

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
MEDICIÓN DE RADIACIONES NO IONIZANTES PARA SER
MONTADO EN UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO**

Tesis para optar el Título de **INGENIERO ELECTRÓNICO**, que presenta el
bachiller:

Giancarlo Villena Prado

ASESOR: Dr. Manuel Augusto Yarlequé Medina

Lima, diciembre del 2014

RESUMEN

Hoy en día, la creciente demanda de los teléfonos celulares y la gran variedad de compañías proveedoras de servicio móvil han conllevado a un aumento necesario de las estaciones base con el fin de mejorar la calidad de servicio para con los usuarios. Este crecimiento de antenas celulares ha provocado un grado de preocupación y temor en los ciudadanos debido a las ubicaciones en donde se instalan y operan las estaciones base omnipresentes, cada vez más cercana a nuestros hogares. La radiación proveniente de las estaciones base están categorizadas como emisiones no ionizantes, es decir, no tiene suficiente energía para causar ionización de las moléculas o átomos; sin embargo, a modo de precaución, la Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP, por sus siglas en inglés) ha establecido límites máximos que se deben cumplir para garantizar que no se generará algún efecto negativo sobre la salud de la persona. Debido a que en la actualidad, en el mundo, aún se siguen realizando estudios para garantizar la inexistencia de algún tipo de riesgo a la exposición a estos campos electromagnéticos y que en el Perú abunda la informalidad en lo que respecta a la entrega de autorizaciones, control y supervisión de las antenas celulares, crece la incertidumbre sobre los efectos dañinos que podrían ocasionar el convivir en una sociedad rodeada de estaciones base. Por lo tanto, el asunto de estudio se restringe al diseño e implementación de un sistema que permita medir las radiaciones no ionizantes (RNI) de las antenas de telefonía celular con el fin de verificar el cumplimiento de los límites máximos permisibles (LMP's) basados en la ICNIRP y establecidos por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). El diseño se elabora en los rangos de emisión de las bandas de retorno de 850 MHz y 1900 MHz, y se realizaron las pruebas de medición en dos escenarios: a nivel del suelo y montado en un vehículo aéreo no tripulado sobrevolando alrededor de una antena de telefonía celular. También se incluyen otras aplicaciones en las que se utilizan equipos analizadores de radiaciones no ionizantes en las que se podría utilizar el sistema propuesto.

DEDICATORIA

A mi madre por el constante apoyo en toda mi vida universitaria y por estar siempre conmigo en todo momento.

A mi padre por ser mi constante motivación e inspiración y el mejor ejemplo a seguir como profesional y como persona.

A mis hermanos Jhonattan y Jimena porque en ellos quiero ser un buen ejemplo a seguir

A mi abuelito Aquiles, a mi abuelita Angélica, a mi tía Dora y a mi madrina Gladys que han sido un apoyo incondicional durante toda mi vida



AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento singular a mi asesor, el Profesor Manuel A. Yarlequé Medina por el apoyo y la paciencia brindada durante todo el proceso de elaboración del presente trabajo.

Agradecer a las personas que me apoyaron en la elaboración de la tesis, en primer lugar a mis padres Fredy Villena y Maria Prado quienes me dieron vida, educación, apoyo y consejos. A Juan D. David por el apoyo a pesar de estar en mi misma situación académica, a Carlos Saito y a Jorge Barba por el apoyo con las mediciones realizadas en el dron y por último y no menos importante a Melanie Y. Romero quien me apoyo y alentó para continuar en todo momento.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....Error! Bookmark not defined.

CAPITULO 1: PROBLEMÁTICA DE LAS RADIACIONES NO IONIZANTES..... Error! Bookmark not defined.

1.1 INTRODUCCIÓN**Error! Bookmark not defined.**

1.2 DEFINICIÓN DE LAS RADIACIONES.....**Error! Bookmark not defined.**

1.3 CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA DE TELEFONÍA MÓVIL..... **Error! Bookmark not defined.**

1.4 PRINCIPALES ORGANIZACIONES REGULADORAS DE LAS RNI EN EL MUNDO**Error! Bookmark not defined.**

1.4.1 LA ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE SALUD (OMS) **Error! Bookmark not defined.**

1.4.2 LA COMISIÓN INTERNACIONAL PARA LA PROTECCIÓN CONTRA LAS RADIACIONES NO IONIZANTES (ICNIRP) ..**Error! Bookmark not defined.**

1.4.3 ADMINISTRACIÓN ESTADOUNIDENSE DE ALIMENTOS Y FÁRMACOS (FDA)**Error! Bookmark not defined.**

1.4.4 COMISIÓN FEDERAL DE COMUNICACIONES (FCC) – USA..... **Error! Bookmark not defined.**

1.5 ORGANIZACIÓN REGULADORA Y LÍMITES ESTABLECIDOS EN EL PERÚ**Error! Bookmark not defined.**

1.6 PROBLEMAS EXISTENTES DE LA TELEFONÍA CELULAR**Error! Bookmark not defined.**

1.6.1 INFORMALIDAD EN EL PAÍS.....**Error! Bookmark not defined.**

1.6.2 INDICIOS DE POSIBLES ALTERACIONES EN EL METABOLISMO ... **Error! Bookmark not defined.**

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE DE LAS MEDICIONES DE RADIACIONES NO IONIZANTES..... Error! Bookmark not defined.

2.1 INTRODUCCIÓN**Error! Bookmark not defined.**

2.2 ORGANISMOS DE CONTROL Y SUPERVISIÓN DE TELECOMUNICACIONES EN EL PERÚ.....**Error! Bookmark not defined.**

2.2.1 PARÁMETRO REGULADOR: DENSIDAD DE POTENCIA.**Error! Bookmark not defined.**

2.2.2 MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES **Error! Bookmark not defined.**

2.2.2.1 FUNCIONES DE LA ORGANIZACIÓN REGULADORA DEL SECTOR DE COMUNICACIONES	Error! Bookmark not defined.
2.2.2.2 EQUIPOS UTILIZADOS	Error! Bookmark not defined.
2.3 DRIVE TEST	Error! Bookmark not defined.
2.3.1 IMPORTANCIA DE LOS <i>DRIVE TESTS</i>	Error! Bookmark not defined.
2.3.2 EQUIPOS UTILIZADOS.....	Error! Bookmark not defined.
2.4 SISTEMAS STANDALONE	Error! Bookmark not defined.
CAPÍTULO 3: PROPUESTA E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN	Error! Bookmark not defined.
3.1 INTRODUCCIÓN	Error! Bookmark not defined.
3.2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA PROPUESTO...	Error! Bookmark not defined.
3.2.1 ELECCIÓN DEL MODULO DETECTOR DE RADIOFRECUENCIA.....	Error! Bookmark not defined.
3.2.2 MICROCONTROLADOR PARA TODO EL SISTEMA..	Error! Bookmark not defined.
3.2.3 MODULO GPS Y DE ALMACENAMIENTO DE DATA EN UNA MEMORIA MICRO SD.....	Error! Bookmark not defined.
3.2.4 ANTENAS DE BANDA ANGOSTA DEL SISTEMA	Error! Bookmark not defined.
3.3 PROGRAMACIÓN DE LOS MÓDULOS EN ARDUINO.....	Error! Bookmark not defined.
3.4 REQUERIMIENTOS Y ELABORACIÓN DEL PROTOTIPO PARA MONTARLO EN EL HEXACÓPTERO.....	Error! Bookmark not defined.
CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS FINALES ..	Error! Bookmark not defined.
4.1 EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODULO DETECTOR DE RADIOFRECUENCIA.....	Error! Bookmark not defined.
4.2 PRUEBAS DEL SISTEMA REALIZADAS A NIVEL DEL SUELO EN EL CAMPUS DE LA PUCP	Error! Bookmark not defined.
4.2.1 PRUEBA REALIZADA CON LA ANTENA DE RETORNO DE 850 MHZ	Error! Bookmark not defined.
4.2.2 PRUEBA REALIZADA CON LA ANTENA DE RETORNO DE 1900 MHZ	Error! Bookmark not defined.
4.3 PRUEBAS DEL SISTEMA MONTADO EN EL HEXACÓPTERO EN EL CAMPUS DE LA PUCP	Error! Bookmark not defined.

4.3.1 PRUEBA REALIZADA CON LA ANTENA DE RETORNO DE 850 MHZ **Error! Bookmark not defined.**

4.3.2 PRUEBA REALIZADA CON LA ANTENA DE RETORNO DE 1900 MHZ
..... **Error! Bookmark not defined.**

4.4 COMPARACIÓN DE LAS MEDICIONES DEL SISTEMA CON EL SRM-3006
..... **Error! Bookmark not defined.**

4.5 PRESUPUESTO **Error! Bookmark not defined.**

CONCLUSIONES..... **Error! Bookmark not defined.**

RECOMENDACIONES..... **Error! Bookmark not defined.**

BIBLIOGRAFÍA..... **Error! Bookmark not defined.**

ANEXOS



INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico ha causado una exposición cada vez mayor de los seres humanos a radiaciones electromagnéticas de diverso tipo. Hoy en día la encontramos en todos los lugares del mundo; principalmente en diversos equipos que emiten radiaciones (señal de televisión, radio, generada por hornos microondas, unidades de control remoto, etc.).

Estas radiaciones son clasificadas como 'ionizantes' y 'no ionizantes'. Los efectos de la denominada radiación ionizante sobre los seres vivos son bastante bien conocidos (rayos X, rayos gamma, etc.) y existen normas de seguridad para su aplicación. Los efectos sobre la salud de la radiación electromagnética de menor energía, considerada como "no ionizante", han sido menos estudiados y en consecuencia, existe reglamentación insuficiente respecto de las medidas destinadas a disminuir o evitar los posibles efectos adversos sobre la salud [1].

A este grupo de radiaciones no ionizantes pertenecen las señales emitidas por las estaciones bases de telefonía celular, que trabajan alrededor de 800 y 1900 MHz. La exposición a señales de radiofrecuencia producida por estas estaciones bases y la relación con la salud de las personas es un tema controversial y preocupante hoy en día, sobretodo en el sector público.

En el Perú, la empresa que rige las normas técnicas sobre las restricciones radioeléctricas es el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). Uno de los parámetros que usa el MTC como medida de restricción es la densidad de potencia electromagnética (W/m^2). El límite de radiación para antenas de telecomunicaciones es de $2.1 W/m^2$ en una frecuencia de 850 MHz y $4,8 W/m^2$ para una frecuencia de 1950 MHz para una exposición poblacional en áreas de uso público.

Debido a la informalidad existente por parte de algunas compañías de telefonía celular, se dan casos donde las empresas no respetan estos límites establecidos. Por lo tanto, en esta tesis se va a desarrollar un sistema que pueda detectar las radiaciones no ionizantes existentes en el medio ambiente para poder tomar medidas correctivas, enfatizando el rango de operación de la radiación proveniente de las antenas de telefonía celular. El diseño se elabora en los rangos de emisión de las antenas de telefonía celular

(*downlink* o retorno) 869 – 894 MHz para la banda de 850 MHz y de 1930 – 1990 MHz para la banda de 1900 MHz.

El desarrollo de esta tesis implica el diseño del sistema y sus módulos, el análisis y selección del detector de radiofrecuencia que mejor se adecue a los requerimientos (mayor rango de frecuencias, consumo de potencia, peso, etc.); selección del microcontrolador que mejor facilite el control de los dispositivos que se usarán (detector de radiofrecuencia, receptor GPS y módulo de tarjeta microSD), la implementación del sistema, y finalmente la realización de pruebas de validación del sistema montado en un vehículo aéreo no tripulado (hexacóptero). La información se almacenará en una tarjeta de memoria microSD y ésta contendrá la latitud, longitud, altitud, fecha, hora, potencia recibida y la densidad de potencia de cada punto analizado.



CAPITULO 1: PROBLEMÁTICA DE LAS RADIACIONES NO IONIZANTES

1.1 INTRODUCCIÓN

Desde su invención, la telefonía celular ha revolucionado el área de las comunicaciones y ha ido creciendo drásticamente en el mundo causando un gran impacto en la vida de las personas. Tradicionalmente, los teléfonos celulares se mantuvieron fuera del alcance de la mayoría de los consumidores debido a los altos costos involucrados. Como resultado, las compañías proveedoras de servicios invirtieron tiempo y recursos para encontrar nuevos sistemas de mayor capacidad, y por ende, menor costo.

El aumento masivo del uso de celulares en la sociedad, nos ha llevado a reflexionar si este nuevo método comunicativo es positivo o negativo. Actualmente su uso dentro de la población general es un tema de debate mundial por sus posibles efectos sobre la salud. La influencia de las radiaciones electromagnéticas en el organismo, a mediano y largo plazo todavía está siendo estudiado por la OMS (Organización Mundial de la Salud), pero se han reportado casos aislado de lesiones en algunas personas que utilizan con frecuencia este medio de comunicación móvil. [2] La creciente demanda de electricidad, el avance de la tecnología y los cambios de hábitos sociales han generado más fuentes artificiales de campos electromagnéticos, dando lugar a la presencia de radiaciones no ionizantes en el medio ambiente urbano con las que el ser humano convive diariamente, ello ha generado preocupación en la sociedad con respecto a sus efectos sobre la salud.

Hoy en día vemos que el teléfono celular se ha convertido en un dispositivo necesario e indispensable para la humanidad. Este crecimiento ha permitido que empresas realicen negocios en esta área. En el Perú la organización encargada de regularizar, promocionar, ejecutar y supervisar las comunicaciones es el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC).

En la Tabla 1.1 se observa la evolución del número de líneas móviles por empresa en un periodo del año 2010 hasta junio del año 2014. Hasta junio del año 2014, los usuarios de Movistar representaban el 55.8% del mercado total, mientras que los de Claro representaban un 39.5% y finalmente, los de Nextel (ahora Entel) representaban un 4.6% del total del mercado móvil.

EMPRESA	2010	2011	2012	2013	jun-14
CLARO	9,486,305	11,054,014	12,880,912	11,855,181	12,085,719
NEXTEL	1,069,241	1,378,736	1,627,526	1,527,264	1,409,208
MOVISTAR	18,447,245	19,872,705	14,861,964	16,571,403	17,063,821
TOTAL	29,002,791	32,305,455	29,370,402	29,953,848	30,558,748

Tabla 1.1: Líneas de telefonía móvil según empresa operadora

Fuente: Empresas operadoras

Elaboración: OSIPTEL

1.2 DEFINICIÓN DE LAS RADIACIONES

Antes de definir las radiaciones no ionizantes, primero se determinará el significado del término radiación. La radiación es una forma de energía en movimiento, que está presente en nuestro mundo de forma natural o artificial, como se muestra en la Figura 1.2. La radiación de los sistemas de comunicación móviles es de naturaleza electromagnética, por ello el término “campo electromagnético” (CEM) se usa para indicar la presencia de radiación electromagnética.

Los CEM son fenómenos naturales que siempre han estado presentes. Estos campos naturales son de origen magnético (como el producido por el giro del núcleo de hierro de la Tierra) y eléctrico (como el que da lugar en las tormentas). Las ondas electromagnéticas, en particular, son variaciones de los campos eléctrico y magnético que se propagan por el aire atenuándose con la distancia.

Los parámetros más importantes de una onda electromagnética son su amplitud y su frecuencia (Figura 1.1). La amplitud define la potencia de la onda y la frecuencia define el número de ciclos por segundo.

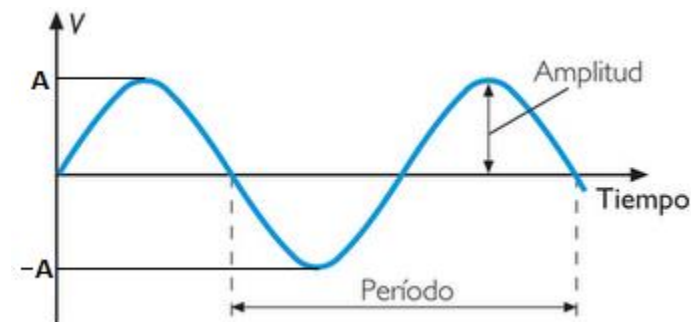


Figura 1.1: Grafica de una onda sinusoidal de voltaje en la cual se visualiza un ciclo y medio de la onda

Fuente: http://rubenmartinimagen.blogspot.com/2011_09_01_archive.html

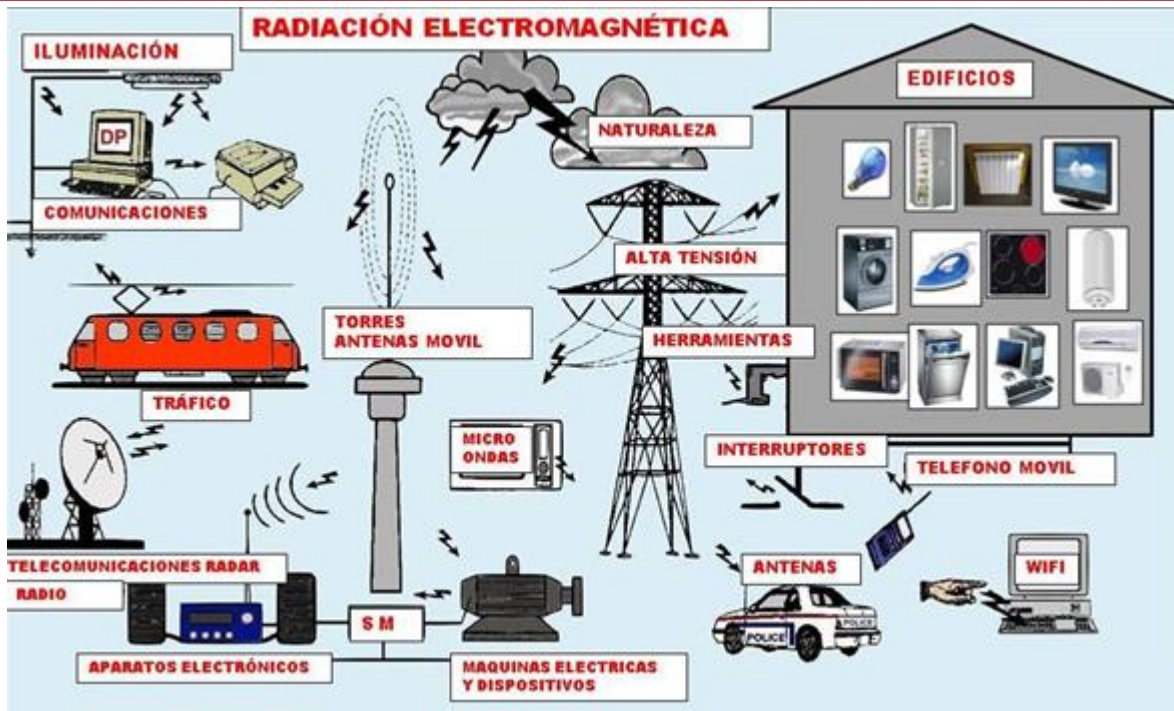


Figura 1.2: Fuentes de exposición a la radiación electromagnética en la vida diaria

Fuente: <http://arquyma.blogspot.com/2013/09/radiaciones-naturales-artificiales-y.html>

Las emisiones electromagnéticas pueden ser de dos tipos, dependiendo de la frecuencia de emisión. En la Figura 1.3 se puede visualizar en el espectro electromagnético la clasificación de las diferentes emisiones existentes en estos dos grupos:

- **Emisiones ionizantes:** Según la OMS, la radiación ionizante es una radiación con la energía suficiente para que, durante una interacción con un átomo, pueda eliminar los electrones fuertemente unidos de la órbita del átomo; haciendo que el átomo se cargue o se ionice [3]. Debido a que este tipo de emisiones son muy estudiados (rayos X, rayos gamma, etc.) y que además no forma parte del desarrollo de la presente tesis; no se entrará a más detalle.
- **Radiación no ionizante (RNI):** La OMS la define como la parte del espectro electromagnético donde hay energía insuficiente para causar la ionización [4]. Este tipo de radiaciones son provocadas por emisiones de baja frecuencia, como aquellas empleadas en sistemas de telefonía móvil, difusión de radio y televisión.



