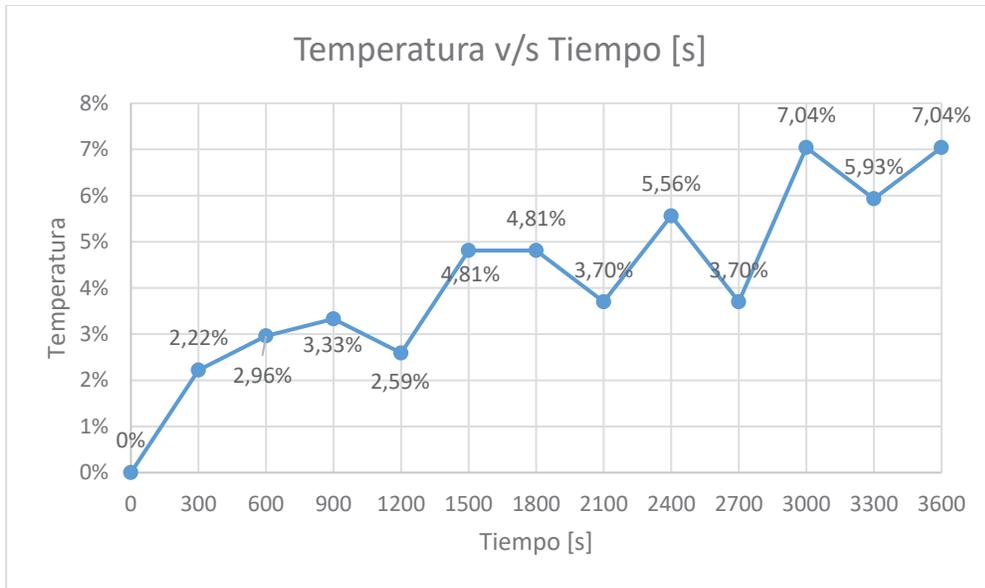


Figura A-12: Variación de la temperatura en porcentaje con respecto al tiempo transcurrido.

Con la información dispuesta en los gráficos, se puede observar que la variación de voltaje máximo no es constante, donde la mayor variación alcanza tan solo un 1.03% del valor original. Además tomando en cuenta la variable temperatura, esta variable no afecta los resultados de las mediciones, ya que esta tiene una variación que no es lineal a medida que avanza el tiempo de funcionamiento.

Lo mismo pasa con la variable de voltaje mínimo, donde su mayor variación es de un 2.70% y no corresponde a la misma medición en donde la variable temperatura alcanzo su mayor alza.

Estas mediciones demuestran que las variaciones de los valores de voltaje mínimo y voltaje máximo son muy pequeñas. Con el fin de que no existan estas variaciones, se promediaron las mediciones de cada receptor y se calculó un valor de voltaje máximo y voltaje mínimo para cada receptor. De esta forma se asegura que los valores más altos o más bajos que se puedan medir estén limitados por estos promedios de valores.

El voltaje máximo y voltaje mínimo promedio de la Tabla A-4 es de:

Tabla A-6: Voltajes promedio

Voltaje Máximo [V]	Voltaje Mínimo [V]
1.732	0.763

Para saber cuáles son los valores que leerá Arduino en sus entradas análogas, se debe realizar una conversión análoga digital con la ecuación (A-4):

$$\text{valor leído por arduino} = (\text{Voltaje de rssi} * 1023) / 5 \tag{A-4}$$

De la ecuación (A-4) el valor está dividido por 5, este número es el valor de voltaje de referencia que tiene el convertidor análogo digital. Cabe destacar que el Arduino viene por defecto con esta referencia de voltaje.

De esta forma los valores de voltaje máximo y voltaje mínimo en términos de lectura del Arduino nos quedaría como:

$$\text{Voltaje máximo} = (1,732 * 1023)/5 \quad (\text{A-5})$$

$$\text{Voltaje máximo} = 354$$

$$\text{Voltaje mínimo} = (0,763 * 1023)/5 \quad (\text{A-6})$$

$$\text{Voltaje mínimo} = 156$$

A.3 Confección de tabla para receptor cuatro

La Tabla A-7 se confecciono con los valores obtenidos de la medición del receptor cuatro.

