

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

Desarrollo de Radar HF Marino basado en Radio Definida por Software

ENRIQUE ALEXIS CARRASCO BERNALES

Tesis presentada al Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción para optar al Título Profesional de Geofísico.

Profesor Tutor: Elias Ovalle Comisión: James Morales, Fernando Cortés Enero, 2019 Concepción, Chile © ENRIQUE ALEXIS CARRASCO BERNALES © 2018 por Enrique Alexis Carrasco Bernales

Se autoriza la reproducción total o parcial con fine académicos, por cualquier medio o procedimiento incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Índice general

1.	Intr	oducción		1
	1.1.	Motivación del tra	bajo	2
	1.2.	Problema y Solucio	ón	2
	1.3.	Objetivo		3
	1.4.	Descripción del tra	bajo	3
2.	Esta	ado del Arte y an	tecedentes teóricos	5
	2.1.	Estado del arte $% \left({{{\rm{E}}_{{\rm{E}}}}_{{\rm{E}}}} \right)$.		5
		2.1.1. Radar Mari	no HF	5
		2.1.2. Radares HI	F marinos en Chile	8
	2.2.	Antecedentes teóri	cos	9
		2.2.1. Definiciones	s básicas	9
		2.2.2. Matriz de I	Dispersión	10
		2.2.3. Antenas .		11
		2.2.4. SDR		13
3.	Tra	bajo experimenta	1	15
3.	Tra 3.1.	b ajo experimenta Selección y búsque	l da de un lugar para instalar las antenas	15 15
3.	Tra 3.1. 3.2.	b ajo experimenta Selección y búsque Trabajo previo	l da de un lugar para instalar las antenas	15 15 18
3.	Tra 3.1. 3.2.	bajo experimenta Selección y búsque Trabajo previo . 3.2.1. Pruebas rea	l da de un lugar para instalar las antenas 	15 15 18 18
3.	Tra 3.1. 3.2.	bajo experimenta Selección y búsque Trabajo previo . 3.2.1. Pruebas rea 3.2.2. Pruebas en	l da de un lugar para instalar las antenas	15 15 18 18 19
3.	Tra 3.1. 3.2.	bajo experimenta Selección y búsque Trabajo previo . 3.2.1. Pruebas rea 3.2.2. Pruebas en 3.2.3. Pruebas rea	l da de un lugar para instalar las antenas dizadas en antiguas dependencias del TIGO laboratorio microondas de ingeniería	15 15 18 18 19 20
3.	Tra 3.1. 3.2.	bajo experimenta Selección y búsque Trabajo previo . 3.2.1. Pruebas rea 3.2.2. Pruebas en 3.2.3. Pruebas rea 3.2.4. Pruebas co	I I da de un lugar para instalar las antenas I da de un lugar para instalar las antenas I alizadas en antiguas dependencias del TIGO I alizadas en antiguas dependencias del TIGO I alizadas en CePIA I ali	15 18 18 19 20
3.	Tra ¹ 3.1. 3.2.	bajo experimenta Selección y búsque Trabajo previo . 3.2.1. Pruebas rea 3.2.2. Pruebas en 3.2.3. Pruebas rea 3.2.4. Pruebas co observatorio	I I da de un lugar para instalar las antenas I da de un lugar para instalar las antenas I dizadas en antiguas dependencias del TIGO I alizadas en antiguas dependencias del TIGO I alizadas en CePIA I n balun utilizado por un radar ionosférico en el I o de Chillán I	 15 18 18 19 20 22
3.	Tra 3.1. 3.2.	bajo experimenta Selección y búsque Trabajo previo . 3.2.1. Pruebas rea 3.2.2. Pruebas en 3.2.3. Pruebas rea 3.2.4. Pruebas co observatorio 3.2.5. Elección de	I I da de un lugar para instalar las antenas I da de un lugar para instalar las antenas I alizadas en antiguas dependencias del TIGO I alizadas en CePIA I n balun utilizado por un radar ionosférico en el I o de Chillán I la frecuencia de trabajo I	 15 15 18 19 20 22 23
3.	Tra 3.1. 3.2. 3.3.	 bajo experimenta Selección y búsque Trabajo previo . 3.2.1. Pruebas rea 3.2.2. Pruebas en 3.2.3. Pruebas rea 3.2.4. Pruebas co observatoria 3.2.5. Elección de Montaje de las ant 	I Image: definition of the second state	 15 18 19 20 22 23 24
3.	Tra 3.1. 3.2. 3.3.	bajo experimenta Selección y búsque Trabajo previo . 3.2.1. Pruebas rea 3.2.2. Pruebas en 3.2.3. Pruebas rea 3.2.4. Pruebas co observatoria 3.2.5. Elección de Montaje de las ant 3.3.1. Antenas Tr	I Image: da de un lugar para instalar las antenas Image: data antenas Image: dat	 15 18 19 20 22 23 24 27
3.	Tra 3.1. 3.2. 3.3.	 bajo experimenta Selección y búsque Trabajo previo . 3.2.1. Pruebas rea 3.2.2. Pruebas en 3.2.3. Pruebas rea 3.2.4. Pruebas co observatoria 3.2.5. Elección de Montaje de las ant 3.3.1. Antenas Tr 3.3.2. Antenas Real 	I Image: da de un lugar para instalar las antenas Image: da de un lugar para instalar las antenas alizadas en antiguas dependencias del TIGO Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería alizadas en CePIA Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería alizadas en CePIA Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería In balun utilizado por un radar ionosférico en el po de Chillán Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Ia frecuencia de trabajo Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería ansmisoras Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería ansmisoras Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Image: da de ingeniería Ima	15 15 18 19 20 22 23 24 27 32
3.	Tra 3.1. 3.2. 3.3. 3.4.	bajo experimenta Selección y búsque Trabajo previo . 3.2.1. Pruebas rea 3.2.2. Pruebas en 3.2.3. Pruebas rea 3.2.4. Pruebas co observatoria 3.2.5. Elección de Montaje de las ant 3.3.1. Antenas Tr 3.3.2. Antenas Rea	I Image: Ima	 15 18 18 19 20 22 23 24 27 32 36
3.	Tra 3.1. 3.2. 3.3. 3.4.	 bajo experimenta Selección y búsque Trabajo previo . 3.2.1. Pruebas rea 3.2.2. Pruebas en 3.2.3. Pruebas rea 3.2.4. Pruebas co observatoria 3.2.5. Elección de Montaje de las ant 3.3.1. Antenas Tr 3.3.2. Antenas Rea Ajuste final del sis 3.4.1. Ajuste ópti 	I Image: da de un lugar para instalar las antenas Image: da de un lugar para instalar las antenas alizadas en antiguas dependencias del TIGO Image: da de	15 18 18 19 20 22 23 24 27 32 36 36

	3.5. Estado Final Antenas403.6. Transmisión y recepción de un pulso HF43
4.	Conclusiones y Discusión 47 4.1. Conclusiones
A	éndices 53
А.	Parámetros de sintonización53A.1. VNA53A.2. Gráficas generadas con datos de VNA54A.2.1. Gráfica S_{11} 54A.2.2. Gráfica VSWR55A.2.3. Gráfica carta Smith56
В.	Equipos 59 B.1. Periféricos SDR 59 B.1.1. RTL-SDR 60 B.1.2. Sincronización RTL-SDR 60 B.2. Equipos Radio Aficionados 61 B.2.1. ICOM IC-735 61
C.	SDR 63 C.1. SDR 63 C.1.1. GNU Radio 63 C.1.2. GNU Radio Companion 64 C.2. Creación de bloques en GNU Radio Companion 65
D.	Digitalización de señales 69 D.1. Muestreo de señales 69 D.1.1. Mixers 70 D.1.2. Muestreo IQ 71 D.2. Implementación Muestreo IQ en RTL-SDR 73
E.	FEKO E.1. Optimización con FEKO
F.	Balun 77 F.1. Líneas de Transmisión 77 F.2. Balun como adaptador de impedancias 78

ÍNDICE GENERAL	V
Acrónimos	78
Glosario	78
Bibliografía	81

VIÍNDICE GENERAL

Índice de figuras

Índice de Ilustraciones

VII

2.1.	Radar Meteorológico	6
2.2.	Radares instalados mundialmente	8
2.3.	Esquema relación de onda estacionaria	10
2.4.	Diagrama parámetros S para un dispositivo de 2 puertos	10
2.5.	Antena monopolo y patrón de radiación	12
3.1.	Lugar facilitado en Puerto Lirquén	16
3.2.	Espacio disponible en pesquera Camanchaca	16
3.3.	Lugar de instalación de antenas Tx	17
3.4.	Lugar de instalación de antenas Rx	17
3.5.	Lugar definitivo instalación antenas	17
3.6.	Periférico RTL-SDR y su antena de recepción asociada	18
3.7.	Generador de señal RF y Osciloscopio ocupados en TIGO	19
3.8.	Setup utilizado para pruebas de RTL-SDR	19
3.9.	Setup utilizado para pruebas de ICOM-735	20
3.10.	Setup utilizado caracterización antena 2G	21
3.11.	Datos obtenidos de la antena de redes 2G	21
3.12.	Pérdida retorno antena Tx Observatorio Ionosférico Chillán	22
3.13.	Pérdida retorno antena Rx Observatorio Ionosférico Chillán	23
3.14.	Ubicaciones de antenas instaladas en Camanchaca	24
3.15.	Antenas transmisoras y receptoras instaladas con medidas de Tabla 3.2	25
3.16.	Estacas de anclaje de antena	25
3.17.	Diagrama partes antena instalada	26
3.18.	Diagrama arreglo de antenas transmisoras	27
3.19.	S_{11} , ROE y carta Smith inicial de antena Tx1	28
3.20.	S_{11} , ROE y carta Smith inicial de antena Tx2	28
3.21.	S_{11} , ROE y carta Smith inicial de antena Tx3	29
3.22.	S_{11} , ROE y carta Smith inicial de antena Tx4	29
3.23.	Elementos para elaboración línea transmisión	30
3.24.	S_{12} cables de transmisión	31

3.25. Configuración geométrica de las antenas receptoras	32
3.26. Antenas receptoras	32
3.27. S_{11} , ROE y carta Smith inicial de antena Rx1	33
3.28. S_{11} , ROE y carta Smith inicial de antena Rx2	33
3.29. S_{12} cables de recepción $\ldots \ldots \ldots$	34
3.30. S_{11} inicial todas las antenas	35
3.31. Herramientas utilizadas para cortes de elemento vertical de antena.	37
3.32. Cambio en S_{11} medidos con VNA a distintos cortes del monopolo	37
3.33. Cambio en ROE medidos con VNA a distintos cortes del monopolo.	38
3.34. Carta Smith para distintas medidas del monopolo	38
3.35. Cambio de S_{11} , ROE y carta Smith en distitos ángulos de depresión	
de radiales en Tx1	39
3.36. S_{11} final antenas Camanchaca	40
3.37. ROE final antenas Camanchaca	41
3.38. Carta Smith final antenas Camanchaca	41
3.39. Equipo ICOM-735 y splitter instalados en terreno	43
3.40. Setup utilizado en Camanchaca	43
3.41. Equipos de recepción instalados y programa de GRC utilizado	44
3.42. Señal recibida en gráfico tipo cascada por antenas receptoras	44
3.43. Señal recibida en gráfica "Scope" y "FFT" de GRC	45
4.1. Tendido eléctrico y alambres al costado de las antenas	50
4.2. Waterfall de antena Rx8 de Radar Faro Haulpén	51
4.3. Esquemático modificaciones RTL-SDR para Direct-Sampling	52
A 1 Imagen frontal equipo VNA	54
A 2 Gráfica S.	55
A 3 Gráfica VSWB	56
A A Gráfica carta Smith	57
	51
B.1. RTL-SDR y su antena asociada	60
B.2. Dos RTL-SDR conectados al mismo reloj	61
B.3. ICOM-735	62
	
C.1. Aspecto tipico procesamiento GNU Radio Companion.	65
C.2. Estructura de carpetas y archivos de un bloque GRC	66
D.1. Digitalización con resolución de 4 bit	69
D.2. Uso de mixers	71
D.3. Composisión y descomposición de señal con frecuencia negativa	72
D.4. Diagrama procesamiento dentro de RTL-SDR	73
E.1. Patrón radiación arreglo 4 antenas en Feko.	76

ÍNDICE DE FIGURAS

E.2.	Optimización realizada en Feko para el ángulo de depresión de los	
	radiales de antena Tx1	76
F.1.	Interior de un balun 4:1	77
F.2.	Partes internas línea de transmisión balanceada	78
F.3.	Partes internas línea de transmisión desbalanceada $\ . \ . \ . \ .$.	78

XÍNDICE DE FIGURAS

Índice de Tablas

Índice de Tablas

2.1.	Técnicas aplicadas por radares HF [6]	7
3.1.	Bandas de transmisión ICOM-735	23
3.2.	Medidas Iniciales de los monopolos.	24
3.3.	Medidas Iniciales de los monopolos transmisión para cada correspon-	
	diente mínimo local.	30
3.4.	Largo final de cables transmisores	30
3.5.	Largo cables receptores	34
3.6.	Tabla resumen valores iniciales antenas Camanchaca	35
3.7.	Tabla resumen colores y longitudes de cortes en antena Tx1	36
3.8.	Valores encontrados experimentalmente de largo e. vertical, largo de	
	radiales y ángulo de radiales	40
3.9.	Valores finales antenas a 28 Mhz	42
B.1.	Periféricos SDR comunes. Datos obtenidos de RTL-SDR.com.	59
B.2.	Bandas transmisión ICOM-735	62
C.1.	Tipos de bloques en GNU Radio basada en datos de wiki.gnuradio.	65

XIIÍNDICE DE TABLAS

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a mis padres por su apoyo incondicional en todo el tiempo que duró este trabajo.

