



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA BASADO EN USRP PARA
LA MEDICIÓN DE RADIACIONES NO IONIZANTES DE
RADIODIFUSIÓN FM COMERCIAL**

PRESENTADA POR

VICTOR ROBERTO COLLAZOS VILLALOBOS

RODRIGO GUILLERMO VILLAVICENCIO MONTOYA

ASESOR:

SANTIAGO FIDEL ROJAS TUYA

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

LIMA – PERÚ

2017



Reconocimiento

CC BY

Los autores permiten a otros distribuir y transformar (traducir, adaptar o compilar) a partir de esta obra, incluso con fines comerciales, siempre que sea reconocida la autoría de la creación original.

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA BASADO EN USRP PARA LA
MEDICIÓN DE RADIACIONES NO IONIZANTES DE RADIODIFUSIÓN
FM COMERCIAL

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR

COLLAZOS VILLALOBOS VICTOR ROBERTO
VILLAVICENCIO MONTOYA RODRIGO GUILLERMO

LIMA - PERÚ

2017

*A nuestros padres,
nuestras familias, a todos, se los
agradecemos de todo*

$$r = 1 - \operatorname{sen}\theta$$

“Antes que toda otra cosa la preparación es la clave para el éxito”

Alexander Graham Bell.

Agradecemos a Dios, a nuestros padres, y a todos nuestros familiares por estar con nosotros a cada paso que damos.

A nuestros profesores y especialmente por todo el apoyo a nuestro asesor, por guiarnos y ayudarnos a encontrar nuestro camino durante toda la carrera.

A nuestros amigos, compañeros y a todos aquellos que contribuyeron de alguna manera al desarrollo de este proyecto.

Gracias

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES Y CUADROS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE ANEXOS	viii
RESUMEN	ix
INTRODUCCIÓN	xi
CAPÍTULO I. ASPECTOS INTRODUCTORIOS	
1.1 Problemática	1
1.2 Objetivos	1
1.2.1 Objetivo general	1
1.2.2 Objetivos específicos	1
1.3 Justificación	2
1.4 Limitaciones	2
1.5 Viabilidad	3
a) Viabilidad técnica	3
b) Viabilidad económica	3
c) Viabilidad social	3
d) Viabilidad operativa	3
e) Alternativas	4
1.6 Aplicaciones académicas	4
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes	6
2.1.1 Antecedentes locales	7
2.1.2 Antecedentes nacionales	8
2.1.3 Antecedentes internacionales	10
2.1.4 Equipos comerciales empleados para la medición de RNI	11
2.2 Bases teóricas	12

2.2.1	Ondas electromagnéticas	12
2.2.2	Propagación	13
2.2.2.1	VHF	14
2.2.2.2	Radio FM comercial	16
2.2.3	Sistemas de radiodifusión FM	17
2.2.3.1	Frecuencia modulada	17
2.2.3.2	Radiodifusión sonora FM en Chiclayo	18
2.2.4	Radiaciones no ionizantes (RNI)	20
2.2.5	Cálculos de radiaciones	21
2.2.6	Límites máximos permisibles de RNI	24
2.2.7	Protocolos de medición en el Perú	27
2.2.8	SDR plataforma y conceptos	32
2.2.8.1	SDR diagrama de bloques	32
2.2.8.2	Universal software radio peripheral (USRP)	33
2.2.8.3	USRP daughterboards	37
2.2.8.4	GNU radio	39
2.2.8.5	GNU radio companion (GRC)	39
2.2.9	Sistema operativo Linux	42
2.2.9.1	Software libre	43
2.2.9.2	Fedora 15	44
2.3	Terminologías y conceptos	45
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA		
3.1	Criterios para la elección y la implementación del sistema	48
3.2	Materiales y métodos	49
3.2.1	Materiales	49
3.2.2	Métodos	51
3.3	Desarrollo del proyecto	53
3.3.1	Instalación Fedora 15	53
3.3.2	Actualización de paquetes y entorno	54
3.3.3	Instalación GNU radio companion (GRC)	56
3.3.4	UHD	61
3.3.5	Agregar bloque	65
3.3.6	Ecuaciones de cálculo de potencia	65

3.3.7 Características técnicas del sistema	68
CAPÍTULO IV. PRUEBAS Y RESULTADOS	
4.1 Diagrama de bloques	70
4.1.1 Descripción general	70
4.1.2 Receptor FM en GRC	71
4.2 Preparación y puesta en marcha	73
4.3 Pruebas realizadas	74
4.4 Resultados obtenidos	78
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN Y APLICACIONES	
5.1 Discusión del proyecto	80
5.2 Aplicación del proyecto	81
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
FUENTES DE INFORMACIÓN	84
ANEXOS	86
a) Datasheet USRP	
b) Fórmulas de conversión	
c) Informe de estudios teóricos de RNI	

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES Y CUADROS

FIGURAS	Página
Fig. 2.1. Trabajos de monitoreo de RNI en la ciudad de Chiclayo	7
Fig. 2.2. Antena y analizador de campo electro-magnético	8
Fig. 2.3. Antena logarítmica y analizador de espectro	9
Fig. 2.4. Puntos de medición tomados por MTC	10
Fig. 2.5. Ondas magnéticas y eléctricas	12
Fig. 2.6. Banda de frecuencias	14
Fig. 2.7. Modos de propagación de ondas	15
Fig. 2.8. Onda portadora/moduladora/modulada FM	16
Fig. 2.9. Cerropón, carretera Chiclayo - Pimentel	19
Fig. 2.10. Diferentes tipos de radiación electromagnética	20
Fig. 2.11. Radiación no ionizante / ionizante	20
Fig. 2.12. Ejemplo de la línea de promediación.	29
Fig. 2.13. Software defined radio diagrama de bloques	32
Fig. 2.14. Idea principal de un SDR	33
Fig. 2.15. Tarjeta madre del USRP	34
Fig. 2.16. Conversor analógico a digital	35
Fig. 2.17. FPGA	36
Fig. 2.18. Daughterboard BasicTX y BasicRX	38
Fig. 2.19. PSK Demodulation in GRC	40
Fig. 2.20. Cuadro de propiedades de una fuente de señal en GRC	41

Fig. 2.21. Cuadro de parametros en GRC	42
Fig. 2.22. Distribuciones de Linux	44
Fig. 2.23. Linea de tiempo de fedora	45
Fig. 3.1. Criterios del sistema de medición de RNI	49
Fig. 3.2. Proceso de recepción	52
Fig. 3.3. Página de bienvenida de Fedora 15	54
Fig. 3.4. Software para instalación en añadir/quitar software	56
Fig. 3.5. Mensaje de la versión del GRC 0.70	56
Fig. 3.6. Descarga de la versión 3.5.2.1 de la página GNU radio	57
Fig. 3.7. Página web de GNOME con el pygtk 2.24	58
Fig. 3.8. Muestra de instalación de requerimientos	60
Fig. 3.9. Entorno de trabajo de GNU Radio companion actualizado	63
Fig. 3.10. Reconocimiento del hardware USRP y características	64
Fig. 4.1 Sistema de medición de RNI con USRP	71
Fig. 4.2 Receptor FM en GRC	71
Fig. 4.3 Imagen FFT con Peak Hold y captura de Amplitud	75

TABLAS	Página
Tabla 2.1. Tabla de bandas de la ITU	13
Tabla 2.2. Nombres comerciales, radiodifusión sonora FM, localidad de Chiclayo	18
Tabla 2.3. Radiodifusión sonora FM, localidad de Chiclayo	19
Tabla 2.4. Clasificación de las radiaciones	21
Tabla 2.5. Límites máximos permisibles de RNI en telecomunicaciones para exposición ocupacional	25
Tabla 2.6. Límites máximos permisibles de RNI en telecomunicaciones para exposición poblacional	25
Tabla 2.7. Límites para una separación de 0.5λ entre elementos Radiantes	26
Tabla 2.8. Límites para una separación de 1λ entre elementos Radiantes	26
Tabla 2.9. Características USRP	34
Tabla 2.10. Libertades del software libre	43
Tabla 3.1 Materiales, equipos y sistemas a emplear	50
Tabla 3.2 Conversión dBm a Watts	67
Tabla 3.3 Conversión dBm, dWm, Watts	68
Tabla 4.1 Mediciones realizadas en USMP-FN	76
Tabla 4.2 Mediciones realizadas en Lima (centro)	77
Tabla 4.3 Mediciones realizadas en Chorrillos	78

Tabla 4.4 Mediciones realizadas con el sistema basado en USRP de RNI en radiodifusión FM comercial	79
Tabla 5.1. Comparación entre el objetivo general y lo logrado por la implementación del sistema	80

ÍNDICE DE ANEXOS

	Página
Datasheet USRP	86
Fórmulas de conversión	89
Modelo de informe de estudios teóricos de RNI	90

RESUMEN

Esta investigación titulada Implementación de un sistema basado en USRP para la medición de radiaciones no ionizantes de radiodifusión FM comercial, surge de la necesidad de medir las radiaciones no ionizantes con fines netamente académicos y de investigación que pueden aplicarse a ramas de ingeniería y otras ciencias relacionadas al tema tanto a nivel de pre o pos grado. Específicamente en nuestra carrera profesional de Ingeniería Electrónica se podrían realizar prácticas de Laboratorio, Talleres o Proyectos sobre este tema en asignaturas como: Telecomunicaciones I y II, Líneas de Transmisión y Antenas, Comunicaciones Inalámbricas, Microondas y Vía Satélite y Procesamiento Digital de Señales.

De esta forma, el objetivo de la tesis es implementar un sistema de medición de radiaciones no ionizantes basado en Hardware para capturar y procesar las señales a través de arquitectura de FPGA, y en Software que emplea la metodología SDR, Radio Definido en Software, a través de la plataforma libre GNU Radio.

Finalmente, se obtuvieron los resultados de mediciones de radiación no ionizante en ubicaciones determinadas, concluyendo así que el uso de este sistema cumple con la finalidad de investigación académica ya que nos permite la implementación de un sistema personalizado aplicable para el entorno universitario y que puede ser mejorado en futuras investigaciones.

ABSTRACT

This research entitled Implementation of a system based on USRP for measuring non-ionizing radiation in broadcast commercial FM, arose from the need to measure non-ionizing radiation for academic and research purposes, and can be applied to Engineering and other Sciences at undergraduate or postgraduate level. In our program of Electronics Engineering could be applied in Laboratory Practices, workshops or projects related to subjects such as: Telecommunications I and II, Transmission Lines and Antennas, Wireless Communications, Microwave and Satellite and Digital Signal Processing.

In this way, the objective of the thesis is to implement a non-ionizing radiation measurement system radiation based on Hardware to capture and to process the signals through FPGA's architecture, and software that uses the SDR methodology, Software Defined Radio, through an open source platform called GNU-Radio.

Finally, the results of non-ionizing radiation measurement were obtained at specific locations, concluding the use of this system complies with academic purposes as we allow the implementation of a customized system that can be improved in future researches.

INTRODUCCIÓN

El estudio sobre las radiaciones no ionizantes (RNI) es de mucha importancia puesto que cada día toman mayor presencia en el medio ambiente con las diferentes tecnologías de transmisión inalámbrica y en consecuencia la posible influencia que puede tener en la salud de las personas.

A pesar de lo mencionado anteriormente, la aplicabilidad de este proyecto es estrictamente orientada al mundo académico y de la investigación, con énfasis en el aprendizaje del proceso de captación de información para el campo de Radiaciones no ionizantes (RNI) en la banda comercial de Frecuencia Modulada (FM). El desarrollo del presente proyecto está basado en los fundamentos de las asignaturas de: Telecomunicaciones, Líneas de Transmisión y Antenas, entre otros; que fueron obtenidos en pregrado y que podrían aportar sobremanera al desarrollo de prácticas de Laboratorio, Talleres y/o Proyectos de Investigación.

Un sistema de radio definido por software (*Software Defined Radio* de las siglas SDR) es un sistema de radiocomunicaciones donde los componentes más importantes que normalmente están implementados en hardware son implementados en software. Esto se debe a la evolución de los circuitos electrónicos y digitales que han desarrollado arquitecturas como los FPGA y otros dispositivos que permiten la implementación de proyectos personalizados y que solo se limitan a la creatividad y el alcance al que se quiere llegar.

La tendencia actual que posee SDR, en las radiocomunicaciones, se puede apreciar en los servicios de telefonía celular y otras aplicaciones como Wi-Fi, Bluetooth, GPS, GSM, EDGE, 3G, Wimax, etc. en los cuales se emplean protocolos con procesamiento en tiempo real que cambian de acuerdo a la necesidad, de forma constante y son adaptables gracias al uso de software. Esta tendencia puede hacer que a largo plazo la metodología SDR se conviertan en la tecnología dominante en

radiocomunicaciones así como las tecnologías de última generación celular 4G hacen uso del protocolo IPV6 y SDR para optimizar el radio acceso.

Enfocándonos en el tema de aplicación, de acuerdo a las publicaciones del año 2006 realizados por INICTEL [1], las estaciones que generan mayor aporte de campo electromagnético son las estaciones de radiodifusión FM comercial, incluso mayor que en puntos cercanos a estaciones base de telefonía celular.

En nuestro país, no existe mucha cultura acerca de las RNI y en consecuencia hay pocas instituciones que cuentan con equipos para la realización de mediciones a nivel profesional siendo una de ellas es INICTEL. Es necesario recalcar que los equipos empleados para la medición de RNI deben estar homologados para cumplir con los estándares emitidos por las entidades encargadas de la Salud que rigen los niveles máximos permisibles de RNI para los seres humanos. A pesar de que existen diversos estudios de la OMS sobre los posibles problemas y daños generados por las RNI para los seres humanos y el medio ambiente, las instituciones encargadas de velar por la salud (hospitales) y aquellas enfocadas en la investigación (universidades) no cuentan con tecnología necesaria para la realización de mediciones de RNI y en consecuencia realizar estudios necesario de acuerdo al área de aplicación. Por esta razón se propone el desarrollo de un sistema de medición RNI que fomente la investigación sobre las mismas y que pueda darse como una opción para las instituciones relacionadas al tema.

Se recalca nuevamente que el presente trabajo tiene un alcance estrictamente académico y está compuesto por 05 capítulos. El primer capítulo denominado Aspectos Introdutorios nos ubica principalmente en el motivo que generó el desarrollo de este proyecto tratando aspectos como objetivos, alcances, justificación y limitaciones. El segundo capítulo nos ubica en el estado del arte de investigaciones realizadas en nuestro país y a nivel mundial. Asimismo en este capítulo se describe los conceptos teóricos sobre la RNI, las especificaciones de la tecnología USRP y los equipos comerciales que se utilizan para realizar mediciones como los fabricados por la empresa NARDA. En el tercer capítulo denominado Metodología, se describen los Materiales y Métodos empleados para el desarrollo de este proyecto. En el cuarto capítulo se describe el proceso de realización de Pruebas y Obtención de Resultados desde el inicio en que se configuran los equipos hasta obtener los resultados adecuados en diferentes locaciones geográficas. Finalmente en el quinto capítulo, se

analizan los resultados obtenidos y se indican las posibles aplicaciones que nos brinda para el mundo académico.

CAPÍTULO I

ASPECTOS INTRODUCTORIOS

1.1 Problemática

¿Es posible implementar un sistema que permita medir radiaciones no ionizantes generadas en el espectro de radiodifusión FM comercial usando Software Defined Radio (SDR) para aplicaciones en el mundo académico?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general.

Implementar un sistema de medición de radiaciones no ionizantes en el rango comercial de radiodifusión FM empleando SDR y una plataforma Universal Software Radio Peripheral (USRP) para fines académicos.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Estudiar el concepto y la implicancia de las radiaciones no ionizantes (RNI) y del radio defined software (SDR) así como su aplicación en la banda comercial FM.
- Implementar un sistema de medición de radiaciones no ionizantes (RNI) para la banda comercial FM, empleando la plataforma USRP basada en Linux.

- Obtener un sistema que sirva como plataforma de estudio para el diseño e implementación de nuevos y futuros proyectos relacionados a la investigación de mediciones RNI.

Los objetivos descritos acorde con la presente investigación son para fines académicos.

1.3 Justificación

Se sabe que toda la población está expuesta a las radiaciones no ionizantes (RNI) que emiten los diversos equipos de comunicaciones, por tal motivo las instituciones como el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) tienen como misión asegurar el correcto uso del espectro radioeléctrico mediante inspecciones y monitoreo permanente.

Con esta premisa, el sistema propuesto en el presente trabajo apunta a construir una alternativa de instrucción y medición para fines académicos y de investigación fomentando el conocimiento acerca de las RNI y que herramientas disponibles se tienen para poder realizar este tipo de mediciones.

Así mismo, se pretende promover la investigación de las RNI a través del uso de herramientas del software libre como la empleada en este proyecto, desarrollar proyectos con la tecnología software defined radio (SDR) que contribuyan al desarrollo tecnológico y que aporte beneficios para la sociedad.

Finalmente el sistema propuesto servirá como punto de partida de futuros trabajos de investigación en las mediciones de RNI y la tecnología SDR.

1.4 Limitaciones

- La implementación de este sistema es de carácter académico por lo cual existirá un margen de error superior al de los equipos homologados.

- El sistema requiere del uso de alimentación externa y no funciona con baterías.

- El sistema requiere del uso de una computadora para poder ser programado, modificado y poder mostrar la información gráfica.

- No se tomarán mediciones en los puntos radiantes, solamente se realizarán mediciones para la exposición poblacional.

- No se discutirá la influencia sobre la salud de las personas.

1.5 Viabilidad

a) Viabilidad técnica.

La implementación se basa en una plataforma USRP, siendo esta una de las más populares a nivel global, para el desarrollo de sistemas SDR. Por esa razón se cuenta con manuales, tutoriales y foros con recursos técnicos.

Se aplicaron los conocimientos desarrollados durante la formación universitaria en asignaturas como: Lenguajes de Programación, Telecomunicaciones y Teoría de Campos Electromagnéticos.

b) Viabilidad económica.

El proyecto fue viable ya que no se importó un equipo especializado para realizar mediciones que tienen un costo elevado. Se adquirió un hardware que permitía el desarrollo de software a medida y se empleó recursos propios como una computadora.

c) Viabilidad social.

El proyecto logrará un impacto en la salud así como en lo académico.

Con el sistema implementado se tomó como ubicación la ciudad de Chiclayo para la realización de mediciones y se verificó que si cumple con los estándares nacionales de calidad ambiental para ondas no ionizantes dadas para proteger la salud de la población. Posteriormente se puede sensibilizar a la población sobre las normas y estándares mundiales acerca de las RNI.

Los resultados de las mediciones e implementación servirán como base para otros estudios donde se realicen nuevas aplicaciones y mejoras del sistema desarrollado.

d) Viabilidad operativa.

Se tienen muchas facilidades en cuanto a las licencias GNU (GNU is not Unix, licencia de software gratuita) por ser de uso libre. El requisito del procesamiento empleado en la computadora personal es bajo, lo cual asegura no forzar la máxima performance del equipo.

El USRP puede ser usado como medio de enseñanza tal cual indica en sus especificaciones junto a sus diversas aplicaciones, inclusive se encuentra en la lista de equipos y aparatos de telecomunicaciones que no requieren permiso de internamiento dada por el MTC lo cual hace factible su disponibilidad.

e) Alternativas.

Existen equipos homologados en el mercado de uso comercial y para realizar mediciones oficiales. Estos equipos son muy costosos y solamente los tienen pocas instituciones. Se podría solicitar los servicios de medición de instituciones como INICTEL o referirse a los resultados obtenidos de mediciones oficiales.

El equipo también permite diversas aplicaciones como el testeo de equipos, receptor GPS, receptor de radio FM, transmisor de radio FM, decodificador de televisión digital, radar pasivo, receptor móvil WiMAX, etc. las cuales permiten tener una gama más amplia de campos de investigación y medios de enseñanza utilizando la tecnología SDR y la plataforma USRP.

1.6 Aplicaciones académicas

El proyecto desarrollado es consecuencia de la investigación de un tema de importancia para la sociedad como es el posible efecto de las RNI en la salud. En nuestro campo de Ingeniería Electrónica para este proyecto se han aplicado conocimientos obtenidos a lo largo de la carrera que facilitan la comprensión de nuevos conceptos como el Radio Definido por Software (SDR) y de un nuevo lenguaje de programación como es GNU Radio. Consideramos que las asignaturas donde podría aplicarse con mayor relevancia los resultados de una investigación como esta son:

- Telecomunicaciones II
- Líneas de Transmisión y Antenas
- Procesamiento Digital de Señales
- Comunicaciones Inalámbricas
- Microondas y Vía Satélite

Estas aplicaciones pueden realizarse a través de laboratorios, talleres o proyectos.

Así no limitamos la investigación de las RNI a otros campos como la matemática, física y algoritmos computacionales.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Diversos estudios, investigaciones y realización de mediciones sobre Radiaciones No Ionizantes existen hoy en día en nuestro país y a nivel internacional mostrando el estado del arte actual y la conciencia que se tiene de este tema, basados en instrumentos de medición comerciales y también en Software Defined Radio (SDR)

En relación a mediciones con aplicaciones de SDR existen:

a) Robles Palacios, Oscar. “Diseño e implementación de un modulador OFDM reconfigurable para la tecnología Software-Defined Radio sobre un FPGA”, PUCP tesis pregrado. Lima, 2009.

b) Dr. Jeffrey H. Reed. “Role of SDR in 4G Systems”, Mobile and Portable Radio Research Group (MPRG). Virginia, 2003.

c) Lee K. Patton. “A GNU Radio Based Software-Defined Radar”; Wright State University, Master of Science thesis. Ohio, 2007.

d) Dr. Brian Banister. “Software-Defined Radio”; Washington State University, Final Report. Washington, 2012.

e) Tony J. Roupael. “RF and Digital Signal Processing for Software-Defined Radio: A Multi-Standard Multi-Mode Approach”. Newnes Edition, 2009.

Así mismo, en el desarrollo de la presente investigación se han encontrado antecedentes locales, nacionales e internacionales como se describe a continuación:

2.1.1 Antecedentes locales.

MTC descarta indicadores elevados de radiofrecuencia procedente de antenas en Chiclayo [2]

Inspectores del Ministerio de Transportes y Comunicaciones se desplazaron hasta la ciudad de Chiclayo para realizar trabajos de monitoreo de radiofrecuencias procedentes de las antenas de telefonía móvil (ver Fig. 2.1).

Los resultados obtenidos en los últimos estudios de medición, realizados junto con personal de la Dirección de Comunicaciones del Gobierno Regional de Lambayeque, confirman que la emisión de radiofrecuencias no superan los límites máximos permisibles. En ninguno de los dos puntos inspeccionados se alcanzó un valor que supere el 1% de un límite de 100% establecidos por las leyes peruanas.



Fig. 2.1. Trabajos de monitoreo de RNI en la ciudad de Chiclayo.

Antenas y Salud. (2015). *MTC descarta indicadores elevados de radiofrecuencia procedentes de antenas en Chiclayo*. Lima, Perú. Recuperado de <http://antenasysalud.pe/>

La actividad de medición de RNI se realizó en tres puntos diferentes de la Plaza Principal de Chiclayo y dos de la Plaza Bolognesi. En este lugar se alcanzaron valores que oscilaron entre 0.29% y el 0.35%, cifras inferiores al 1% del límite máximo permisible establecido por las normas vigentes.

2.1.2 Antecedentes nacionales.

Diagnostico Nacional de las Radiaciones No Ionizantes producidas por los servicios de Telecomunicaciones en el Perú [3]

Mediciones de la intensidad de campo eléctrico proveniente de los servicios más importantes en la banda 500 KHz hasta 2 GHz (ver Fig. 2.2, Fig. 2.3), incluyendo los servicios de radio AM, FM, televisión servicio troncalizado de telefonía móvil, en 6 ciudades principales: Lima, Cuzco, Huancayo, Ica, Iquitos, Pucallpa y Trujillo:

Tipo 1:

- Analizador de campo electro-magnético.
- 10KHz – 60 GHz
- Sonda 300KHZ – 40 GHz
- Computadora portátil.