Figura 1.3: Espectro electromagnético

Fuente: http://13100650-lesg.mex.tl/2137936_Espectro-Electromagnetico.html

1.3 CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA DE TELEFONÍA MÓVIL

Las señales de radio son una clase de onda electromagnética que se aplica en las telecomunicaciones y que permite interconectar dos puntos distantes tan lejos como algunos metros (teléfonos inalámbricos) o miles de kilómetros como el caso de los enlaces satelitales. Las radiofrecuencias (RF) incluyen las ondas electromagnéticas emitidas por los transmisores de radio, televisión, telefonía móvil, microondas, comunicaciones satelitales y los radares. También existen ondas de radio que no son utilizadas en telecomunicaciones las cuales se encuentran en aplicaciones médicas como la resonancia magnética, la diatermia y aplicaciones domésticas como los hornos microondas [5]

En lo que respecta a la telefonía móvil, esta opera bajo el principio de la red celular, la cual subdivide su cobertura en áreas más pequeñas llamadas células o celdas, que tienen como elemento central a las estaciones bases (BTS). Estas BTS son instalaciones fijas que se interconectan con los teléfonos móviles mediante ondas electromagnéticas de radiofrecuencia. También es necesario que las BTS se comuniquen con las centrales de sus propias redes para comunicarse con otros abonados móviles y con las centrales de telefonía fija para interconectar a los abonados móviles con los abonados de telefonía fija, lo cual también se realiza utilizando campos electromagnéticos; por lo tanto las personas en las cercanías tanto del teléfono como de la estación base son sometidas a exposición por radiaciones electromagnéticas (radiaciones no ionizantes). Las antenas de telefonía celular o estaciones base, son montadas sobre torres, postes o distribuidas en las azoteas de los edificios o casas.

Las transmisiones de las estaciones base y de los teléfonos no alcanzan una distancia más allá de una célula. Es por esto que en la Figura 1.4 se observa que en cada celda adyacente se pueden reutilizar las mismas frecuencias sin interferir unas con otras (rango de frecuencias interpretadas por los colores de las células). [6]

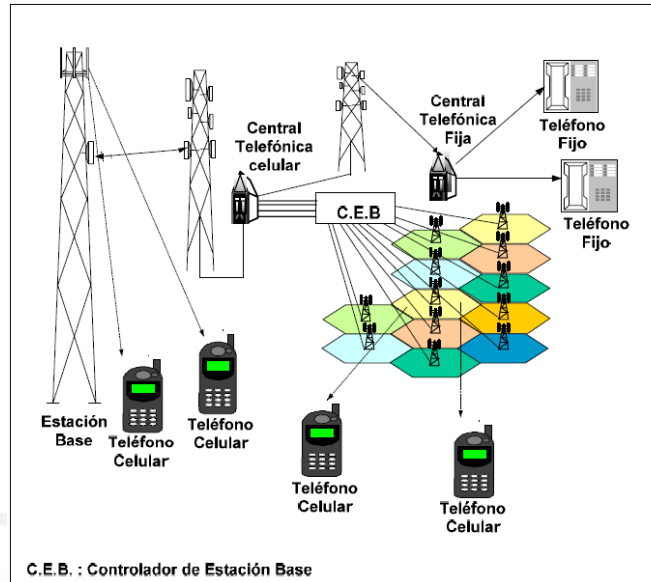


Figura 1.4: Diagrama simplificado de un Sistema de Telefonía Móvil Celular

Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos40/antenas-telefonía-movil/antenas-telefonía-movil2.shtml>

Las estaciones base utilizan antenas omnidireccionales y sectoriales para la comunicación con los teléfonos móviles o radios; pero también en algunos casos en forma alternativa a los enlaces por fibra óptica se utilizan antenas parabólicas para el radioenlace que servirá como sistema de transporte de la información entre estación base y la central de telecomunicaciones móviles (Figura 1.5).



Figura 1.5: Estación base ubicada en el campus de la PUCP

Fuente: Elaboración propia

Las antenas omnidireccionales se caracterizan por emitir señales en todas las direcciones en el plano horizontal, y un ancho de haz vertical de entre 7° a 9° , tal y como se observa en la Figura 1.6. Su ganancia va desde los 2 a 12 dBi, con una ganancia típica de 8 dBi en sistemas GSM (*Global System for Mobile Communications*). Se caracterizan por tener gran cobertura de radiación, pero manejan una baja capacidad de tráfico, normalmente se utilizan en la etapa inicial de la expansión de la estación base o en zonas rurales.

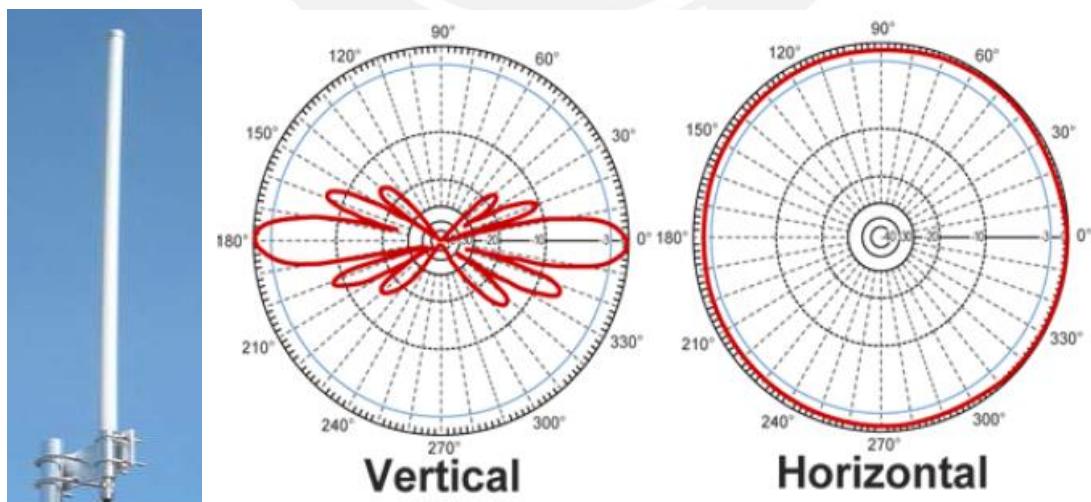


Figura 1.6: Antena omnidireccional y sus patrones de radiación

Fuente: http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb2009/pb2009_004.pdf

Las antenas sectoriales son altamente utilizadas en sistemas de telefonía móvil debido a que su patrón de radiación (Figura 1.7) se acopla perfectamente a la forma geométrica de las células. Se utilizan generalmente con una abertura de 120° por lo que se necesita de tres antenas para cubrir todo el espacio. Irradian su lóbulo principal con una apertura vertical de ± 10 grados y de 60° a 120° de apertura horizontal, más muchos lóbulos secundarios. [7][8]

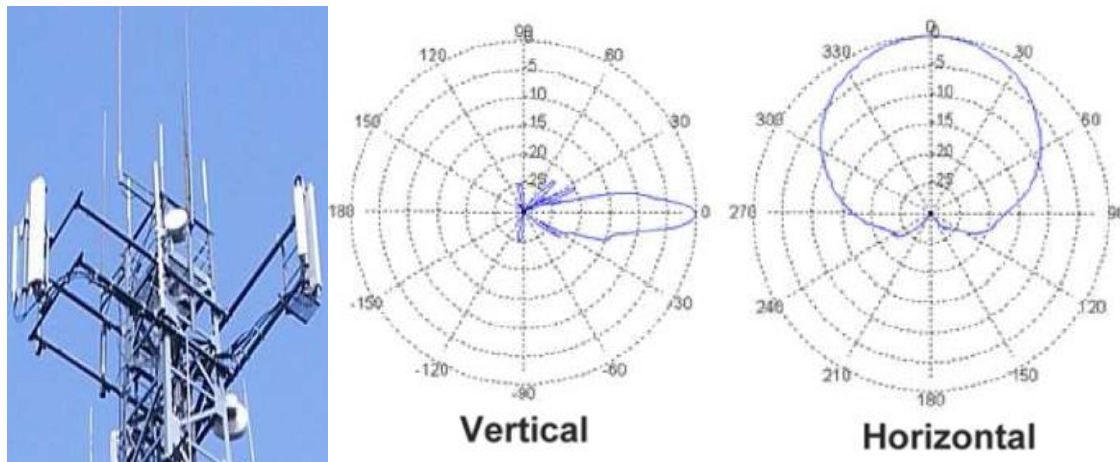


Figura 1.7: Antena sectorial y sus patrones de radiación

Fuente: http://ie.ucl.ac.cr/uploads/file/proybach/pb2009/pb2009_004.pdf

1.4 PRINCIPALES ORGANIZACIONES REGULADORAS DE LAS RNI EN EL MUNDO

La preocupación del público no es sólo a nivel nacional, sino también a nivel mundial. Esto ha dado lugar a la que las organizaciones nacionales e internacionales vinculadas a las telecomunicaciones, monitoreen e investiguen temas relacionados con la exposición a la RF. A continuación se describirán las principales actividades realizadas de las más importantes organizaciones reguladoras a nivel mundial.

1.4.1 LA ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE SALUD (OMS):

La OMS es la autoridad directiva y coordinadora de la acción sanitaria en el sistema de las Naciones Unidas. Es la responsable de desempeñar una función de liderazgo en los asuntos sanitarios mundiales, configurar la agenda de las investigaciones en salud, establecer normas, articular opciones de política basadas en la evidencia, prestar apoyo técnico a los países y vigilar las tendencias sanitarias mundiales [9]. En respuesta a la preocupación pública por los posibles efectos adversos a la salud que

podrían producir las radiaciones electromagnéticas, la OMS inicio en 1996 el proyecto internacional sobre los campos electromagnéticos (CEM). Dicho proyecto tiene como objetivos principales: [10]

- Dar una respuesta internacional y coordinada a las inquietudes que suscitan los posibles efectos sanitarios de la exposición a los CEM.
- Evaluar las publicaciones científicas, y elaborar informes de actualidad sobre los efectos sanitarios.
- Incorporar resultados de las investigaciones en monografías de la serie “criterios de salud ambiental” de la OMS, en las que se evaluarán metódicamente los riesgos sanitarios de la exposición a los CEM.
- Facilitar el desarrollo de normas internacionalmente aceptables sobre la exposición a los CEM.
- Asesorar a las autoridades nacionales y de otros ámbitos sobre los efectos sanitarios y ambientales de los CEM, y sobre las eventuales medidas o actuaciones de protección necesarias.

1.4.2 LA COMISIÓN INTERNACIONAL PARA LA PROTECCIÓN CONTRA LAS RADIACIONES NO IONIZANTES (ICNIRP): [11]

La ICNIRP es un grupo independiente de expertos establecido en 1992 que tiene como objetivo proteger a las personas y el medio ambiente contra los efectos adversos de las radiaciones no ionizantes (RNI). Con este fin, la ICNIRP elabora y difunde consejos de base científica sobre la limitación de la exposición a las RNI. Expertos de diferentes países y disciplinas como la biología, la epidemiología, la medicina, la física y la química, trabajan en conjunto con la ICNIRP para evaluar el riesgo de exposición a las RNI y proporcionan asesoramiento y orientación científica sobre los efectos en la salud y el medio ambiente de este tipo de radiaciones (RNI) para proteger a las personas y el medio ambiente de la exposición RNI perjudicial.

Las recomendaciones de la ICNIRP son las de mayor aceptación en el mundo, siendo la base de las normativas nacionales en distintos países tales como Australia, Brasil, Chile, Nueva Zelanda, Perú, la Unión Europea, Venezuela, entre otros; y de instituciones como la Organización Internacional del Trabajo (OIT) y la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). Además las recomendaciones de la ICNIRP son aconsejadas

por la OMS como las normas internacionales a ser utilizadas por los países para la limitación de las RNI.

1.4.3 ADMINISTRACIÓN ESTADOUNIDENSE DE ALIMENTOS Y FÁRMACOS (FDA):

La FDA es una organización responsable de proteger la salud pública asegurando la seguridad, la eficacia y la certeza de los medicamentos humanos y veterinarios, productos biológicos, dispositivos médicos, cosméticos y productos que emiten radiación. Esta entidad pertenece al “grupo de trabajo interinstitucional de radiofrecuencia (RF)”. Las agencias federales de este grupo tienen responsabilidad en distintos aspectos de la seguridad de la RF y trabaja para garantizar la coordinación de esfuerzos a nivel federal [12]. Según la ley, la FDA no revisa la seguridad de productos de consumo que emiten radiación, como los teléfonos móviles y dispositivos inalámbricos similares antes de que puedan venderse, tal y como lo hace con los nuevos medicamentos o dispositivos médicos. Sin embargo, la FDA tiene la autoridad para tomar medidas si se demuestra que los teléfonos móviles emiten energía de radiofrecuencia a un nivel que sea peligroso para el usuario. En tal caso, la FDA podría exigir a los fabricantes de teléfonos móviles para informar a los usuarios sobre el peligro a la salud y reparar, reemplazar o devolver los teléfonos y/o equipos similares para que el peligro ya no exista. [13]

1.4.4 COMISIÓN FEDERAL DE COMUNICACIONES (FCC) – USA [14]:

Otra organización que se encuentra dentro del grupo de trabajo interinstitucional de radiofrecuencia es la FCC, la cual se encarga de regular las comunicaciones interestatales e internacionales por radio, televisión, cable y satélites en todos los cincuenta estados de los Estados Unidos. En 1996, la FCC adoptó guías actualizadas para la evaluación de la exposición humana a los campos RF de antenas transmisoras fijas, tales como los utilizados para los celulares. Las guías de la FCC son idénticas a las recomendadas por el Consejo Nacional de Protección y Medición de Radiación (NCRP), una corporación sin fines de lucro el cual desarrolla información y las recomendaciones relativas a la protección radiológica.

1.5 ORGANIZACIÓN REGULADORA Y LÍMITES ESTABLECIDOS EN EL PERÚ

De acuerdo a los estudios que vienen realizando la OMS y las demás entidades, presentadas líneas arriba, a la fecha, no existe evidencia de que la exposición a las radiaciones que emiten las antenas de telefonía móvil, cause un daño a la salud. Sin

embargo, en el 2011, la Agencia para la Investigación sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés), un organismo que pertenece a la OMS, clasificó dicha radiación en la categoría 2 b de acuerdo a la lista de agentes carcinógenos en humanos [15]. Por ello en base al principio de precaución, los países han adoptado medidas a fin de cautelar de manera preventiva la salud de la población.

En el Perú, desde el año 2003, se adoptó la recomendación de la ICNIRP para el rango de frecuencias entre 9 kHz y 300 GHz, la cual, bajo el Decreto Supremo N°038-2003-MTC del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, se establece los límites máximos permisibles de radiaciones no ionizantes para las actividades de telecomunicaciones en todo el territorio del país. Adicionalmente, el ministerio aprobó normas técnicas complementarias, que entre otras, establecen disposiciones para la presentación de estudios teóricos a los que están sujetos quienes instalen las antenas, así como la regulación del procedimiento de supervisión y control, y la forma de medición de las radiaciones que emiten las antenas. [16]

Para efectos de la aplicación de dicho decreto supremo, se entenderá como actividades de telecomunicaciones la instalación, operación, importación, fabricación, distribución, comercialización y venta de equipos de telecomunicaciones. Los LMP de las RNI se dividen en dos grupos:

- a) **Para 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 exposición, y pueden ejercer el control sobre el mismo. Estos límites también se aplican cuando sus niveles están sobre los límites poblacionales, con tal que la persona expuesta esté enteramente consciente del potencial de exposición y pueda ejercer el control abandonando el área o por algún medio conveniente.

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 x f ^{0.5}	0.008 x f ^{0.5}	f/40
2 - 300 GHz	137	0.36	50

Tabla 1.2: Límites máximos permisibles para una exposición ocupacional

Fuente: Elaboración propia

- b) **Para exposición poblacional:** Se aplica para el público en general, cuando las personas expuestas, como consecuencia de su ocupación, podrían no estar conscientes del potencial de la exposición o no puedan 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.

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 x f ^{0.5}	0.0037 x f ^{0.5}	f/200
2 - 300 GHz	61	0.16	10

Tabla 1.3: Límites máximos permisibles para una exposición poblacional

Fuente: Elaboración propia

En el año 2005, el MTC aprueba la norma técnica sobre restricciones radioeléctricas en áreas de uso público cuya finalidad es la de establecer restricciones en los niveles de intensidad de campo eléctrico y densidad de potencia por la operación de estaciones radioeléctricas de los servicios de telecomunicaciones en áreas de uso público. En dicha norma, se considera áreas públicas como lugares definidos por la administración en los que se considera que la población expuesta podría ser sensible a los campos electromagnéticos. Estos lugares son:

- Colegios de educación inicial, primaria y secundaria.