Quisiera mencionar también al James Morales por su tiempo para responder dudas que surgieron en este trabajo.

A Pesquera Camanchaca y al Sr. Ramón Macías por facilitar el espacio utilizado para la instalación de las antenas.

A los integrantes de Laboratorio CePIA de Astronomía, ya que sin su ayuda este trabajo habría sido imposible. En especial a Katy Cortés y Fernando Cortés por su tiempo al ir repetidas veces a terreno a tomar mediciones y sintonizar las antenas con el equipo Vector Network Analizer (VNA).

Al departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones por permitir uso de los equipos del laboratorio de microondas.

Por último a los compañeros de Geofísica Sebastián Subiabre de Girólamo del Mauro, Néstor Soto, Adán Yerkobic y Gabrielle Córdoba por su tiempo y energías ocupadas de forma desinteresada ayudando con la instalación de las antenas en terreno.

XIVÍNDICE DE TABLAS

Resumen

Los radares HF marinos son equipos de instalación costera, que poseen la capacidad de medir parámetros oceanográficos superficiales. Los datos obtenidos son campos de datos, entre ellos corrientes superficiales, espectro y altura significativa. Esto propicia su uso, en forma secundaria, para la detección de Tsunami. CHIOOS (Sistema Chileno Integrado de Observación del Océano) posee dos radares HF (3 a 30 MHz) marinos modelo WERA (Wellen Radar) de los cuales sólo uno está operativo. Debido a que el sistema es un equipo comercial, es costoso reparar el equipo sin que intervenga el fabricante y genera dependencia hacia ellos.

Una de las nuevas tecnologías con potencial de simplificar la construcción de sistemas de radar HF marinos, es la Radio Definida por Software (SDR), la cual permite reemplazar al máximo los componentes de hardware de un sistema radar, realizando el procesamiento de la señal en software.

Para solucionar el problema generado con equipos comerciales, se plantea la construcción de un radar HF marino propio basado en SDR, la primera etapa consiste en instalar un sistema de antenas propio y realizar una transmisión-recepción de un tono HF utilizando SDR. Este trabajo es el realizado en este HP.

Fue lograda la instalación en dependencias de pesquera Camanchaca de 6 antenas de radar HF provenientes de un antiguo sistema WERA. Las antenas fueron ajustadas cambiando su frecuencia de operación de 19.5 MHz a 28 MHz. Con el sistema de antenas fue realizada la transmisión de un tono HF ocupando un equipo de radioaficionados ICOM-735, y para recepción fueron utilizados receptores de televisión digital de bajo costo denominados RTL-SDR junto con el software libre de procesamiento de señales GNU Radio Companion.

Capítulo 1

Introducción

Los radares son equipos que se utilizan en una gran variedad de aplicaciones geofísicas. Sus usos van desde medir contenido de agua en nubes [1], hasta medir pequeñas deformaciones en domos de volcanes con radares montados en satélites[2]. Estos equipos basan su funcionamiento en el análisis de las ondas transmitida y reflejada por algún objeto [3].

Actualmente CHIOOS (Chilean Integrated Ocean Observing System) posee dos radares HF WERA (Wellen Radar): uno ubicado a un costado de ruta 160 en las dependencias del edificio Olas, el cual no está funcionando y otro ubicado en un terreno donde funciona el Faro Hualpén. Estos equipos son capaces de generar datos oceanográficos, los cuales son utilizados actualmente tanto por estudiantes del departamento de Geofísica y por algunos investigadores. Los datos generados, a diferencia de los provenientes de boyas, poseen una resolución espacial que permite determinar la dirección del oleaje. Sin embargo, una de las desventajas que presentan estos radares, es su alto costo de inversión inicial y la gran dificultad para mantenerlos operando continuamente debido a costes de refacciones y mantenimiento.

Al tratar de visualizar una forma de mejorar las dificultades recién mencionadas, surgió la idea y primer objetivo, de utilizar los elementos de hardware de una antigua antena que operó el 2006, la cual estaba en desuso, para intentar desarrollar el diseño de un radar HF, el cual pudiera ser construido en el DGEO (Departamento de Geofísica). De esta forma, este instrumento podría ser ocupado en el futuro como referencia para calibrar las mediciones realizadas por los otros dos radares del observatorio regional CHIOOS y para desarrollar e implementar nuevas tecnologías. La construcción de un radar HF, permitiría realizar mejoras tecnológicas e idealmente reducir los costos de construcción y desarrollo.

Un segunda meta de este trabajo es combinar la tecnología de radar con el tratamiento digital SDR (Software Defined Radio) para crear un tipo de radar que pudiera expandir todavía mas los usos de esta tecnología. De acuerdo a nuestra revisión bibliográfica, el uso de tecnológica de SDR, al momento de este trabajo, no

ha sido utilizada para radares marinos, ya que por ahora su uso se ha restringido a otras disciplinas como comunicaciones[4] y meteorología [5]. Es este sentido la idea propuesta en este trabajo, sería la primera de este tipo en Chile.

1.1. Motivación del trabajo

Una de las razones de porqué actualmente radares marinos son usados en oceanografía, es que permiten obtener datos superficiales del mar con relativamente buena resolución espacial en regiones costeras, lo cual es imposible de obtener si se utilizan boyas, ya que ellas sólo pueden obtener datos en un conjunto reducido de puntos de latitud y longitud dadas.

En términos de generales, un radar marino se instala y deja funcionando por unos USD 130000. Un caso particular que ejemplifica el rendimiento de un radar HF WERA es el utilizado por CHIOOS: Este equipo produce grillas de 3900 puntos con 2 km de resolución que dan un costo por punto de grilla de unos USD 33. Una boya de las más económicas tiene un costo de alrededor de USD 35000. Esto indica que el sistema de boyas sería unas 1060 veces más costoso que un sistema de radar.

Uno de los fabricantes más importantes de este tipo de radares HF es Helzel Messtechnik GmbH. Dos de estos radares WERA fueron adquiridos y utilizados como base del proyecto CHIOOS, que buscaba crear una plataforma que pudiera visualizar en forma interactiva en la web y que además pudieran ser descargados. Actualmente por problemas de financiamiento, no se ha podido poner en funcionamiento uno de los radares, lo que ha provocado una pérdida importante de datos que podrían ser ocupados tanto por la comunidad como por los estudiantes e investigadores.

Las dificultades que lleva consigo utilizar un radar comercial son:

- WERA es un producto comercial y de fabricantes alemanes, por lo que cualquier servicio de mantenimiento y refacciones debe ser realizado necesariamente en Alemania, lo que provoca demoras y costos adicionales.
- Actualmente el equipo es utilizado como caja negra, y como no se conoce exactamente cómo funciona internamente, se genera una dependencia total del fabricante, amén de la posible pérdida de datos.

Estos problemas podrían ser completamente solucionados si los equipos fueran creados por nosotros mismos, con cualidades similares o mejores, reduciendo costos de fabricación y en caso de falla, una rápida reparación.

1.2. Problema y Solución

De lo anterior se define el problema:

1.3. OBJETIVO

Los radares HF marinos comerciales son utilizados sólo como usuario. En el momento de necesitar reparaciones por fallas del equipo, la dependencia fabricante eleva costos y genera demoras. En caso de no tener fondos suficientes, el equipo queda detenido originando una posible pérdida de datos.

La solución propuesta consiste en: construir un radar HF marino, reutilizando materiales (antenas de un sistema WERA antiguo) y basado Radio Definida por Software exponiendo el funcionamiento de hardware del radar.

1.3. Objetivo

• El objetivo primario del trabajo es realizar un transmisión de un tono HF ocupando SDR.

Debido a que el objetivo principal lleva consigo más tareas secundarias necesarias para realizar la transmisión, también se definen los objetivos secundarios:

- Encontrar lugar para instalar antenas de radar HF cercano al mar y con acceso controlado.
- Seleccionar equipos capaces de transmitir un tono a frecuencias HF, y equipos para recibir dicho tono.
- Utilizar tecnología SDR en algún punto de la transmisión-recepción.
- Realizar la instalación de las antenas en base al manual de WERA.
- Construcción de cables a medida para las antenas transmisoras y receptoras.
- Ajustar impedancia de antenas en caso de ser necesario.

1.4. Descripción del trabajo

La presentación del trabajo la haremos de la siguiente forma: en el capítulo 1 se plantea el problema abordado en la HP. En el capítulo 2 se presenta el estado del arte del tema a desarrollar para luego presentar el marco teórico que soporta las conclusiones del trabajo. En el capítulo 3 se muestra cómo fue realizada la instalación de las antenas además son mostrados los primeros datos obtenidos con ellas. También son mostrados los resultados de una simulación de un conjunto de antenas en Feko (ver Apéndice E), lo cual fue utilizado para preparar y sintonizar las antenas transmisoras y receptoras. Finalmente, en el capitulo 4 se discuten dificultades del trabajo realizado y se muestran las conclusiones, junto con un conjunto de propuestas para un trabajo futuro. Toda la información adicional que pueda ser necesaria para la buena comprensión del lector, se han agregado en un conjunto de apéndices.

Capítulo 2

Estado del Arte y antecedentes teóricos

2.1. Estado del arte

Un Radar es un sistema que ocupa ondas de radio para detectar objetos ubicados a una cierta distancia como lo indica su nombre (**ra**dio **d**etection **a**nd **r**anging)¹. Estos equipos son ampliamente utilizados en geofísica porque permiten realizar mediciones a distancias relativamente grandes. Actualmente existe una gran variedad de radares. Por ejemplo, existen radares que son montados en satélites, los cuales permiten medir deformaciones del domo en volcanes por interferometría (Interferometría Radar [2]), radares ubicados en las azoteas de edificios para obtener información meteorológica (Radar Meteorológico [1]) (Figura 2.1), etc.

2.1.1. Radar Marino HF

Los Radares Marinos son equipos que procesan el reflexión de radiofrecuencias en la banda HF (3-30 MHz), para obtener datos de velocidad superficial, detección de buques y determinación de oleaje y dirección de olas. Estos han sido montados en zonas costeras y en algunos barcos. Como la frecuencia utilizada es baja (longitud de onda decamétrica), estos equipos son muy grandes para ser montados en satélites. El procesamiento de la señal adquirida se analiza utilizando conceptos como la dispersión de Bragg y el efecto Doppler [6].

Aunque los radares marinos HF costeros se basan en el mismo fenómeno, es posible definir dos sistemas de radares HF que funcionan de maneras distintas: ellos son, los radares CODAR y los radares WERA. Lo primero que se debe analizar es la forma en que el radar determina la distancia de donde proviene la medición.

 $^{^1\}mathrm{En}$ la lengua inglesa, la palabra range significa distancia.



Figura 2.1: Radar Meteorológico. Imagen extraída de la Agencia Estatal de Meteorología de España.

Range

Range es la distancia desde el punto de generación, al punto donde se genera la reflexión. Una buena determinación del rango, supone que existe una relación señalruido alta, tomando en cuenta que en la propagación de la onda electromagnética, esta se ve afectada por atenuación y dispersión provocada por la superficie del mar [6].

La metodología utilizada por el sistema CODAR, consiste en transmitir pulsos de onda continua (CW) con alta potencia (comparado a lo necesario en FMCW), los que tienen un tiempo de transmisión corto, para luego con los tiempos de llegada definir celdas de rango para los diferentes tiempos de viaje.

Los sistemas de WERA a diferencia de CODAR transmiten una señal FMCW la cual es continua y tiene tiempos precisos entre la frecuencia mínima y máxima. Con esos datos conocidos es posible obtener los rangos sabiendo qué frecuencia del "Chirp transmitido" es el que fue devuelto ya que cada frecuencia tiene asociado un tiempo de viaje desde la frecuencia más baja a la más alta del "Chirp".

Azimuth

Los métodos ocupados por CODAR y WERA son buscador de dirección (direction finding) y formación de haz (Beam forming) respectivamente. El primer método se basa en la descomposición de las series de tiempo recibidas por 3 o 4 antenas. Este sistema funciona creando una señal compuesta: cada parte de la señal proviene de una de las receptoras, mientras se multiplexan en forma circular logrando crear una velocidad angular que, en la señal recibida por el equipo receptor, genera un pseudo corrimiento Doppler. Este sistema asume que diferentes velocidades angulares provienen de distintos azimut [6].

En el segundo método, se utiliza un arreglo de antenas en 1 dimensión. Este sistema añade a la señal de cada antena, desfases que logran direccionar la señal recibida. Este sistema asume que la señal que proviene de distintos azimut llega naturalmente con desfases a las distintas antenas. Cada uno de las distintas combinaciones de desfase para las antenas receptoras es asociado a un ángulo de azimut distinto. Si para cierto desfase se logra que la señal de todas las antenas tenga igual fase es porque las antenas están a la misma distancia de la fuente. De esta forma se logra rotar el arreglo de antenas artificialmente.

Las dos formas de obtener el rango y el azimut del campo de datos, junto con el tipo de señal transmitida, dan lugar a los distintos tipos de radares que combinan las técnicas descritas anteriormente. Estos sistemas combinados se pueden resumir en la Tabla 2.1.

