

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



**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE UN
SISTEMA PARA MEDIR EL RETARDO EN LA
PROPAGACIÓN IONOSFÉRICA**

PRESENTADO POR:
CÉSAR CRISTIAN ESCOBAR CASTRO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO DE 2019

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

MSc. CRISTOBAL HERNÁN RÍOS BENITEZ

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título:

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE
UN SISTEMA PARA MEDIR EL RETARDO EN LA
PROPAGACIÓN IONOSFÉRICA**

Presentado por:

CÉSAR CRISTIAN ESCOBAR CASTRO

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. WERNER DAVID MELENDEZ VALLE

SAN SALVADOR, JULIO DE 2019

Trabajo de Graduación Aprobado por:

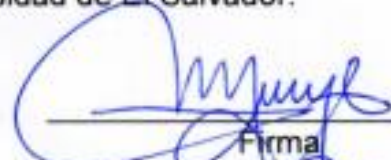
Docente Asesor:

ING. WERNER DAVID MELENDEZ VALLE

ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, viernes 12 de julio de 2019, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 3:00 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


Firma



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

- ING. WERNER DAVID MELENDEZ VALLE
(Docente Asesor)


Firma

- ING. MARVIN GERARDO JORGE HERNANDEZ


Firma

- ING. WALTER LEOPOLDO ZELAYA CHICAS


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA MEDIR EL RETARDO EN LA PROPAGACIÓN IONOSFÉRICA

A cargo del Bachiller:

- ESCOBAR CASTRO CÉSAR CRISTIAN

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.3

(OCHO PUNTO TRES)

Contenido

1. Generalidades	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos	1
1.2.1. Objetivo General.....	1
1.2.2. Objetivos Específicos.....	1
1.3. Alcances	2
1.4. Antecedentes.....	2
1.5. Planteamiento del Problema	3
1.6. Justificación.....	3
2. Base Teórica	4
2.1. Propagación de Ondas en la Atmósfera	4
2.1.1. Tropósfera	5
2.1.2. Estratósfera.....	5
2.1.3. Mesósfera	5
2.1.4. Ionósfera.....	6
2.2. Señales CHIRP	9
2.2.1. Análisis Matemático	9
2.2.2. Aplicaciones de las Señales Chirp	11
2.3. Sistema Global de Navegación Satelital (GNSS).....	13
2.3.1. Sistemas GNSS Existentes	14
2.3.2. Sistemas de Aumentación de GNSS.....	18
2.4. ADS-B.....	19
2.5. Modelados de Ionósfera	20
2.5.1. Modelo IRI	20
2.5.2. Modelo NeQuick	23
3. Caracterización del Error y Métodos de Sondeo	27
3.1. Servicios con Poca Afectación Ionosférica	27
3.2. Efectos Ionosféricos sobre Señales GNSS	27
3.2.1. Caracterización de Variaciones	29
3.3. Actualidad en el Estudio del Error Ionosférico	33
3.3.1. Análisis y Mitigación del error ionosférico en los Sistemas Globales de Navegación por Satélite con receptores de una frecuencia	34

3.3.2.	Estimación del Error de la Posición GPS por Efectos Ionosféricos	36
3.4.	Métodos de Sondeo Ionosférico	41
3.4.1.	Reflexión Parcial	41
3.4.2.	Ionosonda	42
3.4.3.	Radars Coherentes.....	64
3.4.4.	Radars Incoherentes	65
3.5.	Factibilidad Económica.....	66
3.5.1.	Ionosonda de Incidencia Oblicua	66
3.5.2.	Ionosonda de Incidencia Vertical	67
4.	Sistema de Sondeo Ionosférico Sugerido.....	68
4.1.	Finalidad del Sistema de Sondeo Ionosférico	68
4.2.	Evaluación del Equipo Disponible en Escuela de Ingeniería Eléctrica	68
4.2.1.	Transceptor Kenwood TS-50S	68
4.2.2.	Antenas.....	69
4.2.3.	Computadora	71
4.3.	Descripción del Sistema Recomendado	71
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	74
6.	Bibliografía.....	75
	Apéndice A. Especificaciones de Equipos	78
	I. Transceptor Kenwood TS-50S.....	78
	II. Digisonde DPS-4D.....	80
	Apéndice B.	81
	I. Mapa Global de Estaciones Digisonde.....	81
	Apéndice C. DDS para Chirp Digitales.	82
	Apéndice D. Antenas T2FD	83

Ilustraciones.

Figura 1. Capas de la Atmosfera.....	4
Figura 2. Capas de la ionósfera	6
Figura 3. Propagación de onda electromagnética por medio de la ionósfera.....	9
Figura 4. Respuesta en frecuencia de un sistema Chirp.....	10
Figura 5. Respuesta al impulso de un sistema Chirp, obteniendo una señal creciente.	10
Figura 6. Ejemplo de ionograma con especificación de valores detallados.	13
Figura 7. Datos ingresados para obtener modelo IRI 2016.....	23
Figura 8. Resultados del modelado IRI para TEC y alturas críticas para alturas entre 0 y 2000 km.	23
Figura 9. Datos ingresados para modelado web de NeQuick 2.....	25
Figura 10. Perfil de densidad de electrones obtenido mediante NeQuick 2.	26
Figura 11. Refracción de una onda con relación al ángulo de incidencia.....	31
Figura 12. Rotación de Faraday en una onda electromagnética.	32
Figura 13. Diagrama de bloques del análisis del error (Honorine Kenguruka, 2014)	40
Figura 14. Diagrama de bloques y etapas de una ionosonda típica.	43
Figura 15. Estación de Digisonde D4.	46
Figura 16. Diagrama de bloques de una sonda de incidencia vertical Chirp de una antena.	49
Figura 17. Parámetros de funcionamiento de la ionosonda FM.	50
Figura 18. Diagrama de bloques de una ionosonda utilizando DDS.....	52
Figura 19. Pantalla principal del software ChirpView.....	57
Figura 20. Diagrama de Bloques de una Conexión Típica de ChirpView.....	58
Figura 21. Pantalla principal del SAO Explorer.....	60
Figura 22. Análisis de ionograma en el software SAO Explorer.	61
Figura 23. Modelo de Datos del SAO.....	62
Figura 24. Software ChirpView instalado en SO Windows 10.....	72

Tablas.

Tabla 1. Comparación de los distintos Sistemas de Navegación por Satélite.	15
Tabla 2. Rangos de frecuencia para las técnicas de sondeo ionosférico.	41
Tabla 3. Costo detallado de adquisición del sistema DPS-4D de Digisonde Technologies.	47
Tabla 4. Costo detallado de implementación de una ionosonda de incidencia vertical con modulación FM según George Barry.	50
Tabla 5. Costo detallado de implementación de una ionosonda de incidencia vertical con modulación FM.	53
Tabla 6. Costo detallado de implementación de una estación receptora con radio con frecuencia fija.	55
Tabla 7. Costo detallado de implementación de una estación receptora con radio con frecuencia variable.	57
Tabla 8. Costo detallado de implementación del análisis de la señal utilizando el software ChirpView.	59
Tabla 9. Costo detallado de implementación del análisis de la señal utilizando el software SAO-X.	63
Tabla 10. Costo detallado de implementación del análisis de la señal utilizando el software LabVIEW.	64
Tabla 11. Estaciones dedicadas al estudio mediante radares incoherentes.	65
Tabla 12. Comparación de costo total de alternativas para recepción de señales de sondeo ionosférico.	66
Tabla 13. Comparación de alternativas para análisis de señales adquiridos mediante ionosondas.	66
Tabla 14. Comparación de alternativas para la implementación de un sistema de sondeo de incidencia vertical activo.	67

1. Generalidades

1.1. Introducción

Se tiene como finalidad evaluar la factibilidad de implementación de un sistema que permita cuantificar el retardo que sufren las transmisiones de radio que se propagan a través de la ionósfera, así como la forma en que dicho retardo afecta a la información que se recibe con relación a la información emitida. El estudio de dichas emisiones estará basado en transmisiones de radio de ultra alta frecuencia o UHF por sus siglas en inglés (Ultra High Frequency) y señales de mensajes tipo barrido ascendente de frecuencias (CHIRPS). De igual forma se caracterizan sistemas que hacen uso de señales HF con mensajes modulados en frecuencia tipo Chirp, los cuales ayudan (entre otras cosas) a predecir la calidad de la información proporcionada por los sistemas de posicionamiento global, basados en satélites (o GNSS) y las aplicaciones derivadas de ellos, por ejemplo, la radionavegación terrestre, marítima y aérea.

Usualmente, los sistemas se denominan ionosondas o sistemas de sondeo ionosférico, debido a que la mayor afectación de las señales GNSS es provista por la ionósfera. Por lo general, la información que se deriva de estos sistemas permite la construcción de ionogramas los cuales son representaciones gráficas de la relación entre la frecuencia y la altura en la que las frecuencias son reflejadas a la atmósfera mediante el cual, se obtiene el contenido total de electrones en la zona de estudio y permite aplicarlo en métodos de corrección de errores ionosféricos, mostrando su utilidad sobre otros estudios ya que el modelado ionosférico es único para nuestra región (debido al comportamiento de la ionósfera en relación de la latitud y longitud).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Analizar la factibilidad de implementación de un sistema que permita evaluar el retardo en la propagación de señales de alta frecuencia que se transmiten a través de la ionósfera, de tal forma que se puedan generar ionogramas mediante un software apropiado, utilizando el hardware disponible en la Escuela de Ingeniería Eléctrica y la normativa aplicable.

1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Examinar los tipos de errores producidos por la ionósfera en las señales de radio que se propagan a través de ésta, dando especial interés en las señales emitidas por los sistemas de posicionamiento global (GNSS).

- b) Determinar las alternativas de sistemas que permitan la captura de señales de prueba que se propaguen a través de la ionósfera haciendo uso del hardware disponible en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la FIA-UES, obteniendo así, bajos costos de implementación.
- c) Seleccionar las herramientas de software de uso libre, que permitan la construcción de ionogramas y cuantificación del retardo de propagación basados en señales de radio de alta frecuencia, así como proveer de datos que puedan servir de base para estudios a profundidad del comportamiento de la ionósfera en la región Centroamericana.
- d) Proponer un sistema completo hardware-software que pueda ser utilizado como base para la construcción de ionogramas y a partir de él, determinar la variación en el retardo de propagación y su incidencia en la información que se proporciona a los usuarios finales de la misma.

1.3. Alcances

Al finalizar el presente trabajo, se propondrá el diseño de un sistema completo para el análisis del retardo en la propagación ionosférica y su factibilidad de implementación en la EIE. Para ello, se evaluarán los equipos de radio disponibles en la Escuela de Ingeniería Eléctrica y su factibilidad de uso en la recepción de señales de HF moduladas con información CHIRP o en su defecto se indicarán las modificaciones y/o adaptaciones que deberían hacerse para tal fin. De igual forma, se determinará el software más apropiado para ser utilizado en el análisis de señales provenientes de ionosondas, determinación de parámetros atmosféricos y elaboración de ionogramas, así como la metodología que debería seguirse para ello. A su vez, se describirá la forma en que tales diagramas, permiten la evaluación del retardo y la calidad de las señales dadas por los sistemas satelitales de posicionamiento global que se pueden recibir en El Salvador.

1.4. Antecedentes

En años recientes, en diversas partes del mundo, se han realizado numerosos estudios con el fin de analizar el comportamiento de la propagación de señales de radio en la ionosférica. Dichos estudios arrojaron como resultado la presencia de errores en la recepción de datos, derivados de los retardos en la propagación, mismos que se cuantifican por medio de ionogramas. Los resultados en cuestión también han servido para predecir errores en otro tipo de aplicaciones, entre ellas la información proporcionada por las redes satelitales de posicionamiento global o GPS.

Para facilitar este tipo de estudios, a nivel mundial existen algunas estaciones que transmiten señales de prueba tipo CHIRPS en la banda de HF, las cuales se pueden recibir y analizar, siempre y cuando se cuente con el hardware y software apropiado.

La EIE cuenta con sistemas de radio HF que podrían utilizarse como base para la implementación de una estación receptora de este tipo de señales; así mismo, se cuenta con recursos informáticos para la instalación del software requerido para la operación de este tipo de estaciones, no obstante, es necesario realizar un estudio completo de factibilidad que tome en cuenta los requerimientos e insumos disponibles y partir de ello, establecer si es viable o no, su implementación

1.5. Planteamiento del Problema

En la actualidad, existe una diversidad de aplicaciones vía radio, que hacen uso de la ionósfera para su propagación y una de las particularidades de ésta, es que sus propiedades electromagnéticas cambian constantemente a largo del día o a lo largo del año, lo que afecta a las señales que requieren el paso por ella (señales satelitales), y esto a su vez, incide de diversas formas en la calidad de la información que se transporta. Es por esta razón que se hace necesario analizar la factibilidad de implementación de un sistema que permita evaluar tales variaciones, especialmente el retardo de propagación con el fin de implementar técnicas de corrección de errores ionosféricos y mejorar de forma significativa la precisión de dichos sistemas.

1.6. Justificación

En la actualidad, existe diversas aplicaciones de radio que hacen uso de la ionósfera para su transmisión, entre ellas, los sistemas de radionavegación basados en redes satelitales de posicionamiento global. La exactitud de la información obtenida de dichas redes depende, en gran medida, del comportamiento electromagnético de las distintas regiones de la ionósfera, mismas que varían de acuerdo con la zona geográfica en la cual se haga uso de ella. Disponer de sistemas que permitan conocer la variación antes señalada, ayuda a seleccionar métodos de corrección adecuados o establecer restricciones de uso, y por ello, es importante conocer la factibilidad de implementación en nuestro país, de una estación de monitoreo del comportamiento de la ionósfera, aprovechando las estaciones de prueba instaladas en distintas partes del mundo.

2. Base Teórica

2.1. Propagación de Ondas en la Atmósfera

La propagación de las ondas electromagnéticas varía en función del medio que atraviesan. Por lo tanto, es necesario prestar especial atención al comportamiento de dichas ondas en la atmósfera terrestre debido a que muchas de las señales utilizadas en aplicaciones de localización y geoposicionamiento, mayormente en la banda de UHF, obedecen estos parámetros.

En términos generales, la atmósfera, al estar compuesto por aire (mayormente nitrógeno y oxígeno), presenta atenuación, reflexión y absorción. Estos cambios en la propagación están relacionados tanto a la capa de la atmósfera en la que viaja la señal o la longitud de la onda con la que se desplaza.

La atenuación está muy relacionada con los fenómenos meteorológicos, principalmente en las regiones inferiores de la atmósfera, mientras que los fenómenos de reflexión y absorción están ligados principalmente a la radiación del sol por lo que se muestra con mayor fuerza en las regiones superiores donde los rayos UV y los rayos X ionizan los gases que conforman el aire.

La atmósfera está dividida en cinco capas con características diferentes las cuales son: la tropósfera, la estratósfera, la mesósfera, la ionósfera también conocida como termosfera y la exosfera la cual es la última capa donde la atmósfera pierde sus características generales y se combina con el vacío espacial.

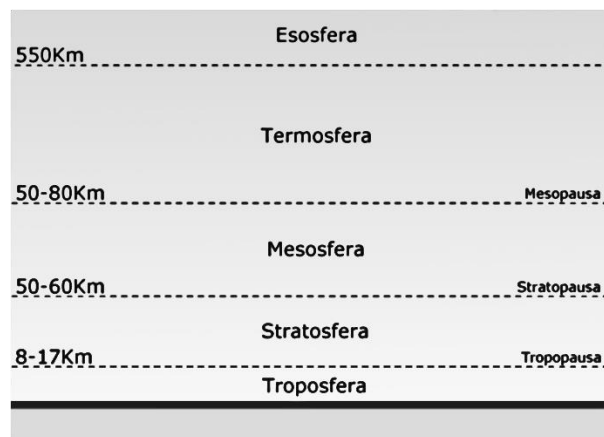


Figura 1. Capas de la Atmósfera

2.1.1. Tropósfera

Se encuentra a una altura promedio de 10 km. En esta región se producen fenómenos meteorológicos, entre las que se encuentran las nubes, tormentas, presión, temperatura, etc. Esta capa es la responsable de la mayoría de las condiciones de propagación en VHF.

Las frecuencias en la banda VHF se propagan del mismo modo que la luz; por lo que son detenidas por los obstáculos o reflejadas por ellos. Este modo de propagación obliga a captar las ondas en un sitio despejado.

La propagación troposférica en la parte inferior de la banda de VHF se logra mediante la refracción de las ondas al llegar a la troposfera, tomando en consideración que las reflexiones en la ionósfera son considerables para frecuencias debajo de 150 MHz. En ciertas condiciones como con cielos despejados, se pueden lograr distancias mucho mayores que las de línea de vista aprovechando las características favorables de la atmósfera. Mientras que, para las señales de nuestro interés, la tropósfera presenta poca afectación

2.1.2. Estratósfera

Entre 10 y 50 km sobre la tropósfera se encuentra la estratósfera, y está estratificada en capas de temperatura a medida que incrementa su altitud. Estas capas presentan una temperatura más fría en zonas inferiores, es decir más cercanas a la corteza terrestre. En cambio, en capas de mayor altitud se incrementa la temperatura gradualmente. Este comportamiento se debe a que en la zona superior se encuentra la Capa de Ozono, la cual juega un papel importante en la absorción de radiación ultravioleta del sol, por lo que impide que dichos rayos alcancen la superficie, aumentando a su vez la temperatura debido a la absorción.

Debido a la forma como se sitúan los estratos de temperatura, esta capa de la atmósfera carece por completo de nubes o perturbaciones meteorológicas. A su vez, al ser una capa de baja densidad, no tiene ninguna influencia sobre las ondas electromagnéticas.

2.1.3. Mesósfera

Esta capa de la atmósfera se encuentra ubicada entre los 50 y los 80 Km de altura. En su parte inferior contiene una pequeña cantidad de Ozono y, por lo tanto, calentamiento máximo debido al contacto directo con la porción superior de la estratósfera, en cambio, a medida que aumenta la altitud, decae la temperatura. Debido a su contacto directo con la capa D de la ionósfera, la altitud máxima varía dependiendo del comportamiento solar y la estación del año.

En la porción superior comienza a presentar ionización, coincidiendo con la capa D perteneciente a la ionósfera, donde la ionización del oxígeno libera electrones. A pesar de ser una capa poco comprendida por la comunidad científica, se considera que su influencia en la radiocomunicación es nula y toda ionización presente en la parte superior de esta, se atribuye y agrupa en la capa D de la ionósfera.

2.1.4. Ionósfera

Sobre la mesósfera y hasta una altura de 600 Km se encuentra la ionósfera. Esta región de la atmósfera se ioniza, al recibir la radiación ultravioleta y los rayos X del Sol y se liberan electrones de las moléculas de Nitrógeno y de Oxígeno (que pueden permanecer muchas horas en ese estado y en grandes áreas). Si estos electrones reciben excitación de radiofrecuencia, son capaces de irradiarla nuevamente hacia áreas adyacentes, incluida la tierra, o simplemente la disipan.

Es muy importante para las comunicaciones en HF ya que las señales que llegan a esta región son refractadas hacia la tierra, a miles de kilómetros del lugar de origen, además que, por su ionización, tiene un impacto en la fase y código en el que se propagan las señales HF. Por lo tanto, el estudio de propagación de las HF (principalmente señales de posicionamiento global) se centra en predecir su comportamiento. En cambio, en condiciones normales la ionósfera no produce ningún efecto sobre las señales de UHF, que la atraviesan y se pierden en el espacio exterior.

Los electrones libres se agrupan en diferentes capas dentro de la ionósfera como se muestra en la figura 2.

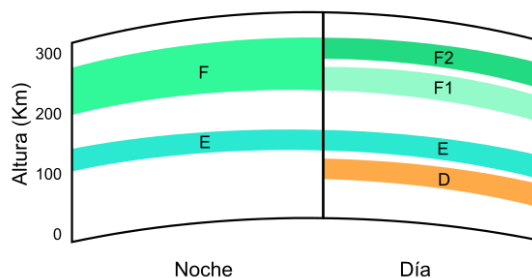


Figura 2. Capas de la ionósfera

La existencia de la ionósfera permite las comunicaciones a grandes distancias, pero como se mostró anteriormente, su efecto es distinto para las diferentes bandas de frecuencia. A frecuencias bajas y muy bajas, la ionósfera supone un cambio brusco en el índice de reflexión. Esta variación produce una reflexión de la onda incidente en la parte baja de la ionósfera (capa D).

Se puede considerar que la superficie de la Tierra y la capa D forman una guía de ondas que favorece la propagación a grandes distancias típicamente entre los 5000 y 20000 km. Dado que la onda no llega a penetrar en la ionósfera, este modo de propagación es relativamente insensible a las variaciones de la ionósfera.

A frecuencias más elevadas (MF y superiores) la onda penetra en la ionósfera. La ionósfera es un medio cuyo índice de refracción varía con la altura. La densidad de iones aumenta según se incrementa la altura hasta alcanzar el máximo entre los 250 y 600 km. A medida que la densidad de ionización aumente, el índice de refracción disminuye, produciéndose la refracción de la onda o curvatura de la trayectoria, de forma análoga a la refracción atmosférica, pudiendo presentarse condiciones en las que la onda regresa a la Tierra.

2.1.4.1. Capa D

Es la capa inferior de la Ionosfera, situada entre los 60 y los 90 km sobre la superficie terrestre. Presenta una gran cantidad de ionización tanto de hidrógeno como de óxido nítrico, pero su tasa de recombinación es mayor a la de ionización, por lo que contiene mayor cantidad de moléculas neutrales que de iones. Este comportamiento difiere en el día ya que la radiación del sol aumenta la ionización de la capa, no obstante, en la noche dicha ionización es casi inexistente.

Para las frecuencias MF y la banda inferior de frecuencias HF se presenta como un medio de absorción, por lo que son atenuadas de forma significativa. Esto se debe a que los electrones del frente de onda colisionan con moléculas neutrales entregando la energía que portaban. Este comportamiento es más frecuente para las frecuencias inferiores, puesto que, al tener una mayor longitud de onda aumenta la posibilidad de la colisión, mientras que frecuencias con menor longitud de onda no se ven afectadas.

Como el comportamiento de absorción aumenta con la luz solar, el efecto es máximo en horas cercanas al mediodía y es casi nula en horas de la noche (mantenida únicamente por los rayos cósmicos). Esto significa que las frecuencias menores a 10 MHz son absorbidas por la capa

En el día, en cambio en la noche, frecuencias mayores a 5 MHz puede atravesar esta capa libremente.

Durante tormentas solares, el efecto de absorción de las señales se incrementa considerablemente pudiendo llegar a varias decenas de decibeles de atenuación. Debido a estos comportamientos durante las horas del día, las comunicaciones en las bandas de 1.8 MHz y 3.5 MHz se limitan a unos cientos de kilómetros pudiendo limitarse aún más, bajo efectos de tormentas solares.

2.1.4.2. Capa E

Está situada sobre la capa D alcanzando hasta los 110 kilómetros de altitud. La ionización en esta capa es debida al efecto de rayos X y rayos UV, pero se presenta mucho menos absorbente que la capa D. Usualmente, esta capa puede reflejar frecuencias menores a 10 MHz pudiendo alcanzar frecuencias de hasta 50 MHz en instantes con ionización intensa o tormentas solares.

Ya que su densidad de ionización depende de la luz solar, se presenta de noche como esporádica y permeable, mientras que durante el día es más densa. Luego de la puesta de sol su altura se incrementa permitiendo una mejor propagación de ondas debido a la reflexión.

Durante instantes de ionización intensa, se presenta una subdivisión llamada E_s (proveniente de “sporadic E”). Dicha capa está caracterizada por pequeñas nubes de intensa ionización, las cuales pueden soportar la reflexión de ondas de radio de muy alta frecuencia (VHF) inclusive. Este comportamiento permite la comunicación a distancias mucho mayores que las usuales llegando a presentarse distancias de hasta 2,500 km para propagación de un salto. La causa de la formación de dicha capa es aún desconocida, sin embargo, se sabe que ocurre con mayor frecuencia en verano teniendo apariciones de un máximo de 24 horas.

2.1.4.3. Capa F

De características puramente reflectivas, ubicada entre los 110 y los 550 km de altitud, se divide en dos, la capa F1 y la capa F2. La capa F1 (entre los 110 km y los 250 km) se encuentra presente solamente durante el día (ausente en invierno) y la capa F2 (entre los 250 km hasta los 550 km aproximadamente) presentándose en mayor cantidad durante la noche. Este comportamiento se explica por la poca densidad de moléculas en las capas altas de la atmósfera, lo que dificulta la recombinación por colisiones y por fenómenos dinámicos de difusión de iones desde capas inferiores.