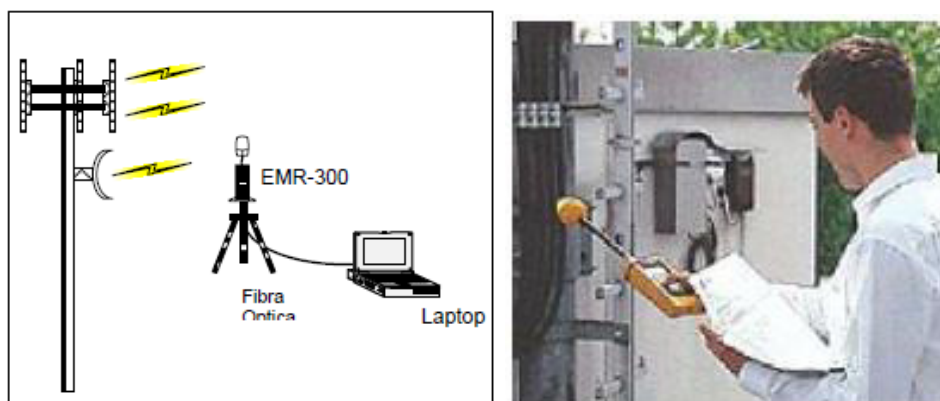


Fig. 2.2. Antena y analizador de campo electro-magnético.

INICTEL. (2012). *Diagnostico nacional de las RNI producidas por los servicios de telecomunicaciones en el Perú*. Lima, Perú. Recuperado de https://www.osiptel.gob.pe/Archivos/Transparencia/Info_adicional/

Tipo 2:

- Analizador de espectros (9KHz – 3GHz)
- Antena Log-Periódica: 30 MHz – 1800MHz
- Computadora portátil.

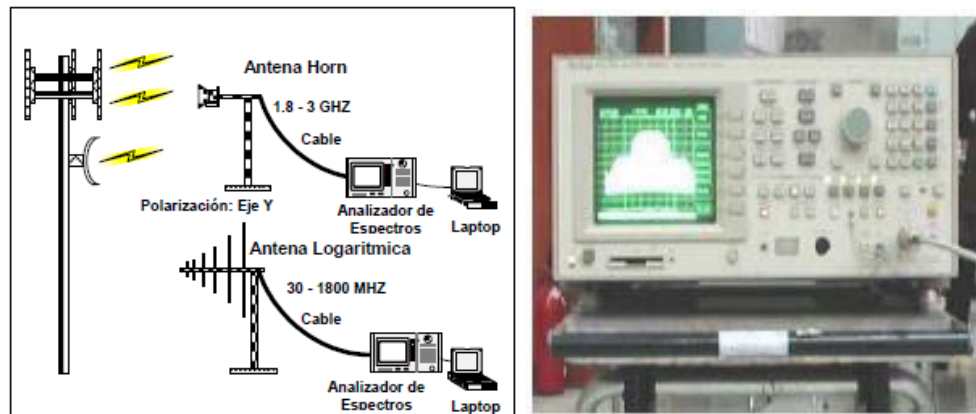


Fig. 2.3. Antena logarítmica y analizador de espectro.

INICTEL. (2012). *Diagnostico nacional de las RNI producidas por los servicios de telecomunicaciones en el Perú*. Lima, Perú. Recuperado de https://www.osiptel.gob.pe/Archivos/Transparencia/Info_adicional/

Mediciones realizadas a nivel nacional por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC [4]

El MTC realiza permanentemente mediciones de radiaciones de campos electromagnéticos procedentes de los servicios de telefonía móvil, radiodifusión FM, televisión, VHF, tele servicios privados, aeronáuticos, marítimos, entre otros a nivel nacional.

En total se realizaron un total de más de ocho mil mediciones ejecutadas en todo el país con el fin de garantizar que las antenas de telecomunicaciones cumplan los límites máximos permisibles establecidos por las leyes peruanas en cuanto a los servicios antes mencionados que utilicen el espectro electromagnético.

En el trabajo de monitoreo no se ha detectado algún caso que supere el 1% de los límites máximos permisibles establecidos por las leyes peruanas, basadas en recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud y de la Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones No Ionizantes. Se ha generado información en cada punto inspeccionado para poder visualizar detalles de ubicación y valores obtenidos de las mediciones en cada lugar.

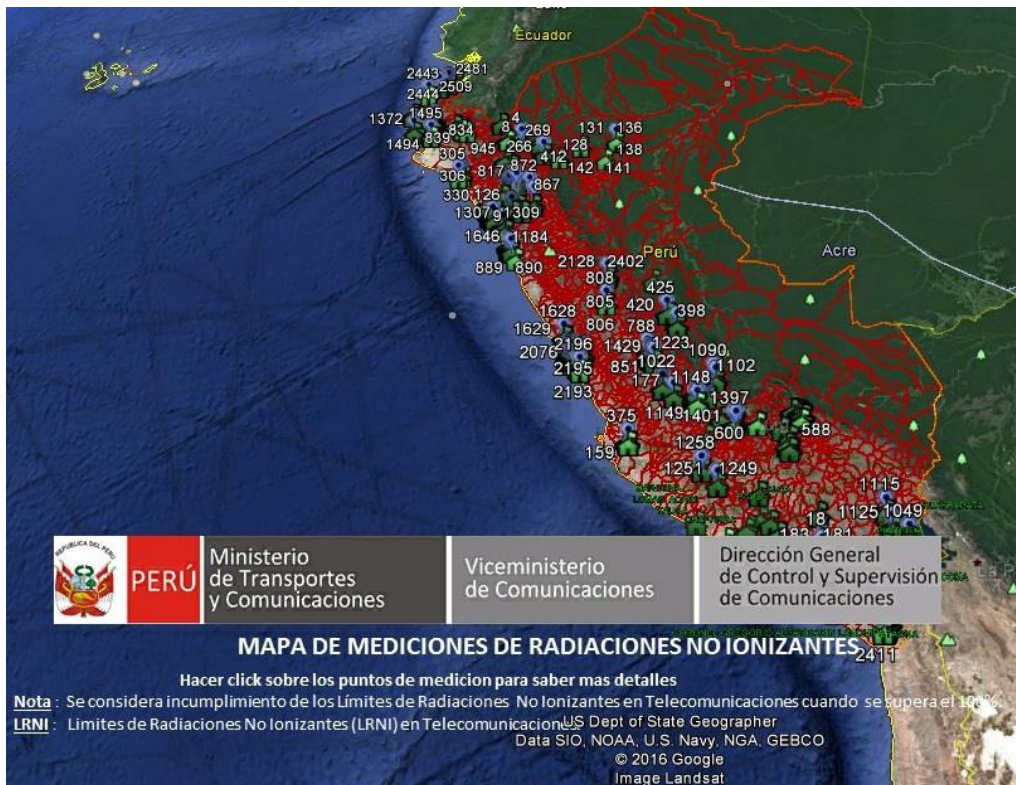


Fig. 2.4. Puntos de medición tomados por el MTC a nivel nacional.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Mediciones realizadas de radiaciones no ionizantes*. Lima, Perú. Recuperado de <http://antenasysalud.pe/mediciones/>

2.1.3 Antecedentes internacionales.

La Organización Mundial de la Salud y el estudio de los Efectos en la Salud de las Radiofrecuencias [5]

Las evaluaciones de los posibles efectos sobre la salud que realiza la OMS no están basadas en investigaciones de los funcionarios de la OMS sino en los resultados de las investigaciones realizadas tanto por los entes nacionales de países de todo el mundo que están preocupados por proteger la salud de sus connacionales así como organismos internacionales de reconocido prestigio como la Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP) y la Asociación Internacional de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) entre otros.

Software radio y el USRP [6]

En esta tesis se tiene como objetivo desarrollar un transmisor y un receptor de FM utilizando las herramientas de GNU Radio y el hardware USRP. La idea inicial fue realizar un sistema de Software Radio por lo cual se realizó una

búsqueda de equipos comerciales capaces de soportar Software Radio y se escogió USRP en base a sus características, universalidad y el costo.

Implementación de un sistema de comunicaciones basado en Software Radio [7]

En este trabajo se propone la implementación de un sistema de comunicaciones basado en la emergente tecnología conocida como Software Radio haciendo uso de los periféricos disponibles en el laboratorio.

2.1.4 Equipos comerciales empleados para la medición de RNI.

Analizador de Campo Eléctrico EFA 200/300

Permite evaluación de la exposición del campo, comparada con estándares importantes, mediante análisis espectral de FFT. Cuenta con capacidad de almacenaje de datos y opera entre el rango de frecuencias de 5Hz a 32Khz.

Analizador de Campo Electromagnético y densidad de flujo EHP 50C

Permite análisis a bajas frecuencias de los campos eléctricos y magnéticos hasta 100 KHz y medida isotrópica en un rango de 140dB. Cuenta además con análisis espectral incorporado.

Medidor de Campo Magnético ELT 400

Permite evaluación directa de la exposición del campo comparado con estándares importantes. Elimina la sobreestimación que ocurre de vez en cuando con la evaluación FFT. Opera en un rango de frecuencias de 1Hz a 400Khz.

Medidor de radiaciones electromagnéticas NARDA SRM 3000

Utiliza una antena de tres ejes para mediciones isotrópicas entre el rango de 100Khz hasta 3Ghz, este equipo realiza medidas selectivas de la intensidad de campo lo que implica que las evaluaciones de seguridad sean rápidas y fiables.

Medidor de radiaciones electromagnéticas NARDA NBM 550

Ofrece la más amplia cobertura de frecuencia de los campos eléctricos y magnéticos. Todas las sondas NBM superan las pruebas de las normas internacionales vigentes, disponibles para cubrir el rango de 100Khz a 60Ghz.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Ondas electromagnéticas.

Son un tipo de ondas que se encuentran rodeándonos por todas partes. Al variar un flujo magnético se induce un campo eléctrico y al variar un flujo eléctrico se induce un campo magnético, esta es la ley que describe el efecto de inducción de campos planteada por Maxwell.

La inducción mutua de los campos eléctrico y magnético origina el fenómeno de oscilaciones electromagnéticas (ver Fig. 2.5) independientes en el espacio vacío, estos campos se perpetúan entre sí. Podemos descomponer convencionalmente el campo electromagnético en la parte del “vector” eléctrico y magnético [8].

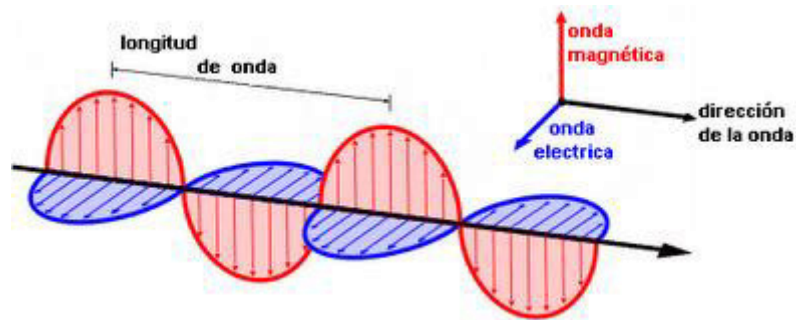


Fig. 2.5. Ondas magnéticas y eléctricas, separadas ortogonalmente. Elaborado por el autor.

La generación de las ondas electromagnéticas se da a través de una perturbación de los campos. En medida en que la carga se mueve con velocidad uniforme los campos la acompañan. Si una carga se mueve de un lado a otro con movimientos y aceleración periódicos, entonces irradia una onda periódica cuya frecuencia es igual al movimiento de la carga.

Por ejemplo las cargas eléctricas sobre las antenas de estaciones de radio FM suelen oscilar de un lado a otro con una frecuencia de 100 MHz, en consecuencia la longitud de la radiación emitida por estas cargas corresponde a la ecuación (2.1):

$$\lambda = \frac{c}{f}; c(\text{velocidad de la luz}), f(\text{frecuencia}) \quad (2.1)$$

Las oscilaciones de las cargas sobre antenas son producidas por medio de un circuito RC en resonancia acoplado con la antena mediante una inductancia

mutua. Esencialmente, este es el método que se utiliza para generar ondas largas, ondas medias (incluyendo AM) y ondas cortas (incluyendo las de FM), así como ondas de televisión. Las ondas de radio generan un rango de longitud de ondas que va desde 10^5 m hasta unos cuantos centímetros.

2.2.2 Propagación.

Se le llama propagación al conjunto de fenómenos físicos que conducen a las ondas del transmisor al receptor. Los modos de propagación más frecuentes son:

- Propagación en la ionosfera.
- Propagación troposférica.
- Propagación por onda de superficie.
- Propagación en la litosfera.
- Propagación en la biosfera.

Se toma en cuenta el espectro radio eléctrico, el cual se refiere a la parte del espectro electromagnético correspondiente a las frecuencias de radio que son inferiores a 300GHz. Las ondas se clasifican por bandas (pequeña parte del espectro de radio comunicación de frecuencias). Las denominaciones de las bandas de frecuencia se pueden realizar por décadas, como por ejemplo MF, HF, VHF, UHF. Estas son dadas por la ITU (International Telecommunication Union) las cuales se puede ver en la tabla 2.1.

Tabla 2.1.

Tabla de bandas de la ITU

Banda	Denominación	Frec. Mínima	Frec. Máxima	λ máxima	λ mínima
ELF	Extremely Low Frequency	-	3 KHz	-	100 km
VLF	Very Low Frequency	3 KHz	30 KHz	100 km	10 km
LF	Low Frequency	30 KHz	300 KHz	10 km	1 km
MF	Medium Frequency	300 KHz	3 MHz	1 km	100 m
HF	High Frequency	3 MHz	30 MHz	100 m	10 m
VHF	Very High Frequency	30 MHz	300 MHz	10 m	1 m
UHF	Ultra-High Frequency	300 MHz	3 GHz	1 m	10 cm
SHF	Super High Frequency	3 GHz	30 GHz	10 cm	1 cm
EHF	Extremely High Frequency	30 GHz	300 GHz	1 cm	1 mm

International Telecommunication Union. (2015). *Tabla de bandas de frecuencias de la ITU*. Ginebra, Suiza. Recuperado de <https://www.itu.int/es/>

2.2.2.1 VHF.

Muy alta frecuencia (very high frequency, VHF) es el rango de frecuencia de radio de 30MHz a 300MHz de la banda de frecuencias mostrado en la figura 2.6.

Entre los servicios comunes en VHF se encuentran la radio comercial FM, emisión de televisión, estaciones móviles terrestres, gama de larga comunicación de datos, radio amateur, sistemas de navegación aérea, entre otras. Entre los sistemas que funcionan en VHF se encuentran:

- A partir de los 50MHz existen frecuencias asignadas, según los países, a la televisión comercial; estos son los canales llamados “bajos” del 2 al 13.
- Entre los 88 y los 108MHz encontramos frecuencias asignadas a las radios comerciales en frecuencia modulada o FM, se le llama “FM de banda ancha” porque para que el sonido tenga buena calidad, es preciso aumentar el ancho de banda.
- Entre los 108 y 136,9 MHz se encuentra la banda aérea usada en aviación. Las comunicaciones por voz se realizan por arriba de los 118 MHz, utilizando la amplitud modulada.
- Alrededor de 144 y 148 MHz, encontramos las frecuencias de la banda de radioaficionados.
- Entre 155 y 162 MHz, se encuentra la banda de frecuencias VHF internacional reservada al servicio radio marítimo.
- Por encima de esta frecuencia se encuentran otros servicios como bomberos, ambulancias, radio-taxis, etc.

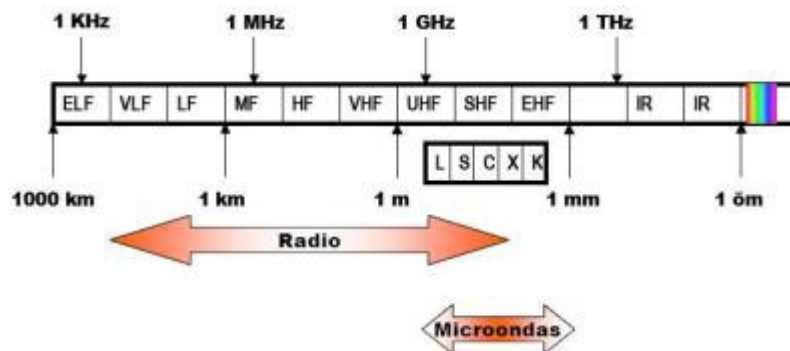


Fig. 2.6. Banda de frecuencias.

Kraus, F. (2000). *Electromagnetismo con aplicaciones*. México D.F; México: McGraw-Hill.

Algunas de las características de la propagación VHF es que son ideales para la comunicación terrestre de corta distancia, se puede observar la onda directa y reflejada en la figura 2.7, generalmente la ionosfera no refleja en VHF por lo que las transmisiones están restringidas a una zona determinada, evitando interferencias. Sin embargo, existen dos condiciones inusuales de propagación las cuales pueden permitir una gama mucho más lejos de lo normal; el primero es por conducto troposférico (existencia marcada de diferencia en humedades) y esporádicos E (referido a la capa E de la ionosfera); ambos fenómenos naturales pocos usuales.

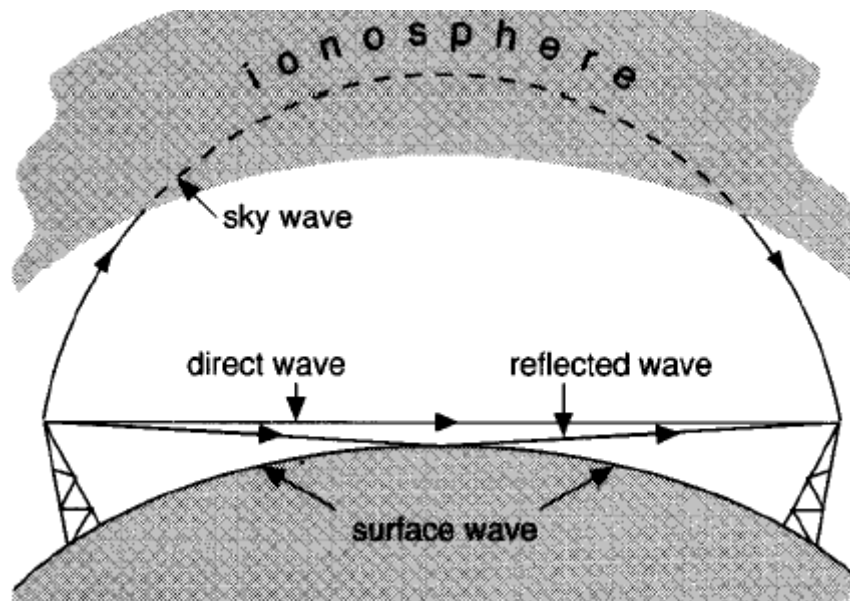


Fig. 2.7. Modos de propagación de ondas.

Kraus, F. (2000). *Electromagnetismo con aplicaciones*. México D.F; México: McGraw-Hill.

Para el cálculo de la línea de visión, se toma la distancia al horizonte de radio y se extiende ligeramente sobre la línea de visión geométrica en el horizonte, las ondas de radio débilmente son dobladas hacia la tierra por la atmosfera.

Aproximación de la línea de visión en el horizonte (en tierra), está dada por la Ec. (2.2):

Distancia en kilómetros

$$D_1 = \sqrt{12.746xAm}, \quad (2.2)$$

donde Am es la altura de la antena en metros.

2.2.2.2 Radio FM comercial.

Las frecuencias de las ondas de radio que se indican en los radio receptores se refieren a la frecuencia de la onda portadora, onda periódica estable emitida por la estación de radio durante momentos de silencio, cuando no hay señal de audio (no hay señal de sonido).

Las ondas de radiodifusión FM comercial van de 88 MHz hasta los 108 MHz. En modulación FM (como se muestra en la Fig. 2.8), la frecuencia de las ondas portadoras se modifican según la amplitud de la señal de audio; así, la frecuencia portadora aumenta o disminuye cuando la amplitud de la señal de audio aumenta o disminuye, pero la amplitud de la onda portadora se mantiene constante. Es por ello que se alcanza una mayor fidelidad, siendo bastante insensible a perturbaciones en la intensidad de la onda portadora, no existe efecto sobre su frecuencia; también por tener un mayor rango de frecuencias, a fin de evitar saturación de las bandas de transmisión, es que poseen esta fidelidad.

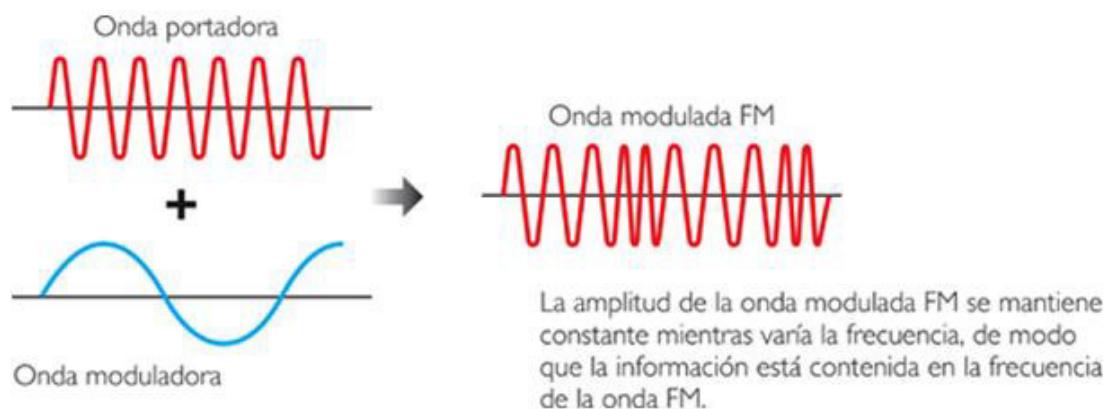


Fig. 2.8. Onda portadora/onda moduladora/onda modulada FM.

SL-Tecnología. (2016). *La modulación en frecuencia FM*. Turmero, Venezuela. Recuperado de <https://sltecnologia.wikispaces.com/La+Modulación>

La radiodifusión FM comercial se clasifica como un servicio final de telecomunicaciones cuyas transmisiones están destinadas a la recepción libre y directa por el público en general.

La radio como medio de comunicación, se basa en el envío de señales de audio a través de ondas de radio. Esta tecnología posibilita la transmisión de señales mediante la modulación de ondas electromagnéticas.

2.2.3 Sistemas de radiodifusión FM.

2.2.3.1 Frecuencia modulada.

Es una modulación que transmite información a través de una onda portadora variando su frecuencia.

Modular en FM es variar la frecuencia de la portadora al "ritmo" de la información, lo cual significa que en una señal de FM, la amplitud y la fase de la señal permanecen constantes y la frecuencia cambia en función de los cambios de amplitud y frecuencia de la señal que se desea transmitir.

La frecuencia modulada es usada comúnmente en las radiocomunicaciones de muy alta frecuencia por la alta fidelidad de la radiodifusión de la música y el habla. El tipo usado en la radiodifusión FM es generalmente llamado amplia-FM o W-FM.

Dentro de los avances más importantes que se presentan en las comunicaciones, son requeridos el mejoramiento de los sistemas de transmisión y recepción basados en parámetros como la relación señal-ruido. Esto permite una mayor calidad en las comunicaciones. Es así como el paso de modulación en amplitud (AM) a la modulación en frecuencia (FM) establece un importante avance y mejoras en la respuesta ante fenómenos como desvanecimientos e interferencias.

Dentro de las aplicaciones de FM se encuentra la radio, en donde los receptores emplean un detector de FM y el sintonizador es capaz de recibir la señal más fuerte de las que se transmiten en la misma frecuencia.

La modulación de una portadora sobre FM resulta un problema debido a que se necesitan dos características contrapuestas: estabilidad de frecuencia y que la señal moduladora varíe la frecuencia. Por ello existen diversos métodos como por ejemplo: modulación con oscilador, moduladores de fase y modulador con lazos de seguimiento de fase (PLL¹).

Para la demodulación también existen diversos métodos como: discriminador reactivo y detector con PLL.

¹ Sistema en el cual la frecuencia y la fase son realimentados.