- Hospitales, centros de salud y clínicas.

Los titulares de concesiones y autorizaciones vigentes adoptaran las medidas necesarias a efectos de garantizar que las radiaciones que emitan sus estaciones radioeléctricas, dentro de las áreas de uso público, no excedan los siguientes valores:

Rango de frecuencias	Intensidad de campo eléctrico (V/m)	Densidad de potencia (W/m ²)
9 – 150 KHz	61.5	-
0.15 – 1 MHz	61.5	-
1 – 10 MHz	$61.5/f^{0.5}$	-
10 – 400 MHz	20	1
400 – 2000 MHz	$0.9721 \times f^{0.5}$	$f/400$
2 – 300 GHz	43.1	5

Tabla 1.4: Límites máximos permisibles en áreas de uso público

Fuente: Elaboración propia

Para efectos de la presente tesis, se considerará los límites para una exposición poblacional en áreas de uso público en el rango de 400 – 2000 MHz, ya que dentro de ese rango operan la operadoras de telefonía celular.

1.6. PROBLEMAS EXISTENTES DE LA TELEFONÍA CELULAR

Como se ha podido visualizar en las Tabla 1.1 (elaboradas por el OSIPTEL), el Perú cuenta con más de 30 millones de teléfonos móviles, y debido a esta gran demanda, los operadores se ven en la necesidad de incrementar las estaciones bases, con la finalidad de aumentar la cobertura, adecuarse a la tecnología actual y mejorar la calidad de servicio. Este aumento de estaciones base origina cierto grado de preocupación de la población por los posibles daños que podría ocasionar, a la desinformación y sobre todo a los intereses políticos. A continuación se describirán dos aspectos negativos existentes en el campo de la telefonía celular.

1.6.1 INFORMALIDAD EN EL PAÍS

Para la instalación de infraestructura necesaria para la prestación de servicios públicos de telecomunicaciones, los operadores deberán obtener, según la Ley 29022, las respectivas autorizaciones ante las entidades de la administración pública competentes. [17]. El operador debe solicitar la autorización de la municipalidad del distrito (entidad de la administración pública) a instalar y una concesión para prestar servicios de telecomunicaciones al Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Estas entidades de la

administración pública no pueden otorgar el permiso de construcción sin que se entregue una copia de la resolución emitida por el MTC mediante la cual se otorga concesión al operador para prestar el servicio público de telecomunicaciones. Si antes de obtener la respectiva autorización, el operador iniciara las obras para la instalación de su infraestructura, la entidad de la administración pública competente podrá disponer la paralización inmediata de los trabajos y el desmontaje y/o retiro de lo instalado y de los materiales, y además de la aplicación de las sanciones administrativas correspondientes (multas). Sin embargo, muchas empresas no respetan estas normas y para acelerar el proceso y evitar multas, realizan la instalación de sus antenas de telefonía celular camufladas. Muchas empresas optan por utilizar diversos métodos de camuflaje para eludir las autoridades como los que se observa en la Figura 1.8. Ahora, debido a que en los últimos 15 años, el número de celulares se ha multiplicado por diez, se requerirá un aumento del número de antenas para que no haya problemas de calidad en el servicio. El MTC junto con OSIPTEL pronosticó que para asegurar una buena cobertura de red se necesitaran aumentar de las 8 mil a casi 22 mil antenas para el 2016 [18]. Distintos medios de comunicación en el Perú han realizado diversos reportajes con respecto a estas antenas camufladas, e incluso han llegado a realizar mediciones de densidad de potencia para verificar el cumplimiento de los LMP dentro de los departamentos que están a una altura cercana a estas antenas. El reportaje realizado por el programa Panorama en octubre del 2013 muestra valores de densidad de potencia mayores a 6 W/m^2 , el cual está muy por encima del límite permisible. [19]. Si bien es cierto el Ministerio de Transportes y Comunicaciones y el Ministerio del Ambiente tienen registros de las mediciones realizadas en las supervisiones rutinarias, cabe resaltar que son realizadas a nivel del suelo.



Figura 1.8: Reportajes del Perú sobre la informalidad de las antenas de telefonía celular

Fuentes: <https://www.youtube.com/watch?v=QDm361nlyqI> y <http://bunkerphone.com/>

1.6.2 INDICIOS DE POSIBLES ALTERACIONES EN EL METABOLISMO

Si bien es cierto no está demostrado la relación causa - efecto de la radiación de antenas celulares y cáncer; sin embargo, existen informes del Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) y de otras entidades que indican efectos secundarios y hasta incluso una posible relación con el cáncer.

Los científicos saben que la radiación RF tiene la capacidad de causar daños biológicos a efectos de calentamiento. La radiación de radiofrecuencia puede afectar el cuerpo humano porque el cuerpo humano se compone de aproximadamente 65 a 70% de agua, electrolitos e iones. La molécula de agua es una molécula polar que tiene cargas positivas y negativas separadas por un dipolo. El cuerpo humano posee un campo electromagnético débil y cada una de sus células tiene su propio campo electromagnético. Los campos electromagnéticos débiles como la radiación de radiofrecuencia emitida por teléfonos móviles van a interactuar con el cuerpo humano y van a afectar sus campos electromagnéticos, interfiriendo así el proceso natural del cuerpo de curación. Los campos electromagnéticos propios del cuerpo humano son esenciales para la salud, reparación de células, la reproducción y la replicación del ADN (ácido desoxirribonucleico). La radiación electromagnética y eléctrica puede causar el desplazamiento de electrolitos y los iones dentro del cuerpo y a su vez interferir el sistema neurológico del cuerpo y el mantenimiento de la homeostasis del sistema. [20] A continuación se describirán algunos de estos efectos que provocaría la exposición a la radiación electromagnética de la telefonía celular:

La radiación de radiofrecuencia emitida por teléfonos móviles tiene efectos en la salud humana que puede ser categorizada como térmica, no térmica, genotóxico, aumento de probabilidad de contraer un tumor cerebral y síntomas no específicos [21]. Las quejas de síntomas no específicos realizadas por los usuarios de teléfonos móviles son: dolores de cabeza, dolores de oído, visión borrosa, pérdida de la memoria a corto plazo, adormecimiento, sensación de ardor, comezón, dificultad para dormir, agotamiento, hipersensibilidad electromagnética y ansiedad al utilizar el teléfono móvil. Los experimentos realizados en STUK (radiación y autoridad de seguridad nuclear) han producido también indicadores de que la radiación móvil podría causar cambios temporales en las funciones de las células. Estas funciones incluyen las funciones de los genes, la activación de las proteínas y la comunicación química interna dentro de las células. [22]

En otro estudio clínico llevado a cabo por el Instituto Karolinske de Suecia y la Universidad Estatal de Wayne en los EE UU., los autores sugirieron que los efectos adversos en la calidad del sueño son causados por la radiación. La hipersensibilidad electromagnética ocurre en algunos usuarios de teléfono móvil que reportaron sentir varios síntomas inespecíficos tales como ardor y picazón en la piel de la cabeza, cansancio, trastornos del sueño, mareos, pérdida de atención mental, tiempo de reacción, pérdida de la memoria a corto plazo, dolor de cabeza, depresión y alteraciones del aparato digestivo [22]

La IEEE, ha realizado diversas mediciones en ciudades como Nigeria y Malaysia en donde existe una gran concentración de antenas celulares con resultados muy por debajo de los LMP según la ICNIRP [23]. En Nigeria las radiaciones de los sistemas GSM son campos de microondas débiles cuyos efectos sobre la salud biológica son principalmente no térmicos. El efecto no térmico de baja intensidad que se encuentra asociado con más persistencia es el dolor de cabeza. La radiación de campo medido no tiene suficiente energía para romper los enlaces químicos en el ADN. La radiación de los sistemas GSM en Nigeria es seguro si solo consideráramos el efecto térmico. Los efectos adversos de salud no deberían basarse únicamente en el efecto que puede causar la muerte. Para disfrutar una calidad de vida aceptable no solo requiere la ausencia de una enfermedad terminal. [24]

En Chile, se realizó un informe en el cual se describen los efectos para las diferentes clases y fuentes de radiación electromagnética no-ionizante. Con respecto a la radiación electromagnética proveniente de las estaciones base de telefonía celular, menciona que aun cuando las normas aceptadas no sean excedidas y por lo tanto, no se produzcan los efectos térmicos sobre las personas expuesta, es necesario considerar la existencia de efectos no térmicos, producidos con intensidades mucho más bajas de radiación, cuyos efectos crónicos o diferidos solo podrán ser detectados por estudios epidemiológicos en el largo plazo. Entre los efectos que sustenta podrían ocasionar son: diversas formas de cáncer, esclerosis lateral amiotrófica, enfermedad de alzhéimer, asma bronquial, enfermedades alérgicas, aumento de incidencia de abortos, dermatitis, electrosensibilidad, alteraciones neuroconductuales, cardíacas y endocrinas. [1]

En el Perú, el diario El Comercio publicó en el 2013 un informe de un estudio que relaciona el uso de los celulares con la aparición del cáncer. Dicho estudio fue realizado por científicos israelíes y publicado en la revista "Antioxidants and Redox Signaling". El

equipo realizó un estudio comparativo entre usuarios regulares de teléfonos celulares y no usuarios de estos equipos. Debido a que el aparato celular se coloca a la altura de la glándula salivar durante las llamadas efectivas, se evaluó la saliva de ambos grupos participantes para encontrar posibles alteraciones. Como resultado el grupo de usuarios tenía un aumento significativo en los resultados de las pruebas que median el estrés oxidativo, en comparación con el grupo de no usuarios. El estrés oxidativo daña ciertos aspectos de la célula humana, e incluso, puede generar la modificación del ADN. Y como su daño está relacionado con mutaciones celulares y genéticas, promueve la formación y desarrollo de tumores malignos. [25]

Sin duda el entorno de radiación electromagnética muestra una tendencia de aumento en el nivel actual de radiación global. Sin embargo, la situación en todo el mundo no es equilibrada. La IEEE ha investigado y analizado la contaminación ambiental de radiación de la región en algunas ciudades de China y de Alemania con el fin de comparar dos culturas distintas. Muchas de las estaciones base de Alemania poseen un número menor de antenas y las mediciones de potencia de señal son muy bajas alrededor de ella. Incluso la frecuencia de uso del teléfono móvil de los alemanes es baja. Por otro lado, en China, se tiene un mayor número de estaciones base en sus ciudades, una mayor frecuencia de uso de teléfonos móviles y por ende una mayor cantidad de potencia alrededor de sus estaciones. Incluso el miedo y la preocupación de los ciudadanos alemanes por la radiación electromagnética parece ser indiferente, ya que las estaciones base no se encuentran instaladas a gran altura. Según las mediciones realizadas en ambos países, la amplitud de la potencia de la señal transmitida de las estaciones de Alemania no es demasiado alta, lo cual repercute en la baja cobertura; mientras que en China posee una cobertura sin fisuras. [26]

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE DE LAS MEDICIONES DE RADIACIONES NO IONIZANTES

2.1 INTRODUCCIÓN

En lo que respecta las radiaciones no ionizantes, existen diversas entidades y/u organizaciones que realizan mediciones de las RNI como parte de su labor diaria. En el presente capítulo se enfocará a detallar tres aplicaciones en las que es necesario el uso de un equipo que permita medir el nivel de potencia electromagnética existente en el medio ambiente.

Una de las principales razones que amerita el uso de un sistema que mida las emisiones no ionizantes es debida a los problemas existentes en la telefonía celular descritos en el capítulo anterior. La ICNIRP publicó en 1988 un documento de los límites de exposición a los campos electromagnéticos de radiofrecuencia en el rango de frecuencia de 100 kHz hasta 300 GHz. El documento está destinado a proporcionar un trabajo o ambiente de vida saludable a la exposición de campos de radiofrecuencia bajo todas las condiciones normales [27]. A partir de aquí, muchos países tomaron como referencia a esta institución y adecuaron sus normas en base a sus límites. Los límites de exposición son los límites en los que un individuo está protegido contra los peligros físicos directos, así como los efectos biológicos adversos. Los efectos de la exposición a los campos electromagnéticos en los seres humanos no solo dependen de la frecuencia de los campos, sino también, de la duración de la exposición, las intensidades de campo, la polarización de los campos y las características del cuerpo humano. [28].

Otra aplicación, muy utilizada por las empresas operadoras, es el *drive test*. En este caso se utilizan equipos que miden los niveles de señal que registran los equipos móviles, es decir, la potencia con la que se conectan estas estaciones móviles (MS) con la finalidad de medir optimizar el performance de la red móvil.

Finalmente, una aplicación que recientemente está siendo utilizado en diversos países son los sistemas *standalone* o punto de sensado fijo de las RNI. A continuación se detallaran las aplicaciones descritas.

2.2 ORGANISMOS DE CONTROL Y SUPERVISIÓN DE TELECOMUNICACIONES EN EL PERÚ

En nuestro país la entidad encargada de realizar investigaciones y estudios respecto a este tema es el Instituto de Investigación y Capacitación en Telecomunicaciones (INICTEL-UNI), así mismo, es el Ministerio de Transportes y Comunicaciones la entidad encargada de realizar mediciones con el objetivo de verificar el cumplimiento de los límites máximos permisibles de radiaciones no ionizantes. Estos parámetros tope que utiliza el MTC son: Intensidad de campo eléctrico (V/m), intensidad de campo magnético (A/m) y densidad de potencia (W/m^2). Para las pruebas de funcionamiento del sistema de la presente tesis, se verificará que se respeten los límites máximos permisibles de densidad de potencia.

A continuación se definirá el parámetro regulador a utilizar en la presente tesis. También se describirá la organización encargada del control y la supervisión de las estaciones base de telefonía móvil, así como también sus equipos utilizados.

2.2.1 PARÁMETRO REGULADOR: DENSIDAD DE POTENCIA

La densidad de potencia es la cantidad de energía EM distribuida sobre una unidad de área determinada perpendicular a la dirección de desplazamiento. La densidad de potencia se expresa en vatios por metro cuadrado (W/m^2) o milivatios por centímetro cuadrado (mW/cm^2) [29]. La densidad de potencia se calcula a partir de la ecuación (2.2.a):

$$Pr = S * Ae \quad (2.2.a)$$

$$Pr = S \times \frac{\lambda^2}{4\pi} \times 10^{\frac{G}{10}} \quad (2.2.b)$$

$$S = \frac{4\pi \times Pr}{\lambda^2 \times 10^{\frac{G}{10}}} \quad (2.2.c)$$

$$S = \frac{Pr \times 4\pi}{\left(\frac{3 \times 10^8}{f}\right)^2 \times 10^{\frac{G}{10}}} \quad (2.2.d)$$

En donde:

Ae: Área efectiva de la antena (m^2)

S: Densidad de potencia (W/m^2)

Pr: Potencia recibida (W)

G: Ganancia de la antena (dBi)

f: Frecuencia de operación (Hz)

2.2.2 MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES

En el Perú, en julio del año 2002 se aprobó la separación del sector de transportes y comunicaciones del sector vivienda y construcción, y se establecieron 15 ministerios entre los que figuraba el Ministerio de Transporte y Comunicaciones, cuya función es integrar interna y externamente al país, para lograr un racional ordenamiento territorial vinculado a las áreas de recursos, producción, mercados y centros poblados, a través de la regulación, promoción, ejecución y supervisión de la infraestructura de transportes y comunicaciones. [30]

Los objetivos específicos del ministerio son los siguientes:

- a) Promover o proporcionar infraestructura vial, aérea y acuática adecuada, así como velar por que los servicios de transporte se brinden de manera eficiente, segura y sostenible.
- b) Promover el desarrollo sostenible de los servicios de comunicaciones y el acceso universal a los mismos; fomentar la innovación tecnológica y velar por la asignación racional y el uso eficiente de los recursos.

2.2.2.1 FUNCIONES DE LA ORGANIZACIÓN REGULADORA DEL SECTOR DE COMUNICACIONES

La dirección general de control y supervisión de telecomunicaciones es un órgano de línea del subsector comunicaciones y tiene por objetivo fortalecer los mecanismos de supervisión y control en la prestación de los servicios y actividades de telecomunicaciones, en el ámbito de competencia del ministerio. Dicha organización tiene a su cargo la fiscalización del cumplimiento de los límites máximos de las radiaciones que emiten las antenas de radiocomunicaciones. Tiene las siguientes funciones [31]:

- a) Controlar el correcto uso del espectro radioeléctrico.

- b) Supervisar el cumplimiento de las condiciones establecidas en los contratos de concesión y autorizaciones para la prestación de servicios de telecomunicaciones.
- c) Evaluar, determinar y aplicar sanciones relacionadas con los servicios y actividades de telecomunicaciones en el ámbito de su competencia.
- d) Proponer y ejecutar políticas y estrategias de telecomunicaciones, en el ámbito de su competencia.
- e) Adoptar las medidas cautelares a quien hubiera lugar.
- f) Administrar y mantener operativa la infraestructura de control del espectro.
- g) Proponer y aprobar las normas técnicas y directivas necesarias para las actividades de control, supervisión y aplicación de sanciones.
- h) Homologar los equipos y aparatos de telecomunicaciones y emitir los certificados correspondientes.
- i) Expedir resoluciones directorales que por atribución y responsabilidad correspondan a la dirección general.
- j) Las demás funciones que le asigne el viceministro de comunicaciones, en el ámbito de su competencia.

