

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE
MULTILATERACIÓN DE ÁREA EXTENSA Y SU
FACTIBILIDAD DE APLICACIÓN EN EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

DAVID EDGARDO MENDOZA GUARDADO

MARVIN JOSUÉ VÁSQUEZ LARA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

DR. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título:

**EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE
MULTILATERACIÓN DE ÁREA EXTENSA Y SU
FACTIBILIDAD DE APLICACIÓN EN EL SALVADOR**

Presentado por:

DAVID EDGARDO MENDOZA GUARDADO

MARVIN JOSUÉ VÁSQUEZ LARA

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

SAN SALVADOR, ABRIL DE 2022

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, miércoles 16 de marzo de 2022, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 5:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón
Director

Firma



2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario

Por:

Firma

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguiente

- ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE
(Docente Asesor)

Firma

- MSC. HUGO MIGUEL COLATO RODRIGUEZ

Firma

- DR. CARLOS OSMIN POCASANGRE JIMÉNEZ

Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MULTILATERACIÓN DE ÁREA EXTENSA Y SU
FACTIBILIDAD DE APLICACIÓN EN EL SALVADOR

A cargo de los Bachilleres:

- MENDOZA GUARDADO DAVID EDGARDO
- VÁSQUEZ LARA MARVIN JOSUÉ

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.5
(ocho punto cinco)

AGRADECIMIENTOS

DAVID EDGARDO MENDOZA GUARDADO

A Dios todopoderoso, por haberme permitido tener fortaleza y fe, en momentos difíciles tanto para mi familia como para mi persona. A mis padres, Gloria Guardado de Mendoza y David Edgardo Mendoza, quienes me han apoyado y guiado durante toda mi vida, enseñándome y educándome hasta convertirme en la persona que soy. A mi hermana querida Sharyl por apoyarme desde pequeño y también como adulto, siempre brindándome su ayuda, apoyo y amor como buena hermana. A Fátima, por siempre apoyarme y estar en las buenas y en las malas, que a pesar de todo siempre me ha brindado apoyo y amor. A mis tíos y tías que me han brindado su apoyo. A mis grandes amigos, compañeros y colegas, Marvin Vásquez, Julio Ayala y José Preza, quienes me ayudaron a ser mejor persona y también a crecer tanto personal como profesionalmente y quienes me han brindado apoyo y han sido una mano de ayuda en todo momento. A nuestro asesor de tesis el Ingeniero Werner que nos supo guiar en esta última etapa académica, también agradecer a el personal académico de la escuela de Ingeniería eléctrico como lo es Don Juancito, Don Posada y niña Reinita. Agradecer en general a toda persona que en algún momento de mi vida me dio esa motivación para seguir adelante y ser mejor, muchas gracias a todos.

MARVIN JOSUÉ VÁSQUEZ LARA

A Dios todopoderoso, por haberme permitido tener fortaleza y fe, en momentos difíciles tanto para mi familia como para mi persona.

A mis padres, María Magdalena de Vasquez y Marvin Vasquez Tejada, quienes me han apoyado y guiado durante toda mi vida, enseñándome y educándome hasta convertirme en la persona que soy.

A mi novia, Susana Mendoza por orientarme a tomar la carrera que hoy estoy culminado, persona que siempre ha estado conmigo a pesar de las situaciones adversas me han brindado cariño y apoyo.

A toda mi familia, quienes han estado pendientes de mí, tanto en situaciones adversas como buenas y siempre me han ayudado y brindado mucho soporte.

A mis amigos, Edgardo Mendoza, Julio Ayala y José Preza, quienes me ayudaron en el estudio, apoyo personal, apreciar la amistad sincera que me han brindado.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

LISTA DE FIGURAS.....	1
LISTA DE TABLAS	3
GLOSARIO	4
OBJETIVOS	5
ALCANCES	6
ANTECEDENTES	6
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
JUSTIFICACIÓN	7
INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO I: SISTEMAS DE VIGILANCIA	10
¿Qué son los sistemas de vigilancia en la aeronáutica?	10
Tecnologías de vigilancia.....	10
Radar primario de vigilancia (PSR)	10
Radar secundario de vigilancia (SSR).....	12
Radar modo S	13
Tramas de datos.....	13
Protocolo ASTERIX	14
Vigilancia dependiente automática: Radiodifusión (ADS-B).....	15
Sistema radar en El Salvador	17
Simulaciones de cobertura visual de radares secundarios de El Salvador	18
CAPÍTULO II: SISTEMA DE MULTILATERACION MLAT	22
Sistema de Multilateracion MLAT	22
Parámetros de evaluación en sistemas de multilateracion	24
Sincronismo.....	25
Dilución en la precisión respecto a la geometría de las estaciones receptoras	29
CAPITULO III: EVALUACIÓN DE APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MULTILATERACION EN EL SALVADOR	37
CONCLUSIONES	52

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
ANEXOS	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de funcionamiento de radar primario. (Principio de funcionamiento de un radar primario básico, 2011).	11
Figura 2 Patrón de radiación de antena Radar Primario. (Diagrama de antena real de una antena parabólica en escala logarítmica, medida en una prueba de campo s.f).	11
Figura 3 Esquema SSR. (Universidad Politécnica de Madrid, Esquema SSR Modo S, 2018). ...	12
Figura 4 Señal de interrogación en modo S. (Diego Martin Crespo, Señal interrogación Modo S, 2017).	14
Figura 5 Señal de respuesta en modo S. (Diego Martin Crespo, Señal de Respuesta en Modo, 2017)	14
Figura 6 Esquema de sistema de vigilancia ADS-B (Thales Global, Guía de vigilancia global, s.f.)	16
Figura 7 Visualización de pantalla de información de tráfico abordado (CDTI). (ADS-B y Terminal de exhibición del radar 7.3 CDTI ADS-B, s.f.).	16
Figura 8 Cobertura visual de los radares secundarios a 2000ft de altura.....	18
Figura 9 Cobertura visual de los radares secundarios a 4000ft de altura.....	19
Figura 10 Cobertura visual de los radares secundarios a 6000ft de altura.....	19
Figura 11 Cobertura visual de los radares secundarios a 8000ft de altura.....	20
Figura 12 Flujo e intercambio de mensaje en sistemas MLAT y sus antecesores por medio del protocolo ASTERIX. (Thales Global, Guía de vigilancia global, s.f.).....	22
Figura 13 Esquema que ejemplifica un sistema de multilateración. (Thales Global, Guía de vigilancia global, s.f.).....	23
Figura 14 Cobertura visual en la zona de interés.....	25
Figura 15 Esquema de ejemplo de cómo se comunica un sistema satelital con las estaciones en tierra. (Sistemas de navegación satelital y su aplicación en Guatemala, s.f).....	26
Figura 16 Precisión horizontal para un error de sincronismo de 10ns.....	27
Figura 17 Precisión horizontal para un error de sincronismo de 1ns.....	27
Figura 18 Precisión geométrica para un error de sincronismo de 10ns.	28
Figura 19 Precisión geométrica para un error de sincronismo de 30ns.	29
Figura 20 Volumen tetraédrico encerrado por los vectores trazados desde estaciones hasta aeronave. (Richard B. Langley, Dilution of Precision 1999).	30
Figura 21 Precisión geométrica para un arreglo de 5 estaciones con una geometría triangular. ...	31
Figura 22 Gráfico de precisión para una geometría triangular con 5 estaciones.	32
Figura 23 Carta de navegación aproximación hacia la pista 15.....	37
Figura 24 Carta de navegación de salida de la pista 15 y 33.	38
Figura 25 Posicionamiento de antenas de vigilancia en aeropuerto de Ilopango para cobertura visual.....	39
Figura 26 Cobertura visual que obtenemos con la antena 1 MLAT hacia un punto cualquiera a 1.5 metros de altura sobre la pista y hangares.	40
Figura 27 Cobertura visual que obtenemos con la antena 2 MLAT hacia un punto cualquiera a 1.5 metros de altura sobre la pista y hangares.	40

Figura 28 Cobertura visual que obtenemos con la antena 3 MLAT hacia un punto cualquiera a 1.5 metros de altura sobre la pista y hangares.	41
Figura 29 Cobertura visual que obtenemos con la antena 4 MLAT hacia un punto cualquiera a 1.5 metros de altura sobre la pista y hangares.	41
Figura 30 Cobertura visual que obtenemos con la antena 5 MLAT hacia un punto cualquiera a 1.5 metros de altura sobre la pista y hangares.	42
Figura 31 Alcance óptico de 5 estaciones MLAT	42
Figura 32 Alcance óptico sistema de radares secundarios.....	43
Figura 33 Alcance óptico de sistema de multilateracion a 5000ft.....	44
Figura 34 Alcance óptico de sistema de radares secundarios a 5000ft.....	44
Figura 35 Gráfico de precisión a 1.5 metros de altura.....	45
Figura 36 Gráfico de precisión a 1.5 kilómetros de altura.....	45
Figura 37 Ubicaciones de las estaciones MALT/WAM.....	46
Figura 38 Cobertura visual a 2000ft	47
Figura 39 Cobertura visual a 4000ft	47
Figura 40 Cobertura visual a 6000ft	48
Figura 41 Cobertura visual a 8000ft	48
Figura 42 Gráfico de precisión de sistema MLAT/WAM a 1.5km de altitud	49
Figura 43 Arquitectura del sistema de multilateracion. (Multilateracion, INDRA, s.f).	50
Figura 44 Carta de navegación aproximación hacia la pista15.....	58
Figura 45 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada AMESA.	59
Figura 46 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada IMALU.	59
Figura 47 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada RELTA.....	60
Figura 48 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada MORAM.....	61
Figura 49 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada ATUMA.....	61
Figura 50 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada IMIMO.....	62
Figura 51 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto D20	63
Figura 52 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto D15	64
Figura 53 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada D8.....	64
Figura 54 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada D2.....	65
Figura 55 radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto D7	67
Figura 56 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada 15 DME.....	67
Figura 57 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada RELTA 1B	68
Figura 58 radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada MORAM 1B.....	69
Figura 59 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada IMIMO 1B	69
Figura 60 radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada IMALU1B	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Categorías protocolo Asterix para sistemas de vigilancia aérea.....	15
Tabla 2 Coordenadas de los radares secundarios de El Salvador.	17
Tabla 3 Ubicación de las 5 estaciones receptoras en geometría triangular.....	31
Tabla 4 Ubicación para un arreglo de 5 estaciones con una geometría triangular.	32
Tabla 5 Coordenadas de estaciones MLAT	39
Tabla 6 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada AMESA	59
Tabla 7 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada IMALU	60
Tabla 8 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada RELTA	60
Tabla 9 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada MORAM ..	61
Tabla 10 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada ATUMA .	62
Tabla 11 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada IMIMO ...	62
Tabla 12 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto D20.....	63
Tabla 13 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto D15.....	64
Tabla 14 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada D8	65
Tabla 15 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada D2	65
Tabla 16 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto D7.....	67
Tabla 17 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada 15 DME ..	68
Tabla 18 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada RELTA 1B	68
Tabla 19 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada MORAM 1B	69
Tabla 20 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada IMIMO 1B	70
Tabla 21 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada IMALU 1B	70

GLOSARIO

ATM	Control del tráfico aéreo.
ASTERIX	Estándar para el intercambio de información de servicios de tránsito aéreo.
Aeródromo	Es un área definida de tierra o agua (que incluye todas sus edificaciones, instalaciones y equipos) destinado total o parcialmente a la llegada, salida y movimiento en superficie de aeronaves.
Azimuth	El azimut es el ángulo que forma el Norte y un cuerpo celeste, medido en sentido de rotación de las agujas de un reloj alrededor del horizonte del observador.
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional.
DOP	Dilución de Precisión.
GDOP	Dilución de Precisión geométrica.
HDOP	Dilución de Precisión horizontal.
Multilateracion	Es una técnica de navegación basada en la medición de la diferencia de distancias.
Matriz	Es una tabla bidimensional de números en cantidades abstractas que pueden sumarse y multiplicarse.
Radar	Sistema de detección de objetos empleado en aeronáutica, navegación, astronomía, etc.
PDOP	Dilución de Precisión posicional.
Precisión	Ajuste completo o fidelidad de un dato, cálculo, medida, expresión, etc.
VDOP	Dilución de Precisión vertical.
TDOP	Dilución de Precisión en tiempo.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Evaluar la factibilidad de aplicación de las tecnologías de Multilateración de Área Amplia en los Sistemas de Vigilancia aeronáutica de El Salvador.

Objetivos Específicos

- Demostrar las afectaciones del entorno sobre la precisión de los sistemas MLAT-WAM.
- Ilustrar la incidencia de las variaciones del sincronismo en la exactitud de la información proporcionada por los sistemas MLAT-WAM.
- Proponer herramientas de enseñanza que faciliten la comprensión de los parámetros de diseño asociados a sistemas MLAT-WAM.

ALCANCES

- Analizar la normativa aplicable a sistemas de vigilancia MLAT-WAM.
- Aplicar herramientas de software que demuestren la incidencia del sincronismo y cobertura, en la precisión de los datos proporcionados por los sistemas MLAT-WAM.
- Proponer un diseño de una red de este tipo, para el Aeropuerto de Ilopango de El Salvador, prediciendo teóricamente, su desempeño esperado.
- Establecer un estudio comparativo, entre la eficiencia de la red propuesta en el punto anterior y la que brindan los radares primarios y secundarios, actualmente en funcionamiento en El Salvador y que cubren el aeropuerto antes indicado.
- Proponer una metodología que facilite el diseño de este tipo de sistemas de vigilancia.

ANTECEDENTES

Hasta hace algunos años (en Latinoamérica) los sistemas de vigilancia aeronáutica estaban conformados de forma exclusiva por estaciones de radar (primarios, secundarios o radares de superficie), y en la mayoría de los casos, la cobertura de dichos sistemas, así como su precisión, se ve afectada por las condiciones de su entorno o incluso, por las edificaciones dentro y en los alrededores de los aeropuertos; reducir dicho impacto, requiere de aumentar el número de estaciones, lo que implica costos considerables. Como alternativa, los organismos reguladores de este sector, propusieron el uso de sistemas que aprovechan la información brindada por las redes de satélites de posicionamiento global (o GPS), complementada por estaciones basadas en tierra, que implementan técnicas de triangulación radioeléctrica, a lo que se denominó sistemas de Multilateración de Área Amplia (MLAT-WAM). En la actualidad, algunos aeropuertos de Latinoamérica, han instalado dichos sistemas, con gran éxito, lo que implica que en el corto plazo serán desplegados en Centroamérica, de ahí la importancia del estudio de los criterios de diseño que se deben tomar en cuenta para la instalación de este tipo de soluciones.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a la orografía de países como El Salvador, resulta sumamente difícil lograr una cobertura del 100% del espacio aéreo de nuestro país, con sistemas de vigilancia basados exclusivamente en radares, es por ello que resulta de mucha utilidad, considerar otras alternativas que puedan brindar ese servicio (vigilancia aeronáutica) y dentro de ellas, los sistemas de MLAT-WAM constituyen una opción económica y confiable, por lo cual se hace necesario familiarizarse con los conceptos radioeléctricos que sustentan el funcionamiento de este tipo de sistemas.

JUSTIFICACIÓN

El crecimiento sostenido del transporte aéreo a nivel mundial, requiere de sistemas de vigilancia aeronáutica que fortalezcan la seguridad de las operaciones aéreas, tanto en el aire, como en tierra (movimientos en plataformas y pistas). Los sistemas MLAT-WAM, ofrecen una alternativa importante para cumplir este requerimiento, no obstante, su uso exige comprender las variables que afectan el desempeño de estos sistemas y como las mismas, se aplican en el diseño de soluciones basadas en esta tecnología, lo que constituye un campo de estudio importante en el área de las telecomunicaciones, que puede contribuir al desarrollo del campo aeronáutico de nuestro país; y por ello, la necesidad de que los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la FIA-UES, se familiaricen con este tipo de aplicaciones.

INTRODUCCIÓN

En el capítulo I denominado: “Sistemas de Vigilancia”, se abordan las diferentes tecnologías de vigilancia usadas tradicionalmente en el sector aeronáutico, se comenta su evolución, las características y particularidades de cada uno de estos sistemas, también los beneficios y ventajas, con lo cual vemos su evolución a lo largo de los años. Además, también hacemos mención del protocolo ASTERIX el cual viene siendo la manera en que se estructuran los mensajes de comunicación entre aeronave y los sistemas sea de multilateración o los sistemas tradicionales, es importante la mención del protocolo para poder entender que todos los sistemas de vigilancia aeronáutica siguen este protocolo.

Luego de esto se aborda el tema de la cobertura visual y con respecto a ello se hace el análisis correspondiente en la zona de interés a cubrir y se verifican los requerimientos a cumplir respecto a la implementación de un sistema de multilateración para la zona de interés, que en nuestro caso sería respecto al aeropuerto de Ilopingo, como resultado de este análisis, pudimos notar que eran necesarias 5 estaciones receptoras para cumplir con el criterio de que en la zona de interés en todo momento debe existir una cobertura visual, en la cual 4 estaciones receptoras, como mínimo, deben brindar cobertura al aeronave en todo momento.

Como siguiente punto en el capítulo II se trataron los Sistemas de multilateración, su funcionamiento, parámetros que determinan la precisión en este tipo de sistemas como lo son el sincronismo, la cobertura visual y la geometría de las estaciones respecto al aeronave y la zona de interés a cubrir el espacio aéreo. En esta parte se realizaron las pruebas respectivas por medio del lenguaje de programación Python, el cual nos brinda esa facilidad al trabajar la parte algebraica y matricial que corresponde a los algoritmos de multilateración. Con el desarrollo de las fórmulas que son usadas en localización hiperbólica, que es la base de los sistemas de multilateración, luego se logró simular el sitio de emplazamiento, las geometrías respectivas y las distintas variables que afectan en la dilución de precisión en la zona de interés. Con ello también desarrollamos un concepto importante como lo es el índice de dilución de precisión geométrica, al generar gráficas de calor del índice de dilución de precisión geométrica, el cual es el más importante índice de dilución de precisión, ya que nos ayuda a elegir la geometría que más se adapte a nuestro sitio de emplazamiento, en este caso el aeropuerto de Ilopingo. Luego de esto tomando la información recopilada del segundo capítulo y apoyándonos en simulaciones a través de software, procedimos

a realizar el desarrollo del capítulo con lo cual se generó las coberturas visuales en las zonas de interés, también se generaron los gráficos de precisión con las posiciones adecuadas para las estaciones en tierra obtenidas del análisis de cobertura visual, con ello finalmente traslapamos las gráficas de cobertura visual con las gráficas de precisión variando las altitudes y algunas variables como el error de sincronismo generado por alteraciones propias del sitio en estudio, por ultimo a partir de todos los datos obtenidos mencionamos que es factible la implementación de un sistema de multilateracion para el aeropuerto de Ilopango y complementamos con las simulaciones obtenidas el estudio en la zona de interés.

CAPÍTULO I: SISTEMAS DE VIGILANCIA

¿Qué son los sistemas de vigilancia en la aeronáutica?

Son soluciones que permiten a los controladores aéreos visualizar el tráfico aéreo con finalidad llevar un control más preciso, seguro y eficiente basado como mínimo en conocer la posición de las aeronaves.

Las primeras soluciones están basadas en los radares, el término radar proviene del acrónimo Radio Detection and Ranging (detección y medición de distancia por ondas radio). Funcionan para detectar fenómenos climatológicos (huracanes o tormentas) y detectar cualquier tipo de aeronaves.

Los radares se apoyan del principio definido por el alemán Heinrich Hertz en 1886 cuando a través de diversos experimentos demostró que ondas electromagnéticas tienen las mismas propiedades que ondas luminosas y por tanto se pueden reflejar.

El sistema de vigilancia tiene como finalidad de observar y detectar cualquier blanco que pase por la ubicación de diseño con la fiabilidad de obtener coordenadas exactas en tiempo real como información básica, dependiendo del tipo de radar nos pueden dar más información si estos son compatibles con el transpondedor que llevan las aeronaves receptoras.

Tecnologías de vigilancia.

Radar primario de vigilancia (PSR)

El PSR este sistema está equipado con una antena con rotación 360 grados, que envía ondas electromagnéticas. Cuando la onda electromagnética toca una aeronave, se refleja de nuevo hasta el radar. Al medir el tiempo que tarda la onda en reflejarse hacia el radar primario se puede calcular la posición de la aeronave.

La posición exacta de la aeronave se envía al sistema de control del tráfico aéreo, la información es vista por el controlador de tráfico aéreo.

La ventaja del PSR es que detecta a todas las aeronaves dentro de su alcance, aunque no tengan equipo de a bordo, esto se conoce como vigilancia independiente a lo que corresponde que ninguna

aeronave puede permanecer invisible. Este es el único radar que proporciona la ubicación sin equipo a bordo.

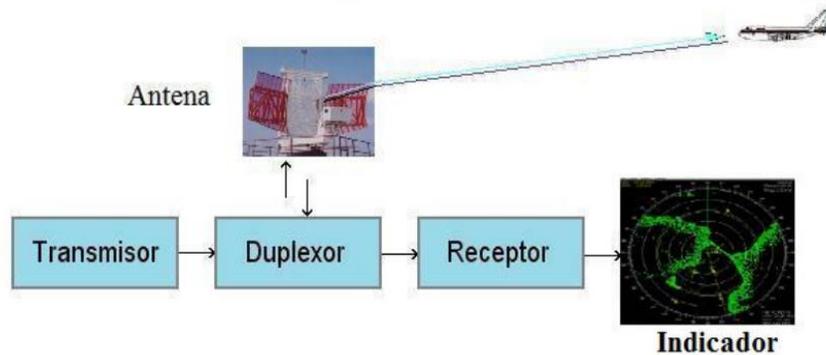


Figura 1 Esquema de funcionamiento de radar primario. (Principio de funcionamiento de un radar primario básico, 2011).