System	Pulse	FM(I)CW	Transmit	Direction	Beam forming
			wide/beam	finding	
CODAR/NOAA	Х		W	Х	
OSCR	Х		W		Х
PISCES		(I)	W		Х
C-CORE		(I)	W		Х
COSRAD	X		b		Х
SeaSonde		(I)	W	Х	
WERA		Х	W	Х	Х

Tabla 2.1: Técnicas aplicadas por radares HF [6]

2.1.2. Radares HF marinos en Chile

8

Actualmente, los únicos radares HF que han funcionado en Chile, han sido instalados por el proyecto del Departamento de Geofísca, CHIOOS. Con todo, todavía se está muy por debajo de los equipos instalados en países del hemisferio norte (ver Figura 2.2). Esto justifica el esfuerzo de crear un radar propio. Además, a la fecha, esta es una idea pionera en el país.

La factibilidad técnica de tal idea, se basa en que actualmente la gran mayoría de los equipos científicos utilizan el hardware solamente en las etapas de generación y recepción de señales, mientras que todo lo que se refiere al tratamiento digital de señales (digital signal processing: DSP) se hace utilizando software. Una de estas metodologías se conoce con el nombre de SDR (Software Defined Radio), la cual permite abaratar costos y masificar la construcción de este tipo de radares HF marinos reduciendo al mínimo el hardware necesario, reemplazándolo por software. Actualmente esta tecnología no ha sido implementada masivamente por los grandes fabricantes de radares y tampoco se ha aplicado a problemas científicos, según lo muestran algunos documentos que presentan pruebas de laboratorio[7][8][4]. Con todo, las aplicaciones se han restringido por ahora a radares de tipo meteorológico [5]. En este sentido la idea de utilizar SDR en un radar marino HF, seria una de las primeras de este tipo que se implementarían en Chile.



Figura 2.2: Radares instalados mundialmente. Imagen extraída de Global HF Radar Network.

2.2. Antecedentes teóricos

El objetivo principal de este trabajo, es preparar el hardware y software mínimo para transmitir y recibir una señal HF, sin realizar un análisis de dicha señal. Por lo tanto, en este capítulo presentaremos primeramente algunas definiciones básicas utilizadas por los ingenieros en telecomunicaciones, que permiten caracterizar el buen funcionamiento de las antenas. Finalmente nos referiremos a la componente software.

2.2.1. Definiciones básicas

En esta sección, definiremos algunos términos que serán utilizados posteriormente para describir el funcionamiento de un radar.

Impedancia de Entrada

La impedancia se define como el cociente entre el voltaje y la corriente en una linea de transmisión y se compone de una componente real (resistencia) y una componente imaginaria (reactancia)

$$Z = \frac{V}{I} = R + jX$$

en donde Z es la impedancia, V es el voltaje y I es al corriente. R es la resistencia y X es la reactancia.

Para una transferencia de energía óptima, las impedancias involucradas en las distintas partes de la transmisión deben ser las mismas. Actualmente las impedancias típicas utilizadas son de 50 Ω . Si alguna de las impedancias no es 50 Ω ocurre una des-adaptación y la transmisión de energía no es óptima.[9]

Relación de onda estacionaria (SWR)

Cuando una línea de transmisión está desadaptada, parte de la energía que fue introducida en la línea de transmisión es reflejada al generador. Este hecho da lugar a que en la línea de trasmisión se forme onda estacionaria con máximos y mínimos de voltaje y corriente. Esta onda tiene la forma mostrada en la Figura 2.3 a distancias fijas.[10]



Figura 2.3: Esquema relación de onda estacionaria. Imagen extraída de [10].

De esta onda estacionaria se define la relación de onda estacionaria ROE como

$$ROE = \frac{|V_{max}|}{|V_{min}|}$$

Pérdida de retorno

La pérdida de retorno (return loss) es otra forma de expresar la desadaptación. Se define como razón logarítmica expresada en dB (decibelios), entre la potencia reflejada y la potencia alimentada[9]. Este valor se expresa en la forma:

Pérdida de Retorno =
$$-20log_{10}\frac{SWR+1}{SWR-1}$$

2.2.2. Matriz de Dispersión

La matriz de dispersión describe la relación de amplitud y fase entre ondas incidentes y reflectadas. Los elementos de esta matriz son ordenados de acuerdo al lugar donde se genera la onda y hacia donde se propaga. Estos elementos también son llamados parámetros S[11].



Figura 2.4: Diagrama parámetros S para un dispositivo de 2 puertos. Imagen extraída de Instituto de Telecomunicaciones de Portugal.

Por ejemplo, en la Figura 2.4, se hace incidir una onda en un dispositivo bajo test (**D**evice **U**nder **T**est). Parte de la onda pasará a través del DUT y parte se reflejará.

2.2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

De la figura se puede decir entonces que B_1 y B_2 pueden ser descritas como una combinación de A_1 y A_2 , lo cual, se puede expresar matemáticamente en la forma:

$$B_{1} = S_{11}A_{1} + S_{12}A_{2}$$

$$B_{2} = S_{21}A_{1} + S_{22}A_{2}$$

$$B = S \cdot A$$

$$S_{11}A_{1} \cdots S_{1n}A_{n}$$

$$\vdots$$

$$S_{m1}A_{1} \cdots S_{mn}A_{n}$$

$$B = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{1} \\ \vdots \\ A_{m} \end{bmatrix}$$

Los elementos de la matriz S se denominan *parámetros* S. Para sistemas de sólo un puerto, el único parámetro S es el S_{11} . S_{11} es definido formalmente en términos de la matriz de las ecuaciones de parámetro S como[11]:

$$S_{11} = \frac{B_1}{A_1}$$

Esta relación entre una onda incidente y su reflexión es llamada comúnmente coeficiente de reflexión Γ y es definido en términos de ROE[10].

$$|\Gamma| = \frac{|V_{max}| - |V_{min}|}{|V_{max}| + |V_{min}|} = \frac{ROE - 1}{ROE + 1}$$

Hay que notar que el coeficiente de reflexión es un término adimensional que puede ser positivo o negativo. Normalmente el coeficiente de reflexión se expresa en dB, así que puede ser utilizado de la misma forma que la pérdida de retorno.

Perdida de Retorno
$$[dB] = -20log_{10}\frac{SWR + 1}{SWR - 1} = 20log_{10}\Gamma$$

2.2.3. Antenas

Las antenas que son utilizadas por el radar HF, son del tipo monopolo. Este tipo de antenas son utilizadas principalmente en aviones porque tienen la característica que pueden ser utilizadas para transmitir ó recibir una gran variedad de frecuencias. Sus propiedades eléctricas dependen de la geometría del elemento vertical y del plano tierra. La caracterización de este tipo de antenas es particularmente simple, porque sus características eléctricas dependen solamente de 3 parámetros[12]:

- Largo del elemento vertical y radiales.
- Radio del elemento y radiales

• Radio del plano tierra

La alimentación típica de este tipo de antenas es un cable coaxial. Dado que la dimensión del monopolo está determinado por las frecuencias que se quieran utilizar, lo es también en qué forma se construye un plano de tierra. Por ejemplo, para frecuencias sobre los 200 MHz, se utiliza un cono sólido, pero para frecuencias mas bajas, es más usual emplear una serie de radiales, que en nuestro caso son 3.



Figura 2.5: Antena monopolo con radiales en forma de cono y patrón de radiación (imagen inferior). Imagen extraída de [13].

Si los radiales están verticales, la antena se comporta como un monopolo con una impedancia de 30 a 35 Ω . Si el ángulo de depresión aumenta, es posible llevar la impedancia a valores cercanos a 70 Ω . Ajustando el ángulo de los radiales es posible ajustar la impedancia de la antena[13]. La frecuencia de transmisión de la antena está dada por el largo del elemento vertical y de los radiales. El ancho de banda está dado por el radio del elemento y de los radiales. El radio del elemento vertical afecta en mayor medida al ancho de banda que el radio de los radiales.

2.2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

Estas antenas tienen un patrón de radiación similar al mostrado en la Figura 2.5, el cual es básicamente omnidireccional en el plano horizontal.

2.2.4. SDR

Software Defined Radio (SDR) es una tecnología que permite hacer en software las operaciones que antes sólo eran posibles en hardware. Sus principales ventajas sobre sistemas tradicionales que realizan la mayor parte del tratamiento de señales utilizando hardware, se pueden enumerar en [4]:

- Configurabilidad: Para diferentes aplicaciones, un único Tranceptor puede ser usado, sin ser necesario ningún cambio en hardware.
- Actualizable: Es posible mantener el hardware intacto, mientras sólo se mejoran los algoritmos que procesan la señal.
- Flexibilidad. El mismo Tranceptor, con el mismo hardware puede ser utilizado para diferentes usos. Simplemente reconfigurados o actualizando el software.

14CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES TEÓRICOS

Capítulo 3

Trabajo experimental

En este capítulo es descrito cómo fue adquirido el acceso a un terreno colindante con el borde marino para poder instalar las antenas del radar. Posteriormente se muestra cómo fue realizado el montaje de las antenas y cómo se las modificó para que cumplieran con los requerimientos exigidos por el diseño experimental sugerido. Finalmente son mostradas algunas mediciones eléctricas que permitieron conocer exactamente la configuración lograda. La transmisión y recepción de una señal HF, lo cual es finalmente el objetivo de este trabajo, será descrito al final de este capítulo.

3.1. Selección y búsqueda de un lugar para instalar las antenas

La instalación de un sistema de antenas para radar marino HF requiere cercanía al mar, además de poder contar con un lugar que brinde seguridad para la instalación y operación del equipo. Como era de esperar, estos lugares son muy escasos cerca de la universidad.

En primera instancia, gracias a gestiones realizadas por el técnico de nuestro departamento (Geofísica), Sr. Freddy Echeverría, el puerto de Lirquén accedió a facilitarnos un lugar. Dicha localización cumplía con las condiciones necesarias de seguridad, pero no de espacio, debido que era el lugar asignado era una franja de aproximadamente 3 metros de ancho, cuyo suelo estaba constituido de un conjunto de rocas que se utilizaban como rompeolas. En estas condiciones, la instalación del radar era muy complicada, junto al hecho que se estaba en presencia de contenedores metálicos que interferirían con las mediciones. Una vista aérea del lugar se muestra en la Figura 3.1.



Figura 3.1: Lugar facilitado en Puerto Lirquén (polígono rojo)

El otro lugar considerado fue los terrenos donde opera actualmente la pesquera Camanchaca, la cual está ubicada en Isla Rocuant, Talcahuano (ver Figura 3.2). Este lugar presentaba algunas características: tenía acceso controlado, en términos de espacio era mucho más amplio que el facilitado por el puerto de Lirquén, el tipo de suelo no era rocoso. Sin embargo el acceso al mar desde las antenas estaba impedido por una pandereta que delimita el terreno de la pesquera, la cual tiene una altura de dos metros aproximadamente (ver Figura 3.3)



Figura 3.2: Espacio disponible en pesquera Camanchaca (Polígono rojo)

Dicho lo anterior, se decidió instalar las antenas en los terrenos de la pesquera Camanchaca, lo cual pudo ser concretado gracias a las gestiones realizadas por el prof. Ovalle, con el Sr. Ramón Macías, gerente de la pesquera. Se escogió este lugar debido a que, salvo por la pandereta delimitadora (ver Figura 3.3 y 3.4), el lugar cumplía con todo lo que se necesitaba para instalar las antenas del radar. Finalmente fueron escogidos los lugares marcados con la elipse roja (Figura 3.5)

3.1. SELECCIÓN Y BÚSQUEDA DE UN LUGAR PARA INSTALAR LAS ANTENAS17



Figura 3.3: Lugar de instalación de antenas Tx.



Figura 3.4: Lugar de instalación de antenas Rx



Figura 3.5: Lugar definitivo instalación antenas en Camanchaca

3.2. Trabajo previo

En esta sección se describirán algunas actividades previas a la instalación y operación de las antenas en la pesquera Camanchaca.

3.2.1. Pruebas realizadas en antiguas dependencias del TIGO

Para poder captar una señal HF, utilizamos un dispositivo que contiene un sintonizador, un conversor análogo digital y que además incorpora una antena. El modelo utilizado fue RTL-SDR (ver Figura 3.6)



Figura 3.6: Periférico RTL-SDR y su antena de recepción asociada. Imagen extraída de HackerWarehouse.com.

El experimento consistió en instalar dos antenas en las dependencias del antiguo TIGO (Transportable Integrated Geodetic Observatory) para analizar el funcionamiento de las dos antenas instaladas (una como transmisora y la otra como receptora) y realizar algunas pruebas de transmisión. Para realizar la transmisión, se utilizó un generador de señales RF y un osciloscopio digital, facilitados por el laboratorio de microondas, perteneciente al Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones. La señal transmitida fue un tono a 29.17 MHz con 96 mVpp. Por otra parte, para realizar la recepción, se utilizó un periférico RTL-SDR descrito anteriormente, el cual nos permitió visualizar el espectro en el computador donde se conecta el RTL-SDR, y de manera simultánea, se utilizó un analizador de espectro perteneciente al laboratorio de microondas (ver Figura 3.7). Entre otras cosas, se verificó que se dejaba de recibir una señal cuando el equipo transmisor se apagaba.



Figura 3.7: Generador de señal y osciloscopio digital (izquierda). Setup utilizado para pruebas en TIGO (derecha)

3.2.2. Pruebas en laboratorio microondas de ingeniería

La siguiente actividad fue ver en el laboratorio cuáles eran las frecuencias de trabajo permitidas por el receptor RTL-SDR. Para lograr este objetivo, se utilizó un generador de señales RF y un analizador de espectro. El generador y el dispositivo de recepción RTL-SDR fueron enlazados utilizando cables. Se comprobó que la transmisión funcionaba bien para frecuencias mayores que 26.5 MHz, pero para frecuencias más bajas, la señal recibida se perdía. Estas pruebas nos permitieron fijar la frecuencia de trabajo del radar del orden de los 27 MHz. Un diagrama del setup es mostrado en Figura 3.8.