2.2.2.2 EQUIPOS UTILIZADOS

A continuación, se realizará una breve descripción de algunos de los equipos que se utilizan para realizar las medidas de supervisión y control de las estaciones base de las operadoras de telefonía celular. Estos equipos se pueden clasificar en cuatro grupos según sus características; cabe resaltar que estos equipos cuentan con sus certificados de calibración emitidos por los laboratorios de *NARDA Safety Test Solutions* en Alemania. Esta certificación garantiza la exactitud y calidad de las mediciones realizadas. [32]

- 1) **Analizadores de Campos Electromagnéticos de Banda Ancha**: Un ejemplo son los equipos de monitoreo de radiación EMR-20/-21/-30/-200/-300, los cuales han sido especialmente diseñados con la finalidad de medir los campos electromagnéticos de una manera sencilla y con una precisión suficiente para demostrar que se cumplen las normas pertinentes. Estos dispositivos son de banda ancha para la vigilancia de la radiación de alta frecuencia en el intervalo de 3 kHz a 60 GHz. Las unidades de medida se expresan en unidades de intensidad de campos magnético y eléctrico y la densidad de potencia. Alternativamente, se muestra la densidad de potencia en forma de porcentaje de los valores límites especificados. [33]



Figura 2.1: Analizador de campo electromagnético EMR-300

Fuente: <http://www.narda-sts.ru/products/wide/44>

- 2) **Analizador Selectivo de Campos Electromagnéticos**: Un ejemplo es el equipo SRM-3006 (selective radiation meter), el cual es un sistema de medición portátil selectivo en frecuencia para el análisis de la seguridad y las medidas ambientales de los campos electromagnéticos de alta frecuencia en el rango de 9 kHz a 6 GHz. Es ideal para la medición de los valores absolutos y límites de los campos electromagnéticos de alta frecuencia como los emitidos por la banda de radio (AM, FM), TV (analógico, DVB-T), BOS (Tetra), telecomunicaciones móviles (GSM,UMTS), radar, y comunicaciones inalámbricas (WiMax, WLAN). Tiene una alta velocidad de medición y una resolución de ancho de banda (RBW) hasta 20 MHz para UMTS y 32 MHz para W-CDMA. Otra ventaja es que posee internamente una antena receptora GPS, con la cual puede almacenar las coordenadas de posicionamiento por medición almacenada. [34]



Figura 2.2: Analizador selectivo de campo electromagnético SRM-3006

Fuente: <http://www.ibis-instruments.com/index.php?link=en/news-view/1741/srm-3006>

- 3) **Monitores de Área de Campos Electromagnéticos**: Un ejemplo es la familia de productos AMB-8057; estos equipos son soluciones revolucionarias, precisas y fiables para la supervisión remota y continua de los campos electromagnéticos. Para casos de alertas, como cuando el umbral ajustado es sobrepasado, o cuando intentan manipular la unidad remota, o una ruptura de la unidad, algunos equipos (sobre todo las últimas versiones) de esta familia están equipados con un modem GSM/GPRS y pueden ser programados para enviar mensajes SMS describiendo el tipo de alerta. [35] El rango de operación varía según la sonda (sensor) colocada.



Figura 2.3: Monitor de área de campo electromagnético AMB-8057

Fuente: <http://www.cmv.de/produkte/narda-area-monitor-amb-8057.html>

- 4) **Analizador de Campo Electromagnético de Baja Frecuencia**: Un ejemplo es el sistema EFA-300, el cual mide los campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia de hasta 32 kHz. Trabaja en banda ancha y puede seleccionar la frecuencia a medir. El equipo provee un análisis espectral a través de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). [36]



Figura 2.4: Analizador de campo electromagnético de baja frecuencia EFA-300

Fuente: http://www.megon.net/docs/4_Mjerenje/mjerenja_glavna.htm

2.3 DRIVE TEST

A continuación se presentará las principales estrategias empleadas por los operadores móviles en la parte de acceso de radio para la planificación y optimización de la red. También se conocerá el proceso que realizan estas operadoras para el monitoreo del performance su red móvil.

2.3.1 IMPORTANCIA DE LOS DRIVE TESTS

Proporcionar cobertura de la red y calidad de servicio (QoS) es una tarea importante de un operador de red celular. Esto se debe a que el espectro celular normalmente se suministra con licencia bajo la obligación de cobertura, y además los operadores necesitan ser competitivos en el mercado. Para mejorar sus redes, los operadores suelen enviar ingenieros en el campo para recoger las mediciones de radio, para así descubrir problemas como agujeros de cobertura de la red, y para determinar si se necesita cierto ajuste de parámetros de sus estaciones base de transmisión (BTS). [37]

Cuando un operador está desarrollando o dimensionando una nueva red, es necesario verificar que la red esté funcionando según lo previsto. Por ejemplo, la información de cobertura de radio es esencial para la planificación de redes, así como también, la optimización de la red y la optimización de los parámetros de gestión de recursos de radio (RRM) [38]. La verificación se realiza por medio de mediciones de campo reales en términos de *drive test* dentro de la red desplegada y proporciona información relacionada

a la disponibilidad, a la fiabilidad, la capacidad, la latencia y la movilidad de la red. Los *drive tests* pueden ser necesarios a realizar para una operación de mantenimiento después de la fase de despliegue inicial: por ejemplo, en la construcción de nuevas carreteras, ferrocarriles o grandes edificios, en las quejas de los usuarios, así como sobre una rutina periódica. Los *drive tests* son parte muy esencial de la planificación de la red y el proceso de optimización.

Mediante el análisis de los resultados del *drive test*, el operador puede tomar las medidas necesarias para mantener y mejorar la calidad de la red, por ejemplo, decidir si se debe sintonizar ciertos parámetros o construir nuevas estaciones base.

Debido a la utilidad de los *drive tests* para diversas aplicaciones en *wireless*, es necesario evaluar de manera eficiente el desempeño de las antenas de diversos proveedores que se emplean para determinar la más óptima según la banda a medir (LTE, UMTS, GSM, etc.). *Drive testing* es un componente importante para la evaluación de las antenas. Debido a que el *drive testing* es inherentemente estadístico, es importante poder recoger grandes cantidades de datos en el tiempo. Para ello se utilizan los equipos de prueba de radio RF de los fabricantes en donde se puede medir la intensidad de señal recibida por canal (RSSI, por sus siglas en inglés), la señal de potencia recibidas y calidad (RSRP, RSRQ) y la proporción de señal de interferencia más ruido (SINR) [39].

Dentro de las labores de planificación de RF se pueden incluir las siguientes funciones:

- Pronosticar una demanda de tráfico según tipo de cobertura (urbana, rural, etc.) considerando un plan de crecimiento de capacidad debido al aumento de usuarios y/o tráfico.
- Estimar la movilidad de los usuarios para hacer cálculos de los posibles *handovers* (entre celdas o BTS's, BSC's y MSC's) lo cual también es importante en el dimensionamiento.
- Dimensionamiento de la cantidad de canales de voz (TCH), de datos y de control por celda de acuerdo a estimaciones anteriores.
- Diseño de la topología de la red, incluyendo ubicación de los BSC y de los MSS estudiando los costos de las diferentes posibilidades.
- Diseño para interconectar la red móvil con la PSTN también verificando opciones con respecto a los costos.

El servicio de optimización de la red celular, se puede definir como el proceso iterativo de búsqueda del conjunto óptimo de las cuatro “c” que caracterizan una red radio: aumentar la capacidad, disminuir el costo, aumentar la cobertura y aumentar la calidad. Algunas de las técnicas usadas son [40]:

1. La planificación de frecuencias:

El objetivo principal es distribuir el espectro disponible en los sectores de las estaciones base de manera que se evite la interferencia co-canal y la interferencia de canal adyacente.

- **Interferencia Co-canal:** Ocurre en zonas donde no llega la señal de dos estaciones base que tienen la misma frecuencia. El móvil no puede determinar de cual celda tomar la señal, en consecuencia el usuario percibe una mala calidad de señal. Para evitar ello se debe hacer un análisis sobre cual frecuencia se debe cambiar para no rehacer todo el plan.
- **Interferencia de Canal Adyacente:** Debido a imprecisiones propias de los filtros de recepción, frecuencias contiguas pueden solaparse; lo que ocasiona interferencias. Se busca evitar ello guardando cierta distancia entre frecuencias de estaciones que se encuentran geográficamente cerca una de la otra.

En ambos problemas, para reducir el nivel de interferencia se pueden emplear las siguientes técnicas:

Discontinuous Transmission (DTX): Se detiene la transmisión de información cuando no se detecta señal de voz. Si solo se envía información cuando realmente exista, se tendrá un mejor uso del espectro. Otro aspecto es que el DTX permite el ahorro de la batería de los MS.

Control de Potencias: Es un mecanismo de ajuste de potencia entre el MS y la BTS en ambos sentidos (*uplink* y *downlink*). La red le avisa al MS que disminuya su potencia de transmisión cuando éste se encuentre cerca de la BTS, caso contrario le dice que debe aumentarla.

Frequency Hopping (FH): Se hace cambiar la frecuencia de transmisión en cada periodo para promediar la interferencia en el *downlink*. Si durante una conversación, cada móvil

recibe una frecuencia constante todo el tiempo; algunos experimentarán más interferencia que otros; sin embargo, si se usa FH, la interferencia tendrá el efecto de promediarse a lo largo de la conversación. Mientras menor sea la interferencia, el espectro de frecuencias será usado de una manera más eficiente, incrementando la capacidad del sistema.

2. Parámetros de configuración lógicos y físicos de los elementos de la red de acceso por radio:

Consiste en realizar un ajuste fino de los parámetros a nivel de BSS. Es un aspecto bastante complejo, pero con el que se puede conseguir un alto grado de optimización. Generalmente existe un conjunto de parámetros por defecto, sin embargo se programan ciertos parámetros para realizar ciertas acciones, para responder en determinados entornos o a aplicaciones concretas. El número de parámetros configurables en un BSS es del orden de varios cientos.

2.3.2 EQUIPOS UTILIZADOS

La prueba más común que se realiza es el análisis de rendimiento de la red, que por lo general se efectúan en *clusters* (agrupación de células o celdas). Dichas pruebas miden el nivel de potencia de la zona en tiempo real y guardan dicha información, en formato de texto o en .csv, con sus respectivos datos de fecha y hora, así como su posición geográfica como se puede observar en la Figura 2.5 para finalmente procesar toda la data y crear un mapa del área como se muestra en la Figura 2.6. De igual forma, el sistema propuesto en la presente tesis tiene la capacidad de realizar el mismo procedimiento de visualizar la data en tiempo real y de procesarla y mostrarla en cualquier software de análisis, como *Google Maps* o *MapInfo* por ejemplo. Por ello podría ser muy útil para esta aplicación particular de los drive test, pero para un rango de frecuencias amplio.

date_time	latitude	longitude	signal_level	best_server	...
10/03/2011 23:54	37.379242	-122.088951	-85.56	115	...
11/03/2011 23:55	37.379242	-122.088951	-86.63	115	...
12/03/2011 23:56	37.379242	-122.088951	-86.62	115	...
13/03/2011 23:57	37.379242	-122.088951	-84.9	115	...
14/03/2011 23:58	37.379234	-122.088973	-89.5	89	...
15/03/2011 23:59	37.379234	-122.088973	-84.76	37	...
17/03/2011 00:00	37.379211	-122.088988	-86.02	63	...
24/03/2011 00:07	37.379176	-122.088592	-85.92	115	...
25/03/2011 00:08	37.379188	-122.088469	-80.81	89	...
26/03/2011 00:09	37.379246	-122.088336	-72.8	37	...
...

Figura 2.5: Típico ejemplo de la data medida en los *drive tests*

Fuente: <http://www.telecomhall.com/what-is-rf-drive-test-testing-.aspx>



Figura 2.6: Ejemplo de la data procesada de los *drive tests* creado en VBA

Fuente: <http://www.telecomhall.com/what-is-rf-drive-test-testing-.aspx>

El *drive test* convencional es un proceso manual, los ingenieros son enviados directamente a la zona a analizar para recolectar información de la calidad de la red. Por lo general, un vehículo de medición, por ejemplo una furgoneta equipada, dispositivos de medición y un sistema de posicionamientos global (GPS) para obtener la ubicación geográfica son utilizados para comprobar la cobertura al aire libre. Con dicho vehículo de medición, los ingenieros recorren cada *cluster* para verificar su correcto funcionamiento. Se obtienen parámetros que nos describen la funcionalidad y la calidad del servicio

Para realizar *drive test* en la optimización de una red de telefonía celular se necesitan, como mínimo, los siguientes equipos (Figura 2.7) y *software* [40]:

- Dos estaciones móviles, uno en modo de ingeniería y el otro realizando llamadas continuas (dependiendo de la versión del software puede necesitarse solo un equipo).
- Un scanner de doble banda (850 MHz y 1900 MHz).

- Una antena de doble banda.
- Un GPS
- Una laptop con el *software* a emplear instalado (MapInfo, ArcMap, GoogleMaps).



Figura 2.7: Equipamiento básico para Drive Test

Fuente: http://about.keysight.com/en/newsroom/imagelibrary/library/drivetest_images/

2.4 SISTEMAS STANDALONE [49]

En la actualidad en todos los países del mundo, comúnmente, se suele visualizar estos tipos de iluminaciones orientados a la publicidad, en los exteriores de centros comerciales, ciudades con mayor tránsito de personas, etc. En la actividad comercial, el uso de *displays*, se remota desde épocas antiguas en las cuales se basaban en una simple exposición de los productos a ofrecer, esto hoy en día no ha variado mucho en su objetivo, pero si en la tecnología utilizada. Actualmente debido a las ventajas que ofrece la tecnología LED (durabilidad, eficiencia, brillo, entre otras) se ha convertido en la tecnología favorita utilizada para la elaboración de estos monitores gigantes visibles.

Últimamente, adicionalmente a la publicidad que se transmiten en dichos *standalone*, se ha adicionando la ventaja de medir la temperatura (Figura 2.8) y la humedad a través de sondas (sensores) ubicados estratégicamente alrededor de los paneles; con la finalidad de informar a los transeúntes.



Figura 2.8: Pantalla gigante led para publicidad

Fuente: <http://www.rotuloselectronicos.net/proyecto-de-pantalla-curva-de-leds-p637-c70.html>

Adicionalmente a la información de temperatura y humedad, algunos países están adoptando el uso de sensores de campos electromagnéticos como alternativa para atacar la inseguridad con respecto a los niveles de radiación del medio ambiente proveniente de distintas fuentes como las antenas celulares. Estos sistemas de monitoreo de RNI mediante estaciones fijas permiten a los habitantes de una ciudad no solo visualizarlos a través de estos paneles gigantes, sino también vía Internet. Se puede visualizar los niveles de exposición a los que se encuentran expuestos durante las 24 horas y compararlos con los niveles permisibles. Sistemas de este tipo ya han sido utilizados en distintas ciudades europeas, logrando una buena aceptación por parte de los ciudadanos y una baja percepción de riesgo de los mismos. Se saca ventaja de los efectos visuales de la iluminación publicitaria y la conectividad proporcionada por el Internet con el fin de advertir los niveles de radiación a los que se están exponiendo.

El sistema de monitoreo de RNI se compone básicamente de dos partes o subsistemas:

1. La unidad de monitoreo propiamente dicha, compuesta por el medidor de radiación, un GPS para determinar la ubicación geográfica y un módulo de comunicación de datos GPRS que transmite la información a la base central, mediante un canal celular. Todo lo cual es coordinado desde un microcontrolador (Figura 2.9).

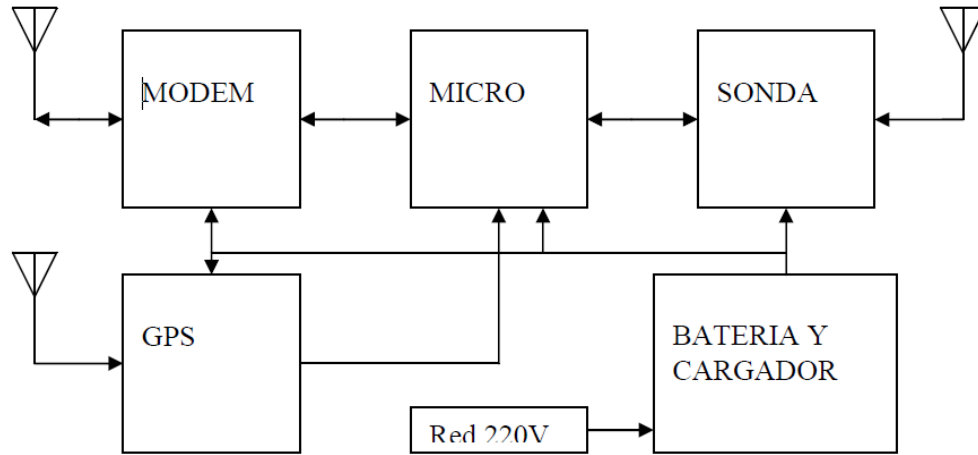


Figura 2.9: Diagrama eléctrico

Fuente: <https://www.kennedy.edu.ar/DocsLISI/Abstract%20Monitoreo%20fijo%20de%20Radiacion%20no%20ionizantes-%20GICI.pdf>

- La base central, constituida básicamente por una base de datos y un servidor Web, permite el acceso público a una página con el mapa de la ciudad en donde se encuentra ubicado el puesto de monitoreo (Figura 2.10). Haciendo clic sobre el punto seleccionado, una ventana se abre indicando el nivel medio de radiación, el máximo, el límite permitido y el acceso a una gráfica de la evolución del nivel de radiación de 24 horas.

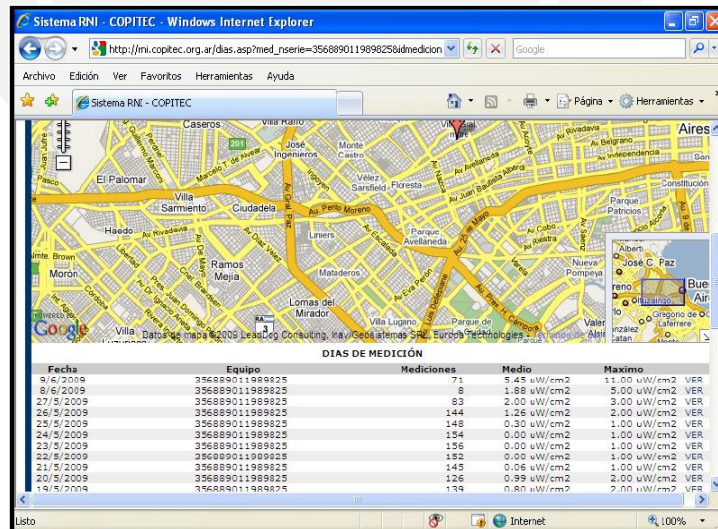


Figura 2.10: Visualización de las mediciones a través de Google Maps

Fuente: http://www.lacie-unlam.org/uea2010/trabajos/uea2010_submission_62.pdf

El sistema propuesto, debido al gran rango de operación de frecuencia, podría utilizarse como punto de sensado fijo para el propósito de esta aplicación.

CAPÍTULO 3: PROPUESTA E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se expone el sistema de medición de radiaciones no ionizantes propuesto, explicando el funcionamiento y las características principales de los componentes del sistema. Si bien es cierto las radiaciones no ionizantes se extienden desde 0 Hertz hasta aproximadamente 3×10^{15} Hertz [41], el sistema propuesto abarca un rango importante de frecuencias, desde 1 MHz hasta 8 GHz, dentro del cual se encuentra la radiación producida por las microondas y las ondas de radio.