Tabla A-7: Valores obtenidos de las mediciones del receptor cuatro.

Tiempo [s]	Voltaje Max [V]	Voltaje Min [V]	Temperatura [°C]
0	1,759	0,649	26,1
300	1,762	0,651	26,9
600	1,75	0,652	26,7
900	1,738	0,654	26
1200	1,745	0,652	26,2
1500	1,745	0,655	26
1800	1,749	0,653	26,3
2100	1,744	0,654	26,2
2400	1,745	0,654	26
2700	1,743	0,655	26,4
3000	1,742	0,653	26,6
3300	1,744	0,655	26,9
3600	1,744	0,655	27,3

Para apreciar de mejor forma la información de Tabla A-7, se confeccionaron los siguientes gráficos:

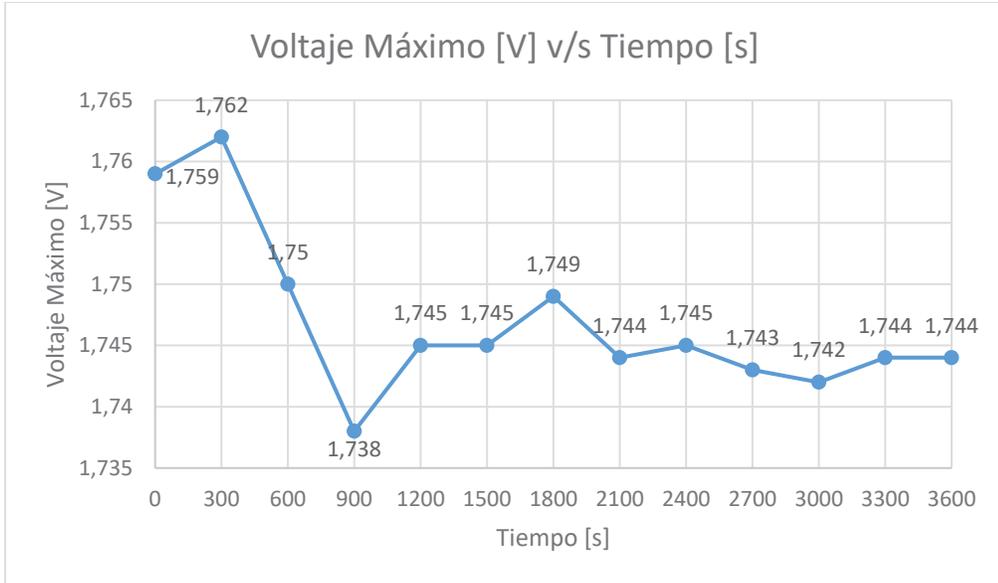


Figura A-13: Variación de voltaje máximo con respecto al tiempo transcurrido.