Figura 3.8: Setup utilizado para pruebas de RTL-SDR

El siguiente paso fue utilizar un equipo transmisor ICOM-735, utilizado por la comunidad de radioaficionados y el cual puede transmitir una señal hasta 100 W. Este equipo fue facilitado por el prof. Ovalle. De la misma forma en que se utilizó el generador de señales, se conectó la salida del ICOM-735 a un analizador de espectro, atenuando la señal en 40 dB, para poder utilizar el analizador de espectros sin quemarlo (ver Figura 3.9). Al hacer las pruebas, se notó que el equipo no transmitía continuamente en todas las frecuencias que se seleccionaban: para algunas frecuencias se verificaba la transmisión y para otras no. Al revisar el manual del equipo, fue notado que éste sólo transmite en determinadas bandas, aunque en modo recepción es capaz de hacerlo en todas las frecuencias disponibles .



Figura 3.9: Setup utilizado para pruebas de ICOM-735

3.2.3. Pruebas realizadas en CePIA

La pruebas realizadas en CePIA consistieron principalmente adiestramiento en el uso del equipo VNA, el cual posteriormente sería utilizado. Dichas pruebas consistieron en caracterización de antenas y realización de la calibración del equipo, estrictamente necesaria antes de cada nueva medición. La necesidad del equipo VNA es descrita en el siguiente párrafo:

La forma de operar de una antena es la siguiente: se genera una señal en un generador, luego esta señal se transmite hacia la antena mediante una guía de onda, donde finalmente se inyecta a la antena. Nosotros utilizamos como línea de transmisión a un cable coaxial y como antena, un monopolo. Una cuestión básica que necesariamente debe ser verificada para que la transmisión o recepción sea buena, es que al irse propagando la señal por las distintas etapas (generador, línea de transmisión, antena), no se generen ondas estacionarias y no exista reflexión. Estos últimos conceptos fueron discutidos en el capítulo 2.

Un Analizador de Redes es un instrumento que se utiliza en los sistemas de radiocomunicaciones, que es capaz de analizar las propiedades del sistema, visualizándolo como una red. Entonces, los coeficientes de transmisión y/o reflexión, se pueden especificar a través de una matriz de dispersión, cuyos elementos se denominan *parámetros S* (ver apéndice A). Los analizadores de redes que más se utilizan en altas frecuencias, operan entre 5Hz y 1,05THz. Actualmente, existen dos tipos principales de analizadores de redes:

- SNA (Scalar Network Analyzer) el cual es un analizador de redes escalar el cual mide propiedades de amplitud solamente
- VNA (Vector Network Analyzer) el cual realiza un análisis vectorial, es decir, mide simultáneamente las propiedades de amplitud y fase

Para poder caracterizar nuestras antenas, es por lo tanto imprescindible caracterizarlas mediante un analizador de señal. Estos equipos tiene costos elevados (aproximadamente 18 % de un radar HF de los utilizados en CHIOOS). Afortunadamente, el laboratorio de Astronomía (CePIA), liderado por el prof. Rodrigo Reeves, permitió utilizar un VNA de su propiedad, teniendo previamente que asistir a un clase introductoria sobre la teoría básica de funcionamiento del equipo, así como realizar el proceso de calibración que debe ser realizado cada vez que se utiliza una frecuencia determinada.



Figura 3.10: Setup utilizado caracterización antena 2G.



Figura 3.11: Datos obtenidos de la antena de redes 2G.

Una figura de la primera medición propia, se muestra en Figura 3.11, donde se muestra el parámetros S_{11} , una carta Smith para visualizar la impedancia de la antena (ver apéndice A.2) a distintas frecuencias. En este caso, fue utilizada una antena pequeña de 2G (red telefonía celular de segunda generación) conectada como muestra Figura 3.10.
3.2.4. Pruebas con balun utilizado por un radar ionosférico en el observatorio de Chillán

Un balun es un dispositivo utilizado para adaptar impedancias cuando se requieren ocupar dispositivos con distintas impedancias características. Para reducir las pérdidas de retorno provocadas por desajuste de impedancias se ocupan los balunes. Ya que al momento de cursar la HP fue necesario caracterizar un balun, se realizó esta actividad como última prueba preliminar. El trabajo consistió en caracterizar el balun que opera con las antenas pertenecientes a un ionosonda de un radar ionosférico instalado en el observatorio ionosférico de Chillán, con la participación de Fernando Cortés, Gonzalo Burgos, ambos de CePIA y por último Henry Fariñe del Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones. Esta medición fue motivada por la imposibilidad de realizar un radiosondeo después que el equipo se averió. Antes de asignarle la falla a problemas más complejos, era necesario asegurarse del buen funcionamiento de los balunes, tanto de transmisión como de recepción. Por esta razón, fue necesario llevar el VNA a Chillán para evaluar su funcionamiento. Este trabajo nos sirvió como último entrenamiento antes de realizar medidas de las antenas del radar marino que posteriormente se instalaría en la ubicación definitiva. Los resultados de las mediciones nos mostraron efectivamente que solamente uno de los dos balunes operaba de manera correcta. El funcionamiento de los balunes es mostrada en la Figura 3.12 y 3.13 mediante gráficas de pérdida de retorno para las dos antenas instaladas en el observatorio.



Figura 3.12: Datos obtenidos de las antenas del radar ionosférico en Chillán. En gráfica se muestra la pérdida de retorno de antena Tx.



Figura 3.13: Datos obtenidos de las antenas del radar ionosférico en Chillán. En gráfica se muestra la pérdida de retorno de antena Rx.

3.2.5. Elección de la frecuencia de trabajo

Hechas todas las pruebas recién descritas, finalmente fue decidido utilizar el equipo de radio aficionados ICOM-735. Este equipo excede la potencia de trasmisión que se necesitaba (alrededor de 30 W) y además en transmisión sólo opera en algunas bandas del espectro (ver Tabla 3.1), las cuales fueron analizadas con el analizador de espectro. Para la recepción fue seleccionado el RTL-SDR. Este equipo puede recibir entre 27 MHz y 1.6 GHz (ver Apéndice B). Dadas todas las restricciones mencionadas (RTL-SDR y ICOM-735), finalmente, se decidió a utilizar una frecuencia de 28 MHz.

Inicio MHz	Final MHz
13.9	14.5
17.9	18.5
20.9	21.5
24.4	25.1
27.9	30.0

 Tabla 3.1: Bandas de transmisión ICOM-735. En rojo la banda seleccionada para transmisión

3.3. Montaje de las antenas

Como se mencionó anteriormente, se hizo contacto con el Señor Ramón Macías, gerente de la compañía Pesquera Camanchaca ubicada en Isla Rocuant, quién nos autorizó a instalar nuestras antenas dentro del sitio donde opera la fábrica. Los lugares donde se instalaron los monopolos muestran en la Figura 3.14.



Figura 3.14: Las ubicaciones de cada antena se muestran con un círculo, según la siguiente nomenclatura: antenas transmisoras en verde, antenas receptoras instaladas en amarillo y lugar para instalar las restantes antenas receptoras en rojo.

Las antenas se instalaron siguiendo instrucciones del manual WERA, donde se establece que las distancias entre los monopolos dependen de su largo físico. Sus medidas iniciales, es decir, las dimensiones que tenían inicialmente son especificadas en Tabla 3.2. Las antenas montadas con dichas medidas se muestran en Figura 3.15.

Variable	Valor
Largo E. Vertical	$2.75 \mathrm{~m}$
Largo Radiales	4.5 m
Ángulo Radiales	30°

Tabla 3.2: Medidas Iniciales de los monopolos.

Cada monopolo fue instalado sobre estacas de aluminio, extendidas en madera, que llegan a una altura de dos metros, fundamentalmente para que éste estuviera sobre el nivel de una pandereta de cemento que contiene algunos alambres en su interior. Los detalles de la instalación del monopolo y sus radiales con los cuales se construye el plano de tierra reflector, se muestran en la Figura 3.16:



Figura 3.15: Antenas Transmisoras (Izquierda)
y Receptoras (Derecha) instaladas con medidas de Tabla 3.2





Figura 3.16: Fijación elemento principal (izquierda), estaca corta con radial (derecha).

La descripción de materiales y partes de la antena instalada se muestran en Figura 3.17.



Figura 3.17: En la figura, las fechas grises representan estacas de distintos largos. Los rectángulos color mostaza son maderas de pino de 3"x2". Las líneas rojas son los tirantes o vientos de material plástico. Las líneas verdes son los radiales para formar el plano de tierra compuesto de cables de acero trenzado recubierto en plástico. El monopolo es la parte de la antena que está más alta, también conocido con el nombre de elemento director. En la parte inferior del monopolo se ubica una bobina anexada a cada monopolo, para ajustar su largo eléctrico.

A continuación será descrita la configuración geométrica que adoptaron las antenas transmisoras (Tx) y se mostrará su caracterización eléctrica proveniente de mediciones realizadas con el equipo VNA del CePIA. Posteriormente, se hará lo mismo con las antenas receptoras (Rx).

3.3.1. Antenas Transmisoras

Debido a que se quiere direccionar la señal generada a una región en particular del océano, es necesario instalar los monopolos en una configuración sugerida por WERA. Como se muestra en la Figura 3.18, la ubicación relativa de los monopolos es función de la longitud de onda de la radiación RF utilizada para ajustar convenientemente la fase con que la señal es emitida.



Figura 3.18: Diagrama arreglo de antenas transmisoras.

Para lograr direccionar la señal transmitida al océano, junto con la distancias entre los monopolos, hay que utilizar distintas longitudes de cables que conectan los monopolos con el equipo generador de RF. Se debe por lo tanto, generar un desfase de 90 grados entre las 2 antenas más cercanas al mar con las dos que están más lejos. Por lo tanto, las distancias entre las antenas junto con la especificación de sus desfase relativos, hacen que el patrón de radiación sea anisótropo y que tenga la forma en que el lóbulo principal apunte hacia el océano.

Una configuración geométrica de las antenas de transmisión se muestra en la Figura 3.18.

Una vez instalados los cuatro monopolos de las antenas transmisoras, a las cuales denominamos con el nombre de Tx1 a Tx4, se procedió a medir sus características eléctricas tales como ROE, coeficiente de reflexión y carta Smith, las cuales son mostradas en Figura 3.19, 3.20, 3.21 y 3.22 para Tx1, Tx2, Tx3 y Tx4 respectivamente.

Monopolo Tx1



Figura 3.19: Izquierda: S_{11} (Azul) y ROE (Rojo). Derecha: Carta Smith

EL monopolo Tx1 muestra valores de coeficiente de reflexión y ROE con mínimos locales aproximadamente 19.6 MHz. Ambos valores son adecuados para transmitir en dicha frecuencia. Monopolo Tx2



Figura 3.20: Izquierda: S_{11} (Azul) y ROE (Rojo). Derecha: Carta Smith

EL monopolo Tx2 tiene mínimos locales para 20 MHz de coeficiente de reflexión y ROE. Esta antena en comparación a Tx1, está desplazada su frecuencia de operación en 0.4 MHz

Monopolo Tx3



Figura 3.21: Izquierda: S_{11} (Azul) y ROE (Rojo). Derecha: Carta Smith

La antena TX3 muestra un mínimo local en 20 MHz al igual que la antena Tx2, pero los valores de coeficientes de reflexión y ROE muestran que esta antena no tiene un acople de impedancia tan bueno como el de Tx2 Monopolo Tx4



Figura 3.22: Izquierda: S_{11} (Azul) y ROE (Rojo). Derecha: Carta Smith

La antena Tx4 es la que posee peores valores de acople de impedancias (más lejos de 50 Ω del cable) de las cuatro antenas transmisoras. Esto se ve reflejados en los valores de pérdida de retorno y ROE.

Como cuadro resumen, la Tabla 3.3 muestra los valores de los mínimos locales en base al coeficiente de reflexión, con sus respectivas frecuencias, ROE e impedancias.

CAPÍTULO 3. TRABAJO EXPERIMENTAL

Antena	Frecuencia [MHz]	$S_{11}[db]$	ROE	Impedancia $[\Omega]$
Tx1	19.6	-19	1.3	63-1j
Tx2	20.01	-21	1.2	60-2j
Tx3	20.02	-16	1.4	66-9j
Tx4	20.01	-14	1.5	70-13j

 Tabla 3.3: Medidas Iniciales de los monopolos transmisión para cada correspondiente mínimo local.

Preparación cables transmisión

El cable utilizado para conectar el sistema de antenas es del tipo coaxial, el cual tiene una impedancia de 50 Ω y un factor de velocidad 0.66 determinados por el fabricante. El método para calcular las longitudes de los distintos cables es descrito en el manual WERA[14], para lo cual la siguiente ecuación es utilizada:

$$L = 0.35\lambda \cdot V$$

L es la diferencia de longitudes de los cables entre las antenas más próximas al mar y las otras. λ es la longitud de onda y V es el factor de velocidad del cable utilizado.

Las medidas finalmente de los cables son descritas en Tabla 3.4, en donde TxL corresponde a los cables cables de transmisión de antenas Tx1 y Tx2 (antenas más próximas al mar), TxC cables de antenas Tx3 y Tx4 (antenas más lejanas del mar). Rx son los cables de recepción. En Figura 3.23 son mostradas las herramientas utilizadas para la fabricación de los cables.