2.2.3.2 Radiodifusión sonora FM en Chiclayo.

En la tabla 2.2. y tabla 2.3 se muestra la relación de las radioemisoras FM y las frecuencias en las que operan y el estado de vigencia de su autorización de funcionamiento de acuerdo al Ministerio de Transportes y Comunicaciones. La Fig. 2.9 muestra el conglomerado de antenas en la ciudad de Chiclayo.

Tabla 2.2.

Nombres comerciales, radiodifusión sonora FM, localidad de Chiclayo.

Frecuencia (MHz)	Nombre
88.5 FM	RIVEREÑA
89.1 FM	MODA
89.7 FM	CALIDAD
90.3 FM	INSPIRACION
90.9 FM	TITANIO
91.5 FM	ROMANTICA
92.1 FM	CALIENTE
92.7 FM	NUEVO TIEMPO
93.3 FM	ZONA 5
94.1 FM	LA MEGA
94.9 FM	NOVA
95.7 FM	FELICIDAD
96.7 FM	RADIO PROGRAMAS DEL PERU (RPP)
97.3 FM	CARIBEÑA
98.3 FM	STAR
98.9 FM	LA CALLE
99.7 FM	SANTA VICTORIA
100.5 FM	FUEGO
101.1 FM	PANAMERICANA
101.7 FM	RADIO NACIONAL
102.3 FM	CADENA PERUANA DE NOTICIAS (CPN RADIO)
102.9 FM	ESTUDIO 92
103.7 FM	ONDA CERO
104.3 FM	LA INOLVIDABLE
105.1 FM	NUEVA Q
105.7 FM	COLONIAL
106.3 FM	RADIO MARIA
106.9 FM	LA EXITOSA
107.7 FM	JHC

En la tabla se muestran los nombres comerciales y las frecuencias que se deben colocar para ser sintonizadas en la ciudad de Chiclayo. Elaborado por el autor.

Tabla 2.3.
Radiodifusión sonora FM, localidad de Chiclayo - MTC [9]

N°	Frec (MHz)	Razón Social	Indicativo	Estado
1	88.5	ALFARO VILVA ALFONSO	OBW-1A	AUTORIZADO
2	89.1	CRP MEDIOS Y ENTRETENIMIENTOS S.A.C.	OCW-1H	AUTORIZADO
3	89.7	RADIO SENSACIONAL E.I.R.L.	OBW-1F	AUTORIZADO
4	90.3	RADIO CHIMOK E.I.R.L.	OBW-1D	AUTORIZADO
5	90.9	RADIO STUDIO 2000 S.A.	OCW-1C	AUTORIZADO
6	91.5	CRP MEDIOS Y ENTRETENIMIENTOS S.A.C.	OCW-1V	AUTORIZADO
7	92.1	TOCTO MONTALVO, ROSA DEL CARMEN	OCW-1W	AUTORIZADO
8	92.7	EMPRESA RADIODIFUSORA BEIJING FM E.I.R.L.	OBW-1J	AUTORIZADO
9	93.3	ZONA 5 CHICLAYO S.R.L.	OCZ-1N	AUTORIZADO
10	94.1	EMISORAS DEL PACIFICO S.A.	OCZ-1A	AUTORIZADO
11	94.9	NOR PERUANA DE TELECOMUNICACIONES S.A.	OCZ-1V	AUTORIZADO
12	95.7	GRUPORPP S.A.C.	OCZ-1Y	AUTORIZADO
13	96.7	GRUPORPP S.A.C.	OCZ-1K	AUTORIZADO
14	97.3	RADIO LA KARIBEÑA S.A.C.	OCZ-1P	AUTORIZADO
15	98.3	RADIO STAR S.A.	OCZ-1F	AUTORIZADO
16	98.9	SIGLO XXI EMPRESA DE RADIO DIFUSION S.R.L.	OBW-1L	AUTORIZADO
17	99.7	RADIODIFUSION SANTA VICTORIA S.A.	OCZ-1L	AUTORIZADO
18	100.5	WSP S.R.L.	OAT-1Z	CANCELACION (IMPUGNACION)
19	101.1	RADIO PANAMERICANA S.A.	OCZ-1C	AUTORIZADO
20	101.7	INSTITUTO NACIONAL DE RADIO Y TELEVISION DEL PERU - IRTP	OCJ-1N	AUTORIZADO
21	102.3	PRODUCCIONES ASTURIAS S.A.C.	OCW-1O	AUTORIZADO
22	102.9	RADIO SAN LUIS S.A.C.	OCW-1I	AUTORIZADO
23	103.7	RADIO PANAMERICANA S.A.	OBW-1K	AUTORIZADO
24	104.3	EMPRESA RADIODIFUSORA TARJET S.A.C.	OBW-1M	AUTORIZADO
25	105.1	CRP MEDIOS Y ENTRETENIMIENTOS S.A.C.	OCW-1E	AUTORIZADO
26	105.7	RADIODIFUSION CM. S.A. LA VOZ DEL MARAÑON	OAT-1K	AUTORIZADO
27	106.3	ASOCIACION RADIO MARIA	OAT-1L	AUTORIZADO
28	106.9	RADIO "A" FRECUENCIA MODULADA S.A.C.	OCW-1Z	AUTORIZADO
29	107.7	EMPRESA DOS MIL E.I.R.L.	OBW-1E	AUTORIZADO

Ministerio de transportes y telecomunicaciones. (2016). *Registro nacional de frecuencias*. Lima, Perú. Recuperado de <https://rnf.mtc.gob.pe/radiodifusion>



Fig. 2.9. Conglomerado de antenas de telefonía, televisión y radioemisoras FM en zona de Cerropón, lugar donde se ubican gran parte de radioemisoras FM comerciales. [Fotografía elaborada por el autor]. (Cerropón. 2016). Pimentel, Chiclayo.

2.2.4 Radiaciones no ionizantes (RNI).

La radiación es un proceso en el cual partículas u ondas energéticas viajan a través de un medio o espacio. Existen dos tipos distintos de radiación, ionizantes y no ionizantes (ver Fig. 2.10 y Fig. 2.11).

La Radiación No Ionizante (RNI) se refiere a cualquier tipo de radiación electromagnética que no tiene suficiente energía para ionizar átomos o moléculas, pero tienen energía para generar calor. Algunos ejemplos de RNI son luz visible, ultravioleta, infrarrojo, microondas, ondas de radio y RF de baja frecuencia.

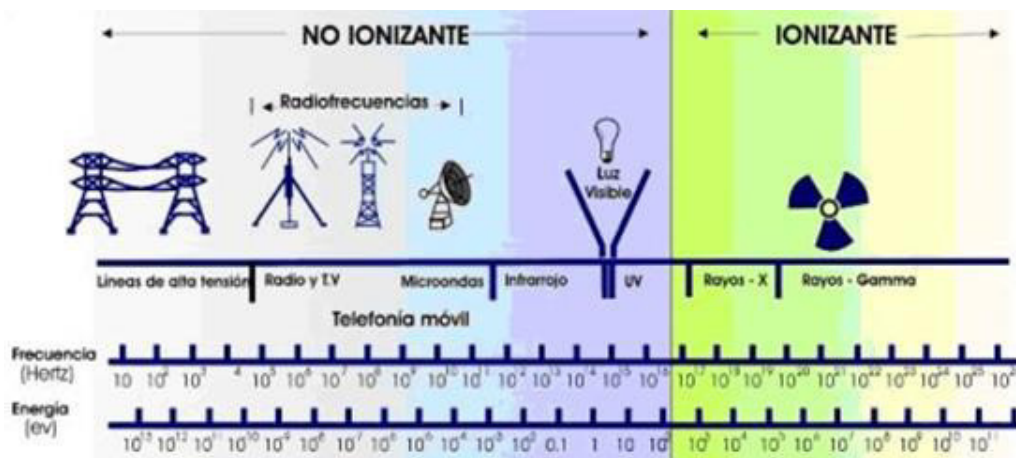


Fig. 2.10. Diferentes tipos de radiación electromagnética.

Radiación No Ionizante. (2017). *Radiaciones Ionizantes y No Ionizantes en el Espectro*. Washington, EU. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Radiación_no_ionizante

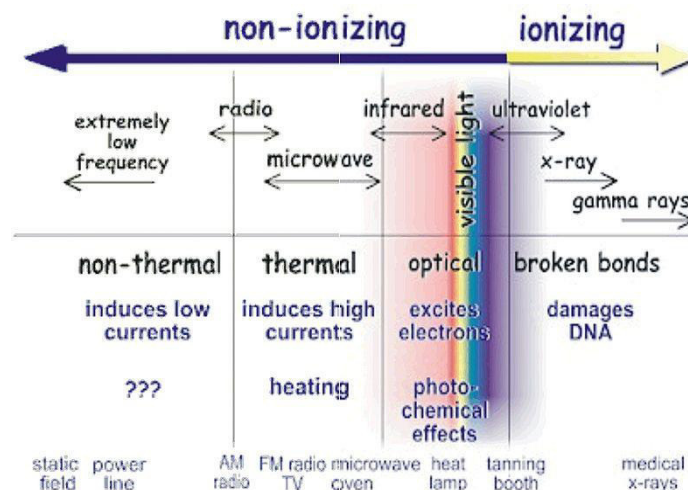


Fig. 2.11. Radiación no ionizante / ionizante.

Radiación No Ionizante. (2017). *Radiaciones Ionizantes y No Ionizantes en el Espectro*. Washington, EU. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Radiación_no_ionizante

Las regiones del espectro de radiaciones no ionizantes se dividen básicamente en cinco regiones (ver tabla 2.4):

- Radiación ionizante.
- Radiación ultravioleta (UV).
- Radiación visible (luz).
- Radiación infrarroja.
- Radiofrecuencias (RF), estas incluyen las microondas.

Donde operan la mayoría de dispositivos es en la radiofrecuencia (RF), por ejemplo sistemas de posicionamiento global, teléfonos celulares, televisiones, radio FM, teléfonos inalámbricos, etc. Esta radiación electromagnética tiene una longitud de onda entre 1 mm y 3000 metros.

Tabla 2.4.

Clasificación de las radiaciones

TIPO	LONGITUD DE ONDA	FOTON DE ENERGIA
La radiación ionizante	menos de 1nm	más de 1 keV
La radiación ultravioleta (UV)	1 a 400 nm	0,3 a 1 keV
La radiación visible	400 a 780 nm	0,15 a 0,3 ev
La radiación infrarroja	780 a 3 mm	0,15 a 40 meV
Las microondas y las ondas de radio	más de 3 mm	menos de 40 meV

International Telecommunication Union. (2015). *Clasificación de las radiaciones*. Ginebra, Suiza. Recuperado de <https://www.itu.int/es/>

2.2.5 Cálculos de radiaciones.

En el Perú existe la norma técnica de "Lineamientos para el desarrollo del estudio teórico de radiaciones no ionizantes" [10], según resolución ministerial N° 612-2004 MTC/03, esta norma tiene como finalidad aprobar los lineamientos para el desarrollo del estudio teórico de RNI, que permita predecir el cumplimiento de valores aprobados como límites máximos permisibles de RNI.

La norma que se presenta es de cumplimiento obligatorio por el estado y las personas naturales o jurídicas nacionales y extranjeras que instalen estaciones radioeléctricas entre las frecuencias de 9kHz a 300 GHz.

Los estudios teóricos deben incluir como mínimo la siguiente información:

- Datos generales de la empresa.
- Características técnicas de la(s) estación(es) radioeléctrica(s) en estudio.

- Características técnicas de las estaciones radioeléctricas que se encuentran dentro de los 100 m. de la torre de estudio.
- Resultados de la estimación teórica.
- Anexo técnico con el detalle del procedimiento de estimación teórica.

Métodos predictivos. - estos métodos permiten la evaluación teórica de la intensidad de campo o de la densidad de potencia. El desarrollo de métodos predictivos comprende:

- Determinación de la longitud eléctrica de la antena: Se considera dos tipos de antenas de acuerdo a sus dimensiones físicas (la dimensión máxima se compara con la longitud de onda respecto a la frecuencia de transmisión).

Antenas pequeñas, si $D < \lambda$

Antenas grandes, si $D \geq \lambda$

- Determinación de las regiones de campo electromagnético: Estas pueden ser región de campo lejano o región de campo cercano. Para determinar la ubicación del punto en evaluación respecto a las regiones de campo electromagnético de una antena, se debe calcular la distancia donde se encuentra el límite entre ambas regiones.

Límite entre la región de campo cercano radiante y la región de campo lejano. Ver Ec. (2.3):

$$R_{cc} = \frac{0.6 D^2}{\lambda} \quad (2.3)$$

Dónde:

D = máxima dimensión lineal de la antena.

R_{cc} = Distancia hasta el inicio del campo lejano (m).

λ = Longitud de onda (m).

- Estimación de los valores de intensidad de campo y/o densidad de potencia: La determinación de estos valores se lleva a cabo empleando:

- Calculo mediante fórmulas analíticas genéricas.

- Calculo en el campo lejano:

En la región de campo lejano debido al comportamiento de onda plana se cumple la siguiente relación entre la intensidad de campo eléctrico y la intensidad de campo magnético y la densidad de potencia. Ver Ec. (2.4):

$$S = E \cdot H = \frac{E^2}{377} 377H^2 \quad (2.4)$$

Dónde:

S = densidad de potencia (W/m²).

E = Intensidad de campo eléctrico en valor rms (V/m).

H = Intensidad de campo magnético en valor rms (A/m).

La intensidad del campo eléctrico en valor rms se calcula mediante la ecuación (2.5):

$$E = \frac{(30pire)^{0.5}}{r} [V/m] \quad (2.5)$$

La densidad de potencia se calcula por las ecuaciones (2.6) y (2.7):

$$S = \frac{pire}{4\pi r^2} [W/m^2] \quad (2.6)$$

$$pire = p_t \times g_t \quad (2.7)$$

Dónde:

Pire = Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (W)

p_t = Potencia de transmisión (W)

g_t = Ganancia máxima de la antena (numérica)

r=Distancia al centro de radiación de la antena al punto de interés (m)

Métodos computacionales.- el empleo de los paquetes computacionales es requerido para:

- Analizar antenas.
- Determinar diversas magnitudes electromagnéticas.
- Determinar patrones de radiación de antenas especiales y sus arreglos.

Tipos de métodos computacionales y principales métodos utilizados:

- Métodos algebraicos, geométricos y sus algoritmos.
- Métodos numéricos.
- Método de los momentos (MOM: method of moments).
- Métodos de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD).
- Método de trazado de rayos.
- Predicciones en el servicio de radiodifusión FM.- (rango de frecuencia: 88 MHz a 108 MHz). En este tipo de sistemas radiantes, existe una radiación en los lóbulos secundarios que conforman el patrón de radiación vertical de la antena.

Estos son calculados por programas computacionales basados en métodos numéricos, el MTC brinda una herramienta para la realización de estos cálculos, una hoja de cálculo basada en Excel² para su aplicación.

2.2.6 Límites máximos permisibles de RNI.

Según decreto supremo N°038-2003-MTC, establecen Límites Máximos Permisibles de Radiaciones No Ionizantes en Telecomunicaciones en el Perú [11], dados por el MTC los cuales se basan en International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP); estos son un instrumento de gestión ambiental prioritario para prevenir y controlar la contaminación generada por actividades comprendidas en el subsector telecomunicaciones, sobre la base de una estrategia destinada a proteger la salud, mejorar la competitividad del país y promover el desarrollo sostenible.

La finalidad es establecer los Límites Máximos Permisibles (LMP) de RNI en telecomunicaciones, su monitoreo, control y demás regulaciones para el efectivo cumplimiento de los límites.

Esta se debe aplicar en todo el Perú, y su cumplimiento es obligatorio para todas las personas que realicen actividades de telecomunicaciones utilizando el espectro radioeléctrico y cuya emisión de campos electromagnéticos de sus equipos de telecomunicaciones se encuentren entre las frecuencias de 9kHz a 300 GHz.

Se toma como referencia los valores establecidos como niveles de referencia por la Comisión Internacional de Protección en Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP), como se muestra en las tablas 2.5 y 2.6:

² Ver Anexo C)

Tabla 2.5.

Límites máximos permisibles de RNI en telecomunicaciones para exposición ocupacional.

Rango de Frecuencias	Intensidad de campo eléctrico (V/m)	Intensidad de campo magnético (A/m)	Densidad de Potencia (W/m ²)
9 - 65 kHz	610	24,4	-
0,065 - 1 MHz	610	1,6 / f	-
1 - 10 MHz	610/f	1,6 / f	-
10 - 400 MHz	61	0,16	10
400 - 2000 MHz	3 f ^{0.5}	0,008 f ^{0.5}	f / 40
2 - 300 GHz	137	0,36	50

Iriarte Jiménez, E. (6 de julio de 2003). Establecen Límites Máximos Permisibles de Radiaciones No Ionizantes en Telecomunicaciones. *El Peruano*, pp.247643 - 247647.

Tabla 2.6.

Límites máximos permisibles de RNI en telecomunicaciones para exposición poblacional [12].

Rango de Frecuencias	Intensidad de campo eléctrico (V/m)	Intensidad de campo magnético (A/m)	Densidad de Potencia (W/m ²)
9 - 150 kHz	87	5	-
0,15 - 1 MHz	87	0,73 / f	-
1 - 10 MHz	87/f ^{0.5}	0,73 / f	-
10 - 400 MHz	28	0,073	2
400 - 2000 MHz	1,375 f ^{0.5}	0,0037 f ^{0.5}	f / 200
2 - 300 GHz	61	0,16	10

Iriarte Jiménez, E. (6 de julio de 2003). Establecen Límites Máximos Permisibles de Radiaciones No Ionizantes en Telecomunicaciones. *El Peruano*, pp.247643 - 247647.

Para las frecuencias entre 100 kHz y 10 GHz el periodo de tiempo a ser utilizado para el cálculo es de 6 minutos.

Los titulares de concesiones o autorizaciones vigentes adoptaran las medidas necesarias a efectos de garantizar que las radiaciones que emitan sus estaciones radioeléctricas, no excedan los valores establecidos como límites máximos permisibles.

Tablas de referencia para radiodifusión sonora FM (ver tablas 2.7 y 2.8):

Tablas de valores para las alturas mínimas del centro de radiación respecto del nivel del suelo, para que la densidad de potencia a 2 metros de altura a nivel del suelo no exceda los límites máximos permisibles (2 W/m²).

Tabla 2.7.

Límites para una separación de 0.5λ entre elementos radiantes.

PRE Total H+V	Número de Elementos					
	2	4	6	8	10	12
	Metros desde el nivel del piso al centro de Radiación					
0,5	5.2	5.6	7.3	9	10.7	12.4
3	9.7	6.1	7.3	9	10.7	12.4
10	16.1	9.4	7.3	9	10.7	12.4
25	24,3	13.7	10.2	9	10.7	12.4
50	33.5	18.5	13.6	10.8	10.7	12.4
75	40.5	22.3	16.2	12.7	10.7	12.4
100	46.5	25.4	18.4	14.5	12.1	12.4
125	51.7	28.1	20.3	15.9	13.2	12.4
150	56.5	30.7	22	17.2	14.3	12.4
175	61	33	23.7	18.4	15.3	13.1
200	65	35	25.2	19.6	16.2	13.9

Barraza Soto, G. (18 de agosto de 2004). Norma Técnica Lineamiento para los Estudios de Radiaciones No Ionizantes. *El Peruano*, pp.274793.

Tabla 2.8.

Límites para una separación de 1λ entre elementos radiantes.

PRE Total H+V	Número de Elementos					
	2	4	6	8	10	12
	Metros desde el nivel del piso al centro de Radiación					
0,5	9.1	9.0	11.5	14.9	18.3	21.7
3	19.3	19.2	19.0	18.8	18.7	21.7
10	33.6	33.3	33.1	32.7	32.4	32.1
25	51.9	51.5	51.1	50.6	50	49.6
50	72.6	71.9	71.4	70.7	69.9	69.3
75	88.4	87.7	87	86.1	85.1	84.4
100	101.8	100.9	100.1	99.1	98.0	97.1
125	113.6	112.6	111.7	110.5	109.3	108.4
150	124.2	123.1	122.2	120.9	119.6	118.5
175	133.4	132.8	131.8	130.4	129.0	127.9
200	143.1	141.8	140.8	139.3	137.7	136.5

Barraza Soto, G. (18 de agosto de 2004). Norma Técnica Lineamiento para los Estudios de Radiaciones No Ionizantes. *El Peruano*, pp.274793.

2.2.7 Protocolos de medición en el Perú [13].

Protocolos de medición de radiaciones no ionizantes se da en el Perú a través de una norma técnica la cual se resuelve por el decreto supremo N° 038-2003-MTC; dándose para prevenir y controlar la contaminación generada por actividades comprendidas en el subsector comunicaciones; destinado para proteger la salud, mejorar la competitividad del país y promover el desarrollo sostenible.

La norma que se presenta es de cumplimiento obligatorio por el estado y las personas naturales o jurídicas debidamente registradas en el MTC para la medición de RNI.

Las mediciones se clasifican en:

- Mediciones en emplazamientos fijos.
- Mediciones en equipos móviles, portátiles y/o terminales portátiles que utilicen el espectro radioeléctrico.

Las magnitudes a medir para emplazamientos fijos son los siguientes:

- Densidad de potencia.
- Intensidad de campo eléctrico.
- Intensidad de campo magnético.
- Para los equipos portátiles y/o terminales portátiles:
- Tasa de absorción específica (SAR).

Las mediciones en los emplazamientos fijos, en la mayoría de casos, serán mediciones en la región de campo lejano. Las mediciones en equipos móviles, equipos portátiles y/o terminales portátiles serán mediciones de campo cercano.

Los protocolos de medición que se establezcan en la norma antes mencionada, serán aplicables a cualquier servicio o sistema de telecomunicaciones.

Para determinar una correcta medición se debe determinar la mayor cantidad de parámetros técnicos que caractericen de manera fiel, las fuentes que generan los campos electromagnéticos.

Los cálculos teóricos expuestos en la norma “Lineamientos para el desarrollo de estudios teóricos de radiaciones no ionizantes”, se pueden emplear para obtener estimados de la intensidad de campo en la región de campo lejano para la selección del instrumento adecuado.

Tipos de mediciones y equipamiento utilizado:

- Mediciones en la región de campo lejano; mediciones de un campo electromagnético de onda plana, linealmente polarizado, cuya fuente de radiación tiene características físicas conocidas tales como: ubicación, frecuencia y polarización; puede llevarse a cabo con un medidor de intensidad de campo sintonizable con un rango de frecuencia que incluya la frecuencia de interés y que tenga la precisión requerida. Alternativamente se puede utilizar un analizador de espectro. Se entiende por precisión requerida, cuando el dispositivo de medición debe ser elegido, de tal manera que la incertidumbre de medición sea menor o igual a 4db, con un nivel de confiabilidad del 95%.
- Medición en la región de campo lejano: fuente múltiple.
- Medición en la región de campo cercano.
- Medición de tasa de absorción específica (SAR): no existe relación simple entre un campo eléctrico externo y campo eléctrico interno dentro del cuerpo humano, por lo tanto la determinación del SAR para exposición de campo cercano es difícil y compleja.
- Características de las mediciones: la medición de radiación no ionizante, se refiere generalmente a la medición de magnitudes electromagnéticas resultantes de la contribución de emisiones múltiples presentes en el lugar de medición, siendo necesario contar con la información técnica de las estaciones radioeléctricas del entorno. En el rango de 10 MHz hasta 30 GHz se deberá medir densidad de potencia, para el rango de frecuencia entre 9KHz y 10 MHz se deberá realizar mediciones de intensidad de campo eléctrico y/o campo magnético. Las mediciones en los puntos de prueba deben ser realizadas considerando la promediación temporal o espacial según sea el caso.
- Promediación temporal: tiempo requerido para promediar los valores de intensidad de campo eléctrico y/o campo magnético en un intervalo determinado. El intervalo de tiempo para la medición de radiaciones no ionizantes es de 6 minutos en el rango de frecuencias desde 100 KHz hasta 10GHz. Ver Ec. (2.8) y (2.9):

$$E = \left[\frac{1}{6} \sum_{i=1}^n E_i^2 \Delta_{ti} \right]^{1/2} \quad (2.8)$$

$$H = \left[\frac{1}{6} \sum_{i=1}^n H_i^2 \Delta_{ti} \right]^{1/2} \quad (2.9)$$

Dónde:

E: intensidad de campo eléctrico en rms (V/m).