El transmisor genera un pulso de alta frecuencia que se dirige hacia el duplexor, este se encarga de llevar la energía electromagnética hacia la antena y luego es enviada de forma de un haz muy direccional.

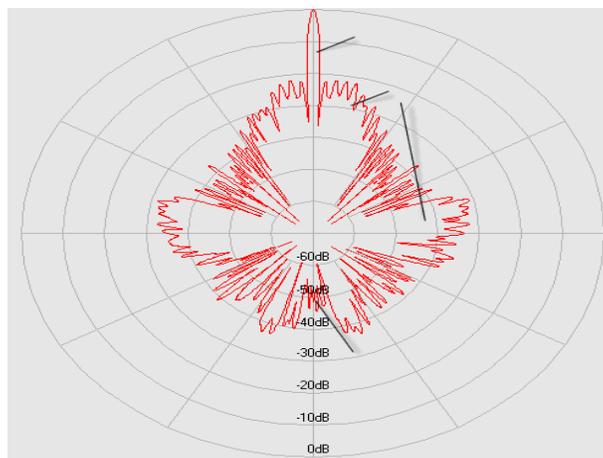


Figura 2 Patrón de radiación de antena Radar Primario. (Diagrama de antena real de una antena parabólica en escala logarítmica, medida en una prueba de campo s.f).

La onda emitida por el radar presenta obstáculos que estos pueden representar falsos blancos, para poder eliminar los falsos blancos se tiene la unidad de procesado en la cual por filtrados de señal hacen la eliminación de los falsos blancos posteriormente se envía la información para la visualización de los operarios en TMA.

Ventajas de Radar primario de vigilancia (PSR)

- Para la detección no se requiere ningún equipo de a bordo
- Se puede utilizar para la vigilancia terrestre
- Información meteorológica

Desventajas de Radar primario de vigilancia (PSR)

- Las aeronaves no son identificadas
- Baja tasa de actualización (entre 4 y 12 Segundos)
- Alto costo del equipo
- Alcance limitado; entre 50-75 millas náuticas para poder captar reflexiones a mayor distancia aumenta la potencia y estos captarían falsos blancos, como rótulos o vallas publicitarias.

Radar secundario de vigilancia (SSR)

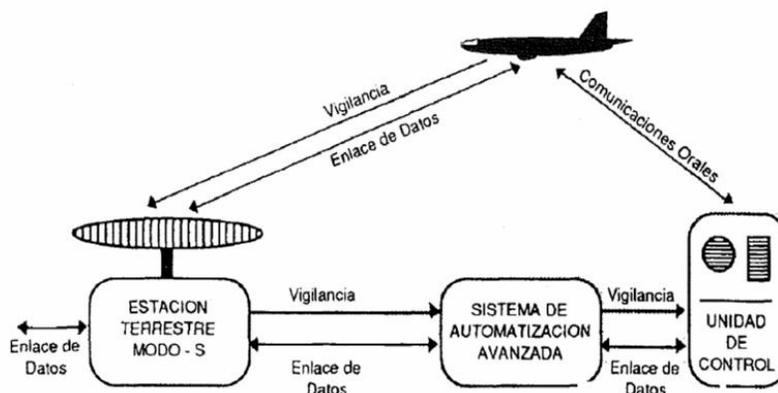


Figura 3 Esquema SSR. (Universidad Politécnica de Madrid, Esquema SSR Modo S, 2018).

El SSR requiere que la aeronave esté equipada con un transpondedor a bordo, de la misma manera que el radar primario tiene un funcionamiento muy similar el radar secundario, ya que la antena radar emite una onda con una frecuencia de 1030 MHz y esta cuando es recibida por la aeronave con el transpondedor a bordo este emite como resultado una señal codificada en una frecuencia de 1090 MHz, la cual es recibida por el radar secundario, luego se decodifica la información que posteriormente es enviada a TMA para que los operarios conozcan los parámetros de interés.

La información que proporciona el transpondedor es la identificación de la aeronave, velocidad, altitud entre otros parámetros que esto se puede tomar como una ventaja ante los radares primarios, más sin embargo el transpondedor no da la ubicación de la aeronave, la ubicación se obtiene de la manera que se hace la diferencia del tiempo que es emitida la onda por el radar secundario y la señal de respuesta que hace el transpondedor que luego llega al radar secundario.

Radar modo S

Presenta mejora en el intercambio de información, pasando de 12 bits en un sistema secundario a 112 bits de modo S, esto marca una importante mejoría, se podrán hacer interrogaciones de manera selectiva, solicitar más información como la velocidad y código único de identificación.

Ventajas de radar secundario de vigilancia (SSR)

- Se detecta la identidad, la altitud de la aeronave y su velocidad.
- Cubre un alcance mayor que el radar primario.
- Utilización de transpondedores en modo S.

Desventaja de radar secundario de vigilancia (SSR)

- Baja velocidad de actualización, y latencia alta.

Tramas de datos

Para hablar de tramas de datos del radar secundario pondré en contexto sobre los radares primarios que la transmisión de información es básica, es un pulso de radio frecuencia caracterizado por su duración y su amplitud, la respuesta es una reflexión a esa señal por lo tanto tendrá mismas características de un pulso de radio, pero de menor nivel porque es una reflexión y a partir de analizar las características del pulso y del tiempo

ESE tiempo es calculado mediante sistemas complejos de sincronismo, es para tener una referencia cuanto tiempo toma en que se emite un pulso RF y en regresar la reflexión de ese mismo pulso.

A ese tiempo lo llamaremos Tiempo de llegada (TOA), es el instante de tiempo absoluto en que una señal de radio que se emite por medio de un transmisor llega a un receptor remoto.

Las mediciones de este tiempo que acabamos de mencionar es parte fundamental de los sistemas de multilateración de los cuales hablaremos más adelante

En los secundarios la transmisión de datos es más compleja como la que se muestra en las figuras 4 y 5.

Lo que varía es la complejidad de la información transmitida, son tramas conformadas por bits en diferentes cantidades, la trama que ven en pantalla es correspondiente a squitter extendido.

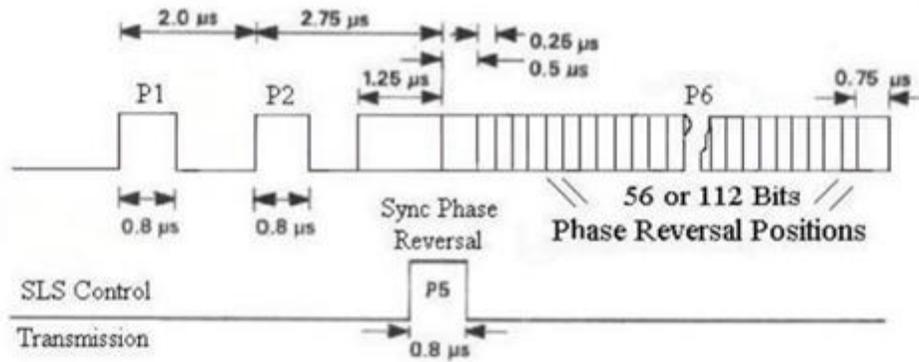


Figura 4 Señal de interrogación en modo S. (Diego Martin Crespo, Señal interrogación Modo S, 2017).

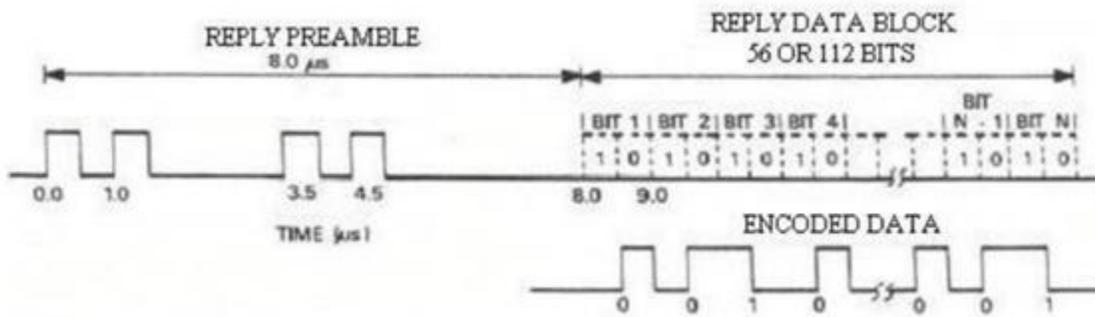


Figura 5 Señal de respuesta en modo S. (Diego Martin Crespo, Señal de Respuesta en Modo, 2017)

Protocolo ASTERIX

Con el surgimiento de nuevas normas de parte de organismos reguladores como la OACI, EUROCONTROL y FAA, se desarrollaron códigos abiertos de transmisión de datos para sistemas radar de los cuales uno de ellos es el utilizado a nivel mundial de Asterix de eurocontrol un protocolo diseñado por eurocontrol para el intercambio de información entre sensores y centros de control mediante una estructura de mensajes. Su acrónimo viene de “All Purpose Structure Eurocontrol Surveillance Information Exchange”; este protocolo codifica toda la información relacionada a aeronaves por un radar dentro de una trama de datos que puede ser transmitida dentro

de una red de tipo LAN. Asterix facilita la integración de sistemas de intercambio de datos obtenidos del radar entre distintas regiones, Asterix nos permite incrementar el intercambio de datos de vigilancia dentro y entre países, su propósito es la transferencia de información usando una representación estándar de los datos intercambiados, la transmisión de datos puede ir por cualquier medio de comunicación disponible como lo son líneas seriales síncronas y asíncronas, LAN, entre otros.

El creador designo la manera de ordenar los bits dependiendo del sistema de vigilancia empleado, las cuales están en las siguientes categorías:

Sistema de vigilancia	Categoría
Radar Primario y Secundario	34 y 38
ADS-B	21, 22 y 23
MLAT	19 y 20

Tabla 1 Categorías protocolo Asterix para sistemas de vigilancia aérea

Vigilancia dependiente automática: Radiodifusión (ADS-B)

Una aeronave utiliza el GNSS (sistema global de navegación por satélite) para determinar la ubicación esta a su vez transmite la información a las estaciones terrestres. Las estaciones terrestres procesan y luego envía la información al sistema de control del tráfico aéreo, que se muestran en las pantallas de control de tráfico aéreo pero a su vez si otra aeronave tiene antena receptora de ADS-B IN esta puede ver la posición de otras aeronaves en tránsito, esto permite que el piloto tenga información al instante sin tener que comunicarse con TMA, la información difundida además de la posición es: la altitud de la aeronave, velocidad, identidad como modelo de la aeronave entre muchas más información que tienen los sistemas abordo.

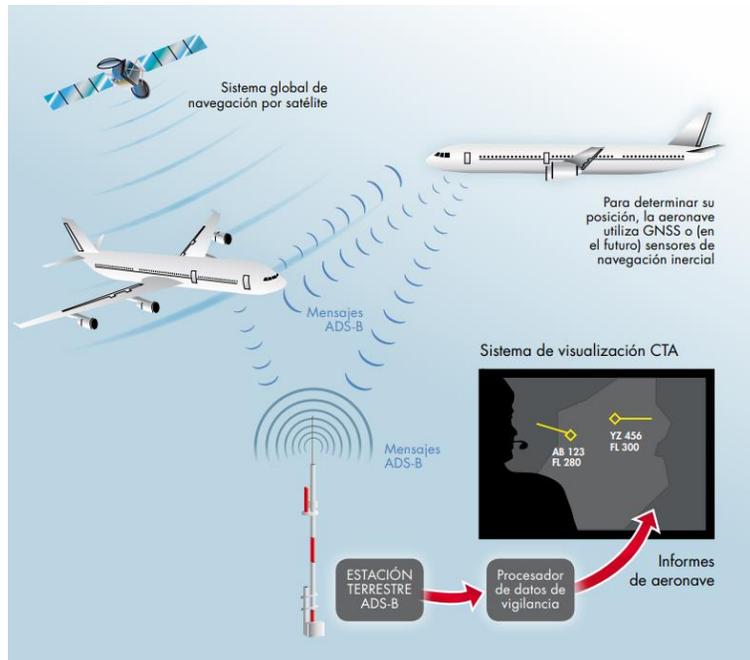


Figura 6 Esquema de sistema de vigilancia ADS-B (Thales Global, Guía de vigilancia global, s.f.)

Las aeronaves que cuentan con antenas ADS-B llevan instalado una pantalla para visualizar la información proporcionada por radiodifusión, este tipo de herramienta se conocen como “pantalla de información de tráfico abordo” CDTI (Cockpit Display of Traffic Information).



Figura 7 Visualización de pantalla de información de tráfico abordo (CDTI). (ADS-B y Terminal de exhibición del radar 7.3 CDTI ADS-B, s.f.).

Ventajas de Vigilancia dependiente automática: Radiodifusión (ADS-B)

- Los costos de adquisición e instalación para un solo sitio ADS-B son los más bajos en comparación con otros sistemas de vigilancia.

- Utilizado en aplicaciones de vigilancia tanto terrestres como aéreas.
- Enlace de datos terrestres/aéreos disponible.
- Baja latencia.
- Alta tasa de actualización (1 segundo).
- Alta precisión (precisión de GPS).
- Muy bajo costo de ciclo de vida.

Desventajas de Vigilancia dependiente automática: Radiodifusión (ADS-B)

- Para determinar la posición y la velocidad se basa exclusivamente en el GNSS (sistema global de navegación por satélite).
- Los efectos ionosféricos alrededor del ecuador afectan al GNSS.

Sistema radar en El Salvador

El Salvador consta de 2 radares secundario y 1 primario, estos se encargan de todo el tráfico aéreo en El Salvador, para determinar la distancia del alcance de los radares secundarios se presentarán simulaciones de cobertura visual en Radio Mobile.

Radar	Coordenada		
	Latitud	Longitud	Altitud
SSR cercanías del lago Ilopango	13.623	-89.0622	941.1 metros
SSR aeropuerto internacional	13.43844	-89.05352	25.6 metros

Tabla 2 Coordenadas de los radares secundarios de El Salvador.

Se tomarán datos a diferentes altitudes porque las cartas de navegación tienen un diseño que tienen coordenadas y dependen de la altitud que la carta sugiera, por lo que conlleva a tomar en cuenta nuestro análisis de diseño y comparativo con el sistema actual de El Salvador, las altitudes tomadas en cuenta son las siguientes: 2000ft, 4000ft, 6000ft y 8000ft.

De manera gráfica se puede observar la cobertura visual de SSR que en la zona sur del Lago de Ilopango en color rosa oscuro y la cobertura visual del SSR que está en las cercanías de la pista del Aeropuerto del Internacional de EL Salvador se mostrara con color verde.

Se han traslapados los resultados de ambos radares por el hecho que los 2 trabajan juntos, los radares después de comunicarse con el transponder a bordo de los aviones esa información es

enviada a la unidad de procesamiento que se encarga de conmutar los datos de los radares y entregar la información a las unidades de control de cada aeropuerto de El Salvador.

La configuración que se utilizó en Radio Mobile que el sensor este una altura de 14 metros a partir de la altitud señalada en la tabla 1 para cada radar porque los radares están empotrados en una estructura que la del SSR de Ilopango se conoce que es de 14 metros y para el Aeropuerto Internacional de El Salvador se asumió la altura, se realizara un barrido 360 grados porque a pesar que los radares secundarios tienen un patrón de radiación direccional ellos giran en su eje para hacer un barrido total y el último valor para obtener los resultados siguientes, el step(paso) este parámetros no da una cobertura visual más uniforme.