Para la presente tesis se realizará las pruebas del sistema propuesto sobre la radiación producida en el rango de operación de las antenas de telefonía celular. Para comprender mejor el rango de operación de todos los operadores de telefonía celular en el Perú, en las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se presentarán unos cuadros resumen de las bandas de operación por operador móvil.

BANDA DE 850 MHZ

Banda	Rango de Frecuencias (MHz)		Empresa	Área de Asignación
	Ida (Uplink)	Retorno (Downlink)		
A	824 - 835	869 - 880	Telefónica Móviles S.A.	A Nivel Nacional
	845 - 846,5	890 - 891,5		
B	835 - 845	880 - 890	América Móvil Perú S.A.C.	A Nivel Nacional
	846,5 - 849	891,5 - 894		

Tabla 3.1: Rango de frecuencia para la banda de 850 MHz en el Perú [42]

Fuente: Elaboración propia

BANDA DE 900 MHZ

Rango de Frecuencias (MHz)		Empresa	Área de Asignación
Ida (Uplink)	Retorno (Downlink)		
899 - 915	944 - 960	Viettel Perú S.A.C.	Provincia de Lima y la Provincia Constitucional del Callao
902 - 915	947 - 960	Viettel Perú S.A.C.	A Nivel Nacional excepto las Provincias de Lima y Callao

Tabla 3.2: Rango de frecuencia para la banda de 900 MHz en el Perú [42]

Fuente: Elaboración propia

BANDA DE 1900 MHZ

Banda	Rango de Frecuencias (MHz)		Empresa	Área de Asignación
	Ida (Uplink)	Retorno (Downlink)		
A	1850 - 1865	1930 - 1945	América Móvil Perú S.A.C.	A Nivel Nacional
D	1865 - 1870	1945 - 1950	Nextel del Perú S.A.	A Nivel Nacional
B	1870 - 1882,5	1950 - 1962,5	Telefónica Móviles S.A.	A Nivel Nacional
E	1882,5 - 1895	1962,5 - 1975	Nextel del Perú S.A.	A Nivel Nacional
F	1895 - 1897,5	1975 - 1977,5	América Móvil Perú S.A.C.	A Nivel Nacional
C	1897,5 - 1910	1977,5 - 1990	Viettel Perú S.A.C.	A Nivel Nacional

Tabla 3.3: Rango de frecuencia para la banda de 1900 MHz en el Perú [42]

Fuente: Elaboración propia

Donde el operador móvil:

Movistar pertenece a la empresa Telefónica Móviles S.A.

Claro pertenece a la empresa América Móvil Perú S.A.C.

Nextel (ahora Entel) pertenecía a la empresa Nextel del Perú S.A. (ahora Entel Perú S.A.C.)

Bitel pertenece a la empresa Viettel Perú S.A.C.

De acuerdo a las bandas de frecuencias mostradas, se necesitará que el sistema trabaje en el rango de 869 MHz hasta 894 MHz para la banda de 850 MHz y en el rango de 1930 MHz hasta 1990 MHz para la banda de 1900 MHz. Cabe resaltar que no se está considerando la banda de 900 MHz debido a que Bitel es un operador que recientemente ha ingresado al mercado de telefonía celular peruano.

3.2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA PROPUESTO

El funcionamiento del sistema de medición de radiaciones no ionizantes propuesto está representado en el diagrama de bloques de la Figura 3.1.

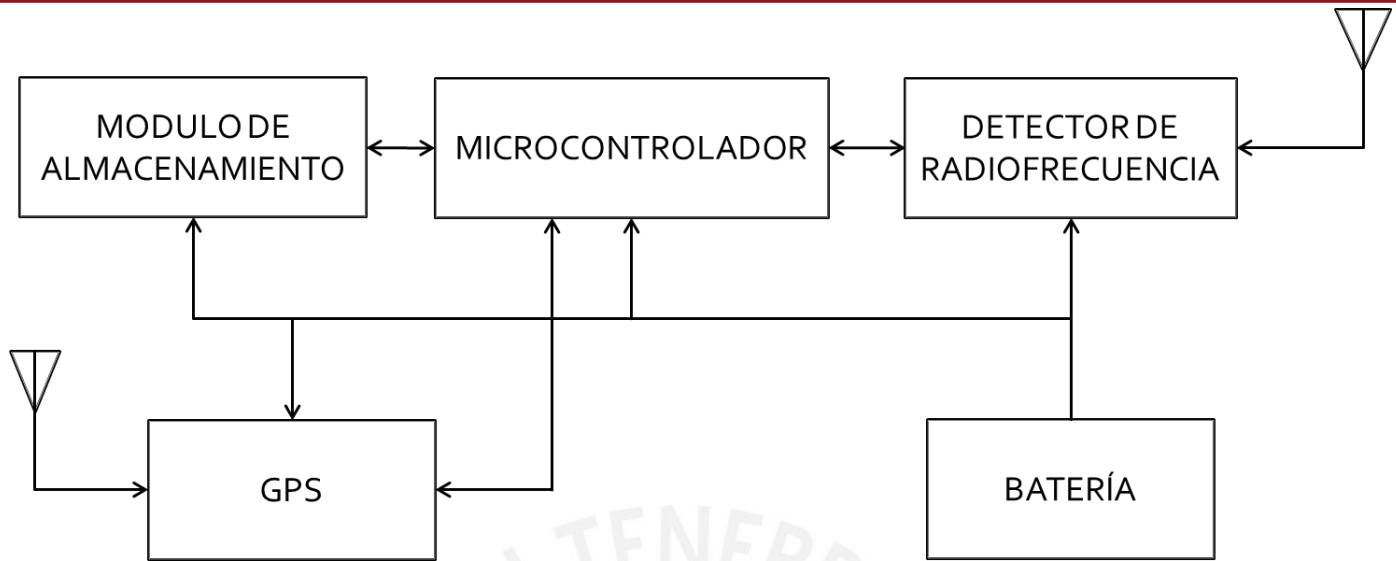


Figura 3.1: Diagrama de bloques del sistema desarrollado

Fuente: Elaboración propia

A continuación se describirán cada uno de los componentes de cada proceso del sistema propuesto:

3.2.1 ELECCIÓN DEL MÓDULO DETECTOR DE RADIOFRECUENCIA

La principal característica del sistema es la detección de las radiaciones no ionizantes, por lo que se buscó operar en el mayor rango posible de frecuencias. Para la selección del módulo detector de radiofrecuencia se tomaron en cuenta las siguientes características como primer criterio de selección:

- Rango de frecuencias más amplio posible
- Mayor rango dinámico posible (*input range*)
- Suministro de corriente

Ante los requisitos mencionados se encontraron tres posibles alternativas disponibles:

Detector de RF	Fabricante	Frecuencia	Rango dinámico	Suministro de corriente
ADL5906[47]	Analog Devices Inc	10 MHz ~ 10GHz	-65dBm ~ 8dBm	86mA
ADL5902[48]	Analog Devices Inc	50MHz ~ 9GHz	-62dBm ~ 3dBm	90mA
AD8319[49]	Analog Devices Inc	1MHz ~ 10GHz	-60dBm ~ -2dBm	22mA

Tabla 3.4: Cuadro comparativo de las tarjetas detectoras de radiofrecuencia

Fuente: Elaboración propia

El siguiente criterio de selección fue la disponibilidad de sus respectivas tarjetas de evaluación. Si bien es cierto estos integrados se encuentran disponibles en la página web de la distribuidora de componentes Digi-Key; sin embargo, su montaje en tarjeta es multicapa y localmente no hay empresa que pueda procesar o fabricar impresos multicapas (4 capas). Por ello se verificó la disponibilidad de sus respectivas tarjetas de evaluación.

Para el integrado ADL5906 no se encontraba disponible en *stock* su tarjeta de evaluación, por lo que se importaron las tarjetas de evaluación CN0150 (Figura 3.2), para el detector de radiofrecuencia AD8319, y CN0178 (Figura 3.3), para el detector de radiofrecuencia ADL5902.



Figura 3.2: Tarjeta de evaluación CN0150

Fuente: <http://media.digikey.com/Photos/Thomas%20Research%20Products/EVAL-CN0150A-SDPZ.jpg>



Figura 3.3: Tarjeta de evaluación CN0178

Fuente: <http://media.digikey.com/photos/Analog%20Devices%20Photos/EVAL-CN0178-SDPZ.jpg>

El tercer y último criterio de selección fue comprobar la funcionalidad de ambas tarjetas y verificar su comportamiento lineal dentro de su rango de operación. Para ello se utilizó el generador de señal analógica de microondas E8257D PSG de la empresa Agilent Technologies (Figura 3.4), que se encuentra disponible en el laboratorio de la universidad, el cual permite modificar la frecuencia y la amplitud de la señal de salida.



Figura 3.4: Generador de señal analógica de microondas E8257D

Fuente: <http://www.interlligent.com/filestock/files/5989-1325EN.pdf>

Se varió el valor de la amplitud (dBm) de salida por cada valor de frecuencia (Hz) del equipo y se analizó el voltaje de salida (V) de las tarjetas para verificar su linealidad. Se conectó directamente las tarjetas, como se observa en la Figura 3.5, para evitar pérdidas introducidas por la longitud de los cables coaxiales; además se realizó las pruebas en el rango lineal según sus integrados.



Figura 3.5: Pruebas de las tarjetas de evaluación

Fuente: Elaboración propia

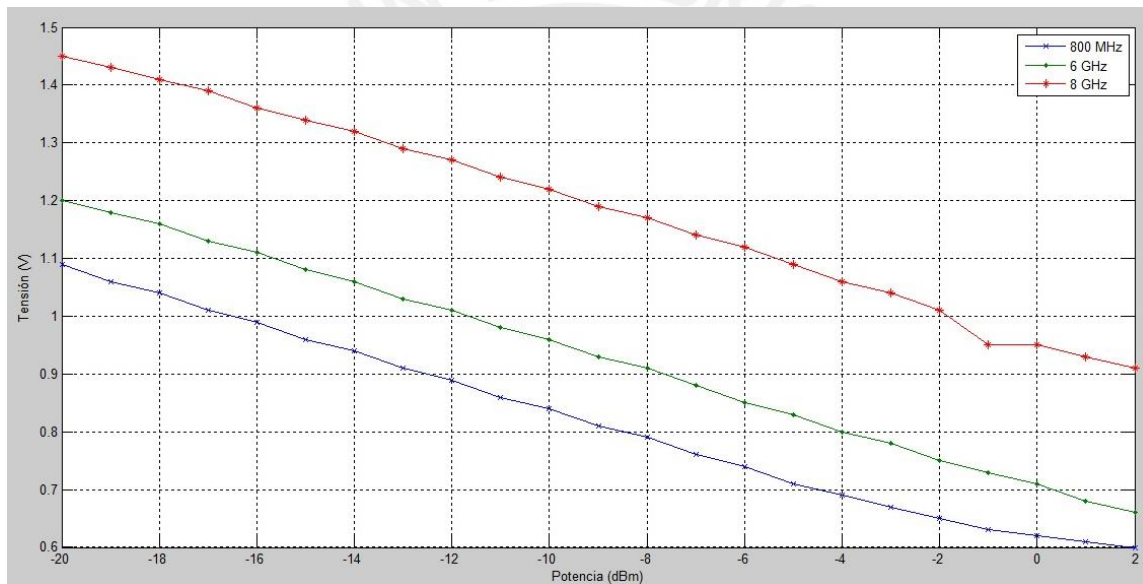


Figura 3.6: Gráfico de los puntos calibrados de la tarjeta de evaluación CN0150

Fuente: Elaboración propia

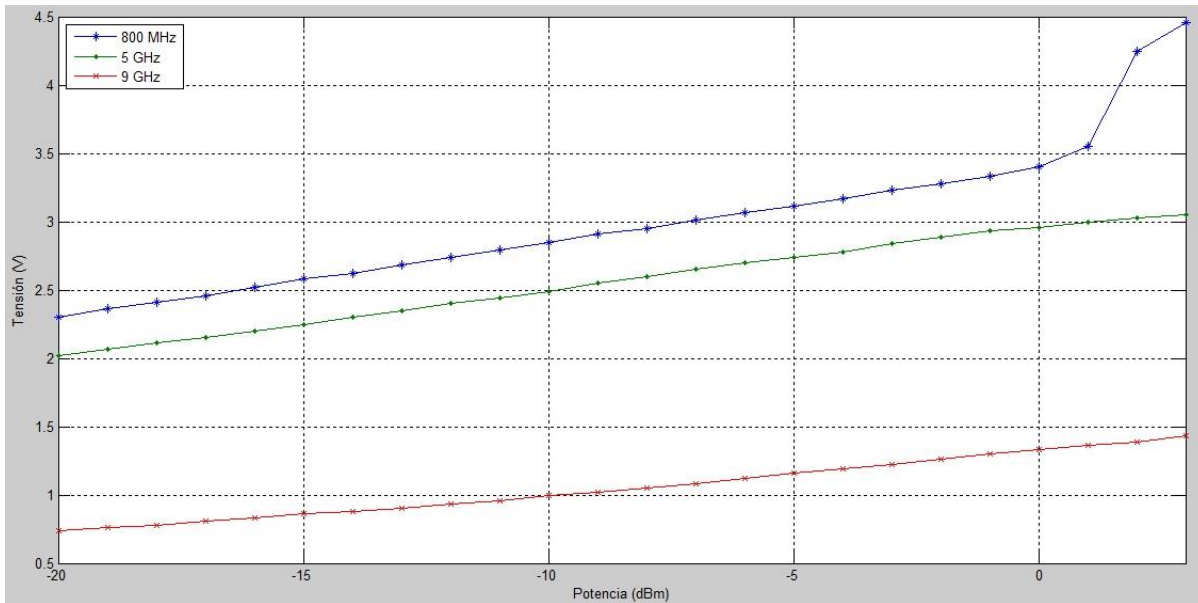


Figura 3.7: Gráfico de los puntos calibrados de la tarjeta de evaluación CN0178

Fuente: Elaboración propia

Al comparar las Figuras 3.6 y 3.7, se observa que la tarjeta de evaluación CN0150 tiene una mejor linealidad que la tarjeta de evaluación CN0178 en el límite máximo de su rango dinámico en su rango de baja frecuencia. Para propósitos de la tesis, se debe de tener el mayor rango dinámico posible en las bandas 850 MHz y 1900 MHz, como también una mejor linealidad. Si bien es cierto, la tarjeta de evaluación CN0178 tiene un rango dinámico mayor; sin embargo, para las frecuencias que se utilizarán la otra tarjeta tiene un mejor comportamiento lineal y por ello se opta por usar dicha tarjeta de evaluación CN0150 para el propósito de la tesis. Ambas tarjetas tienen un ADC de 12 bits cuya comunicación se realiza a través del puerto serial periférico (SPI).

3.2.2 MICROCONTROLADOR PARA TODO EL SISTEMA

El requisito principal para la elección del microcontrolador a utilizar para el propósito de la presente tesis fue contar con una comunicación compatible con el módulo GPS y de almacenamiento de data, y con el módulo detector de radiofrecuencia. Debido a que la restricción mínima es que exista compatibilidad de estas tarjetas, cuya comunicación se realiza a través del bus serial de interfaz periférica (SPI, por sus siglas en inglés), se optó por la familia de tarjetas microcontroladoras Arduino debido a su modo práctico de uso y a sus múltiples opciones de módulos GPS compatibles en el mercado.

Una vez elegida la familia de microcontroladores a utilizar, el criterio para la selección del modelo del microcontrolador a usar fue el número de entradas y salidas que se van a utilizar para unir todos los componentes del sistema, además del tamaño y peso de la tarjeta (debido al límite de carga del UAV). Por esta razón se eligió la tarjeta Arduino UNO Revisión 3.

Arduino es un microcontrolador de una placa (*single-board*), con la intención de hacer más fácil la elaboración de objetos o entornos interactivos. [43] El *hardware* consiste en una placa de código abierto diseñado en torno a un microcontrolador de 8 bits de Atmel AVR, o a una de 32 bits ARM Atmel. Los modelos actuales cuentan con una interfaz USB y adaptables a varias tarjetas de extensión. Arduino viene con un entorno sencillo de desarrollo integrado (IDE) que se ejecuta en computadoras personales regulares y permite a los usuarios escribir programas usando C o C++.

El Arduino UNO (Figura 3.8) es una placa electrónica basada en el ATmega328. Cuenta un conector USB, un conector de alimentación, tecnología ICSP (*“in circuit serial programming”*) y un botón de reinicio. Sus características principales se resumen en la Tabla 3.4. [44]

Microcontrolador	ATmega328
Voltaje de Operación	5V.
Voltaje de Entrada (recomendado)	7-12V.
Voltaje de Entrada (límites)	6-20V.
Pines Digitales E/S	14(de los cuales 6 proveen salida PWM)
Pines Analógicos de Entrada	6
Corriente DC por Pin de E/S	40mA
Corriente DC por 3.3 V Pin	50mA
Memoria Flash	32 KB (ATmega328) de los cuales 0.5 KB son usados para el bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Velocidad de Reloj	16 MHz

Tabla 3.5: Características principales del microcontrolador Arduino UNO. [44]

Fuente: Elaboración propia

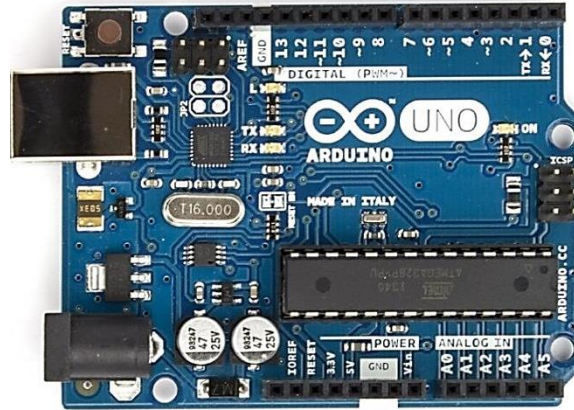


Figura 3.8: Microcontrolador Arduino UNO

Fuente: <http://store.arduino.cc/product/A000066>

3.2.3 MODULO GPS Y DE ALMACENAMIENTO DE DATA EN UNA MEMORIA MICRO SD

El empleo de un módulo GPS y de un módulo de almacenamiento de data es fundamental para el propósito de la presente tesis. Los datos mínimos requeridos por el modulo GPS son: fecha, tiempo (UTC), latitud, longitud y altura. Estos datos son importantes debido a que se necesita saber en qué punto exactamente del mapa se midió la densidad de potencia de la antena celular.