E_i: intensidad de campo eléctrico en valor rms medido en el punto i, siendo considerado constante en el intervalo de tiempo "i".

H: intensidad de campo magnético en rms (A/m).

H_i: intensidad de campo magnético en valor rms medido en el punto i, considerado constante en su intervalo de tiempo "i".

Δ_{ti}: Duración del intervalo de tiempo expresado en minutos.

n: número de periodos de tiempo en el intervalo de 6 minutos

- Promediación espacial: es el valor promedio obtenido de las medidas instantáneas realizadas en distintos puntos situados en una línea vertical perpendicular a la superficie de referencia en el punto de medición como se observa en la figura 2.12.

Campo promedio. Ver Ec. (2.10):

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} [\sum_{i=1}^3 E_i^2]^{1/2} \quad (2.10)$$

Dónde:

E₁: Intensidad de campo eléctrico en valor de rms (V/m).

E_i: intensidad del campo eléctrico en valor rms medido en el punto i (V/m).

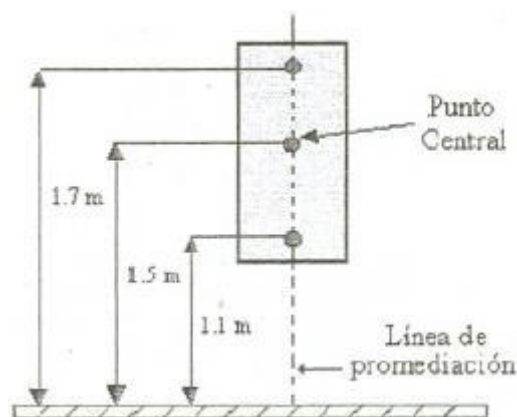


Fig. 2.12. Ejemplo de la línea de promediación.

Barraza Soto, G. (18 de agosto de 2004). Norma Técnica Lineamiento para los Estudios de Radiaciones No Ionizantes. *El Peruano*, pp.274793.

- Protocolos de medición: antes de efectuar las mediciones, se debe estimar la intensidad de campo y determinar el tipo de instrumento requerido. La aproximación

en la determinación teórica de valores estimados de la intensidad de campo dependerá de considerar la direccionalidad de la antena y si esta a su vez es estacionaria o dispone de algún mecanismo para realizar un barrido especial.

Para la estimación teórica del campo eléctrico y/o la densidad de potencia, se debe hacer uso de la norma complementaria sobre “Lineamientos para el desarrollo de estudios teóricos de radiaciones no ionizantes” a fin de obtener valores estimados útiles. Los procedimientos de medición pueden diferir dependiendo de las características del emisor de radiofrecuencia y de la información disponible sobre la propagación de esta emisión.

Procedimientos para emplazamientos fijos:

- Prospección técnica sobre el lugar de emplazamiento.
- Estimación teórica.
- Selección del instrumento de medición.
- Selección de la técnica de medición.
- Métodos de medición
- Ejecución de las mediciones en el emplazamiento y áreas adyacentes.

Prospección técnica sobre el lugar del emplazamiento para la evaluación de RNI, se identifican los factores de entorno físico (ubicación, características topográficas, cercanía de edificaciones, zonas accesibles al público en general) y radioeléctrico (características técnicas de la estación radioeléctrica y característica técnicas de las estaciones radioeléctricas del entorno).

Entre las características técnicas de la estación radioeléctrica por evaluar son:

- Tipo de emisor radioeléctrico.
- Potencia de salida.
- Frecuencia portadora.
- Banda de frecuencias de uso.
- Ciclo de trabajo.
- Características de modulación.

El entorno radioeléctrico comprende: todos los sistemas de emisión radioeléctricos cercanos al lugar en evaluación, las estructuras son capaces de modificar de alguna manera los campos electromagnéticos provenientes del lugar en

evaluación. En consecuencia, se debe tomar datos de las características técnicas de los emplazamientos de transmisión cercanos, como: potencia, frecuencia, modulación, sistema irradiante, etc.

- Estimación teórica: los valores de intensidad de campo radiado en los puntos a medir, pueden ser estimados mediante los lineamientos, procedimientos y tablas mencionadas en la norma de “Lineamientos para el desarrollo de estudios teóricos de RNI”.
- Selección del instrumento de medición: con los datos obtenidos de la prospección técnica y los valores estimados del campo radiado, así como la estimación de las regiones de campo cercano o lejano, podemos determinar el tipo de instrumento a emplear.
- Selección de la técnica de medición: dependerá de la magnitud electromagnética por medir y del servicio de telecomunicaciones por evaluar.
- Métodos de medición: involucran fijar los procedimientos, técnicas de medición y los equipos para efectuarlas.
- Medición preliminar.- permite evaluar si algún punto del entorno de la estación radioeléctrica hasta una distancia radial máxima de 100 metros respecto de la base del sistema irradiante. La técnica de medición empleada será de banda ancha para emisiones múltiples y podrá emplearse en el campo cercano y lejano. Cuando se desee medir el nivel de radiación de una frecuencia específica, este método no debe ser usado.
- Medición selectiva.- este método será aplicado cuando: se requiera realizar evaluación de campo lejano, se requiera conocer el nivel de emisión por frecuencia que existe en el emplazamiento, se quiera determinar la contribución individual de las emisiones múltiples que se encuentren en el punto de medición.
- Medición detallada.- las técnicas de medición en este caso son variadas, incluyendo técnicas de medida en campo cercano de los emplazamientos fijos, de emisiones pulsadas y campos de alta intensidad, generalmente estas medidas serán de banda angosta en el rango de frecuencias entre 9KHz a 3 GHz. Este caso se aplica cuando la medición preliminar y medición selectiva excedan los límites máximos permisibles de radiaciones no ionizantes o cuando el lugar de medición se encuentre en los supuestos de excepción descritos.

2.2.8 SDR plataforma y conceptos.

Según la IEEE, un radio definido por software (SDR) es un sistema de comunicación de radio en el cual alguna o todas las operaciones de la capa física son realizadas por el software, tarea como filtrado, ampliación, modulación y demodulación de señales de radio. Comúnmente lo que se busca es optimizar el diseño de la etapa frontal de radiofrecuencia de radio para obtener una señal fácilmente tratada por un computador; para lograr esto se implementan conversores análogos digital y viceversa en procesadores programables de alto desempeño. La ventaja de un SDR es que este puede recibir y transmitir nuevos protocolos de comunicación simplemente mediante la actualización de software sobre el hardware existente, evitando el cambio total de la estructura de comunicaciones que se encuentra ya implementada.

Un sistema básico SDR puede consistir en un ordenador personal equipado con una tarjeta de sonido u otro convertidor de analógico al digital. Se da un procesamiento de señal los cuales son entregados a los procesadores de propósito general, en lugar de ser hecho en hardware de propósito especial.

"Software radio is the technique of getting code as close to the antenna as possible. It turns radio hardware problems into software problems" [14]

2.2.8.1 SDR diagrama de bloques.

Se presenta la estructura universal SDR, con el software específico (GNU radio) y el hardware (USRP):

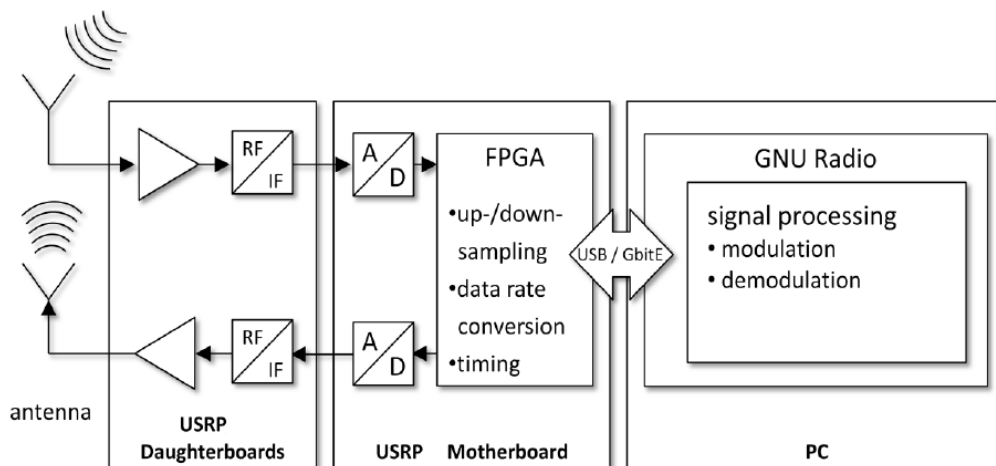


Fig. 2.13. Software defined radio diagrama de bloques.

Matthias Fahnle, H. (2010). *Software Defined Radio with GNU radio and USRP/2 Hardware: Setup and Applications* (tesis de pregrado). University of Applied Sciences, Ulm, Alemania.

Según la figura 2.13. Obtenida de [15], SDR es una estructura de tres bloques, el bloque de la izquierda se constituye de una interfaz de radiofrecuencia de los equipos que sirven como interfaz para el dominio de RF analógico; en el segundo bloque, se encuentra la parte del conversor análogo-digital; en el tercer bloque el conjunto de procesamiento de señales se ha diseñado completamente en software.

2.2.8.2 Universal software radio peripheral (USRP).

Es un equipo que permite el desarrollo de radios definido por software soportado principalmente por el software de desarrollo GNU radio; es considerado un *front end*³ en una etapa de radiofrecuencia, permitiendo a cualquier PC convertirse en SDR. Ver Fig. 2.14:

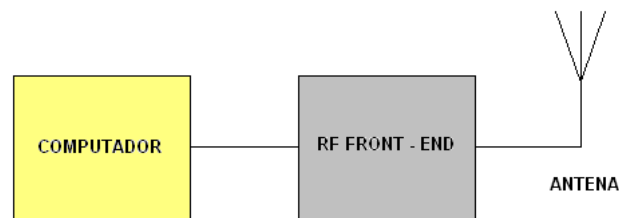


Fig. 2.14. Idea principal de un SDR.

Matthias Fahnle, H. (2010). *Software Defined Radio with GNU radio and USRP/2 Hardware: Setup and Applications* (tesis de pregrado). University of Applied Sciences, Ulm, Alemania.

USRP permite diseñar e implementar potentes y flexibles software de sistemas de radio. Todo esto junto con las diversas daughterboards que cubren una amplia gama de frecuencias. Este al mismo tiempo puede recibir y transmitir en dos antenas en tiempo real, estando todos los relojes de muestreo y los osciladores locales en coherencia lo que permite que se realice MIMO (múltiple entrada, múltiple salida); también posee un FPGA programable para el procesamiento, muestreo y filtrado de altas frecuencias. Todo diseño en USRP es de código abierto, incluyendo esquemas, drivers, la FPGA y los diseños de las daughterboards; cuando se combina el software en GNU radio, se consigue un sistema en código abierto que no requiere de licencias

La estructura y características como se ve en la Tabla 2.9, de un USRP posee un diseño modular basado en una tarjeta madre con cuatro ranuras de

³ Parte del software que interactúa con el o los usuarios

expansión, cada una de las ranuras se encuentra etiquetada como TXA, RXA, TXB, RXB, respectivamente y la organización de los buses *Serial Peripheral Interface* SPI se ocupa las cuatro ranuras de expansión (ver Fig. 2.15). Podemos conectar dos tarjetas con capacidad de transmisión y dos tarjetas para recepción o también se pueden conectar dos *transceiver*.

Tabla 2.9.

Características USRP [16].

	USRP
Fabricante	Ettus Research
Convertidor análogo digital (CAD)	64 MS/s 12-bit
Convertidor digital análogo (CDA)	128 MS/s 14 bit
Max. BW	16 MHz
PC connection	USB 2.0 (32 MB/s half duplex)
RF range	Dependiente de la <i>daughterboard</i> que se utilice.
I/O	Soporte de I/O analógica y digital
S.O.	Linux, Mac OSX, Windows XP

Ettus Research. (2016). *GNU Radio Projects*. Texas, EU. Recuperado de <https://www.ettus.com/>

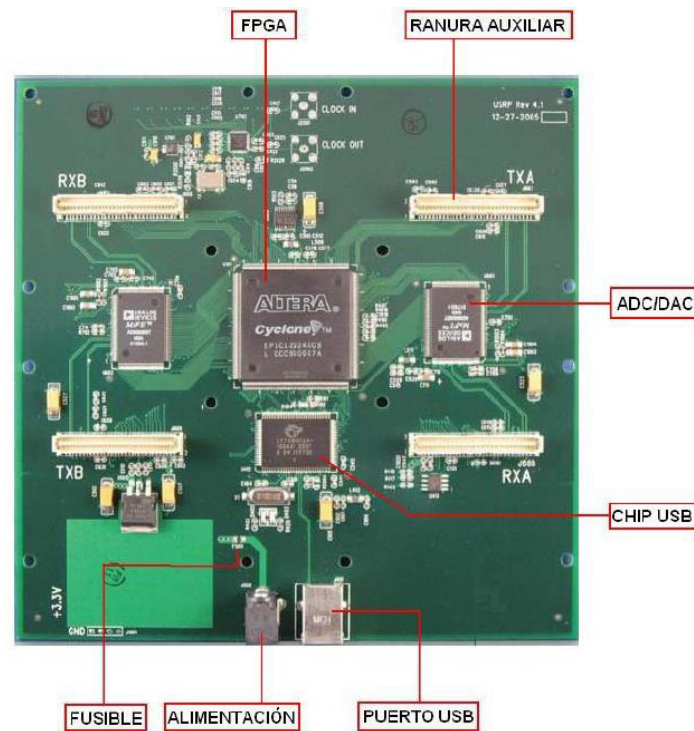


Fig. 2.15. Tarjeta madre del USRP.

Ettus Research. (2016). *GNU Radio Projects*. Texas, EU. Recuperado de <https://www.ettus.com/>

Entre los principales elementos que constituyen una *motherboard* del USRP son:

- ADC (Analog to Digital Converter)

La USRP posee 4 ADC, cada uno de ellos con una resolución de 12 bits. Aplicando el teorema de Nyquist sabemos que los conversores están en capacidad de muestrear una señal con un ancho de banda igual a 32 MHz a una frecuencia máxima de 200 MHz.

Los ADC tienen un rango de 2 voltios pico a pico y una entrada diferencial de 50 ohm la cual puede variar hasta 20 dB (ver Fig. 2.16).

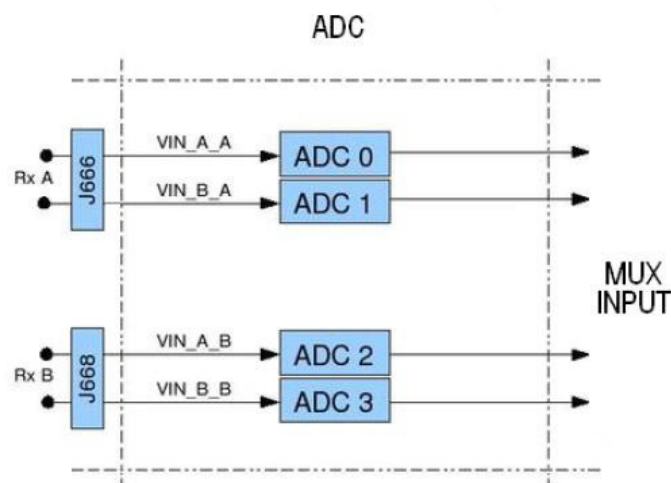


Fig. 2.16. Conversor analógico a digital.

Tocci, R. (2007). *Sistemas Digitales: Principios y Aplicaciones*. Mexico D.F; Mexico: Pearson Educación.

- DAC (Digital to Analog Converter)

En la etapa de transmisión se posee 4 DAC con una resolución de 14 bits. Los conversores de digital a analógico son capaces de muestrear señales con un ancho de banda de 64 MHz. La salida de los DAC entrega 1 voltio pico a una carga diferencial de 50 ohm y también puede mejorar la ganancia en 20 dB.

- FPGA (Field Programmable Gate Array)

Dentro del USRP se encuentra el FPGA (Altera Cyclone) que opera con un reloj de 64 MHz y se encarga de realizar las operaciones de propósito general como

multiplexación, decimación, interpolación, Digital Down Converter (DDC): todo esto debido a que las 4 entradas ADC y las 4 salidas de los DAC generan grandes cantidades de datos como se observa en la figura 2.17.

Así la información que se envía al computador puede ser tratada mediante software, obteniendo un arreglo que proporciona 4 canales de entrada y 4 de salida utilizando muestreo en fase o muestreo en cuadratura, obteniendo 2 entradas y 2 salidas complejas.

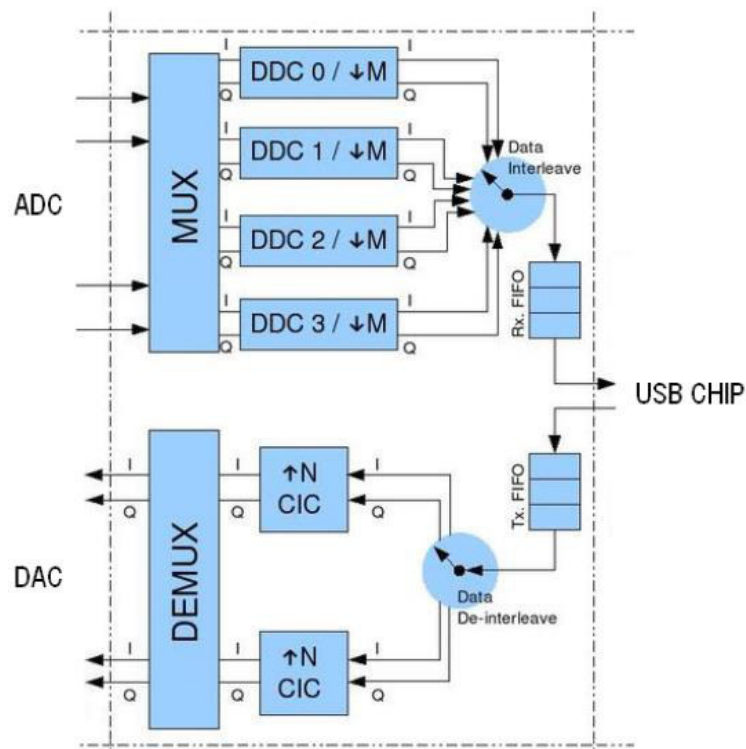


Fig. 2.17. FPGA.

Tocci, R. (2007). *Sistemas Digitales: Principios y Aplicaciones*. Mexico D.F; Mexico: Pearson Educación.

- Puertos digitales auxiliares

La tarjeta madre tiene incorporado un puerto digital de 64 bits que pueden ser controlado mediante software para trabajar independientemente como entradas o salidas digitales.

Los pines de estos puertos son enrutados hacia cada una de las daughterboards a través de los conectores TXA, TXB, RXA, RXB, con una división de 16 bits por conector.

2.2.8.3 USRP daughterboards.

Son una gran variedad de tarjetas adicionales, las mismas que cumplen la tarea de interfaz de RF para la etapa tanto de recepción como de transmisión en diversas frecuencias según sea la necesidad. Cada *daughterboard* cuenta con una memoria EEPROM que le permite identificarse automáticamente el momento que el USRP inicia, cada una de las tarjetas tiene acceso a dos de los cuatro conversores AD/DA.

Estas a su vez sirven como *front-end*, entre sus clases encontramos receptores, transmisores y transceptores; de las cuales entre sus funciones podemos encontrar:

- Módulos transmisores *daughterboard* pueden modular una señal de salida a frecuencia más alta.
- Módulos receptores *daughterboard* pueden adquirir una señal de RF y la convierten en banda base.
- Módulos transceptores *daughterboard* combinar la funcionalidad de un transmisor y un receptor.

A continuación se lista una breve descripción de algunas de las tarjetas *daughterboard* disponibles en la página de Ettus Research:

- Basic TX/RX: diseñadas para operar en el rango de frecuencias de 1-250 MHz, no posee filtros, mezcladores o amplificadores; por lo que su funcionamiento como etapa de frecuencia intermedia (IF) requiere un generador de señales externo. Ver Fig. 2.18.
- LFTX/LFRX: diseño parecido a las tarjetas básicas, con la diferencia que en vez de transformadores de acoplamiento utiliza amplificadores diferenciales y filtros pasa bajos para evitar el aliasing lo que permite expandir la frecuencia de trabajo hasta los 30 MHz (LF: low frequency).
- TVRX: receptor de televisión VHF y UHF capaz de sintonizar canales con un ancho de banda de 6 MHz en el rango de frecuencias de 50 - 860 MHz.
- DBSRX: su rango de frecuencias es de 800 MHz - 2.4 GHz, puede sincronizar canales controlados por software, también cuenta con la posibilidad de alimentar un LNB de antena parabólica por su conector SMA.
- Tansceivers: diseñadas para trabajar al mismo tiempo como transmisor y receptor, ocupan dos ranuras de expansión; funcionan en modo full dúplex gracias a que

poseen osciladores locales y dos conectores SMA, poseen características MIMO y soportan un canal sintonizable con un ancho de banda de 30 MHz.

- RFX900: opera en un rango de frecuencias desde 750 - 1050 MHz, posee un filtro pasa banda que puede ser desactivado para trabajar en las operadoras celulares.
- XCVR2450: tiene su funcionamiento en dos rangos de frecuencias, de los 2.4 - 2.5 GHz y el otro en 4.9 - 5.9 GHz frecuencias usadas por el estándar 802.11a e implementaciones Wimax con frecuencia libre.



Fig. 2.18. Daughterboard BasicTX y BasicRX.

Ettus Research. (2016). *GNU Radio Projects*. Texas, EU. Recuperado de <https://www.ettus.com/>

Algunas aplicaciones en las cuales la plataforma USRP ha sido utilizada:

- Lector para la identificación por radiofrecuencia (RFID).
- Teléfono celular GSM de la estación base.
- Un receptor GPS.
- Un receptor de radio FM.
- Un decodificador de televisión digital.
- Radar pasivo.
- Una estación de radioaficionados.
- Digital audio broadcasting.

- Receptor wimax móvil.

2.2.8.4 GNU radio.

Es un conjunto de herramientas de desarrollo de software libre y de código abierto que proporciona los bloques de procesamientos de señales para poner en práctica el software de radio⁴. Permite el diseño de radios definidos por software mediante el uso de librerías dedicadas que realizan tareas de procesamiento digital de señales, estas librerías son llamadas en forma de módulos integrados en Python, y se conectan entre sí para formar un diagrama lógico a través del cual pasara la información adquirida por el USRP, cada uno de los módulos se orienta a tareas específicas. GNU radio se divide en varios componentes autónomos:

- gnuradio-core. Provee las principales librerías que componen GNU radio.
- gnuradio-examples. Contiene código de ejemplo para distintas aplicaciones de GNU-radio.
- gr-howto-write-a-block. Tutorial para crear bloques para procesamiento de señales.
- pmt. Nos entrega facilidad de polimorfismo en funciones y datos.
- mblock. Implementación que permite el manejo de mensajes basados en paquetes.
- gs-usrp, recursos de bajo nivel necesario para tener acceso a la USRP.
- gr-comedi. Interfaz en Linux para dispositivos de control y medición.
- gr-audio-oss. Interfaz para el driver de sonido Open Sound System Audio.
- gr-audio-portaudio. Interfaz para el desarrollo de aplicaciones de audio multi-plataforma

Se ejecuta en varios sistemas operativos como Linux, MAC OS X, NetBSD. También tiene una portabilidad para Windows, pero debido al control limitado del hardware, la funcionalidad no está garantizada.

2.2.8.5 GNU radio companion (GRC).

Es un lenguaje de código abierto de programación visual para el procesamiento de señales de radio usando las bibliotecas GNU.