Simulaciones de cobertura visual de radares secundarios de El Salvador

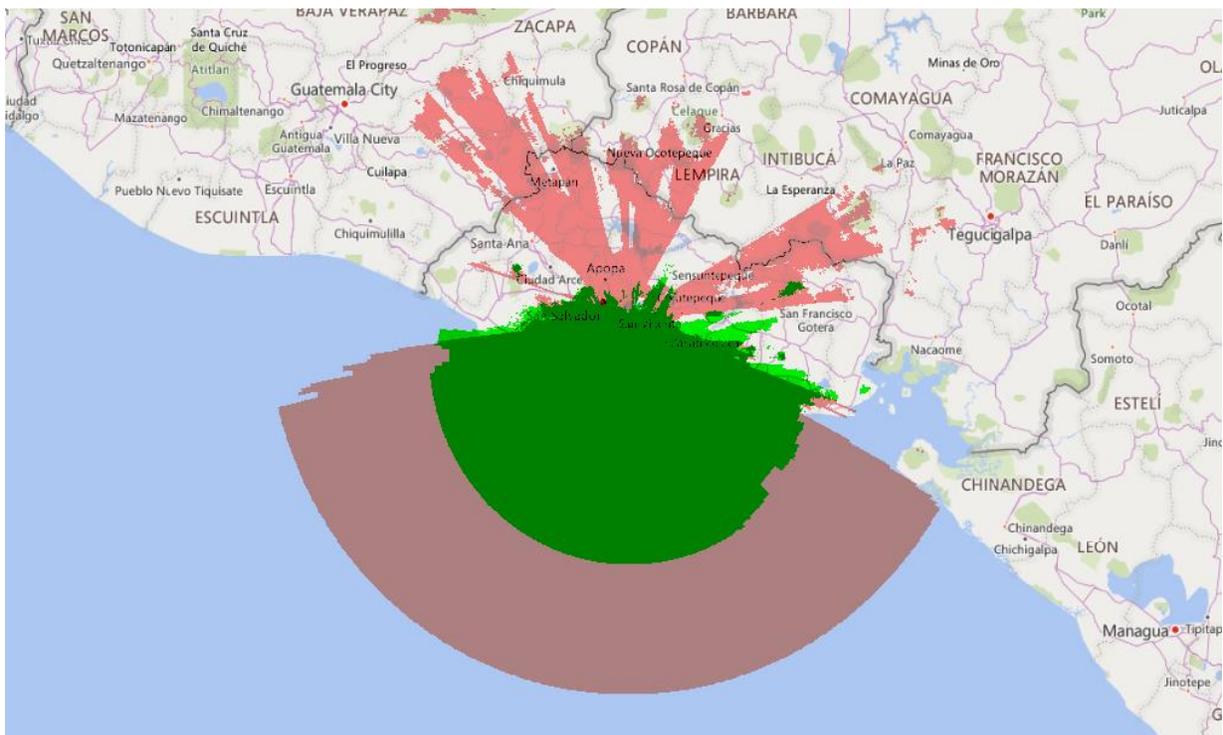


Figura 8 Cobertura visual de los radares secundarios a 2000ft de altura

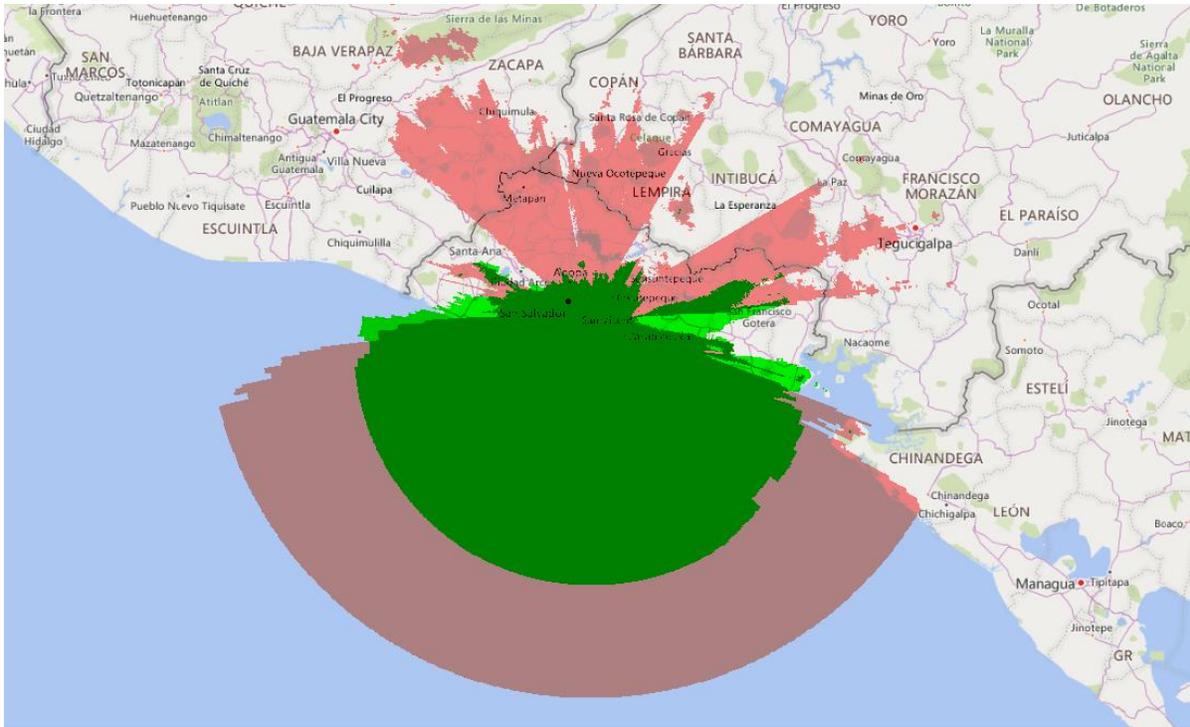


Figura 9 Cobertura visual de los radares secundarios a 4000ft de altura

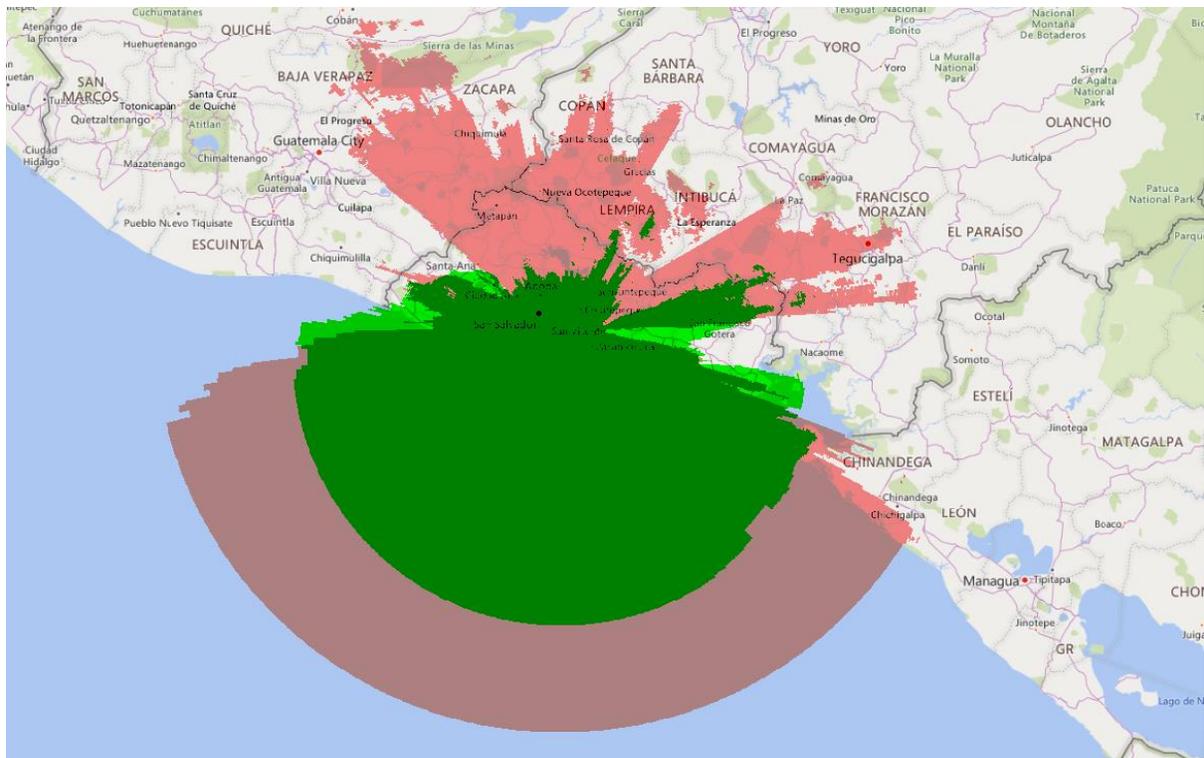


Figura 10 Cobertura visual de los radares secundarios a 6000ft de altura

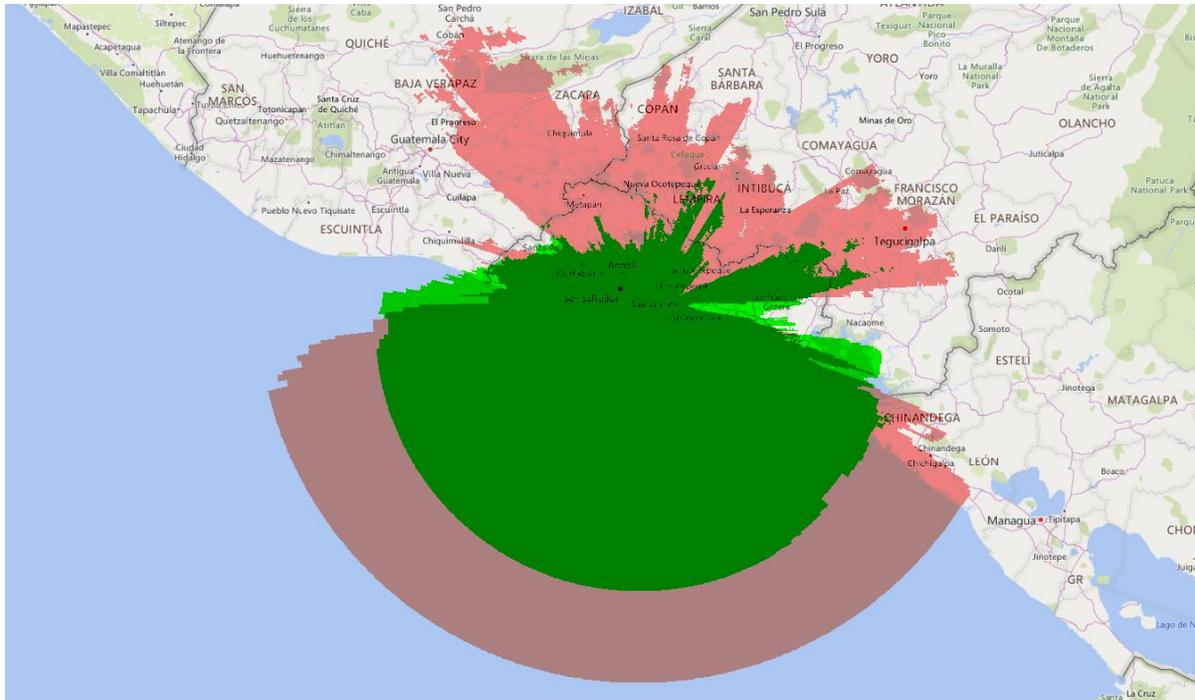


Figura 11 Cobertura visual de los radares secundarios a 8000ft de altura

Los resultados nos muestran que el radar que está a la orilla de del aeropuerto de Ilopango tiene mejor cobertura visual que el radar que está en la cercanías de la pista del aeropuerto Internacional, esto se debe a la ubicación que tiene el radar de Ilopango esta mejor ubicado considerando que la altura es mucho más alta que el radar del aeropuerto internacional, al estar más alto tiene menos obstáculos y más campo abierto que esta consideración beneficia a este tipo de simulación, el del aeropuerto internacional se topa con toda la horrografia de El Salvador; Entre los resultados de las gráficas de 2000ft y 4000ft es deficiente los alcances actuales de los radares secundarios en El Salvador sin embargo es suficiente para el tráfico aéreo manejado en El salvador pero para tener mejores resultados deberían actualizar los Sistemas radares.

Basándonos en los funcionamientos de los radares primarios, estos seguirán siendo útiles para uso militar y para detectar condiciones meteorológicas, esto no lleva que el uso de este tipo de radar se seguirá usando a pesar de las dificultades que serían el costo, el alto consumo de energía, la baja tasa de actualización para vigilancia aérea, la información proporcionada solo es ubicación no nos entrega información de identificación de la aeronave, más sin embargo la recomendación es no invertir en este tipo de radares para vigilancia aérea.

Los radares secundarios a pesar que cumple con los requerimientos de las cartas de navegación, esta alternativa cada vez se ira sustituyendo porque hay sistemas más eficientes, la cualidad más importante de este tipo de radar es que tiene compatibilidad con los transponder a bordo de las aeronaves, como los radares primarios tienen alto costo, alto consumo energético, Baja velocidad de actualización, y latencia alta.

Los resultados de las simulaciones de cobertura visual en Radio Mobile para los radares secundarios nos muestran que es la justa y suficiente para hacer maniobras de descenso a los aeropuertos de El Salvador, sin embargo, la altitud usual de los vuelos comerciales es de 3000ft si una aeronave solo pasa por nuestro país y se ubica su camino de este a oeste o viceversa no lo podríamos detectar con los radares de El Salvador el sistema se apoya de radares externos a El Salvador que esto corresponde a la interconexión de radares de Centroamérica.

CAPÍTULO II: SISTEMA DE MULTILATERACION MLAT

Sistema de Multilateracion MLAT

Los sistemas de multilateracion son la tecnología más reciente que se está implementando en sistemas de vigilancia aérea, con estos sistemas se pretende estimar la posición de un objetivo mediante algoritmos de multilateracion, el objetivo de los sistemas de multilateracion es estimar la posición de un objetivo por medio de fuentes de referencia, como pueden ser estaciones receptoras en un sistema de vigilancia aéreo, en este caso las estaciones receptoras reciben señales provenientes del transpondedor de la aeronave, el cual por medio del protocolo ASTERIX emite los distintos mensajes, la unidad procesamiento central ubicada usualmente dentro del aeropuerto procesa mediante algoritmos de multilateracion estos datos, con el fin de ser usados y presentados al usuario final siendo este el controlador aéreo:

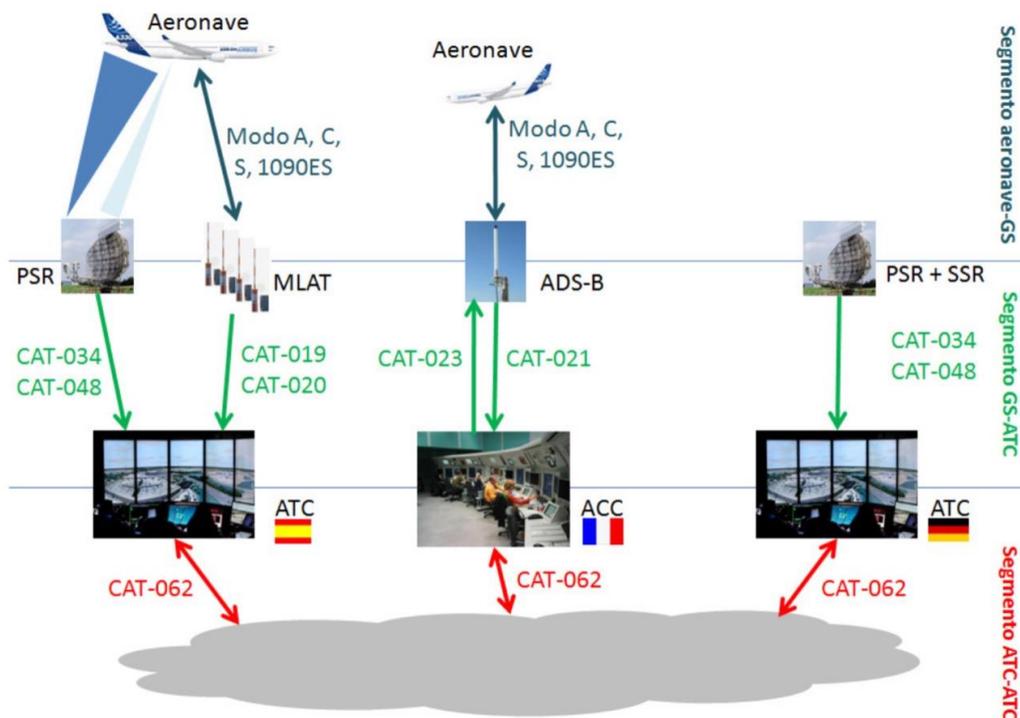


Figura 12 Flujo e intercambio de mensaje en sistemas MLAT y sus antecesores por medio del protocolo ASTERIX. (Thales Global, Guía de vigilancia global, s.f.)

Los sistemas de multilateración permiten localizar aeronaves a partir de la diferencia en tiempos de llegada conocido en inglés por sus siglas TDOA(time difference of arrival), el principio de funcionamiento se basa en que una estación central interrogadora emitirá una señal de interrogación la cual será recibida por el equipo de abordo, el transpondedor, el transpondedor emitirá su respectiva respuesta a la frecuencia correspondiente para este caso de 1090MHz, dicha respuesta llegara a las distintas estaciones receptoras que se encuentran en tierra formando parte del sistema de multilateración, a partir de los distintos tiempos de llegada de la onda a cada una de las estaciones, el sistema de procesamiento central usando algoritmos de multilateración llegara a estimar la ubicación de la aeronave.

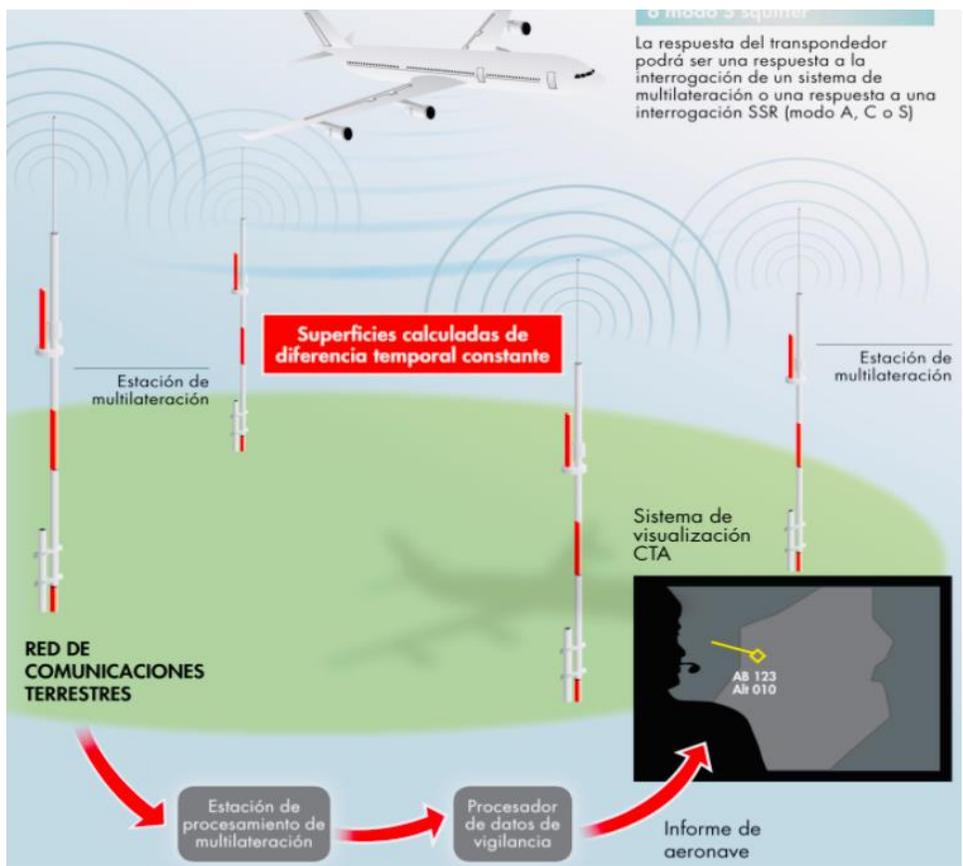


Figura 13 Esquema que ejemplifica un sistema de multilateración. (Thales Global, Guía de vigilancia global, s.f.)

Los sistemas de Multilateración tienen diferentes aplicaciones dependiendo de la zona de interés que se busca cubrir:

- Aeropuertos: Se utiliza para localizar e identificar aeronaves y vehículos en tierra, así como las aeronaves que vuelen en las inmediaciones del aeropuerto, como en las sendas de planeo.
- Terminal Aéreo: Se utiliza como radar secundario para localizar e identificar las aeronaves dentro de las áreas terminales y las fases de aproximación.
- Áreas extendidas: Esta aplicación se le conoce comúnmente como WAM (Wide Area Multilateration). Esta tecnología es especialmente recomendable para áreas de orografía complejas.

Parámetros de evaluación en sistemas de multilateración

Al hablar de sistemas de multilateración es importante mencionar los factores que afectan la precisión, estos sistemas siguen adoleciendo de las mismas limitaciones que los sistemas radares anteriormente mencionados, es decir que son sistemas de alcance óptico y para asegurar la cobertura de una aeronave este sistema va a seguir necesitando una línea vista sin obstáculos, el mínimo número de estaciones que debe recibir la información para estimar la posición de la aeronave debe ser de cuatro, para una detección en un espacio de tres dimensiones. Es importante hacer un estudio previo de la precisión que tendrá el sistema, esta precisión depende esencialmente de variaciones físicas.

Alcance óptico

En la evaluación de la precisión de estos sistemas podemos mencionar que se deben evaluar varios aspectos entre ellos uno es asegurar el alcance óptico a lo largo de todo el espacio que se desea cubrir también es importante evaluar los grados de precisión que se pueden obtener o que puede proporcionar el sistema. El alcance óptico se puede desarrollar mediante herramientas de cobertura de radio entre ellas tenemos radio Mobile; el análisis de alcance óptico nos da como resultado que, a partir de la zona de interés, cual es el número de estaciones necesario para poder brindar esa cobertura, partiendo de que debemos mantener cuatro estaciones que estén brindando cobertura en la zona de interés en todo momento.

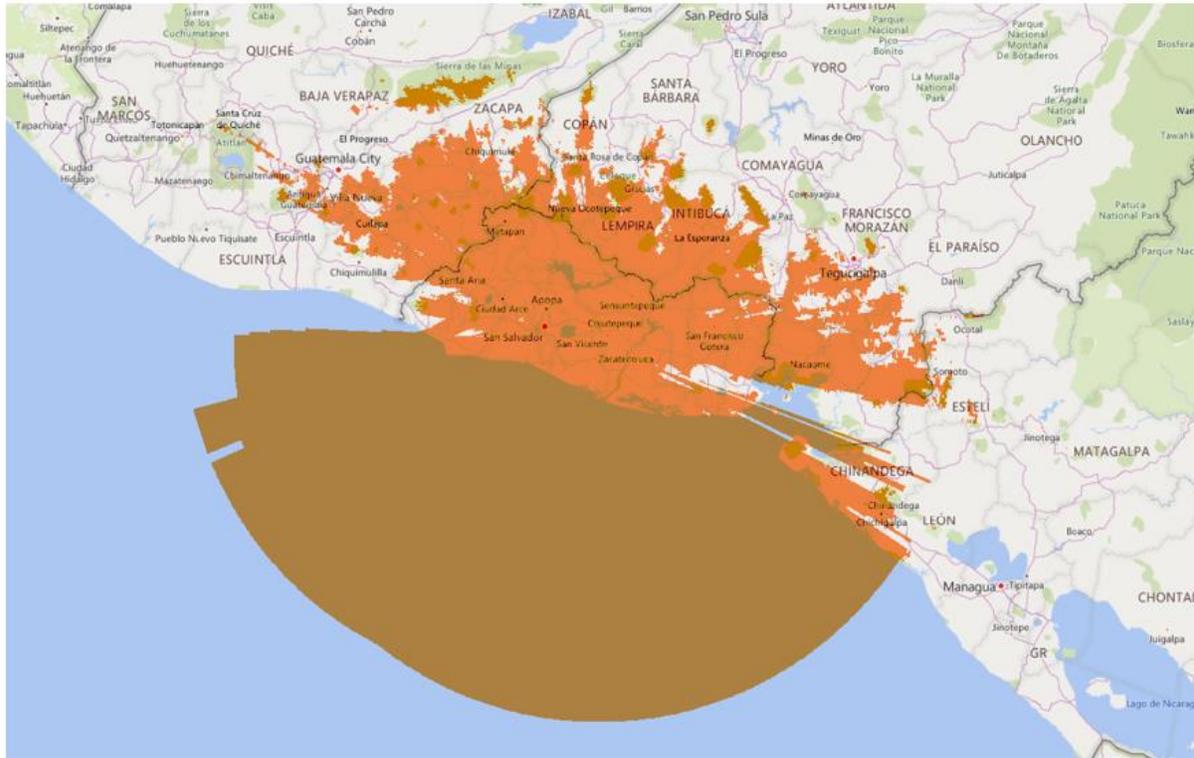


Figura 14 Cobertura visual en la zona de interés.

Sincronismo

Otro de los parámetros de evaluación en un sistema de multilateración es el sincronismo, debido a que, al hacer una medición en el tiempo de emisión de una onda electromagnética, el sincronismo entre la estación interrogadora y las estaciones receptoras en tierra es muy importante minimizar este error.

En los sistemas de multilateración el sincronismo se logra a través de un reloj común, el cual puede ser implementado a través de un reloj propio de la red, de alta precisión como lo es un reloj de rubidio, pero por el incremento en el costo del sistema no suele usarse.

Actualmente los fabricantes decidieron utilizar como medio de sincronización señales que provienen de redes de sistemas de posicionamiento global las cuales brindan una alta precisión, esto debido a los costos de operación y la alta precisión que ofrecen.



Figura 15 Esquema de ejemplo de cómo se comunica un sistema satelital con las estaciones en tierra. (Sistemas de navegación satelital y su aplicación en Guatemala, s.f)

El sincronismo como tal no se puede predecir en cuanto al entorno en particular en donde se va a instalar el sistema, pero se pueden usar modelos de predicción teórica, la evaluación del sincronismo en campo requiere de instrumentos de medición especializados, pero los errores de sincronismo comúnmente se encuentran entre el rango de los 10 nano segundo hasta los 30 nano segundo.

Este error puede verse incrementado por condiciones que van desde interferencias electromagnéticas en el lugar de instalación, como variaciones de la ionosfera, error de propagación o reflexiones.

Los fabricantes en la actualidad cuantifican el error de sincronismo en gráficos de precisión donde se puede apreciar en que a medida que el error de sincronismo aumenta, la precisión disminuye para el total del área de interés.

A modo de ejemplo a continuación se muestra un gráfico que el fabricante de sistemas de vigilancia aérea y sistemas de multilateración, INDRA, ha generado a modo de ejemplificar como el error de sincronismo afecta en la precisión en la zona de interés:

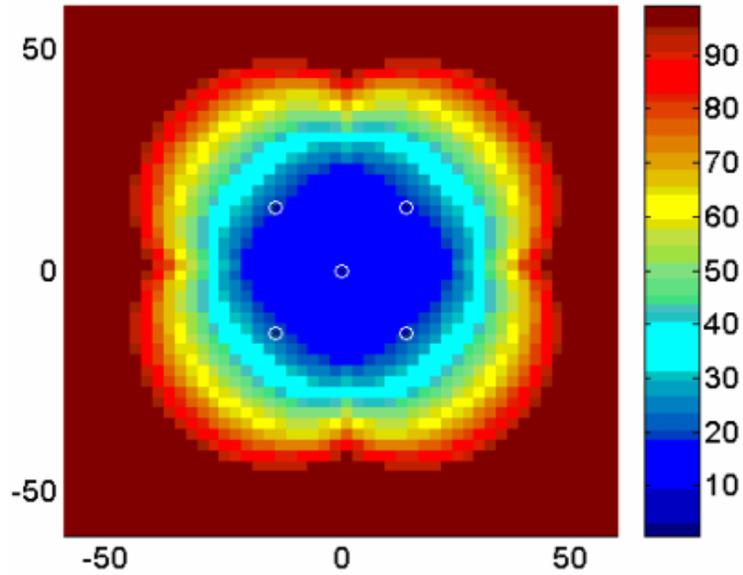


Figura 16 Precisión horizontal para un error de sincronismo de 10ns.