Con respecto al módulo de almacenamiento, era indispensable almacenar todos los puntos medidos por el sistema para posteriormente visualizarlo en un software de mapas. Para este caso, se utiliza *Google Maps* y *ArcMap* para visualizar la trayectoria de las mediciones según su nivel de densidad de potencia.

Existen diversos módulos GPS y diversos módulos de almacenamiento en el mercado; sin embargo, luego de comparar precios se optó por utilizar el ITAED GPS SHIELD 1.1 (Figura 3.9), el cual contiene el modulo GPS junto con la opción de almacenamiento de memoria microSD.



Figura 3.9: Módulo GPS ITAED versión 1.1

Fuente: <http://imall.iteadstudio.com/im120417017.html>

El Itaed GPS Shield 1.1 es un módulo GPS diseñado para ser receptor del sistema mundial de posicionamiento que incluye una interfaz de memoria microSD. Se basa en el módulo GPS RoyalTek REB-4216 (Figura 3.10) y es compatible con la familia de microcontroladores Arduino.



Figura 3.10: Integrado RoyalTek REB-4216

Fuente: <http://www.royaltek.com/solutions/?CId=1&Id=18>

Sus principales características son [45]:

- Frecuencia de operación: 1575.42 MHz.
- Sensibilidad de rastreo: -159 dBm
- Precisión de la posición: 10 metros para el 90 % (24 horas estático, -130 dBm)
- Altura máxima: 18000 metros
- Velocidad máxima: 515 m/s
- Tasa de bits: 38400 bps
- Peso: <= 3 gramos
- Temperatura de operación: -40°C ~ +85°C

Con respecto a la antena del GPS, sus principales características son [46]:

- Frecuencia de operación: 1575.42 ± 1.023 MHz
- Impedancia de salida: 50 ohms
- Ganancia (Especificación del LNA/ Filtro) : 28 dB
- Cubierta: Antena Magnética
- Cable Coaxial: RG174 (5 metros)
- Conector del cable: SMA Macho
- Temperatura de Operación: -30 °C hasta $+85$ °C

3.2.4 ANTENAS DE BANDA ANGOSTA DEL SISTEMA

Como ya se mencionó, se realizará la prueba del sistema para la frecuencia de operación de las antenas de telefonía celular, por ello se necesita trabajar en las bandas 850MHz y 1900MHz. Debido a que los módulos detectores de radiofrecuencia disponibles no filtran únicamente la banda que se desea trabajar, se necesitará dos antenas que operen exactamente en ese rango de frecuencias para que trabajen como si fuesen un filtro. De esta forma, se tomará medidas correctas para la frecuencia calibrada de la tarjeta de evaluación elegida, CN0150.

Se fabricó dos antenas de banda angosta que operen en el rango de frecuencias de retorno (*downlink*) de las bandas 850 MHz (Figura 3.13) y 1900 MHz (Figura 3.11). Cabe recalcar que el término *downlink* es utilizado para representar el enlace entre la estación base y la estación móvil de la telefonía celular. Se analizó el rango de operación de mayor eficiencia de recepción y transmisión de ambas antenas implementadas a través del analizador de redes escalar (VNA), el cual mide propiedades de amplitud y fase. Por norma, la potencia reflejada debe ser menor a la décima parte de la incidente, por ello se verifico, para la determinación del ancho de banda de las antenas, que las magnitudes del parámetro s_{11} estén por debajo de -10 dB.

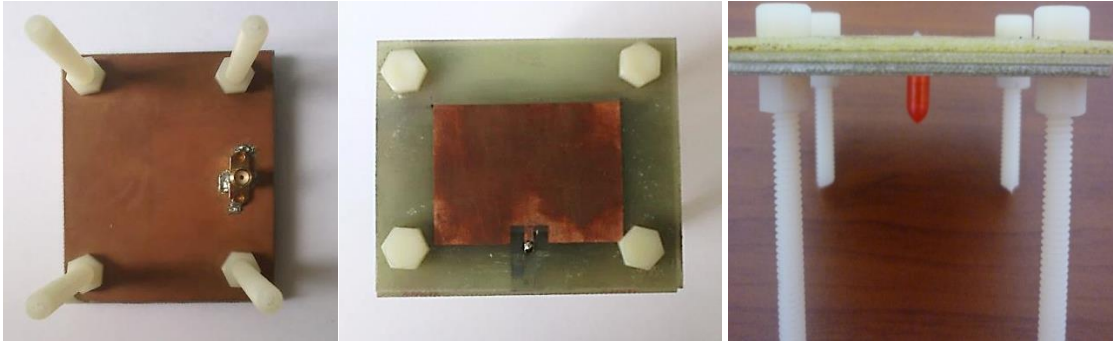


Figura 3.11: Antena *microstrip* para la banda de retorno de 1900 MHz

Fuente: Elaboración propia

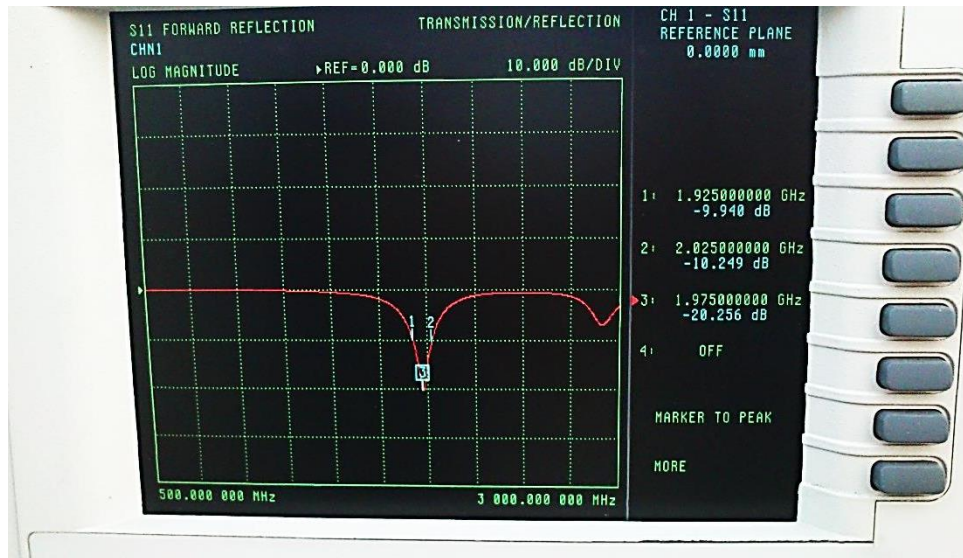


Figura 3.12: Prueba de la antena *microstrip* para la banda de retorno de 1900 MHz en el VNA

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.12 se observa que el rango de frecuencia de operación en el VNA para la antena 1900 MHz es de 1925 MHz hasta 2025 MHz, el cual está muy cercano al rango de retorno de las antenas de telefonía celular para la banda de 1900 MHz.

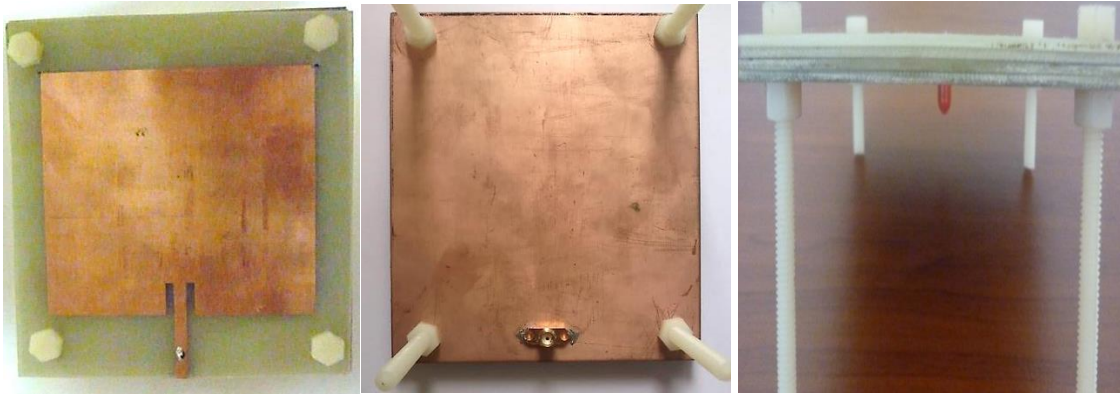


Figura 3.13: Antena *microstrip* para la banda de retorno de 850 MHz

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.14: Prueba de la antena *microstrip* para la banda de retorno de 850 MHz en el VNA

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.14 se observa que el rango de frecuencia de operación en el VNA para la antena 850 MHz es de 865 MHz hasta 893 MHz, el cual está muy cercano al rango de retorno de las antenas de telefonía celular para la banda de 850 MHz.

3.3 PROGRAMACIÓN DE LOS MÓDULOS EN ARDUINO

En la solución propuesta el Arduino UNO ejecuta los programas “ProgramaAntena850.ino” y “ProgramaAntena1900.ino”. A modo de indicadores se utilizó dos diodos LEDs de color rojo y verde como indicadores de falla y de configuración correcta respectivamente. Al inicio se enciende el LED verde como señal de que se pudo configurar correctamente todas las tarjetas y luego de tres segundos se apaga. El programa empieza captando la

data del GPS y decodificándola para poder almacenarla en la memoria microSD en el formato “.csv”. El programa no empieza la comunicación con la tarjeta de evaluación CN0150 hasta que se logre decodificar todas las variables de interés del GPS (altitud, latitud, altura, fecha y hora) para el propósito de la presente tesis. Una vez realizada la comunicación con la tarjeta CN0150, el LED color verde se vuelve a encender y el programa utiliza la ecuación que relaciona voltaje de entrada con potencia recibida, determinada en la calibración de la tarjeta, para el cálculo de densidad de potencia según la frecuencia a medir. El microcontrolador envía una trama al ADC para que este pueda enviarle la medición de la potencia. Luego promedia estos valores de potencia de un mismo punto (misma longitud y latitud) para calcular la densidad de potencia del valor promediado. Ambos programas operan bajo el mismo esquema, solo varían de acuerdo a la antena a utilizar. Se muestra a continuación en la Figura 3.15, el diagrama de flujo del programa mencionado:



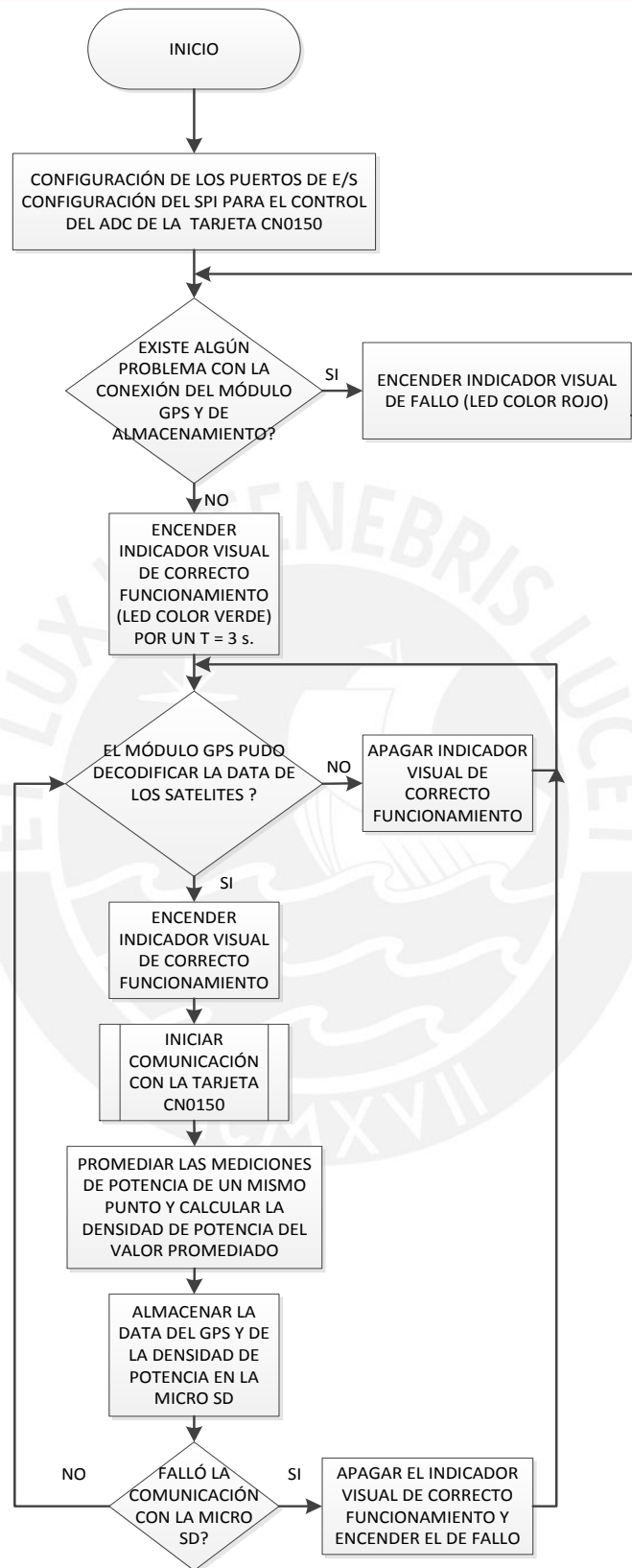


Figura 3.15: Diagrama de flujo del sistema

Fuente: Elaboración propia

3.4 REQUERIMIENTOS Y ELABORACIÓN DEL PROTOTIPO PARA MONTARLO EN EL HEXACÓPTERO

Luego de haber elegido el microcontrolador del sistema, el módulo de GPS y almacenamiento de data y el módulo detector de radiofrecuencia, se procederá a unir todo el sistema y a fabricar un prototipo simple para poder montarlo en el hexacóptero.

Como ya se mencionó, todo el sistema se comunica por el bus serial de interfaz periférica. Como el módulo GPS y de almacenamiento es compatible con el microcontrolador Arduino UNO, no hubo mucha dificultad en poder controlarlo y almacenar la información en el formato “.csv” en la memoria microSD; sin embargo, debido a que la tarjeta de evaluación es compatible con otro módulo de distinto microcontrolador, y se requería de la importación de dicho módulo para poder visualizar la data en una PC, se tuvo que adecuar la tarjeta CN0150 para poder conectarlo al Arduino UNO. Para ello se soldó espadines hembra sobre los “*Test Points*” (TPs) de la tarjeta y también se diseñó una base simple para la tarjeta de evaluación de tal forma que pueda conectarse al microcontrolador con cables de “*protoboard*” de forma simple (como se muestra en la Figura 3.16).

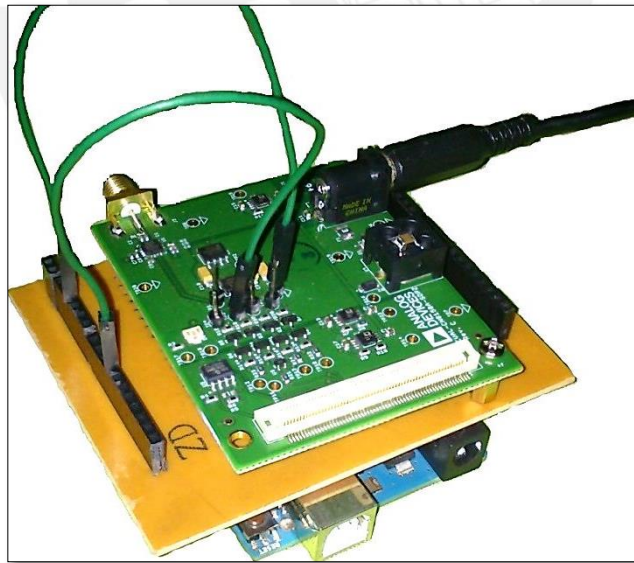


Figura 3.16: Adaptación de la tarjeta CN0150 para su implementación

Fuente: Elaboración propia

Luego de haber podido controlar la tarjeta de evaluación con el Arduino, se diseñó la alimentación de todo el sistema. Ambas tarjetas de evaluación requieren de una alimentación exacta de 6 V.

Debido a que las calibraciones dependen del voltaje de salida de las tarjetas, era necesaria una alimentación estable de 6 voltios, ya que, en caso contrario, variaría el voltaje de salida y por ende se tendría un error a la hora de calcular la potencia recibida y la densidad de potencia. Para ello se utilizó un regulador de voltaje DC-DC LM2596 (Figura 3.17) porque permitía ajustar un potenciómetro de precisión para mantener una salida constante de voltaje deseada para una entrada variable de voltaje. Sus principales características son [50]:

- Rango de voltaje de salida variable ajustable: 1.2 V a 37 V
- Corriente de carga de salida: 3 A.
- Rango de tensión de entrada máxima: 40 V.
- Frecuencia fija del oscilador interno: 150 kHz
- Modo de operación: Conmutación (*switching*)

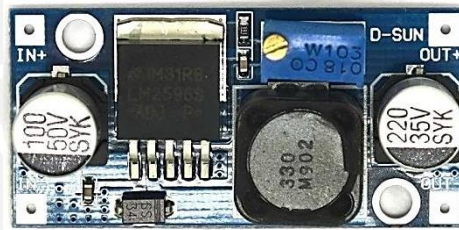


Figura 3.17: Regulador de voltaje DC-DC LM2596

Fuente: <http://www.hotmcu.com/lm2596-buck-dcdc-module-p-50.html>

Luego de elegir el regulador de voltaje, se midió las corrientes de consumo del sistema para la elección de la batería que alimentará a todo el sistema.

COMPONENTE	CONDICIÓN	CORRIENTE CONSUMIDA MÁXIMA
LM2596	Se varió el voltaje de entrada desde 6.6 V hasta 12 V	12 mA
CN0150	Se le colocó una entrada de potencia máxima.	46 mA
Arduino UNO + Modulo GPS y de almacenamiento	Se esperó hasta que el GPS decodifique toda la información importante para la presente tesis.	72 mA
CORRIENTE TOTAL MÁXIMA		130 mA

Tabla 3.6: Mediciones de corriente máxima de cada componente del sistema

Fuente: Elaboración propia

En el laboratorio se disponía de dos baterías de tensiones mayores a 6 voltios:

ZIPPY COMPACT 2200 mAH @ 8.3 V.