Cable	Largo [m]
TxL	7.67
TxC	5.2



Tabla 3.4: Largos de cables transmisores.

Debido a que los cables fueron fabricados de manera artesanal, fue necesario comprobar que cada uno fuera realizado de manera adecuada. Esto fue medido con el equipo VNA en el modo de dos puertos.

3.3. MONTAJE DE LAS ANTENAS

La gráfica de S_{12} mostrada en Figura 3.24 muestra que todos los cables de transmisión tienen una pérdida similar y la cual es pequeña. Esto indica que los cables fueron fabricados correctamente y tienen una pérdida de aproximadamente un 6 %.



Figura 3.24: S_{12} cables de transmisión

3.3.2. Antenas Receptoras

El tratamiento hecho con las antenas receptoras fue similar al realizado con las antenas transmisoras. En este caso, la única restricción es que se mantenga una distancia entre ellas igual a 0,45 λ (ver Figura 3.25). En el sitio cedido por la empresa Camanchaca no se pudo cumplir estrictamente esta regla, debido a la existencia de una estructura de concreto que imposibilitó la instalación de algunas de las estacas. Por esto se la distancia entre los monopolos que se utilizó fue de 0,90 λ (ubicación de futura antena Rx3). Cabe señalar, que la distancia entre las antenas transmisoras y receptoras resultó ser aproximadamente igual a 90 m.



Figura 3.25: Configuración geométrica de las antenas receptoras.



Figura 3.26: Antenas receptoras.

Una vez instaladas las dos antenas receptoras (ver Figura 3.26), a las cuales denominamos con el nombre de Rx1 y Rx2, se procedió a medir sus características eléctricas tales como ROE y el coeficiente de reflexión y carta Smith, las cuales se muestran en la Figura 3.27 (Rx1) y Figura 3.28 (Rx2).

Monopolo Rx1



Figura 3.27: Izquierda: S_{11} (Azul) y ROE (Rojo). Derecha: Carta Smith

El monopolo Rx1 tienen un mínimo local de coeficiente de reflexión en 20 MHz. En esta frecuencia alcanza los -12 dB mientras que el ROE y la impedancia son de 1.6 y 76-16j Ω .

Monopolo Rx2



Figura 3.28: Izquierda: S_{11} (Azul) y ROE (Rojo). Derecha: Carta Smith

Por último el monopolo Rx2 tiene un mínimo local en 19.5 MHz, lo que indica que su frecuencia de operación está desplazada en 0.5 MHz respecto a la antena Rx1. Los valores de S_{11} , ROE e impedancia son -12 dB, 1.7 y 56-26j Ω .

Preparación cables recepción

Al igual que para las antenas transmisoras, fue necesario fabricar los cables que serían utilizados. Estos fueron fabricados ocupando el mismo material, por los que sus características de impedancia y factor de velocidad son iguales a los cables de transmisión. Para el caso de antenas receptoras, la única restricción es que la longitud de los cables utilizados sea la misma. En este caso, lo que se busca es no tener desfaces producidos por los cables. El largo de los cables receptores se muestra en Tabla 3.5, mientras que sus mediciones de pérdida se muestran en Figura 3.29.

Cable	Largo [m]
Rx	7.97

Tabla 3.5: Largo cables receptores



Figura 3.29: S₁₂ cables de recepción. RX1C y RX2C cables antena Rx1 y Rx2.

Al igual que en los cables de transmisión, estos pierden al rededor de un $6\,\%$ de la señal.

3.3. MONTAJE DE LAS ANTENAS

Como se pudo ver en las imágenes anteriores, tanto las antenas transmisoras como las receptoras están están sintonizadas a una frecuencia aproximada entre los 19.5 y 20 MHz. Una tabla resumen de los valores obtenidos en cada una de las antenas es mostrada en Tabla 3.6.

Antena	Frecuencia [MHz]	$S_{11}[db]$	ROE	Impedancia $[\Omega]$
Tx1	19.6	-19	1.3	63-1j
Tx2	20.01	-21	1.2	60-2j
Tx3	20.02	-16	1.4	66-9j
Tx4	20.01	-14	1.5	70-13j
Rx1	20.01	-12.5	1.6	76-16j
Rx2	19.52	-12.1	1.7	56-26j

Tabla 3.6: Tabla resumen valores iniciales antenas Camanchaca

Finalmente, una imagen comparativa de S_{11} para todas las antenas se presenta en Figura 3.30.



Figura 3.30: S_{11} inicial todas las antenas.

Como se explicó anteriormente, debido a restricciones impuestas por el equipo receptor RTL-SDR y del equipo transmisor ICOM-735, es necesario mover la frecuencia de sintonización de las antenas a los 28 MHz. La descripción de este proceso es descrito más adelante.

3.4. Ajuste final del sistema de antenas del radar HF

Lo descrito hasta este momento, se refiere a distintas pruebas realizadas para familiarizarse con el trabajo experimental y eléctrico de las antenas. En esta sección, será descrito cómo fueron modificadas las antenas para cumplir los requerimientos de diseño, basados en las restricciones impuestas por el transmisor y receptor, esto es, sintonizar el conjunto de antenas para que operen a una frecuencia de 28 MHz.

3.4.1. Ajuste óptimo del largo de los monopolos

Para comenzar el proceso de ajuste, fue estimado el largo del monopolo mediante el uso del software Feko (Software de simulación de antenas). El software arrojó que el tamaño que debería tener el monopolo, esto fue cerca de los 1.55 m. Luego de conocer el valor esperable, la aproximación real fue completamente empírica. Es decir, el monopolo se fue acortando (herramientas utilizadas en Figura 3.31) y posteriormente midiendo con el VNA el coeficiente de reflexión y el ROE. Este procedimiento se hizo en forma iterativa, de hecho 6 veces, hasta llegar al valor buscado basado únicamente en las mediciones realizadas. Esta prueba fue hecha sólo con la antena Tx1, pues los otros monopolos eran similares.

Para hacer cada corte del monopolo, se requería bajar toda la antena hasta el suelo. Entonces, una vez realizado el corte, era necesario instalar nuevamente la antena en el mástil correspondiente junto a sus radiales para comenzar luego a medir.

Los desplazamientos en el mínimo local para cada corte del monopolo Tx1 en gráficas de S_{11} y ROE son mostrados en Figura 3.32 y 3.33, mientras que en Figura 3.34 se muestra la carta Smith. Las longitudes seleccionadas y su color asociado son mostrados en la Tabla 3.7

Color	Longitud [m]
Azul	2.75
Amarillo	2.5
Verde	2
Rojo	1.8
Púrpura	1.75
Marrón	1.6

Tabla 3.7: Tabla resumen colores y longitudes de cortes en antena Tx1.

Cada serie de puntos de las gráficas, de un determinado color, es una medición del monopolo Tx1 con distintas longitudes del elemento vertical. Los mínimos locales y sus frecuencias son marcados con puntos negros. Lo mínimos locales de la gráfica de ROE (Figura 3.33) son las frecuencias que son marcados con pentágonos en la carta Smith de Figura 3.34.



Figura 3.31: Herramientas utilizadas para cortes de elemento vertical de antena.



Figura 3.32: Cambio en S_{11} medidos con VNA a distintos cortes del monopolo.



Figura 3.33: Cambio en ROE medidos con VNA a distintos cortes del monopolo.



Figura 3.34: Cambios en carta Smith para distintas mediciones del monopolo.

3.4.2. Ajuste óptimo del ángulo de los radiales

Para que una antena HF funcione correctamente, no basta con que el largo del monopolo sea el adecuado, sino también que el plano reflector esté correctamente construido. Para estimar la configuración de los radiales, simulamos una antena con su plano reflector mediante el uso del software utilizado en el área de radiofrecuencia denominado Feko, el cual obtuvo como resultado que el ángulo óptimo era de 27,1°. Sin embargo, al implementar este valor en la práctica, fue comprobado que un ángulo que producía una impedancia mas cercana a los 50 Ω (para igualar la de línea de transmisión) era el de 0°, razón por la cual fue el ángulo que finalmente se utilizó. Esto es posible verlo en las gráficas de Figura 3.35, en las cuales, con la antena Tx1 cortada a 1.6 m, fueron manipulados sólo los ángulos los radiales mientras que sus largos permanecieron constantes en 4.5 m. En estas gráficas sólo fue manipulado el ángulo de depresión de los radiales a 0°, 10°, 15° y 30°. Las gráficas muestran el empeoramiento del acople de impedancias cuanto más era aumentado el ángulo de depresión.



Figura 3.35: Cambio en S_{11} (Superior Izquierda) ROE (Superior Derecha) y carta Smith a distintos ángulos de depresión de radiales. Los triángulos en todas las gráficas muestran la ubicación de los 28 MHz en las distintas curvas.

3.5. Estado Final Antenas

La configuración final de las antenas, donde se incorporaron modificaciones del largo de los monopolos y la configuración del plano de tierra, se muestra en la Tabla3.8

Variable	Valor	
Largo E. Vertical	$\approx 1.60~{\rm m}$	
Largo Radiales	4.5 m	
Ángulo Radiales	\approx 0 °	

 Tabla 3.8: Valores encontrados experimentalmente de largo e. vertical, largo de radiales

 y ángulo de radiales

La respuesta eléctrica de los monopolos en conjunto se muestran además en las Figuras 3.36, 3.37 y 3.38 siendo estas de S_{11} , ROE y carta Smith respectivamente. Notar que la antena Tx2 fue ajustada lo mismo que las otras, pero su frecuencia de operación está desplazada respecto a las demás. Esto ocurrió debido a que su estado inicial era distinto, y esto no se consideró al ajustarla. Esto debiera ser corregible alargando pocos centímetros el elemento vertical de la antena.



Figura 3.36: S_{11} final antenas Camanchaca.



Figura 3.37: ROE final antenas Camanchaca.



Figura 3.38: Carta Smith final antenas Camanchaca. Los puntos rojos marcan los 28 MHz.

Antena S_{11} [dB] ROE Impedancia $[\Omega]$ Tx1 -9.2 68.8-39.1j 2.0Tx2-7.12.661.6-53.5j Tx3 -8.9 2.180.2-38.6j Tx4 -10.71.8,62.0-31.9j Rx1 -9.4 2.064.9-38.2j Rx2 -11.0 1.856.5-30.4j

Las antenas sintonizadas para operar a los 28 MHz poseen las características eléctricas que son resumidas en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Valores finales antenas a 28 Mhz

El ángulo de los radiales necesario para lograr valores de coeficiente de reflexión obtenidos es 0 grados, probablemente debido la pandereta que se encuentra a un costado de las antenas. En ese ángulo los radiales estaban por encima de dicha pandereta y producían la mejor impedancia de las antenas a 28 MHz (contrariamente a lo simulado en software, sin panderetas).

Cabe notar que aunque las gráficas muestran que los valores de S_{11} y ROE en la frecuencia deseada son buenos, no lo son tanto los valores de impedancia. En el momento al sintonizar fue necesario priorizar: el ajuste de impedancia o un ajuste de coeficiente de reflexión. Fue escogido el coeficiente de reflexión debido que la impedancia puede ser mejorada posteriormente mediante la adición de inductores, condensadores y resistencias en serie, de forma externa.

3.6. Transmisión y recepción de un pulso HF

En esta sección será descrito cómo fue alcanzado el objetivo de esta HP, esto es, transmitir y recepcionar una señal de radiofrecuencia utilizando un conjunto de antenas pertenecientes a un radar marino HF. Para tal efecto, fue utilizado como transmisor, un equipo ICOM-735, el cual fue conectado a las antenas transmisoras mediante cables coaxiales, conectados a un splitter, el cual tiene la función de repartir la energía inyectada por el transmisor en forma equitativa, hacia las antenas transmisoras. La modulación utilizada fue de onda continua (CW), sintonizada en 28 MHz y utilizando el mínimo de potencia permitido por el transmisor, como precaución para no quemar el equipo. En la Figura 3.39 se muestra el transmisor y el splitter utilizado mientras que en la Figura 3.40 se muestra un diagrama del setup instalado.



Figura 3.39: Izquierda: Equipo transmisor ICOM-735. Derecha: Splitter



Figura 3.40: Setup utilizado en Camanchaca.

Para realizar la recepción, se ocupó el software GRC y dos periféricos RTL-SDR y un computador donde se instaló GRC. En GRC se utilizó un bloque denominado *Multi-RTL*, que permite generar una señal (en el programa) en fase, proveniente de distintos RTL-SDR, a los cuales puede fijarse una frecuencia central de manera independiente. Una figura de la instalación utilizada en recepción se muestra en Figura 3.41.



Figura 3.41: Izquierda: perisféricos RTL-SDR con relojes sincronizados y un notebook con GNU Radio Companion. Derecha: parte del código utilizado por GRC

Una visualización de los espectros de las señales recibidas en cada una de las dos antenas receptoras, es mostrada en la Figura 3.42. Esta imagen muestra la señal recibida por ambas antenas en forma de gráfica tipo cascada. En estas gráficas es mostrado el espectro en le dominio de las frecuencias, centrado en 28 MHz. En los bordes izquierdos de la imagen de cada espectro se muestra en blanco, el tiempo transcurrido durante la recepción, el cual aumenta hacia abajo. Este tipo de gráfica permite hacer un seguimiento en el tiempo de una señal recibida en cierta frecuencia.



Figura 3.42: Señal recibida en gráfico tipo cascada por antenas receptoras Rx1 (izquierda) y Rx2 (derecha).