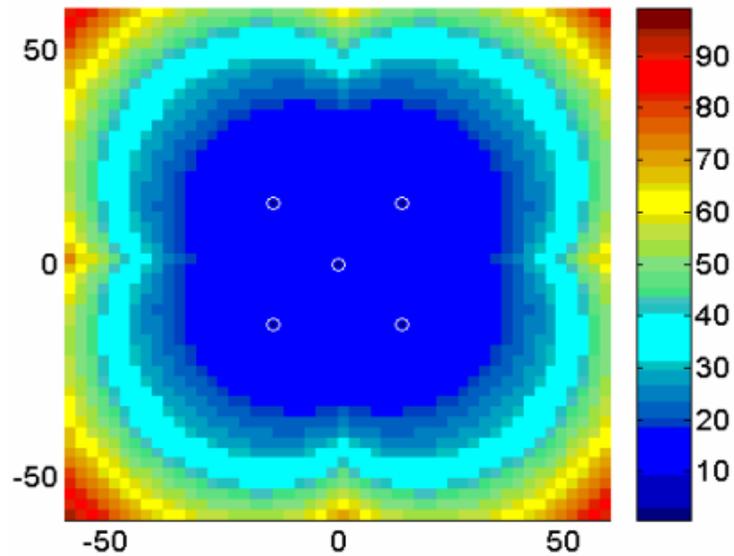


Figura 17 Precisión horizontal para un error de sincronismo de 1ns.

En este caso el fabricante INDRA no da mayores detalles en cuanto a las unidades que representan los ejes, pero conociendo que es una gráfica de precisión se intuye que para los ejes X,Y se representan en unidades de kilómetros un área de 100km x 100km, la escala de colores indica la cuantificación del error horizontal a medida que aumenta este número indica que el error es mayor, este error también se le suele llamar como DOP o dilución de precisión que indica como la precisión disminuye a medida s valor aumento, este valor es un factor escalar, adimensional. De

los gráficos anteriores podemos notar que, por la parte interna del arreglo de 5 estaciones en forma de X, la precisión es mayor y a medida que nos alejamos de este arreglo la precisión disminuye, también podemos notar que a mayor error de sincronismo menor precisión en la zona de interés.

Por nuestra parte hemos generado distintos gráficos de dilución de precisión, para comprobar el efecto que tiene el error de sincronismo en los sistemas de multilateración:

Dilucion de precision con 5 estaciones y un error de sincronismo de 10ns

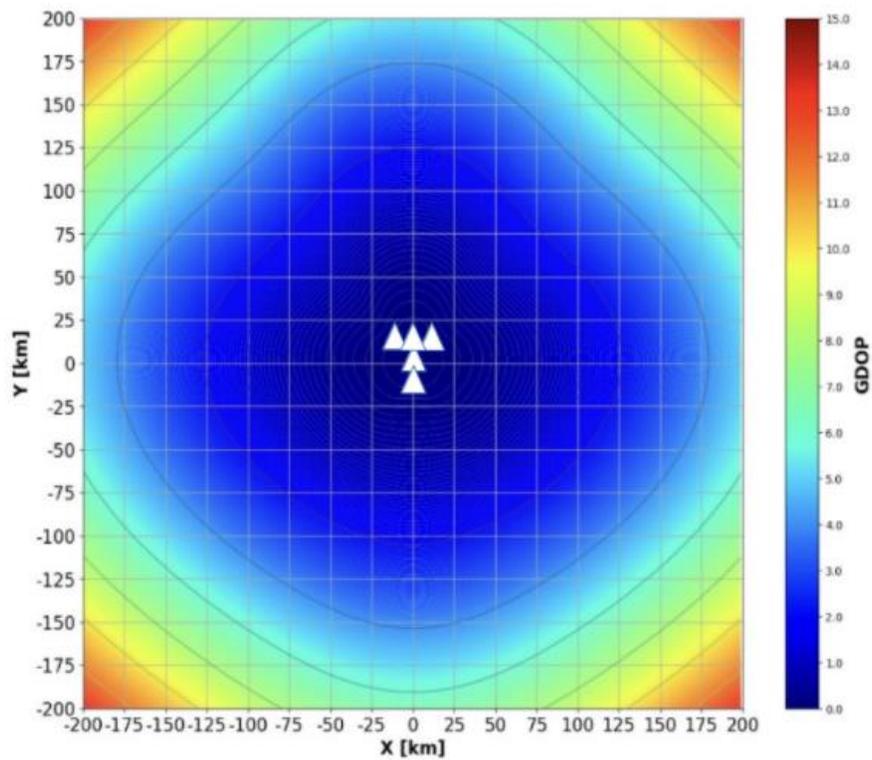


Figura 18 Precisión geométrica para un error de sincronismo de 10ns.

Dilucion de precision con 5 estaciones y un error de sincronismo de 30ns

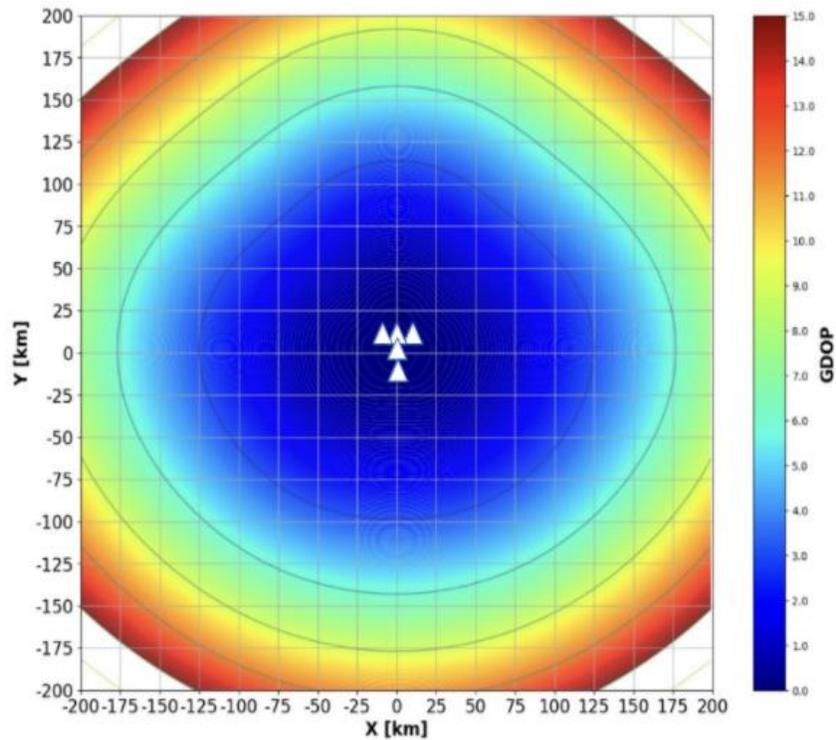


Figura 19 Precisión geométrica para un error de sincronismo de 30ns.

Con ello comprobamos por nuestra cuenta que el error de sincronismo en los sistemas de multilateración afecta de manera global la precisión en dicho sistema, con lo cual podemos concluir que a mayor error de sincronismo mayor error en la precisión que se tiene al estimar la ubicación de una aeronave.

Dilución en la precisión respecto a la geometría de las estaciones receptoras

Los valores de dilución en precisión vienen en función de las superficies triangulares y volúmenes formados por los vectores unitarios entre los receptores y la aeronave. Como ejemplo en la imagen que a continuación se muestra, tenemos 4 estaciones en tierra con una geometría triangular que encierran un volumen tetraédrico, esto muestra como las distancias de los vectores unitarios se relacionan entre sí.

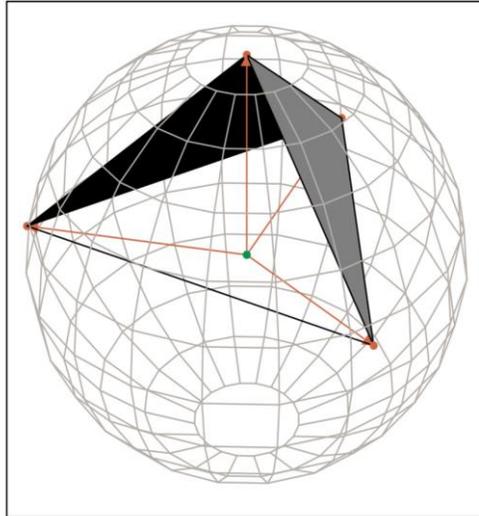


Figura 20 Volumen tetraédrico encerrado por los vectores trazados desde estaciones hasta aeronave. (Richard B. Langley, Dilution of Precision 1999).

Matemáticamente a mayor volumen encerrado entre los vectores trazados, menor será la dilución de precisión geométrica, por ello a medida que aumenta el volumen encerrado entre las estaciones receptoras y la aeronave, mayor será la zona de cobertura con un valor bajo en la dilución de precisión, mientras más nos alejamos del arreglo que encierra el mayor volumen notamos que aumenta el error en la precisión, confirmándose una relación inversa entre el volumen y el valor en dilución de precisión.

Entonces se esperaría que la zona de cobertura para un arreglo de estaciones en particular va a cambiar dependiendo de la forma física en la cual se instalen las estaciones.

Algunos fabricantes podrán utilizar instalaciones que asemejan líneas paralelas, otras líneas en estrella entre otras. Estas diferentes distribuciones van a dar gráficas distintas, se buscará una distribución lo más similar posible a la que se vaya a implementar más adelante en nuestro sistema de multilateración para el aeropuerto de Ilopango, tomando de referencia alguno de estos gráficos generados y a partir de ello buscar que la zona de interés de cobertura se ubique en las zonas de color azul intenso en la mayor proporción posible.

A continuación, mostramos un arreglo de 5 estaciones en geometría triangular y sus gráficos de precisión con las siguientes ubicaciones:

Estación	X(km)	Y(km)	Z(km)
1	0	0	0
2	-10	10	0
3	10	10	0
4	0	-10	0
5	0	10	0

Tabla 3 Ubicación de las 5 estaciones receptoras en geometría triangular.

Dilucion de precisión con 5 estaciones en geometría triangular

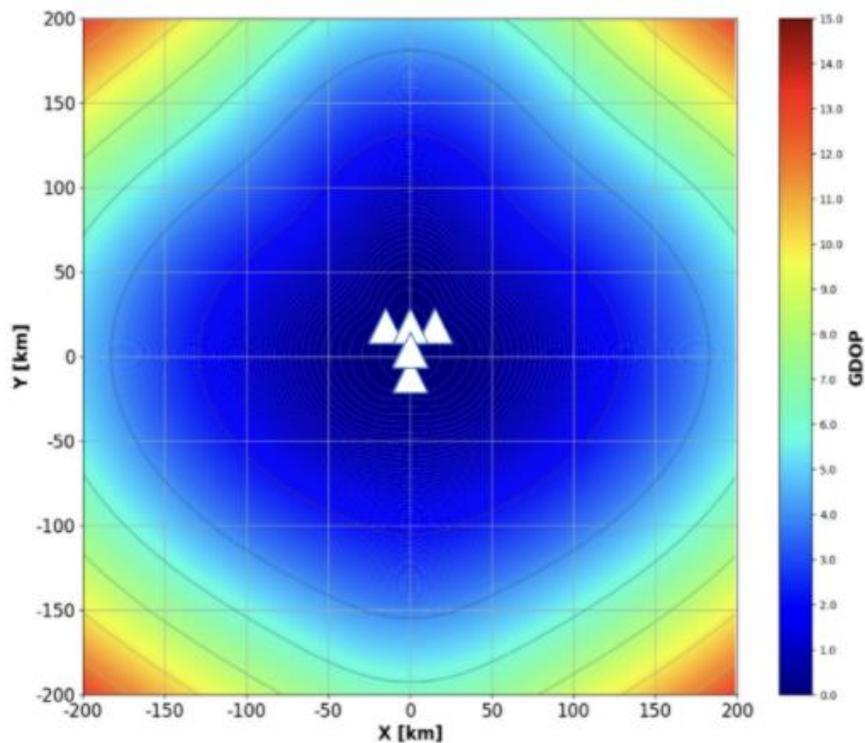


Figura 21 Precisión geométrica para un arreglo de 5 estaciones con una geometría triangular.

En la siguiente imagen también hacemos uso de una geometría triangular, pero para verificar el efecto que tiene el volumen encerrado entre las estaciones y la aeronave, esta vez expandimos las ubicaciones de las 5 estaciones de modo que encierren un mayor volumen:

Estación	X(km)	Y(km)	Z(km)
1	0	0	0
2	-20	20	0
3	20	20	0
4	0	-20	0
5	0	20	0

Tabla 4 Ubicación para un arreglo de 5 estaciones con una geometría triangular.

Dilucion de precision con 5 estaciones en geometría triangular

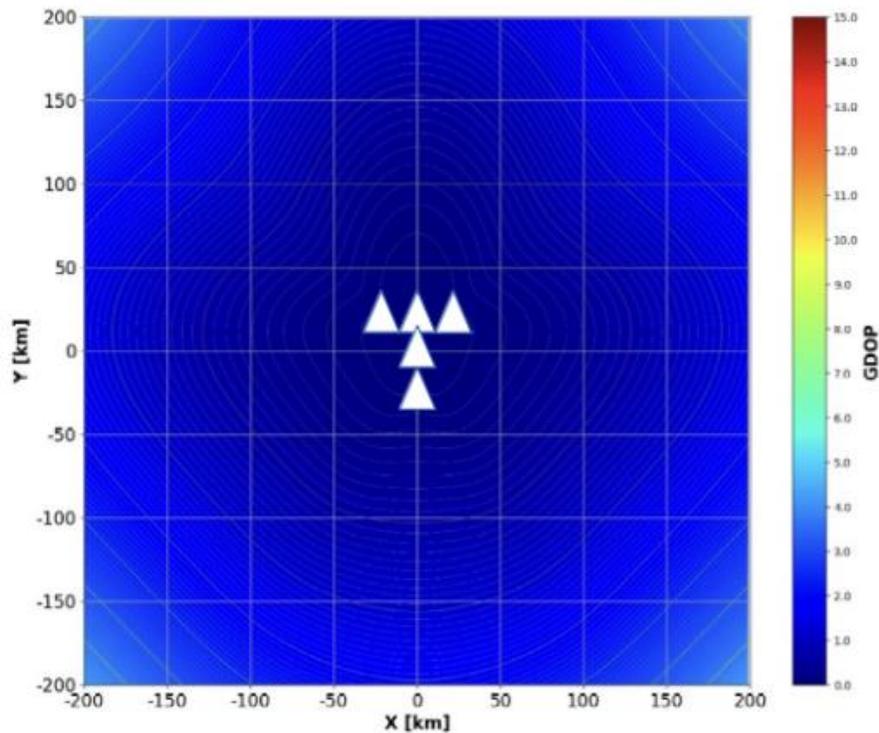


Figura 22 Gráfico de precisión para una geometría triangular con 5 estaciones.

Como podemos notar para una geometría triangular en ambos casos en la parte interna del arreglo de estaciones, el error en la precisión es menor y a medida que nos alejamos del arreglo por la parte exterior el error en la precisión o la dilución de precisión aumenta, esto es debido a que cuando la aeronave sobrevuela por la parte interna el volumen encerrado entre la aeronave y las estaciones en tierra en esa zona el volumen es mayor, y a medida que se aleja de esta zona el volumen disminuye, por esta misma razón en el arreglo de 5 estaciones de estas se encuentran más alejadas unas de las otras pero respetando la misma geometría, puede verse que los valores obtenidos en la dilución de precisión son menores para la misma zona de interés.

Precisión en multilateración como un problema geométrico

La localización en multilateración se trata de un problema geométrico que consiste en encontrar la intersección entre las ramas de hiperboloides o la intersección de circunferencias que se forman mediante el sistema de ecuaciones que se arma por cada una de las estaciones receptores en relación con los tiempos de llegada de cada onda a su respectiva estación receptora.

Para ello es importante establecer las siguientes relaciones:

Distancia entre la estación i -ésima y la aeronave o:

$$\hat{r}_{ij} = \sqrt{(x_i - \hat{x}_o)^2 + (y_i - \hat{y}_o)^2 + (z_i - \hat{z}_o)^2}$$

$\mathbf{r}_o = (x_o, y_o, z_o) \longrightarrow x_o, y_o, z_o =$ Coordenadas de ubicación de la aeronave

$\mathbf{r}(i) = (x(i), y(i), z(i)) \longrightarrow x_i, y_i, z_i =$ Coordenadas de la estación receptora

Otra relación importante es la pseudo distancia:

$$\text{Pseudodistancia} \longrightarrow \rho = c \cdot \delta t$$

La pseudodistancia medida entre el receptor y el i -ésimo satélite se puede relacionar con la posición del usuario y el error de sincronismo del reloj de la siguiente manera:

$$\hat{\rho}_i = \sqrt{(x_i - \hat{x}_o)^2 + (y_i - \hat{y}_o)^2 + (z_i - \hat{z}_o)^2} + c\hat{t}_o \quad i = 1, 2, \dots, N \longrightarrow \begin{array}{l} \text{Relación entre la distancia aeronave-estación} \\ \text{y el error de sincronización} \end{array}$$

↓
error de sincronización

$$\text{Ecuación (1)} : f(\hat{x}_o, \hat{y}_o, \hat{z}_o, \hat{t}_o) = \hat{\rho}_i = \sqrt{(x_i - \hat{x}_o)^2 + (y_i - \hat{y}_o)^2 + (z_i - \hat{z}_o)^2} + c\hat{t}_o$$

La estimación de la precisión puede lograrse a través de la linealización de la ecuación 1 mediante aproximación en un punto estimado usando series de Taylor:

$$\begin{aligned}
x_o &= \hat{x}_o + \Delta x_o \\
y_o &= \hat{y}_o + \Delta y_o \\
z_o &= \hat{z}_o + \Delta z_o \\
t_o &= \hat{t}_o + \Delta t_o
\end{aligned}$$

Reescribiendo:

$$f(x_o, y_o, z_o, t_o) = f(\hat{x}_o + \Delta x_o, \hat{y}_o + \Delta y_o, \hat{z}_o + \Delta z_o, \hat{t}_o + \Delta t_o)$$

Al ampliar sobre el punto aproximado, usando series de Taylor truncadas a orden cero:

$$\begin{aligned}
f(\hat{x}_o + \Delta x_o, \hat{y}_o + \Delta y_o, \hat{z}_o + \Delta z_o, \hat{t}_o + \Delta t_o) &= f(\hat{x}_o, \hat{y}_o, \hat{z}_o, \hat{t}_o) \\
+ \frac{\partial f(\hat{x}_o, \hat{y}_o, \hat{z}_o, \hat{t}_o)}{\partial \hat{x}_o} \Delta x_o &+ \frac{\partial f(\hat{x}_o, \hat{y}_o, \hat{z}_o, \hat{t}_o)}{\partial \hat{y}_o} \Delta y_o \\
+ \frac{\partial f(\hat{x}_o, \hat{y}_o, \hat{z}_o, \hat{t}_o)}{\partial \hat{z}_o} \Delta z_o &+ \frac{\partial f(\hat{x}_o, \hat{y}_o, \hat{z}_o, \hat{t}_o)}{\partial \hat{t}_o} \Delta t_o + \dots
\end{aligned}$$

Resolviendo las derivadas parciales en x,y,z,t , obtenemos:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f(\hat{x}_o, \hat{y}_o, \hat{z}_o, \hat{t}_o)}{\partial \hat{x}_o} &= -\frac{x_j - \hat{x}_o}{\hat{r}_{ij}} \\
\frac{\partial f(\hat{x}_o, \hat{y}_o, \hat{z}_o, \hat{t}_o)}{\partial \hat{y}_o} &= -\frac{y_j - \hat{y}_o}{\hat{r}_{ij}} \\
\frac{\partial f(\hat{x}_o, \hat{y}_o, \hat{z}_o, \hat{t}_o)}{\partial \hat{z}_o} &= -\frac{z_j - \hat{z}_o}{\hat{r}_{ij}} \\
\frac{\partial f(\hat{x}_o, \hat{y}_o, \hat{z}_o, \hat{t}_o)}{\partial \hat{t}_o} &= c
\end{aligned}$$

Sustituyendo:

$$\hat{\rho}_i - \rho_i = \frac{x_i - \hat{x}_o}{\hat{r}_{ij}} \Delta x_o + \frac{y_i - \hat{y}_o}{\hat{r}_{ij}} \Delta y_o - \frac{z_i - \hat{z}_o}{\hat{r}_{ij}} \Delta z_o - c \Delta t_o$$

Usaremos nuevos términos para simplificar más la expresión anterior:

$$\begin{aligned}\Delta\rho &= \hat{\rho}_i - \rho_i \\ a_{xi} &= \frac{x_i - \hat{x}_o}{\hat{r}_{ij}} \\ a_{yi} &= \frac{y_i - \hat{y}_o}{\hat{r}_{ij}} \\ a_{zi} &= \frac{z_i - \hat{z}_o}{\hat{r}_{ij}}\end{aligned}$$

Rescribiendo la expresión ya linealizada:

$$\Delta\rho = a_{xi}\Delta x_o + a_{yi}\Delta y_o + a_{zi}\Delta z_o - c\Delta t_o$$

Ahora tendremos 4 incógnitas: $\Delta X_o, \Delta Y_o, \Delta Z_o$, y Δt_o , las cuales pueden ser resueltas resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$\begin{aligned}\Delta\rho_1 &= a_{x1}\Delta x_o + a_{y1}\Delta y_o + a_{z1}\Delta z_o - c\Delta t_o \\ \Delta\rho_2 &= a_{x2}\Delta x_o + a_{y2}\Delta y_o + a_{z2}\Delta z_o - c\Delta t_o \\ \Delta\rho_3 &= a_{x3}\Delta x_o + a_{y3}\Delta y_o + a_{z3}\Delta z_o - c\Delta t_o \\ \Delta\rho_4 &= a_{x4}\Delta x_o + a_{y4}\Delta y_o + a_{z4}\Delta z_o - c\Delta t_o\end{aligned}$$

Estas ecuaciones pueden ser reescritas en forma matricial:

$$\Delta\rho = D\Delta x$$

Donde:

$$\Delta\rho = \begin{bmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \Delta\rho_3 \\ \Delta\rho_4 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & -1 \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & -1 \\ a_{x3} & a_{y3} & a_{z3} & -1 \\ a_{x4} & a_{y4} & a_{z4} & -1 \end{bmatrix}, \Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x_o \\ \Delta y_o \\ \Delta z_o \\ \Delta t_o \end{bmatrix}$$

Luego para el cálculo de la dilución de precisión geométrica tomamos la matriz D como:

$$D = (A^T A)^{-1}$$

D es igual a:

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{xt} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} & \sigma_{yt} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z^2 & \sigma_{zt} \\ \sigma_{xt} & \sigma_{yt} & \sigma_{zt} & \sigma_t^2 \end{bmatrix}$$

Por definición el GDOP es el trace de la matriz D, es decir el GDOP es la sumatoria de los elementos en diagonal de la matriz de D:

$$\text{GDOP} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_t^2} = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33} + D_{44}}$$

Con lo cual podríamos calcular el error de precisión o dicho de otra forma el cálculo del índice de Dilución de precisión geométrica basado en la ecuación anterior, obteniendo así los gráficos de precisión en la zona de interés.