HellBoss 2800 mAH @ 12.5 V.

Ambas baterías cumplen con el requerimiento mínimo de 130 mA de corriente de consumo del sistema y también pueden utilizarse con el regulador de voltaje para reducir su valor de voltaje a 6 voltios constantes. Debido a que ambos cumplían con el requerimiento, el criterio de elección fue la de menor peso y tamaño: ZIPPY COMPACT 2200m AH @ 8.3 V (Figura 3.18).



Figura 3.18: Batería de Li-PO de 8.3 voltios

Fuente:

http://hobbyking.com/hobbyking/store/_21392_ZIPPY_Compact_2200mAh_2S_35C_Lipo_Pack.html

Una vez construido todo el sistema, se armó un chasis simple de forma cubica a base de acrílico y cintillos para reforzar su unión. El criterio principal fue que desde un punto de vista electromagnético se debe evitar materiales conductores o metálicos porque podrían introducir error a la hora de medir las radiaciones no ionizantes.

CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS FINALES

En el presente capítulo se procederá a describir y explicar las pruebas realizadas con el sistema propuesto las cuales se visualizarán en forma de “diagrama de calor” en la API (*Application Programming Interface*) de *Google Maps* y *ArcMap*, los cuales permiten visualizar la hora, la fecha, la latitud, la longitud, la altura, la potencia recibida y la densidad de potencia de cada punto medido.

Para las pruebas realizadas se determinó el escenario del campus de la PUCP, debido a que dentro de ella se ha instalado una estación base de telefonía celular en la azotea de la biblioteca central.

Por último, se realizará los comentarios de las mediciones realizadas, los resultados obtenidos y el presupuesto de la implementación del sistema propuesto.

4.1 EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODULO DETECTOR DE RADIOFRECUENCIA

Como se mencionó en el capítulo anterior, se utiliza, principalmente, el generador de señal analógica de microondas E8257D PSG de la empresa Agilent Technologies, pero a diferencia de las pruebas de funcionamiento de las tarjetas de evaluación, en esta ocasión se realizarán las calibraciones con todo el sistema implementado en las frecuencias de operación de ambas antenas microstrip implementadas. Esto es debido a que posiblemente alguno de los componentes del sistema afecte el comportamiento de la tarjeta CN0150 y ya no tenga el mismo comportamiento de las pruebas iniciales. Para el caso de la antena de frecuencia de retorno de la banda 850 MHz se consideraron las calibraciones de las frecuencias 869 MHz, 890 MHz y 894 MHz, cuyos valores de voltaje se promediaron y se obtuvo la siguiente gráfica:

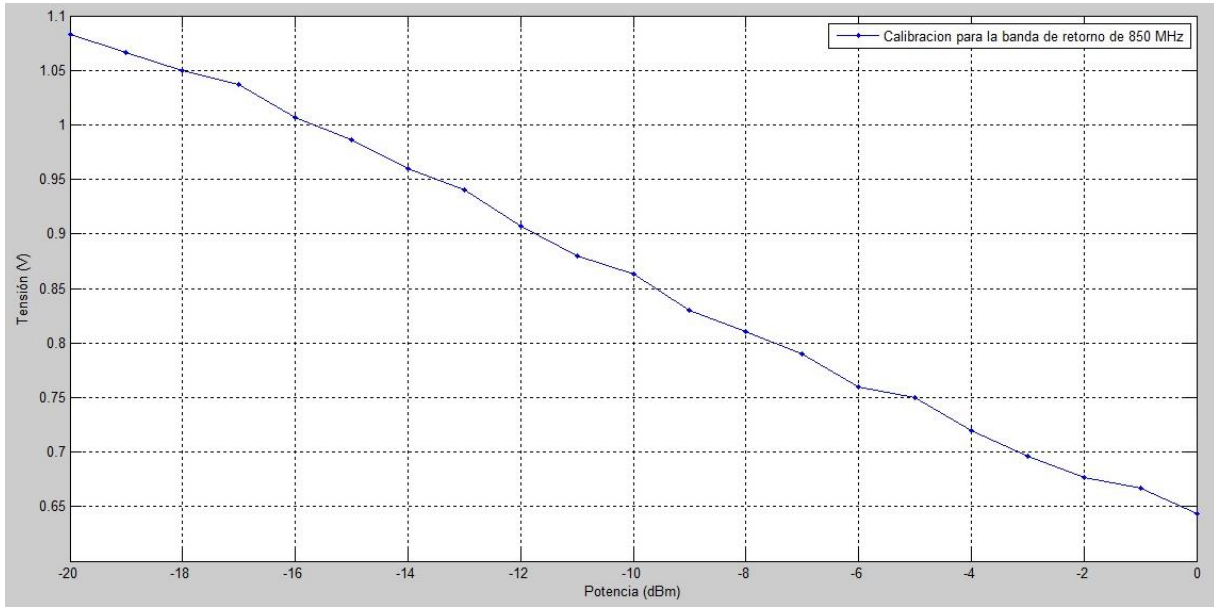


Figura 4.1: Gráfico de la calibración de todo el sistema para la banda de 850 MHz

Fuente: Elaboración propia

Partiendo de la Figura 4.1, calculamos la ecuación que satisface a esa recta lineal. Dicha ecuación es la relación entre voltaje y potencia recibida y a partir de ahí despejamos y calculamos la potencia recibida:

$$Voltaje = -0.0232 \times Pin + 0.6347 \tag{4.2.a}$$

$$Pin = \frac{Voltaje - 0.6347}{-0.0232} \tag{4.2.b}$$

Se realiza el mismo procedimiento para la antena de frecuencia de retorno de la banda 1900 MHz. Para este caso se calibró las frecuencias 1930 MHz, 1960 MHz y 1990 MHz, y su resultado se ilustra en la Figura 4.2.

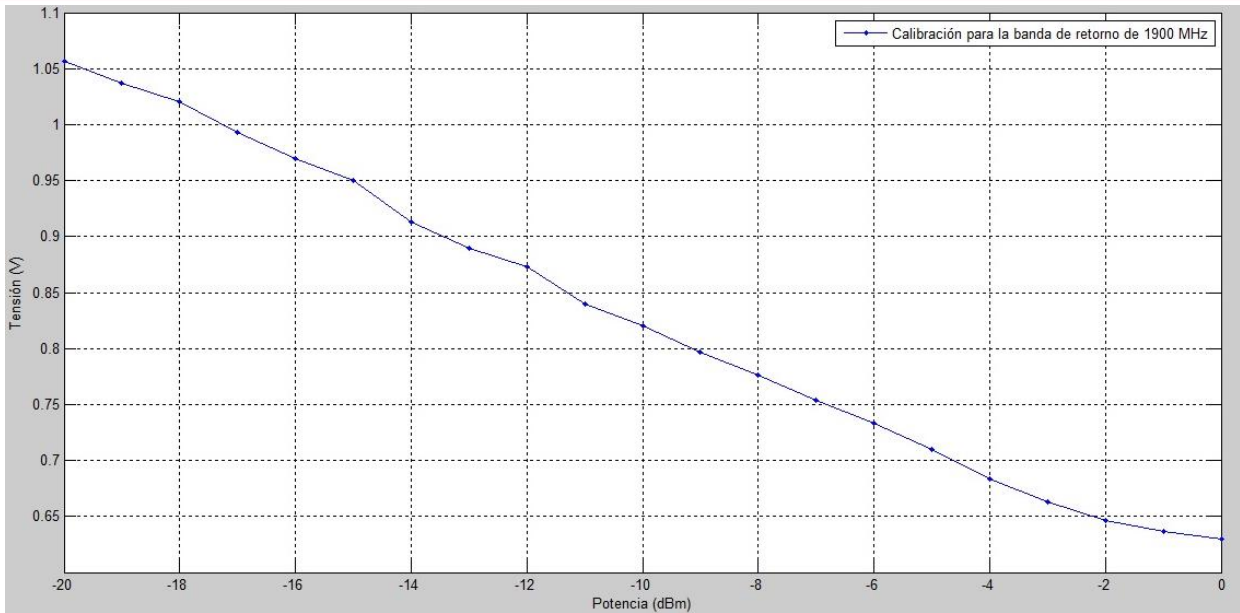


Figura 4.2: Gráfico de la calibración de todo el sistema para la banda de 1900 MHz

Fuente: Elaboración propia

$$Tension = -0.0233 \times Pin + 0.6006 \quad (4.2.c)$$

$$Pin = \frac{Voltaje - 0.6006}{-0.0233} \quad (4.2.d)$$

Las ecuaciones (4.2.b) y (4.2.d) representan el valor de la potencia recibida del sistema según su voltaje de entrada para las bandas de retorno de 850 MHz y 1900 MHz respectivamente.

Se realizó la prueba estadística t-Student para muestras relacionadas para comparar los valores de potencia que indica el sistema propuesto calibrado y el generador de señal analógica de microondas [53], con la finalidad de determinar que las diferencias sean estadísticamente significativas. Es decir, analizar si la diferencia de valores (error) sea muy cercano a cero (significativo), ya que idealmente deberían ser el mismo valor y por ende tener una diferencia igual a cero. Básicamente lo que se realizó fue conectar nuevamente ambos equipos y se volvió a trabajar en las frecuencias calibradas. Con ello, se analizaron ambos valores y se trabajó con software estadístico SPSS para realizar la prueba paramétrica para muestras relacionadas t-Student. Como requisito previo para aplicar dicha prueba, se tenía que verificar que la diferencia de los valores, en cada frecuencia, cumpla la normalidad, para ello se aplicó la prueba Kolmogorov-Smirnov, la

cual permite verificar si un conjunto de datos se distribuye de manera normal. Las hipótesis que se plantearon son:

H₀: Los datos se distribuyen de manera normal.

H₁: Los datos no se distribuyen de manera normal.

Frecuencia (MHz)	Prueba de normalidad Z de Kolmogorov-Smirnov	Valor "p" Sig.(Bilateral)	Correlación de muestras (Coef. de Pearson)	Error máximo (dB)
869	0,646	0,797	0,997	1.81
890	0,843	0,477	0,998	1.71
894	0,644	0,801	0,997	1.71
1930	0,763	0,605	0,998	1.93
1960	0,823	0,507	0,998	1.93
1990	0,757	0,615	0,997	2.09

Tabla 4.1: Prueba de normalidad utilizando Kolmogorov-Smirnov

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.1 muestra la prueba Kolmogorov-Smirnov que nos permite contrastar la hipótesis de normalidad de un conjunto de datos, observamos que los valores “p” son mayores de 0.05 ($p > 0.05$), concluyendo que los datos cumplen el supuesto de normalidad, ya que se acepta la hipótesis nula. De esta forma podemos aplicar la prueba paramétrica para muestras relacionadas t-Student. Además se muestran los valores del coeficiente de correlación de Pearson ofreciendo la existencia de una alta correlación entre los valores de ambos grupos (valores muy cercanos a uno). De este modo podemos verificar si realmente se trata de dos grupos altamente relacionados. También se muestra el máximo error en decibelios por cada frecuencia calibrada, teniendo un máximo error de 2.09 dB para la frecuencia de 1990 MHz.

Para las pruebas de t-Student, se plantearon las siguientes hipótesis:

H₀: La diferencia de medias es igual a cero ($\mu_d = 0$).

H₁: La diferencia de medias no es igual a cero ($\mu_d \neq 0$).

De igual forma que la prueba anterior, para aceptar la hipótesis nula el valor “p” de significancia debe ser mayor a 0.05.

Frecuencia (MHz)	Intervalo de confianza para la variable diferencia al 95%		t	gl	Valor "p" Sig. (Bilateral)
	Inferior	Superior			
869	-0,258	0,231	-0,111	32	0,972
890	-0,310	0,176	-0,561	32	0,578
894	-0,325	0,164	-0,669	32	0,508
1930	-0,347	0,124	-0,965	32	0,342
1960	-0,346	0,131	-0,916	32	0,367
1990	-0,083	0,480	1,437	32	0,160

Tabla 4.2: Prueba de t-Student para muestras relacionadas

Fuente: Elaboración propia

La tabla 4.2 muestra los intervalos confidenciales para la variable de diferencia (μ_d) al 95% de confianza, observando que en todos los intervalos incluye el cero, lo que nos permite deducir también que se puede aceptar que los valores de potencia del generador de señales analógicas y el sistema propuesto calibrado sean significativamente iguales. Esta misma conclusión se refuerza utilizando la prueba paramétrica para muestras relacionadas t-Student donde los valores “p” son mayores a 0.05 ($p > 0.05$), aceptando la hipótesis nula.

Cabe resaltar que para la comprobación de los resultados obtenidos no solo se usó la calibración con el generador de señales, del cual se obtuvo un error máximo de 2.09 dBm, sino también el Narda SRM-3600 que se encuentra disponible en el laboratorio y cuyas pruebas se mostrarán más adelante.

4.2 PRUEBAS DEL SISTEMA REALIZADAS A NIVEL DEL SUELO EN EL CAMPUS DE LA PUCP

Una vez obtenidas las ecuaciones que relacionan el voltaje de entrada con la potencia recibida por cada banda de frecuencia, se procederá a realizar las pruebas del sistema

completo. La intención es tener un diagrama de nivel de radiación del campus de la universidad y comprobar el correcto funcionamiento del sistema.

4.2.1 PRUEBA REALIZADA CON LA ANTENA DE RETORNO DE 850 MHZ

Como se puede observar en la Figura 4.3 lo valores medidos se dividieron en cinco rangos, y estos a su vez se representaron por colores. Analizando el valor máximo de potencia EM medida, -17 dBm, considerando una ganancia de la antena de 5 dBi y utilizando la ecuación (2.2.d), se obtiene un valor de densidad de potencia de 665.28×10^{-6} W/m² el cual representa el 0.0306% del límite máximo permisible.

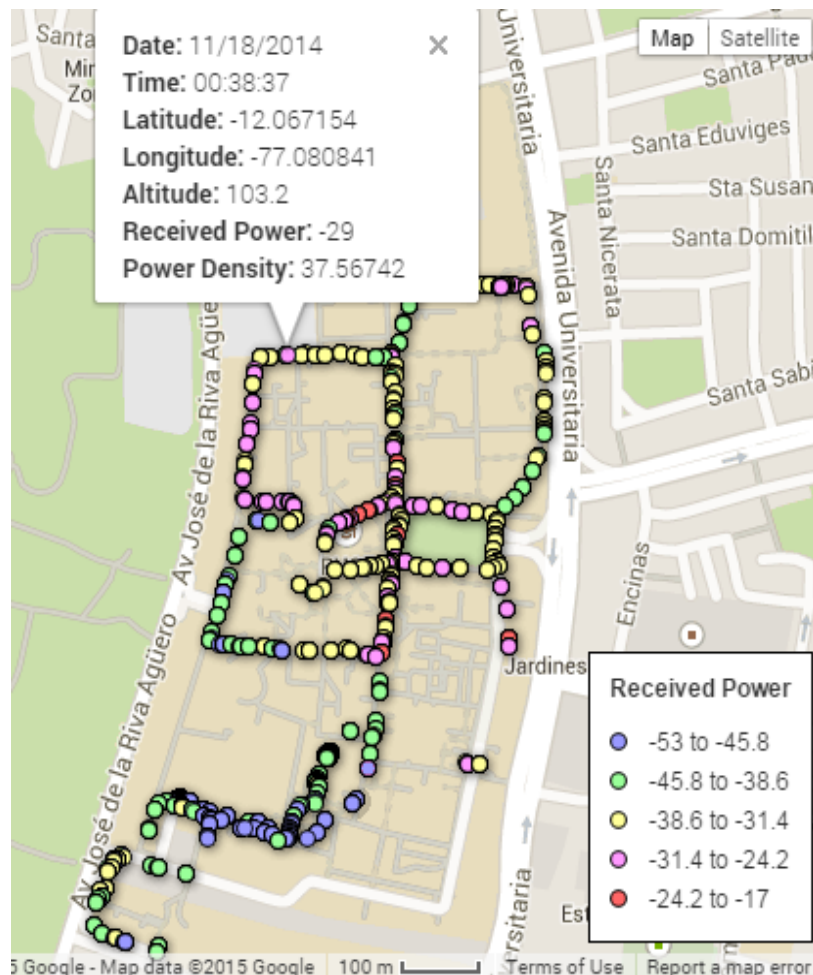


Figura 4.3: Representación del nivel de potencia de la banda de retorno de 850 MHz

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 PRUEBA REALIZADA CON LA ANTENA DE RETORNO DE 1900 MHZ

Como se puede observar en la Figura 4.4 lo valores medidos se dividieron en cinco rangos, y estos a su vez se representaron por colores. Analizando el valor máximo de potencia EM medida, -20 dBm, considerando una ganancia de la antena de 5 dBi y utilizando la ecuación (2.2.d), se obtiene un valor de densidad de potencia de 1.75×10^{-3} W/m² el cual representa el 0.0362% del límite máximo permisible.