En la Figura 3.42 son mostrados instantes antes de recibir el tono en las antenas

receptoras y mientras es recibido el tono. Esto es apreciado por el color rojo al centro de ambas imágenes, lo cual implica en hay mas energía en la frecuencia central de cada imagen, la cual, en este caso corresponde a los 28 MHz. El color rojo indica en qué momento se está recibiendo la señal, lo que se puede saber mirando el tiempo trascurrido en el borde izquierdo con números blancos.

En Figura 3.43 se muestra la misma señal, en otro tipo de gráfica que compara las señales recibidas en cada antena. La gráfica superior muestra la forma de la onda recibida en 28 MHz. Las amplitudes diferentes pueden deberse a errores en los RTL-SDR, así como los desfases. Para eliminar estos posibles errores en las mediciones (que dificultan su interpretación) seria necesaria una calibración antes efectuar alguna medición, tal como es hecho para lo radares WERA y descrito en su manual. La gráfica inferior es el espectro de una antena, sólo como referencia, centrada en 28 MHz, al igual que la gráfica en Figura 3.42.



Figura 3.43: Osciloscopio (Bloque GNU Radio) con IQ (ver Apéndice D) de Rx1 (azulverde) y Rx2 (rojo-purpura). FFT de referencia.

Ambas imágenes fueron realizadas en base a datos limpiados con filtros pasa banda, debido a que en aproximadamente 27.7 MHz había una fuerte señal siendo transmitida. Para no enmascarar la señal en la que se estaba interesado, el filtro fue aplicado. Esto explica también porqué la señal recibida es tan ancha (color verde en Figura 3.42) en el espectro (no debiera pasar si es sólo un tono). 46CAPÍTULO 3. TRABAJO EXPERIMENTAL

Capítulo 4

Conclusiones y Discusión

En este capítulo se mostrarán las conclusiones obtenidas y se hará una discusión del trabajo realizado. El capítulo termina con una propuesta de trabajo a futuro para poder implementar en algún momento un radar HF en el Departamento de Geofísica de la UdeC.

4.1. Conclusiones

Las conclusiones del trabajo pueden ser descritas a continuación:

Con el fin de realizar la transmisión-recepción del tono fue necesario cumplir una serie de pasos descritos en los capítulos anteriores. El primer paso fue buscar un lugar que cumpliera con las necesidades del sistema de antenas. **El lugar encontrado fue la pesquera Camanchaca, ubicada en la Isla Rocuant, Talcahuano**, el cual pudo ser utilizado, gracias a las gestiones realizadas por el profesor Elías Ovalle con el gerente de la pesquera, Sr. Ramón Macías.

Para instalar las antenas según las instrucciones del manual del radar WERA de CHIOOS (debido a que las antenas provenían de un sistema WERA) es necesario conocer la longitud de onda asociada a la frecuencia de transmisión de las antenas. Para obtener dicho valor fue necesario primero seleccionar el equipamiento disponible que podía ser utilizado para la transmisión-recepción. Debido a las limitaciones propias del equipamiento, frecuencia seleccionada para la transmisión y recepción fue 28 MHz. Con esta frecuencia conocida fue realizada instalación las antenas en desuso con las distancias descritas en el manual WERA con la excepción de la antena Rx2, la cual fue necesaria instalarla al doble de distancia debido al material encontrado en el suelo, al fijar la antena con las estacas. Luego con las antenas instaladas, fueron medidas sus propiedades eléctricas utilizando el equipo VNA y graficadas en forma de coeficiente de reflexión, ROE y carta Smith. Esto mostró que sus frecuencias de operación no correspondían a la seleccionada anteriormente, basada en los equipos para realizar la transmisiónrecepción. Esto llevó a realizar un trabajo de resintonización de las antenas. La resintonización lograda fue, en primera instancia en base a modelación de antenas en software Feko. Este software entregó los valores geométricos para una antena, las que luego fueron aplicadas a una antena real.

Al realizar cortes de la antena Tx1 como lo indicaba Feko, la **frecuencia de opera**ción medida con VNA se acercó a la deseada, sin embargo la impedancia no. Debido a que la impedancia puede ser ajustada posteriormente mediante, resistencias, inductores y capacitores conectados en serie, fue priorizado el ajuste en base a coeficiente de reflexión y ROE únicamente.

Esta diferencia entre lo modelado y lo medido de debe probablemente a la pandereta ubicada a un costado de las antenas. Esta pandereta es la que obligó que el ángulo de los radiales fuera 0 grados (justo por sobre el nivel de éstas).

Con las antenas sintonizadas a 28 MHz fue realizada la transmisión del tono ocupando para recepción dos periféricos SDR controlados por el software GNU Radio Companion, los que en conjunto implica el uso de tecnología SDR, tal como fue fijado en los objetivos.

Las conclusiones pueden ser definidas de la siguiente forma:

Fue encontrado un lugar adecuado para instalar las antenas. Este fue la pesquera Camanchaca, en Talcahuano.

En base a restricciones de los equipos para transmisión y recepción del tono, la frecuencia seleccionada fue 28 MHz.

Fue realizada la instalación de un juego de antenas en desuso a las distancias establecidas por el manual WERA las que dependen del la frecuencia designada excepto Rx2 por problemas al poner las estacas. Rx2 fue instalada al doble de la distancia (en el lugar de la futura Rx3).

Ocupando el equipo VNA, fueron caracterizadas las antenas en coeficiente de reflexión, ROE e impedancia.

Fue verificado que todas las antenas instaladas tenían frecuencia de operación entre 19.5 y 20 MHz.

En base a simulaciones en Feko, fueron encontradas medidas geométricas para aplicar a las antenas con el fin de desplazar su frecuencia de operación a 28 MHz.

4.2. DISCUSIÓN

Fueron aplicadas las medidas simuladas en antena Tx1 parcialmente, logrando desplazar la frecuencia de operación.

Al mover el ángulo de depresión de los radiales de Tx1 la impedancia empeoró. El mejor ángulo encontrado empíricamente fue 0° .

La diferencia entre lo modelado y medido puede deberse a la pandereta delimitadora del lugar. Los 0 grados corresponden a situar los radiales a la misma altura de la pandereta.

Aplicando los mismos cambios realizados en antena Tx1 a las demás, fue posible cambiar la frecuencia de operación de todas las antenas.

Fue realizada la transmisión y recepción del tono a 28 MHz. Para la recepción fue utilizado Radio Definida por Software, en base a RTL-SDR y GRC.

Todo el trabajo realizado y los equipos seleccionados funcionaron como fue esperado, resultando en una exitosa transmisión del tono de 28 MHz.

En resumen, el objetivo de el presente trabajo de HP, se cumplió completamente, porque pudimos generar una señal, transmitirla y recepcionarla en un conjunto de cuatro antenas emisoras y dos receptoras sintonizadas en los 28 MHz. El trabajo realizado es fundamental para enfrentar la construcción de un radar marino HF en un futuro cercano.

4.2. Discusión

Aunque en un principio se esperaba utilizar como generador de la señal a transmitir un periférico SDR llamado HackRF One, debido a la baja potencia generada por éste, fue necesario utilizar un transceptor ICOM-735, equipo usado por la comunidad de radioaficionados. Esto sin embargo, nos hizo cambiar la frecuencia de transmisión a los 28 MHz y además complicó el proceso de realizar la sincronización para medir los tiempos de generación y recepción de la señal. Por lo tanto, en este trabajo sólo aseguramos que una vez que se iniciaba la transmisión en las antenas transmisoras, se obtenía una señal en las antenas receptoras de manera casi simultánea. Para recepcionar la señal emitida, se utilizó una antena acoplada al periférico RTL-SDR y todo el tratamiento de señales básicos se realizaron mediante el uso del software GRC.

El ajuste de las antenas fue un trabajo muy lento debido a que el Departamento de Geofísica no posee el equipamiento necesario para el ajuste de los parámetros de sintonización de antenas. Esto nos obligó a depender de la disponibilidad de un analizador de redes VNA perteneciente al laboratorio de astronomía CePIA para ir a terreno y poder realizar el trabajo en el menor tiempo posible.

Los valores de los parámetros de las antenas obtenidos con Feko no fueron los mas adecuados, según se comprobó al compararlo con mediciones en terreno. Una posible explicación para la discrepancia observada, puede ser debido al hecho a que el lugar de instalación de las antenas está rodeado de panderetas y cables eléctricos y de alambres púas. Esto podría mejorarse si se pudiera realizar la instalación de las antenas en un lugar más despejado.



Figura 4.1: Tendido eléctrico y alambres al costado de las antenas.

El trabajo en terreno mostró que el diseño de las antenas, principalmente los radiales, era muy frágil, por lo que fue difícil obtener mediciones no dispersas con el VNA. Esto podría mejorarse si se utilizara otro tipo de antena, como una antena Yagi-Uda, al menos para realizar la transmisión (Aunque este es un tipo de antena más compleja, es más robusto, pues no posee radiales y además puede ser direccionada fácilmente rotándola).

En nuestro trabajo experimental nos vimos enfrentado a algunos problemas domésticos, que podrían mejorarse simplemente cambiando el lugar de instalación de las antenas. Por ejemplo, hubieron ocasiones en que el lugar donde se ubicaron las receptoras, fue completamente inundado después de una lluvia por lo que no era posible acceder a las antenas.

4.3. Recomendaciones y Trabajo Futuro

A continuación se propone un conjunto de recomendaciones para ser tomadas en cuenta en una continuación del trabajo realizado

Sería interesante diseñar un procesamiento en GRC para la señales crudas obtenidas de las antenas receptoras del radar de Faro Hualpén. Por ejemplo, en la siguiente Figura 4.2 se puede observar la generación de un barrido en frecuencias en las antenas emisoras, conocida con el nombre de Chirp, el cual fue captado por medio de HackRF One (Ver Apéndice B). Esto da lugar a realizar más pruebas ocupando este periférico SDR, ya que permite llegar a frecuencias en donde opera el radar instalado de CHIOOS. Probablemente las líneas marrones-amarillas corresponden a la señal transmitida por las antenas transmisoras del radar. Las líneas verdes posiblemente correspondan a reflexiones de la señal, o posiblemente, a otra señal transmitida por otro equipo que no es el radar. A primera vista, la señal verde pareciera iniciar justo al mismo tiempo que la señal transmitida aparece en la gráfica, y hay veces que no. Para obtener más información seria necesario eliminar la señal transmitida sustra-yéndola a la señal recibida, ya que la señal transmitida al tener más potencia que la recibida y al estar a una frecuencia casi idéntica a la recibida enmascara lo reflejado por el océano.

La línea roja constante es un error del equipo que siempre está presente. No debe ser tomado en cuenta como dato proveniente de la antena.



Figura 4.2: Waterfall de antena Rx8 de Radar Faro Haulpén.

Ya que fue probado que es posible utilizar SDR para obtener señales del radar HF instalado en Hualpén con una antena, el siguiente paso natural corresponde a conectarse a todas las antenas con RTL-SDR. Como fue visto anteriormente el problema de estos equipos es llegar a frecuencias bajo 27 MHz. Una solución es la utilización de los periféricos RTL-SDR en modo Direct-Sampling, pemitiéndoles llegar hasta frecuencias de 0 MHz. Esto requiere modificaciones internas al equipo junto con cablear algunos nuevos componentes. Esto está descrito en la comunidad de software libre, tal como muestra el esquemático que aparece en Figura 4.3 publicado por el usuario YU3MA.



Figura 4.3: Esquemático modificaciones RTL-SDR para Direct-Sampling.

Apéndice A

Parámetros de sintonización

Cuando se trabaja con sistemas de corriente alterna sin frecuencia fija, es necesario conocer el comportamiento del sistema a distintas frecuencias. Para caracterizar estos sistemas se requiere de variables que caractericen el sistema en el dominio de la frecuencia. Las variables y el equipo necesario para obtenerlas son los siguientes:

A.1. VNA

El equipo capaz de medir impedancia sistemas eléctricos es el VNA (Vector Network Analizer) [11] (ver Figura A.1). Este equipo mide conectándolo a los puertos del sistema y luego registrando los distintos flujos de energía entre los puertos a distintas frecuencias definidas por el usuario. Estos equipos permiten obtener gráficas casi en tiempo real de lo que esta midiendo por lo que es posible ocuparlo para corregir en el momento los sistemas eléctricos. Es importante notar el el equipo VNA guarda datos de lo medido en el momento. Generalmente todos los datos son referenciados a una frecuencia, la cual es generada por el equipo y le permite medir. Por esta razón los datos medidos por el VNA **no son series de tiempo** y es sólo una captura de la respuesta del DUT (Device Under Test) a distintas frecuencias mientras progresivamente actualiza las gráficas con las nuevas frecuencias y nuevas respuestas.

Por estos motivo los datos del equipo VNA a veces son dispersos porque el DUT es modificado y los datos medidos antes y después de la modificación se mezclan en la misma gráfica.



Figura A.1: Equipo VNA. Imagen extraída de keysight.com.

A.2. Gráficas generadas con datos de VNA

Los parámetros S (Scattering) describen la relación de entrada y salida entre puertos o terminales en un sistema eléctrico. Por ejemplo si se tienen 2 puertos, entonces S_{12} representa la potencia transferida desde el puerto 2 al puerto 1. Los puertos pueden ser definidos en cualquier lugar de un sistema eléctrico. Para una antena, lo normal es definir el puerto justo en donde se conecta a la línea de transmisión. Si este fuera el puerto uno, entonces S_{11} será la energía reflejada por la antena hacia el transmisor.