CAPITULO III: EVALUACIÓN DE APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MULTILATERACION EN EL SALVADOR

Siguiendo los pasos para implementar sistemas de multilateración es delimitar la zona de interés de la implementación del sistema MLAT/WWAM.

Este proceso nos podemos ayudar en las cartas de navegación que son aproximaciones a al aeropuerto de interés que nuestro caso es el Aeropuerto de Ilopango, las imágenes corresponden a las aproximaciones a la pista 15 y 33.

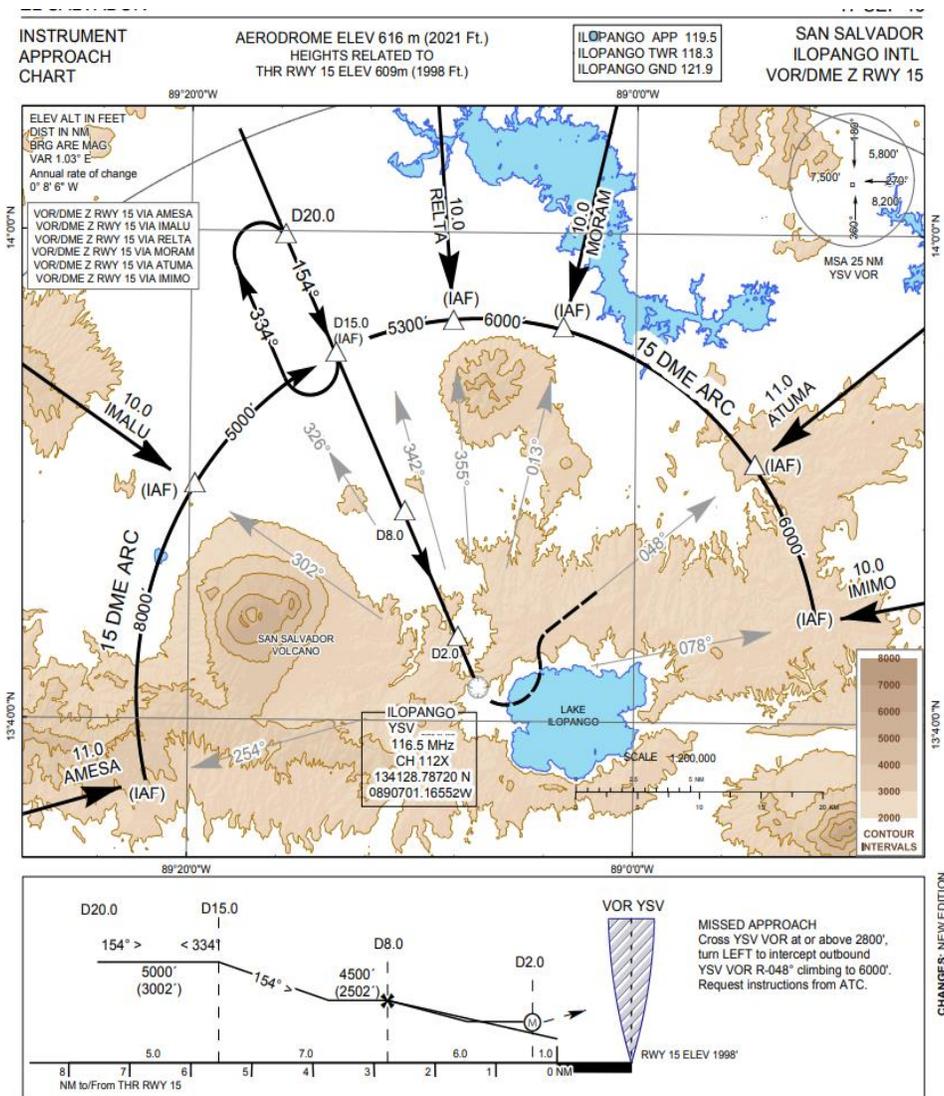


Figura 23 Carta de navegación aproximación hacia la pista 15

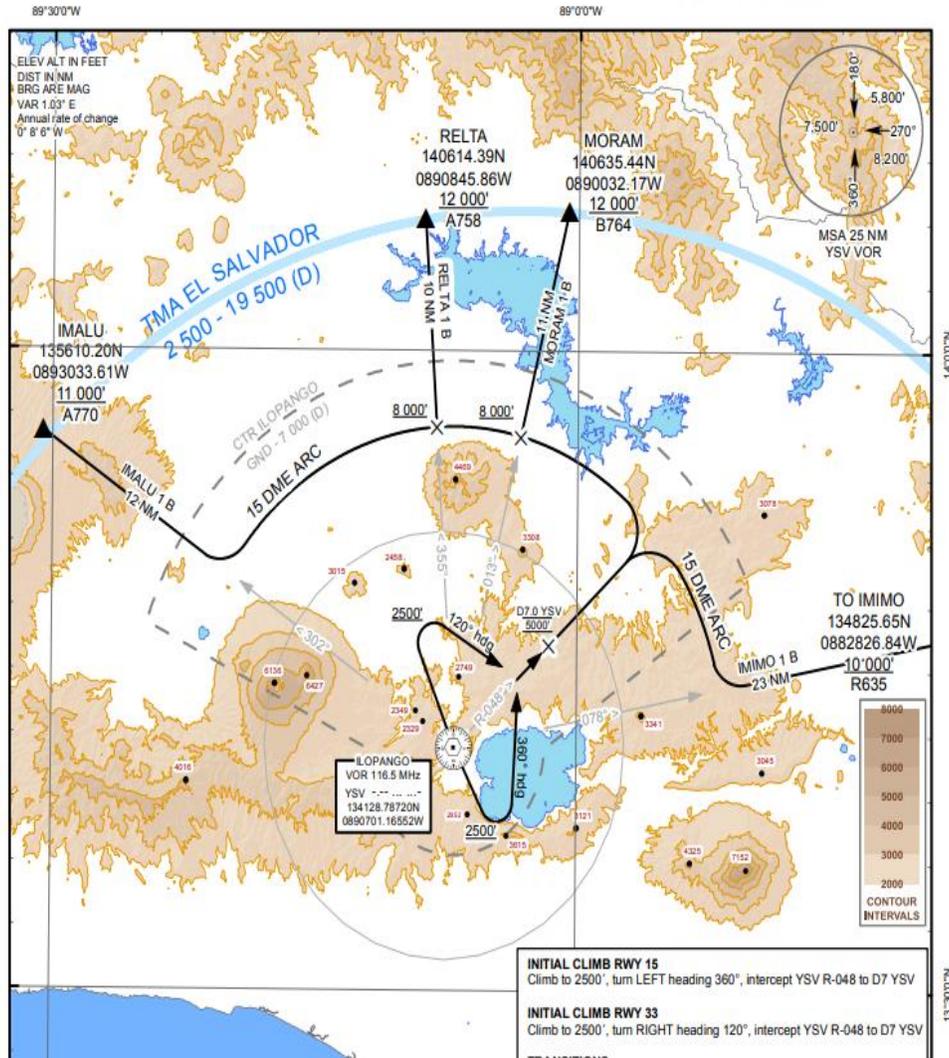


Figura 24 Carta de navegación de salida de la pista 15 y 33.

El sistema MLAT implementado en el aeropuerto tendrá como objetivo cubrir desde el aeropuerto hasta el arco identificado de línea de color negro, esta a su vez está a 15 millas náuticas y a 5000ft de altitud. Para el sistema de multilateración de área extensa se encargaría desde la delimitación del primer sistema hasta la zona TMA.

Identificado el espacio de tráfico aéreo se procede simular el alcance óptico de las estaciones en la ubicación del aeropuerto.

Tomando en cuenta el cumplimiento del anexo 14 que se trata del diseño y operaciones de aeródromos el cual nos facilita la ubicación de las estaciones bajo estándar, partimos de 4 estaciones como mínimo, en la prueba obtuvimos que se necesitan 5 estaciones para cumplir con el alcance óptico deseado, las ubicaciones de las 5 estaciones son las siguientes:

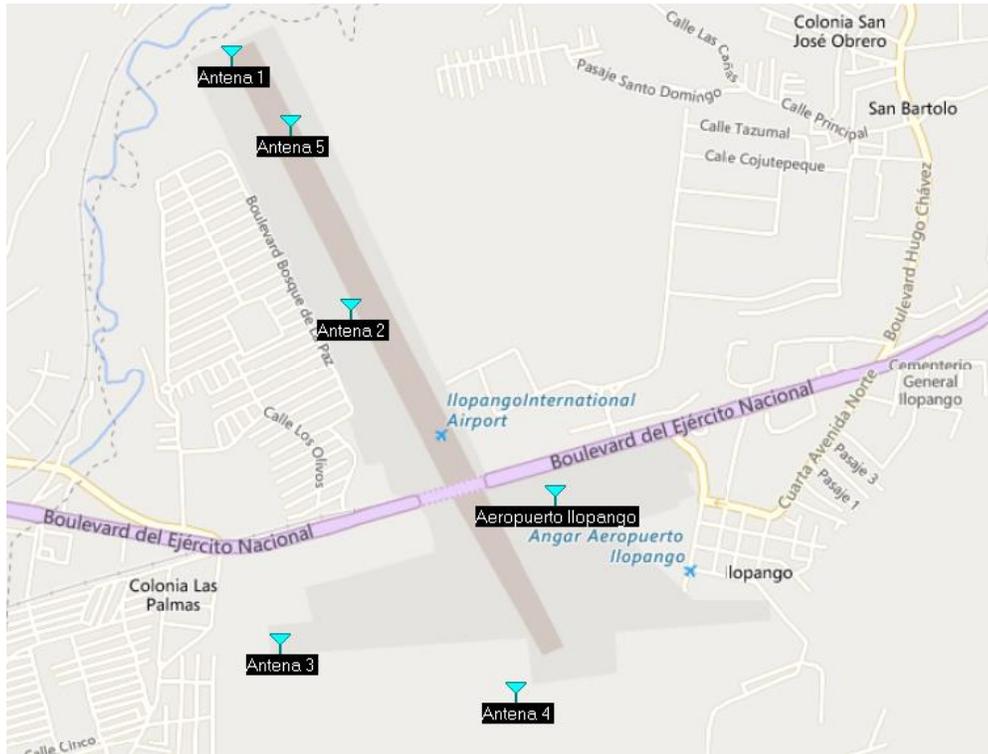


Figura 25 Posicionamiento de antenas de vigilancia en aeropuerto de Ilopango para cobertura visual

Coordenadas de las estaciones:

Antena	Coordenada	
	Latitud	Longitud
Antena 1	13.7083	-89.1247
Antena 2	13.70107	-89.12116
Antena 3	13.69149	-89.12328
Antena 4	13.69011	-89.11631
Antena 5	13.70634	-89.12296

Tabla 5 Coordenadas de estaciones MLAT

Se procedió a simular el alcance óptico para cada una de las estaciones se representa a continuación:

Cobertura visual para la antena 1:

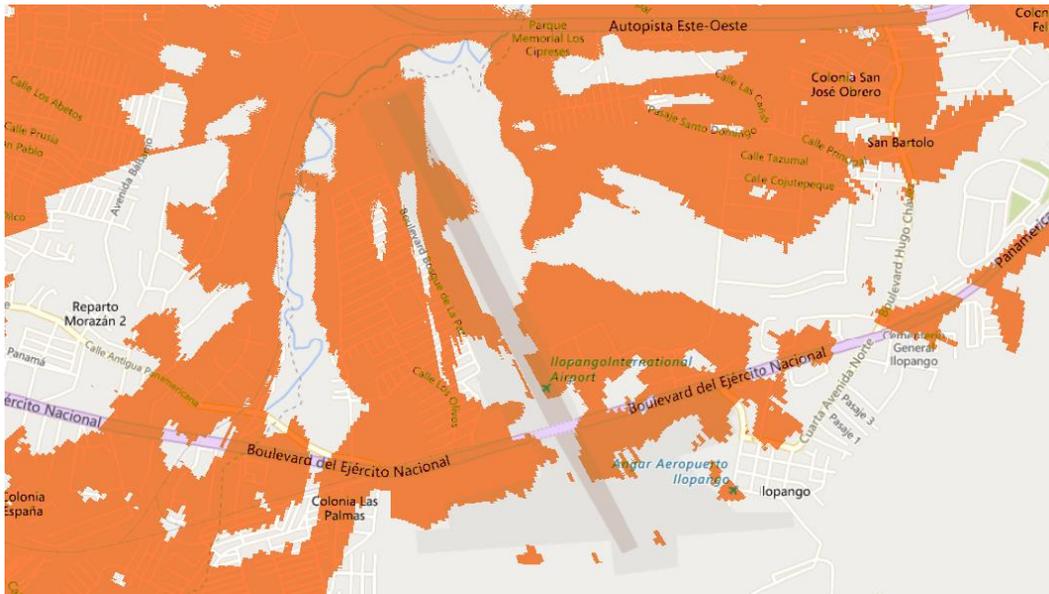


Figura 26 Cobertura visual que obtenemos con la antena 1 MLAT hacia un punto cualquiera a 1.5 metros de altura sobre la pista y hangares.

Cobertura visual para la antena 2:

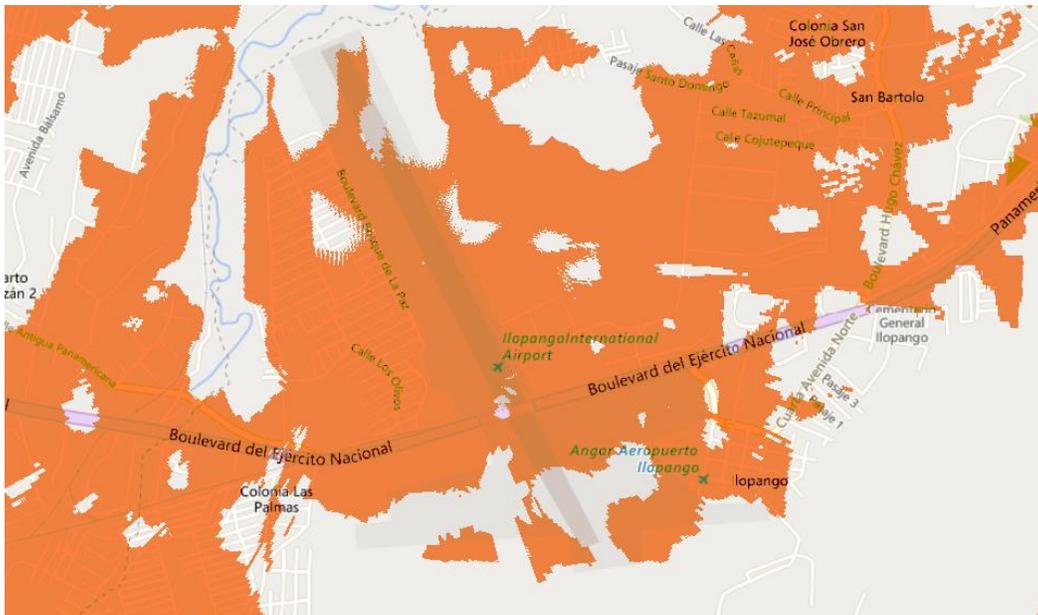


Figura 27 Cobertura visual que obtenemos con la antena 2 MLAT hacia un punto cualquiera a 1.5 metros de altura sobre la pista y hangares.

Cobertura visual para la antena 3:

Cobertura visual para la antena 5:



Figura 30 Cobertura visual que obtenemos con la antena 5 MLAT hacia un punto cualquiera a 1.5 metros de altura sobre la pista y hangares.

Al superponer los alcances ópticos tenemos el siguiente resultado:



Figura 31 Alcance óptico de 5 estaciones MLAT

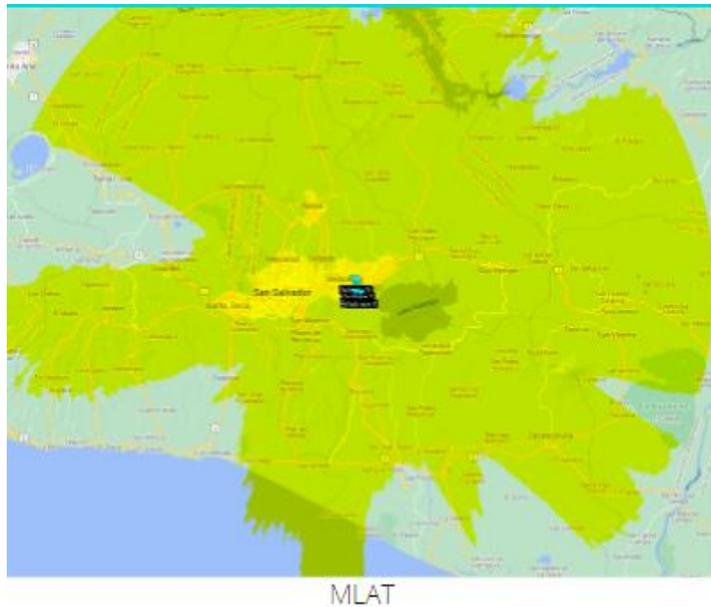
El rendimiento del alcance óptico de las 5 estaciones dentro del aeropuerto es completamente funcional, el resultado lo compararemos con los sistemas de radares secundarios.



Figura 32 Alcance óptico sistema de radares secundarios.

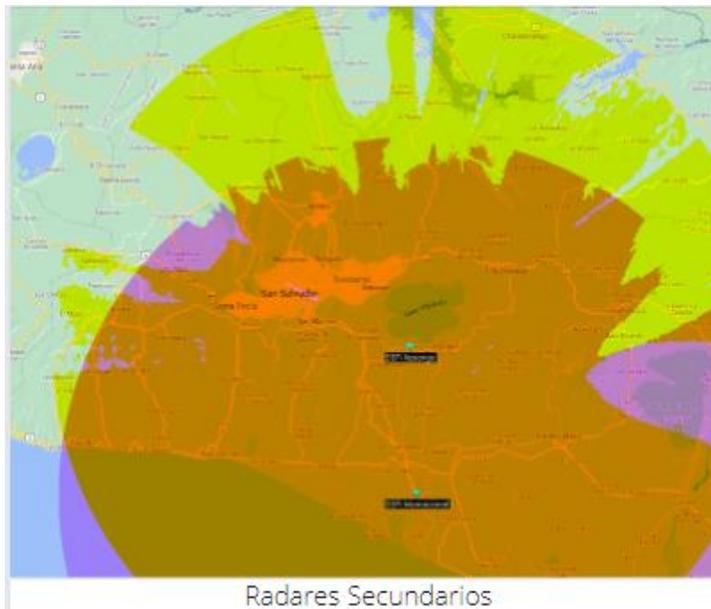
Comparando la cobertura visual de estaciones MLAT vrs la cobertura generada por el radar secundario, se pueden apreciar resultado cuasi similares, si observamos a detalle la cobertura por estaciones MLAT cubren de mejor manera la pista de aterrizaje, por parte de los resultados de los radares secundarios cabe mencionar que tiene más cobertura óptica por que la simulación no tomo en cuenta la obstrucción del aeropuerto y torre de control, con MLAT no tenemos esa afectación porque las estaciones el aeropuerto. El resultado de alcance óptico con estaciones MALT para la zona de aeropuerto es aprobado por cumplir los requerimientos exigidos.

Por parte del aeropuerto el alcance óptico cubre con las zonas de interés, a continuación, se veremos el alcance óptico de este primer sistema, a 5000 ft y delimitado a 15 millas náuticas del aeropuerto de Ilopango:



MLAT

Figura 33 Alcance óptico de sistema de multilateracion a 5000ft.



Radars Secundarios

Figura 34 Alcance óptico de sistema de radares secundarios a 5000ft.

El alcance óptico cumple con la delimitación de 15 millas náuticas que nos exigen en cartas de navegación, tenemos zonas de no cobertura en ambos casos, para el sistema MLAT el encargado de cubrir el sistema WAM ese sector volcán de San Salvador zona del Boquerón.