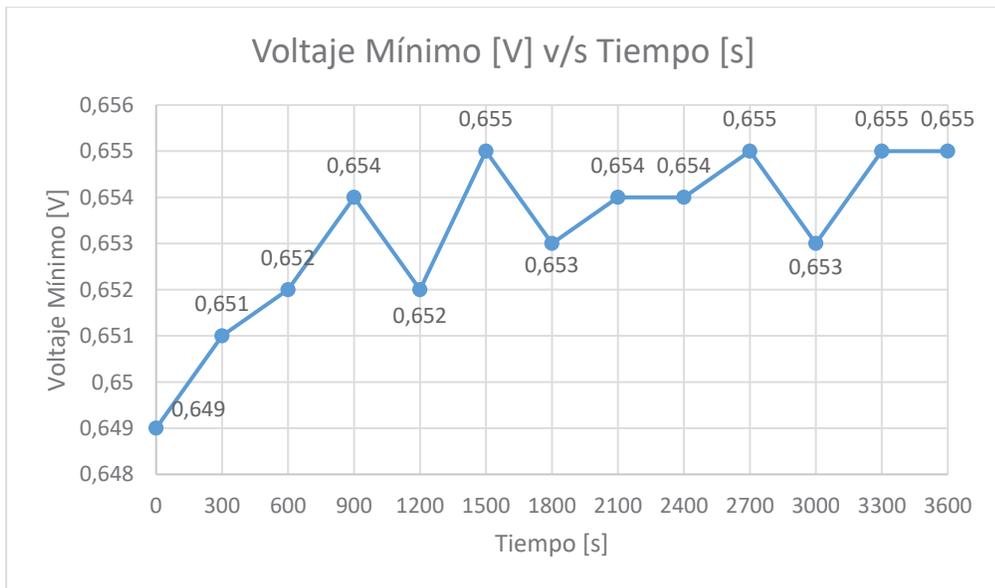


Figura A-14: Variación de voltaje mínimo con respecto al tiempo transcurrido.

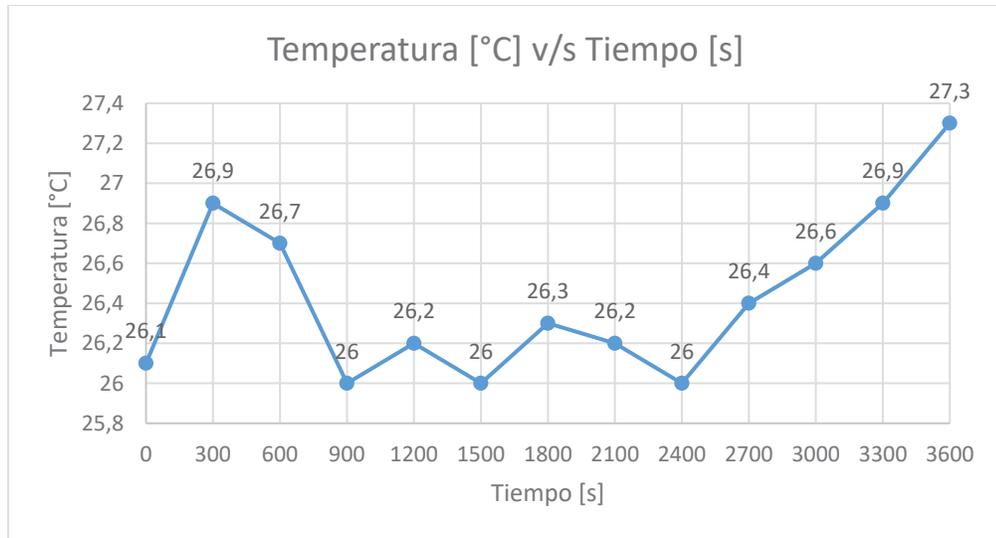


Figura A-15: Variación de la temperatura con respecto al tiempo transcurrido.

Para saber cuánto es la variación que existe en término de porcentaje; donde el valor de la medición cero es el valor de referencia, se pasaron los valores de voltaje máximo, voltaje mínimo y temperatura a porcentaje, dando como resultado los valores de la Tabla A-7:

Tabla A-8: Valores en términos de porcentaje.

Tiempo [s]	Voltaje Max [%]	Voltaje Min [%]	Temperatura [%]
0	0,00	0,00	0,00
300	0,17	0,31	3,07
600	-0,51	0,46	2,30
900	-1,19	0,77	-0,38
1200	-0,80	0,46	0,38
1500	-0,80	0,92	-0,38
1800	-0,57	0,62	0,77
2100	-0,85	0,77	0,38
2400	-0,80	0,77	-0,38
2700	-0,91	0,92	1,15
3000	-0,97	0,62	1,92
3300	-0,85	0,92	3,07
3600	-0,85	0,92	4,60

Para apreciar de mejor forma los resultados de la Tabla A-8 se realizaron los siguientes gráficos:

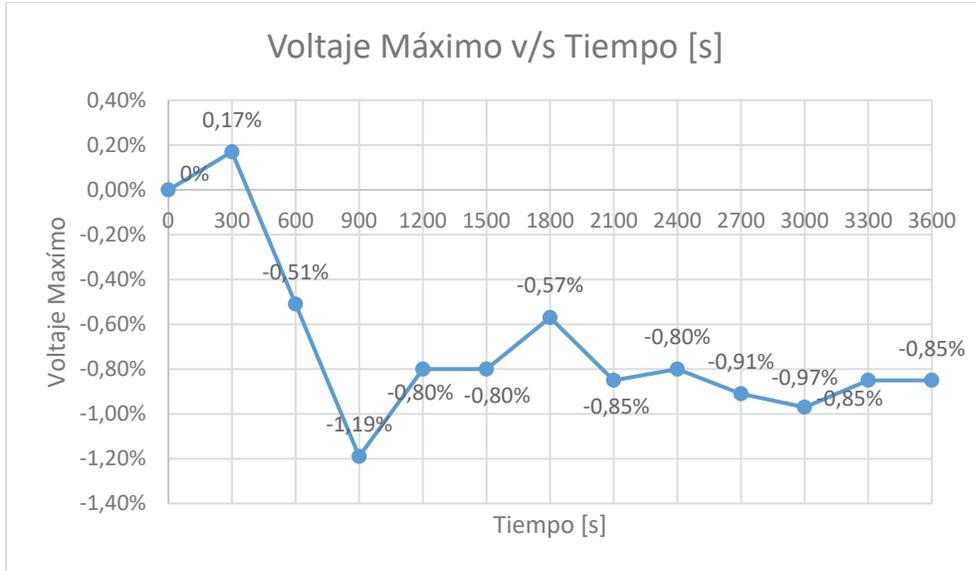


Figura A-16: Variación del voltaje máximo en porcentaje con respecto al tiempo transcurrido.

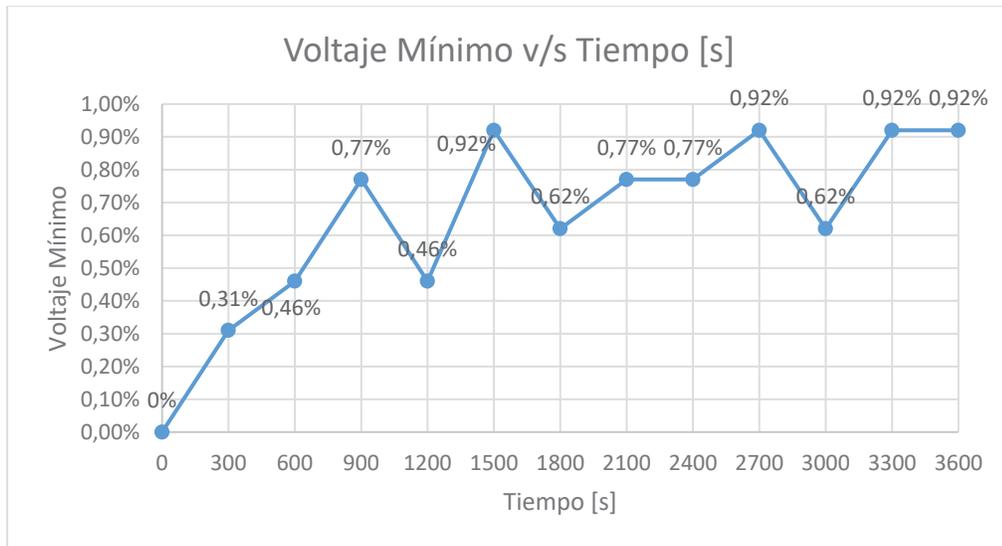


Figura A-17: Variación de voltaje mínimo en porcentaje con respecto al tiempo transcurrido.