Los tipos de gráficas son las siguientes.

A.2.1. Gráfica S_{11}

En este tipo de gráfica (ver Figura A.2), lo que se busca es que el valor de $S_{11}[dB]$ sea el mínimo posible. Mientras menor sea el valor para una determinada frecuencia del eje de las abscisas, menor será la energía reflectada por el DUT. Estos mínimos en el caso de antenas, son los que determinan la llamada frecuencia de operación de las mismas. Es posible que exista más de un mínimo en la curva. Cuando esto ocurre se dice que son antenas multibanda[15]. En la práctica sólo es necesario que en la frecuencia de interés, esté presente el menor valor en la curva de S_{11} .



Figura A.2: Gráfica S_{11} .

La gráfica se interpreta buscando los mínimos. Como S_{11} es el coeficiente de reflexión, los mínimos indican que en esa frecuencia menos energía de la transmitida es reflejada y se podría decir que, para este caso, la antena está sintonizada en 29 y 45 MHz.

A.2.2. Gráfica VSWR

Este tipo de gráficas, al igual que las de S_{11} lo que se busca son mínimos. VSWR estos valores van de 1 a ∞ . Este valor es ocupado para definir condiciones de operación de transmisores, que a veces exigen un VSWR menor que un cierto valor. Algunos equipos tienen un medidor análogo de VSWR que permite conocer el VSWR de la línea de transmisión y antena conectada al equipo a modo de test.



Figura A.3: Gráfica VSWR.

En la gráfica de Figura A.3 se muestran datos de antena TX1 obtenidos con el equipo VNA. Se puede ver que los valores de VSWR son mínimos en aproximadamente en 28 y 44 MHz.

A.2.3. Gráfica carta Smith

La carta Smith es un tipo de gráfica, que permite mostrar la impedancia de un DUT. Como la impedancia tiene componentes real y complejos, este tipo de gráfico es similar a un plano complejo. Si la impedancia característica y la característica es de 50 Ω en la frecuencia en la que se está interesado, el punto para esa frecuencia debiera estar en el centro de la gráfica. Si esto fuera cierto, para los mismos datos y misma frecuencia debiera tener mínimos en las gráficas de VSWR y S_{11} .

En la gráfica de Figura A.4 se ven datos de la antena Tx1. La impedancia de la frecuencia de interés (punto rojo a 28 MHz) no está en el centro, por lo que las impedancias no están adaptadas.

Los valores del centro son valores normalizados de acuerdo a la impedancia característica. Por esto si la frecuencia de interés está en el centro, su impedancia es 50 Ω aunque en la gráfica aparezca el valor 1.0.



Figura A.4: Gráfica carta Smith.
58APÉNDICE A. PARÁMETROS DE SINTONIZACIÓN

Apéndice B

Equipos

B.1. Periféricos SDR

Aunque el procesamiento de señales es hecho en tiempo real en el software de SDR (Software Defined Radio), todavía es necesario un componente de hardware que permita la entrada de un **flujo** de datos al computador. Este componente de hardware es el **periférico SDR** [16].

Un periférico SDR es un dispositivo que convierte señales disponibles de manera física (Ondas Acústicas, Ondas Electromagnéticas) en un flujo de bits, que luego pueden ser procesadas en un software SDR. EL flujo de bits que crean estos periféricos SDR tiene limitaciones, dependiendo del tipo de conexión con el PC. Por ejemplo no es lo mismo que el periférico SDR se conecte al PC mediante USB 2.0, 3.0 o pci-express así como la resolución de su ADC. Mejores ADC generalmente necesitan mayor velocidad de conexión al PC. Algunos modelos comunes de periféricos SDR son detallados en la Tabla B.1:

Equipo	USD	Frecuencia	ADC	Ancho de Banda	Tx/Rx
RTL-SDR	10-22	27-1700 Mhz	8 bits	3.2 Mhz	Rx
RTL-SDR.com v3	19.95	500KHz-1.75 Ghz	8 bits	3.2 Mhz	Rx
HackRF One	299	1-6000 MHz	8 bits	20 MHz	Tx o Rx
USRP B200 One	675	70-6000 MHz	12 bits	56 MHz	Tx y Rx

 Tabla B.1: Periféricos SDR comunes. Datos obtenidos de RTL-SDR.com.

B.1.1. RTL-SDR

RTL-SDR (ver Figura B.1) es un periférico que contiene un integrado con ADC del fabricante *Realtek* (RTL) y un sintonizador del fabricante *Raphael*[17]. Este dispositivo es el más barato del los RTL-SDR y está disponible en Concepción a un precio económico (USD 11). El dispositivo viene con una pequeña antena, pensada para radio FM y ISDB-T (Televisión Digital), además de un CD con software para ver Televisión Digital y escuchar radio FM en *Windows*. Como este dispositivo no fue pensado para ser utilizado con SDR, es necesario ocupar un controlador modificado que permite poner el dispositivo en un modo donde es posible ocuparlo indefinidamente como periférico SDR y procesar los datos en software SDR.



Figura B.1: RTL-SDR. Imagen extraída de HackerWarehouse.com..

B.1.2. Sincronización RTL-SDR

Uno de los requerimientos de los radares para que funcionen correctamente es que la desmodulación de las señales sea hecha en forma coherente [18]. Esto se logra sincronizando los relojes que controlan los ADC de RTL-SDR[19].

Los RTL-SDR (ver Figura B.2) están hechos para funcionar en forma autónoma. por lo que una misma señal recibida en dos receptores idénticos y a la misma distancia de la fuente, es obtenida con desfases que cambian en el tiempo uno respecto a otro. Esto ocurre porque las señales de reloj que controlan los ADC no están sincronizadas. Experimentalmente es posible sincronizar 2 equipos conectando las señales de reloj de uno de los equipos al otro por medio de cables[19]. Con esto se logra que los desfases entre los equipos se mantenga fijos. Luego el desfase restante es fácilmente corregible en software SDR.



Figura B.2: Dos RTL-SDR conectados al mismo reloj. Imagen extraída de Piotr Krysik's webpage

B.2. Equipos Radio Aficionados

B.2.1. ICOM IC-735

El ICOM IC-735 (ver Figura B.3) es un equipo de radioaficionados que permite transmitir y recibir señales SSB, CW, AM, FM. Este equipo puede recibir y demodular las señales en todo el ancho de banda de 0.1 a 30 MHz. Para la transmisión, sólo puede hacerlo en **bandas definidas**. Estas son mostradas en Tabla B.2:



Figura B.3: ICOM-735. Imagen extraída de Google Imágenes

Inicio MHz	Final MHz		
1.8	2.0		
3.4	4.1		
6.9	7.5		
9.9	10.5		
13.9	14.5		
17.9	18.5		
20.9	21.5		
24.4	25.1		
27.9	30.0		

Tabla B.2: Bandas transmisión ICOM-735

Este equipo tiene una función de Onda Constante (CW) que es utilizada para código morse. Esto permite transmitir un tono en cualquier frecuencia dentro de las bandas de transmisión.

Apéndice C

SDR

C.1. SDR

SDR es una nueva forma uso de recursos computacionales, que permite realizar procesamiento de señales, que sólo podían ser realizados en hardware, realizarlos en software y en **tiempo real**. Un software especialmente utilizado por la comunidad de software libre es el GNU Radio.

C.1.1. GNU Radio

GNU Radio es un software que está principalmente hecho en C++ y Python , que facilita la creación de procesamientos de señales, para correrlos en tiempo real. Este software está disponible primariamente como un módulo de Python. El software contiene filtros así como otras herramientas que comúnmente están disponibles en otros sistemas de procesamiento de señales. Una de las características importantes, es que permite conectar bloques de procesamiento directamente sin tener que recurrir a variables intermedias. Si fuera necesario añadir funcionalidades, el mismo software tiene un asistente que permite crear nuevos procesamientos en C++ o Python por intérprete de comandos[20].

Un típico procesamiento en GNU Radio es así:

```
from gnuradio import gr
class sismos3(gr.sync_block):
    """
    docstring for block sismos3
```

```
"""
def __init__(self):
    gr.sync_block.__init__(self,
        name="sismos3",
        in_sig=None,
        out_sig=[numpy.float32])

def work(self, input_items, output_items):
    # <+signal processing here+>
t#=numpy.linspace(0,5,1000)
#p=range(len(t))
my=ones=numpt.ones(1000)
        output_items[0]=input_items
output_items[0][:]=my
    return len(output_items[0])
```

C.1.2. GNU Radio Companion

GNU Radio Companion es una interfaz gráfica para GNU Radio que automáticamente crea un código Python de acuerdo al procesamiento creado en GNU Radio Companion. Esto hace posible un uso de GNU Radio mucho más rápido. Su uso se basa en la unión de bloques disponibles en una librería preinstalada, de tal forma que crear una serie de procesamientos sucesivos a una señal resulta muy sencillo. El aspecto final del procesamiento es muy parecido a un mapa contextual,

mostrado en Figura C.1:



Figura C.1: Aspecto típico procesamiento GNU Radio Companion.

Como se ve en la imagen, este es un procesamiento típico en donde se le aplica un filtro pasa-bajo a una señal guardada previamente en un archivo. Generalmente cualquier procesamiento de una señal debe de haber un bloque **Source** y un bloque **Sink**. Source es un bloque fuente de flujo de datos y Sink es un bloque donde se comsumen datos, es decir, un sumidero.

C.2. Creación de bloques en GNU Radio Companion

GRC tiene tres tipos de bloques básicos que dependen de la cantidad de datos que entran y salen de los bloques. En resumen los bloques se pueden clasificar en 4 tipos:

Nombre	Entrada:Salida		
Sincronizados	1:1		
Decimación	N:1		
Interpolación	1:M		
General	N:M		

Tabla C.1: Tipos de bloques en GNU Radio basada en datos de wiki.gnuradio.

Generalmente para crear un bloque hay que tener instalado GRC, el cual incluye una herramienta de creación de bloques via intérprete de comandos.

\$ gr_modtool newmod add

Este comando crea la estructura de carpetas y archivos de un módulo, los cuales son los mostrados en la Figura C.2

$C \to \to \to \Phi$ Creatingenerated - gentemation						Q E = X
C feoreire					<u> </u>	
Ф Сарен ремене		100 million (100 million)	foreigner and			
4 Discliges						
D Occumentos			Charlen be			
i indgeres	40.5	- chane	CP-995E8C.01		etanpies.	- 48C
ale Movee			Sec.			
- Wang						
🗇 Fapelera						
₫ envived@producom	Indude		PWNIFEST(m:	pytton	5740	
+ Clus abbaranes						

Figura C.2: Estructura de carpetas y archivos de un bloque GRC.

De estos archivos los más importantes son los de la capeta Python y GRC. En la capeta Python se encuentra el código que realiza efectivamente el procesamiento, en que puede variar de acuerdo al tipo de bloque. En la Carpeta GRC de define cómo se verá el bloque y variables configurables en GRC.

Finalmente con los códigos listos, se necesita correr algunos comandos más en la carpeta raíz del bloque:

```
$ mkdir build
$ cd build/
$ cmake ../
$ make
$ sudo make install
```

\$ sudo ldconfig

Luego ya se puede probar el nuevo bloque en GRC. Si el bloque tiene algún error el propio programa avisará que existe un error apenas inicie y no se podrá usar el bloque creado.

68APÉNDICE C. SDR

Apéndice D

Digitalización de señales

D.1. Muestreo de señales

Cuando se tiene una señal continua y se requiere hacer un procesamiento en forma digital, es necesario discretizar (ver Figura D.1) esa señal tomando muestras de la señal cada cierto tiempo, de tal forma que las muestras tomadas contengan la mayor parte de la información contenida en la señal original. Normalmente se considera necesario que la tasa de muestras sea el doble o más que la máxima frecuencia que se necesita representar en la digitalización El componente de hardware que realiza esta tarea es el ADC.



Figura D.1: Digitalización con resolución de 4 bit. Imagen extraida de Videoclub Zoetermeer

D.1.1. Mixers

En señales de RF, las frecuencias que se trabajan son 3kHz a 300 GHz. Para digitalizarlas se necesitan muestreadores de velocidad del doble de la frecuencia de interés. Estos equipos es muy difícil fabricarlos, y aunque fuera posible, procesar tal cantidad de datos, tampoco sería posible al nivel de la tecnología actual. Es necesario un método alternativo.

Por ejemplo si se tiene una señal : cos(wt) y se multiplica por otra señal cos(w't), se obtiene

$$\cos(wt)\cos(w't) = \frac{\cos(wt + w't) - \cos(wt - w't)}{2}$$

Esto da un indicio de que multiplicando señales es posible *trasladar* las señales en el dominio de la frecuencia. Por ejemplo una señal de radio FM a 98 MHz se quiere digitalizar con un muestreador de 4 MHz (máxima frecuencia 2 MHz). Para este caso es necesario multiplicar la señal de 98 MHz con una de 100 MHz.

$$\cos(98t)\cos(100t) = \frac{\cos(198t) - \cos(2t)}{2}$$

Como se puede ver, se obtienen dos frecuencias: 198 MHz y 2 MHz. La frecuencia alta generalmente no es necesaria, por lo lo que simplemente se aplica un filtro pasa bajo. EL proceso anterior es llamado downsampling (ver Figura D.2) porque permite digitalizar señales de alta frecuencia con ADC de relativamente bajo costo y más lentos. El componente de hardware que hace el trabajo de trasladar las frecuencias a frecuencias bajas sin perder información es llamado Mixer. Los Mixer generalmente tienen 3 conexiones: LO,RF y IF. Para nuestro caso: LO es 100 MHz, RF es 98 MHz y IF 2 MHz [21].