Como siguiente paso presentaremos los gráficos de precisión, como último paso de implementación de estos tipos de sistemas.

Para la figura 35 se muestra un gráfico donde tenemos determinamos un área de 10km por 10km, con una escala de color de GDOP que va desde 0 a 5, el resultado de precisión del aeropuerto es menor a 1 el GDOP, este resultado está dentro de los valores permitidos.

Para la figura 36 se muestra un gráfico donde tenemos determinamos un área de 100kmx100km, con una escala de GDOP de 0 a 20, para la zona de interés el GDOP es menor a 5, este resultado está dentro de los valores permitidos.

Las pruebas anteriormente visualizadas podemos concluir que el sistema cumple con estándares, con alcances físicos y con la precisión deseada, las 5 antes para este tipo de aplicación tendrían un costo aproximado de 9000 dólares, estas antenas están conectadas de manera alámbrica a la unidad de procesamiento de datos por la practicidad que están ubicadas en el aeropuerto.

Para la zona MLAT/WAM el procedimiento es el mismo al primer sistema, como se tiene la zona de interés, se tomó en cuenta la orografía del país para tener el mejor alcance óptico de las estaciones MLAT/WAM, el resultado nos indica que necesita 4 estaciones en las siguientes posiciones:

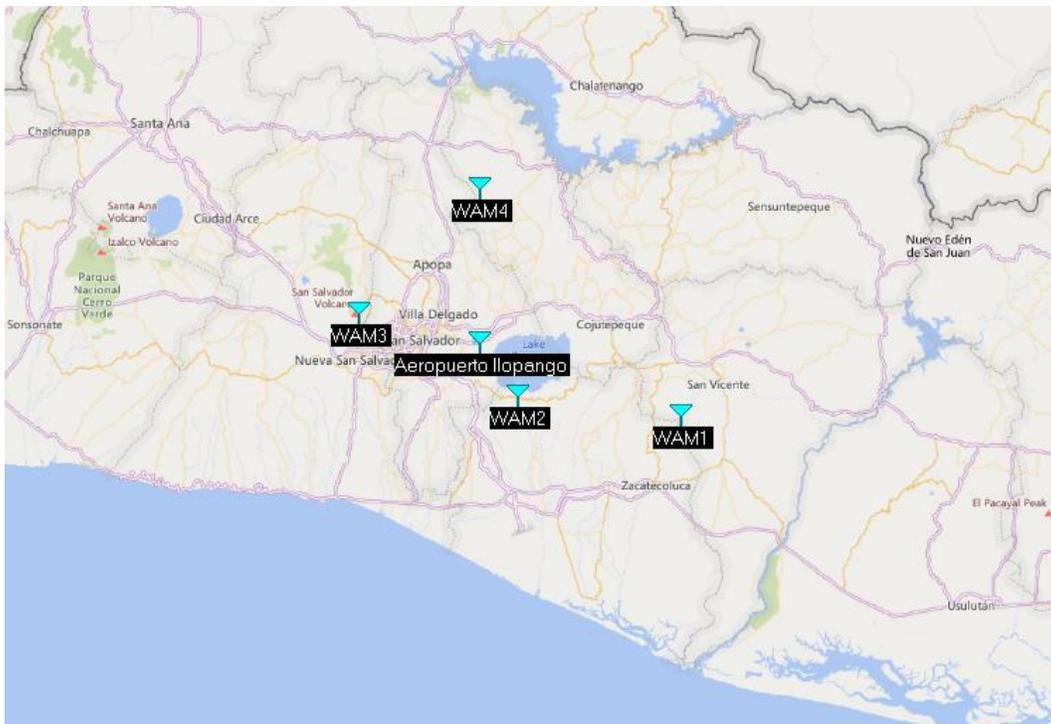


Figura 37 Ubicaciones de las estaciones MALT/WAM

La ubicación y el número de estaciones se determinó con el alcance óptico, el cual se realizó a diferentes altitudes de 2000, 4000, 6000 y 8000 pies, los resultados son los siguientes:

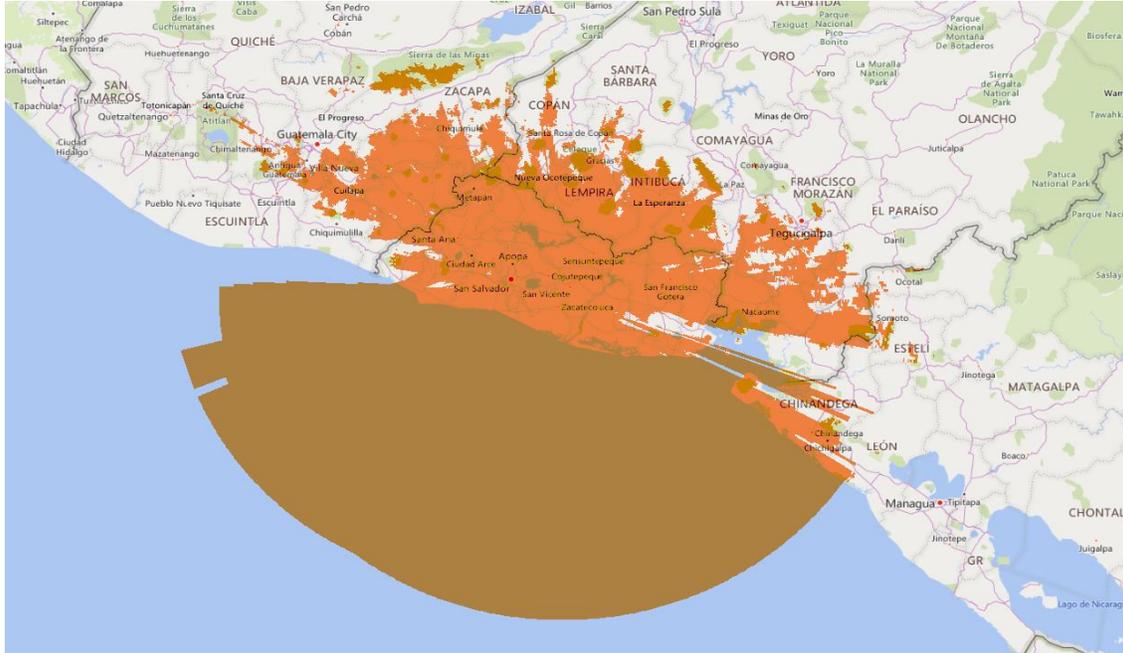


Figura 38 Cobertura visual a 2000ft

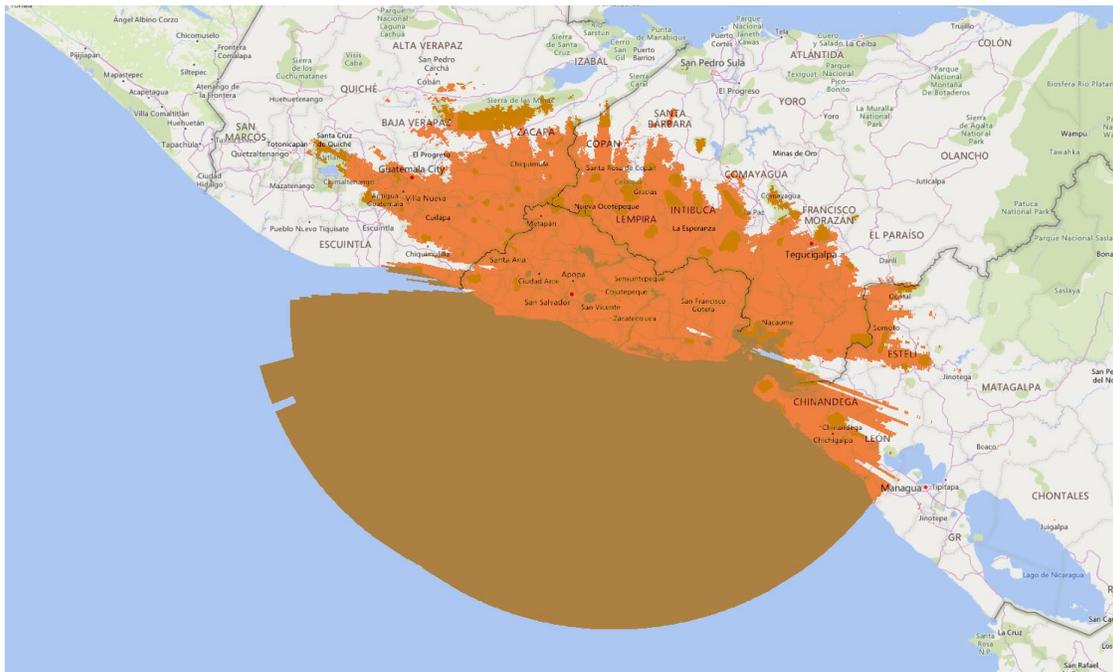


Figura 39 Cobertura visual a 4000ft



Figura 40 Cobertura visual a 6000ft



Figura 41 Cobertura visual a 8000ft

La cobertura visual obtenida en Radio Mobile, es satisfactoria, analizar los márgenes de cobertura representamos que las antenas MLAT/WAM están correctamente ubicadas, ya que los resultados representan áreas sombreadas tienen mejor cobertura que los patrones vistos en las simulaciones de radares secundarios y estos a su vez cumplen con la cobertura necesaria para detectar aeronaves. Como último paso presentaremos el resultado de la precisión para este sistema MLAT/WAM:

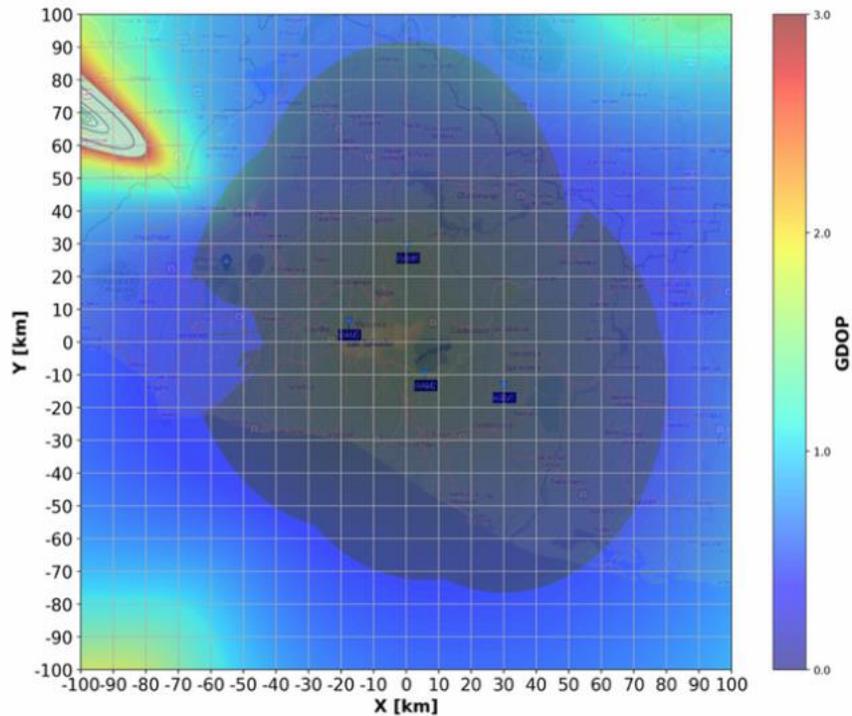


Figura 42 Gráfico de precisión de sistema MLAT/WAM a 1.5km de altitud

Para el gráfico de precisión de sistema MALT/WAM tenemos determinamos un área de 200kmx200km y un GDOP delimitado de 0 a 3, se puede apreciar el valor de GDOP es menor a 1, este resultado está dentro de los valores permitidos, se puede concluir que el sistema MLAT de área extensa cumple con los requerimientos exigidos para estos tipos de sistemas.

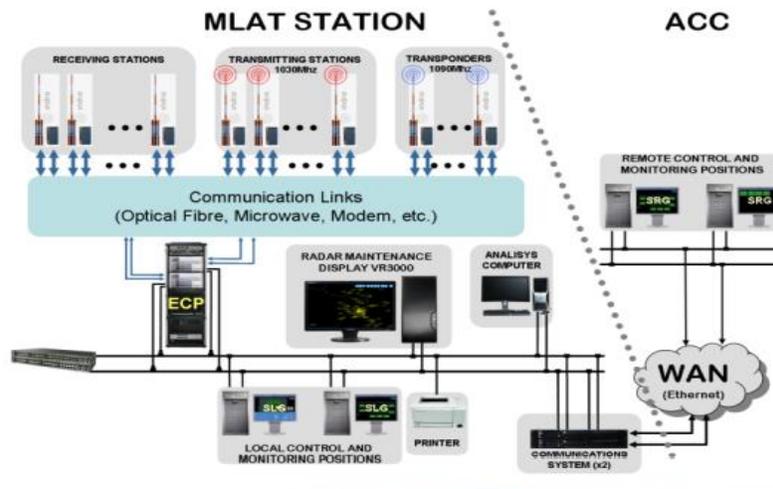


Figura 43 Arquitectura del sistema de multilateración. (Multilateración, INDRA, s.f).

Cómo se había planteado anteriormente la arquitectura de los sistemas de multilateración está compuesta en primera instancia por la estación interrogadora, estaciones receptoras en tierra, su estación central de procesamiento, las cuales están enlazadas y se comunican entre sí por medio de fibra óptica, enlaces microondas, etc.

El hardware de telecomunicaciones a utilizar depende de los requisitos del servicio. En el caso de MLAT, se muestra si una determinada característica del sistema de telecomunicaciones es importante o no. Las características a tener en cuenta son:

Capacidad: Es la característica más importante de la mayoría de los sistemas, pero en cuanto a MLAT, es uno de los menos importantes, porque los mensajes intercambiados no son muy grandes y la capacidad requerida no es muy alta.

Latencia: Es el tiempo total del mensaje en llegar desde el avión a la central de procesamiento. Contiene un componente de demora del sistema, una demora en el enlace de telecomunicaciones y la demora en el aire. Se debe asegurar que la latencia en el sistema no supere un valor determinado, y que la diferencia entre los sensores más rápidos y los más lentos sea inferior a un tiempo determinado.

Fading: Es un problema presente en los canales de comunicación por radioenlace. Aunque no ocurre en las fibras ópticas, si se consideran los enlaces de microondas, es necesario tenerlo en cuenta.

Distancia: Es importante conocer las distancias máximas alcanzables con cada tipo de enlace, ya que en el caso de los enlaces WAM las longitudes pueden ser bastante grandes. El objetivo del estudio de los enlaces de comunicación es conocer cuáles son las limitaciones o ventajas en los posibles sistemas de multilateración a implementar. Es importante considerar las fibras ópticas, los enlaces de microondas y adoptar el que mejor se adapte a las necesidades requeridas.

El sistema de telecomunicaciones más utilizado en la actualidad son las fibras ópticas, ya que es el tipo de enlace de comunicación con mayores tasas de bits y menos errores. La tasa de bits depende de la fibra y el láser utilizados, pero las tasas son muy superiores a las que requiere un sistema MLAT.

CONCLUSIONES

En países como El Salvador, en donde la orografía dificulta el alcance visual de muchos sistemas de radio, incluyendo los sistemas tradicionales de vigilancia, las tecnologías de multilateración que se han discutido acá, proporcionan una alternativa más eficiente para mejorar el alcance antes indicado, a un costo mucho menor que los sistemas que se han utilizado hasta ahora.

Si bien es cierto que la mayoría de documentos consultados sugieren que para evaluar la precisión de los sistemas de multilateración se deberían cuantificar los parámetros de: Dilución de precisión respecto a la posición, Dilución de precisión Horizontal, Dilución de precisión Vertical y Dilución de precisión respecto al tiempo; pero debido a que el índice de dilución de precisión Geométrica incluye todos los índices de Dilución anteriores, se toma este último como una referencia más exacta al evaluar la precisión en los sistemas de multilateración.

Es importante señalar que las condiciones particulares del sitio en donde serán instaladas las estaciones asociadas a un sistema de multilateración, se toman en cuenta mediante la superposición de las gráficas de cobertura visual con el mapa de calor obtenido de la dilución de precisión geométrica.

Tal como se ha indicado a lo largo del presente documento, el sincronismo es fundamental para la precisión de los sistemas de multilateración, eso implica que previo a su implementación, se deberían realizar estudios que confirmen que la calidad de este parámetro es adecuada en los sitios en donde se prevé instalar componentes del sistema.

Es oportuno recordar que para implementar sistemas de multilateración no se requiere modificar o agregar componentes a la aviónica de la mayoría de aeronaves y tampoco modificar los sistemas de control que hacen uso de esta tecnología, con lo cual los costos de implementación se mantienen muy por debajo al costo asociado a los sistemas tradicionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. UPV Universitat Politècnica de València. (s/f). Upv.Es. Recuperado el 27 de febrero de 2022, de <http://www.upv.es/en>
2. Sobre la OACI. (s/f). Icao.Int. Recuperado el 27 de febrero de 2022, de https://www.icao.int/about-icao/pages/es/default_es.aspx
3. List of ASTERIX categories and their statuses. (s/f). Eurocontrol.Int. Recuperado el 27 de febrero de 2022, de <https://www.eurocontrol.int/publication/list-asterix-categories-and-their-statuses>
4. Espín Villacrés, E. C. (2008). Estudio y diseño de un sistema de Multilateración para vigilancia de la zona de Tráfico Aéreo del nuevo aeropuerto de Quito. SANGOLQUÍ / ESPE / 2008.
5. Guia de vigilancia global, Icao.int., Recuperado el 27 de febrero de 2022, de https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2021/ADSB1/01-ThalesGlobal_Surveillance_Solution_Booklet_SPA.pdf
6. Desarrollo de un Analizador de Protocolo ASTERIX de Eurocontrol, Edu.sv. Recuperado el 27 de febrero de 2022, de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/531/1/10137143.pdf>
7. GDOP and the CRB for Positioning Systems Wanchun LI, Ting YUAN, Bin WANG, Qiu TANG, Yingxiang LI, Hongshu LIAOM. Skolnik, Radar Handbook, Third ed., McGraw-Hill Education,2008.
8. M. Deffenbaugh, J. G. Bellingham and H. Schmidt, “The relationship between spherical and hyperbolic positioning,” in OCEANS '96. MTS/IEEE. Prospects for the 21st Century. Conference Proceedings (Volume:2). Fort Lauderdale, FL.
9. E. Kaplan (Ed.), “Understanding GPS: Principles and Applications,” 2nd Edition, Artech House, Norwood, 2005.
10. Chan and K. C. Ho, “A simple and efficient estimator for hyperbolic location,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 42, pp. 1905-1915, Aug. 1994.
11. W. H. Foy, “Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation,” IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-12, pp. 187-194, March 1976,1976.
12. W. H. L. Neven et al, Wide Area Multilateration, EUROCONTROL, 2004.

ANEXOS



Overview

pingStation 2 is a dual band (978MHz and 1090MHz), networkable Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) receiver with a Power-Over-Ethernet (POE) interface enclosed in an IP67 rated protective enclosure. PingStation provides ground, surface, or low-altitude ADS-B surveillance. pingStation is robust enough to be permanently mounted outdoors in harsh environmental conditions, and small enough to be used as a mobile asset for roaming operations. Installation is simple with included pole-mount bracket, and a single POE cable which provides both power and data communications. An integrated GPS provides precision timestamping for messaging.

Multiple pingStation 2 may be networked together to provide a wide area low-altitude surveillance volume. Data messages are in JSON format as described within the pingStation 2 ICD.



Features

- Detects ADS-B equipped aircraft on 1090MHz and 978MHz in real time.
- Internal GPS provides high resolution timestamp messaging in support of third party multilateration software.
- Based on exclusive Ping™ Silicon Radio
- IP67 rated environmentally protected enclosure
- Simple power and connectivity options using Power over Ethernet (POE)
- Multiple data format options
- Network multiple receivers to enable a wide area low-altitude surveillance network
- U.S. patents pending

Technical Specifications

Specification	Value
Input Voltage / Power	44-57V / 350mA Power over Ethernet
Size	4.5"X7.5"X14.8"
Weight	425 grams
Receive	
MTL 1090MHz	-88dBm
Dynamic Range	-79 to 0dBm
MTL 978MHz	-93dBm
Dynamic Range	-90 to -3dBm
Interfaces	
<ul style="list-style-type: none"> • Ethernet (JSON UDP) • Compressed VRS (Virtual Radar Server) 	

DISTRIBUTOR

Northwest UAV
A GLOBAL COMPANY

+1 503.434.6845
+1 503.217.6080
customerservice@nwuav.com
www.nwuav.com

11160 SW Durham Lane, Suite 1 | McMinnville, OR 97128 USA

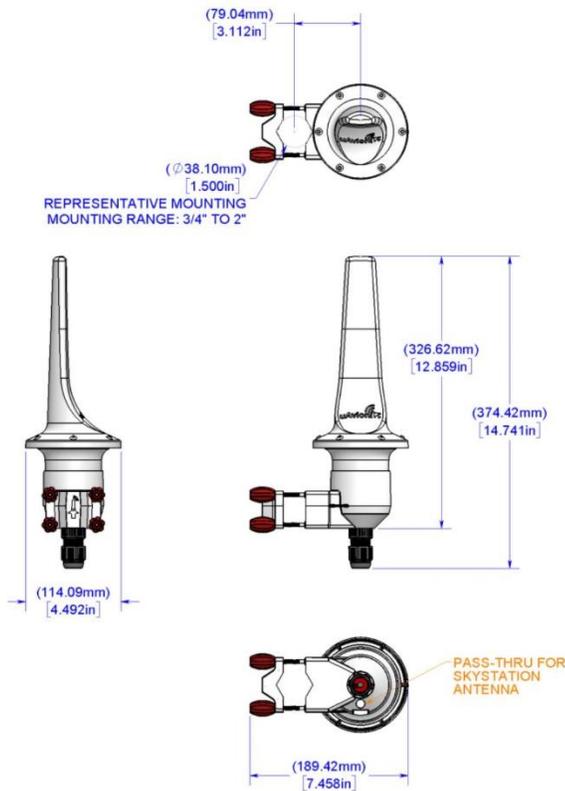
uAvionix reserves the right to alter product, services offerings, specifications, and pricing at any time without notice.