Durante la noche, la capa F refleja las señales de hasta 10 MHz, mientras que el resto de las señales continúan hacia el espacio exterior. En periodos de máxima actividad solar, con ionización nocturna intensa, las señales de incluso 50 MHz se pueden reflejar en esta capa. La distancia por cubrir es mínimo 4000 km y se logran mayores distancias si se utilizan saltos múltiples. Siendo ésta muy útil para la radio afición, la radiodifusión internacional, comunicaciones militares, comunicación a larga distancia para aeronaves y embarcaciones.

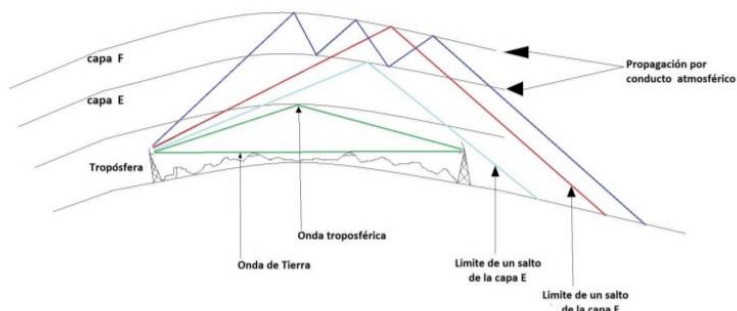


Figura 3. Propagación de onda electromagnética por medio de la ionósfera

2.2. Señales CHIRP

La modulación de frecuencia lineal para comunicación digital fue patentada por Sídney Darlington en 1954 y mejorada por Winkler en 1962. Dicha modulación emplea ondas sinusoidales cuya frecuencia incrementa o decrecienta en función del tiempo. Estas formas de onda son conocidas usualmente como Chirp lineales o simplemente Chirp.

La tasa en la cual la frecuencia cambia es llamada la tasa de Chirp. En el caso del envío de información binaria usando modulación Chirp, se asignan tasas de Chirp opuestas según el mensaje. Es decir, para el envío de un “1” digital, se asigna una tasa positiva, en cambio para un “0” digital se asigna una tasa negativa. Esta modulación es muy utilizada en aplicaciones de radares, sonares y láseres ópticos, lo cual ha generado que se presenten mejoras continuas en la forma de transmisión de señales y el filtrado en la recepción, así como también, ha ampliado su campo de aplicación a campos como la medicina.

2.2.1. Análisis Matemático

La magnitud de las señales Chirp tienen un valor constante de uno, mientras que la fase es una parábola y obedece la siguiente ecuación.

$$X[k] = \alpha k + \beta k^2$$

Donde:

α : representa un cambio en la respuesta al impulso hacia la izquierda o derecha.

β : modifica la curvatura de la fase.

Ambos valores están definidos tal que la fase en $k= N/2$ es un múltiplo de 2π .

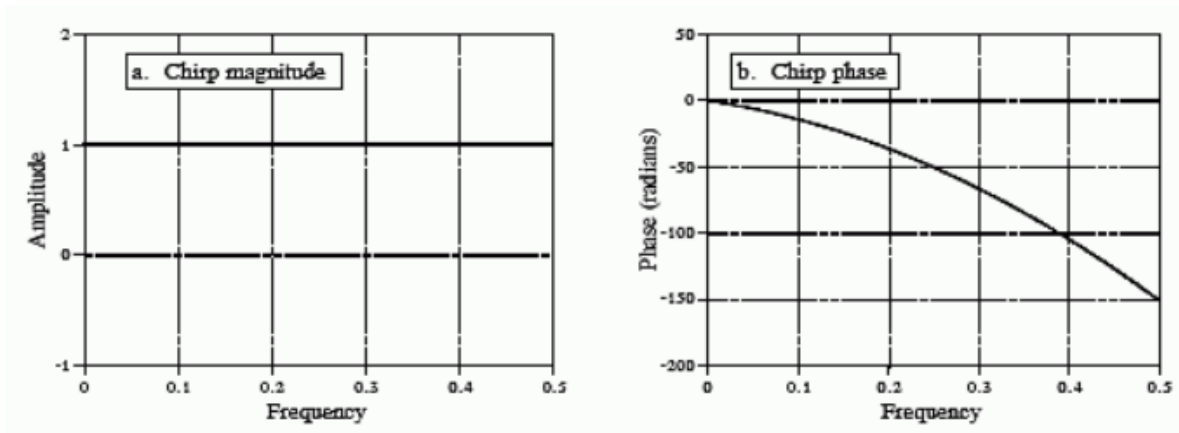


Figura 4. Respuesta en frecuencia de un sistema Chirp.

Este comportamiento se puede observar en la figura 5, donde la señal es oscilatoria e inicia en baja frecuencia y esta aumenta conforme transcurre el tiempo.

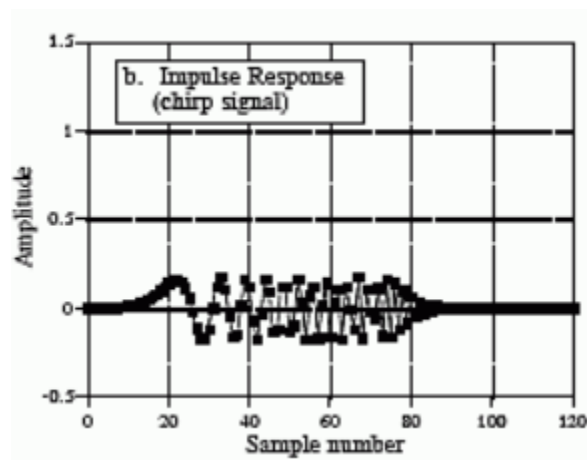


Figura 5. Respuesta al impulso de un sistema Chirp, obteniendo una señal creciente.

Cabe mencionar que las señales Chirp en el receptor se pueden revertir al impulso inicial. Esto se realiza mediante la utilización de un sistema con la magnitud de uno y con fase

opuesta al sistema emisor, facilitando así, el envío y recepción de señales sin pérdidas en el pulso generado.

2.2.2. Aplicaciones de las Señales Chirp

2.2.2.1. *Radars y Sonares*

El radar es un sistema que emplea ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos tales como aeronaves, barcos, vehículos, formaciones meteorológicas y el propio terreno. Por otro lado, un sonar es un sistema que hace uso de la propagación del sonido (usualmente bajo el agua) para comunicarse o detectar objetos a distancia. Los sonares fueron aplicados antes de la aparición de los sistemas GPS como medidas de geolocalización, siendo de uso extendido en otras aplicaciones aún en épocas actuales.

Estos dispositivos emiten pulsos por medio de una antena direccional, recibiendo la señal reflejada en el objetivo y calculando la distancia en base al tiempo transcurrido. Estos sistemas presentan dos requerimientos básicos, generar un pulso extremadamente corto y a su vez con una gran cantidad de energía.

La necesidad de pulsos cortos se debe a la relación inversamente proporcional que posee con la resolución de la medición de distancia. De igual forma, para recorrer distancias mayores, se requiere más energía en el emisor. Si bien, superar dichos requerimientos es una necesidad para radares de largo alcance, ambos difícilmente pueden obtenerse simultáneamente.

Las señales Chirp, en cambio, proveen una solución a la problemática de los radares de largo alcance. Estos sistemas permiten generar un impulso de alta energía el cual es procesado en las etapas de salida del emisor. Este procesamiento permite enviar pulsos modulados de frecuencia en vez de un impulso. Posteriormente, el eco de la señal se recibe, procesándola para obtener un impulso. Esto le da capacidad al sistema de obtener señales de corta duración en las etapas de medición mientras que en las etapas de potencia se trabaja con señales de larga duración.

2.2.2.2. *Ionosondas*

Debido a su desempeño en radares, las señales Chirp son utilizadas en “*Ionosondas*”, es decir, equipo para sondeo de la ionósfera mediante señales de radio. Para esto se ocupa la banda HF (3 a 30 MHz), ya que el comportamiento de propagación permite el análisis de la ionósfera.

A nivel mundial, las señales Chirp son utilizadas para monitorear el comportamiento de la ionósfera. Debido a que el comportamiento de ésta varía dependiendo de la radiación solar, se genera a su vez, errores en la transmisión de señales.

Las señales que son transmitidas a la ionósfera por las estaciones de radio se reflejan en la ionósfera con dirección hacia la superficie terrestre. En la estación receptora se observa una diferencia en concentración y frecuencia, la cual cambia según el estado de los iones en la atmósfera. Luego de recibida la señal, se realiza un barrido de frecuencias para caracterizar correctamente la señal pulsante recibida.

Posteriormente, la señal se interpreta en un gráfico altitud vs concentración llamado ionograma. En base a los ionogramas se puede modelar la ionósfera en dicho instante permitiendo, a su vez, predecir su comportamiento en momentos futuros.

Su fuerte radica en el uso de ionogramas para predicción del comportamiento de las señales HF propagadas mediante la ionósfera y así, generar métodos de corrección del error en su recepción. Tomando en cuenta que el sistema de posicionamiento global, así como sistemas de localización de alta precisión, se transmiten mediante señales HF, es posible visualizar el ionosondeo como una aplicación de alta importancia de las señales Chirp.

2.2.2.2.1. Ionogramas

Los gráficos de incidencia vertical o ionogramas son mediciones de trazos correspondientes a pulsos de alta frecuencia reflejados, los cuales son generados por una ionosonda. Existe una relación única entre frecuencia y valor de densidad de ionización que puede reflejarla.

Cuando el sonar barre de bajas frecuencias hacia frecuencias más altas, la señal sobrepasa el ruido de fuentes de radio comerciales logrando llegar hacia la ionosfera, donde la señal se refleja y posteriormente se analiza el retorno de la señal reflejada por las distintas capas de la ionósfera. Estos ecos forman patrones característicos de trazos que conforman un ionograma. Pulsos de radio viajan más lento dentro de la ionósfera que en espacio libre, por ende, la altura aparente o “virtual” es medida en vez de la altura real. Para frecuencias cercanas al máximo nivel de frecuencia en la capa correspondiente, la altura virtual tiende al infinito debido a que el pulso debe viajar una distancia finita a una velocidad cero. Las frecuencias en las que se produce dicho fenómeno se denominan frecuencias críticas.

Valores característicos de la altura virtual (llamada as h'E, h'F, y h'F2, entre otras) y las frecuencias críticas (designadas por foE, foF1, foF2, etc.) de cada capa son introducidas a escala ya sea de forma manual o mediante una computadora, en base a estos ionogramas. Típicamente, una estación de ionosondeo obtiene una lectura de ionograma cada 15 minutos. Cuando la escala se obtiene manualmente, únicamente las lecturas por hora se analizan a datos numéricos. Ionosondas modernas, apoyadas por computadoras, proveen datos numéricos de todos los ionogramas obtenidos.

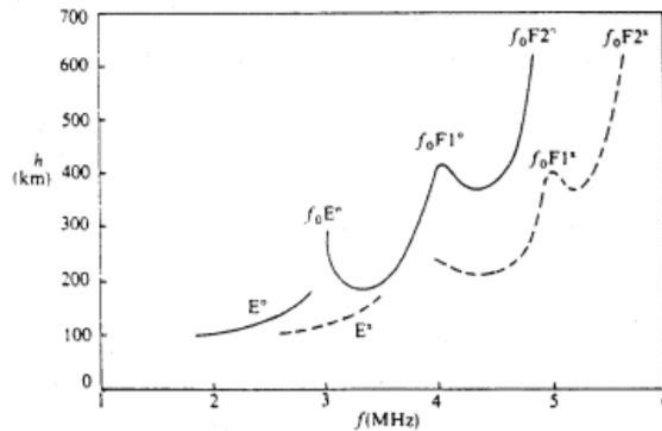


Figura 6. Ejemplo de ionograma con especificación de valores detallados.

Los datos numéricos resultantes, junto con los ionogramas originales y los reportes de la estación son guardados en cinco centros de datos mundiales (WDC's o World Data Centers) dedicados a la ionósfera. Estos conjuntos de datos son compartidos entre todos los centros de datos y contribuyentes. Es requerida la obtención de datos por al menos un año, ya que este conjunto de datos permite conocer correctamente el comportamiento de la ionosfera en función de la hora, la estación y la actividad solar, por lo que un dato aislado carece de aplicación.

2.3. Sistema Global de Navegación Satelital (GNSS)

Los Sistemas Globales de Navegación Satelital o GNSS, son sistemas utilizados para la geolocalización, es decir obtener la ubicación de un receptor en cualquier parte de la superficie terrestre, permitiendo obtener mediciones de longitud, latitud y altitud de un punto. Se llama sistema ya que está compuesto por una constelación de satélites que transmite señales de radio y dispositivos terrestres. Además del cálculo y recepción de los vectores de coordenadas los sistemas GNSS envían referencias de tiempo provista por relojes atómicos. Sus fines de uso es la navegación, geolocalización, medición geodésica, entre otras.

En un inicio se implementaron sistemas que emitían un pulso de radio desde un punto fijo denominado como “maestra” y varias estaciones “esclavas” que trabajaban como repetidoras. Los sistemas más conocidos de este tipo fueron el LORAN y Omega, los cuales emplearon transmisores de radio terrestres de 100 kHz (LF). Su funcionamiento consistía en el cálculo de retraso de tiempo entre la recepción y el envío de la señal, logrando así el cálculo de la distancia a cada una de las estaciones repetidoras y empleando un método de triangulación.

El primer sistema de navegación moderno, es decir, empleando satélites fue un sistema implementado por el ejército de Estados Unidos en 1959 el cual como base el efecto Doppler. La constelación de satélites consistía en al menos diez satélites en orbitas polares bajas los cuales emitían dos señales (150 y 400 MHz) con el fin de minimizar los efectos ionosféricos. Como los satélites emisores de la señal se acercaban o alejaban desde el punto de referencia del receptor (aproximadamente 27,000 km/h), se creaba un desfase de al menos 10 kHz de la señal dependiendo de movimiento del satélite. Siendo que el comportamiento era único para cada una de las señales recibidas, al monitorizar el cambio de frecuencia percibido por el receptor en ciertos intervalos de tiempo, se calculaba la localización con respecto a cada uno de los satélites y al unir estas medidas, se puede obtener una posición exacta del receptor. De igual forma este sistema fue el primero en enviar señales con sincronización de tiempo siendo utilizado como referencia por muchos dispositivos. En sus últimos años de funcionamiento el sistema presentó una precisión de al menos 200 metros y 50 μ s. Este proyecto fue llamado Transit, aunque fue conocido principalmente como NAVSAT o NNSS debido a que la marina era el principal contribuyente de este proyecto.

Los sistemas de navegación satelital están compuestos de tres segmentos individuales. Estos segmentos son el segmento espacial, el segmento de control y el segmento de receptor. El segmento espacial consiste en la constelación de satélites la cual es un conjunto de satélites puestos en órbita quienes son los encargados de emitir señales hacia la superficie terrestre, así como referencias de tiempo utilizando relojes atómicos. También existen estaciones terrestres que tienen la capacidad de restringir su utilización en ciertas regiones, así como controlar y administrar el funcionamiento del sistema por lo que se conoce como el segmento de control. Finalmente se encuentran receptores pasivos encargados de interpretar la señal emitida por los satélites, teniendo como principal función el cálculo de la distancia y dirección en la que se encuentra cada elemento de la constelación, permitiendo así la determinación de la posición exacta, conformando el segmento de usuario.

2.3.1. Sistemas GNSS Existentes

Los sistemas de navegación satelital han presentado ser herramientas de gran utilidad tanto para usuarios comerciales como para usuarios informales, estando presente en teléfonos celulares para aplicaciones que requieren poca precisión o hasta en medios de transporte

automatizados quienes se nutren casi en su totalidad de estos sistemas para obtener un correcto funcionamiento y la minimización de accidentes fatales. Por dicha razón, las dos grandes potencias mundiales implementaron los sistemas de mayor envergadura, el GPS de Estados Unidos y el GLONASS de la Unión Soviética. Ya que estos sistemas nacieron principalmente con fines militares, ambos gobiernos tienen control total sobre ellos teniendo la capacidad de bloquear o restringir el servicio para una región en específico, así como restringir la precisión en áreas de poco interés para dichas naciones. Por lo tanto, gobiernos o regiones se han visto en la necesidad de implementar sus propios sistemas de navegación satelital a escala regional con el fin de mantener el servicio funcional en caso de ser dado de baja o como apoyo a dichos sistemas permitiendo una mayor precisión utilizando las señales de dominio público. Los parámetros básicos de cada sistema se muestran en el cuadro a continuación.

Sistema	BeiDou	Galileo	GLONASS	GPS	NAVIC	QZSS
Propietario	China	Unión Europea	Rusia	Estados Unidos	India	Japón
Cobertura	Global	Global	Global	Global	Regional	Regional
Codificación	CDMA	CDMA	FDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Satélites	38 en órbita 11 a lanzar	30 en órbita 6 a lanzar	24 en órbita 2 en prueba	31 en órbita 10 en prueba	7 en órbita	4 en órbita 3 a lanzar
Frecuencias	1.5611 GHz (B1) 1.5897 GHz (B1-2) 1.20714 GHz (B2) 1.26852 GHz (B3)	1.57542 GHz (E1) 1.27875 GHz (E6) 1.191795 GHz (E5) 1.17645 GHz (E5a) 1.20714 GHz (E5b)	1.602 GHz (L1) 1.246 GHz (L2) 1.201 GHz (L3)	1.5754 GHz (L1) 1.2276 GHz (L2) 1.1764 GHz (L5)	1.11917 (L5) 2.49175 (S)	1.5754 GHz (L1) 1.2276 GHz (L2) 1.1176 GHz (L5) 1.2787 GHz (LEX)
Precisión Uso Público	10 metros	1 metro	2.8 metros	2.3 metros	10 metros	1 metro
Precisión Encriptado	0.1 metros	0.01 metros	0.6 metros	0.3 metros	0.1 metros	0.01 metros

Tabla 1. Comparación de los distintos Sistemas de Navegación por Satélite.

2.3.1.1. Sistema de Posicionamiento Global - NAVSTAR

El Sistema de Posicionamiento Global, también llamado por sus siglas como GPS, fue desplegado en 1978 por la milicia de Estados Unidos como una mejora a los sistemas de geolocalización existentes en su época siempre tomando como base la utilización de constelaciones satelitales en órbita. Una mejora importante a dichos sistemas radica en que el GPS es capaz de entregar información a nivel global teniendo casi una recepción de señal en más del 95% del planeta tierra con una precisión mayor y de uso libre.

Actualmente, es operado por la Fuerza Aérea Estadounidense. Este sistema provee geolocalización a receptores GPS en casi cualquier lado del mundo que tenga una línea de vista a cuatro o más satélites. Obstáculos tales como montañas o edificios bloquean la débil señal del GPS.

El GPS no requiere de la transmisión de datos de parte del usuario más que configuraciones puramente “estéticas” como es el sistema de coordenadas o fijar un número de satélites específico y opera independiente de la recepción telefónica o de internet, aunque estas tecnologías pueden incrementar la utilidad o precisión de las lecturas recibidas. El acceso al sistema es libre a cualquier receptor GPS con cierta precisión limitada, entregando señales de mayor precisión para fines militares.

2.3.1.2. GLONASS

En respuesta al GPS de Estados Unidos, el gobierno soviético desarrolló el GLONASS en 1976, finalizando en 1995. En esencia, la estructura de construcción es igual al GPS, con diferencias en el segmento de control, el segmento espacial y la estructura de la señal. Este sistema muestra ser una alternativa viable ya que es el segundo sistema de navegación con cobertura global y con una precisión comparable.

La mayoría de los receptores GPS incluyen también la capacidad de comunicación con satélites GLONASS ya que se tiene una mayor cantidad de señales a la vista, permitiendo obtener lecturas de forma más precisa, especialmente en zonas donde algunos satélites GPS son bloqueados por obstáculos. De igual forma, está mejor capacitado para su uso en latitudes más altas, es decir, más al norte o al sur.

2.3.1.3. GALILEO

GALILEO es el GNSS implementado por la Unión Europea a través de la Agencia Europea de GNSS (GSA), localizada en Praga, Republica Checa. Se tienen dos centros terrenos de operación, uno en Oberpfaffenhofen cerca de Múnich, Alemania y en Fucino, Italia. Entre los objetivos del proyecto se encuentra el proveer un sistema de posicionamiento independiente y de alta precisión para evitar la dependencia de los sistemas ya existentes, ya que pueden ser deshabilitados o inhabilitados para la región por los administradores. El uso básico de geolocalización es de libre uso, mientras que la alta precisión está disponible mediante pagos. Está previsto que la medición, tanto en vertical como horizontal, esté dentro del rango de un metro, resultando en mejor posicionamiento en altas latitudes.

La constelación satelital de GALILEO consiste en 30 satélites de Orbita Media. El primer satélite en ser lanzado fue el IOV PFM desde Guyana Francesa en 2011. Siendo el último lanzado en 2018 como respaldo. El sistema entró en operación básica en diciembre de 2016 y en operación completa a inicios del 2018. Actualmente el sistema presenta un satélite fuera de línea y tres como respaldo.

2.3.1.4. BeiDou

El Sistema de Navegación por Satélite BeiDou (BDS) es un sistema desarrollado por China. Consiste en tres constelaciones satelitales separadas. El primer sistema conocido como BeiDou-1, consiste en tres satélites los cuales han ofrecido servicios de navegación con cobertura limitada en la región continental de Asia Oriental desde el año 2000.

La segunda generación del sistema, llamado oficialmente BeiDou-2 o COMPASS, entró en operación en diciembre de 2011 con una constelación parcial de 10 satélites. Desde ese momento, se ofrecen servicios a la región de Asia y el Pacífico.

En 2015, China comenzó con la tercera generación del sistema BeiDou-3, con miras a una cobertura global. El primer satélite de esta generación se lanzó en marzo de 2015. Al 2018, nueve satélites se han lanzado. Se espera que se complete en 2020 con un total de 35 satélites en órbita conformados por las tres etapas. En pleno funcionamiento, el sistema proveerá una alternativa del GPS siendo mucho más preciso, alcanzando precisión en niveles milimétricos con lecturas de prueba.

2.3.1.5. NAVIC

El Sistema Regional Indio de Navegación Satelital, cuyo nombre operativo es NAVIC o navegante en hindú, es un sistema de navegación satelital autónomo que provee posicionamiento en tiempo real y servicios de tiempo. Cubre el país de India y una región de 1,500 alrededor de éste, con planes de extender dicha región. El sistema hasta el momento consiste en una constelación de siete satélites en órbita con dos adicionales en tierra como respaldo.

La constelación está en órbita y operando desde inicios del 2018, dando servicio en dos tipos, el posicionamiento estándar cuya utilización es con fines civiles y un servicio restringido

(encriptado) para usuarios autorizados, incluyendo fines militares. Existe un proyecto de expansión del sistema lanzando 4 satélites adicionales.

2.3.1.6. *QZSS*

El Sistema Satelital Quasi-Zenith es un proyecto desarrollado por la Secretaría Nacional del Espacio de Japón para el despliegue de un sistema de transferencia de tiempo regional y un sistema de aumento para el GPS, mejorando la geolocalización de éste en la región de Asia y Oceanía. El objetivo es proveer medidas precisas y estables en la región para uso tanto civil como militar. Se lanzaron cuatro satélites a inicios del 2018 en estado de prueba, los cuales posterior a las pruebas, brindarán servicio de forma oficial.

2.3.2. *Sistemas de Aumentación de GNSS*

Debido a que los sistemas GPS y GLONASS no se crearon para proveer parámetros estrictos de la navegación mediante instrumentos, se requieren sistemas adicionales para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

El aumento de un sistema global de navegación por satélite es un método de mejoramiento de los atributos del sistema tales como la exactitud, integridad, continuidad y disponibilidad, mediante el adiconamiento de información externa al proceso de cálculo. Dichos sistemas son nombrados dependiendo de la forma como el receptor GNSS recibe dicha información externa. Algunos sistemas transmiten análisis de fuente de error, mientras que otros proveen medidas directas del desvío de la señal, mientras que un tercer grupo brinda información para ser integrada en el cálculo.

Tres sistemas de aumento, el sistema basado en la aeronave (Aircraft Based Augmentation System – ABAS), el basado en tierra (Ground Based Augmentation System - GBAS), y el basado en satélites (Satellite Based Augmentation System – SBAS), se han diseñado y normalizado para superar las limitaciones inherentes a los GPS.

Para aplicaciones en tiempo real, las correcciones de los parámetros de cada satélite de las constelaciones GNSS existentes (GPS y GLONASS) deberán ser transmitidas a los usuarios a través de equipos de radio VHF (GBAS) o si se requiere una amplia cobertura a través de satélites geoestacionarios que emitan pseudocódigos con información de corrección (SBAS).