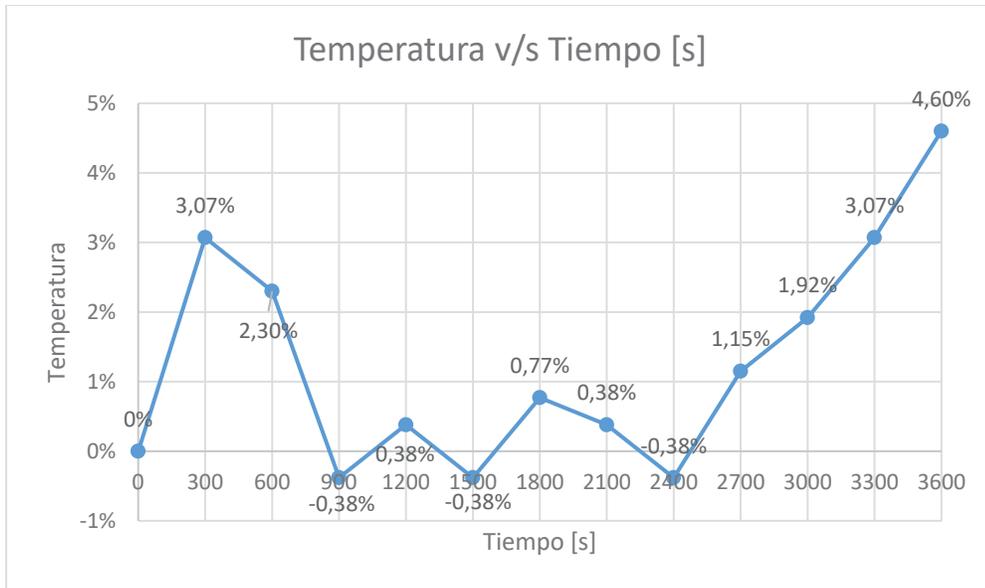


Figura A-18: Variación de la temperatura en porcentaje con respecto al tiempo transcurrido.

Con la información dispuesta en los gráficos, se puede observar que la variación de voltaje máximo no es constante, donde la mayor variación alcanza tan solo un 1.19% del valor original. Además tomando en cuenta la variable temperatura, esta variable no afecta los resultados de las mediciones, ya que esta tiene una variación que no es lineal a medida que avanza el tiempo de funcionamiento.

Lo mismo pasa con la variable de voltaje mínimo, donde su mayor variación es de un 0.92% y no corresponde a la misma medición en donde la variable temperatura alcanzo su mayor alza.

Estas mediciones demuestran que las variaciones de los valores de voltaje mínimo y voltaje máximo son muy pequeñas. Con el fin de que no existan estas variaciones, se promediaron las mediciones de cada receptor y se calculó un valor de voltaje máximo y voltaje mínimo para cada receptor. De esta forma se asegura que los valores más altos o más bajos que se puedan medir estén limitados por estos promedios de valores.

El voltaje máximo y voltaje mínimo promedio de la Tabla A-7 es de:

Tabla A-9: Voltajes promedio.

Voltaje Máximo [V]	Voltaje Mínimo [V]
1.747	0.653

Para saber cuáles son los valores que leerá Arduino en sus entradas análogas, se debe realizar una conversión analoga digital con la ecuación (A-7):

$$\text{valor leído por arduino} = (\text{Voltaje de rssi} * 1023) / 5 \tag{A-7}$$

De la ecuación (A-7) el valor está dividido por 5, este número es el valor de voltaje de referencia que tiene el convertidor análogo digital. Cabe destacar que el Arduino viene por defecto con esta referencia de voltaje.

De esta forma los valores de voltaje máximo y voltaje mínimo en términos de lectura del Arduino nos quedaría como:

$$\text{Voltaje máximo} = (1,747 * 1023)/5 \quad (\text{A-8})$$

$$\text{Voltaje máximo} = 357$$

$$\text{Voltaje mínimo} = (0,653 * 1023)/5 \quad (\text{A-9})$$

$$\text{Voltaje mínimo} = 134$$