© Copyright 2021 uAvionix, all rights reserved. www.uavionix.com

Data / Power Connector: RJ-45 POE 802.13AF

Parameter	Value
Standard	802.3af (802.3at Type1)
Maximum power	15.4W
Voltage Range	37 – 57V
Maximum Current	350mA
Maximum Cable Resistance	20Ω
Supported Cabling	Shielded Cat 3 and Shielded Cat 5
Supported Modes	Mode A (endspan), Mode B (midspan)
Power Management	Power Class 0
Maximum Cable Length	100 meters

Mechanical Specification



uAvionix reserves the right to alter product, services offerings, specifications, and pricing at any time without notice.
© Copyright 2021 uAvionix, all rights reserved. www.uavionix.com

Fragmento que ejemplifica el cálculo del GDOP para una zona de interés con las coordenadas de estaciones base en tierra, en el siguiente fragmento algunas definiciones están implícitamente expresadas.

```
def Calculo():
```

```
    x =X
```

```
    y =Y
```

```
    z=10
```

```
    x1=0
```

```
    y1=0
```

```
    z1=0
```

```
    x2=-20
```

```
    y2=20
```

```
    z2=0
```

```
    x3=20
```

```
    y3=20
```

```
    z3=0
```

```
    x4=0
```

```
    y4=-20
```

```
    z4=0
```

```
    r1 = math.sqrt((x-x1)**2+(y-y1)**2+(z-z1)**2)
```

```
    r2 = math.sqrt((x-x2)**2+(y-y2)**2+(z-z2)**2)
```

```
    r3 =math.sqrt((x-x3)**2+(y-y3)**2+(z-z3)**2)
```

```
    r4 = math.sqrt((x-x4)**2+(y-y4)**2+(z-z4)**2)
```

```
    A =np.array([[c1x-c2x , c1y-c2y , c1z - c2z],
```

```
                 [c1x - c3x, c1y - c3y, c1z - c3z],
```

```
                 [c1x - c4x, c1y - c4y, c1z - c4z],
```

```
    )
```

```

ps =np.array([[2 * error_de_propagacion ** 2, error_de_propagacion ** 2,
error_de_propagacion ** 2, 0],
              [error_de_propagacion** 2, 2 * error_de_propagacion ** 2, error_de_propagacion
** 2, 0],
              [error_de_propagacion ** 2, error_de_propagacion ** 2, 2 * error_de_propagacion
** 2, 0],
              )

```

```

PX=np.array([[error_de_sincronismo ** 2, 0, 0, 0],
             [ 0, error_de_sincronismo ** 2, 0, 0],
             [ 0, 0, error_de_sincronismo ** 2, 0],
             )

```

```

GDOP=np.trace( (np.linalg.inv((A.transpose()@A))) )

```

```

gdop=(math.sqrt(GDOP))

```

```

return gdop

```

Respecto que las investigaciones sobre los diseños de multilateración no toman como procedimiento la cobertura de radio enlace, este procedimiento lo tomamos de suma importancia para el estudio y realizamos la simulación de radio enlace con las estaciones en tierra con las referencias representadas en las cartas de radionavegación.

Carta de navegación aproximación pista 15.

Siguiente validador de este diseño nos apoyaremos en las cartas de navegación en las pistas 15 y 33 del aeropuerto de Ilopango ubicar los puntos donde pasan las aeronaves y simular un radio enlace en Radio Mobile y ver la calidad del enlace.

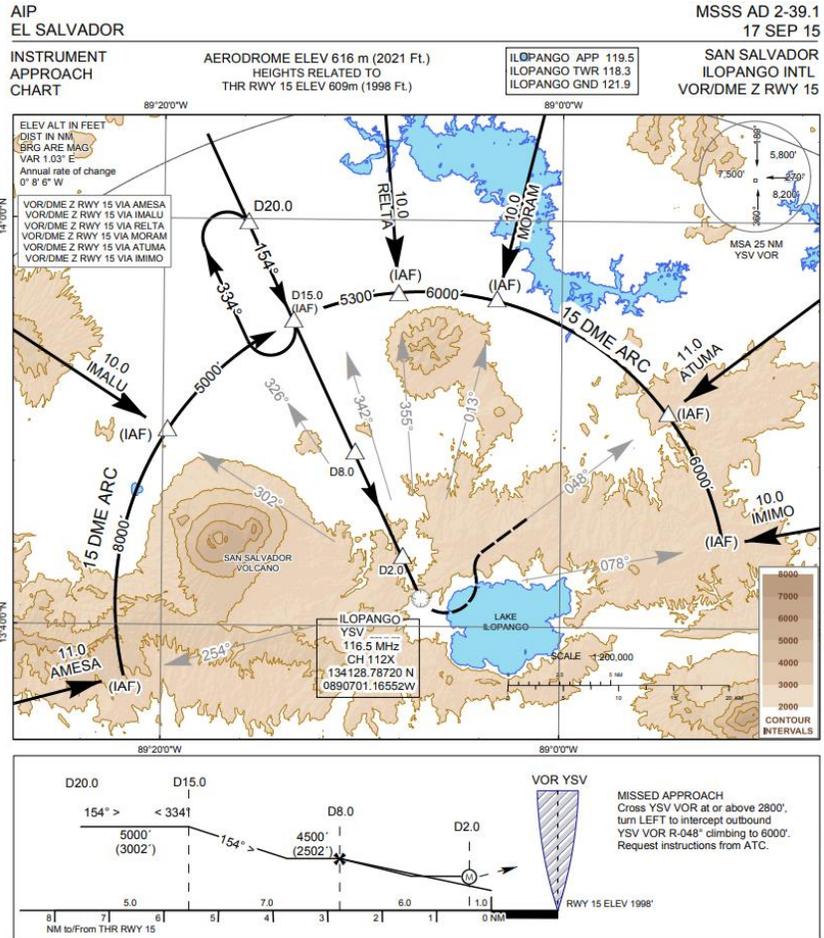


Figura 44 Carta de navegación aproximación hacia la pista 15

En la carta podemos observar nombres ficticios como AMESA, IMALU, RELTA, MORAN, ATUMA y IMIMO estos corresponden a entradas al sistema TMA del aeropuerto de Ilopango correspondiente en la pista 15, observando la circunferencia que su punto de partida es el aeropuerto de Ilopango hacia la circunferencia hay 15 millas náuticas correspondiente a 27.78 kilómetros a una altitud de 5000ft que son equivalentes a 1.5 kilómetros, las características de simulación se estaría utilizando transponder de 200W así como las antenas MLAT/WAM estas a su vez estarían en torres o mástil de 40 metros para evitar obstáculos cercanos como podrían ser la vegetación.

Se realizarán radio enlaces desde cada punto de entrada según la ubicación de la carta de navegación.

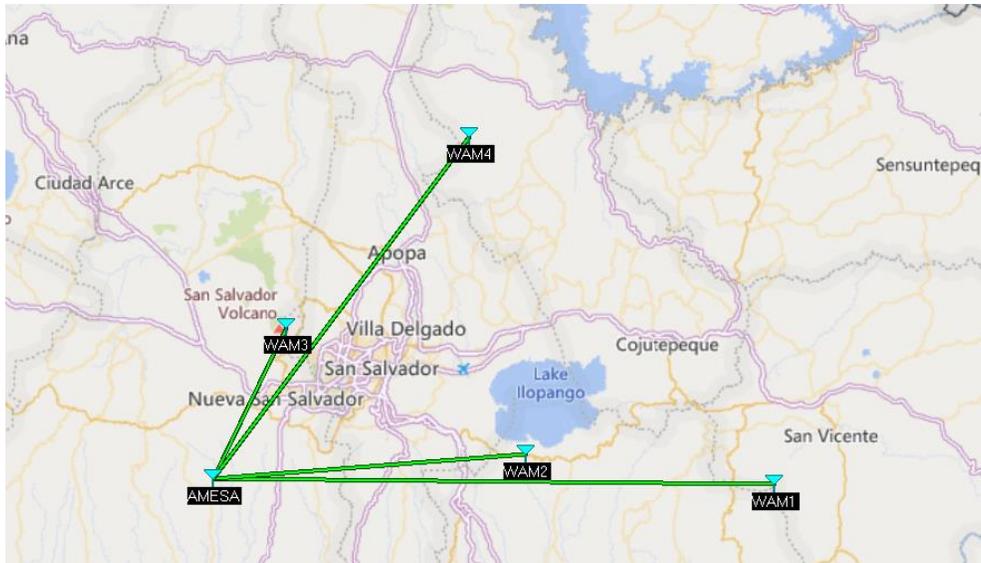


Figura 45 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada AMESA.

Estación(antena)	Nivel de potencia de recepción
WAM1	-64.0dBm
WAM2	-57.5dBm
WAM3	-52.3dBm
WAM4	-60.3dBm

Tabla 6 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada AMESA

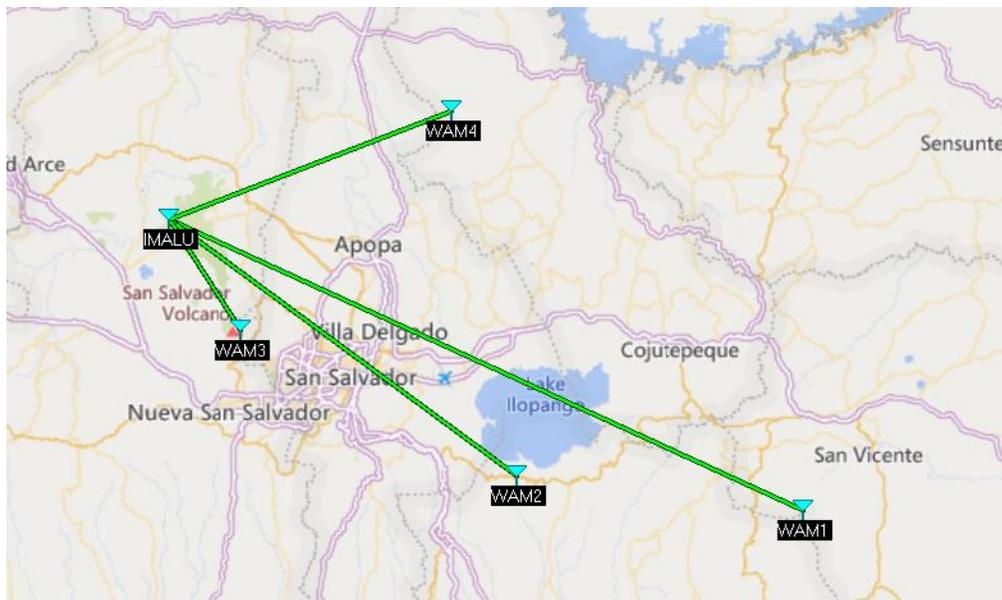


Figura 46 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada IMALU.

Estación(antena)	Nivel de potencia de recepción
WAM1	-63.5dBm
WAM2	-59.7dBm
WAM3	-49.6dBm
WAM4	-55.9dBm

Tabla 7 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada IMALU

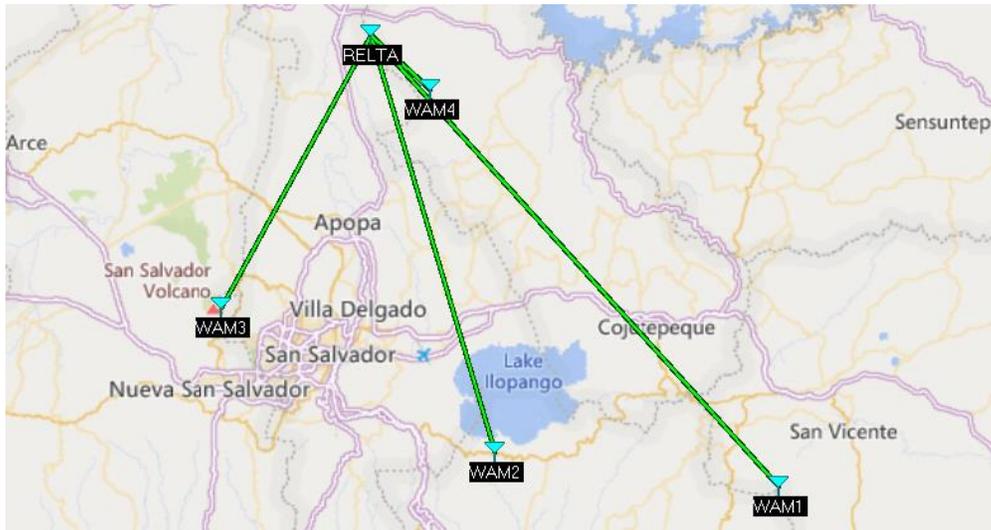


Figura 47 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada RELTA

Estación(antena)	Nivel de potencia de recepción
WAM1	-63.5dBm
WAM2	-59.0dBm
WAM3	-57.9dBm
WAM4	-45.1dBm

Tabla 8 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada RELTA

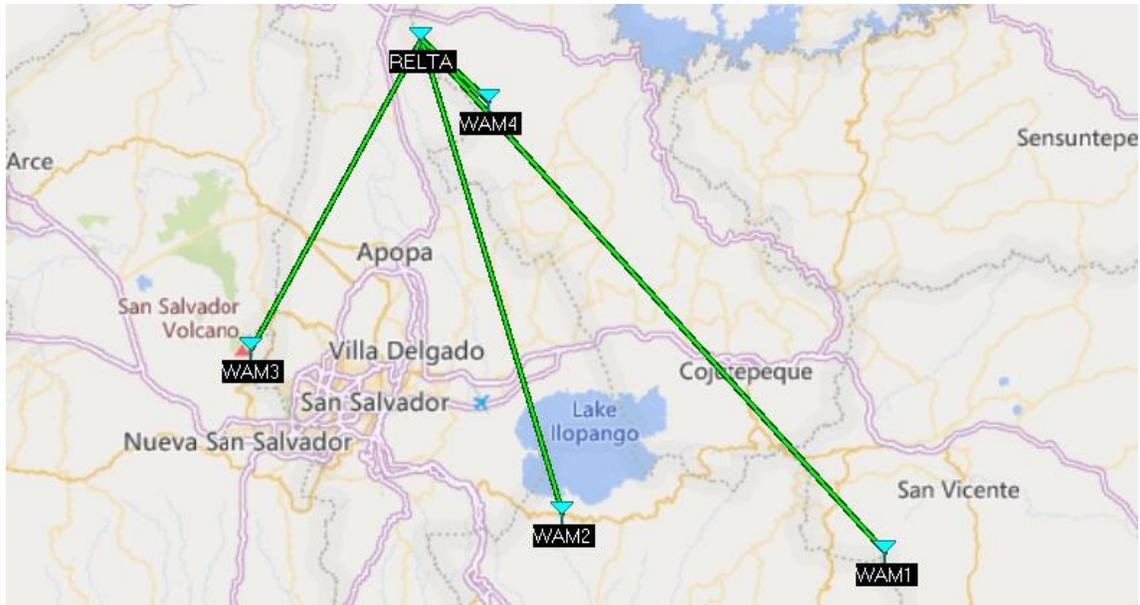


Figura 48 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada MORAM

Estación(antena)	Nivel de potencia de recepción
WAM1	-61.5dBm
WAM2	-59.0dBm
WAM3	-58.0dBm
WAM4	-45.5dBm

Tabla 9 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada MORAM

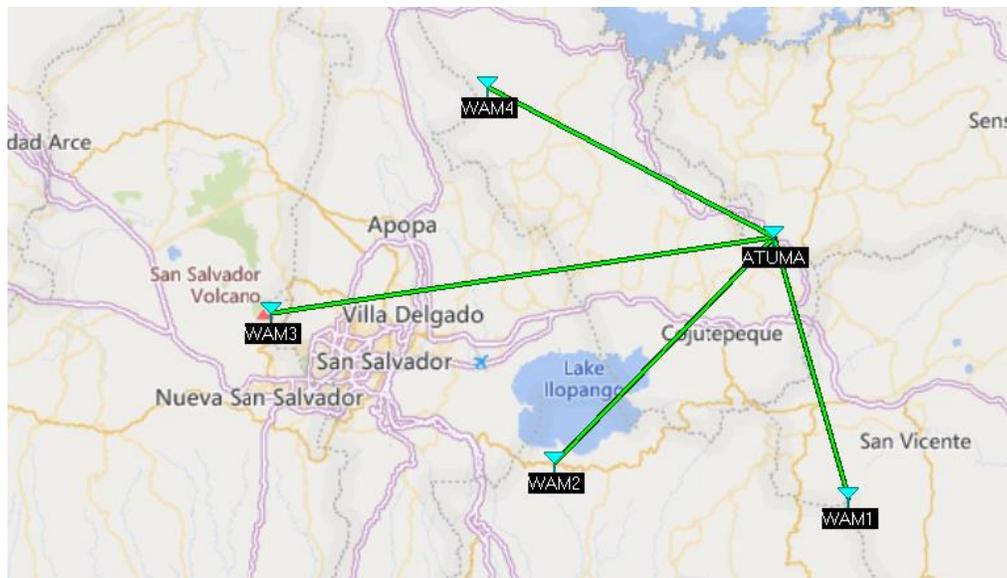


Figura 49 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada ATUMA

Estación(antena)	Nivel de potencia de recepción
WAM1	-56.0dBm
WAM2	-56.1dBm
WAM3	-61.9dBm
WAM4	-56.2dBm

Tabla 10 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada ATUMA

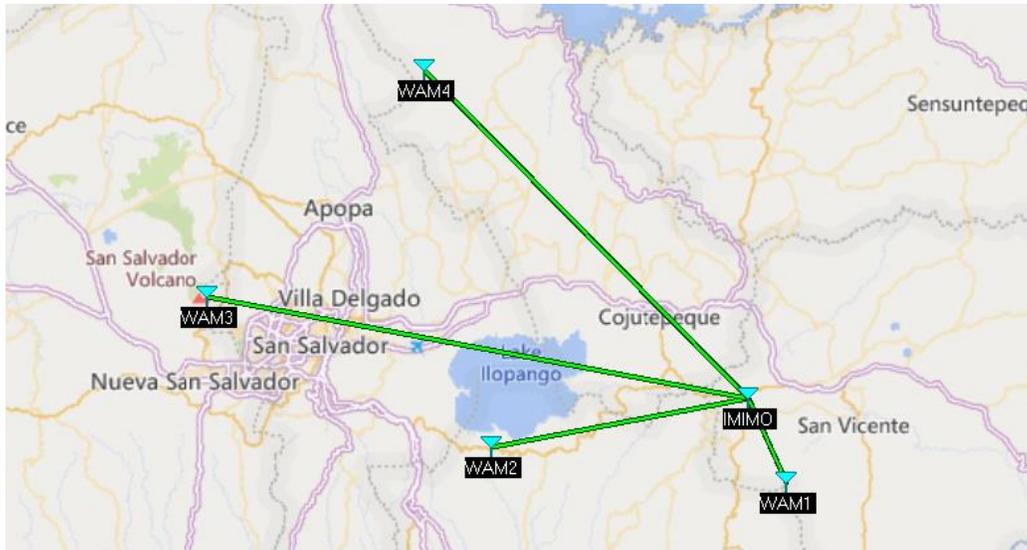


Figura 50 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada IMIMO

Estación(antena)	Nivel de potencia de recepción
WAM1	-46.2dBm
WAM2	-56.0dBm
WAM3	-61.0dBm
WAM4	-60.9dBm

Tabla 11 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada IMIMO

El sistema MLAT/WAM por medio de radio se ha demostrado que es perfectamente funcional, se tiene un excelente enlace, parámetro que hemos fijado que no debía sobrepasar son los -80dBm el radio enlace, el valor más cercano a los -80.0dBm fue el obtenido en la estación WAM1 hacia el punto AMESA que fue de -64.0dBm, el sistema es óptimo para detectar aeronaves en los puntos de entradas.

Procediendo a los radios enlaces hacia la aproximación de la pista 15, nos debemos ubicar en el punto D20, D15, D8 y D2 sucesivamente se deberá hacer un radio enlace para cada punto, esto nos servirá para validar el sistema en aproximación hacia la pista.