2.3.2.1. *ABAS*

El aumento se puede lograr mediante información adicional de sensores de navegación combinada con el cálculo de posición, o algoritmos internos que mejoren el desempeño de la navegación. Muchas veces, las aeronaves operan con sistemas separados al GNSS los cuales no necesariamente están sujetos a las mismas fuentes de error o interferencias. Un sistema como tal es llamado un ABAS o un sistema basado en la aeronave por la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO). La forma más extendida de uso es el Receptor con Supervisión Autónoma de la Integridad (RAIM), el cual usa señales GPS redundantes para asegurar la integridad de la posición y detectar señales erróneas.

2.3.2.2. *GBAS*

El Sistema de Aumentación Basado en Tierra (GBAS) provee una corrección diferencial de GPS (DGPS) y una verificación de integridad cerca del aeropuerto. Receptores de referencia en posiciones definidas miden las desviaciones del GPS y calculan correcciones, las cuales son emitidas en 2 Hz a través de una señal VHF en un rango de 43 km. Un GBAS puede soportar hasta 48 descensos y cubrir muchas vías de aterrizaje al mismo tiempo.

Dicho sistema no está diseñado para dar cobertura sobre regiones geográficas amplias, por lo que su uso principal radica en el control de tráfico aéreo en la etapa de aterrizaje.

2.3.2.3. *SBAS*

Un Sistema de Aumentación Basado en Satélites es un sistema de corrección de las señales GNSS recibidas por un usuario GPS. Estos soportan una región por medio del uso de satélites adicionales. Utilizando la medida de estaciones terrenas, mejoran el posicionamiento horizontal y vertical del receptor, además de dar información de la calidad de la señal. Los mensajes de corrección son elaborados y enviados a uno o más satélites para su transmisión a usuarios finales en forma de señales diferenciales. SBAS pueden ser considerados como sinónimos de DGPS de gran cobertura.

2.4. *ADS-B*

ADS-B (Automatic Dependant Surveillance- Broadcast o Sistema de Vigilancia Dependiente Automática) es un sistema en el cual los equipos electrónicos a bordo de una aeronave emiten automáticamente la ubicación exacta de la misma a través de un enlace de información digital. Los datos pueden ser utilizados por otras aeronaves y el control de tráfico aéreo para mostrar la posición de la aeronave y la altitud en las pantallas de visualización sin necesidad de un radar.

La utilización del sistema implica que la aeronave determine su posición utilizando el GPS. Un transmisor transmite dicha posición en intervalos rápidos, junto con la identidad, altitud, velocidad, entre otros datos. Estaciones terrenas dedicadas, reciben dichas transmisiones y la utilizan para el control de tráfico aéreo obteniendo un seguimiento exacto de la aeronave. El cambio de un sistema basado en radares a uno basado en satélites implica una mejoría en la precisión y la confiabilidad de la vigilancia.

Los datos de ADS-B se emiten cada medio segundo a 1090MHz. A su vez, la información transmitida puede incluir: identificación de vuelo, latitud/longitud, integridad o exactitud de la posición, altitudes barométricas y geométricas, variación vertical, velocidad, indicación de emergencia (en caso aplique) y una identificación de posición especial.

La capacidad de una estación terrena para recibir una señal depende de la altitud, distancia y obstáculos del terreno. El alcance máximo de cada estación puede exceder las 250 millas náuticas o 463 kilómetros. En el espacio aéreo inmediato alrededor de cada estación, la cobertura se extiende a la superficie cercana.

El sistema ADS-B permite a los pilotos compartir la información con los controladores aéreos y viceversa, permitiendo evitar el mal tiempo, así como recibir restricciones de vuelo. A su vez, al mejorar la precisión e integridad de las señales, permite reducir de forma segura la separación obligatoria entre aeronaves propiciando mayor capacidad de vuelos en determinadas áreas.

Depender de las señales satelitales en lugar de las ayudas a la navegación en tierra significa que las aeronaves vuelan más directamente del punto A al punto B, ahorrando tiempo y dinero mientras reducen la quema de combustible. También se reduce el riesgo de incursiones en la pista. Los pilotos y los controladores podrán ver la ubicación precisa de las aeronaves y los vehículos terrestres adecuadamente equipados que se mueven en el suelo, incluso durante la noche o durante las lluvias torrenciales.

2.5. Modelados de Ionósfera

2.5.1. Modelo IRI

El IRI o Referencia Internacional de la Ionosfera es un proyecto patrocinado por el Comité de Investigaciones Espaciales (COSPAR) y la Unión Internacional de Radio (URSI). Las

organizaciones mencionadas formaron un grupo de trabajo en la década de los sesenta para producir un modelo empírico de la ionósfera el cual se basa en todos los datos disponibles de diversas fuentes. Este modelo se actualiza anualmente mediante la “IRI Task Force” que son talleres especiales.

Los datos proporcionados de parte del IRI comprenden en lugar, fecha, hora, promedios mensuales de densidad electrónica, temperatura electrónica, temperatura de los iones y su composición en el rango de 50 km a 1000 km de altitud. Además, se incluyen los parámetros del Contenido Total de Electrones (TEC) pudiendo delimitar el área de análisis.

Entre las principales fuentes de datos están:

- a) **La red mundial de Ionosondas.** Las cuales se han explicado en los apartados anteriores. Estas proveen datos del TEC en distintas zonas específicas en intervalos de 15 minutos.
- b) **Los radares de dispersión incoherente.** Son radares que crean una dispersión incoherente en el plasma ionosférico al momento de su retorno. Se utilizan usualmente para medir los parámetros relacionados con los cambios modelo de distribución de los electrones y fluctuaciones en el plasma.
- c) **Las superestructuras ISIS/Aloutte.** Fue un sistema geocéntrico de satélites lanzado por la Agencia Espacial Canadiense y la Agencia Espacial Estadounidense de manera conjunta. Dichos satélites fueron funcionales por un periodo de dos décadas en las cuales se dedicaron a realizar mapeo por medio de imágenes de la tierra, análisis del comportamiento de la ionósfera y obtención de parámetros del plasma ionosférico.
- d) **Instrumentos en satélites.**

Desde sus inicios, se pensó en que en lugar de configurar el IRI como un conjunto de tablas era preferible el desarrollo de los ordenadores, presentarlo como un código, para un lugar y tiempo determinados. El modelo ofrece promedios mensuales de los perfiles de densidad y temperatura para los electrones que componen la ionósfera, considerando condiciones geomagnéticas favorables. La versión 2001 incorpora también subrutinas para simular condiciones de tormenta geomagnética.

El primer código se publicó en 1978 y estuvo bajo revisión durante una década. A partir de 1982 se han organizado reuniones anuales en las que se discute y se añaden mejoras al modelo. Esto permite al modelo estar sujeto a una continua discusión científica para añadir nuevos datos o hacer modificaciones.

En la versión IRI 2011, el perfil de densidad electrónica se construye a partir de 6 subregiones que modelan las capas D, E, F1 y F2, incluyendo la parte por encima del pico F2 para la que usa el modelo de Bent.

- a) **Para la parte superior al pico F2 (topside).** La parte superior se construye a partir de los datos del pico de la capa F2 (altura y concentración electrónica máxima) donde se emplea los coeficientes del Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones (CCIR), los del URSI o introducidos por el usuario. Se emplea la función del modelo de Bent, pero evita las discontinuidades al aplicar funciones analíticas en altitud, latitud, actividad solar y frecuencia crítica de F2 ($f_0 F_2$), lo que mejora la representación de la densidad electrónica.
- b) **Para la parte inferior al pico F2.** En esta región la densidad electrónica está en función de la altura donde se modela a partir del máximo de concentración en esta región, en la altura se producen dos parámetros de forma y grosor de la capa tabulada en función de la época del año, lugar y actividad solar.
- c) **Para la región F1.** Se emplea un modelo de ocurrencia de la capa F1 que depende del ángulo cenital solar. En función de este ángulo, de la localización y de la actividad solar, el modelo calcula la densidad electrónica del máximo de esta capa, si existe, y añade una capa parabólica a la región inferior al pico F2.
- d) **Región intermedia.** En esta región se produce el acoplamiento entre el perfil superior, normalizado al máximo de concentración electrónica de la capa F2, y la inferior, normalizada al pico de la capa E.
- e) **En el valle de la región E.** parte superior de la región E. Se obtiene el máximo electrónico de la capa E a partir de la actividad solar, la época del año, latitud geodésica y ángulo solar cenital. Esta región se describe con un polinomio de 5° grado cuyos coeficientes se calculan en función de la localización y hora del día. La capa E esporádica no está incluida en el IRI.
- f) **Parte inferior de la región E y región D.** Para esta región el IRI ofrece tres alternativas que describen la forma del perfil electrónico en función de la zona, época y hora del día.

El modelo IRI 2016 incluye nuevo código que permite asimilar medidas observadas en tiempo real. La asimilación de datos es la incorporación de información observada al modelo matemático, para así acercar el modelo a la realidad observada. Estas mejoras están permitiendo que el IRI evolucione desde un modelo de predicción climatológica (reproducción de las condiciones habituales de la ionósfera) hacia un modelo meteorológico (capaz de reproducir las condiciones actuales de la ionósfera terrestre).

● **Select Date and Time**

Year(1958-2019): 2019

Month: January Day(1-31): 01

Note: If date is outside the Ap index range (1958/02/14-2018/4/30), then STORM model will be turned off.

Time Universal Time (0. - 24.0 in decimal hours): 12

● **Select Coordinates**

Coord. Type Geographic Latitude(-90. - 90. deg.): -89.20 Longitude(0. - 360. deg.): 13.72

Height (km, from 60. to 2000.): 100.

● **Select profile type and range:**

Height [60. - 2000. km] Start 100. Stop 2000. Step size 50.

Submit Reset

Figura 7. Datos ingresados para obtener modelo IRI 2016

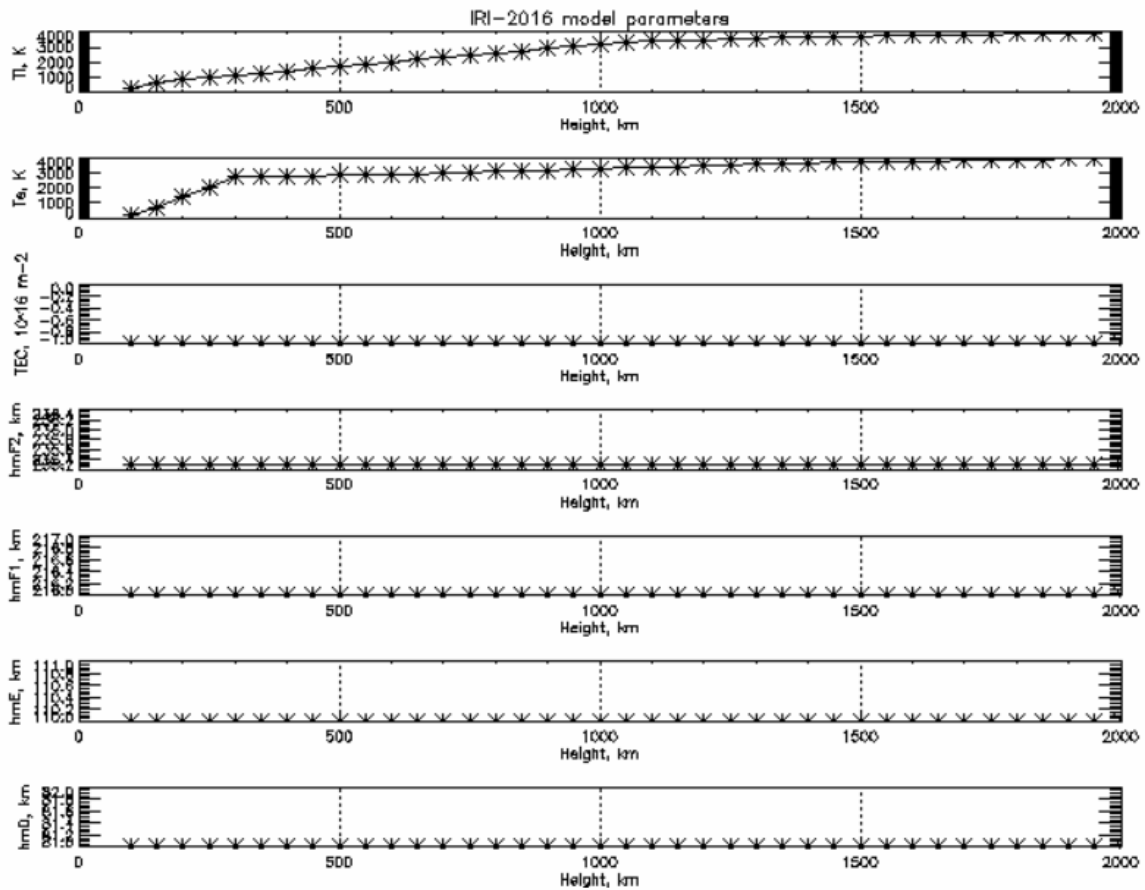


Figura 8. Resultados del modelado IRI para TEC y alturas críticas para alturas entre 0 y 2000 km.

2.5.2. Modelo NeQuick

El modelo NeQuick es el modelo ionosférico propuesto para ser utilizado por los

usuarios de una sola frecuencia del Sistema Global de Navegación por Satélite europeo "Galileo", con el fin de calcular las correcciones ionosféricas. El modelo NeQuick ha sido desarrollado en el Centro Internacional de Física Teórica (ICTP) en Trieste y en la Universidad de Graz y ha sido adoptado por las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R) como un modelo adecuado para calcular el Contenido Total de Electrones.

Es un modelo tridimensional de densidad de electrones de la ionósfera y dependiente del tiempo, que proporciona la densidad de electrones en la ionósfera como una función de la posición y el tiempo. El nivel de actividad solar es introducido por el número de manchas solares o por el flujo de radiación solar con una longitud de onda de 10.7 cm. Los parámetros de entrada del modelo son la posición (longitud, latitud y altura), la época (mes y UT) y la actividad solar y otros parámetros internos como los f_0F_2 , valores, que pueden definirse de acuerdo con la UIT-R, entre otras opciones, dependiendo del propósito. En base a esto, permite calcular los retrasos ionosféricos (TEC), a lo largo de cualquier trayectoria de rayo ya que la densidad electrónica es integrada en el rayo.

Debido a que el modelo NeQuick está desarrollado dentro de los receptores Galileo de una sola frecuencia el parámetro más sobresaliente incluido en el sistema es el Nivel Eficaz de Ionización A_z (en sustitución del flujo solar), que es una función de la ubicación del receptor. El parámetro A_z se calcula usando los datos del TEC desde estaciones GNSS, distribuidas por todo el mundo. Los coeficientes se transmiten a los usuarios en el mensaje de navegación Galileo y se actualizan cada 24 horas.

El algoritmo para un receptor de una frecuencia dado del sistema Galileo consiste en los siguientes pasos según Arbesser-Rastburg:

1. A_z es evaluada aplicando a_0 , a_1 , a_2 (obtenidos del mensaje de navegación) y el Nivel Eficaz de Ionización obtenido del modelo NeQuick.
2. La densidad de electrones es calculada para un punto en el camino entre el satélite y el receptor.
3. Se repiten los pasos 1 y 2 para muchos puntos discretos a lo largo del camino de la comunicación. El número y espaciamiento de los puntos dependen de la altura y serán un punto de balance entre el error y la potencia de computación.
4. Todos los valores de densidad de electrones son integrados para obtener el Contenido Total de Electrones de la pendiente.
5. El Contenido Total de Electrones de la pendiente, dado en unidades de TEC, es convertida a metros de retraso en L1 para corrección del error aplicando la ecuación con f en Hz

$$I_f = \frac{40.3 \times 10^6}{f^2} TEC$$

Es de notar que las correcciones ionosféricas calculadas por el modelo NeQuick puede ser utilizado en cualquier señal de GNSS colocando la frecuencia correspondiente en la ecuación anterior.

NeQuick 2 Web Model

Computation and plotting of slant electron density profile and total electron content

Endpoints Coordinates

Lower endpoint: Latitude °N Longitude °E Height km

Higher endpoint: Latitude °N Longitude °E Height km

Satellite data: Azimuth °N Elevation ° Height km

Date and Time

Year(YYYY) Month Day(DD) Time

Solar Activity

R12 (source: NOAA-NGDC)
 Daily Solar Radio Flux (source: NOAA-NGDC)
 User Input Solar index type Value *

ITU-R compliant *

*For R12: [0 to 150]; for F10.7: [63 to 193] F.U.

Warning! Not respecting the limits could lead to undefined electron density values! (ITU-R P.1239 recommendation)

Figura 9. Datos ingresados para modelado web de NeQuick 2.

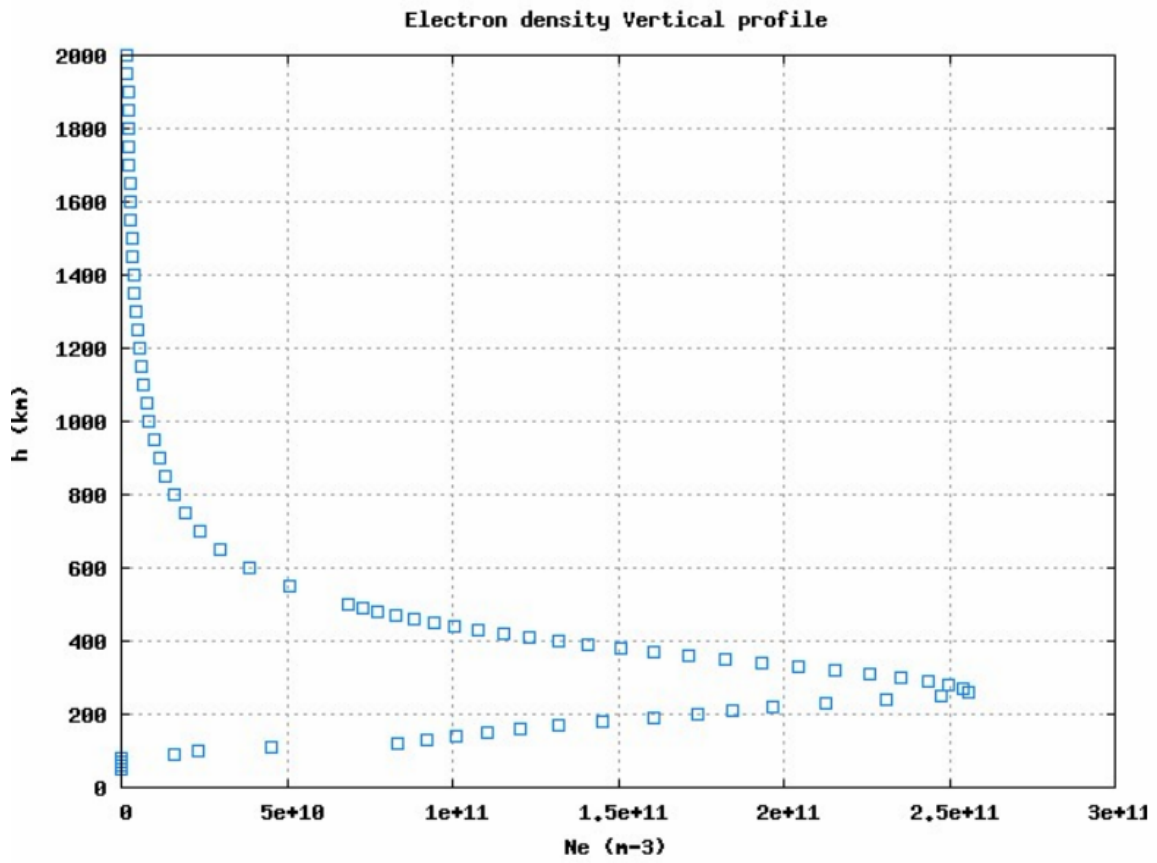


Figura 10. Perfil de densidad de electrones obtenido mediante NeQuick 2.

3. Caracterización del Error y Métodos de Sondeo

3.1. Servicios con Poca Afectación Ionosférica

La atmósfera terrestre presenta efectos variados sobre la propagación de ondas de radio. Dicho efecto varía conforme la frecuencia aumenta hasta ser prácticamente imperceptible en frecuencias arriba de los 4 GHz, pues dichas ondas atraviesan completamente la atmósfera terrestre y se desplazan hacia el espacio exterior.

De forma inversa, las ondas con una longitud mayor, como es el caso de la propagación en AM, no tienen la capacidad de escapar de la troposfera. Este comportamiento es debido a que el medio se aprecia principalmente reflectivo con cierto porcentaje de absorción de la señal dependiendo de la densidad de ionización de la ionósfera.

Cabe mencionar que durante el día la absorción de la ionósfera es mayor para esta banda, lo que nos indica claramente que no es tan factible su utilización en el día. Por otro lado, en la noche la propagación por las ondas de cielo (skywave) a través de la capa D de la ionósfera, es posible utilizando la banda de MF (comprendida entre 300 kHz y 3 MHz). La interferencia puede ser constructiva o destructiva dependiendo de la fase de las ondas incidentes y las variaciones en el tiempo debidas a la altura de la capa D.

3.2. Efectos Ionosféricos sobre Señales GNSS

En un sistema de comunicaciones satelitales, la señal siempre atraviesa la ionósfera, la cual afecta la señal de diferentes formas debido a sus características. La ionósfera es un medio dispersivo que produce un índice de refracción distinto, en el período que tarda en atravesar esta capa, dependiendo a su vez, de la frecuencia de la señal. Por lo tanto, una señal que pasa por la ionósfera sufre una distorsión provocada por el desfase de sus componentes espectrales. Esto da como resultado que la velocidad de grupo y velocidad de fase se vean involucradas con el índice de refracción, generando un retardo en la señal.

Según el medio, las velocidades de propagación de una onda sinusoidal y un conjunto de ondas son diferentes. La velocidad de propagación de una onda sinusoidal es la tasa a la cual la fase de la misma señal se propaga en el espacio con una longitud de onda uniforme, mientras que, en el caso de un conjunto de ondas, la velocidad de grupo se define por la velocidad angular de la onda definida por ω y del vector k .

$$v_{ph} = \frac{\omega}{k}$$

Se puede diferenciar que la velocidad de fase no es igual a la velocidad de grupo. La velocidad de grupo de una onda es la tasa a la cual viaja la energía almacenada en la onda, es decir las variaciones en la forma de la amplitud de onda (también llamada modulación o envolvente) conforme se propaga en el espacio. La velocidad de grupo está definida por la siguiente ecuación.

$$v_{gr} = \frac{d\omega}{dk}$$

Estas ecuaciones sirven para describir el efecto de retardo producido por la ionósfera. La característica de la propagación de una onda electromagnética en el espacio se define por su frecuencia y longitud de onda. La ionósfera produce un plasma ionizante de electrones libres que actúan como un medio dispersivo para señales GNSS, donde la ubicación particular de la ionósfera en la Tierra se encuentra iluminada por el Sol de forma alterna y, en consecuencia, la exposición es una variación diaria en el que la ionización suele ser máxima a las 2 la tarde y mínima un par de horas después de medianoche. Otras variaciones en la ionósfera son el resultado de cambios en la actividad solar.

El principal efecto de la ionósfera en las señales GNSS es cambiar la velocidad de propagación de la señal, en comparación con el espacio libre. La modulación de la señal (el código y el flujo de datos) se retrasa, mientras que la fase de la portadora se adelanta por la misma cantidad. El retardo o la diferencia entre la señal recibida por el satélite y la señal obtenida por el receptor, puede ser de código o de fase.

La magnitud del error es directamente proporcional al Contenido Total de Electrones (TEC). El TEC varía por la no homogeneidad espacial de la ionósfera. Estas variaciones temporales son causadas no sólo por la dinámica de la ionósfera, sino también por los rápidos cambios en la trayectoria de propagación debido al movimiento del satélite. Igualmente se tienen diferentes retardos debido a los fenómenos naturales del día y la noche. El retardo de la señal de un satélite con respecto al receptor es considerablemente menor en la noche que en el día (entre un metro por la noche y de cinco a 15 metros durante el día). A su vez, en los ángulos de baja altitud, la trayectoria de propagación a través de la ionósfera es mucho más larga, por lo que los retrasos típicos correspondientes pueden aumentar varios metros por la noche y tanto como 50 m durante el día.

3.2.1. Caracterización de Variaciones

Las señales GNSS atraviesan la atmósfera y sus capas, entre ellas plasmósfera, ionósfera y troposfera, donde los principales efectos ionosféricos en las señales de radio en banda L dependen del TEC en la ionósfera.

El retardo ionosférico puede compensarse utilizando frecuencias GNSS dobles. Dado que los efectos dependen de la frecuencia, el uso de dos frecuencias permite que los receptores GNSS detecten y calculen estos retardos ionosféricos. El avance de fase y el retardo de grupo son iguales en tamaño, pero diferentes en el proceso de muestreo. En términos prácticos, el contenido de grupo se hace más largo y mientras que el de fase se hace más corto.