⁴ Software de radio.- sistema de radio que realiza el procesamiento de señal requerido en software en lugar de utilizar circuitos dedicados en hardware; como ventaja se tiene que dado que el software puede ser fácilmente sustituido en el sistema de radio, el mismo hardware se puede utilizar para crear varios tipos de radios para muchas normas de transmisión diferentes, por ello un software de radio puede utilizarse para varias aplicaciones.

Puesto que es más fácil de manejar en forma gráfica, GNU radio ofrece una aplicación con la posibilidad de formar un diagrama de flujo con los bloques gráficos. Esta aplicación ofrece numerosos bloques predefinidos, organizados en diferentes grupos como signal sources, signal skins, así también como funciones de modulación y demodulación.

GRC se ilustra mejor con un típico diseño de demodulación PSK como se muestra en la figura 2.19.

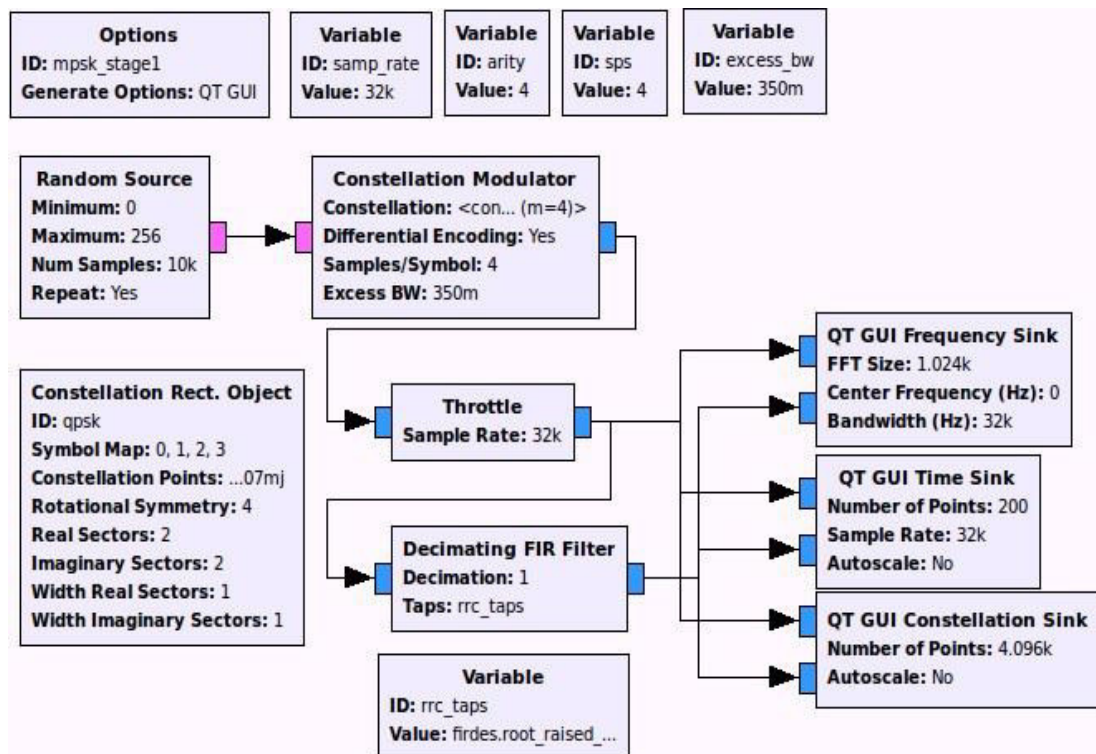
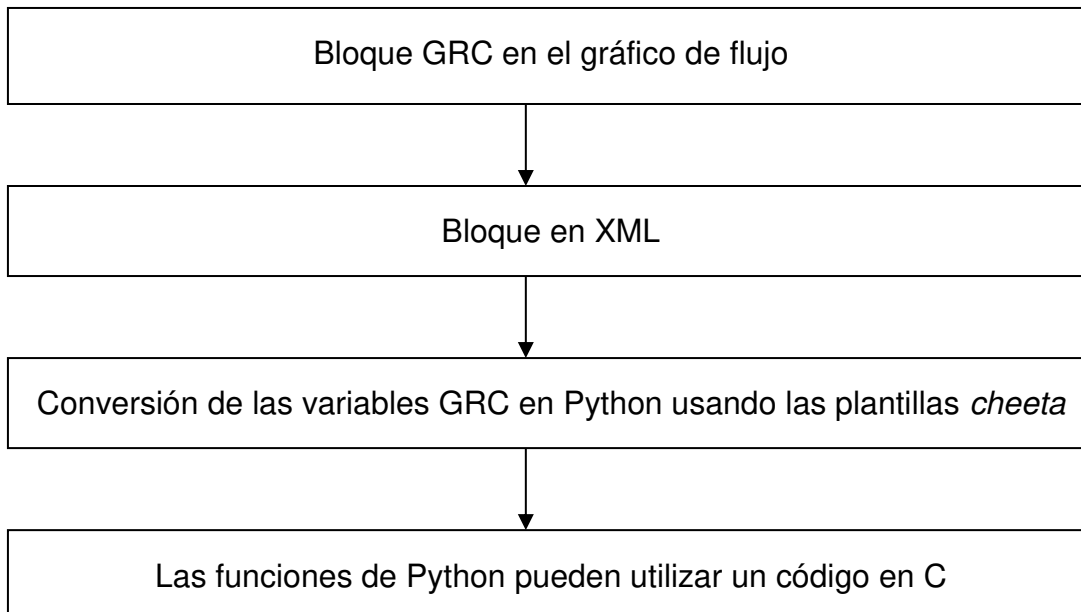


Fig. 2.19. PSK Demodulation in GRC. Elaborado por el autor.

En el siguiente grafico se describen las capas de procesamiento de un bloque de GRC.



Los bloques están conectados el uno a la otra con una línea de conexión, haciendo clic sobre cada bloque se abre la ventana de propiedades de cada bloque respectivamente. En la figura 2.20 se puede observar las propiedades de una fuente de señal.

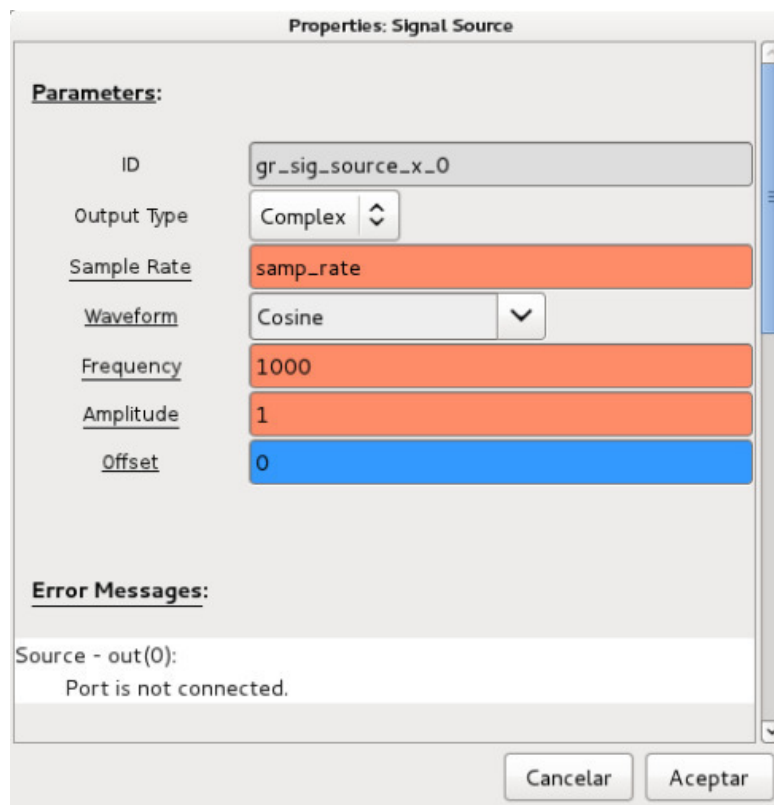


Fig. 2.20. Cuadro de propiedades de una fuente de señal en GRC. Elaborado por el autor.

Las propiedades de un bloque de GRC se les dice "Parámetros", estos se pueden establecer en forma estática, escribiendo un número fijo en ellos o con valores variables, que pueden ser utilizados para algunos cálculos dependientes (ver Fig. 2.21). Una posibilidad para cambiar el valor de las variables mientras que el proyecto se está ejecutando es el uso de sliders, en GRC un bloque slide establece un valor por defecto, un valor mínimo y máximo.

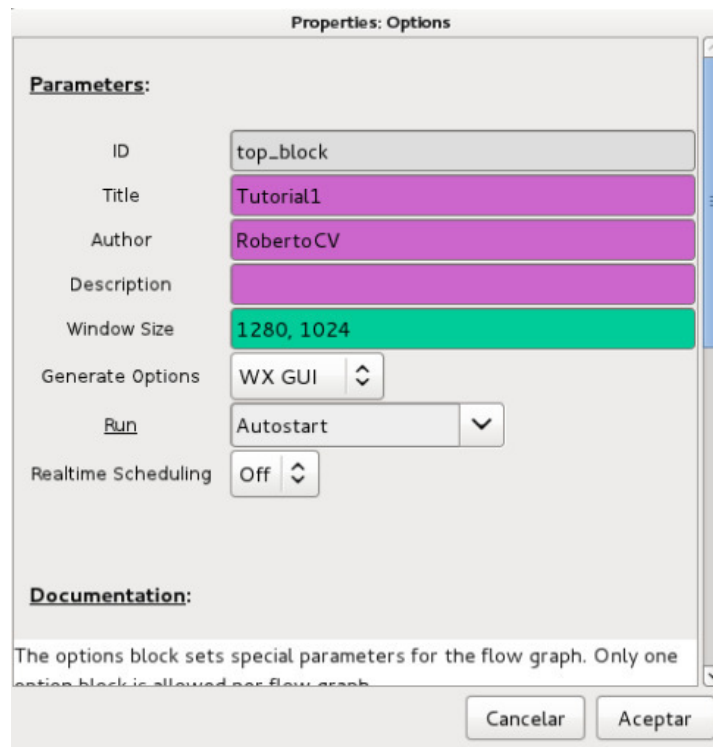


Fig. 2.21. Cuadro de parámetros en GRC. Elaborado por el autor.

2.2.9 Sistema operativo Linux.

Linux nace en 1991 como una alternativa a UNIX pero bajo los lineamientos del proyecto GNU (GNU is not Unix) que busca la creación de un sistema operativo y herramientas de licencia libre, que es todo lo contrario a UNIX.

GNU/Linux es uno de los términos empleados para referirse a la combinación del núcleo o kernel libre similar a Unix denominado Linux, que es usado con herramientas de sistema GNU. Su desarrollo es uno de los ejemplos más prominentes de software libre; todo su código fuente puede ser utilizado, modificado y redistribuido libremente por cualquiera bajo los términos de la GPL (Licencia Pública General de GNU) y otra serie de licencias libres.

Desde entonces Linux poco a poco se ha convertido en el sistema operativo preferido por programadores, administradores de redes e investigadores gracias a los tiempos de operación y fiabilidad que otros sistemas no ofrecen. Aunque posee gran flexibilidad para su configuración, lograr que funcione como necesitamos puede ser una tarea muy laboriosa, esto nos demuestra que aún falta mucho por hacer para que usuarios de escritorio puedan incorporarse al mundo de Linux y no encuentren en él una mala experiencia.

2.2.9.1 Software libre.

Es la denominación del software que respeta la libertad de los usuarios sobre su producto adquirido, es decir, una vez obtenido puede ser usado, copiado, estudiado, modificado y redistribuido libremente. *El software libre se refiere a la libertad de los usuarios para ejecutar, copiar, distribuir, estudiar, modificar el software y distribuirlo modificado* [17].

En la tabla 2.10. se pueden observar las libertades del software libre, este suele estar disponible de forma gratuita o al precio de costo de la distribución a través de otros medios; esto no es obligatorio (no hay que asociar software libre a software gratuito). De igual forma de no debe ser confundido el término "software libre" con el término "software de dominio público", ya que este último es aquel software que no requiere licencia, pues sus derechos son para todos.

Tabla 2.10.

Libertades del software libre.

Libertad	Descripción
0	La libertad para usar el programa, con cualquier propósito.
1	La libertad de estudiar cómo funciona el programa y modificarlo, adaptándolo a nuestras tendencias.
2	La libertad de distribuir copias del programa.
3	La libertad de mejorar el programa y hacer públicas esas mejoras a los demás.
Las libertades 1 y 3 requieren acceso al código fuente.	

Free Software Foundation. (2016). *Free Software Resources*. Boston, EU. Recuperado de <https://www.fsf.org/>

Entre algunas de las licencias que existen en el software libre se encuentran: Licencias GPL (licencia publica general de GNU), AGPL (affero GPL), BSD (Berkeley Software Distribution) y Copyleft.

En sus comienzos Linux tan solo consistía de su núcleo y unas pocas herramientas GNU incorporadas que con el tiempo fueron aumentando en número y variedad. Con el esfuerzo de los diversos usuarios e instituciones crearon sus propias versiones, aunque el núcleo era el mismo los paquetes adicionales eran distintos (lo que hoy llamamos distribuciones). Hoy en día las distribuciones más populares que podemos encontrar son Ubuntu, Fedora, Mandriva y openSUSE, etc. Ver Fig. 2.22. Debemos escoger cual es la distribución que más se acerca a nuestras necesidades.



Fig. 2.22. Distribuciones de Linux.

Switch to GNU/Linux. (2015). *Distribuciones de Linux*. Mexico D.F; Mexico. Recuperado de <https://www.getgnulinux.org/es/>

2.2.9.2 Fedora 15.

Es una distribución de Linux para propósitos generales basada en RPM (red hat package manager), se caracteriza por ser un sistema estable, la cual es mantenida gracias a una comunidad internacional de ingenieros, diseñadores gráficos y usuarios que informan de fallos y prueban nuevas tecnologías. Los desarrolladores de Fedora prefieren hacer cambios en las fuentes originales en lugar de aplicar los parches específicos, de esa forma se asegura las actualizaciones para todas las variantes de GNU/Linux.

Una característica de Fedora es que cada distribución lleva un nombre en código, el nombre del Fedora 15 es *Love/lock*, fue lanzado el 24 de mayo del 2011. Esto se puede observar en la Fig. 2.23. que muestra la línea de tiempo de Fedora.

Fedora se encuentra en el tercer lugar de las distribuciones más conocidas de GNU/Linux, por detrás de Linux Minit y Ubuntu. Por ello se eligió a Fedora 15 como una opción para la instalación del GNU Radio, además de las herramientas de desarrollo y el entorno, haciendo la instalación y el uso más sencillo [18].

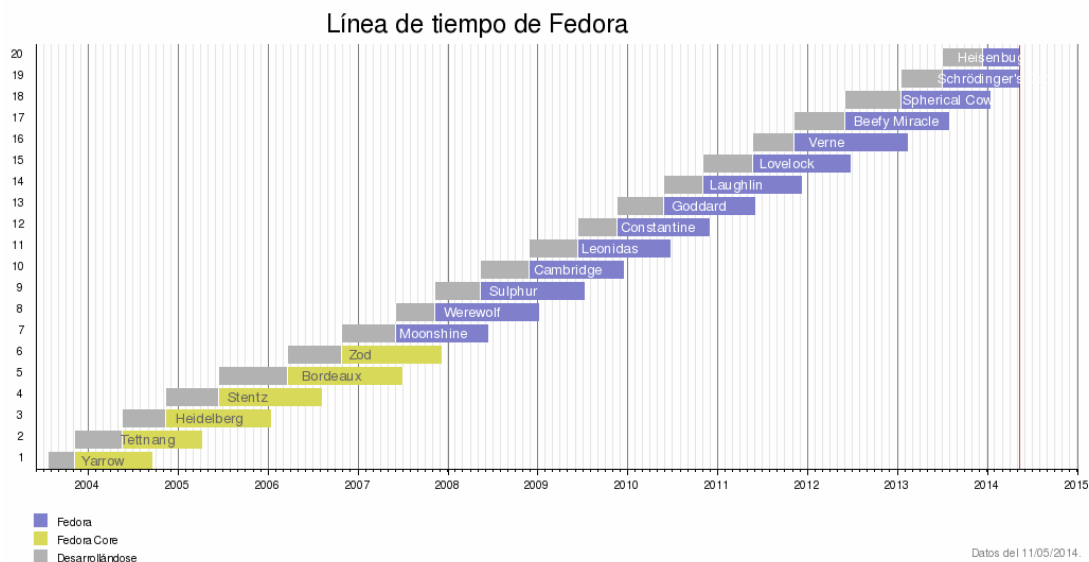


Fig. 2.23. Línea de tiempo de fedora.

Fedora Project. (2016). *Fedora time line and namas*. New York, EU. Recuperado de <https://getfedora.org/en/>

2.3 Terminologías y conceptos

- Antena: dispositivo de radiación o receptor de energía de radiofrecuencia (RF).
- Campo electromagnético: el movimiento de cargas eléctricas en un conductor (como antena de una emisora de radio o TV) origina ondas de campo eléctrico y magnético que se propagan a través del espacio vacío a la velocidad de la luz.
- Campo eléctrico: la región que rodea una carga eléctrica, en el cual la magnitud y dirección de la fuerza sobre una prueba de carga hipotética está definida en algún punto.
- Campo magnético: región de espacio que rodea una carga en movimiento, siendo definida en cualquier punto por la fuerza a la que estaría expuesta otra hipotética carga en movimiento. Un campo magnético ejerce fuerza sobre partículas cargadas solo si están en movimiento, y las partículas cargadas producen campos magnéticos solo cuando están en movimiento.

- Densidad de potencia: la tasa de flujo de energía electromagnética por la unidad de área de superficie usualmente expresado en W/m² o mW/cm² o uW/cm².
- Exposición: el hecho de estar sometido a campos eléctricos, magnéticos o electromagnéticos, diferentes aquellos que se originan debido a procesos fisiológicos en el cuerpo u otro fenómeno natural.
- Exposición ocupacional: se da con respecto a los campos de RF cuando las personas están expuestas como consecuencia de su ocupación y están completamente conscientes del potencial de la exposición y se puede ejercer el control sobre el mismo. Los límites de exposición ocupacional también se aplican cuando sus niveles están sobre los límites poblacionales, con tal que la persona expuesta este enteramente consciente del potencial de exposición y pueda ejercer el control abandonando el área o por algún medio conveniente.
- Exposición poblacional: se aplica para el público en general cuando la persona expuesta como consecuencia de su ocupación podrían no estar consciente del potencial de la exposición o no pueda ejercer control sobre dicha exposición. Por lo tanto, el público en general siempre cae bajo esta categoría cuando la exposición no está relacionada con la ocupación.
- Ganancia de antena: el incremento en la potencia transmitida o recibida por una antena direccional cuando es comparado con una antena estándar, la cual es usualmente una antena isotrópica ideal. La ganancia es una relación de potencias y podría ser expresado en decibeles (dB) o como un numero adimensional.
- Límite máximo permisible: es la concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos que caracterizan a un efluente o a una emisión, que al ser excedido puede causar daños a la salud, bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente.
- Longitud de onda: la longitud de onda (λ) de una onda electromagnética esta relacionada con la frecuencia (f) y la velocidad (c) por la expresión $\lambda = c/f$. En el espacio libre la velocidad de una onda electromagnética es igual a la velocidad de la luz, por ejemplo, aproximadamente 3×10^8 m/s.
- PIRE (potencia isotrópica radiada equivalente): es el producto de potencia suministrada a una antena por la ganancia de la antena, en una dirección dada, relativa a un radiador isotrópico.

- Radiación electromagnética: la emisión o transferencia de energía a través del espacio en la forma de ondas electromagnéticas.
- Radiación No Ionizante: es la que no produce ionización en la materia. Cuando atraviesa los tejidos vivos, no tiene la suficiente energía para dañar el ADN en forma directa.
- Región de campo cercano: región generalmente en la proximidad de una antena u otra estructura radiante, en la cual los campos eléctricos y magnéticos no tienen un carácter substancialmente de onda plana, pero varían considerablemente de punto a punto. La región de campo cercano se subdivide a su vez en región de campo cercano radiante y región de campo cercano reactivo.
- Región de campo lejano: región del campo de una antena donde la distribución de campo angular es esencialmente independiente de la distancia a la antena. En esta región el campo tiene un carácter predominante de onda plana.
- Radio FM comercial: las ondas de radiodifusión FM comercial van de 88 MHz hasta los 108 MHz. En modulación FM, la frecuencia de las ondas portadoras se modifican según la amplitud de la señal de audio.
- SDR (software defined radio): es un sistema de comunicación de radio en el cual alguna o todas las operaciones de la capa física son realizadas por el software, tarea como filtrado, ampliación, modulación y demodulación de señales de radio.
- USRP (universal software radio peripheral): es un equipo que permite el desarrollo de radios definido por software soportado principalmente por el software de desarrollo que este utilice, permite diseñar e implementar potentes y flexibles software de sistemas de radio. Todo esto junto con las diversas placas hijas que cubren una amplia gama de frecuencias.
- Linux: GNU/Linux es uno de los términos empleados para referirse a la combinación del núcleo o kernel libre similar a Unix denominado Linux, que es usado con herramientas de sistema GNU. Su desarrollo es uno de los ejemplos más prominentes de software libre; todo su código fuente puede ser utilizado, modificado y redistribuido libremente por cualquiera bajo los términos de la GPL (Licencia Pública General de GNU) y otra serie de licencias libres.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Criterios para la Elección y la Implementación del Sistema

Los criterios son todas aquellas condicionales que se deben tomar en cuenta para una correcta instalación y funcionamiento del equipo. Los criterios empleados han sido descritos a lo largo de este trabajo y en resumen fueron los siguientes (ver Fig. 3.1):

- Fundamentos teóricos: relacionados a las RNI provenientes de Radiodifusión FM comercial
- Investigación de tecnologías para la medición de RNI:
 - a. Comerciales.
 - b. Plataformas libres.
- Relación calidad/precio.
- Capacidad de personalización y de desarrollo futuro.

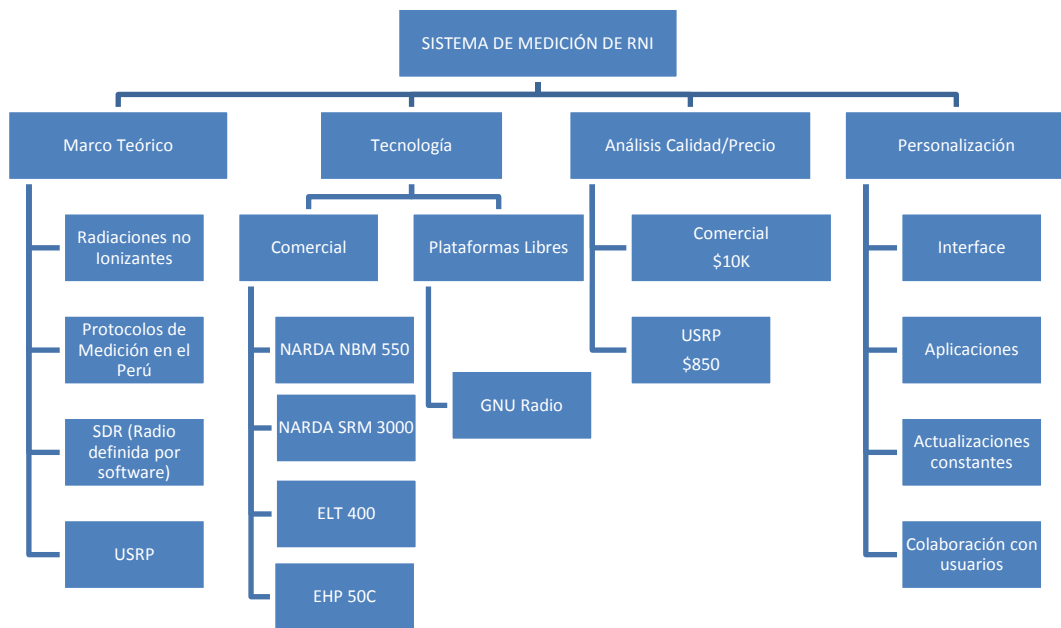


Fig. 3.1. Criterios del sistema de medición de RNI. Elaborado por el autor.