Figura D.2: Uso de mixers. Imagen extraída de Digikey.com.

D.1.2. Muestreo IQ

Un ADC normalmente funciona tomando muestras de voltajes cada cierto tiempo y representando esos valores en una determinada secuencia de valores posibles que dependen de la resolución del ADC. Estos voltajes digitalizados pueden provenir de la suma de cualquier señal. Al muestrear sólo un voltaje es posible que esté perdiendo información y viendo una señal, que proviene de dos cosas distintas, sin que pueda diferenciarlas. Por ejemplo:

 $_{\dot{c}}$ Qué sucede si la frecuencia de interés está a 102 MHz? Haciendo los cálculos:

$$\frac{\cos(wt + w't + 2\phi) - \cos(wt - w't)}{2} = \frac{\cos(202t + 2\phi) - \cos(-2t)}{2}$$

La frecuencia obtenida es negativa (ver Figura D.3), pero este es posible diferenciarlo con un ADC? La verdad es que no. La forma con la que es posible diferenciarlas es ocupando un muestreador **IQ**.

IQ proviene de *In-phase* y *Quarter-phase* lo que significa que el muestreo es tomado a partir de una señal multiplicada por LO generado por una señal coseno (I) y otra multiplicado por un LO seno (Q).

De esta forma, si tenemos una señal y se descompone en IQ por medio de mixers:

$$e^{i98t}\left[\frac{e^{100i} - e^{-100i}}{2i}\right] = \left[\frac{e^{198i} - e^{-2i}}{2i}\right]$$



ambas multiplicaciones obtienen una señal a 2 MHz pero ya es posible diferenciar su origen por medio del desfase de la componente Q (imaginaria), la señal de 98 MHz produce una señal con frecuencia positiva y la 102 MHz produce una señal con frecuencia negativa.

Otro punto importante del uso de mixers y muestreo IQ es que posibilidad obtener la desmodulación de una señal. Por ejemplo, al obtener los valores de IQ de una señal AM, esta señal IQ es efectivamente el mensaje que fue modulado en la señal portadora de más alta frecuencia. Al obtener el cambio de fase entre cada muestra de valores IQ y la siguiente se obtiene el mensaje que llevaba la señal portadora en el caso de FM[16].



Figura D.3: Composisión y descomposición de señal con frecuencia negativa.

D.2. Implementación Muestreo IQ en RTL-SDR

El muestreo IQ está implementado internamente en RTL-SDR. Este dispositivo tiene dos integrados principales: Raphael Micro R820T y RTL2832U (ver Figura D.4). El primero es el que trabaja la parte análoga, y prepara la señal para el ADC, de tal forma que esté en una frecuencia que el ADC pueda muestrearla correctamente y no aparezca la señal suma de frecuencias. El segundo integrado es el que contiene el ADC y encargado de muestreos IQ y aplicarles decimación. Es importante notar que 28 MHz es una frecuencia fija de muestreo del ADC y esta justamente es la señal que hay que conectar entre dos RTL-SDR para sincronizarlos[19].



Figura D.4: Diagrama procesamiento dentro de RTL-SDR. Imagen extraída de [17].

74APÉNDICE D. DIGITALIZACIÓN DE SEÑALES

Apéndice E

FEKO

Feko es un software que es utilizado para simular el compartimento de diseños de antenas en forma teórica. Este software permite obtener los parámetros de sintonización de una antena, o un arreglo de antenas (ver Figura E.1). También puede calcular el patrón de radiación de una antena en campo lejano y campo cercano.

En Feko es posible crear cualquier tipo de antena y conocer cómo varían los parámetros de sintonización conforme cambian las medidas físicas de la antena[22].

E.1. Optimización con FEKO

El software Feko tiene una funcionalidad de optimización automática[22], en la cual se le dan variables que pueden ser modificadas, para obtener un resultado de ROE e Impedancia considerados buenos, definidos por el usuario.

Feko realiza simulaciones con todos los valores (ver Figura E.2) de las variables que pueden ser modificadas[23]. Este valor final que se encuentra, es el valor optimizado que cumple con todas las condiciones establecidas al inicio.



Figura E.1: Patrón radiación arreglo 4 antenas en Feko.



Figura E.2: Optimización realizada en Feko para el ángulo de depresión de los radiales de antena Tx1.

Apéndice F

Balun

Se denomina balun (del ingles **bal**anced-**un**balanced) al dispositivo (ver Figura F.1) capaz de transformar una línea de transmisión balanceada en una no balanceada y viceversa (unbal).



Figura F.1: Interior de un balun 4:1. Imagen extraída de Pinterest.cl

F.1. Líneas de Transmisión

Un línea de transmisión balanceada se caracteriza por ocupar dos cables conductores gemelos (ver Figura F.2) para transmitir la señal. La señal es transmitida en ambos cables, pero uno con un desfase de 180 grados (V-) respecto al otro (V+). El objetivo es que cualquier ruido externo sea cancelado al sumar electrónicamente los voltajes: V+-(V-).



Figura F.2: Partes internas línea de transmisión balanceada. Imagen extraída de telecomworld101.com.

Por el contrario una línea de transmisión desbalanceada (ver Figura F.3) se caracteriza por ocupar sólo un conductor central rodeado por una malla protectora. Al igual que la línea de transmisión balanceada la malla es conectada a tierra. Sólo el conductor central es el que transmite la información y debido a esto no tiene forma de eliminar el ruido externo. Por esta razón las líneas desbalaceadas son ocupadas mayoritariamente en distancias cortas.



Figura F.3: Partes internas línea de transmisión desbalanceada (coaxial). Imagen extraída de telecomworld101.com.

F.2. Balun como adaptador de impedancias

Como segunda función, el balun puede desempeñar la función de adaptador de impedancias en el caso que se requiera. Por ejemplo, se quiere transmitir una señal generada por un transmisor HF que tiene una salida balanceada con impedancia de 50 Ω y la antena es un dipolo que tiene una alimentación desbalanceada (coaxial) con impedancia de 200 Ω . Para este caso se requiere un balun 1:4. Si no hubiera que adaptar las impedancias bastaría sólo con un balun 1:1. Este tipo de balun sólo transforma líneas de transmisión, pero no adapta impedancias.

Glosario

- **bobina** bobina o bobina de carga es un término usado para inductores en antenas de radio, o entre la antena y su línea de alimentación, para hacer una antena eléctricamente corta, resonante con su frecuencia de operación.
- **controlador** controlador o *driver* es un programa informático que permite al sistema operativo interaccionar con un periférico..
- decimación En procesamiento digital de señales, decimación es el proceso de reducir la tasa de muestreo de una señal.. , 73
- **DVB-T** siglas de Digital Video Broadcasting Terrestrial, en español: Difusión de Video Digital-Terrestre, es el estándar para la transmisión de televisión digital terrestre (TDT) creado por la organización europea Digital Video Broadcasting (DVB).
- HackRF One HackRF One es un (SDR) de banda ancha tranceptor half-duplex creado y manufacturado por Great Scott Gadgets..
- half-duplex Se denomina semidúplex —en inglés half-duplex— a un modo de envío de información que es bidireccional pero no simultáneo.
- **HF** HF o SW del inglés High Frequency o shortwave, altas frecuencias u onda corta, son las siglas utilizadas para referirse a la banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de 3 MHz a 30 MHz.
- **Interferometría** Interferometría es una técnica geodésica que calcula el patrón de interferencia causado por la diferencia de fase entre dos imágenes adquiridas es dos tiempos distintos, por vehículos espaciales con sistemas inSAR. , 5
- radiales Son cables que se fijan a la base de una antena, usados para aumentar la conductividad del suelo cerca de la base de la antena.
- **RTL-SDR** RTL-SDR es un SDR de bajo costo que usa el sintonizador de DVB-T TV basado en el chipset RTL2832U. VII, , 18, 19, 35, 44, 52, 60, 73

- **spliter** Splitter o divisor es un componente electrónico que permite dividir la energía que ingresa en las salidas generalmente en partes iguales.
- **Tranceptor** Un transceptor es un dispositivo que cuenta con un transmisor y un receptor que comparten parte de la circuitería o se encuentran dentro de la misma caja. , 13

Siglas

- ADC analog-to-digital converter., 60, 69, 73
- **CePIA** Centro Para la Instrumentación Astronómica., 50

CHIOOS Chilean Integrated Ocean Observing System.

- ${\bf CW}\,$ Continuous Wave. , 43
- **DUT** Device Under Test., 53, 54, 56
- ${\bf FFT}\,$ Fast Fourier transform. , 45
- GRC GNU Radio Companion. VIII, , 44, 65-67
- ${\bf LO}\,$ Local Oscilator. , 71
- Radar Radio detection and ranging.
- **RF** Radio Frecuency., 70
- ${\bf ROE}\,$ Relación de Onda Estacionaria. , 10
- **SDR** Software Defined Radio., 13, 49
- **SWR** Standing Wave Ratio.
- VNA Vector Network Analizer. XIII, , 53, 56
- **VSWR** Votage Standing Wave Ratio.
- WERA Wellen Radar., 2, 24, 27

82Acronyms

Bibliografía

- M. E. Weber. «Advances in operational weather radar technology». Lincoln Laboratory Journal (2006), págs. 9-30.
- D. Massonnet y K. L. Feigl. «Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface». *Reviews of Geophysics* 36.4 (1998), págs. 441-442.
 URL: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/ 97RG03139.
- M. Skolnik. Radar Handbook, Third Edition. Electronics electrical engineering. McGraw-Hill Education, 2008, pág. 23. URL: https://books.google.cl/ books?id=76uF2Xebm-gC.
- [4] F. Principe y col. «Software-Defined Radio Technologies for GNSS Receivers: A Tutorial Approach to a Simple Design and Implementation» (2011).
- [5] A. Prabaswara, A. Munir y A. B. Suksmono. «GNU Radio based softwaredefined FMCW radar for weather surveillance application». 2011 6th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA). 2011, págs. 227-230.
- [6] K.-W. Gurgel, H.-H. Essen y S. P. Kingsley. «HF radars : Physical limitations and recent developments». 2005.
- [7] K. Vachhani y R. A. Mallari. «Experimental study on wide band FM receiver using GNURadio and RTL-SDR». 2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). 2015, págs. 1810-1814.
- [8] A. Al-safi, L. Narasimhan y B. Bazuin. «Software defined community radio using low cost hardware and free software». 2016 Universal Technology Management Conference (UTMC). 2016, pág. 51.

- [9] R. Flickenger. Wireless Networking in the Developing World. Capítulo 4: Antenas y lineas de transmisión. Limehouse Book Sprint Team, 2006, págs. 105-144. URL: http://wndw.net/pdf/wndw2-en/wndw2-ebook.pdf.
- [10] C. P. Vega. Líneas de Transmisión. [Online; recuperado 5 Septiembre 2018].
 URL: http://www.cartagena99.com/recursos/electronica/apuntes/ CH9ST_Web.pdf.
- [11] N. Instruments. Introduction to Network Analyzer Measurements: Fundamentals and Background. [Online; accessado 19 Septiembre 2018]. 2014. URL: www. ni.com/rf-academy.
- [12] M. Weiner. Monopole Antennas. Taylor & Francis, 2003. URL: https:// books.google.cl/books?id=f1KtCyn03RsC.
- [13] R. Burberry e I. of Electrical Engineers. VHF and UHF Antennas. Electromagnetics and Radar Series. [Online; accessado 5 Septiembre 2018]. P. Peregrinus, 1992. URL: https://books.google.cl/books?id=6DG09x0jbkMC.
- K.-W. Gurgel. How to set up a WERA Site. [Online; accessed 12-Septiembre-2018]. 2009. URL: http://wera.cen.uni-hamburg.de/WERA_Guide/WERA_Guide.shtml.
- [15] A. R. R. League. THE ARRL ANTENNA BOOK. Electromagnetics and Radar Series. [Online; recuperado 5 Septiembre 2018]. The American Radio Relay League, Inc., 1998. Cap. 7-1.
- [16] M. Ossmann. Software Defined Radio with HackRF. [Online; accessed 20 Septiembre 2018]. 2014. URL: https://greatscottgadgets.com/sdr/.
- [17] R. W. Stewart y col. «A low-cost desktop software defined radio design environment using MATLAB, simulink, and the RTL-SDR». *IEEE Communications Magazine* 53.9 (2015), págs. 64-71.
- [18] K.-W. Gurgel y col. «Wellen Radar (WERA): a new ground-wave HF radar for ocean remote sensing». *Coastal Engineering* 37.3 (1999), págs. 219-234. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383999000277.
- [19] P. Krysik. Multi-RTL: Making multiple channels receiver from cheap RTL-SDR dongles. [Online; accessado 19 September 2018]. 2016. URL: https://github. com/ptrkrysik/multi-rtl.

- [20] Wikipedia contributors. GNU Radio Wikipedia, The Free Encyclopedia.
 [Online; accessado 19 Septiembre 2018]. 2018. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=GNU_Radio&oldid=858967513.
- [21] B. C. Henderson y J. A. Cook. «Image-reject and single-sideband mixers». Wi TechNote 12.3 (1985).
- [22] F. Altair. «Suite 7.0». Online: http://www. altair. com (2017). [Online; accesado 12 Septiembre 2018].
- [23] M. Schoeman, U. Jakobus y B. Woods. «FEKO Optimization Capabilities: Simplex, Particle Swarm, Genetic Algorithm» (2018).