Algunos efectos provocados por la ionósfera en una señal de radio son: el retardo en la señal, centelleo en fase y de amplitud, dispersión, refracción y absorción.

3.2.1.1. Retardo en la Señal

Las señales GNSS se retardan en tiempos variables dependiendo de la densidad de las partículas ionizadas en la ionósfera. En general los cambios solares aumentan la variación espacial y temporal del Contenido Total de Electrones. Esto genera un retardo tanto en fase como en código afectando negativamente las lecturas del GNSS. Un retardo en código resulta en mayor distancia en la medición mientras que el retardo en fase da como resultado menor distancia medida. Este problema se acentúa más debido a que los retardos ocurren con signo contrario, es decir, al generar la ionósfera un retardo en código genera a su vez un retardo negativo en fase, aumentando el error de medición de la distancia provocado por ambos retardos. La magnitud del retardo puede calcularse del siguiente modo:

$$t = 1,345 * \frac{N_T}{f^2} * 10^{-7}$$

donde:

t: tiempo de retardo (s) con respecto a la propagación en el vacío

f: frecuencia de propagación (Hz)

N_T : se determina a lo largo del trayecto de propagación oblicuo

En una banda de frecuencias cercanas a 1,600 MHz, el retardo de la señal varía entre 0.5 y 500 ns para aproximadamente una unidad de TEC (1016 el/m²).

3.2.1.2. *Centelleo en Fase y Amplitud*

El centelleo son fluctuaciones rápidas de amplitud y fase, las cuales siendo lo suficientemente fuertes, pueden dar como resultado la pérdida temporal de una o más señales de satélite. Este fenómeno no afecta simultáneamente áreas amplias de la ionósfera, sino que ocurre en partes limitadas, afectando así solamente a unos pocos satélites a la vista de un usuario.

Las pérdidas de seguimiento de la señal debidas al centelleo son de corta duración, pero pueden ocurrir reiteradamente durante varias horas. Esas pérdidas son capaces de causar que el servicio GNSS se degrade o se pierda temporalmente. Un medio de mitigación es la capacidad del receptor de volver a adquirir rápidamente una señal del satélite después de un centelleo, ya que este afecta todas las frecuencias del GNSS de manera que los receptores de multifrecuencia no proporcionan una protección mayor.

Otra forma de mitigación es el uso de múltiples constelaciones. Si el receptor es capaz de realizar el seguimiento de más satélites la probabilidad de interrupción de servicio se reduce considerablemente, debido a que se dispone de más conexiones las cuales no se verían afectadas.

El centelleo es virtualmente inexistente en las latitudes medias, excepto a niveles de bajo a moderado. El fenómeno es común en las regiones ecuatoriales, donde ocurre normalmente después de la puesta de Sol y antes de la medianoche local. A su vez, ocurre con frecuencia de forma moderada en las regiones de latitudes elevadas.

3.2.1.3. *Dispersión*

La dispersión es el fenómeno de separación de las ondas de distinta frecuencia al atravesar un material, en este caso la ionósfera, y las distintas frecuencias. En esta, ocurre el retardo en la propagación de la señal que está en función de la frecuencia. Los retardos a través del ancho de banda son proporcionales a la densidad de electrones a lo largo del trayecto del rayo. Por lo tanto, para un contenido de electrones de 5×10^{17} el/ m^2 , una señal con una longitud de pulso de 1 microsegundo mantiene un retardo diferencial de 0,02 ms a 200 MHz, mientras que en 600 MHz el retraso sería sólo de 0,00074 ms.

3.2.1.4. *Refracción*

La refracción electromagnética es el cambio de dirección de una onda al incidir de forma oblicua en otro medio. La velocidad de propagación es inversamente proporcional a la

densidad del medio en el que se desplaza, por lo tanto, existe un cambio de velocidad siempre que una onda pase de un medio a otro con distinta densidad.

En el caso cuando las ondas de radio se propagan de forma oblicua a través de la capa de la ionósfera se someten a la refracción. Dependiendo de la densidad de electrones en la ionósfera, así será la variación del índice de refracción entre ambos medios para determinadas frecuencias. Este comportamiento define la variabilidad de la ionósfera para reflejar señales en ciertas frecuencias, pudiendo incluso afectar frecuencias de longitud de ondas menores periodos de alta actividad solar.

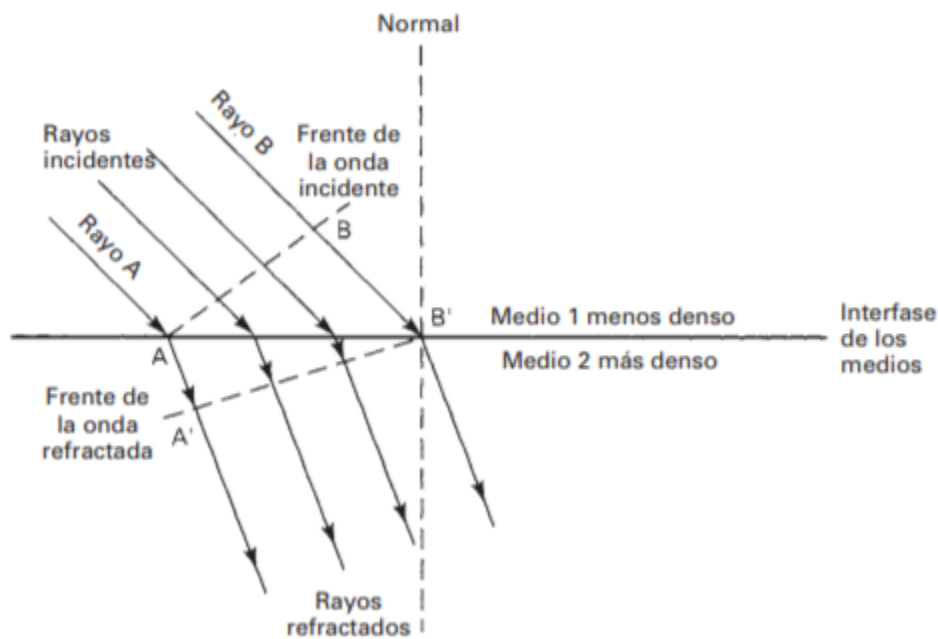


Figura 11. Refracción de una onda con relación al ángulo de incidencia.

3.2.1.5. Absorción

Cuando una onda se propaga a través de un medio que no es vacío, puede existir transferencia de energía de la onda a los átomos y moléculas atmosféricas. La absorción de onda por la atmósfera es análoga a una pérdida de potencia, provocando que la energía se disipe en el medio. La atenuación debido a la absorción no depende de la distancia a la fuente de radiación, sino a la distancia total que la onda se propaga a través del medio.

Para las regiones ecuatoriales y de latitudes medias, las ondas de radio con frecuencias superiores a 70 MHz aseguran la penetración de la ionósfera sin absorción significativa,

mientras que para las frecuencias inferiores a 70 MHz es significativa la pérdida por la absorción ionosférica. Dicha absorción está ligada a la cantidad de electrones libres en la ionósfera, En frecuencias más bajas se tiene una mayor distancia recorrida por el frente de onda (mayor longitud de onda) lo cual provee mayor cantidad de colisiones entre electrones, provocando perdidas de energía en el frente de onda hasta llegar a su atenuación máxima entregando toda su energía a las partículas en la ionósfera.

3.2.1.6. Rotación de Faraday

La rotación de Faraday consiste en una rotación del plano de polarización al momento que una onda atraviesa un material con un fuerte campo magnético, por lo que, en el caso de la ionósfera, es proporcional al contenido electrónico de esta. El efecto está dado por:

$$\Omega = 2.36 \cdot 10^4 \cdot f^2 \cdot (B \cos \theta \sec \chi) \cdot TEC$$

donde Ω está en radianes,

f es la frecuencia de la señal en Hz,

$(B \cos \theta \sec \chi)$ es un valor efectivo sobre el camino de la señal

B la intensidad del campo magnético

θ el ángulo que forma la dirección del campo magnético con la dirección de la señal

χ es el ángulo cenital de la señal

TEC está en m^{-2}

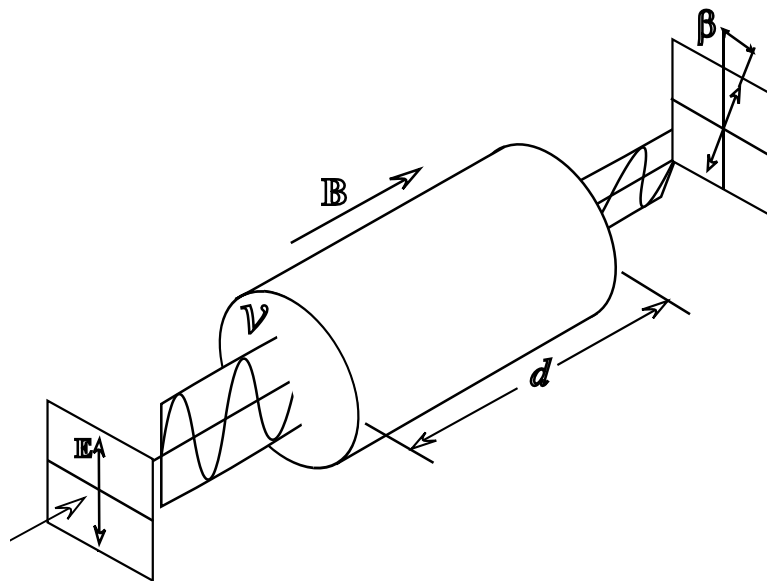


Figura 12. Rotación de Faraday en una onda electromagnética.

La rotación de Faraday tiene un efecto sobre el ancho de banda de las señales afectando de forma significativa el desempeño del sistema de comunicación. Debido al comportamiento variante de la ionósfera, se han realizado estudios de la relación de la alta actividad solar con la rotación de la polarización. Según el estudio realizado en Tucumán por Ezquer y Adler (1989) se determinó que:

- la variabilidad diaria del contenido electrónico
- la presencia de una variación semi-anual (máximos equinociales)
- diferentes comportamientos durante tormentas geomagnéticas, mostrando tanto incrementos como disminuciones
- la presencia ocasional de un máximo secundario
- la ausencia de la anomalía en invierno
- la influencia de la anomalía ecuatorial

3.3. Actualidad en el Estudio del Error Ionosférico

A continuación, se presentan estudios que profundizan sobre el error ionosférico enfocado en una región específica con el fin de recalcar la importancia de realizar un estudio del error ionosférico en la región. Sin considerar la profundidad de análisis, ambos estudios muestran un interés en el análisis del error ionosférico con el fin de lograr correcciones a las mediciones en sus respectivos países, logrando así, una mayor precisión en datos de posicionamiento utilizados por distintos entes tanto públicos como privados los cuales buscan utilizar las señales GNSS como fuente confiable de ubicación.

En el caso del primer estudio, muestra una investigación exhaustiva del tema a tratar en el presente trabajo, brindando análisis matemático, caracterización del error y técnicas avanzadas de mitigación del error. El segundo estudio, a su vez profundiza en el retardo de la señal obtenida de los sistemas GNSS provocada por efectos ionosféricos, siendo el estudio con mayores resultados aplicables debido a la zona en que se efectuaron las mediciones.

El primero de estos, realizado en Madrid, presenta una caracterización detallada del error ionosférico, así como propuestas de corrección de este error utilizando diversos métodos basado en su totalidad, en la relación del código recibido al estado de la red de satélites visibles en dicho momento.

El segundo, realizando en México, presenta un sistema de corrección de errores de retardo en señales GNSS. En él, se detalla la obtención del Contenido Total de Electrones a partir del pseudo-rango y la frecuencia de la señal recibida. Asimismo, muestra una alternativa de cálculo de la posición exacta de la constelación de satélites, obteniendo así, mediante el uso del TEC, el retardo en la señal.

3.3.1. Análisis y Mitigación del error ionosférico en los Sistemas Globales de Navegación por Satélite con receptores de una frecuencia

Este trabajo consiste en una tesis doctoral elaborada en la Universidad Complutense de Madrid (Elsa M. Harris, 2005).

El objetivo de la tesis es analizar el efecto de la ionósfera en la determinación de la posición de un receptor de una sola frecuencia (utilizado por GALILEO dada su localización en la Unión Europea). Se centra en la evaluación del posicionamiento aislado, así como sobre el vector diferencial, es decir, no se limita a la distancia lineal entre el receptor y el satélite sino al posicionamiento sobre un sistema de coordenadas.

De igual forma pretende evaluar métodos para mitigar este efecto. Se muestran diversas estrategias para reducir el impacto de la fuente de error sobre ambos tipos de posicionamiento. Para el caso de la posición absoluta, se muestra el resultado de la corrección empleando correcciones diferenciales. Asimismo, se muestra una técnica que permite realizar las mismas correcciones con la única restricción de conocer los satélites visibles en el momento. También, para reducir el efecto sobre posicionamiento diferencial, se muestra una técnica empleando múltiples estaciones de referencia con posibilidad de emplearla en tiempo real.

3.3.1.1. Modelo Matemático para el posicionamiento puntual

La ecuación del pseudo-rango medido sobre la frecuencia para este caso corresponde a:

$$C1_i^k = \rho_i^k + c(dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)) + c\delta t_{rel} + \delta\rho_{trop} + \delta\rho_{ion} + \epsilon_i^k$$

Donde C1 corresponde a la medición del pseudo-rango para cada uno de los satélites k.

ρ_i es la distancia geométrica entre el satélite y el receptor.

C es la velocidad de la luz.

dt_i corresponde al error del reloj en el receptor.

dt_k al error en el satélite al momento de emisión de la señal.

p_{trop} corresponde al retardo de propagación en la troposfera.

p_{ion} corresponde al retardo de propagación en la ionósfera.

ϵ_i^k Representa errores no modelados para este caso incluyendo el ruido de la propia medición.

Debido a que la ecuación presenta una gran cantidad de incógnitas, se procede a linealizarlo, simplificando los términos ρ_i , dt_k , p_{trop} , p_{ion} . Pero debido a que aún se presenta como un sistema de ecuaciones de $m + 4$ incógnitas, no se puede resolver por lo que se consideran los errores relacionados con ϵ_i^k (relacionado con m incógnitas) despreciables, obteniendo la ecuación:

$$\Delta C1_i^k = -\vec{u}_i^k \Delta \vec{r}_i + c\Delta dt_i$$

Este sistema presenta finalmente m ecuaciones con 4 incógnitas por lo que se requieren al menos 4 satélites a vista para resolver el sistema. Se selecciona un punto aleatorio cercano al receptor y se itera hasta converger.

Finalmente, teniendo que:

$$\vec{l} = \begin{pmatrix} \Delta C1_i^1 \\ \Delta C1_i^2 \\ \vdots \\ \Delta C1_i^m \end{pmatrix} \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\vec{u}_i^1 & 1 \\ -\vec{u}_i^2 & 1 \\ \vdots & 1 \\ -\vec{u}_i^m & 1 \end{pmatrix} \quad \vec{p} = \begin{pmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \\ c\Delta dt_i \end{pmatrix}$$

Se hace uso de la siguiente ecuación para obtener la resolución del sistema.

$$\vec{p} = \mathbf{A}^{-1} \vec{l} \quad \text{donde } m = 4$$

El sistema se puede extrapolar para el caso de una señal GPS donde se reciben dos frecuencias portadoras.

$$\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (P2 - P1) = -c \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(d_1^k - d_2^k) + (d_{1i} - d_{2i})] + \frac{\alpha}{f_1^2} STEC_i^k + \epsilon_{i,comb}^k$$

Donde:

d1 y d2 corresponden a los retardos en código.

STECi corresponde a los errores ionosféricos de cada una de las señales.

3.3.1.2. Conclusiones y Recomendaciones del Estudio

Al final el estudio, tomando en cuenta el modelo presentado y las pruebas de campo realizadas, se obtiene que:

- Se ha observado que la mayor repercusión de este error se obtiene en las componentes de altura y de error de reloj del receptor.
- Se ha mostrado que la componente temporal depende del error ionosférico a bajas elevaciones
- Que las componentes horizontales se pueden estimar a partir de los gradientes horizontales evaluados
- Se recomienda emplear la técnica de receptores diferenciales para minimizar de manera óptima el error ionosférico.
- Al aumentar la distancia entre estaciones, el error tiende a disminuir.
- El error es mayor para L2 que para L1.

3.3.2. Estimación del Error de la Posición GPS por Efectos Ionosféricos

Este trabajo consiste en una tesis doctoral elaborada en Instituto Politécnico Nacional en México D.F. (Honorine Kenguruka, 2014).

El estudio tiene como objetivo realizar estudios para evaluar el error en el cálculo de posición debido al efecto de retardo ionosférico de señales GPS. Este objetivo se logra estimando el Contenido Total de Electrones utilizando un banco de datos de mediciones espaciadas entre sí. De igual forma, se modela el retardo ionosférico tomando como base el TEC calculado en las estaciones de referencia. Finalmente, se calcula el error de la posición de lectura de GPS.

3.3.2.1. Retardo Ionosférico

La influencia de la ionósfera en la propagación de señales de radiofrecuencia se caracteriza principalmente por la dispersión, presentando la siguiente ecuación como descripción de fases del código:

$$n = 1 \pm \frac{c_2}{f^2} \pm \frac{c_3}{f^3} \pm \frac{c_4}{f^4} \pm \dots$$

Teniendo los coeficientes c , independientes de la frecuencia de la portadora, pero dependientes de la densidad de electrones. Debido a que el primer término de la serie es aproximadamente tres órdenes de magnitud mayor a los siguientes, se desprecian y relacionando n con el efecto ionosférico se obtiene:

$$I_{iono} = \pm 40.3 \frac{TEC}{f^2}$$

Dicha ecuación permite realizar una corrección de la refracción ionosférica evaluada sobre una frecuencia portadora de mensaje GPS. Sin embargo, se pueden describir mejores resultados usando dos frecuencias diferentes y aplicando modelos ionosféricos de corrección.

3.3.2.2. *Posicionamiento de Punto Simple*

Se refiere a posicionamiento de punto simple o SSP al caso en el que el receptor calcula automáticamente sus propias coordenadas en base a las mediciones enviadas por los satélites visibles. Es decir, sin aplicar ningún tipo de corrección externa.

Para la aplicación del modelo de solución, requiere de un mínimo de 4 satélites visibles en todo momento debido a que se toma en consideración los cambios en la ionósfera, así como los cambios en las condiciones ambientales. Por lo tanto, a pesar de que el receptor se encuentra estático, se considera como un punto móvil desde la referencia de la medición satelital.

3.3.2.3. *Determinación del TEC*

La obtención del TEC se basa en la ecuación de observación del pseudo-rango del GPS. Se resta $P_1 - P_2$, para obtener la ecuación:

$$TEC = \frac{f_1^2 f_2^2 (P_1 - P_2)}{40.3 (f_2^2 - f_1^2)}$$

Donde P y f representan el pseudo-rango y la frecuencia respectivamente.

Al tomar en consideración el error en el hardware (tanto satélites como receptores GPS), se redefine la ecuación:

$$TEC = \frac{f_1^2 f_2^2 (P_1 - P_2 - k_{rx} - k_{sv})}{40.3 (f_2^2 - f_1^2)}$$

Donde k_{rx} y k_{sv} son los errores entre frecuencias del receptor y el satélite. Estos datos usualmente se obtienen en el orden de los nanosegundos.

Siendo que, para el GPS, f_1 y f_2 son conocidas, se sustituyen en la ecuación. El TEC indica un ruido considerable causado por errores instrumentales al presentar frecuencias de transmisión no sincronizadas.

La ecuación empleada para el cálculo del TEC haciendo uso del pseudo-rango de doble frecuencia bajo la señal GPS es:

$$TEC = -9.52 (P_1 - P - k_{rx} - k_{sv})$$

3.3.2.4. Posicionamiento Basado en Código

El principio del método consiste en resolver la medición de la distancia de los satélites mediante análisis geométrico utilizando una posición de coordenadas ya conocidas. Se determina el vector r y el delta de tiempo del reloj en el receptor a partir de la pseudodistancias recibidas de un mínimo de 4 satélites. Estos datos se reciben a través del mensaje de navegación enviado por el satélite GPS.

A partir del mensaje de la pseudodistancias entre satélite y receptor se plantea un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas (x , y , z , dt).

$$P^j + c\delta t^j - \delta^j \simeq \sqrt{(x - x^j)^2 + (y - y^j)^2 + (z - z^j)^2} + c\delta t \quad \text{con } j=1,2,\dots,n \text{ (} n \geq 4 \text{)}$$

Donde δ^j representa las desviaciones de multitrayectoria y ruido en el medio.

Al ser un sistema no lineal, se resuelve linealizando la distancia geométrica p alrededor de un punto de referencia correspondiente a una posición aproximada al receptor.

$$P^j = \rho_0^j + \frac{x_0 - x^j}{\rho_0^j} dx + \frac{y_0 - y^j}{\rho_0^j} dy + \frac{z_0 - z^j}{\rho_0^j} dz + c(\delta t - \delta t^j) + \delta^j \quad \text{con } j = 1, 2, \dots, n \text{ (} n \geq 4 \text{)}$$

Debido al comportamiento de la red GPS, se obtendrán sistemas con $n > 4$, es decir con mayor número de ecuaciones en relación con la cantidad de incógnitas, por lo que la técnica de resolución del sistema es iterativa. Cabe resaltar que el delta de distancia entre la posición real del receptor y la posición aproximada de este se irá reduciendo a medida que se apliquen iteraciones sucesivas.

El sistema de ecuaciones se puede expresar de forma simplificada como $Y=AX$,

donde Y representa un vector ($n \times 1$) el cual contiene los valores de diferencia entre los pseudo-rangos medidos y los predichos según el TEC.

A su vez, A consiste en una matriz ($n \times 4$) conteniendo los rangos geométricos del satélite y receptor.

Finalmente, X representa un vector (4×1) que contiene el valor verdadero del diferencial de distancia dado para el sistema de coordenadas entregando valores con pocos centímetros de error.

3.3.2.5. *Método de ajuste de Mínimos Cuadrados*

Añadiendo al modelo la consideración de errores, se puede obtener una mejor aproximación de la posición verdadera del receptor. Este cálculo de errores se realiza mediante el método de mínimos cuadrados.

$$Y = A X + \varepsilon$$

El término de error se calcula generalmente por métodos estadísticos por medio de los valores de media y de la matriz de covarianza. Debido a que se incluye el error, se puede presentar el caso donde no existe una solución exacta que cumpla con el sistema, por lo que se define un vector para minimizar la discrepancia. Siendo en este caso, la ecuación que define el ajuste de mínimos cuadrados:

$$\min \|Y - \hat{Y}\|^2 = \min[\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2]$$

Dado que este modelo presenta todas las mediciones de la misma manera, se generan mediciones erróneas. Esto se debe a que mientras el ángulo de elevación es menor, las mediciones sufren mayor error debido a la multitrayectoria. Con el fin de mejorar la calidad de la medición, se agrega una matriz de pesos.

Finalmente, se hace uso un software de computadora llamado gLab el cual permite realizar posicionamientos de alta precisión, para manipular lecturas y calcular la posición SPP. A continuación, se muestra el diagrama de bloques del cálculo del error en la posición SPP de un receptor GPS.