3.2 Material y métodos

3.2.1 Materiales.

Los materiales y equipos a emplear se describen en la tabla 3.1:

Tabla 3.1.

Materiales, equipos y sistemas a emplear.

Material/Equipo/Sistema	Descripción
Laptop personal Toshiba	Intel Core i5 4GB RAM Disco duro 500 GB
Disco duro externo Samsung	500 GB
Fedora 15	Sistema operativo de uso libre
GNU radio	Aplicación con licencia de uso libre
USRP - Ettus	Plataforma de desarrollo programable
Basic RX - Ettus	Tarjeta para recepción VHF
Antena	Antena VHF

Descripción de los materiales, equipos y sistemas empleados durante el Proyecto.

Elaborado por autor.

Los equipos adquiridos para este proyecto fueron principalmente importados ya que no se dispone de esta tecnología en el mercado local. La computadora y el disco duro pertenecen a los investigadores.

Para la determinación de la antena VHF que fue adquirida se tomó en cuenta el rango de operación y que cuente con el conector coaxial acoplable al USRP para evitar tener pérdidas o atenuaciones durante la conexión. También se probó con otras antenas como son direccionales o de tipo J-Pole sin obtener el resultado deseado.

La adquisición del equipo USRP fue seleccionada ya que es uno de los equipos que mayormente son empleados para investigaciones con la metodología SDR. Asimismo para su importación se contactó directamente al fabricante Ettus en Estados Unidos. Sin embargo, hubo problemas en aduanas para poder liberar el equipo debido a la suposición que podía intervenir frecuencias privadas del Estado Peruano. Luego de investigar en la página del MTC se demostró que el equipo USRP y la tarjeta Basic RX se encuentran dentro de los equipos y aparatos de

telecomunicaciones que no necesitan permisos de internamiento. Este procedimiento ocasionó demoras y gastos en trámites para poder liberar el equipo.

3.2.2 Métodos.

Este proyecto está basado en la metodología SDR que se explicó en el capítulo II. Asimismo es importante recalcar que el sistema está basado en hardware USRP y el software libre GNU-radio que opera sobre el sistema operativo Fedora.

Esta sección en primer lugar realiza el estudio e implicancia de las RNI y el estudio del SDR (en nuestro caso GNU radio); su desarrollo, instalación y aplicaciones dadas para Linux (Fedora 15). Con estos fundamentos aprendidos con solidez sobre aplicaciones básicas de GNU radio, luego se desarrollan configuraciones de prueba para la operación de la plataforma USRP. A continuación se investiga la realización de aplicaciones y modelos tales como receptor de señales FM, utilizando la daughterboard del USRP y se comienza a desarrollar una interfaz gráfica.

En segundo lugar, se adaptaron ecuaciones de cálculo para radiaciones no ionizantes a fin de poder complementar los resultados del sistema y así cuantificar la intensidad de potencia y flujo de potencia hacia la zona de exposición poblacional, dado que el sistema ofrece el resultado en decibel (dB); como se verá en el punto 3.2.6. Ecuaciones de cálculo de potencia. Se realizarán pruebas a nivel de campo para determinar mediciones de potencia en zona de exposición poblacional dentro de la ciudad de Chiclayo demostrando su utilidad y su aplicación en cualquier escenario, los cuales pueden ser tomados en un futuro de manera instructiva y/o como precedente para futuros proyectos de investigación.

En este punto es importante mencionar que el enfoque se da en el sistema de medición de RNI para la banda de radiodifusión comercial FM utilizando la tecnología SDR, dado que este sistema puede ser programable para este tipo de medición y reconfigurado de ser necesario el caso. El sistema incluye la recepción de las señales las cuales pasan a un receptor análogo-digital, las que llegan al USRP llevando la señal a base de RF a través de la sección IF y viceversa.

Dentro del USRP el primer nivel que atraviesa la señal son los convertidores análogo-digital (ADC) y digital-análogo (DAC) luego el procesador

(FPGA) e interfaces los cuales están conectados a los ADC's y DAC's. Aquí se da un procesado de las señales en la banda precisada (diezmado); la configuración estándar del FPGA incluye cuatro convertidores digitales de bajada (DDC). El procesamiento siguiente se realiza en el multiplexor determinando que ADC conecta a cada DDC comunicando las señales de salida a la computadora vía USB que realiza el procesamiento por software.

Dentro de las limitaciones que se encuentra al momento de implementar el sistema son las tarjetas secundarias y antenas. Para el sistema se utilizara una basic daughterboard las cuales operan a un determinado rango de frecuencias y una antena de conexión coaxial que opere en el rango de frecuencia FM comercial.

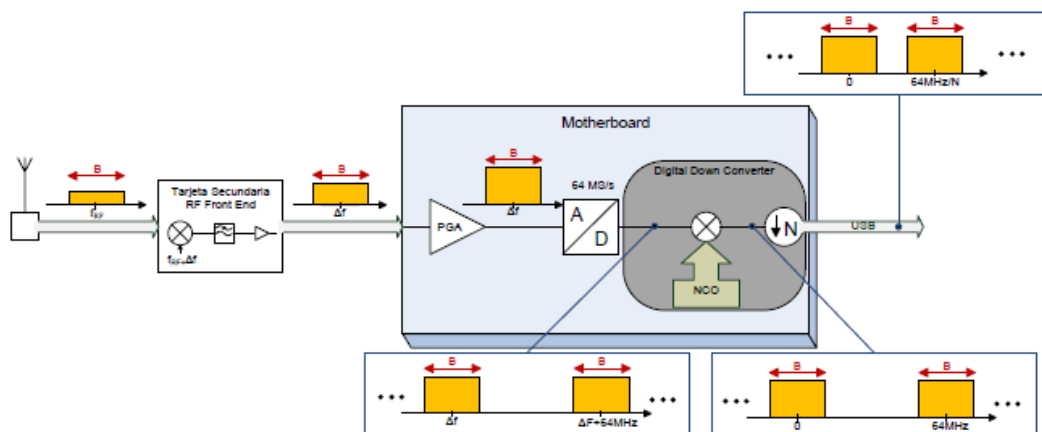


Fig. 3.2. Proceso de recepción.

Pinar Domínguez, I. (2011). *Comunicaciones Digitales de Radio Definida por Software*. Sevilla, España: Anaya.

En la figura 3.2 se muestra un resumen del proceso de recepción desde la antena hasta la interfaz USB en cuanto a muestreos y ganancias se refiere. Hay que tener en cuenta que normalmente la frecuencia intermedia será 0, por ello la tarjeta secundaria intentará sintonizarse al máximo a la radiofrecuencia deseada. El proceso de transmisión sería simétrico [19].

Finalmente se discutirá la performance del sistema, el diseño e implementación, la selección del rango comercial FM, así como del USRP y la utilidad como plataforma de estudio para nuevos y futuros proyectos relacionados a la investigación de RNI.

3.3 Desarrollo del proyecto

3.3.1 Instalación Fedora 15.

Para realizar el proceso de instalación se dispone de instrucciones bastante intuitivas, lo cual facilita la instalación. La instalación para este proyecto fue realizada en un disco duro externo de estado sólido para lograr que el sistema sea portable y no dependa de una computadora en particular. El sistema operativo puede ejecutarse desde cualquier medio de almacenamiento siendo este caso un DVD el medio empleado. Una vez que se inicia el computador y se selecciona el medio de almacenamiento que contiene el sistema operativo como unidad de arranque (booteo), los pasos a seguir fueron los siguientes:

- Seleccionar la opción *Install a new system*.
- Escoger el idioma adecuado.
- Asignar nombre del *host* al equipo.
- Seleccionar la ciudad más cercana al uso horario.
- Asignar contraseña para el usuario *root* (el usuario creado tiene por defecto todos los privilegios).
- Seleccionar el tipo de instalación, en este caso tomando la opción de *Utilizar espacio libre*, y como destino la unidad del disco externo. El sistema operativo Fedora 15 necesitara de 4 particiones principales para que funcione correctamente:

/boot

/(root)

/home

swap (para el punto de montaje)

- Del grupo de opciones siguiente seleccionar Desarrollo de software y la opción "Personalizar luego". Seguido a esto aparecerá el mensaje cargando el S.O.
- Finalmente el sistema se reinicia y mostrará un mensaje de bienvenida indicando que se ha concluido y el sistema Fedora 15 con Gnome 3 (entorno grafico de Fedora 15) está instalado.



Fig. 3.3. Página de bienvenida de Fedora 15.

Fedora Project. (2016). *Release Fedora 15*. New York, EU. Recuperado de <https://getfedora.org/en/>

3.3.2 Actualización de paquetes y entorno.

La actualización de los paquetes se realizó usando las opciones que ofrece el sistema operativo (*Actualización de software*). El tiempo empleado depende de la conexión a Internet y la disponibilidad de los Servidores que comparten los paquetes. Sin embargo, algunos paquetes no pueden ser actualizados de esta forma y otros no vienen instalados al iniciar el S.O., para ello es necesario realizar la instalación manual y uno por uno a través de líneas de comandos.

A continuación se mencionan las actualizaciones realizadas y los comandos que se emplearon:

- Cambio de idioma a teclado latino

```
system-config-keyboard la-latin1
```

- Instalación de Firefox

```
yum install Firefox
```

- Instalación paquete adobe

```
rpm -ivh http://linuxdownload.adobe.com/adobe-release/adobe-release-i386-1.0-1.noarch.rpm
```

- Instalación Adobe Flash

```
yum -y install flash-plugin
```

- Instalación Open Office

```
wget
```

```
http://sourceforge.net/projects/openofficeorg.mirror/files/4.0.1/binaries/en-US/
Apache_OpenOffice_4.0.1_Linux_x86_install-rpm_en-US.tar.gz/download -O
Apache_OpenOffice_4.0.1_Linux_x86_install-rpm_en-US.tar.gz
```

```
wget
```

```
http://sourceforge.net/projects/openofficeorg.mirror/files/4.0.1/binaries/en-US/
Apache_OpenOffice_4.0.1_Linux_x86-64_install-rpm_en-US.tar.gz/download -O
Apache_OpenOffice_4.0.1_Linux_x86-64_install-rpm_en-US.tar.gz
```

```
su -
```

```
yum remove openoffice
```

```
tar -xvf Apache_OpenOffice_4.0.1
```

```
rpm -Uvh RPMS/*.rpm RPMS/desktop-integration/openoffice4.0-redhat-*.rpm
```

```
openoffice4
```

- Instalación de los controladores de audio

```
su-
```

```
su -c 'yum localinstall --nogpgcheck
```

```
http://download1.rpmfusion.org/free/fedora/rpmfusion-free-release-stable.noarch.rpm
```

```
http://download1.rpmfusion.org/nonfree/fedora/rpmfusion-nonfree-release-stable.noarch.rpm'
```

```
yum update
```

```
yum install --nogpgcheck gstreamer-ffmpeg gstreamer-plugins-ugly -y
```

3.3.3 Instalación GNU radio companion (GRC).

El primer paso que se efectuó fue instalar el GRC directamente desde la opción *Añadir/Quitar software* dentro de aplicaciones en el S.O. como se muestra en la figura 3.4. Sin embargo, el resultado de la instalación del software arrojó una versión que no era la actual (ver Fig. 3.5).

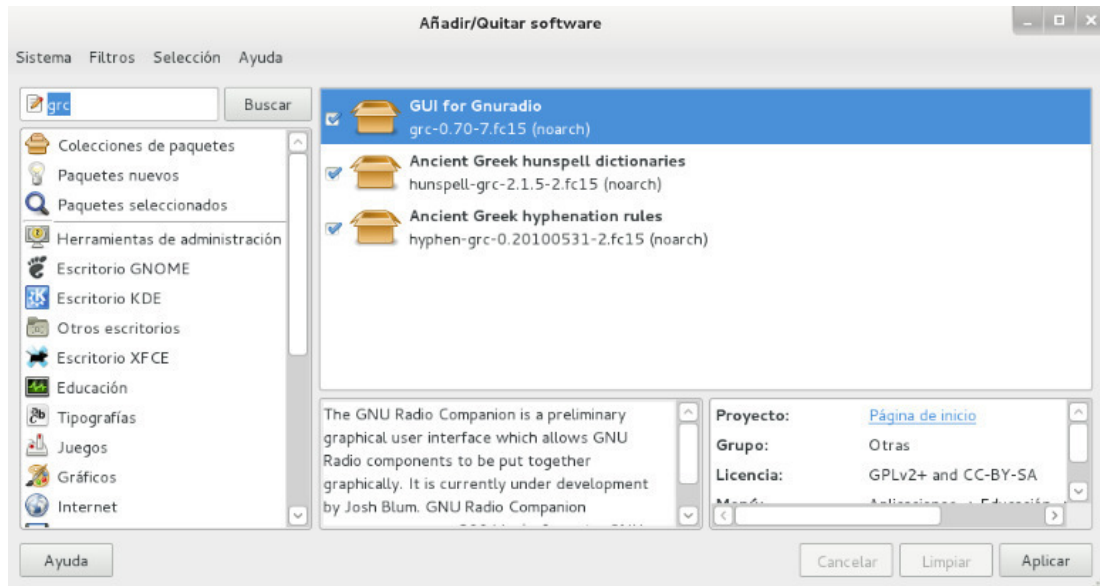


Fig. 3.4. Software para instalación en Añadir/Quitar software. Elaborado por el autor.

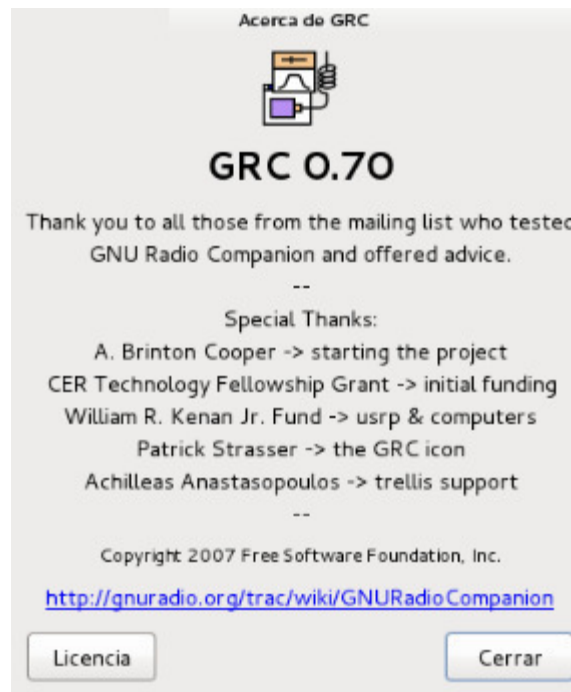


Fig. 3.5. Mensaje de la versión del GRC 0.70 instalado por defecto. Elaborado por el autor.

Para poder instalar la versión actual, se reinstaló el software completamente a través de líneas de comando de la siguiente manera:

a) Abrir la página de GNU Radio-Companion

<http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki/GNURadioCompanion>

b) Descargar en la sección de últimas noticias, uno de los releases de GNU radio, en este caso se descargó: GNU Radio Release 3.5.2.1

<http://gnuradio.org/redmine/news/9>

c) Descargar y extraer el archivo (ver Fig. 3.6):

<http://gnuradio.org/redmine/attachments/download/319/gnuradio-3.5.2.1.tar.gz>

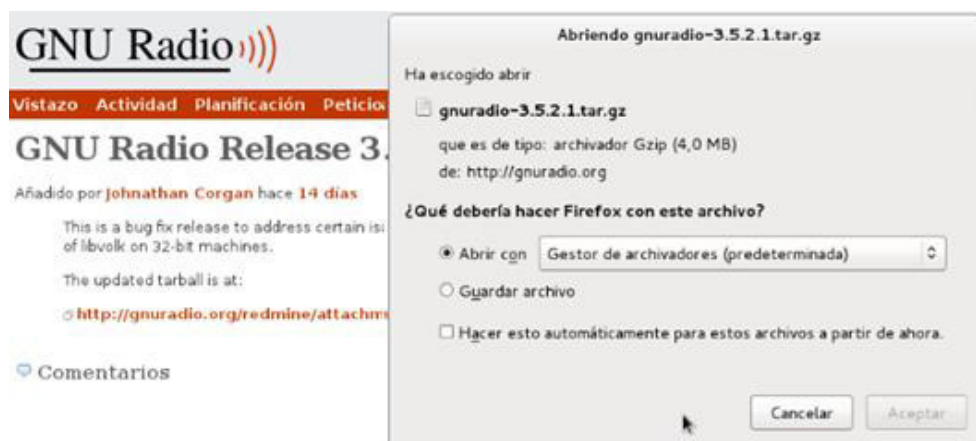


Fig. 3.6. Descarga de la versión 3.5.2.1 de la página GNU radio. Elaborado por el autor.

d) En la página GRC-Companion se visualizaron los requerimientos del GRC y se procedió con la instalación.

- Python 2.5 o superior.
- Python-LXML 2.0 o superior.
- Cheetah Template Engine 2.0 o superior.
- Python-GTK 2.10 o superior.

Para cumplir con los requerimientos del GRC se instalaron ingresando las siguientes líneas de comando en un terminal (Aplicaciones>Herramientas del sistema>Terminal):

```
$ su -
```

```
# yum install python
```

```
# yum install python-lxml; (Python-LXML)
```

```
# yum install python-cheetah; (Cheetah Template)
```

Python-GTK: En la página de pygtk, en la sección descargas:

<http://www.pygtk.org/downloads.html> (ver Fig. 3.7)

Descargar la versión para Linux, en este caso la 2.24.0

<http://ftp.gnome.org/pub/GNOME/sources/pygtk/2.24/>



Fig. 3.7. Página web de GNOME con el pygtk 2.24. Elaborado por el autor.

En el terminal, abrir la carpeta donde se extrajo el archivo e instalar de la siguiente forma:

```
# cd /home/roberto/pygtk-2.24.0
```

```
# ./configure
```

```
# make
```

```
# make install
```

e) Otros requerimientos necesarios para evitar errores al momento de la instalación del GNU-Radio son:

```
# yum install fftw-devel ;FFTW3T
```

CPPUNIT superior a la versión 1.9, descargar, extraer e instalar de la página y ejecutar los comandos:

```
http://sourceforge.net/projects/cppunit/files/cppunit/1.12.0/cppunit-1.12.0.tar.gz/download
```

```
# cd /home/roberto/cppunit-1.12.0
# ./configure
# make
# make install
# yum install gsl-devel ;gsl package
# yum install numpy ;python NumPy
```

Descargar "gr-howto-write-a-block" e instalar:

```
http://gnuradio.org/redmine/attachments/download/318/gr-howto-write-a-block-3.5.2.tar.gz
```

```
# yum install wxPython ;gr-wxgui
# yum install sdcc ;sdcc
# yum install usrp
# yum install gr-usrp
```

Para instalar wxPython, descargar el archivo del siguiente link:

```
https://sourceforge.net/project/showfiles.php?group id=10718
```

```
# cd /home/roberto/wxPython-src-2.9.3.1
# ./configure
# make
# make install
$ yum install xmlto xmlto version ; xmlto or later.
http://cyberelk.net/tim/xmlto/index.html
```

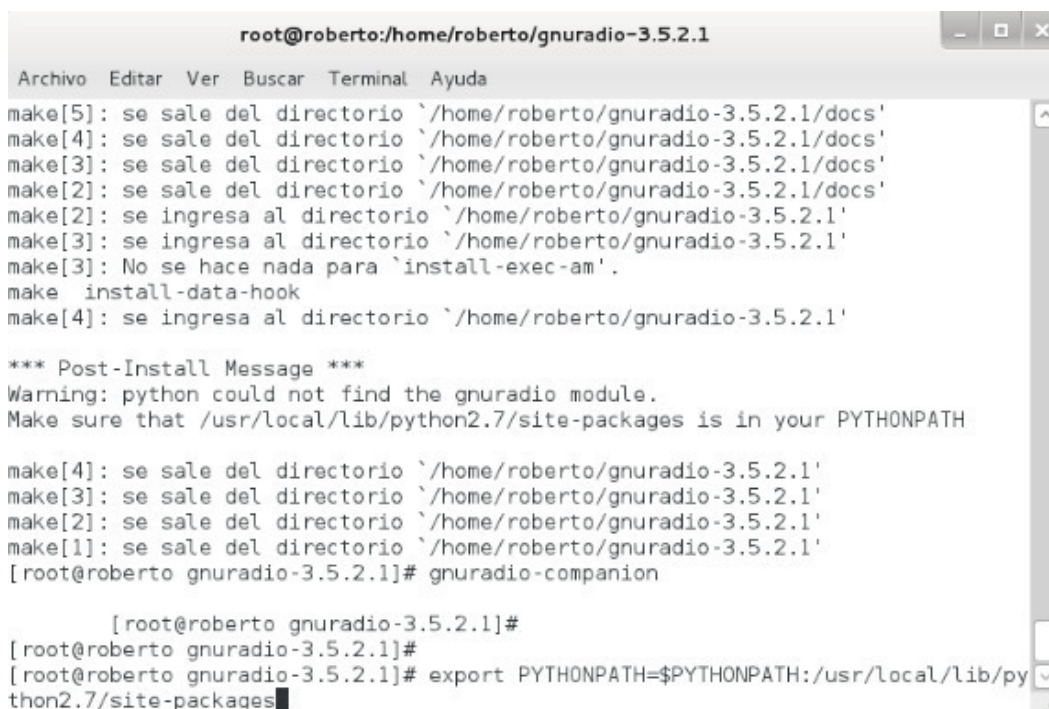
-> The Boost C++ Libraries (1.35 or later) <http://www.boost.org>

f) Finalmente en un nuevo terminal, dirigirse a la carpeta donde se encuentra extraído el archivo previamente descargado (gnuradio-3.5.2.1), en este caso:

```
# cd /home/roberto/gnuradio-3.5.2.1
# ./configure --enable--all--components
# make
# make install
# gnuradio-companion
```

Al intentar ejecutar el comando anterior, es probable que no se ejecute, ya que hay un problema con el "path" del python, dado esto se comprobara la versión del python (Sistema de archivos>usr>local>lib>Python2.7) y verificar el nombre de la carpeta "dist-packages" o "site-packages" que se encuentra dentro de Python2.7. En este caso se cuenta con la versión 2.7 y la carpeta "site-packages", por lo que la línea de comando a ingresar es:

```
# export PYTHONPATH=$PYTHONPATH:/usr/local/lib/python2.7/site-packages
```



```
root@roberto:/home/roberto/gnuradio-3.5.2.1
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
make[5]: se sale del directorio `/home/roberto/gnuradio-3.5.2.1/docs'
make[4]: se sale del directorio `/home/roberto/gnuradio-3.5.2.1/docs'
make[3]: se sale del directorio `/home/roberto/gnuradio-3.5.2.1/docs'
make[2]: se sale del directorio `/home/roberto/gnuradio-3.5.2.1/docs'
make[2]: se ingresa al directorio `/home/roberto/gnuradio-3.5.2.1'
make[3]: se ingresa al directorio `/home/roberto/gnuradio-3.5.2.1'
make[3]: No se hace nada para `install-exec-am'.
make install-data-hook
make[4]: se ingresa al directorio `/home/roberto/gnuradio-3.5.2.1'

*** Post-Install Message ***
Warning: python could not find the gnuradio module.
Make sure that /usr/local/lib/python2.7/site-packages is in your PYTHONPATH

make[4]: se sale del directorio `/home/roberto/gnuradio-3.5.2.1'
make[3]: se sale del directorio `/home/roberto/gnuradio-3.5.2.1'
make[2]: se sale del directorio `/home/roberto/gnuradio-3.5.2.1'
make[1]: se sale del directorio `/home/roberto/gnuradio-3.5.2.1'
[root@roberto gnuradio-3.5.2.1]# gnuradio-companion

[root@roberto gnuradio-3.5.2.1]#
[root@roberto gnuradio-3.5.2.1]#
[root@roberto gnuradio-3.5.2.1]# export PYTHONPATH=$PYTHONPATH:/usr/local/lib/py
thon2.7/site-packages
```

Fig. 3.8. Muestra de instalación de requerimientos y el GNU radio actual. Elaborado por el autor.