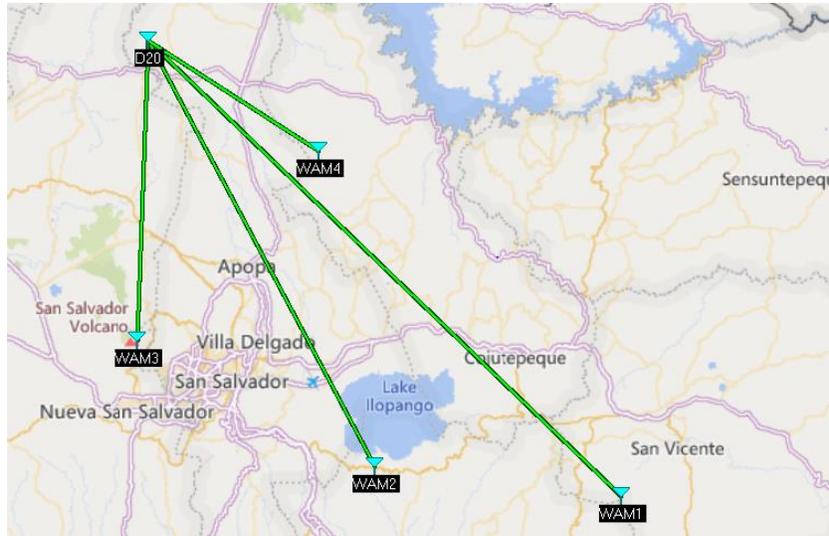


Figura 51 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto D20

Estación(antena)	Nivel de potencia de recepción
WAM1	-65.4dBm
WAM2	-61.2dBm
WAM3	-57.4dBm
WAM4	-54.0dBm

Tabla 12 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto D20

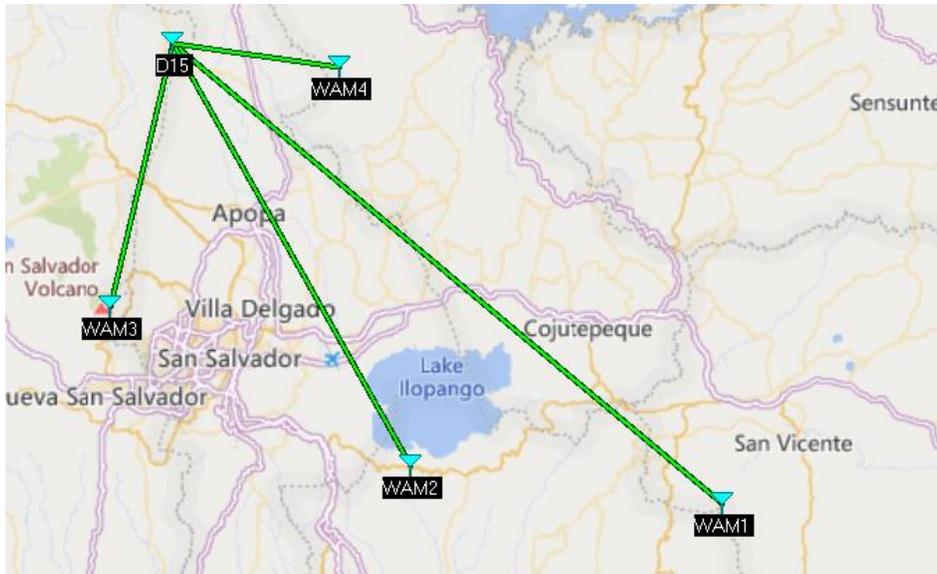


Figura 52 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto D15

Estación(antena)	Nivel de potencia de recepción
WAM1	-63.9dBm
WAM2	-60.8dBm
WAM3	-55.6dBm
WAM4	-51.6dBm

Tabla 13 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto D15

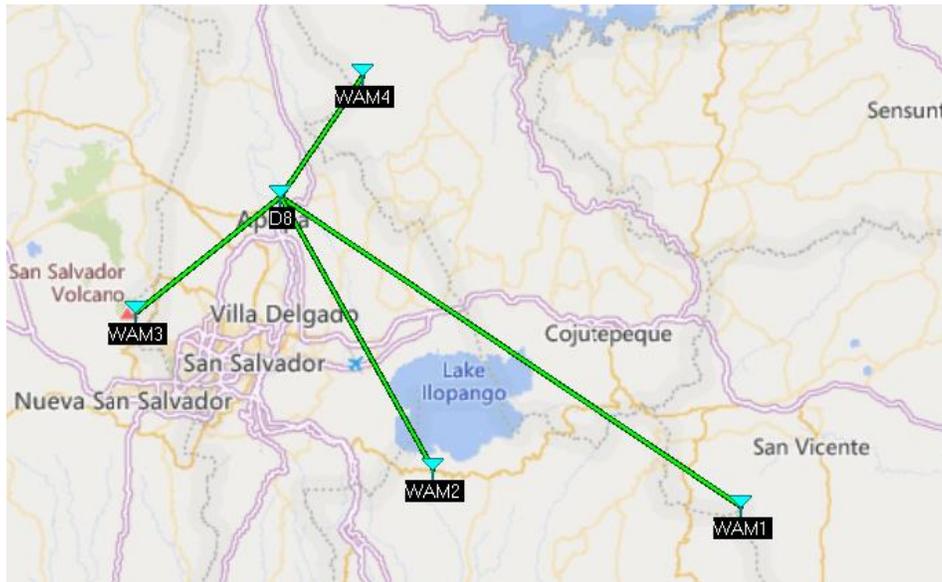


Figura 53 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada D8

Estación(antena)	Nivel de potencia de recepción
WAM1	-61.0dBm
WAM2	-55.6dBm
WAM3	-51.6dBm
WAM4	-49.0dBm

Tabla 14 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada D8

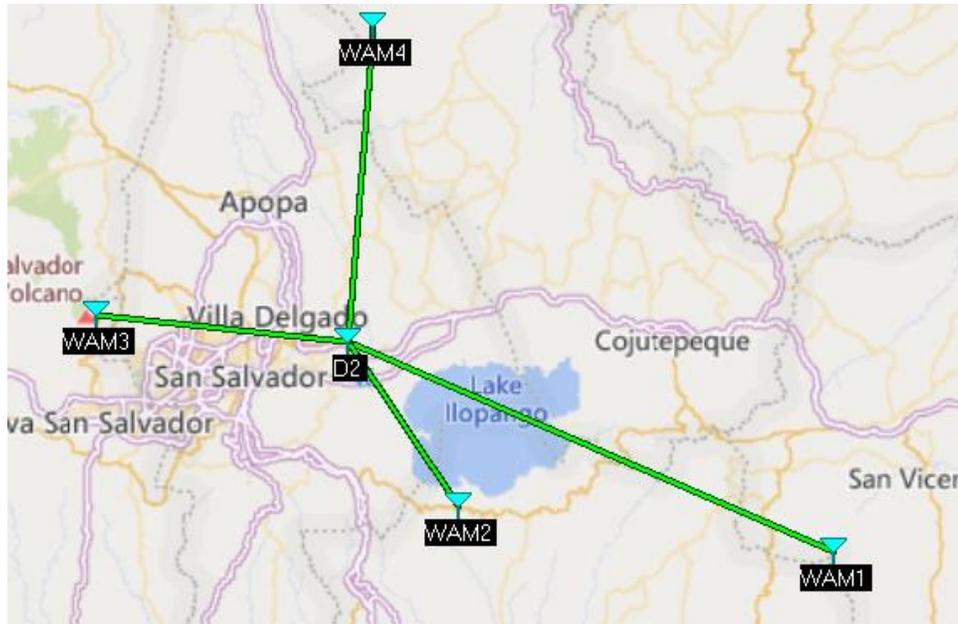


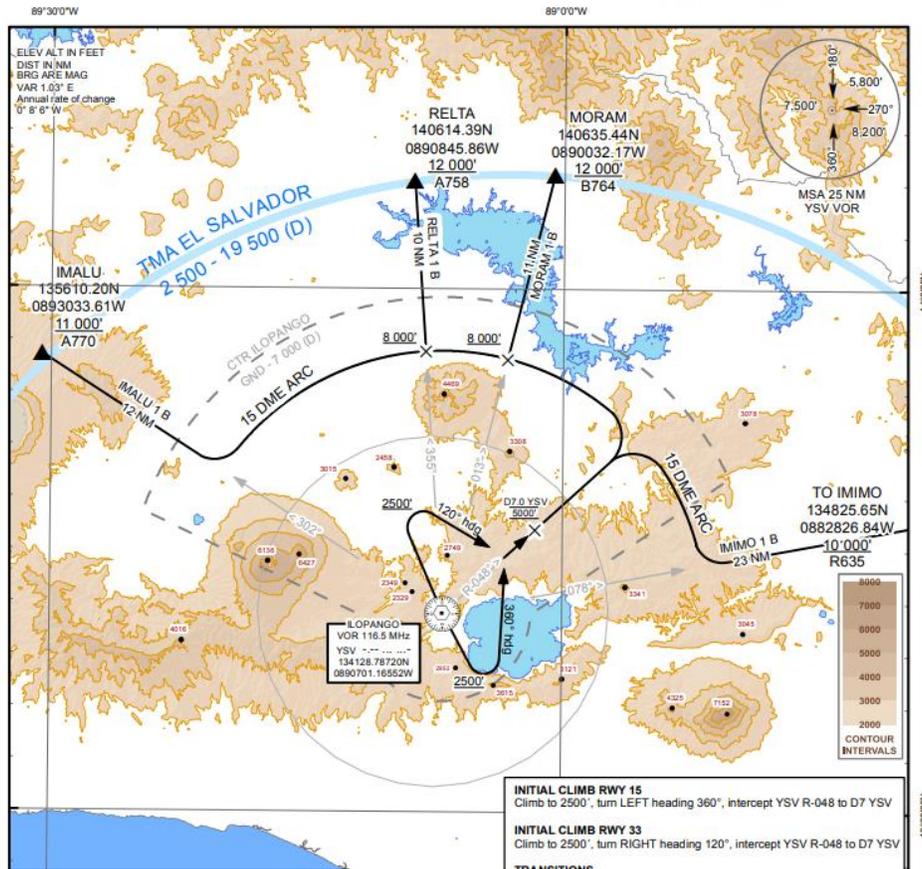
Figura 54 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada D2

Estación(antena)	Nivel de potencia de recepción
WAM1	-59.4dBm
WAM2	-49.9dBm
WAM3	-52.5dBm
WAM4	-49.7dBm

Tabla 15 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada D2

Carta de navegación aproximación pista 15/33.

Los radios enlaces de la pista 33 nos apoyaremos en las cartas de navegación de ascenso/salida del aeropuerto de Ilopango, con estas rutas se verificará el rendimiento de toda aeronave que salga del aeropuerto de Ilopango.



Carta de navegación de salida de la pista 15 y 33.

Radio enlaces desde antenas WAM hacia cada punto marcado en la carta de navegación pista 33.

Se tomarán D7 que está ubicado a 5000ft, luego asciende a 8000ft a 15 millas náuticas a partir del aeropuerto de Ilopango, luego la salida se puede dividir en 4 salidas que dependen del destino que lleva la aeronave tomara cualquiera de las 4 salidas.

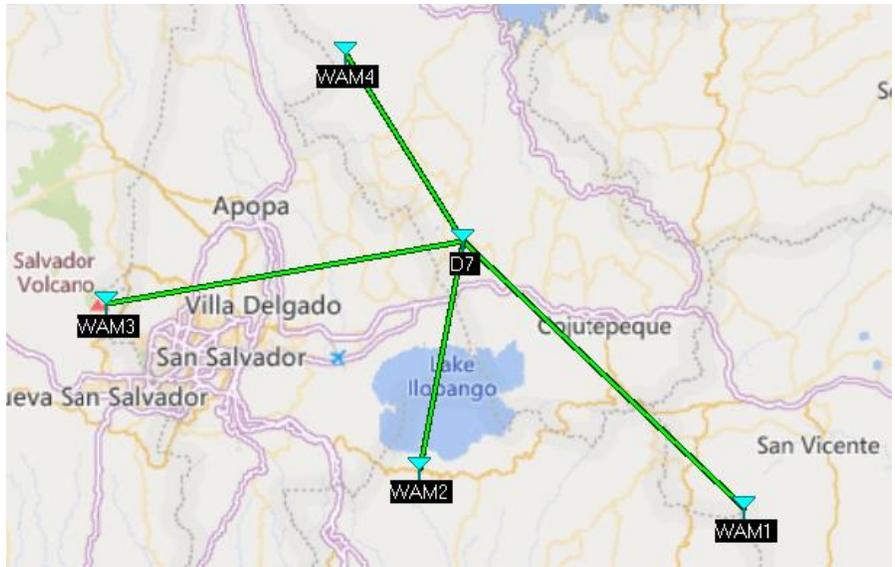


Figura 55 radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto D7

Estación(antena)	Nivel de potencia de recepción
WAM1	-57.0dBm
WAM2	-52.5dBm
WAM3	-56.7dBm
WAM4	-52.1dBm

Tabla 16 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto D7

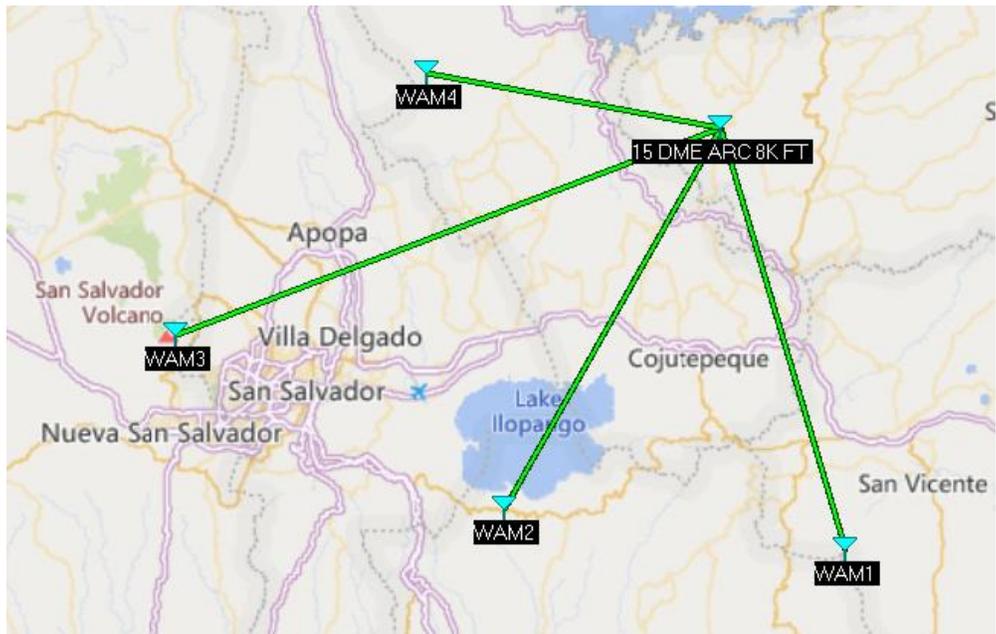


Figura 56 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada 15 DME

Estación(antena)	Nivel de potencia de recepción
WAM1	-59.1dBm
WAM2	-57.5dBm
WAM3	-60.7dBm
WAM4	-55.0dBm

Tabla 17 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada 15 DME

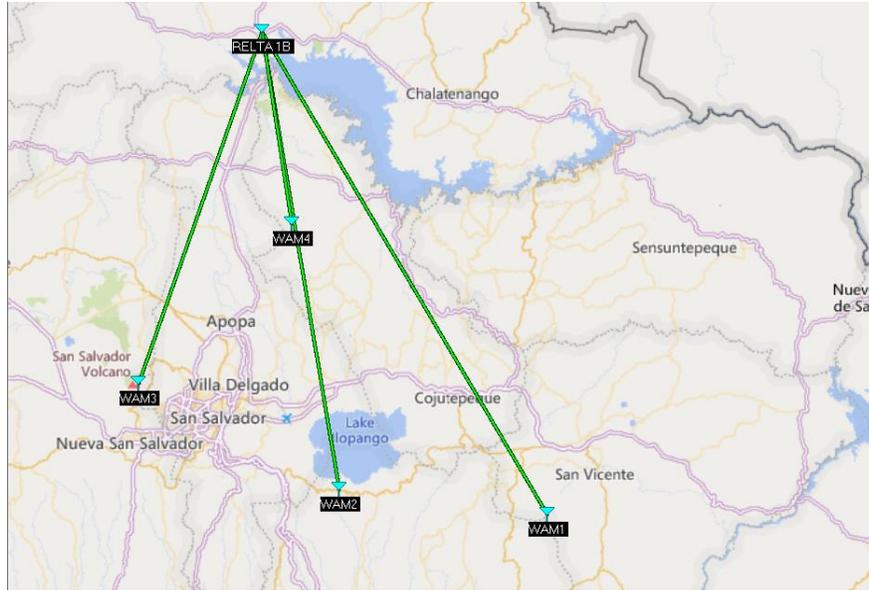


Figura 57 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada RELTA 1B

Estación(antena)	Nivel de potencia de recepción
WAM1	-65.7dBm
WAM2	-62.3dBm
WAM3	-61.2dBm
WAM4	-55.5dBm

Tabla 18 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada RELTA 1B

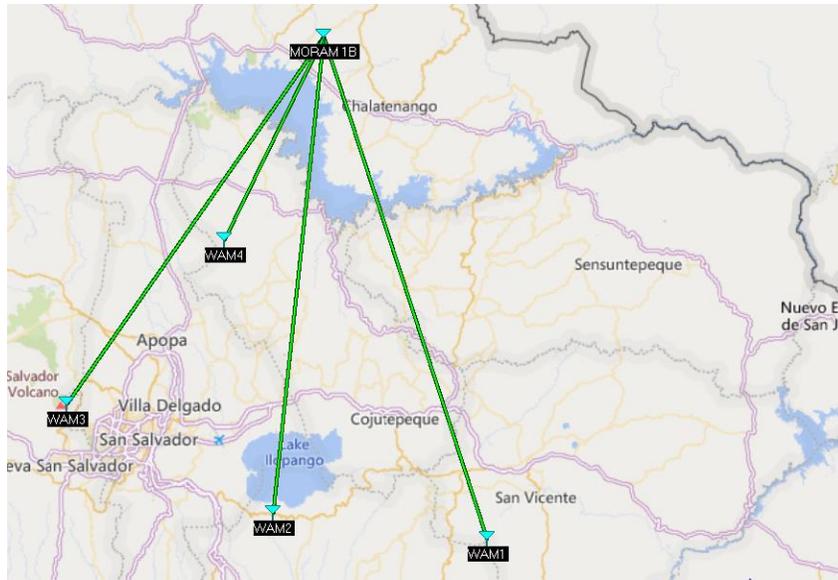


Figura 58 radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada MORAM 1B

Estación(antena)	Nivel de potencia de recepción
WAM1	-64.8dBm
WAM2	-64.1dBm
WAM3	-62.6dBm
WAM4	-57.6dBm

Tabla 19 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada MORAM 1B

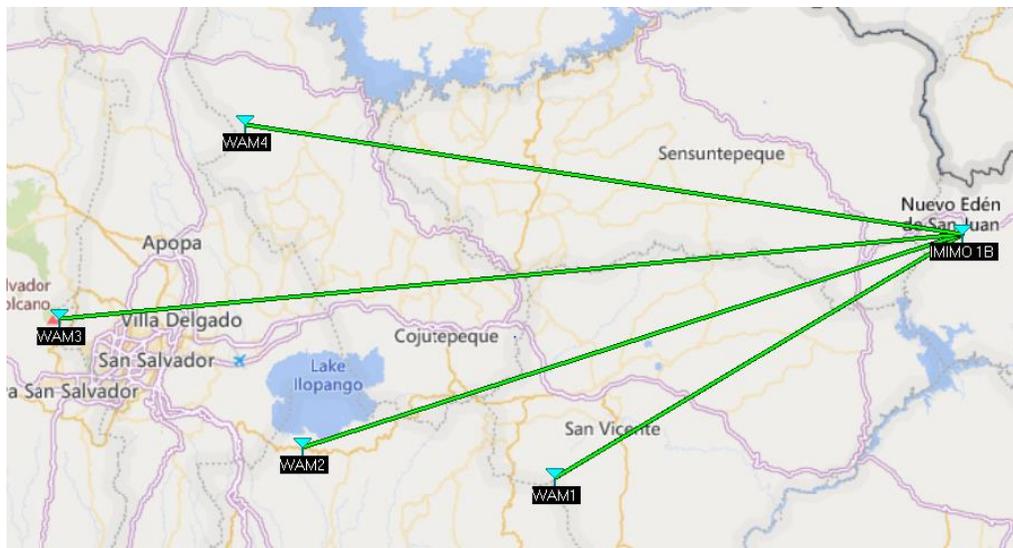


Figura 59 Radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada IMMO 1B

Estación(antena)	Nivel de potencia de recepción
WAM1	-62.3dBm
WAM2	-64.7dBm
WAM3	-66.4dBm
WAM4	-65.0dBm

Tabla 20 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada IMIMO 1B

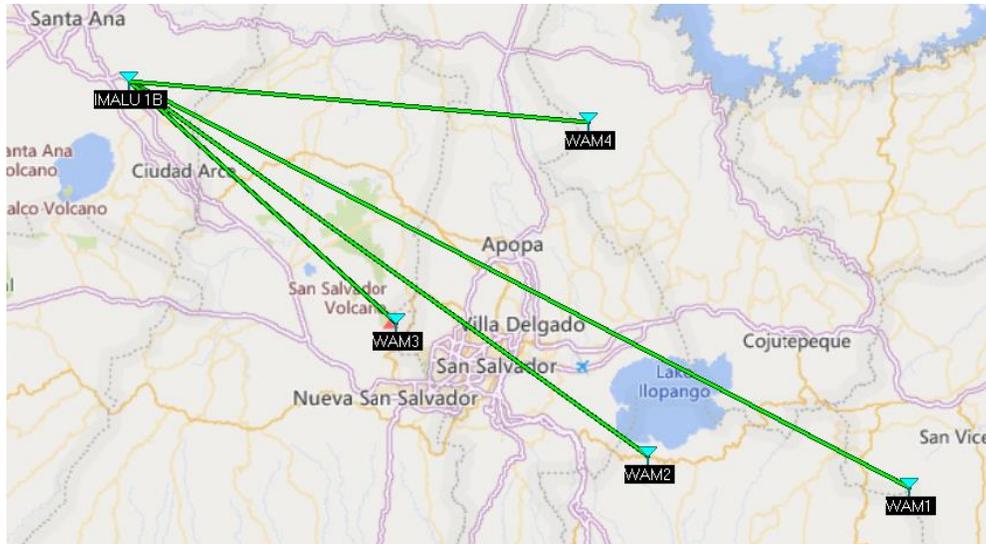


Figura 60 radio enlace desde antenas MLAT/WAM hacia punto de entrada IMALU1B

Estación(antena)	Nivel de potencia de recepción
WAM1	-67.0dBm
WAM2	-64.0dBm
WAM3	-58.2dBm
WAM4	-61.8dBm

Tabla 21 Niveles de potencias de cada antena MLAT/WAM hacia punto de entrada IMALU 1B