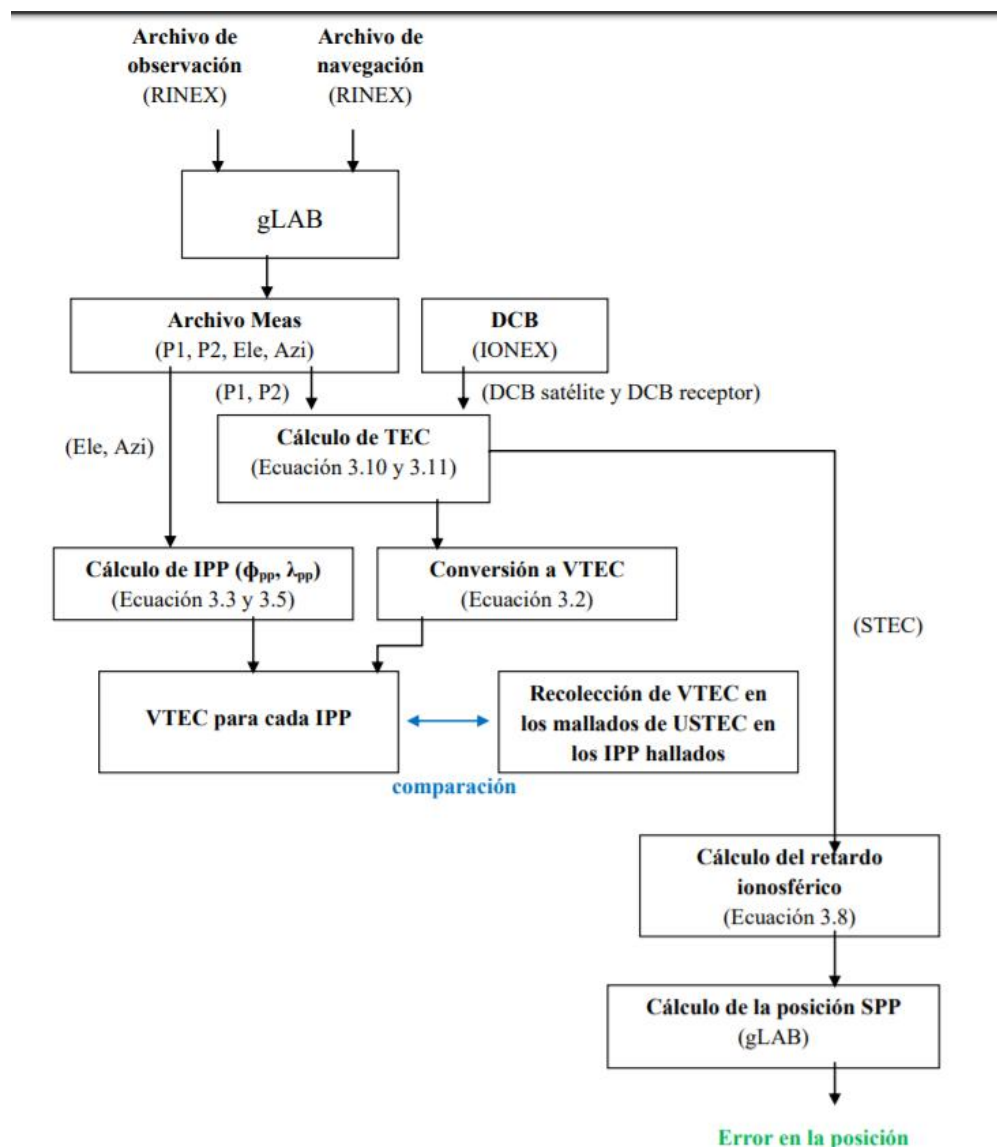


Figura 13. Diagrama de bloques del análisis del error (Honorine Kenguruka, 2014)

3.3.2.6. Conclusiones y Recomendaciones del Estudio

Como resultados generales del estudio se muestran:

- El TEC obtenido se considera aceptable al compararse con valores obtenidos mediante modelados de la ionósfera provisto por el USTEC de estados unidos, presentado una mejor de hasta el 98% del error medio al realizar las correcciones.
- Se demuestra que los errores inter-frecuenciales contribuyen de manera principal a la estimación del TEC.
- Se muestre una alternativa de corrección del retardo en la señal provocado por el error ionosférico para una medición SPP. Esto presenta una mejoría en la exactitud de la posición obtenida mediante el sistema GPS.

Por lo que, en base a los resultados, se puede aplicar el método propuesto en el estudio, siendo éste los cimientos para un modelado y estudio del error ionosférico y cálculo del Contenido Total de Electrones para otros países aledaños a México como tal es el caso de El Salvador.

3.4. Métodos de Sondeo Ionosférico

El sondeo remoto de la ionósfera recurre a un amplio espectro de frecuencias, desde las ondas de radio VLF hasta la luz ultravioleta. Existen cuatro técnicas importantes para el sondeo de la ionósfera desde la superficie terrestre reflexión parcial, ionosondas, radares coherentes y radares incoherentes. Cada técnica tiene sus propios objetivos y está basada en distintos mecanismos de reflexión.

TÉCNICA	FRECUENCIA (MHZ)
REFLEXIÓN PARCIAL	2 a 6
IONOSONDA	0.1 a 30
RADAR COHERENTE	50 a 100
RADAR INCOHERENTE	50 a 500

Tabla 2. Rangos de frecuencia para las técnicas de sondeo ionosférico.

3.4.1. Reflexión Parcial

La medición de reflexión parcial de ondas de radio por la ionosfera inferior ha sido empleada como una técnica para el estudio de cambios en la ionización de la capa D. Esta técnica se basa en la comparación de ecos ordinarios y extraordinarios que retornan de la región mencionada. Se mide experimentalmente la relación entre la amplitud ordinaria y la extraordinaria en función de la altura.

Teóricamente se asume que la reflexión ocurre debido a irregularidades de ionización, brindando así, una medida de la frecuencia de colisiones de electrones en un rango de altura donde la absorción es despreciable, entiéndase 50 a 60 km durante el día. En base a esto, la

relación de amplitud es una medida de la densidad de electrones en la región de la atmósfera donde la absorción diferencial ocurre (70 a 90 km).

De igual forma, se puede hacer uso de instrumentos con capacidad de medición de fase para realizar una medición de diferencias de fase. Utilizando dos o más frecuencias y grandes arreglos de antenas, se puede calcular la densidad de electrones en los rangos de altura de 50 a 90 km durante el día y 40 a 80 km en momentos de extremadamente alta ionización. Para la emisión, transmisores de pulso con 50 a 100 kW de potencia pico y pulsos de 25 microsegundos son requeridos.

Como consideración adicional, los niveles de ruido e interferencia en latitudes medias impactan considerablemente las mediciones, restringiendo la adquisición de datos fiables mientras el ángulo cenital se encuentra entre 70° y 90°. En el caso de altas latitudes, los datos son fiables en todo el transcurso del día y, por lo tanto, por las noches también.

3.4.2. Ionosonda

La primera medición de la altura de las capas ionosféricas fue reportada por Appleton y Barnett en 1925, quienes instalaron transmisores y receptores ubicados entre 65 y 130 km de distancia. Ellos notaron retardos en fase la recepción, por lo que cambiaron la frecuencia tanto del receptor como el transmisor de forma rápida y simultánea dando como resultado la obtención de puntos máximos y mínimos en frecuencias donde las ondas se sumaban o cancelaban respectivamente. Este primer experimento propició otros, los cuales sentaron las bases para el mecanismo de medición más utilizado en el mundo, la ionosonda.

En contraste a las técnicas de reflexión parcial, que normalmente operan en frecuencias fijas de entre 2 a 6 MHz, las ionosondas escanean una banda de frecuencia ancha comprendida entre 1 MHz a 30 MHz para medir las estructuras de ionización de la región E hasta el límite superior de la región F. Las ondas son reflejadas a la altura en que la frecuencia del plasma es igual a la frecuencia de la onda (reflexión especular) para la onda ordinaria e igual a $\sqrt{f^2 - f * fH}$ para la onda extraordinaria. Donde fH es la frecuencia de los iones en el campo magnético y f es la frecuencia de la sonda. Muchos de los instrumentos emplean pulsos entre 50 y 100 microsegundos para sondeos tanto verticales como oblicuos y una potencia pico de 1 a 10 kW. Para el estudio de propagación oblicua, las sondas Chirp usualmente hacen uso de tasas de barrido de frecuencia de 100 kHz/s.

Las Ionosondas están comprendidas por tres etapas generales. Estas etapas son de emisión de la señal, recepción de la señal y el análisis de esta. El diseño específico de cada etapa varía según el fabricante por lo que existen diversos estudios y tesis doctorales con propuestas de construcción. En forma simple, consiste en un barrido de señal que se envía mediante un transmisor RF hacia la atmósfera siendo esta la etapa de emisión. Luego, se recibe la señal reflejada por la ionósfera con retardo de pocos milisegundos, si la conductividad de tierra es alta y la absorción ionosférica baja, pueden recibirse múltiples ecos de la señal (etapa de recepción). La etapa de análisis consiste en deducir el tiempo de retraso entre la emisión y recepción de la señal, asumiendo que la onda viaja a velocidad de la luz.

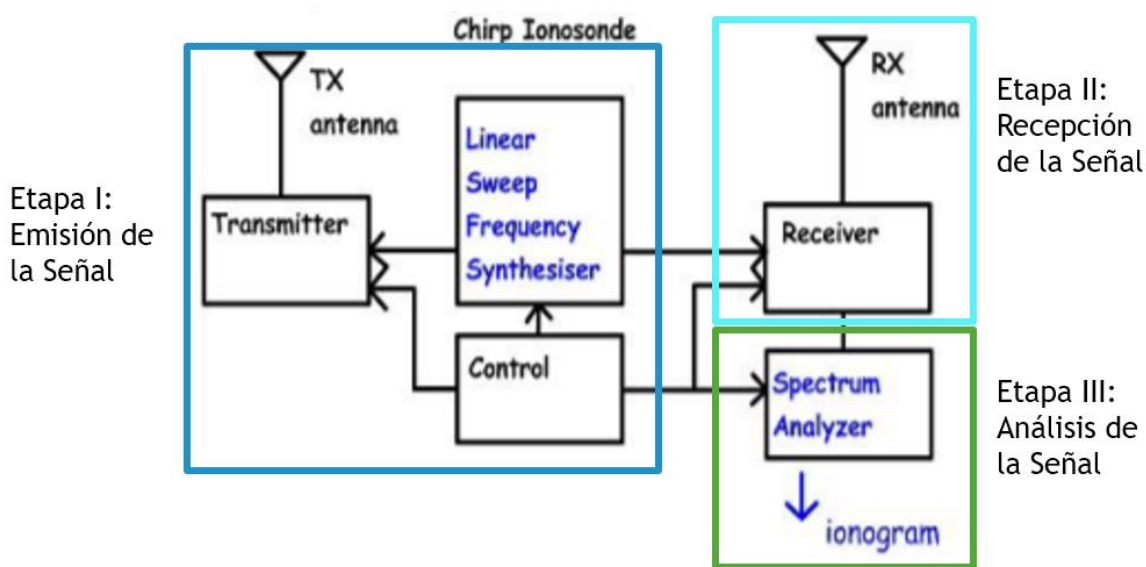


Figura 14. Diagrama de bloques y etapas de una ionosonda típica.

Las tres etapas definidas en la figura 14 pueden variar dependiendo del tipo de incidencia que se esté empleando en la medición de la señal. Cabe destacar una diferencia crucial entre las ionosondas oblicuas y verticales la cual es la emisión de la señal ya que el sistema es pasivo y activo respectivamente. Es decir, la ionosonda de incidencia oblicua requiere de un mínimo de dos estaciones distanciadas a 100 km entre sí, existiendo la posibilidad de utilizar estaciones pertenecientes a otras organizaciones.

3.4.2.1. Ionosonda de Incidencia Vertical

En 1926, se utilizó la primera ionosonda de incidencia vertical para medición de la altura virtual de la ionósfera en la cual emplearon un transmisor de pulsos hacia la atmósfera con un receptor situado a pocos metros de este.

La ionosonda de incidencia vertical es el método de uso más extendido por los organismos encargados del modelado de la ionósfera. Este método consiste en las tres etapas mencionadas en la figura 14. En este modelo, la antena receptora se sitúa cerca del emisor, midiendo únicamente la distancia vertical recorrida por la señal. Algunos modelos presentan dos o más antenas con el fin de minimizar los errores de recepción.

3.4.2.2. Diseño de Ionosonda de Incidencia Vertical

Uno de los instrumentos más básicos de la investigación ionosférica es la sonda de incidencia vertical. Es justo decir que la ionosonda ha contribuido mucho más en el estudio de la ionósfera que cualquier otra herramienta hasta el momento. Esta técnica se basa, de forma resumida, en la emisión vertical de pulsos de ondas de radio hacia la ionósfera, en la cual las ondas se reflejan cuando existe una densidad electrónica suficiente y se reciben en la estación.

Es importante mencionar las generalidades de la implementación de una ionosonda de incidencia vertical. Principalmente, permite la obtención de ionogramas puramente verticales propiciando una mayor precisión en la obtención de datos ionosféricos debido a que la distancia recorrida es únicamente la distancia vertical. Debido a esto, no se requiere el escalado de la señal a la hora de generar el ionograma disminuyendo el error de ajuste mediante código.

La versatilidad en el manejo de la señal se presenta también como una ventaja sobre la medición pasiva, ya que se tiene total control de la emisión de la señal obteniendo así, la capacidad de ajustar parámetros según las necesidades. Igualmente, permite hacer una mejor comparación de frecuencias al tener completo acceso a la información de la emisión de la señal.

Al estar compuesta de las tres etapas de un sistema típico de sondeo, se debe tomar en consideración el diseño de la etapa de emisión de la señal. La implementación del emisor de la señal puede encarecer considerablemente el proyecto al requerir equipos con parámetros específicos para asegurar un funcionamiento óptimo del sistema. Asimismo, aumentan los costos de mantenimiento del sistema ya que el equipo requerido para la etapa de generación representa aproximadamente un 50% del total de hardware empleado en una ionosonda típica.

En ciertos casos, se puede generar interferencia con señales utilizadas por comunicaciones vía radio debiendo considerar la ubicación de la sonda ionosférica en su diseño con el fin de

no incurrir en ilegalidades. También las disposiciones del uso de ciertas frecuencias según el ente regulador del país deben ser tomadas en cuenta, tramitando el permiso del uso de ciertas radiofrecuencias (lo cual puede incurrir en un costo) o la omisión de dichos saltos en las frecuencias.

3.4.2.2.1. Alternativa de Diseño Propietario

En diversas partes del mundo existen estaciones con un sistema de sondeo ionosférico provisto por un implementador de tecnologías de propietario. Dichas tecnologías son aplicadas tanto por las agencias de monitoreo atmosférico de Estados Unidos, así como las agencias meteorológicas y de sondeo ionosférico de la Unión Europea.

Al ser tecnologías diseñadas para venta, las aplicaciones están en constante actualización y soporte por parte del proveedor. Igualmente, presentan el respaldo de haber implementado sistemas para grandes entidades internacionales, demostrando su potencial de sondeo. Muchos de estos diseños, hacen descuentos en ciertos servicios si el cliente comparte sus datos con la comunidad científica promoviendo la investigación ionosférica.

3.4.2.2.1.1. Digisonde Portable Sounder (DPS)

La variación temporal y espacial en estructuras ionosféricas históricamente han truncado efectos de comunicación y operadores de sistemas de radares quienes basan su manejo de frecuencias en predicciones mensuales de radio propagación. Lowell Digisonde International (LLC) produce las sondas portables Digisonde Portable Sounder (Sondas Portables Digisonde), los cuales son capaces de realizar mediciones de la ionósfera circundante, provee procesamiento de datos en tiempo real y análisis para caracterizar la propagación de radio señales.

El sistema compensa su transmisor de baja potencia (300 W) empleando una codificación de fase de intrapulso, compresión de pulso digital e integración Doppler. El sistema de control de adquisición de datos, procesamiento de señales, display y funciones de análisis automático de datos han sido condensados en un solo procesador multitarea, mientras que la circuitería análoga se ha simplificado en función de la potencia reducida del transmisor, dispositivos de banda ancha y expansiones de PC disponibles comercialmente.



Figura 15. Estación de Digisonde D4.

El objetivo del proyecto de DPS era desarrollar una sonda ionosférica de incidencia vertical pequeña que fuera capaz de recolectar y analizar mediciones ionosféricas en sitios de operación remota con la finalidad de seleccionar las frecuencias de operación óptimas para la propagación de comunicaciones vía radio y vías de propagación de radar. Para lograr esto, se requiere el desarrollo de una forma de onda eficiente y la generación de señales funcional, así como circuitos de procesamiento y análisis, por lo que es vital el uso de sistemas embebidos con alto poder computacional. El DPS se realizó en un equipo compacto de baja potencia con la capacidad de observar los parámetros de frecuencia, altura vertical, amplitud, fase, cambios de Doppler, ángulo de incidencia y el plano de polarización.

El diseño del receptor de señales provee una medición precisa de todas las variables dada su relación señal a ruido extremadamente buena con el fin de mejorar la sensibilidad de las mediciones de fase relacionada al componente aleatorio de ruido generado. Esto se demuestra con la relación de señal a ruido de al menos 20 a 40 dB a pesar de tener condiciones de absorción, ruido, interferencia y una antena con bajo rendimiento. En general todas estas características se logran utilizando componentes existentes en el mercado con gran capacidad de funcionamiento. Entre los componentes que conforman el equipo receptor se encuentran los siguientes:

- Transistores MOSFET 300W para RF

- ▶ Conversor analógico-digital de alta velocidad y precisión
- ▶ Conversor digital-analógico de alta velocidad y precisión
- ▶ Sintetizador Digital Directo (DDS)
- ▶ Amplificadores de Potencia de banda ancha
- ▶ Moduladores de fase 90° (2-32 MHz)
- ▶ Procesador digital de señales de alta velocidad
- ▶ Microcontrolador de alta velocidad

En la tabla 9 se detalla el costo de adquisición del sistema más reciente distribuido por Digisonde Technologies.

Digisonde Technologies	
Equipo	Costo Unitario
Sistema DPS-4D	\$6,000.00
Envío	\$100.00
Soporte	\$600.00
Sub-Total	\$6,700.00
Equipo Disponible	
Sub-Total	\$0.00
Total	\$6,700.00

Tabla 3. Costo detallado de adquisición del sistema DPS-4D de Digisonde Technologies.

3.4.2.2.2. Ionosonda de Incidencia Vertical con Modulación FM

El diseño de las ionosondas ha cambiado conforme se agregan avances técnicos para facilitar la tarea y optimizar el instrumento de medición, por lo que se muestran dos alternativas de diseño haciendo uso de CW en modulación FM de señales Chirp para la medición de parámetros ionosféricos.

3.4.2.2.2.1. George H. Barry, A Low-Power Vertical-Incidence Ionosonde

El estudio describe el uso de una ionosonda de compresión de pulsos de estado sólido que provee un rendimiento mejorado a pesar de la reducción en la potencia pico. Anteriormente, se construyó una sonda de incidencia vertical de FM operado por una antena. Para resolver el problema del uso de una sola antena, se dividió el tiempo de operación permitiendo ventanas de recepción. Este modo de operación provee una potencia pico reducida por 3 dB y la mitad de la potencia restante transmitida es perdida por los ecos cancelando la señal emitida.

El diseño de la ionosonda mejorada consiste en una señal Chirp modulada en FM. La razón principal de aplicar la modulación en FM es que, para señales en HF, la modulación FM brinda mayores ventajas dada su poca vulnerabilidad hacia interferencia. En comparación con las técnicas para disminuir la interferencia, su aplicación es más sencilla. Esto se logra mediante la reducción de ancho de banda eliminando el ruido de frecuencia angosta.

A continuación, se muestran los insumos requeridos para la construcción de la sonda ionosférica de baja potencia utilizando modulación en FM, así como el diagrama de bloques que muestra sus etapas de construcción y funcionamiento.

- ▶ F2972NEGK (T/R Switch 0.5 MHz – 10 GHz)
- ▶ LMC555 (Control de Tiempos de alta precisión)
- ▶ Amplificador de Potencia RF 0.1-50 MHz
- ▶ Generador de Barrido Lineal 0.5 – 30 MHz
- ▶ Antena dipolo con cada brazo formado de dos líneas de 10 m y 35 metros.

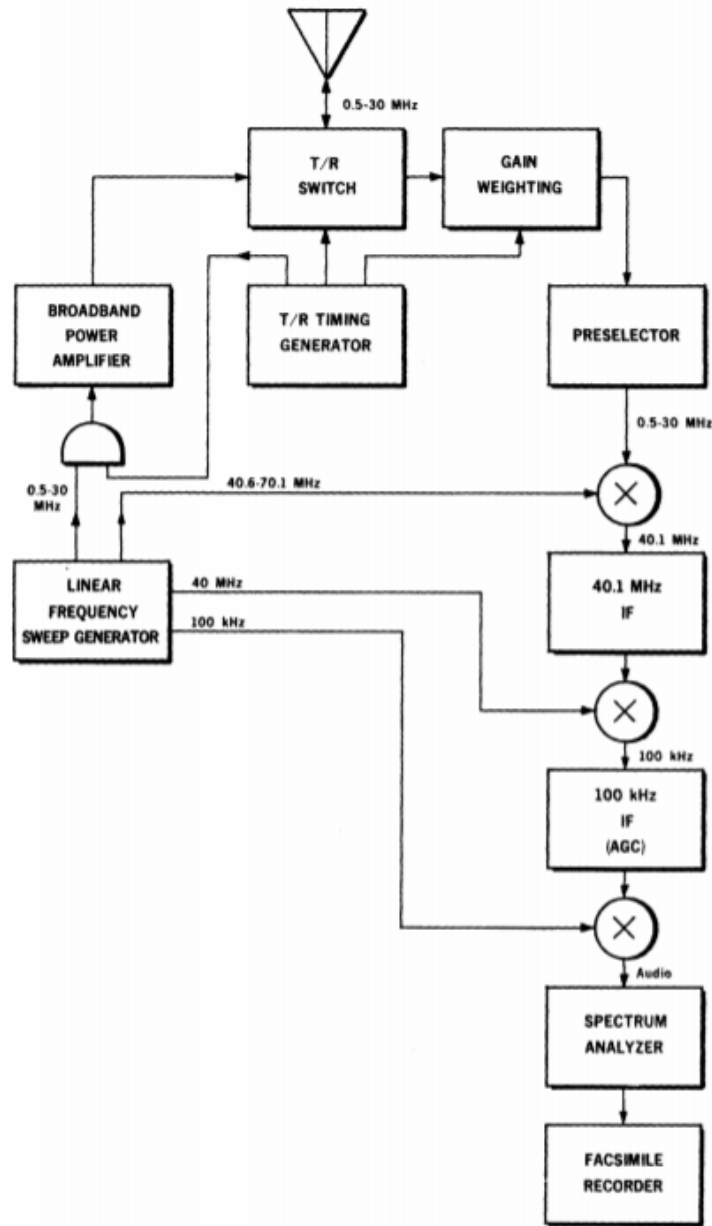


Figura 16. Diagrama de bloques de una sonda de incidencia vertical Chirp de una antena.

Al utilizar la técnica de FM, la resolución del tiempo de retardo de la sonda está limitada completamente por las características de la ionósfera. La resolución de tiempo de un sistema típico de sondeo ionosférico impacta fuertemente la resolución en la frecuencia, según la característica de la ionósfera medida (altura virtual o frecuencia crítica). Se escogió una resolución de tiempo de $45 \mu\text{s}$ considerando que es igual la longitud de pulsos de una sonda convencional.

El equipo se instaló en dos racks de mesa y operado intermitentemente por un periodo de dos semanas. Se colocó principalmente una antena dipolo conectada en paralelo a la alimentación para aumentar la respuesta de frecuencias. Se utilizó un cable coaxial de 50 Ω conectado mediante un balun de 4-1 en el centro de la antena.

Los parámetros generales de la ionosonda utilizando modulación FM se muestran en la siguiente figura. Como se puede apreciar, el sistema es útil para emplear bajas frecuencias manteniendo parámetros de ionosondas de incidencia vertical convencionales, manteniendo una recepción correcta de la señal.

PARAMETERS OF FM IONOSONDE	
Frequency range	0.5–30 MHz
Output power	8 W peak, 3 W average
Sweep rate	logarithmic, 49 s/octave
Instantaneous sweep	linear, 14 kHz/s
Sweep coherence	30 kHz
Time delay resolution	45 μ s
Receiver bandwidth	100 Hz
Pulse-repetition frequency	randomly varied 350–800 pps
Virtual height range	0 to 1000 km
Display	facsimile recorder

Figura 17. Parámetros de funcionamiento de la ionosonda FM.

En la tabla siguiente se muestra la inversión necesaria para implementar la etapa de emisión de la ionosonda de incidencia vertical con modulación FM presentada por George Barry.

George Barry	
Equipo	Costo Unitario
F2972NEGK (T/R Switch 0.5 MHz – 10 GHz)	\$40.00
LMC555 (Control de Tiempos de alta precisión)	\$25.00
Amplificador de Potencia RF 0.1-50 MHz	\$1,200.00
Generador de Barrido Lineal 0.5 – 30 MHz	\$700.00
Sub-Total	\$1,965.00
Equipo Disponible	
Generador de Barrido Lineal 0.5 – 30 MHz	\$700.00
Sub-Total	\$700.00
Total	\$1,265.00

Tabla 4. Costo detallado de implementación de una ionosonda de incidencia vertical con modulación FM según George Barry.

3.4.2.2.2. P.D. Kotheekar, S.D. Shelke, A.P. Khandare, Transmitter Chain for HF Radar i.e. Ionosonde using Direct Synthesizer (2012)

El estudio consiste en el diseño de una ionosonda generando el pulso de código bi-fase haciendo uso de un sintetizador directo digital IC AD9854 para sintetizar las frecuencias entre 0.5 MHz a 20 MHz. Un amplificador de potencia RF y un acoplador bidireccional es utilizado para amplificar la señal y evitar la señal reflejada.