3.3.4 UHD.

Es un software perteneciente al hardware USRP, el cual sirve como controlador para todos los dispositivos del mismo. Funciona en todas las plataformas (Linux, Windows y Mac).

El objetivo del software UHD es proporcionar un controlador de host y API (Application Programming interface) para los productos de la marca Ettus para investigaciones actuales y futuras. Los usuarios pueden utilizar el software independiente como UHD o con aplicaciones de terceros, tales como:

- GNU radio
- LabVIEW
- Simulink
- OpenBTS
- Iris
- Redhawk

Los prerequisites y pasos para la instalación son los siguientes:

```
sudo yum -y install boost-devel libusb1-devel python-cheetah doxygen python-docutils
```

El código fuente se encontró en la siguiente sección:

```
git clone git://code.ettus.com/ettus/uhd.git
```

Posteriormente se debe crear un archivo en la carpeta `"/etc/yum.repos.d/"` el cual tendrá por nombre `"ettus.repo"`; y dicho contenido serán las siguientes líneas [20]:

```
[ettus-uhd-master-repo]
```

```
name=Ettus Research - UHD Master $releasever-$basearch
```

```
baseurl=http://files.ettus.com/binaries/uhd_unstable/repo/uhd/fedora/$releasever/$basearch
```

```
gpgcheck=0
```

De existir problemas para el traslado del archivo o creación, pueden crearse en otra carpeta y usar la siguiente línea de comandos para llevarlo a dicha ubicación, en este caso:


```
$ mv /home/roberto/Documentos/ettus.repo /etc/yum.repos.d/
```

Seguido de las siguientes líneas de comando:

```
$ yum update ; Revisará nuevas actualizaciones, detectará todas
```

```
$ yum install uhd ; Escoger las actualizaciones del UHD
```

Luego se debe colocar lo siguiente en línea de comandos:

```
$ yum install libusb-devel
```

```
$ yum install cppunit-devel wxPython-devel pygsl guile-devel PyOpenGL PyQt4-devel  
qwtplot3d-qt4-devel PyQwt-devel
```

```
$ yum install orc-devel
```

```
$ yum install qwtplot3d ; instalación QtGui
```

```
$ yum install qt-devel ; instalar librerías del QT
```

```
$ yum install qwt-devel ; librerías
```

```
$ yum install qwtplot3d-devel ; librerías
```

```
$ yum install comedilib-devel ; librerías de 'comedi'
```

```
$ export PATH=/usr/libexec/sdcc:$PATH
```

Es necesario instalar el complemento SDCC (Small Device C Compiler), para ello dirigirse a la página del proveedor, en la sección de descargas:

<http://sourceforge.net/projects/sdcc/files/>

Seleccionar, para este caso, una versión en Linux. Extraer el archivo *tar*, crear una carpeta de nombre SDCC y acceder a ella:

```
$ cd ~
```

```
$ mkdir tmp
```

```
$ cd tmp
```

```
$ tar xjf path/to/binary/kit/sdcc-####.tar.bz2
```

Luego reemplazar la dirección y el nombre del archivo que se descargó; cambiar a la carpeta *sdcc* y copiar los archivos de la ubicación de la siguiente forma:

```
$ cd sdcc
```

```
$ cp -r * /usr/local
```

Finalmente ingresar las siguientes líneas de comando para terminar la instalación:

```
uhd_usrp_probe
```

```
uhd_find_devices
```

```
yum install usrp-devel (o dev)
```

Al finalizar la instalación y al aparecer el software ya instalado en la versión actual como se ve en la figura 3.9, cada vez que se quiera ingresar al software se debe ingresar desde al símbolo del sistema como súper usuario (su -) e ingresar las siguientes líneas:

```
#export PYTHONPATH=$PYTHONPATH:/usr/local/lib/python2.7/site-packages
```

```
#gnuradio-companion
```

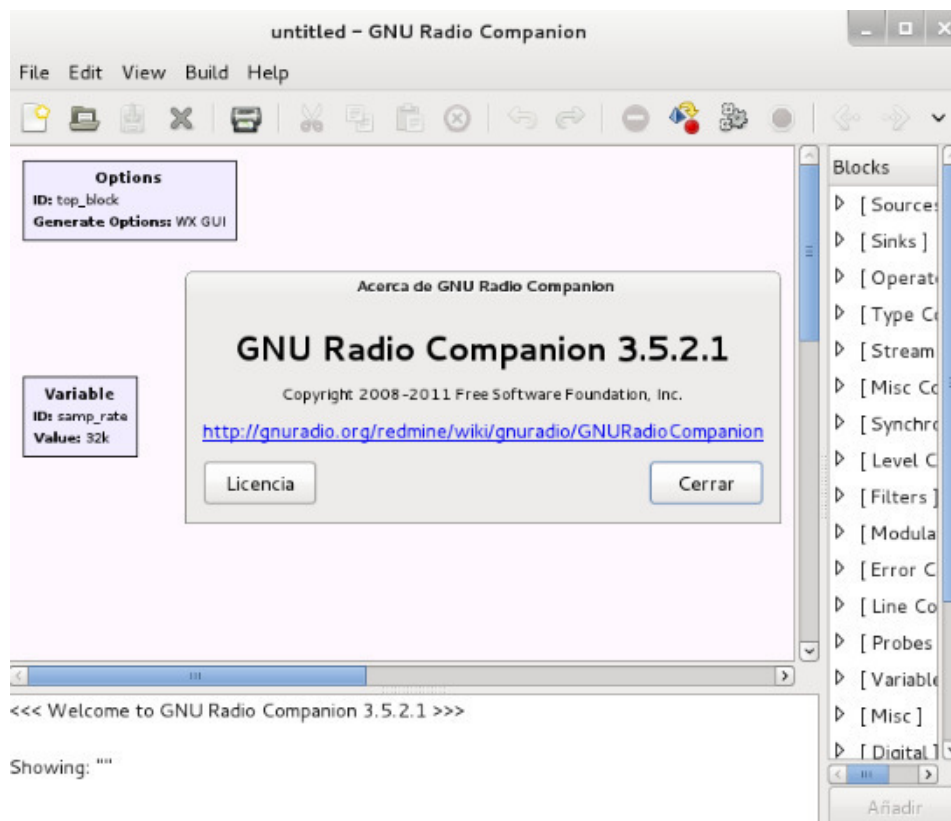


Fig. 3.9. Entorno de trabajo de GNU Radio companion actualizado. Elaborado por el autor.

Con ello el software GNU Radio Companion está listo para su uso, al conectarle el USRP y escribir los comandos:

```
$ uhd_find_devices
```

```
$ uhd_usrp_probe
```

Detectara el dispositivo y describirá las características del USRP1 conectado, como se muestra en la figura 3.10:

```
roberto@roberto:~  
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda  
[roberto@roberto ~]$ uhd_usrp_probe  
linux; GNU C++ version 4.6.3 20120306 (Red Hat 4.6.3-2); Boost_104600; UHD_003.0  
04.002-150-unstable  
  
Error: LookupError: KeyError: No devices found for ----->  
Empty Device Address  
[roberto@roberto ~]$ uhd_find_devices  
linux; GNU C++ version 4.6.3 20120306 (Red Hat 4.6.3-2); Boost_104600; UHD_003.0  
04.002-150-unstable  
  
No UHD Devices Found  
[roberto@roberto ~]$ uhd_usrp_probe  
linux; GNU C++ version 4.6.3 20120306 (Red Hat 4.6.3-2); Boost_104600; UHD_003.0  
04.002-150-unstable  
  
-- Loading firmware image: /usr/share/uhd/images/usrp1_fw.ihx... done  
-- Opening a USRP1 device...  
-- Loading FPGA image: /usr/share/uhd/images/usrp1_fpga.rbf... done  
-- Using FPGA clock rate of 64.000000MHz...  
  
┌───┐  
│   │ Device: USRP1 Device  
│   │ ────────────────────┐  
│   │ │ Mboard: USRP1  
│   │ │ serial: 4d7fe3e6  
│   │ │  
│   │ │ Time sources: none  
│   │ │ Clock sources: internal  
│   │ │ Sensors:  
│   │ │ ────────────────────┐  
│   │ │ │ RX DSP: 0  
│   │ │ │ Freq range: -32.000 to 32.000 Mhz  
│   │ │ │ ────────────────────┐  
│   │ │ │ │ RX DSP: 1  
│   │ │ │ ────────────────────┐  
│   │ │ ────────────────────┐  
│   │ ────────────────────┐  
└───┘
```

Fig. 3.10. Reconocimiento del hardware USRP y características. Elaborado por el autor.

3.3.5 Agregar bloque.

Una vez realizada la instalación completa del software GNU Radio Companion v3.5.2.1. Se debe de agregar algunos bloques faltantes los cuales son necesarios para la realización del sistema y para la detección de Radiaciones No Ionizantes en la banda FM comercial.

Para agregar los bloques dirigirse a la siguiente página para descargar el repositorio de los bloques que se necesitan (acorde a la versión que se utilice, esto puede variar):

<http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/repository>

En este caso, gnuradio-3.5.2.1:

<http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/repository/revisions/9988664127b367fa8fee4409f8460673d6f265e1>

Descargar el bloque deseado en XML. El archivo descargado se moverá a la carpeta “blocks” (/usr/local/share/gnuradio/grc/blocks), con el comando:

```
# mv /home/roberto/wxgui_scopesink2.xml
```

En este caso en la carpeta home/roberto. Finalmente para actualizar la variable del entorno:

```
# GRC_BLOCKS_PATH=/usr/local/share/gnuradio/grc/blocks
```

3.3.6 Ecuaciones de cálculo de potencia.

Se detallan como es que las ecuaciones han sido implementadas para complementar los resultados del sistema, dado que estas ecuaciones se han adaptado al cambio de potencia.

Se hace notar que las ecuaciones de cálculo para radiaciones no ionizantes han sido adaptadas con el objetivo de poder cuantificar la intensidad de potencia y flujo a la exposición poblacional, dado que el sistema ofrece el resultado en decibel (dB).

Conversión de dB a mW (A.1):

$$dBm = 10 \log \left[\frac{\text{señal}(mW)}{1mW} \right]$$

Conversión de potencia (A.2):

$$dBm = dBw + 30$$

Convirtiendo dBm a Watts:

$$dBm = 10 \log \left[\frac{\text{señal}(mW)}{1mW} \right]$$

$$\frac{dBm}{10} = \log \left[\frac{\text{señal}(mW)}{1mW} \right]$$

$$\frac{\text{señal}(mW)}{1mW} = 10^{dBm/10}$$

$$\text{señal}(W) = 1W * 10^{(dB-30)/10}$$

Como ejemplo usamos 0 dBm:

$$S(W) = 1W * 10^{(0-30)/10}$$

$$S(W) = 0.001W$$

El resultado se puede corroborar en la tabla 3.2 Tabla de conversión dBm a Watts:

Tabla 3.2.

Conversión dBm a Watts.

Power (dBm)	Power (W)
-30 dBm	0.000001 W
-20 dBm	0.00001 W
-10 dBm	0.0001 W
0 dBm	0.001 W
1 dBm	0.0012589 W
2 dBm	0.0015849 W
3 dBm	0.0019953 W
4 dBm	0.0025119 W
5 dBm	0.0031628 W
6 dBm	0.0039811 W
7 dBm	0.0050119 W
8 dBm	0.0063096 W
9 dBm	0.0079433 W
10 dBm	0.01 W
20 dBm	0.1 W
30 dBm	1 W
40 dBm	10 W
50 dBm	100 W

Elaborado por el autor.

A su vez estas fórmulas fueron utilizadas al momento de obtener los resultados de las pruebas realizadas las cuales se podrán ver en el Capítulo IV - 4.3. Pruebas realizadas; siendo base de referencia la tabla 3.3 Tabla de conversión dBW, dWm, Watt.

Tabla 3.3.

Conversión dBm, dWm, Watts.

Power (dBW)	Power (dBm)	Power (Watt)
-130 dBW	-100 dBm	0.1 pW
-120 dBW	-90 dBm	1 pW
-110 dBW	-80 dBm	10 pW
-100 dBW	-70 dBm	100 pW
-90 dBW	-60 dBm	1 nW
-80 dBW	-50 dBm	10 nW
-70 dBW	-40 dBm	100 nW
-60 dBW	-30 dBm	1 uW
-50 dBW	-20 dBm	10 uW
-40 dBW	-10 dBm	100 uW
-30 dBW	0 dBm	1 mW
-20 dBW	10 dBm	10 mW
-10 dBW	20 dBm	100 mW
-1 dBW	29 dBm	0.794328 W
0 dBW	30 dBm	1 W
1 dBW	31 dBm	1.258925 W
10 dBW	40 dBm	10 W
20 dBW	50 dBm	100 W
30 dBW	60 dBm	1 kW
40 dBW	70 dBm	10 kW
50 dBW	80 dBm	100 kW
60 dBW	90 dBm	1 MW
70 dBW	100 dBm	10 MW
80 dBW	110 dBm	100 MW
90 dBW	120 dBm	1 GW
100 dBW	130 dBm	10 GW

Elaborado por el autor.

3.3.7 Características técnicas del sistema.

A continuación se describen las características técnicas del sistema basado en USRP para la medición de radiaciones no ionizantes de radiodifusión FM comercial:

Características básicas:

- Antena omnidireccional VHF (incluido el rango FM comercial 88-108 MHz).
- Tarjeta madre USRP.
- Tarjeta básica RX - USRP.

Rango de frecuencia: 1 - 250 MHz

Rango de potencia: Variable (puesta en el sistema en dB: -125 ~ -75.

Sin filtros, mezcladores o amplificadores.

Usado como etapa de frecuencia intermedia.

- Laptop (Intel core i5).
- Disco duro externo (Instalado el S.O. Fedora 15 y el software GNU radio).

Aplicaciones:

- Receptor de radio FM.
- Receptor de frecuencia VHF.
- Uso del lenguaje SDR para la enseñanza.
- Medición de potencia de Radiaciones No Ionizantes en VHF.
- Variación de la programación para la realización de nuevos proyectos académicos de medición de RNI.

Descripción: La descripción general del equipo, así como cada uno de los bloques configurables del receptor FM en GRC, la preparación y la puesta en marcha del sistema se encuentran en el Capítulo IV - Pruebas y resultados, en el cual se detallan cada uno de los puntos antes mencionados

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

En esta sección se explica el funcionamiento del sistema, desde la realización de pruebas iniciales para comprobar el correcto funcionamiento de cada una de las partes del sistema hasta el proceso final de obtención de resultados.

4.1 Diagrama de Bloques del Sistema

4.1.1 Descripción general.

Después de haber explicado la instalación del software GNU radio con todos sus componentes en el entorno de Linux, en este punto se explicara el sistema por etapas, las cuales comprenden la parte de hardware y el software en conjunto con la implementación del sistema.

El equipamiento físico o hardware, como se observa en la figura 4.1 consta de 3 partes principales que son: la antena receptora de la señal, el Universal Software Radio Peripheral (USRP) que realiza el procesamiento de la señal adquirida y la PC en la cual se encuentre el software que determina el paso que tendrá la señal por el sistema. La parte del software será explicada posteriormente así como el entorno del mismo.



Fig. 4.1. Sistema de medición de RNI con USRP. Elaborada por el autor.

4.1.2 Receptor FM en GRC.

La interface visual para el usuario del software GNU radio se trabaja a través de bloques configurables y programables. Ver la figura 4.2:

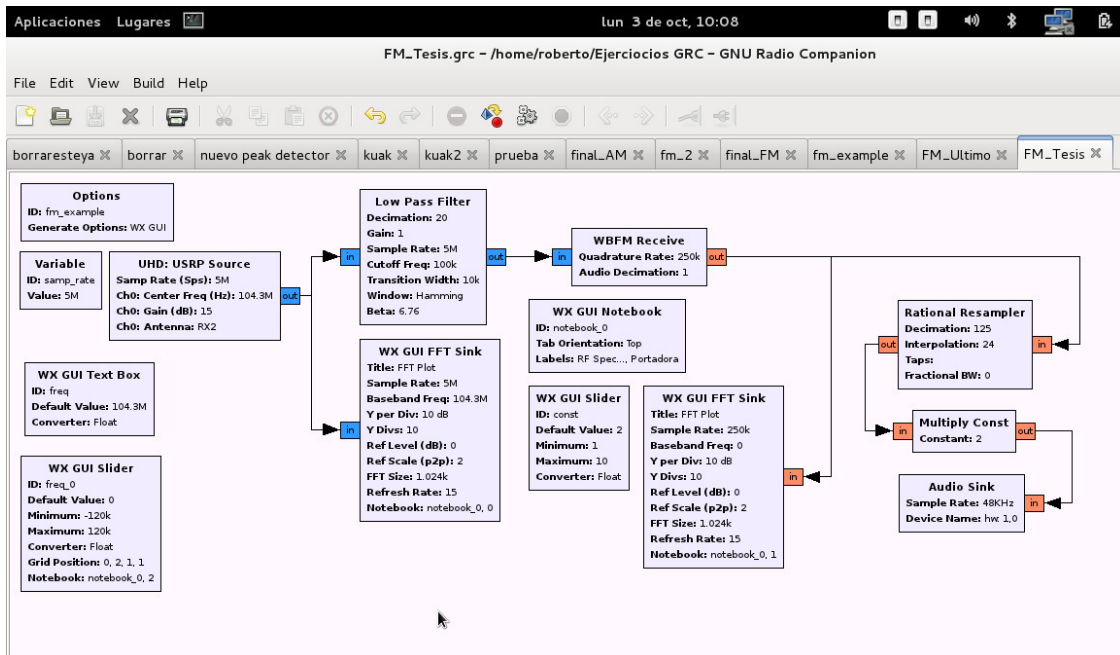


Fig. 4.2. Receptor FM en GRC. Elaborada por el autor.

De esta imagen podemos observar los bloques utilizados para el receptor, su configuración y la programación gráfica que se realizó, los cuales se describen a continuación:

- **OPTIONS:** el presente bloque establece los parámetros especiales para el diagrama a desarrollar. Solo se puede utilizar un bloque "Options" por diagrama. Título, autor, descripción y parámetros son para propósitos de identificación. El ítem "generate options" controla el tipo de código generado. En una aplicación gráfica el ítem "run" puede ser controlado por una variable para iniciar y detener el diagrama a la hora de ejecución.

El "ID" de este bloque determina el nombre del archivo generado.

- **VARIABLE:** este bloque asigna un valor a una única variable. No posee una representación gráfica.

- **WX GUI TEXT BOX:** este bloque crea una variable con un cuadro de texto. Usa la variable ID como etiqueta.

El ítem "Default value" se ingresa un valor de inicio por defecto, convirtiendo el valor en una cadena de un formato predeterminado.

- **WX GUI SLIDER:** este bloque crea una variable con un control deslizante. Utiliza la variable ID como etiqueta.

El valor a ingresar debe ser un número real, ese valor debe estar entre el mínimo y el máximo. El número de pasos (ítem "Num Steps") debe estar entre 0 y 1000.

- **UDH: USRP SOURCE:**

Dirección del dispositivo: es un string delimitado, usado para localizar dispositivos UHD en el sistema. Utilizará el primer dispositivo UHD encontrado.

Se puede utilizar la opción "Device Address" para especificar un dispositivo o una lista de dispositivos específicos.

El ítem "Output type" controla el tipo de datos en gnuradio.

"Num Motherboards": selecciona el número de placas base USRP en la configuración del dispositivo.

"Num Channels": selecciona el número total de canales en la configuración del USRP.

Frecuencia de muestreo: es el número de muestras por segundo de entrada de este bloque. El controlador del dispositivo UHD hará todo lo posible para que coincida con

la frecuencia de muestreo requerida, si la tasa solicitada no es posible el bloque UHD mostrara un error en tiempo de ejecución.

Frecuencia central: es la frecuencia global de la cadena de RF.

Antena: para sub dispositivos con una sola antena este puede dejarse en blanco. De lo contrario, el usuario debe especificar una de las posibles opciones de antena.

Ancho de banda: para poder utilizar la configuración del filtro del mismo por defecto, el valor debe ser cero.

- LOW PASS FILTER: es un filtro conveniente para FIR (ítem FIR Type) en las funciones generadas.

Las frecuencias de muestreo, frecuencia de corte y ancho de transición serán ingresadas en Hertz.

- WX GUI FFT SINK: promedio establecido de “Alfa” a cero para un ajuste automático.

Dejar en blanco la ventana para tener el tamaño por defecto.

Dentro de este se establecen los siguientes parámetros: título, radio, frecuencia, división de 10 dB, RF level y tamaño de FFT.

- WX GUI Notebook.

- WBFM Receiver.

- RATIONAL RESAMPLER: Dejar en blanco para la toma del valor automático.

Dejar ancho de banda fraccional en cero para tener el valor automático.

- Multy const

- AUDIO SINK: no todas las frecuencias de muestreo serán apoyadas por su hardware. Puede tener múltiples entradas dependiendo de su hardware, controla el nivel del audio.

4.2 Preparación y puesta en marcha

En primer lugar se realiza la conexión de una antena adecuada para la recepción de señales en el rango VHF de frecuencias, la cual debe tener el conector coaxial adecuado para poder acoplarse al puerto RX del USRP.

Seguidamente, se ubica la conexión de alimentación DC del USRP, que debe ser conectada a la fuente de alimentación provista. El encendido es de forma inmediata.

Luego se conecta la computadora al USRP a través de la conexión USB mediante un cable tipo USB-A a tipo USB-B.

Posteriormente se coloca el disco duro externo e iniciamos el sistema operativo Fedora 15, para ello se cambia el modo de arranque de la PC eligiendo otros medios de arranque.

Una vez iniciado el sistema operativo se realiza el *login* en el sistema, abrir el terminal para dar inicio con el software a utilizar, en el cual se usan los siguientes comandos para iniciar el programa:

```
su
```

```
(Clave de administrador)
```

```
#export PYTHONPATH=$PYTHONPATH:/usr/local/lib/python2.7/site-packages
```

```
#gnuradio-companion
```

En el capítulo anterior se explicó el proceso de instalación del software GNU radio y se desarrollaron algunos programas de prueba para verificar el funcionamiento del sistema y lograr la familiarización con el manejo del software, en este punto se usa uno de los programas mencionados para comprobar que el sistema está operando correctamente. Para ello se utiliza un programa FM básico que nos permite escuchar una emisora escogida y mostrando información gráfica en pantalla.

4.3 Pruebas realizadas

Las mediciones se realizaron en tres zonas para probar el funcionamiento del sistema y tener muestras de resultados comparables. Las zonas escogidas son: la ciudad de Chiclayo (campus USMP), Lima (centro) y en Chorrillos (inmediaciones del Morro Solar).

Las frecuencias escogidas para realizar las mediciones fueron seleccionadas en la ciudad de Chiclayo por lo cual estas se replicaron a las otras dos locaciones.

Para realizar esto en el software, se coloca la frecuencia a evaluar como se muestra en la figura 4.3 Posteriormente se utilizan las opciones *Trace Options (Peak Hold & Average)* las cuales permiten limitar los puntos más elevados de dicha frecuencia (amplitud) y el promedio de los mismos. Esto se observa en el gráfico final que nos arroja el sistema.

Para la obtención del valor exacto, posicionar el puntero sobre el valor de frecuencia que se está evaluando obteniendo como resultado un cuadro con los datos de: Amplitud en dB, la frecuencia que se está evaluando y el valor Pico.