Las sondas Chirp oblicuas barren una señal de fase continua en el rango de la banda de interés. Dado que el método de operación del receptor, un ancho de banda de recepción en el orden de algunas centenas de Hertzios es empleado, requiriendo una potencia de transmisión relativamente baja. Una de las principales desventajas de las sondas Chirp es el relativamente complejo análisis que se debe realizar para determinar el modo de propagación de la ionósfera. Existen alternativas de sondeo aplicando transmisión CW FM. Los resultados de ionosondas FM son parecidos en la resolución de retardo, relación señal a ruido y calidad general a ionosondas convencionales, reduciendo los efectos de interferencia de otros usuarios HF. Adicionalmente se debe mantener la estabilidad y precisión de la amplitud de la onda sinusoidal con el objetivo de obtener una óptima medición de la impedancia.

Diseño.

El sistema consiste en un transmisor de señales, un receptor y una sección de control DSP. El diagrama de bloques del sistema es el mostrado en la figura 23. De igual forma se muestra a continuación el equipo necesario para su implementación.

- ▶ ADUC814 (DAC)
- ▶ AD9854 (DDS)
- ▶ BTM00250- AlphaSA (Amplificador de Potencia)
- ▶ C50-109-481/1N (Acoplador)
- ▶ SPST Switch
- ▶ Bird 8343-200-N 20dB, 100W (Atenuador)

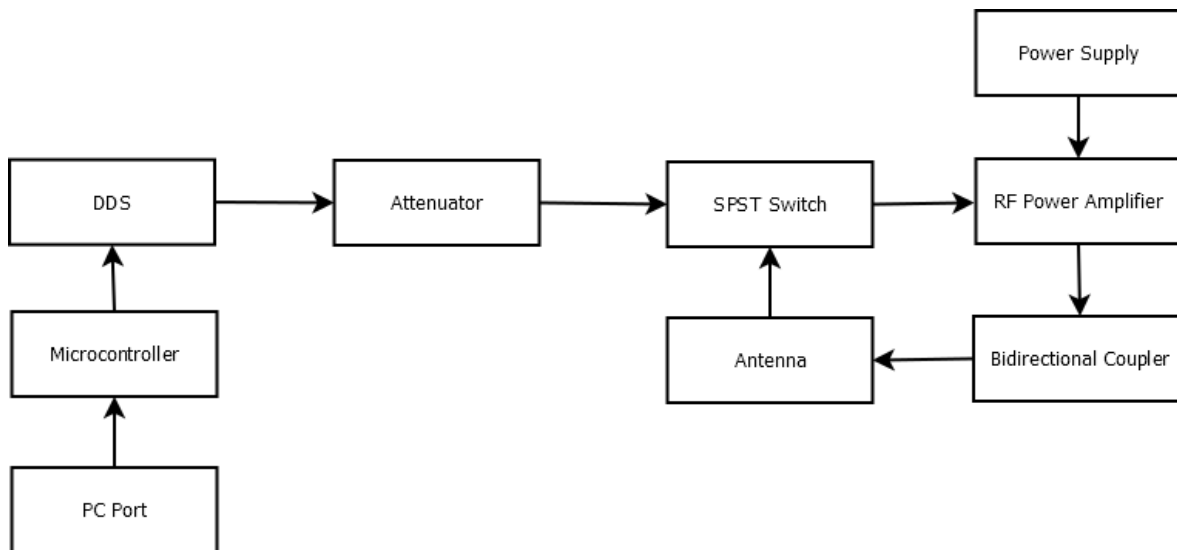


Figura 18. Diagrama de bloques de una ionosonda utilizando DDS.

En el transmisor es empleado el controlador análogo ADUC814, posteriormente para la generación de la señal codificada es aplicando un AD9854 el cual es un sintetizador directo digital. Dispositivos de circuitos integrados pueden generar salidas análogas programables en formas de ondas de una manera rápida y con alta resolución. Dispositivos DDS tales como el AD9854 son programados haciendo uso de la interfaz serial de alta velocidad y requieren únicamente de una salida de reloj externa. La salida del DDS es transmitida al atenuador mod 8343-200 s/n 3281 para llevar la señal hasta 0 dBm ya que tiene una atenuación de hasta 20 dB. La señal atenuada es llevada al Switch SPST el cual trabaja como protección del transmisor. Esta señal es llevada al amplificador de potencia RF BTM00250-AlphaSA, el cual tiene una frecuencia de 500 Kz-150Mhz y salida de 250 watts para ser entregada al acoplador bidireccional C50-109-481/1N, siendo amplificada hasta los 230.4 dBm. El puerto de salida es conectado a la antena que trabaja como carga para el acoplador La alimentación es dada en 48 voltios, requerida para la generación de pulsos CW. Un puerto es aislado y el puerto acoplado se conecta al Switch con el fin de proteger el hardware. Finalmente, el programa realizado para la generación de señal está escrito en el software KEIL.

En la tabla siguiente se muestra la inversión necesaria para implementar la etapa de emisión de la ionosonda de incidencia vertical con modulación FM presentada por P.D. Kothekar, S.D. Shelke, A.P. Khandare.

P.D. Kotheekar, S.D. Shelke, A.P. Khandare	
Equipo	Costo Unitario
ADUC814 (DAC)	\$100.00
AD9854 (DDS)	\$55.00
BTM00250- AlphaSA (Amplificador de Potencia)	\$1,500.00
C50-109-481/1N (Acoplador)	\$30.00
SPST Switch	\$5.00
Bird 8343-200-N 20dB, 100W (Atenuador)	\$200.00
Sub-Total	\$1,890.00
Equipo Disponible	
Sub-Total	\$0.00
Total	\$1,890.00

Tabla 5. Costo detallado de implementación de una ionosonda de incidencia vertical con modulación FM.

3.4.2.3. *Ionosonda de Incidencia Oblicua*

En los últimos 80 años, las ionosondas de incidencia vertical han sido los sistemas más utilizados para la detección ionosférica dada su habilidad para medir el eco de rango de grupo como una función de la frecuencia y así estimar la frecuencia crítica de las capas de la ionósfera, altura virtual, perfil de densidad de electrones. Sin embargo, las ionosondas de incidencia oblicua, las cuales operan de modo biestático, no se ha implementado tan ampliamente.

La ionosonda de incidencia oblicua puede monitorear la ionósfera incluso en áreas de difícil acceso tales como el océano, desiertos, pantanos, es decir en lugares donde implementar una ionosonda de incidencia vertical no es factible. En una red de monitoreo ionosférico, N ionosondas verticales pueden proveer información de N ubicaciones, pero N transmisores y M receptores de ionosondas oblicuas, separadas entre sí por más de 100 km, tienen el potencial de caracterizar la ionósfera en las zonas aledañas de NxM puntos de reflexión.

Por lo tanto, la ionosonda oblicua muestra ser un atractivo más versátil que la ionosonda vertical debido a su potencial de aplicación. Esto muestra un aumento en implementación de este tipo de sistemas siendo el más famoso el sistema IRIS, el cual es un sistema de sondeo ionosférico de incidencia oblicua desarrollado en el Reino Unido por la Universidad de Lancaster.

3.4.2.4. *Diseño de Ionosonda de Incidencia Oblicua*

Como se detalló, una Ionosonda de Incidencia Oblicua requiere dos estaciones, una de emisión y otra de recepción. Debido a la extensión territorial del país dificulta la separación correcta de las estaciones y considerando que existen 6 estaciones relativamente cercanas, separadas a varias centenas de kilómetros, es posible prescindir de la estación de emisión. Dichas estaciones transmisoras son San Juan y Ramey en Puerto Rico, Soto Cano en Honduras y Austin, Eglin y Melrose en Estados Unidos.

El modo de trabajo típico de una ionosonda de incidencia oblicua consiste en una estación la cual emite una señal modulada hacia la atmósfera en un ángulo distinto de 90 grados. La onda se refleja en la ionósfera hacia la superficie terrestre en un ángulo diferente al de incidencia, permitiendo que la señal recorra más de 100 km de distancia. Usualmente el receptor tiene sincronismo con el emisor por lo que se facilita el cálculo el retraso.

3.4.2.4.1. *Recepción de la Señal*

La etapa más crítica de un sistema de sondeo ionosférico es la recepción de las señales reflejadas por la ionósfera. Se requiere una antena y un transceptor que mantengan un óptimo funcionamiento en todo el espectro transmitido, con la capacidad de eliminar interferencias tanto de eco como de ruido inherente a la comunicación. El modo de trabajo dependerá de la disponibilidad de control del emisor, es decir, si la recepción es pasiva o activa.

En el caso de no hacer uso de un receptor en sincronismo con el emisor (recepción pasiva), se requiere conocer el periodo de sondeo. Para definir el periodo del sondeo, es decir, en qué momento inicia la emisión y en qué momento se repite, existen una notación expresada como 900:21.0121. Esta notación se interpreta como: la estación inicia la emisión del CHIRP aproximadamente 21 segundos después de la hora y la señal se repetirá cada 900 segundos siendo equivalente a 15 minutos.

Además de hacer uso de la recepción con sincronismo con el emisor o mediante configuración empleando la notación de la emisora y una referencia exacta de tiempo, existe la opción de implementar la estación receptora utilizando un transceptor de frecuencia fija o de frecuencia variable. Esta decisión está fuertemente ligada a la cantidad de procesamiento que se realizará en el análisis posterior de la señal.

3.4.2.4.1.1. *Recepción Mediante Radio con Frecuencia Fija*

Para el sondeo ionosférico aplicando ionosondas de incidencia oblicua, es usual hacer uso de una transmisión a una frecuencia fija. Esto debido a que, si se emplea la variación de frecuencias, puede interferir con canales existentes de radiocomunicaciones. Esto permite la

utilización de un radio receptor configurado para mantenerse en una frecuencia intermedia. El filtro pasa banda debe tener un amplio ancho de banda para permitir la recepción de señales cercanas a su frecuencia de trabajo.

Esto significa que los requerimientos técnicos del radio receptor son menores, puesto que no se necesita la habilidad de dar los saltos de frecuencia típicos de 100 kHz/s usuales para mantener la recepción de manera óptima, lo cual permite que exista una mayor disponibilidad de equipos que cumplen dichos requerimientos. A su vez, reduce los costos al ser viable el uso radios con características básicas sin afectar el desempeño del sistema.

Por otra parte, se requiere mayor trabajo en el análisis de la señal ya que el software debe ajustar el espectro dependiendo del tiempo. Es decir, debe amplificar las frecuencias correspondientes a medida que la señal Chirp haga los saltos de frecuencia. Usualmente, estos softwares requieren un GPS para medidas de tiempo exactos porque un desfase de un milisegundo puede afectar negativamente el procesamiento de la señal.

Radio con Frecuencia Fija	
Equipo	Costo Unitario
Radio Receptor	\$500.00
Acoplador de antena automático	\$200.00
Fuente de poder para radio	\$3,000.00
Antena	\$300.00
Sub-Total	\$4,000.00
Equipo Disponible	
Transceptor Kenwood TS-50S	\$500.00
Acoplador de antena automático	\$200.00
Fuente de poder 13 V / 35 A	\$3,000.00
Antena dipolo plegada	\$300.00
Sub-Total	\$4,000.00
Total	\$ -

Tabla 6. Costo detallado de implementación de una estación receptora con radio con frecuencia fija.

3.4.2.4.1.2. Recepción Mediante Radio con Frecuencia Variable

Otro método de recepción de señales ionosféricas consiste en el uso de frecuencias variantes en todo el espectro de frecuencias de interés. Provistos de antenas multibanda, estos receptores permiten realizar un barrido de frecuencias dinámico sin perder la relación señal a ruido, ni la ganancia de la señal.

Sin embargo, cabe mencionar que el equipo utilizado para la recepción de señales con frecuencia variable requiere de gran robustez con el fin de evitar pérdidas en la señal. Parte de su robustez radica en la capacidad de realizar saltos de frecuencia atípicos o con alta variabilidad, permitiendo así el seguimiento del barrido de frecuencias manteniendo la recepción estable. De igual forma, el radio debe mantener una alta precisión en la recepción debido a que la relación de cambio usual es de 100 kHz por segundo, por lo que retrasos de un milisegundo puede provocar la pérdida de la señal y perder la utilidad del sistema.

Una fortaleza en el uso de un radio de recepción de señales variable es la simplificación del análisis de señal debido a que el programa no requiere realizar un procesamiento excesivo, siendo trabajo del radio la sintonización de la señal y la aplicación del filtro. Esto deriva en una potencial desventaja, al no recibir el espectro completo de señales en todo momento, el sistema puede ser susceptible a errores de ancho de banda angosto, así como disminución de la relación señal a ruido. La principal razón de dicha susceptibilidad es que la señal, al sufrir retardos de microsegundos, se debe aplicar un filtro pasabandas más ancho aumentando la ventana de recepción de señales externas y de ruido.

Finalmente, la robustez requerida en el receptor de la señal se traduce a su vez, en mayores costos del equipo a implementar a diferencia de softwares de procesamiento, que se pueden obtener a menor costo con iguales resultados. De igual forma, el uso de todo el espectro de frecuencias en la propagación puede verse afectado por las frecuencias dedicadas para las comunicaciones. Dichas señales pueden generar interferencias y modificar las lecturas obtenidas, así como provocar la pérdida completa de la señal como consecuencia de las bajas potencias de propagación empleadas para el sondeo ionosférico.

Para la adquisición de equipo, se puede observar que el valor del radio aumenta considerablemente en consecuencia de la capacidad de trabajo del equipo. La siguiente tabla muestra el presupuesto de esta alternativa en la cual se muestra el costo total de implementación de una estación de recepción de señal utilizando un radio con frecuencia variable.

Radio con Frecuencia Variable	
Equipo	Costo Unitario
Radio Receptor	\$2,450.00
Acoplador de antena automático	\$500.00
Fuente de poder para radio	\$3,000.00
Antena	\$300.00
Sub-Total	\$6,250.00
Equipo Disponible	
Fuente de poder 13 V / 35 A	\$3,000.00
Antena dipolo plegada	\$300.00
Sub-Total	\$3,300.00
Total	\$2,950.00

Tabla 7. Costo detallado de implementación de una estación receptora con radio con frecuencia variable.

3.4.2.4.2. Análisis de la Señal

3.4.2.4.2.1. Utilizando ChirpView

ChirpView es un software de análisis de señales de sondeo ionosférico pasivo diseñado por un radio aficionado llamado Peter Martínez. Está diseñado para una computadora con un sistema operativo de Windows con su última versión estable en el 2010. A pesar de que han transcurrido aproximadamente 8 años desde su última actualización, el software sigue siendo útil y compatible con versiones más actuales de Windows.

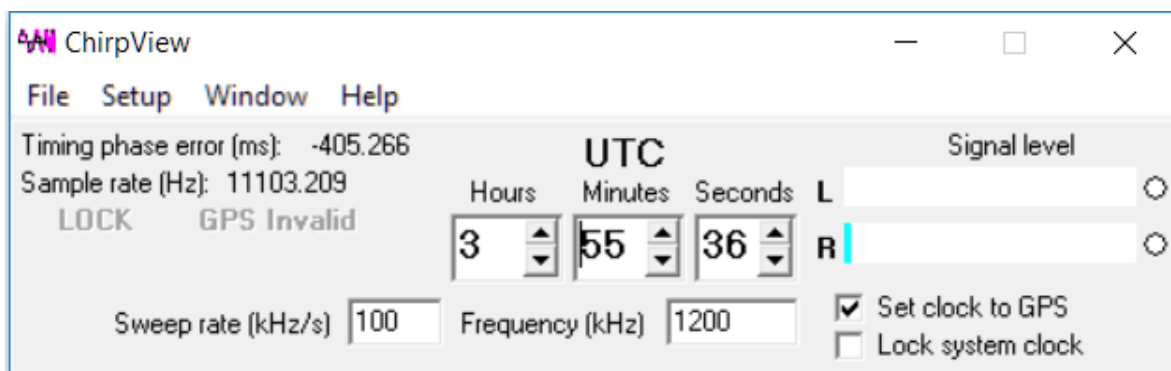


Figura 19. Pantalla principal del software ChirpView.

La aplicación contiene un filtro que barre las frecuencias a una tasa de 100 kHz/s y un ancho de banda de 66 Hz con una resolución de 0.66 ms. Permitiendo así optimizar la recepción de señales, eliminando posibles interferencias en la recepción. Otra ventaja del software es su

objetivo de aplicación, al ser un software diseñado para radio aficionados, se requiere poco hardware para implementarse, así como un bajo costo.

La aplicación también posee un cuadro estadístico con las frecuencias y su correspondiente tiempo de emisión, así como la posibilidad de obtener diagramas de cascada y ionogramas en tiempo real, con la desventaja que dichos ionogramas pueden ser guardados únicamente en formato de imagen .png.

A continuación, se muestran los requerimientos técnicos especificados por el desarrollador.

- Una computadora compatible con los sistemas Windows 2000 y XP. Pero se asegura la compatibilidad en sistemas de Windows 8 y Windows 10.
- Un procesador con velocidad de 100 MHz mínimo.
- Una tarjeta estéreo con entrada de línea.
- Un receptor GPS
- Receptor HF con modo de trabajo USB con un filtro normal de voz de aproximadamente de 3 kHz. Filtros más angostos pueden generar error en la recepción de la señal.
- Receptor con posibilidad de apagar el AGC y de utilizar control de ganancia RF manual. El control de ganancia automático puede generar lecturas erróneas del programa al no poder modificar los niveles de señal correctamente.

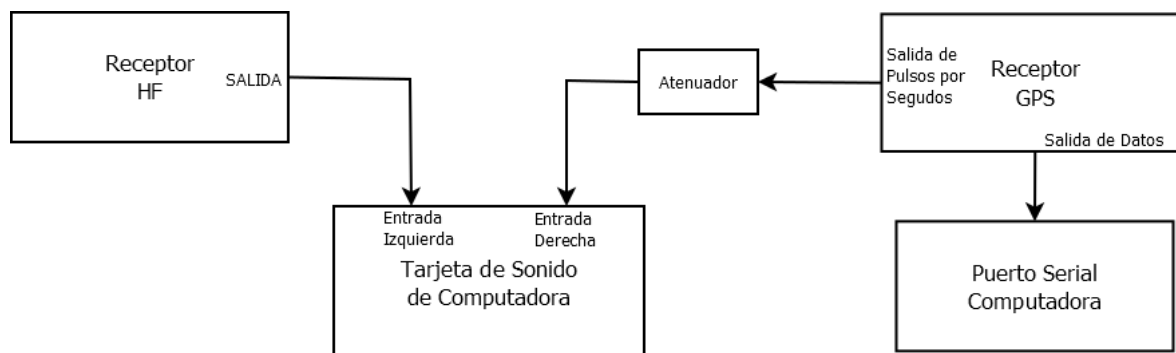


Figura 20. Diagrama de Bloques de una Conexión Típica de ChirpView.

El sistema requiere de un receptor GPS externo con la capacidad de generar una salida de pulsos por segundo para mantener una referencia de tiempos precisa. De igual forma necesita una entrada de línea estéreo para poder recibir correctamente la señal de forma simultánea a la referencia de tiempo, permitiendo procesar correctamente la señal recibida.

En la tabla 6 se muestra el costo total de la inversión concerniente al análisis de la señal obtenida por medio de la ionosonda utilizando el programa ChirpView.

ChirpView	
Equipo	Costo Unitario
Computadora con Pentium IV o mayor	\$400.00
Tarjeta de Sonido	\$100.00
Receptor GPS	\$30.00
Sub-Total	\$530.00
Equipo Disponible	
Computadora	\$400.00
Sub-Total	\$400.00
Total	\$130.00

Tabla 8. Costo detallado de implementación del análisis de la señal utilizando el software ChirpView.

3.4.2.4.2.2. Utilizando SAO-X

Consiste en un sistema desarrollado por el departamento de Visualización Científica, Procesamiento y Archivo de Datos Adquiridos del Centro de Investigación Atmosférica de la Universidad de Massachusetts Lowell, derivado de software ADEPT (Sistema de Edición de Datos e Impresión) iniciado a finales de los ochentas. La fortaleza del sistema SAO Explorer (SAO-X) radica en su potencial para edición de ionogramas. Mientras que existen softwares con alta capacidad de escalar un ionograma, aun se requiere modificación humana con el fin de obtener un ionograma libre de errores.

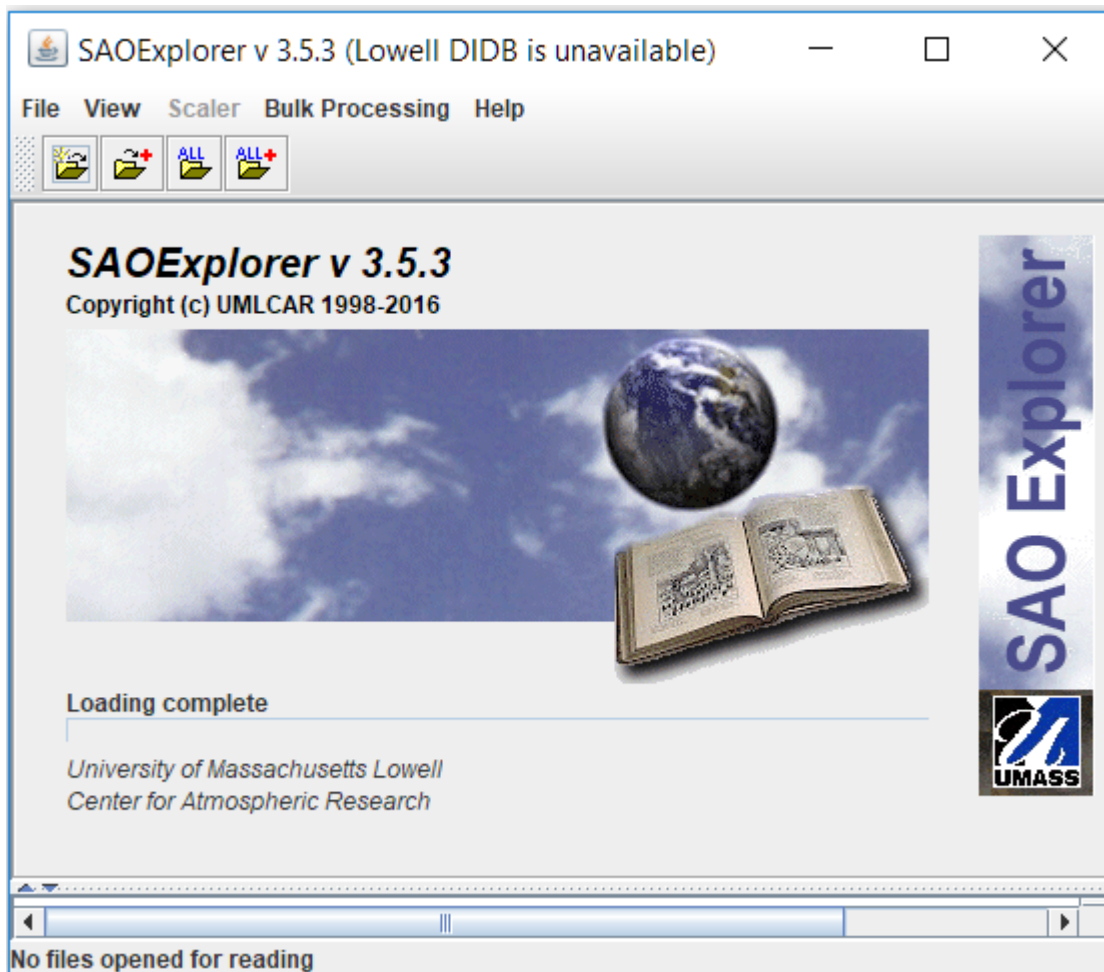


Figura 21. Pantalla principal del SAO Explorer.

SAO Explorer es de uso extendido en la actualidad por científicos dedicados al estudio de la ionósfera, por lo que se realiza mediante una aplicación Java permitiendo su uso en cualquier plataforma de sistema operativo actual. De igual forma su diseño provee una visualización mejorada de datos provenientes de lecturas.

Entre las herramientas que posee el software se encuentra un visualizador de datos recibidos permitiendo la calibración de lecturas en el dominio del tiempo con la información de amplitud y fase para cuatro canales de entrada de antenas. Esta herramienta muestra también muestra el cambio de fase en relación con el código utilizado por un pulso de transmisor. Existe también la herramienta de medición de ionogramas, el cual realiza una agrupación de ionogramas derivados de una sola estación, permitiendo dar seguimiento a los patrones de comportamiento de la ionósfera llamado directograma.

Integra también una herramienta que muestra características ionosféricas, trazos de ionograma y cálculo del perfil de densidad de electrones derivadas de ionogramas. De igual forma, permite el cálculo de densidades de plasma o las frecuencias de plasmas correspondientes teniendo la capacidad de graficar los contornos de densidad de plasma. De igual forma, actualiza los valores derivados de ionogramas escalados manualmente, así como cambios inmediatos a este.

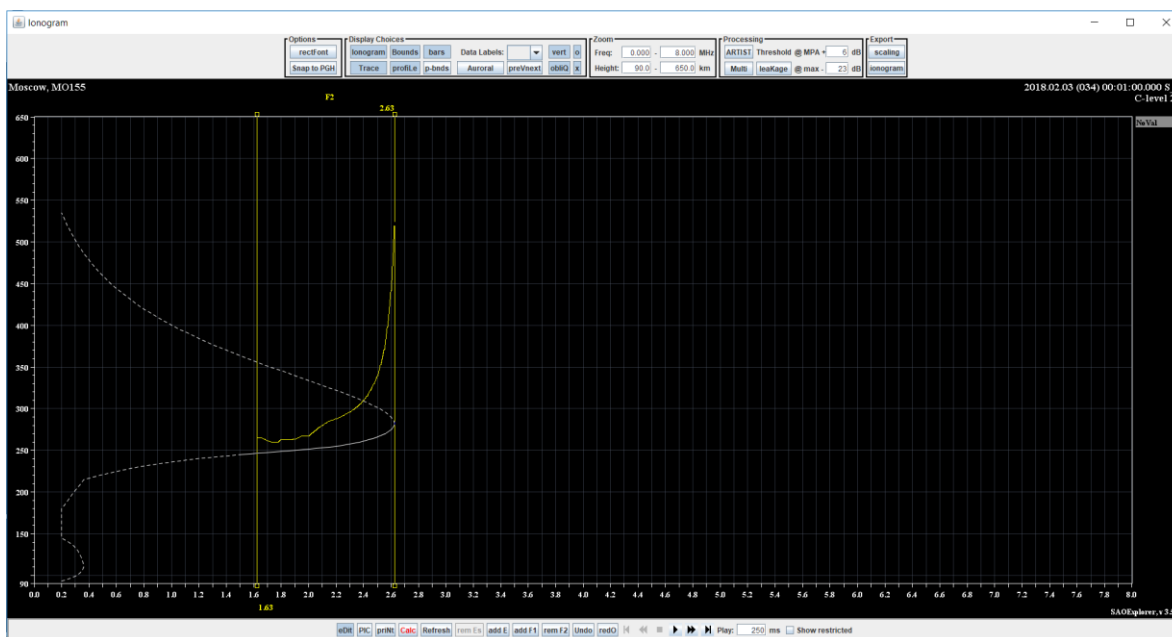


Figura 22. Análisis de ionograma en el software SAO Explorer.

Al trabajar con un modelo de datos diseñado para el estudio profesional de las características de la ionósfera se requiere una traducción especial para la adecuación de datos. Debido al uso extendido del modelo de datos, se considera un estándar de presentación de datos ionosféricos por lo que otras aplicaciones traducen los datos al mismo modelo. Por consiguiente, el software provee acceso a bases de datos ionosféricos obtenidos por estaciones dedicadas a la medición de la ionósfera como es el caso de todas las estaciones manejadas por la Administración Oceánica y Atmosférica Nacional (NOAA).

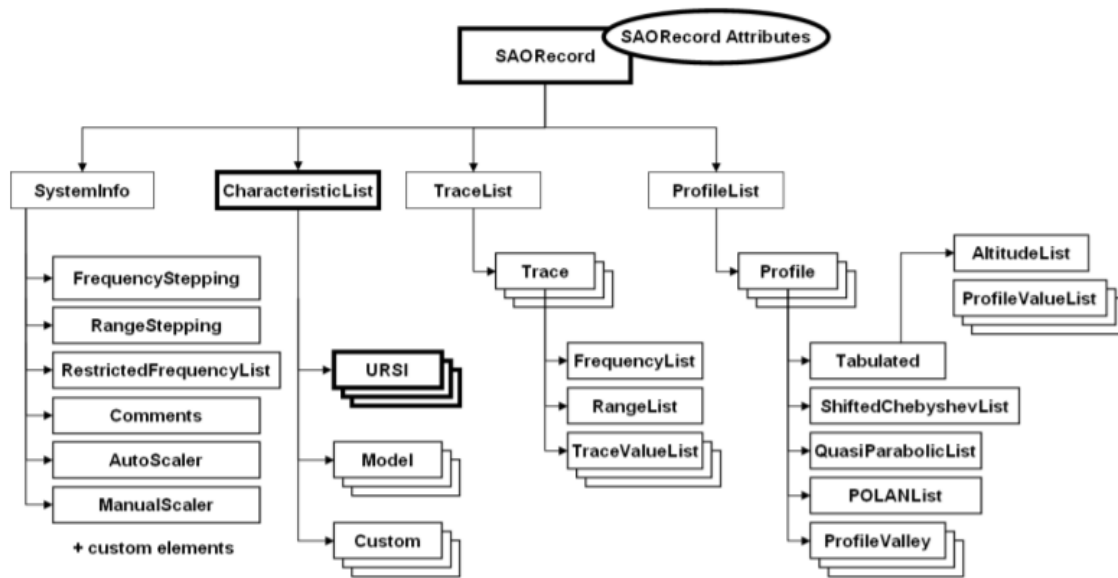


Figura 23. Modelo de Datos del SAO.

La desventaja principal que presenta el software es la falta de comunicación directa con un radio receptor. Para su utilización en el estudio de la ionósfera, se requiere la adecuación de los datos recibidos por el radio y transformarlos según las especificaciones provistas por el UMLCAR. Una alternativa es el uso de un programa que permita la comunicación entre la computadora y el receptor, siempre que tenga la capacidad de realizar el guardado con los datos necesarios por el SAO Explorer.

Los requerimientos técnicos para la aplicación del software SAO-X son los siguientes.

- ▶ Computadora con sistema Windows.
- ▶ Compilador de FORTRAN para la traducción de datos.
- ▶ Radio receptor y software de modelado de datos
- ▶ Java WorkFrame.

En la tabla 7 se muestra el costo total de la inversión concerniente al análisis de la señal obtenida por medio de la ionosonda utilizando el programa SAO-X. Es de considerar que se requiere software adicional para lograr la comunicación entre el tranceptor y el SAO-X.

SAO-X	
Equipo	Costo Unitario
Computadora	\$400.00
Software de modelado de datos	\$0.00
Sub-Total	\$400.00
Equipo Disponible	
Computadora	\$400.00
Sub-Total	\$400.00
Total	\$0.00

Tabla 9. Costo detallado de implementación del análisis de la señal utilizando el software SAO-X.

3.4.2.4.2.3. Utilizando LabView

LabVIEW es un software de ingeniería de sistemas que requiere pruebas, medidas y control con acceso rápido a hardware e información de datos. Este es un software desarrollado para el diseño de sistemas empleando un lenguaje de programación visual simplificado con el objetivo de implementar hardware y software de control, diseño y modelado en tiempo real o simulado. El programa fue creado por National Instruments con una nueva versión de actualización anual, que incluye herramientas desde electrónica hasta instrumentos de RF.

El modo de utilización de LabVIEW para el análisis de una señal proveniente de una ionosonda es mediante el diseño de un instrumento virtual capaz de generar ionogramas, por medio de ecuaciones y análisis matemático. Se requiere el uso de herramientas de cálculo avanzado y de análisis en tiempo real por lo que se debe adquirir la licencia de LabVIEW Completa.

Se requiere una computadora con una tarjeta de sonido con entrada de línea para mantener dos señales simultáneas de entrada. Por una línea se conectará el transceptor brindando los datos al software, mientras que por el otro canal se conectará una salida PPS de un receptor GPS para una referencia de tiempo precisa. Posteriormente se realiza una diferencia entre el tiempo de recepción y el tiempo de emisión obteniendo el tiempo que tardó la señal en su recorrido. Dicha diferencia de tiempo se muestra en un gráfico de altura vs tiempo obedeciendo la ecuación $\Delta t = 2h/c$, la cual especifica que el delta de tiempo es igual a dos veces la altura relativa entre la velocidad de la luz.

El gráfico obtenido se debe escalar relacionando el tiempo con su frecuencia correspondiente con el fin de obtener un ionograma. Dicho ionograma provee de forma visual las alturas virtuales de las regiones de la ionósfera, así como las frecuencias que interactúan con la

ionósfera. El ionograma a su vez se integra con respecto a la altura para obtener el contenido total de electrones TEC. De igual forma, se obtienen las frecuencias críticas correspondientes a cada región, calculando los puntos donde la altura tiende al infinito.

Los requerimientos técnicos para la elaboración de ionogramas y análisis de los datos recibidos por una ionosonda son una computadora con sistema Windows y gran capacidad de procesamiento para lograr soportar el software LabVIEW. Una tarjeta de sonido estéreo con entrada de línea para manejar dos señales de entrada de forma simultánea. Un receptor GPS con salida de pulsos por segundo para tener una referencia de tiempo exacta mediante un canal de entrada de línea.

En la tabla 8 se muestra el costo total de la inversión concerniente al análisis de la señal obtenida por medio de la ionosonda utilizando el software LabView con su versión completa con capacidad de trabajo en tiempo real.

LabView	
Equipo	Costo Unitario
Software NI LabView	\$3,300.00
Computadora con Core I5 o mayor	\$600.00
Tarjeta de Sonido	\$100.00
Receptor GPS	\$30.00
Sub-Total	\$4,030.00
Equipo Disponible	
Computadora con Core I5 o mayor	\$600.00
Sub-Total	\$600.00
Total	\$3,430.00

Tabla 10. Costo detallado de implementación del análisis de la señal utilizando el software LabVIEW.

3.4.3. Radares Coherentes

Las técnicas mediante radares se basan en retornos dispersos de irregularidades estructuradas. Los radares coherentes son sensitivos a ecos coherentes de estructuras cuasi deterministas. Para el sondeo ionosférico son irregularidades alineadas al campo magnético con el tamaño de un medio de la longitud de onda del radar. Este método es extremadamente sensitivo, con la suficiente energía siendo dispersa únicamente en la dirección normal a la del campo magnético. En latitudes más altas, esta condición no se puede cumplir para la región F cuando

se hace uso frecuencias en la banda de VHF, mientras que para la región E, las condiciones se cumplen al situar el radar aproximadamente 500 km hacia el ecuador. Para el estudio de la región F, los rayos VHF nunca son perpendiculares al campo magnético para latitudes aurorales. Para estudiar dicha región, frecuencias HF mayores a la frecuencia crítica de la capa F pueden ser empleados en dado caso sean refractados en la región F para ser perpendiculares al campo.

3.4.4. Radares Incoherentes

El sistema de sondeo ionosférico más potente es el radar incoherente, el cual mide densidades de electrones, temperaturas de ion y electrón, composición de iones, así como velocidades de iones y electrones en la capa E y F siendo con menor resolución para la capa E. Debido al extremadamente alto costo de construcción, únicamente existen cinco estaciones dedicadas al estudio mediante radares incoherentes. Estas estaciones son Jicamarca (Perú) en 1961, Arecibo (Puerto Rico) en 1963,

Estación	Ubicación	Organización	Fecha de Construcción
Jicamarca	Perú	Instituto Geofísico del Perú Universidad Cornell National Science Foundation	1961
Arecibo	Puerto Rico	Universidad Metropolitana National Science Foundation	1963
Saint Santin	Francia	Centro de Estudios de Telecomunicaciones (CNET) Agencia Espacial Europea	1965
Chatanika	Alaska, trasladada a Groenlandia en 1984	Stanford Research Institute National Science Foundation	1972
EISCAT	Noruega	Agencia Espacial Europea	1979

Tabla 11. Estaciones dedicadas al estudio mediante radares incoherentes.

3.5. Factibilidad Económica

El factor económico juega un papel determinante en la implementación de un sistema ya que este debe estar acorde al presupuesto disponible del interesado. En el presente apartado se muestra la evaluación de los sistemas mostrados anteriormente desde el punto de vista económico, teniendo en cuenta el equipo disponible en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador.

3.5.1. Ionosonda de Incidencia Oblicua

3.5.1.1. *Recepción de la Señal*

En la etapa de recepción de la señal se muestran dos alternativas de diseño relacionadas principalmente con la capacidad de operación del radio receptor en función de la frecuencia de trabajo. Por lo que se presenta un incremento considerable en el costo de implementación al requerir un transceptor con mayor robustez y un acoplador con gran capacidad de saltos de frecuencia.

Alternativa	Equipo Por Adquirir	Equipo Disponible	Costo Total
Radio con Frecuencia Fija	\$4,000.00	\$4,000.00	\$0.00
Radio con Frecuencia Variable	\$6,250.00	\$3,300.00	\$2,950.00

Tabla 12. Comparación de costo total de alternativas para recepción de señales de sondeo ionosférico.

3.5.1.2. *Análisis de la Señal*

Para el análisis de la señal se presentan tres alternativas de software entre las que encontramos aplicaciones de libre uso y aplicaciones de propietario. La adquisición de dichas licencias encarece enormemente la implementación de dicha alternativa. A su vez, se toma en consideración el equipo necesario para la comunicación con la etapa de recepción. En el caso del software SAO-X, es de notar que requiere de un programa adicional para la comunicación con el radio receptor debido a su uso especial de modelo de datos y que carece de interfaz con radios.

Alternativa	Equipo Por Adquirir	Equipo Disponible	Costo Total
ChirpView	\$530.00	\$400.00	\$130.00
SAO-X	\$0.00	\$0.00	\$0.00
LabView	\$4,030.00	\$600.00	\$3,430.00

Tabla 13. Comparación de alternativas para análisis de señales adquiridos mediante ionosondas.

3.5.2. Ionosonda de Incidencia Vertical

Igualmente se muestran las alternativas de un sistema de sondeo ionosférico activo contemplando una etapa de emisión de la señal. Como se detalló en el apartado anterior, la primera alternativa consiste en un sistema de propietario comprendido de emisor y receptor siendo comercializado por la empresa Lowell Digisonde International (LLC) mientras que los otros dos son propuestas de diseño de ionosondas de incidencia vertical que presentan baja potencia de emisión y relativa facilidad en la adquisición del equipo necesario utilizando modulación en FM y haciendo uso de equipo digital para lograr un procesamiento más óptimo en la emisión y recepción de las señales ionosféricas.

Alternativa	Equipo Por Adquirir	Equipo Disponible	Costo Total
Digisonde Technologies	\$6,700.00	\$0.00	\$6,700.00
George Barry	\$1,965.00	\$1,265.00	\$700.00
P.D. Kothekar, S.D. Shelke, A.P. Khandare	\$1,890.00	\$0.00	\$1,890.00

Tabla 14. Comparación de alternativas para la implementación de un sistema de sondeo de incidencia vertical activo.

4. Sistema de Sondeo Ionosférico Sugerido

4.1. Finalidad del Sistema de Sondeo Ionosférico

Las aplicaciones actuales de los sistemas de sondeo ionosférico se agrupan en dos categorías.

- Soporte para sistemas funcionales, incluyendo comunicaciones de radio de onda corta y sistemas de radar. Este soporte consiste en predecir las frecuencias de propagación en ciertos periodos de tiempo en el futuro en determinadas áreas. Puede ser utilizado también para brindar actualizaciones en tiempo real (en intervalos de 15 minutos) para detectar condiciones reales que pueden servir para optimizar los parámetros de operación del sistema.
- Investigación científica con el objetivo de mejorar la predicción de las condiciones ionosféricas y en el estudio de las propiedades físicas del plasma atmosférico y solar. De igual forma comprender el comportamiento del campo magnético con relación al efecto de los vientos solares.

Ha habido un efecto considerable en la producción de modelos globales de densidades ionosféricas, constitución química entre otras. Dado que, con una red de sondeo comprendida de varias Ionosondas separadas por menos de 500 km pueden entregar un estimado del comportamiento de la ionósfera en un radio de 250 km. Por dicha razón, el aumento de estaciones de sondeo ionosférico provee datos más puntuales del comportamiento de la atmósfera y mejora la precisión del modelo.

4.2. Evaluación del Equipo Disponible en Escuela de Ingeniería Eléctrica

En el presente apartado, se muestra un detalle del equipo existente en la Escuela de Ingeniería Eléctrica el cual puede ser utilizado para la implementación de un sistema de sondeo ionosférico.

4.2.1. Transceptor Kenwood TS-50S

Un transceptor es un dispositivo que puede trabajar tanto de transmisor como de receptor, también llamado radio. El equipo existente en la EIE es de marca Kenwood modelo TS-50S. Es un transceptor en la banda HF con un rango de bandas de 500 kHz a 30 MHz con la capacidad de trabajar en los siguientes modos de modulación; Lower SideBand (LSB), Upper SideBand (USB), Continuous Wave (CW), Amplitude Modulation (AM) y Frequency Modulation (FM).

El equipo también contiene un Sintetizador Digital Directo (Direct Digital Synthesizer o DDS) con control de lógica de paso permitiendo pasos de hasta 5 Hz con gran movilidad. El

DDS es un método empleado para crear formas de onda arbitrarias con base a una referencia de reloj de una sola frecuencia fija. Es empleado para generadores, sintetizadores de sonido y moduladores.

Otras características que incluye el dispositivo son:

- Capacidad de reducir el nivel de ruido con un rango dinámico de hasta 105 dB
- Reducción de interferencia comprensiva
- Modulación inversa de onda continua (CW) el cual permite invertir la interferencia de una señal CW permitiendo la recepción por ambos lados.
- Eliminación de ruido blanco.
- Control de ganancia automático (AGC) configurable para todos los modos de operación.
- Cambio de frecuencia intermedia del filtro pasa banda, permitiendo maximizar la ganancia y mejorar la relación señal a ruido.
- Filtro de interferencias de pulsos electrónicos.
- Atenuador de RF de 20 dB.
- 100 canales de memoria con parámetros como frecuencia, modo y tipo de filtro.
- Salida de potencia RF ajustable (100 W, 50 W, 10 W)
- Capacidad de trabajo en auto-modo
- Dimensiones de 179 x 60 x 233 mm (W x H X D)

4.2.1.1. Acoplador de antena automático Kenwood® de 50Ω para TS-50

Un acoplador es un elemento que adapta la antena a la impedancia de la línea. Es empleado cuando la comunicación requiere de un gran ancho de banda permitiendo una sola antena recibir las diferentes frecuencias. También puede ser utilizado cuando se hace uso de una antena fuera de su frecuencia de diseño. Su función específica es transformar la impedancia de la línea de transmisión al valor de impedancia del radio, en el caso del acoplador a una impedancia de 50 Ω.

4.2.2. Antenas

4.2.2.1. Antena dipolo plegada multibanda, low noise T2FD, 90 ft (27.43 m)

Para la emisión/recepción de una señal, la antena debe estar diseñada para trabajar en una frecuencia específica. Dicho diseño implica que la antena debe de estar relacionada a la longitud de onda a la frecuencia de trabajo. Considerando que la señal buscada está entre las frecuencias de 0.5 MHz a 30 MHz, calculamos la longitud de onda para una frecuencia intermedio de 12.5 MHz.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300}{12.5} = 24 \text{ m}$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío.

Para el uso de la antena T2FD (tilted terminated folded dipole), se debe colocar en forma diagonal y plegarse horizontalmente. El cálculo de la longitud en metros se calcula de la siguiente forma.

$$\text{Longitud Total (m)} = \frac{50}{\text{frecuencia más baja } f(\text{MHz})}$$

Modificamos la ecuación para obtener la frecuencia más baja que puede soportar la antena de 27.43 metros.

$$\text{Frecuencia} = \frac{50}{\text{longitud total}} = \frac{50}{27.43} = 1.82 \text{ MHz}$$

Por lo que la antena es capaz para trabajar con frecuencias mayores a 1.82 MHz.

Para la frecuencia mínima de operación utilizando la ecuación anterior tenemos que la longitud horizontal llamado también como brazo A es de 20 metros, mientras que la separación entre ambos brazos es de 0.6 metros. Para su instalación se debe colocar con 30° de inclinación desde el nivel del piso por lo que se requiere un espacio libre de obstáculos de al menos 17.2 metros que representa la distancia horizontal que cubre la antena.

De igual forma requiere cuatro pararrayos punta franklin con 5 metros de elevación para asegurar la protección de la antena contra descargas eléctricas y conectado a una red de tierra sólida. Dichas condiciones pueden ser encontradas en el techo del edificio de potencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica que se encuentra, a su vez, ubicado a pocos metros del centro de cómputo por lo que se encuentra en una posición idónea para instalar la antena.

4.2.2.2. Antena vertical de 3 ft (0.9144 metros)

Aplicando la fórmula de la longitud de onda de una señal, podemos calcular la frecuencia más baja que podemos captar con la antena vertical de 0.91 metros.

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{300}{0.9144} = 328.08 \text{ MHz} = 0.328 \text{ GHz}$$

Como se puede observar, la antena vertical de 3 pies tiene una frecuencia de trabajo de 82 MHz a un cuarto de la longitud de onda, no puede ser utilizada para la recepción de señales de sondeo ionosférico cuya frecuencia mayor es 30 MHz. De igual forma para la emisión de señales, su longitud debe ser de la media longitud de onda como mínimo, por lo que su uso queda descartado.

4.2.3. Computadora

Existe un centro de cómputo en la escuela de ingeniería eléctrica con un total de 7 computadoras con sistema operativo Windows 8. Estas computadoras tienen un procesador Intel I5 con 16 GB de memoria RAM. Por lo que tienen la capacidad de manejar la mayoría de los programas actuales sin problemas.

4.3. Descripción del Sistema Recomendado

Para la selección del sistema a implementar se debe considerar tanto la capacidad económica de la institución que la implementará, así como la infraestructura disponible y el mantenimiento que debe brindarle a ésta. En el caso de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, se recomienda principalmente el uso de alternativas de bajo costo y que a su vez requieran de poco mantenimiento.

Como se mencionó en apartados anteriores, tanto las ionosondas de incidencia oblicua y las ionosondas de incidencia vertical cumplen las finalidades de un sistema típico de sondeo ionosférico. A su vez, dichas finalidades se acoplan a las necesidades como país para la determinación del error en la posición de señales GNSS.

La forma más extendida de sondeo ionosférico es mediante el sistema de propietario, el cual, dadas la gran capacidad de análisis de la herramienta, está más orientada a un ente que posea una gran capacidad de financiamiento o que obtenga rentabilidad en el estudio de la ionosfera debido a su alto costo de implementación y mantenimiento. Por esta razón es que se descarta la opción de adquirir un sistema propietario.

Otras alternativas al sistema propietario, es la ionosonda de incidencia vertical análoga y la ionosonda de incidencia vertical digital con DDS. Si bien, ambas se han diseñado como parte de estudios por universidades, la etapa obligatoria de emisión de la señal dificulta grandemente su implementación. Esto se debe a que la antena a utilizar como emisora debe ser de una longitud considerable dada las frecuencias de trabajo que se emplearán. Aunado a esto, los amplificadores de potencia incrementan el costo tanto de implementación como el de mantenimiento significando hasta un 60 o 70 por ciento del costo total del sistema.

Este problema se solventa utilizando ionosondas de incidencia oblicua, la cual puede trabajar utilizando emisoras ya existentes, debido a que existen dos emisoras manejadas por la Agencia Nacional Oceánica y Atmosférica (Estados Unidos), una ubicada en Soto Cano, Honduras y la otra en Puerto Rico con potencia suficiente y distancia adecuada para recibir la señal en cualquier punto de nuestro país. Con esto, queda solventada la necesidad de emitir una señal, permitiendo así, reducir considerablemente los costos. En este punto, aún existen dos alternativas, el uso de un transceptor con capacidad de hacer barridos de frecuencia de forma óptima, o uno que se mantenga en una frecuencia estática. Ya que la escuela de ingeniería eléctrica cuenta con un radio diseñado para trabajar en las frecuencias HF, pero no tiene la capacidad de hacer saltos de frecuencia a la tasa deseada, la opción más viable es el uso de un radio con frecuencia fija y relegar el análisis de señal al software.

El software que se ajusta a las necesidades antes expuestas es el ChirpView, ya que está diseñado para ser usado por radioaficionados con estaciones receptoras de bajo costo. Este software es de libre uso, y puede ser instalado en cualquier computadora, incluso en equipos de baja gama en estándares actuales. A su vez, el uso de memoria o procesamiento es bajo por lo que se pueden ejecutar otras tareas de análisis o de publicación de resultados sin afectar los datos obtenidos.

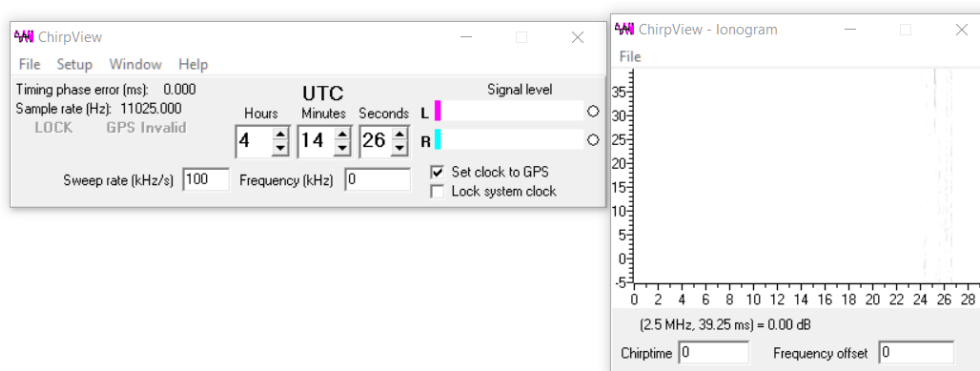


Figura 24. Software ChirpView instalado en SO Windows 10.