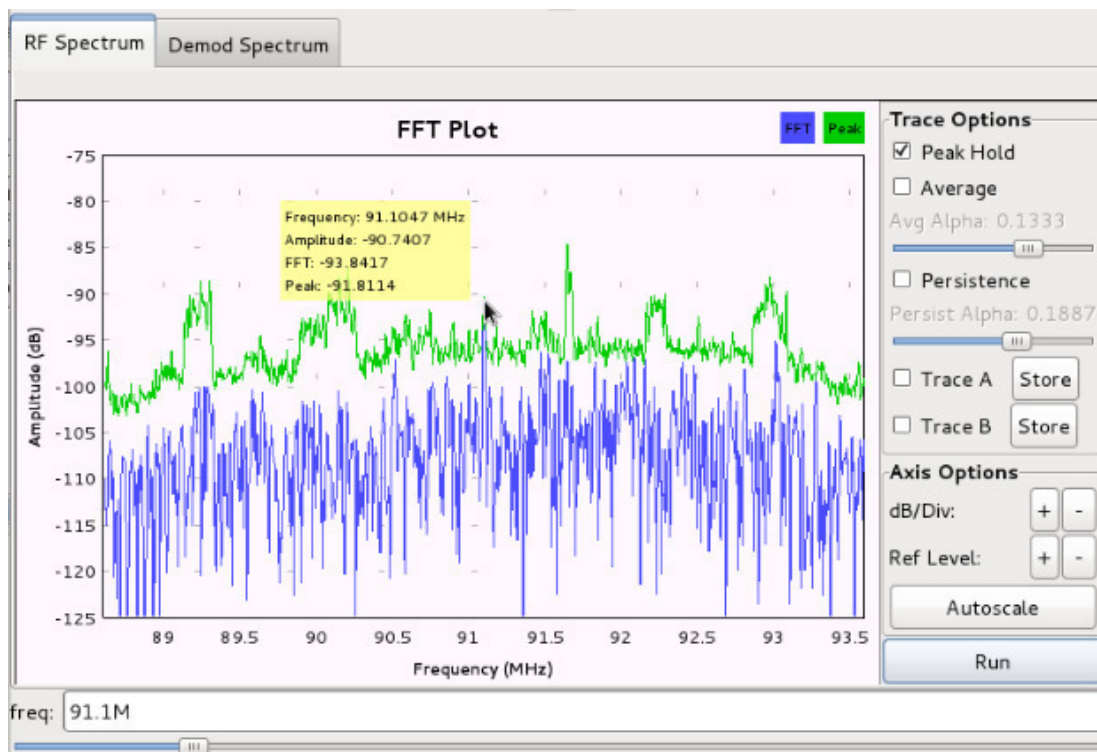


Fig. 4.3. Imagen FFT con Peak Hold y captura de Amplitud. Elaborado por el autor.

De esta forma se repite el proceso mencionado para tomar las mediciones en las zonas elegidas como se muestran en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

Tabla 4.1.

Mediciones realizadas en USMP-FN.

FRECUENCIA	EMISORA	USRP dB	VALOR mW/cm ²
		Amplitud Promedio	
88.5	RIVEREÑA	-88.7815	1.323 e-12
89.1	MODA	-76.953	2.016 e-11
89.7	CALIDAD	-79.793	2.092 e-11
90.3	INSPIRACION	-85.361	2.910 e-12
90.9	TITANIO	-85.0605	3.118 e-12
91.5	ROMANTICA	-74.186	3.814 e-11
92.1	KALIENTE	-80.693	8.525 e-12
92.7	NUEVO TIEMPO	-88.5485	1.397 e-12
93.3	ZONA 5	-88.3165	1.473 e-12
94.1	LA MEGA	-88.598	1.381 e-12
94.9	NOVA	-89.986	1.003 e-12
95.7	FELICIDAD	-83.532	4.434 e-12
96.7	RPP	-80.775	8.365 e-12
97.3	KARIBEÑA	-88.229	1.503 e-12
98.3	STAR	-82.935	5.087 e-12
98.9	LA CALLE	-88.415	1.440 e-12
99.7	SANTA VICTORIA	-87.497	1.779 e-12
100.5	FUEGO	-74.986	3.172 e-11
101.1	PANAMERICANA	-87.281	1.870 e-12
101.7	RADIO NACIONAL	-84.1605	3.836 e-12
102.3	CPN RADIO	-80.665	8.580 e-12
102.9	ESTUDIO 92	-79.0385	1.247 e-11
103.7	ONDA CERO	-89.1005	1.230 e-12
104.3	LA INOLVIDABLE	-74.5005	3.547 e-11
105.1	NUEVA Q	-69.0835	1.234 e-10
105.7	COLONIAL	-87.9955	1.586 e-12
106.3	RADIO MARIA	-80.45	9.015 e-12
106.9	LA EXITOSA	-88.0555	1.564 e-12
107.7	JHC	-88.07	1.559 e-12

Elaborado por el autor.

Tabla 4.2.

Mediciones realizadas en Lima (centro).

FRECUENCIA	EMISORA	USRP dB	VALOR mW/cm ²
		Amplitud Promedio	
88.3	RADIO MAGICA	-85.123	3.073 e-12
88.9	RADIO FELICIDAD	-88.611	1.376 e-12
89.7	RPP	-90.154	9.651 e-13
90.5	RADIO LA ZONA	-92.124	6.131 e-13
91.1	RADIO SAN BORJA	-73.796	4.172 e-11
91.9	OKEY	-82.129	6.124 e-12
92.5	STUDIO 92	-92.006	6.300 e-13
93.1	RITMO ROMANTICA	-88.919	1.282 e-12
93.7	LA INOLVIDABLE	-93.002	5.009 e-13
94.3	LA MEGA	-93.541	4.424 e-13
94.9	KARIBEÑA	-87.685	1.704 e-12
95.5	EXITOSA	-85.987	2.519 e-12
96.1	LA KALLE	-80.586	8.737 e-12
96.7	RADIO CAPITAL	-88.148	1.531 e-12
97.3	MODA	-85.47	2.837 e-12
98.1	ONDA CERO	-90.154	9.651 e-13
99.1	DOBLE NUEVE	-89.691	1.073 e-12
100.1	OASIS	-81.403	7.239 e-12
101.1	PANAMERICANA	-82.901	5.127 e-12
102.1	OXIGENO	-81.358	7.314 e-12
102.7	FILARMONIA	-84.29	3.723 e-12
103.3	UNION	-76.265	2.363 e-11
103.9	NACIONAL	-83.981	3.998 e-12
104.7	VIVA FM	-78.58	1.386 e-11
105.5	RADIO FIESTA	-80.586	8.737 e-12
106.3	RADIO MAR	-74.876	3.253 e-11
107.1	NUEVA Q FM	-80.5	8.737 e-12
107.7	RADIO PANETA	-76.111	2.448 e-11

Elaborado por el autor.

Tabla 4.3.

Mediciones realizadas en Chorrillos.

FRECUENCIA	EMISORA	USRP dB	VALOR mW/cm ²
		Promedio	
88.3	RADIO MAGICA	-91.9	6.456 e-13
88.9	RADIO FELICIDAD	-93.179	4.809 e-13
89.7	RPP	-89.166	1.211 e-12
90.5	RADIO LA ZONA	-89.012	1.255 e-12
91.1	RADIO SAN BORJA	-90.401	9.118 e-13
91.9	OKEY	-89.93	1.026 e-12
92.5	STUDIO 92	-88.24	1.499 e-12
93.1	RITMO ROMANTICA	-90.709	8.493 e-13
93.7	LA INOLVIDABLE	-91.32	7.379 e-13
94.3	LA MEGA	-90.246	9.449 e-13
94.9	KARIBEÑA	-91.79	6.622 e-13
95.5	EXITOSA	-91.38	7.277 e-13
96.1	LA KALLE	-91.481	7.110 e-13
96.7	RADIO CAPITAL	-92.87	5.164 e-13
97.3	MODA	-93.024	4.984 e-13
98.1	ONDA CERO	-91.635	6.862 e-13
99.1	DOBLE NUEVE	-93.178	4.810 e-13
100.1	OASIS	-91.94	6.397 e-13
101.1	PANAMERICANA	-91.9	6.997 e-13
102.1	OXIGENO	-92.024	6.274 e-13
102.7	FILARMONIA	-93.179	4.809 e-13
103.3	UNION	-90.864	8.195 e-13
103.9	NACIONAL	-91.944	6.391 e-13
104.7	VIVA FM	-90.401	9.118 e-13
105.5	RADIO FIESTA	-89.012	1.255 e-12
106.3	RADIO MAR	-90.55	8.810 e-13
107.1	NUEVA Q FM	-90.864	8.195 e-13
107.7	RADIO PANETA	-92.144	6.103 e-13

Elaborado por el autor.

4.4 Resultados obtenidos

Las mediciones en campo realizadas en forma de muestreo para corroborar que el sistema puede ser aplicado en cualquier escenario y denotando el procedimiento a emplear el cual puede ser usado de manera instructiva o como precedente a futuros proyectos.

Como ya se mencionó estas mediciones se realizaron en la ciudad de Chiclayo, en Lima (centro) y en Chorrillos (inmediaciones del Morro Solar); tomando como referencia estos puntos, uno por ser el lugar de investigación del presente proyecto y en el caso del Morro Solar ser el punto con mayor RNI en el país (se realizaron medidas poblacionales en puntos ya tomados por el MTC tal como muestra en la página web: <http://antenasysalud.pe/mediciones/>).

Se tomaron como muestra las 4 emisoras con mayor valor de RNI, tal como se ve en la tabla 4.4.

Tabla 4.4.

Mediciones realizadas con el sistema basado en USRP de RNI en radiodifusión FM comercial.

Frecuencia MHz	Chiclayo (USMP-FN)	Frecuencia MHz	Lima	Frecuencia MHz	Morro Solar
91.5	-74.186 dB	91.1	-73.796 dB	90.5	-89.012 dB
100.5	-74.986 dB	91.9	-82.129 dB	91.9	-89.93 dB
104.3	-74.5 dB	104.7	-78.58 dB	92.5	-88.24 dB
105.1	-69.083 dB	106.3	-74.876 dB	105.5	-89.011 dB

Elaborado por el autor.

Podemos determinar que los resultados obtenidos muestran que ninguna de las emisoras pasa los límites máximos permisibles dados por el MTC, que las mediciones realizadas en las cercanías al Morro Solar son las mayores que se pudieron obtener, que las emisoras en la ciudad de Chiclayo y en la ciudad de Lima son diferentes por ello se tienen diferentes frecuencias como las mayores obtenidas con mayor valor de RNI.

De esta manera se puede demostrar que el sistema implementado es capaz de realizar mediciones de radiaciones no ionizantes para radiodifusión FM comercial usando SDR pudiendo ser usado en el ámbito académico.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN Y APLICACIONES

5.1 Discusión del proyecto

De acuerdo con el sistema desarrollado, se realizará una comparación correspondiente si se logró de acuerdo con los objetivos determinados anteriormente a lo que se deseaba del sistema. Ver tabla 5.1.

Tabla 5.1.

Comparación entre el objetivo general y lo logrado por la implementación del sistema.

OBJETIVO GENERAL	RESULTADO LOGRADO
Implementar un sistema de medición de radiaciones no ionizantes en el rango comercial de radiodifusión FM empleando SDR y una plataforma Universal Software Radio Peripheral (USRP) para fines académicos.	Se logró implementar un sistema que realiza mediciones de RNI para los fines propuestos.

Elaborado por el autor.

5.2 Aplicación del proyecto

La aplicación realizada puede tener relación con otras áreas temáticas las que pueden ser las siguientes:

- Tecnologías de información y comunicaciones: Con la aplicación realizada se podría implementar un sistema completo de monitoreo de RNI y otros parámetros que sean de interés para fines académicos.
- Ciencias Biológicas: Con esta aplicación se podría estudiar los efectos producidos por las RNI para los seres vivos.
- Desarrollo de aplicaciones más portátiles para la medición de RNI con posibles aplicaciones para IOS y Android.
- Aporte para tesis y otros proyectos de investigación.

CONCLUSIONES

1. Se ha demostrado que las radiaciones no ionizantes están presentes en el medio ambiente y se ha estudiado el concepto de las mismas.
2. Se estudió la metodología radio defined software (SDR) y debido a las grandes prestaciones se escogió como plataforma de trabajo para este proyecto. Sin embargo, se determinó que el software GNU-Radio sería la mejor opción de software libre que usa esta metodología.
3. Se logró implementar un sistema de medición de radiaciones no ionizantes (RNI) para la banda comercial FM, empleando la metodología SDR a través de la plataforma USRP y el software libre GNU-RADIO.
4. Se realizaron mediciones de RNI en diferentes locaciones gracias al uso de un sistema que es portable y que no necesita requerimientos complejos para su completa operación.
5. Se ha comprobado que los valores arrojados por las mediciones realizadas indican que las emisoras de radiodifusión FM no superan los valores máximos permitidos.
6. Se ha implementado un sistema que sirve como plataforma de desarrollo para futuras investigaciones de RNI así como para otros proyectos relacionados gracias a su capacidad de personalización y a los constantes aportes que realizan los diferentes colaboradores a nivel mundial.

RECOMENDACIONES

1. Antes de adquirir equipos que puedan tener restricciones con el MTC se debe averiguar si se requiere permisos especiales para el internamiento de los mismos.
2. Se debe prever la importación de estos equipos con anticipación para evitar demoras en el proyecto así como el pago de montos no esperados.
3. Se recomienda investigar información sobre las RNI en los ámbitos nacionales e internacionales.
4. Se recomienda investigar el uso de sistemas operativos Linux y la instalación de programas en este entorno.
5. Se recomienda investigar sobre la tecnología SDR a través del software libre GNU-Radio debido a ser muy versátil y tener usos para diversos proyectos.

FUENTES DE INFORMACIÓN

- [1] Cruz Ornetta, Victor. (2006). *La investigación de las Radiaciones No Ionizantes en el Perú*. Lima, Perú.
- [2] Antenas y Salud. (2015). *MTC Descarta Indicadores elevados de Radiofrecuencia Procedente de Antenas en Chiclayo*. Recuperado de <http://antenasysalud.pe/mtcdescartarnichiclayo/>
- [3] INICTEL. (2012). *Diagnostico nacional de las RNI producidas por los servicios de telecomunicaciones en el Perú*. Lima, Perú. Recuperado de <https://www.osiptel.gob.pe/Archivos/Transparencia/>
- [4] Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Mediciones realizadas de radiaciones no ionizantes*. Lima, Perú. Recuperado de <http://antenasysalud.pe/mediciones/>
- [5] INICTEL. (2009). *OMS: Mitos y verdades sobre las radiaciones no ionizantes*. Lima, Perú.
- [6] Chávez Reyes, J. (2010). *Software Radio y el USRP* (tesis de pregrado). Universidad de las Américas, Puebla, México.
- [7] Montero Hidalgo, J. (2009). *Implementación de un Sistema de Comunicaciones basado el Software Libre* (tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España.
- [8] Kraus, F. (2000). *Electromagnetismo con Aplicaciones*. México D.F; México: McGraw-Hill.
- [9] Ministerio de transportes y telecomunicaciones. (2016). *Registro nacional de frecuencias*. Lima, Perú. Recuperado de <https://rnf.mtc.gob.pe/radiodifusion>

- [10] Barraza Soto, G. (18 de agosto de 2004). Norma Técnica Lineamiento para los Estudios de Radiaciones No Ionizantes. *El Peruano*, pp.274793.
- [11] Iriarte Jiménez, E. (6 de julio de 2003). Establecen Límites Máximos Permisibles de Radiaciones No Ionizantes en Telecomunicaciones. *El Peruano*, pp.247643 - 247647.
- [13] Barraza Soto, G. (19 de agosto de 2004). Norma Técnica Lineamiento para los Estudios de Radiaciones No Ionizantes. *El Peruano*, pp.274822.
- [14] Blossom, E. (2016). *GNU Radio Foundation*. Recuperado de <http://www.comsec.com/>
- [15] Matthias Fahnle, H. (2010). *Software Defined Radio with GNU radio and USRP/2 Hardware Frontend: Setup and FM/GSM Applications* (tesis de pregrado). University of Applied Sciences, Ulm, Alemania.
- [16] Ettus Research. (2016). *GNU Radio Projects*. Texas, EU. Recuperado de <https://www.ettus.com/>
- [17] Free Software Foundation. (2016). *Free Software Resources*. Boston, EU. Recuperado de <https://www.fsf.org/>
- [18] Fedora Project. (2016). *Fedora time line and namas*. New York, EU. Recuperado de <https://getfedora.org/en/>
- [19] Pinar Domínguez, I. (2011). *Comunicaciones Digitales de Radio Definida por Software*. Sevilla, España: Anaya.
- [20] Ettus Research. (2016). *UHD-Linux*. Recuperado de http://code.ettus.com/redmine/ettus/projects/uhd/wiki/UHD_Linux
- [21] Radioing Engineer. (2008). *RF Units Conversion*. Recuperado de <http://www.radioing.com/eengineer/convert.html>
- [22] Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2004). *Formatos de Informes de Estudios Teóricos de Radiaciones No Ionizantes*. Recuperado de <https://www.mtc.gob.pe/comunicaciones/autorizaciones/radiodifusion/>

ANEXOS

a) Datasheet USRP

Ettus Research. (2016). *GNU Radio Projects*. Texas, EU. Recuperado de <https://www.ettus.com/>

De aquí se puede obtener los diversos productos de Ettus Research.

THE USRP SYSTEM

The Universal Software Radio Peripheral (USRP) enables engineers to rapidly design and implement powerful, flexible software radio systems. The intuitive USRP design, coupled with a broad selection of daughter boards covering a wide range of frequencies, helps you to get your software radio up and running quickly. Simply download GNU Radio, a complete open source software radio and signal processing package, and the USRP is ready to use. Once you install the software and plug the USRP into a host computer, it is ready to transmit and receive a virtually limitless variety of signals.

The true value of the USRP is in what it enables engineers and designers to create on a low budget and with a minimum of effort. A large community of developers and users have contributed to a substantial code base and provided many practical applications for the hardware and software. The powerful combination of flexible hardware, open-source software and a community of experienced users makes it the ideal platform for your software radio development.

BENEFITS

- Low cost, flexible platform
- Large community of developers
- Close coupling with the GNU Radio software radio framework forms a flexible and powerful platform



FEATURES

- Four 64 MS/s 12-bit analog to digital converters
- Four 128 MS/s 14-bit digital to analog converters
- Four digital downconverters with programmable decimation rates
- Two digital upconverters with programmable interpolation rates
- High-speed USB 2.0 interface (480 Mb/s)
- Capable of processing signals up to 16 MHz wide
- Modular architecture supports wide variety of RF daughterboards
- Auxiliary analog and digital I/O support complex radio controls such as RSSI and AGC
- Fully coherent multi-channel systems (MIMO capable)

HARDWARE

The USRP can simultaneously receive and transmit on two antennas in real time. All sampling clocks and local oscillators are fully coherent, thus allowing you to create MIMO (multiple input, multiple output) systems.

In the USRP, high sample-rate processing takes place in the field programmable gate array (FPGA), while lower sample-rate processing happens in the host computer. The two onboard digital downconverters (DDCs) mix, filter, and decimate (from 64 MS/s) incoming signals in the FPGA. Two digital upconverters (DUCs) interpolate baseband signals to 128 MS/s before translating them to the selected output frequency. The DDCs and DUCs combined with the high sample rates also greatly simplify analog filtering requirements.

Daughterboards mounted on the USRP provide flexible, fully integrated RF front-ends. A wide variety of available daughterboards allows you to use different frequencies for a broad range of applications. The USRP accommodates up to two RF transceiver daughterboards (or two transmit and two receive) for RF I/O.

Available daughterboards include:

- BasicRX: Receiver for use with external RF hardware
- BasicTX: Transmitter for use with external RF hardware
- LFRX: DC to 30 MHz receiver
- LFTX: DC to 30 MHz transmitter
- TVRX: 50 to 860 MHz receiver
- DBSRX: 800 MHz to 2.4 GHz receiver
- WEX: 50 MHz to 2.2 GHz transceiver
- RFX400: 400-600 MHz transceiver
- RFX900: 750-1050 MHz transceiver
- RFX1200: 1150-1450 MHz transceiver
- RFX1800: 1.5-2.1 GHz transceiver
- RFX2400: 2.3-2.9 GHz transceiver
- XCVR2450: 2.4 GHz and 5 GHz dual-band transceiver

OPEN SOURCE

The entire USRP design is open source, including schematics, firmware, drivers, and even the FPGA and daughterboard designs. When combined with the open source GNU Radio software, you get a completely open software radio system enabling host-based signal processing on commodity platforms. No software or licenses need to be purchased. It provides a complete development environment to create your own radios.

While most often used with GNU Radio software, the USRP is flexible enough to accommodate other options. Some users have created their own SDR environments for the USRP, while others have integrated the USRP into the LabView and Matlab/Simulink environments.

SPECIFICATIONS

Supported Operating Systems

- Linux
- Mac OS X
- Windows XP, Windows 2000
- FreeBSD, NetBSD

Input

Number of input channels: 4 (or 2 I-Q pairs)
Sample rate: 64 Ms/s
Resolution: 12 bits
SFDR: 86 dB

Output

Number of output channels: 4 (or 2 I-Q pairs)
Sample rate: 128 Ms/s
Resolution: 14 bits
SFDR: 83 dB

Auxiliary I/O

High-speed digital I/O: 64 bits
Analog input: 8 channels
Analog output: 8 channels



Tel: +1-650-987-2870
Fax: +1-866-807-9801
1043 N. Shoreline Blvd
Suite 100
Mountain View, CA 94043
sales@ettus.com
www.ettus.com

b) Formulas de conversion

Las formulas descritas a continuación son empleadas para transformar valores de decibeles “dB” a valores de potencia que pueden ser empleados para buscar una semejanza de valores con los diversos métodos de medición en diversas medidas [21].

- Conversión de decibeles: mili watts

$$dBm = 10 \log \left[\frac{\text{señal}(mW)}{1mW} \right] \quad (A.1)$$

*decibeles relativos a un mili watt

- Conversión de potencia

$$dBm = dBw + 30 \quad (A.2)$$

- Densidad de potencia

$$\frac{dBW}{M^2} = 10 \log \left[\frac{V}{M} - \frac{A}{M} \right] \quad (A.3)$$

$$\frac{dBm}{M^2} = \frac{dBW}{M^2} + 30 \quad (A.4)$$

* $10 \log[1000]=30$

- Densidad de potencia por campo eléctrico

$$\frac{dBm}{M^2} = \frac{dBuV}{M} - 115.8 \quad (A.5)$$

*Cambiar esta ecuación a decibelios, convirtiendo: dBW/M² a dBmW/M²

dB: decibel

dBm: decibeles relativos a 1 mili watt

m: mili

dBW: decibeles relativos a 1 watt


V: voltios

A: amperios

M: metro

dBuV: decibeles relativos a 1 micro volt

c) Informe de estudios teóricos de RNI [22].

FORMATO I - INFORME DE ESTUDIOS TEÓRICOS DE RADIACIONES NO IONIZANTES PARA SERVICIOS DE RADIODIFUSIÓN						
						
DATOS DE LA EMPRESA						
Nombre o Razón Social:						
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA ESTACIÓN RADIOELÉCTRICA						
1. TIPO DE SERVICIO						
2. DATOS DE LA PLANTA TRANSMISORA						
Dirección / Ubicación						
Distrito						
Provincia						
Departamento						
Coordenadas Geográficas de la ubicación de la Torre (WGS84)	Longitud Oeste			Latitud Sur		
	Grados	Minutos	Segundos	Grados	Minutos	Segundos
Altitud (msnm)						
3. TRANSMISOR						
Frecuencia de Operación (MHz)			Potencia de Operación (watts) :			
4. SISTEMA RADIANTE						
Tipo de Antena						
Marca						
Modelo						
Ganancia del Arreglo de Antenas en la Dirección de Máxima Radiación (dB)						
Polarización						
Acimut de Máxima Radiación (grados)						
Inclinación del Haz - Tilt (grados)						
Dimensiones de la Antena o del Arreglo (m)						
Altura del Centro de Radiación Respecto al Piso (m)						
Nota: Adjuntar Características Técnicas (anexo I), Diagrama de Radiación Horizontal Polar (anexo II) y Diagrama de Radiación Vertical Cartesiana (anexo III) (deberán ser claros y legibles)						
5. PERDIDAS EN EL SISTEMA						
Pérdidas (Conectores, cables y distribuidor) (dB)						
REFRENDADO POR						
Persona Natural o Jurídica Registrada						
Número de Registro en la DGGT						
Representante Legal						
Firma						
Nota (*): Para el caso del servicio de Radiodifusión Sonora en Onda Media (AM), considerar los Anexos IV y V de los Lineamientos.						