En resumen, la estación más apropiada a implementar en la EIE es una ionosonda de incidencia oblicua utilizando señales emitidas por diversas ionosondas implementadas por

terceros en la región, dejando la implementación de la etapa de emisión como una posibilidad de mejora a futuro, en caso de existir mejores condiciones económicas.

Para la etapa de recepción de la señal se debe colocar la antena T2FD existente en la escuela, ajustada con sus brazos horizontales a 8.6 metros de cada lado, con separación vertical de 0.6 metros. Debe estar inclinada a 30° para asegurar su funcionamiento óptimo. La ubicación más apropiada es en el techo del edificio de potencia ya que es una zona libre de obstáculos, con espacio suficiente para su instalación, cercanía al centro de cómputo existente y con una red de tierra instalada. El radio receptor se puede ubicar dentro del centro de cómputo utilizando un cable coaxial apropiada para comunicarse con la antena, así como un balún de con relación de 1:4. El radio debe colocarse en la frecuencia intermedia de operación, siendo esta 17.5 MHz conectado a su respectiva fuente de alimentación con su salida de audio conectada a la entrada de línea de la computadora. Es de notar que el sistema requiere una fuente de alimentación de respaldo debido a que un corte en red de distribución eléctrica puede significar pérdida de mediciones y afectar negativamente la recolección de datos. Igualmente, al existir un corte de suministro eléctrico, el sistema se debe encender manualmente.

En la etapa de análisis de la señal, se tendrá una computadora con el software ChirpView instalado, configurado con los parámetros de la señal correspondiente tales como los saltos de frecuencia, la frecuencia de inicio y el periodo de Chirp. Además, debe estar configurado para guardar automáticamente los ionogramas generados permitiendo su análisis en tiempo real y a su vez generar una base de datos.

Estas configuraciones permiten la obtención de datos que pueden ser utilizados para emplear técnicas de corrección del error en las señales de posicionamiento GNSS en tiempo real. De igual forma, con la generación de una base de datos de mediciones en el país en el trascurso de dos años como mínimo, es posible realizar estudios enfocados en el comportamiento de la ionosfera en la región y obtener un modelo ionosférico capaz de estimar el comportamiento futuro de ésta. Igualmente, la implementación de este sistema permitiría realizar avances tecnológicos en el campo de la geolocalización permitiendo expandir su uso con altos índices de confiabilidad en las mediciones, siendo esta una opción viable en zonas de difícil acceso o en aplicaciones como vehículos con correcciones de posicionamiento mediante señales VHF como es el ADS-B empleado en aeronaves.

5. Conclusiones y Recomendaciones

El incremento en el uso de señales GNSS y lo delicado de los servicios asociados a ello, hacen necesario que se dispongan de mecanismos para asegurar la calidad de tales señales; uno de esos mecanismos, es la medición del retardo en la propagación a través de la ionosfera, y como se ha visto a lo largo del presente documento, en la EIE se cuenta con lo necesario para implementar un sistema que realice dicha función, lo que facilitaría la obtención de información en la región centroamericana.

El uso de una ionosonda de incidencia oblicua es el recomendado para su utilización en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UES debido a que el alcance (o finalidad) del sistema, los costos de implementación y de mantenimiento son los más asequibles.

Como se ha mencionado, Honduras (al igual que Puerto Rico) cuenta con estaciones generadoras de señales Chirp, lo que facilita los procesos de caracterización del comportamiento de la ionosfera en Centro América; de la información considerada a lo largo del presente trabajo, se desprende que una de estas estaciones, se podría instalar en El Salvador, lo que permitiría contribuir a apoyar este tipo de estudios.

Es factible la implementación de un sistema recepción de señales Chirp para la captación de errores ionosféricos en la EIE, presentando un costo total de 130 USD, permitiendo generar datos que pueden ser utilizados para elaborar un modelo de corrección de errores de propagación, el cual sería de gran utilidad para muchos organismos y empresas a nivel nacional.

La implementación de una estación para la caracterización de la variación de la ionosfera en nuestro país contribuiría a fortalecer la seguridad en el transporte aéreo de la región, ya que facilitaría información que podría ser utilizada en planes de ampliación de servicios de navegación GNSS.

6. Bibliografía

- Gende, M. A. (2002). Mapas ionosféricos derivados de observaciones GPS para aplicaciones geodésicas e investigaciones geofísicas.
- Jursa, A. S. (1985). *Handbook of geophysics and the space environment* (Vol. 1). Hanscom Air Force Base, MA: Air Force Geophysics Laboratory, Air Force Systems Command, United States Air Force.
- Martinez, P. (2000). Chirps: a new way to study HF propagation, pt. 1. *Radio Communication*, 76(7), 22-4.
- Martinez, P. (2000). Chirps: a new way to study HF propagation, pt. 2. *Radio Communication*, 76(8), 23-5.
- de Boer, Pieter-Tjerk, Chirp Reception and Interpretation (2013); <http://websdr.ewi.utwente.nl:8901/chirps/article/>
- McClellan, J. H., & Yoder, M. A. (1997). *DSP first: A multimedia approach*. Prentice Hall PTR.
- Flandrin, P. (2001, March). Time frequency and chirps. In *Wavelet Applications VIII* (Vol. 4391, pp. 161-176). International Society for Optics and Photonics.
- Smith, S. W. (1997). The scientist and engineer's guide to digital signal processing.
- Samama, N. GNSS Navigation Signals: Description and Details.
- Chen, X., Parini, C. G., Collins, B., Yao, Y., & Rehman, M. U. Fundamentals of GNSS.
- Brierley-Green, A., (2017). Global Navigation Satellite System Fundamentals and Recent Advances in Receiver Design. Maxim Integrated Inc.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2007). *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media.
- Pozo-Ruz, A., Ribeiro, A., García-Alegre, M. C., García, L., Guinea, D., & Sandoval, F. (2000). Sistema de posicionamiento global (GPS): Descripción, análisis de errores, aplicaciones y futuro. *ETS ingenieros de Telecomunicaciones. Universidad de Malaga*.
- Gatica Acevedo, V. J. (2012). Propuesta de un sistema de monitoreo GNSS para México. Instituto Politécnico Nacional.
- Brunini, C., & Azpilicueta, F. (2008). Evaluación experimental de la corrección ionosférica y de su integridad para un sistema tipo SBAS en Centro y Sur América. *Física de la Tierra*, 20, 83.
- Aircservices. (2018), Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS); <http://www.airservicesaustralia.com/projects/satellite-based-augmentation-systems-sbas/>
- Federal Aviation Administration. (2010). Fact Sheet – Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B); https://www.faa.gov/news/fact_sheets/news_story.cfm?newsid=7131
- Díaz Vargas, P. A., & Vázquez Gutiérrez, S. (2015). Estudio del retardo provocado por la ionosfera en una señal GNSS. Instituto Politécnico Nacional

- James J. Spilker Jr., Penina Axelrad, Bradford W. Parkinson, and Per Enge, "Ionospheric Effects On Gps", Global Positioning System: Theory and Applications, Volume I, Progress in Astronautics and Aeronautics, pp. 485-515.
- Samama, N. (2008). "GNSS System Descriptions," in Global Positioning: Technologies and Performance.
- Magdaleno Torras, S. (2014). *Anomalías espacio-temporales de la ionosfera y su repercusión en las comunicaciones satelitales*, disertación doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- Recomendación UIT-R P.531-4, Datos de Propagación Ionosférica y Métodos de Predicción Requeridos Para el Diseño de Servicios y Sistemas de Satélites, Unión Internacional de Telecomunicaciones.
- Ezquer, R. G., & Radicella, S. M. (2008). Ionosfera de bajas latitudes: efectos sobre señales de satélites recibidas en Tucumán. *Física de la Tierra*, 20, 61.
- Amarante, G. M., Alazo, K., Ciraolo, L., & Radicella, S. M. (2008). Aplicaciones en la investigación ionosférica de datos procedentes de sondeos de incidencia vertical y receptores GPS. *Física de la Tierra*, 20, 41.
- Díaz Vargas, P. A., & Vázquez Gutiérrez, S. (2015). Estudio del retardo provocado por la ionosfera en una señal GNSS. Instituto Politécnico Nacional
- Mohino Harris, E. (2006). *Análisis y mitigación del error ionosférico en los sistemas globales de navegación por satélite con receptores de una frecuencia*. Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones.
- Kenguruka, H. (2014). Estimación del error de la posición GPS por efectos ionosféricos.. Instituto Politécnico Nacional.
- Bibl, K. (1998). Evolution of the ionosonde. *Annals of Geophysics*, 41(5-6).
- Reinisch, B. W. (1986). New techniques in ground-based ionospheric sounding and studies. *Radio Science*, 21(3), 331-341.
- Chen, G., Zhao, Z., Zhang, Y., Yang, G., Zhou, C., Huang, S., ... & Sun, H. (2012). Application of the oblique ionogram as vertical ionogram. *Science China technological sciences*, 55(5), 1240-1244.
- Khmyrov, G. M., Galkin, I. A., Kozlov, A. V., Reinisch, B. W., McElroy, J., & Dozois, C. (2008, February). Exploring digisonde ionogram data with SAO-X and DIDBase. En *AIP Conference Proceedings* (Vol. 974, No. 1, pp. 175-185). AIP.
- Galkin, I. A., Khmyrov, G. M., Reinisch, B. W., & McElroy, J. (2008, February). The SAOXML 5: New format for ionogram-derived data. En *AIP Conference Proceedings* (Vol. 974, No. 1, pp. 160-166). AIP.
- Hunsucker, R. D. (2013). *Radio techniques for probing the terrestrial ionosphere* (Vol. 22). Springer Science & Business Media.
- Reinisch, B. W., Galkin, I. A., Khmyrov, G. M., Kozlov, A. V., Lisysyan, I. A., Bibl, K., & Luo, Y. (2008, February). Advancing digisonde technology: The DPS-4D. En *AIP Conference Proceedings* (Vol. 974, No. 1, pp. 127-143). AIP.
- Barry, G. H. (1971). A low-power vertical-incidence ionosonde. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 9(2), 86-89.

- Kothekar, P. D., Shelke, S. D., & Khandare, A. P. (2012). Transmitter Chain for HF radar ie Ionosonde using Direct Digital Synthesizer. *thought*, 2(3), 2192-2195.

Apéndice A. Especificaciones de Equipos

I. Transceptor Kenwood TS-50S

GENERAL	
Mode	A1A (CW), J3E (SSB), A3E (AM), F3E (FM)
Memory channels	100
Antenna impedance	50 Ω
Power requirement	13.8 V DC \pm 15%
Power consumption	
Receive (no signal)	1.45A
Transmit (max.)	20.5A
Temperature range	-20 °C – + 60 °C
Frequency stability	Within $\pm 10 \times 10^{-6}$ (-10 °C – +50 °C) Within $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ (-10 °C – +50 °C with SO-2)
Dimensions (W x H x D) [Projections not included]	179 x 60 x 233 mm
Weight (approx.)	2.9 kg
TRANSMITTER	
Frequency range (*Europe type, **Belgium type)	
160m band	1.8/1.81*/1.83** to 1.85**/2.0 MHz
80m band	3.5 to 3.8*/4.0 MHz
40m band	7.0 to 7.1*/7.3 MHz
30m band	10.1 to 10.15 MHz
20m band	14.0 to 14.35 MHz
17m band	18.068 to 18.168 MHz
15m band	21.0 to 21.45 MHz
12m band	24.89 to 24.99*/25.0 MHz
10m band	28.0 to 29.7 MHz
Output power	
SSB/CW/FM	100 W
AM	25 W
Modulation	
SSB	Balanced modulation
FM	Reactance modulation
AM	Low-power modulation
Spurious radiation	Less than -50 dB
Carrier suppression	More than 40 dB
Unwanted sidebands suppression	More than 40 dB
Maximum frequency deviation (FM)	\pm 5 kHz
Frequency response (SSB)	400 – 2600 Hz (less than -10 dB)
Microphone Impedance	600 Ω

RECEIVER

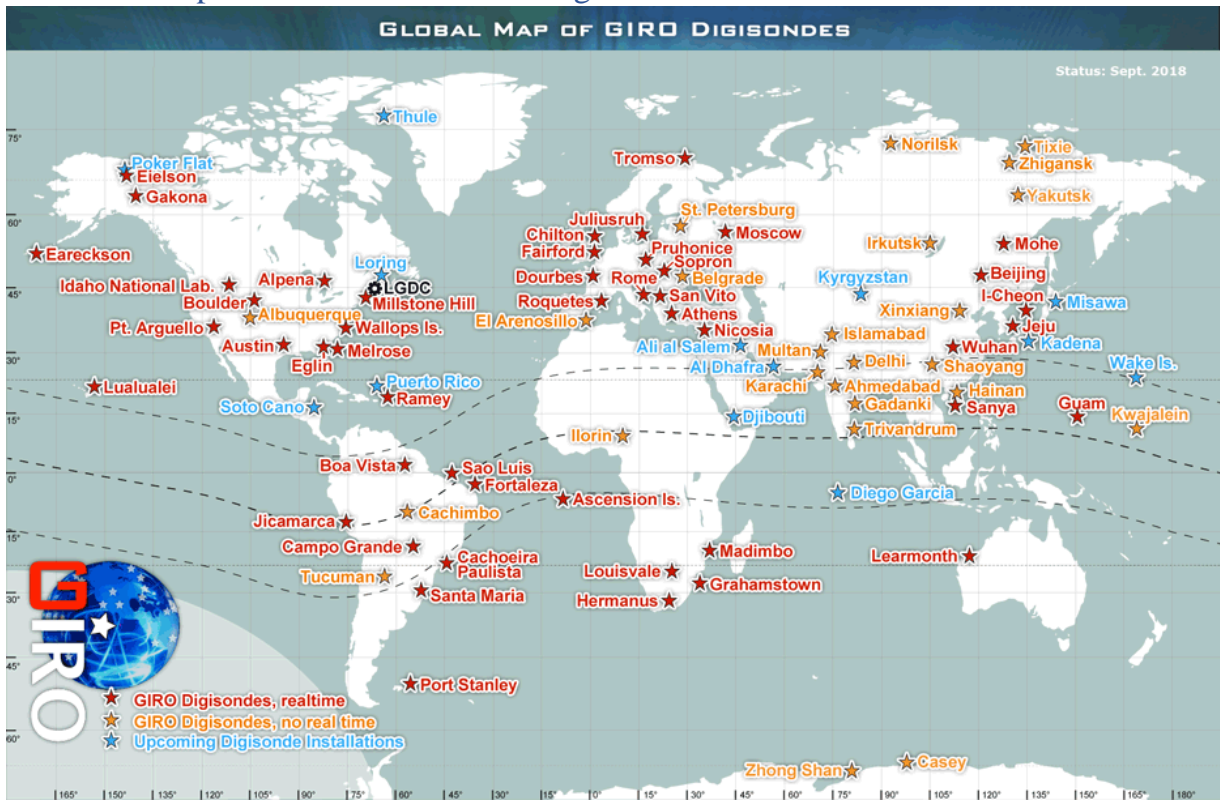
Circuitry	
SSB/CW/AM	Double conversion system
FM	Triple conversion system
Frequency range	500 kHz – 30 MHz
Intermediate frequency	
1st IF	73.045 MHz
2nd IF	10.695 MHz
3rd IF	455 kHz (FM only)
Sensitivity	
SSB/CW (at 10 dB S+N/N, 500 kHz – 30 MHz)	Less than 0.25 μ V
AM (at 10 dB S+N/N, 500 kHz – 30 MHz)	Less than 2.5 μ V
FM (at 12 dB SINAD, 28 – 30 MHz)	Less than 0.5 μ V
Selectivity	
SSB/CW	More than 2.2 kHz (-6 dB), Less than 4.8 kHz (-60 dB)
AM	More than 5 kHz (-6 dB), Less than 40 kHz (-60 dB)
FM	More than 12 kHz (-6 dB), Less than 25 kHz (-50 dB)
Image ratio	More than 70 dB
IF rejection	More than 80 dB
RIT variable range	More than \pm 1.1 kHz
Squelch sensitivity	
SSB/CW/AM (500 kHz – 30 MHz)	Less than 2 μ V
FM (28 – 30 MHz)	Less than 0.32 μ V
Audio output power	2W (8 Ω at 5% distortion)
Audio output impedance	8 Ω

II. Digisonde DPS-4D

Quad Receiver	
Frequency Range	0.5 – 30 MHz (all modes of operation)
Bandwidth	34 kHz @ 3 dB
Input Impedance	50 Ω
Noise Figure	11 dB (at receiver antenna preamplifier)
Receiver Sensitivity	-130 dBm (+/-6 dB) into main chassis; better at preamplifier (amount depending on preamp gain setting)
Dynamic Range	>90 dB instantaneous >140 dB total operating range including gain control
Recovery Time	40 μ s
Output	16-bit quadrature samples
RF Output	
Frequency Scan	0.5 - 30 MHz, start, stop and step size selectable to 1 kHz
Restriction of Transmission	Programmable list of frequencies without RF transmission
Ionogram Scan Time	Standard VIS ionogram 2 - 200 sec (varies with programmable settings)
Frequency Synthesis	Fully digital (frequency switching time < 1 μ s)
Pulse Repetition Rate	100 and 200 pps
Pulse Width	533 μ s (16 chips of 33 μ s) waveform with 30 kHz signal bandwidth
Peak Pulse Power	2 channels @ 150 W each
Output Impedance	50 Ω
Transmitter Type	Dual RF MOSFET Amplifiers for polarized transmission using turnstile transmit antenna
Lightning Protection	In-line spark gap discharge devices
User Interface	
Unattended operation	Controlled by 128 measurement programs, 128 schedules, automatic schedule switch rules and preprogrammed campaign events
Remote access & control	Network TCP/IP) interface for Input/Output access to schedules, measurement data, diagnostic data, and operating software. Standard Remote Control Interface uses Microsoft Remote Desktop over Internet or LAN.
Time Setting	Integrated GPS receiver keeps time to +/-25 μ s
Built-in-Test (BIT)	Full diagnostics to isolate failures to line replaceable units runs automatically, remotely accessible
Self Calibration	Built-in internal cal automatically updates phase/ amplitude adjustment tables. Remotely accessible results.
Signal Processing	
Processors	Two Embedded Intel Core 2 Duo Dual Core processor SBCs (Control and Data Platforms)
# of Range Bins	Selectable: 256 or 512
Height Range	0-1200 km (0 km used for self-calibration)
Height Resolution	2.5 km sample spacing 500 m using differential phase technique
RF Interference Mitigation	RFIM reduces coherent interference up to 35 dB
Waveform Processing	Pulse compression of 16-chip phase code provides 15 dB signal processing gain
Doppler Processing	4 to 128 integrations can provide up to 21 dB signal processing gain
Doppler Range	+/-3 Hz to +/-50 Hz
Doppler Resolution	.0125 to 12.5 Hz
Amplitude Resolution	< 0.01 dB
Wave Polarization	Alternating transmission with O and X, synchronized receive antenna polarizations (doubles reliability of O/X identification by ARTIST). Linear polarization on request.

Apéndice B.

I. Mapa Global de Estaciones Digisonde



Apéndice C. DDS para Chirp Digitales.

Un tipo de aplicación DDS es dedicado a la generación digitales Chirp, empleado en osciladores de barrido. Los generadores Chirp generan una señal FM que es completamente sintetizada y, por lo tanto, alcanza una linealidad y precisión que no es posible con técnicas análogas regulares. La síntesis digital de la forma de onda Chirp se basa en el hecho que un tiempo cuadrático base puede ser generado en forma numérica en alta velocidad aplicando únicamente sumas.

$$\phi(t) = C * t^2 + B * t + A$$

El generador digital Chirp es similar a un sintetizador directo digital normal, pero incluye un acumulador dual. Las salidas del acumulador son guardadas en registros. En la tabla se muestran los contenidos del registro (R1) y los dos registros de salida de acumuladores de fase (R2 y R3) para los primeros ciclos de reloj en una secuencia del generador Chirp. Esto ilustra el proceso de una generación de tiempo base cuadrático. Después de la inicialización del registro, el resultado de R2 (o R3) en cada ciclo de reloj son obtenidos de la suma de los datos guardados si mismo y en R1 del ciclo anterior. La frecuencia inicial, B, y la tasa de barrido, C, son cargadas en los registros de forma asíncrona y mantenidas hasta que la señal de disparador Chirp es recibida.

Clock cycle	R1 Rate	R2 (Frequency)	R3 (Phase)
Initial values	$2C$	$C + B$	A
1	$2C$	$3C + B$	$1^2 C + 1B + A$
2	$2C$	$5C + B$	$2^2 C + 2B + A$
3	$2C$	$7C + B$	$3^2 C + 3B + A$
4	$2C$	$9C + B$	$4^2 C + 4B + A$
⋮	⋮	⋮	⋮
n	$2C$	$(2n + 1)C + B$	$n^2 C + nB + A$

La tasa de Chirp es perfecta con la consideración que siempre existe un nivel de cuantificación digital, es decir, se tienen pasos mínimos de frecuencia (usualmente menores a 2 Hz). Otro problema es el retraso de grupo del filtro pasa bajas, especialmente en el límite superior de la banda. Si existe la necesidad de corrección del retraso de grupo, se debe colocar un ecualizador de fase.

Apéndice D. Antenas T2FD

Una antena T2FD (Tilted Terminated Folded Dipole) es una antena de onda corta desarrollada en los años 40 por la Marina de los Estados Unidos. Se desempeña relativamente bien sobre un amplio rango de frecuencia, sin puntos muertos perceptibles en términos de frecuencia, dirección o ángulo de radiación sobre el horizonte.

Aunque de rendimiento inferior en términos eléctricos con relación a las antenas elaboradas para una frecuencia estática, su desempeño general, tamaño relativamente pequeño, bajo costo y el hecho que no requiere mayor equipo electrónico para operar con un transmisor de onda corta estándar, han hecho que sea muy utilizada en las comunicaciones de onda corta profesionales. También, desde los años 80, operadores de radio amateurs emplearon esta antena específicamente para recepción de difusiones y comunicación de doble vía tales como el código morse y el PSK31, donde es importante mantener una señal constante. Igualmente han existido afirmaciones que las antenas T2FD es insensible a las interferencias de radio hechas por interacción humana, siendo útil en ambientes urbanos, donde un nivel de ruido bajo es preferible a una alta potencia de la señal recibida.

Una antena T2FD típica es construida por dos conductores en paralelo:

- Con su longitud igual a $1/3$ de la longitud de onda más baja a recibir.
- La distancia entre ambos conductores igual a $1/100$ de la longitud de onda, mantenida por la cantidad de clavijas aislantes.
- Dos clavijas en los extremos unidas por cables aislantes como soportes.
- Ambos conductores conectados en los extremos por segmentos de cable soportados por las dos clavijas finales.
- Alimentado al medio del conductor inferior, con una impedancia en el orden de los 200Ω , balanceado mediante un balun 4:1 estándar. Esto provee una operación aceptable para todas las frecuencias con cable coaxial de 50Ω
- Cortado en la mitad del conductor superior con una resistencia de 400Ω , diseñado para absorber al menos un tercio de la potencia aplicada del transmisor. La resistencia absorbe una porción de la potencia de RF (ya sea capturada del aire o suministrada por el transmisor) a medida que la frecuencia de operación se acerca al límite inferior de diseño.

Una antena trabajando en el rango de 5 a 30 MHz, requiere unos 20 m de largo y separación de 60 cm, pudiendo trabajar como receptora únicamente, recibiendo hasta la mitad de la frecuencia de diseño menor (2.5 MHz) satisfactoriamente.

Las fórmulas para calcular las dimensiones de una antena T2FD son las siguientes.

- 6.1. La longitud de cada brazo “A” desde el centro considerando la frecuencia más baja de operación.

$$\text{Longitud brazo } A \text{ (m)} = \frac{50}{f \text{ (MHz)}}$$

- 6.2. El espacio de separación entre ambos brazos “A”.

$$\text{Longitud de } B \text{ (m)} = \frac{3}{f \text{ (MHz)}}$$

- 6.3. El ángulo de inclinación para un patrón no direccional debería ser lo más cercano a 30 grados, pero se considera aceptable en un rango entre 20 y 40 grados.