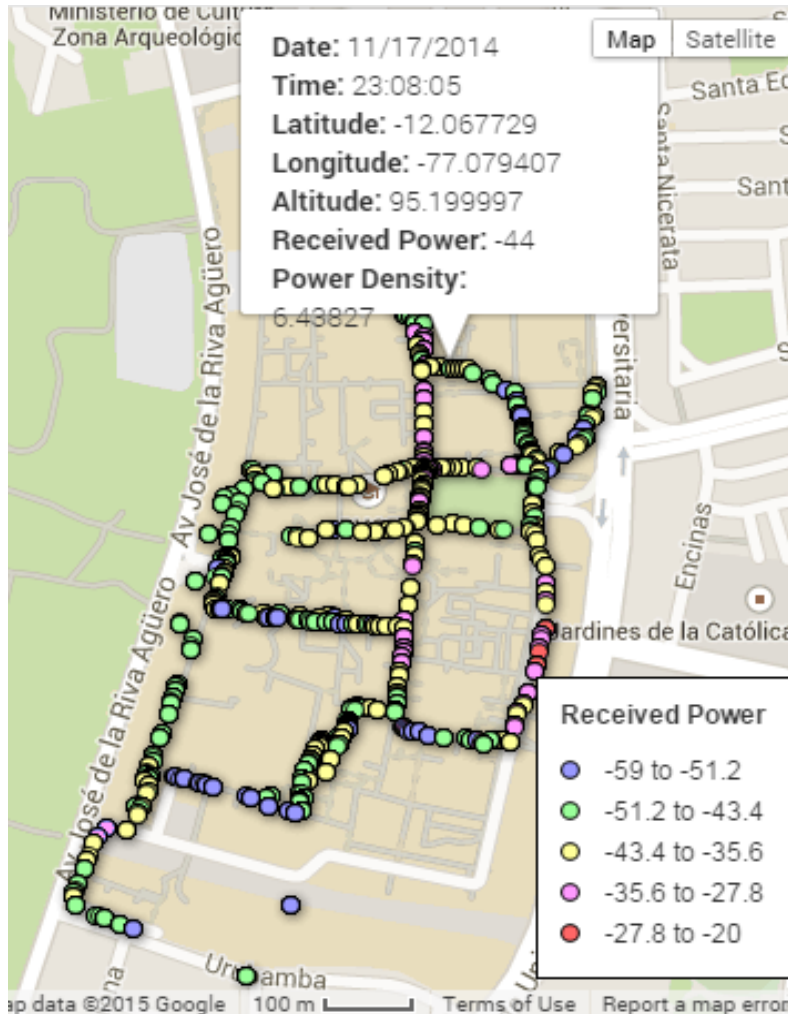


Figura 4.4: Representación del nivel de potencia de la banda de retorno de 1900 MHz

Fuente: Elaboración propia

4.3 PRUEBAS DEL SISTEMA MONTADO EN EL HEXACÓPTERO EN EL CAMPUS DE LA PUCP

Luego de haber realizado las pruebas a nivel del suelo y habiendo comprobado que los valores de densidad de potencia dentro del campus está muy por debajo de los límites

máximos permisibles, se procederá a realizar las pruebas del sistema montado en el vehículo aéreo no tripulado (hexacóptero), para verificar el cumplimiento de estos límites a la altura de una estación base.

Se montó el sistema a través de cintillos de plástico, como se ve en la Figuras 4.5 y 4.6, y se realizaron las pruebas de vuelo alrededor de la antena de telefonía móvil situada en la azotea de la biblioteca central de la universidad (Figura 1.5), cuya ubicación está representada en las gráficas 4.7 y 4.8 como un punto negro. El *drone* voló a una distancia de un radio de la antena de dos metros aproximadamente. Se promedió los valores de potencia recibida para el cálculo de la densidad de potencia en un solo punto. Como mínimo se requería realizar la medición de 10 muestras por punto medido. El valor de los dos metros es un valor redondeado el cual se calculó utilizando las ecuaciones de distancias mínimas hacia antenas de estaciones transmisoras para el cumplimiento de los límites de exposición poblacional del MTC (Tabla 4.1). Se asumió como referencia, para el cálculo del pire, una ganancia de la antena transmisora de 8 dBi y una potencia de 10 W.

$r = 6.38 \sqrt{pire} \div f$	Distancia mínima desde la antena en metros (r)
f = 1990 MHz	1.69
f = 894 MHz	1.13

Tabla 4.3: Cálculo de distancias mínimas de referencia para el cumplimiento de los LMP según la frecuencia

Fuente: Elaboración propia

Como criterio de precaución, partiendo de la ecuación (2.2.d), se calculó el valor de potencia recibida máxima que debería soportar el sistema asumiendo los límites máximos de densidad de potencia para cada una de las antenas y una ganancia de las antenas microstrip de 5 dBi.

$$S = \frac{Pr \times 4\pi}{\left(\frac{3 \times 10^8}{f}\right)^2 \times 10^{\frac{G}{10}}} \quad (4.4.a)$$

$$Pr = \log \left(\frac{S \times \left(\frac{3 \times 10^8}{f} \right)^2 \times 10^{10}}{4\pi} \right) \times 10 \quad (4.4.b)$$

Reemplazando los valores en la ecuación (4.4.b) para el límite máximo del rango de operación para las bandas de retorno de 1900 MHz y 850 MHz se obtienen los siguientes resultados de potencia máxima recibida:

- $f_{\text{máximo}} = 1900 \text{ MHz}$, $S_{\text{maximo}} = 4.95 \text{ W/m}^2$ se obtiene un **$P_{\text{rmax}} = 14.47 \text{ dBm}$**
- $f_{\text{máximo}} = 869 \text{ MHz}$, $S_{\text{maximo}} = 2.23 \text{ W/m}^2$ se obtiene un **$P_{\text{rmax}} = 18 \text{ dBm}$**

Debido a que el sistema soporta un valor máximo de potencia de 0 dBm, se utilizó un atenuador lineal de 20 dBm, para proteger el sistema en caso no se respeten los límites máximos permisibles.

Un punto en contra con estas mediciones es que el tiempo de vuelo del *drone* es de aproximadamente 10 minutos, ello implica una menor cantidad de puntos medidos del sistema alrededor de la antena de telefonía celular. Se utilizó el software ArcMap para mostrar las mediciones realizadas.



Figura 4.5: Imagen del sistema montado en el *drone* con la antena de 1900 MHz

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.6: Imagen del sistema montado en el *drone* con la antena de 850 MHz

Fuente: Elaboración propia

4.3.1 PRUEBA REALIZADA CON LA ANTENA DE RETORNO DE 850 MHZ

Como se puede observar en la Figura 4.7 los valores de potencia recibida medidos se dividieron en cinco rangos, y estos a su vez se representaron por colores. Analizando el valor máximo de potencia EM medida, 0.26 dBm, considerando una ganancia de la antena de 5 dBi y utilizando la ecuación (2.2.d), se obtiene un valor de densidad de potencia de $37.4 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ el cual representa el 1.72% del límite máximo permisible.

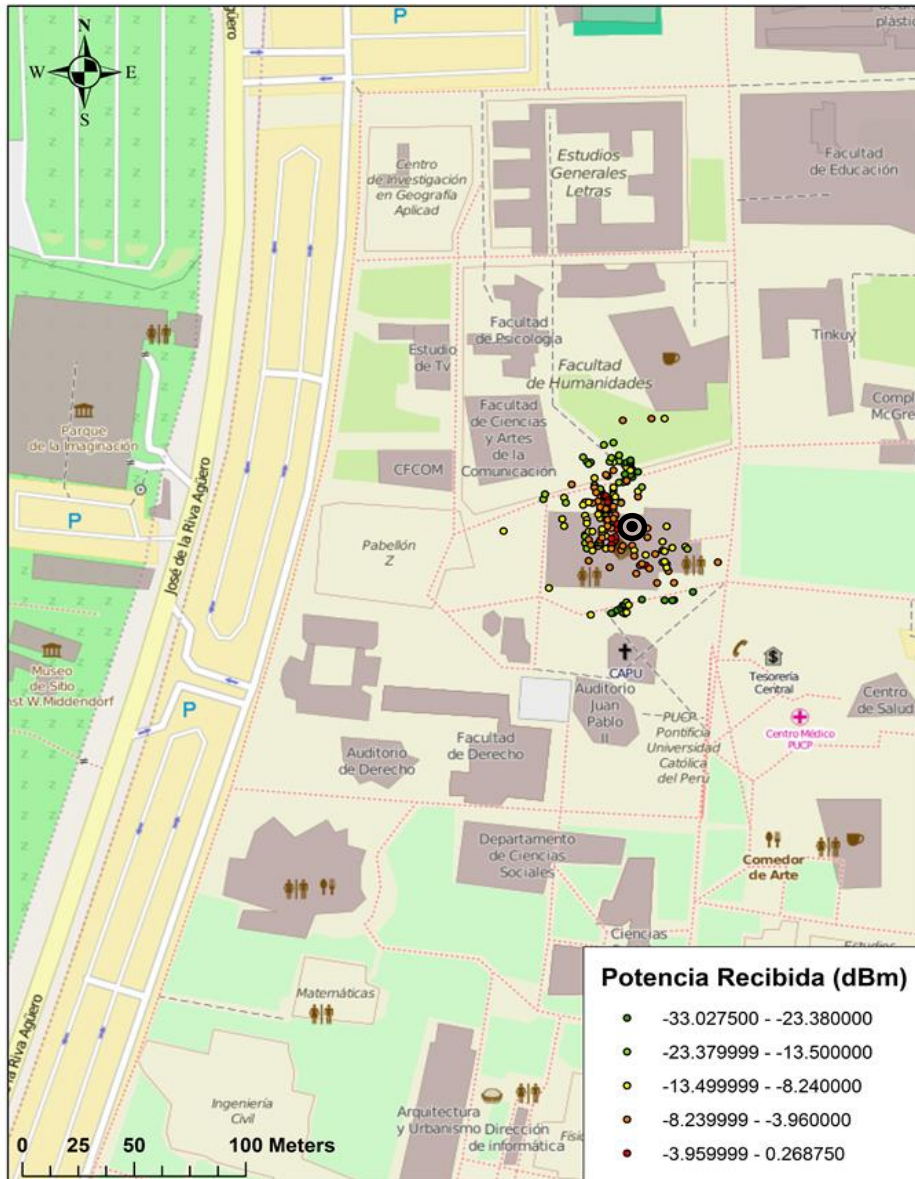


Figura 4.7: Representación del nivel de potencia de la banda de retorno de 850 MHz

Fuente: Elaboración propia

4.3.2 PRUEBA REALIZADA CON LA ANTENA DE RETORNO DE 1900 MHZ

Como se puede observar en la Figura 4.7 los valores de potencia recibida medidos se dividieron en cinco rangos, y estos a su vez se representaron por colores. Analizando el valor máximo de potencia EM medida, -0.26 dBm , considerando una ganancia de la antena de 5 dBi y utilizando la ecuación (2.2.d), se obtiene un valor de densidad de potencia de $164.69 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ el cual representa el 3.41% del límite máximo permisible.

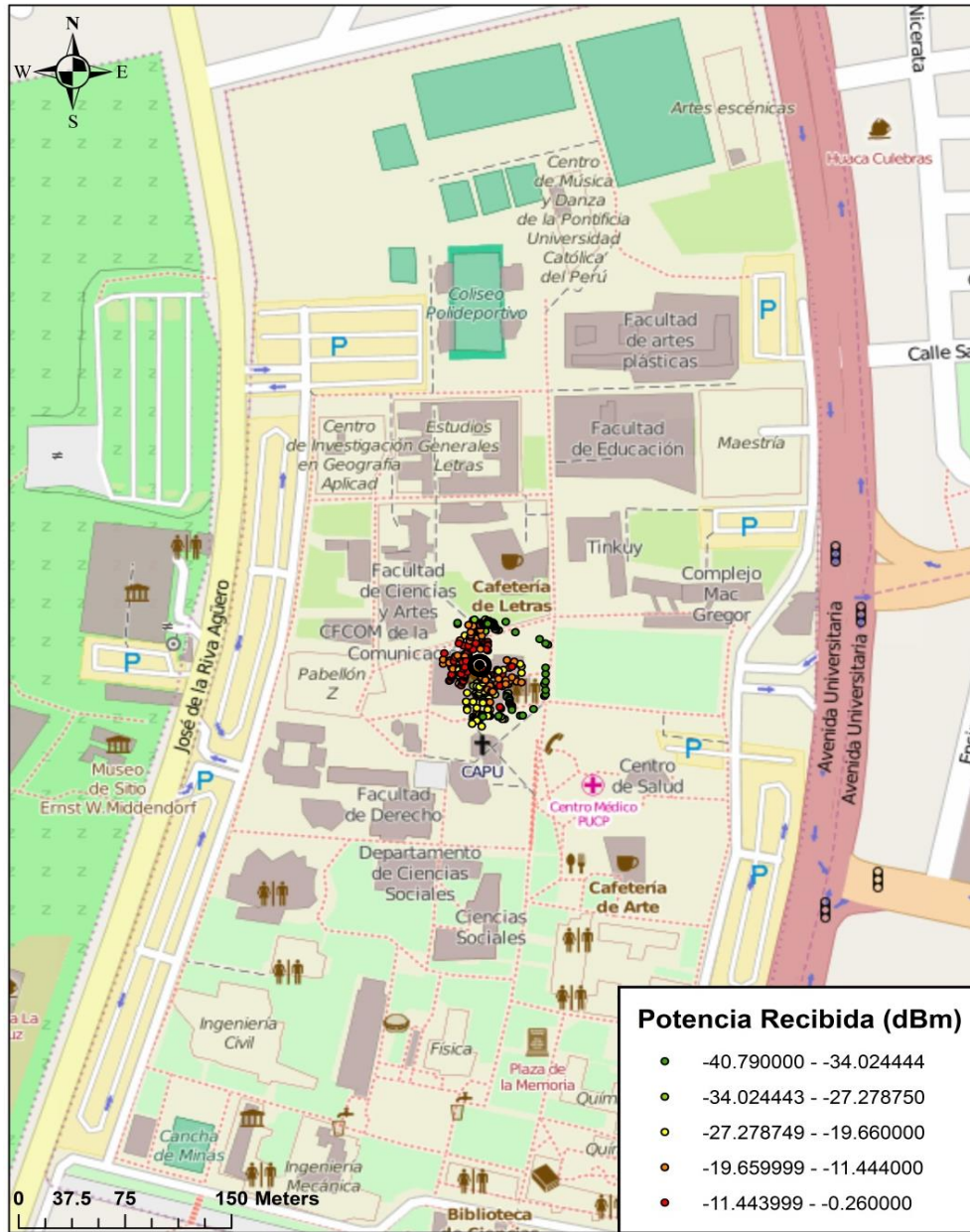


Figura 4.8: Representación del nivel de potencia de la banda de retorno de 1900 MHz

Fuente: Elaboración propia

4.4 COMPARACIÓN DE LAS MEDICIONES DEL SISTEMA CON EL SRM-3006

Una vez realizadas las pruebas de mediciones se procederá a comprobar la veracidad de los datos medido por el sistema utilizando el analizador selectivo de campos electromagnéticos SRM-3006. Para poder realizar una correcta comparación se fabricaron dos antenas adicionales de retorno para las bandas de 850 MHz y 1900 MHz, ya que la propia antena del SRM-3006 es una antena compuesta por tres antenas dipolos, uno en

cada eje (x, y, z), por lo tanto mide los tres componentes vectoriales de la onda y encuentra la magnitud del vector resultante; mientras que las antenas microstrip usadas solo miden en un eje el cual corresponde a la magnitud de la componente del campo eléctrico en dicho eje y por ende se tendría un valor menor al medido por la antena del analizador. Se conectaron las antenas según la frecuencia a medir al analizador de espectros electromagnéticos y se realizó las mediciones de ambos sistemas en paralelo. Se debe tener en cuenta los siguientes errores que influyen en las mediciones a la hora de realizar la prueba de comprobación:

- La potencia en un punto determinado no es un valor fijo en el tiempo; varía dependiendo de las condiciones de propagación y medio externo. Esta variación puede seguir una función de densidad de probabilidad tipo Rayleigh o Rice.
- Ambas antenas no están exactamente en la misma posición.
- A pesar de tratar de mantener una misma altura de ambas antenas, esto dependía del cansancio y de la no distracción del operador a la hora de cargar los equipos alrededor del campus.
- Se grabó más de 400 mediciones en el analizador y alrededor de 3000 puntos de medición del sistema propuesto por cada antena. Debido a que sus coordenadas de posicionamiento no eran iguales, se basó la comparación según el tiempo en que se almacenaron los datos; muchos de ellos no coincidían y se consideró un tiempo con un error de ± 2 segundos.

Con respecto a la medición con la antena de retorno de 1900 MHz, se obtuvo un error máximo de 12.01 dB y un error mínimo de 0.01 dB. Como se puede observar en la Figura 4.9 de los más de 400 datos, se pudieron comparar aproximadamente 379 y la cantidad de picos máximos de error son mínimos en comparación a la cantidad de datos.

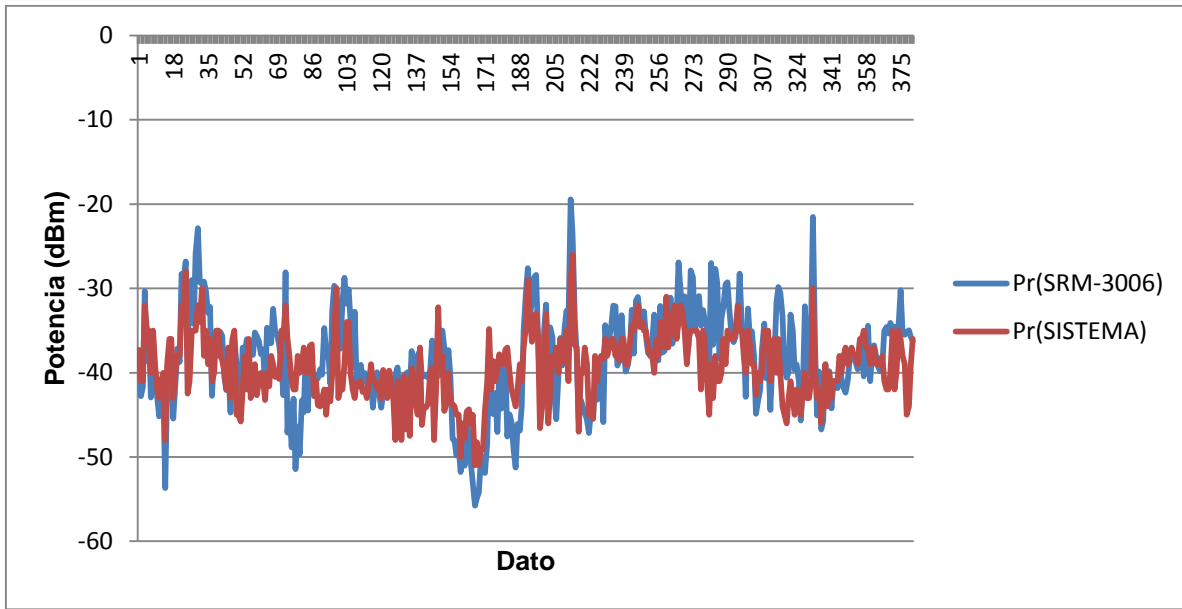


Figura 4.9: Comparación los valores de potencia recibida del sistema y del analizador para la prueba con la antena de retorno de 1900 MHz

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la medición con la antena de retorno de 850 MHz, se obtuvo un error máximo de 13.88 dB y un error mínimo de 0.01 dB. Como se puede observar en la Figura 4.10, de los más de 400 datos, se pudieron comparar aproximadamente 337 y la cantidad de picos máximos de error son mínimos en comparación a la cantidad de datos.

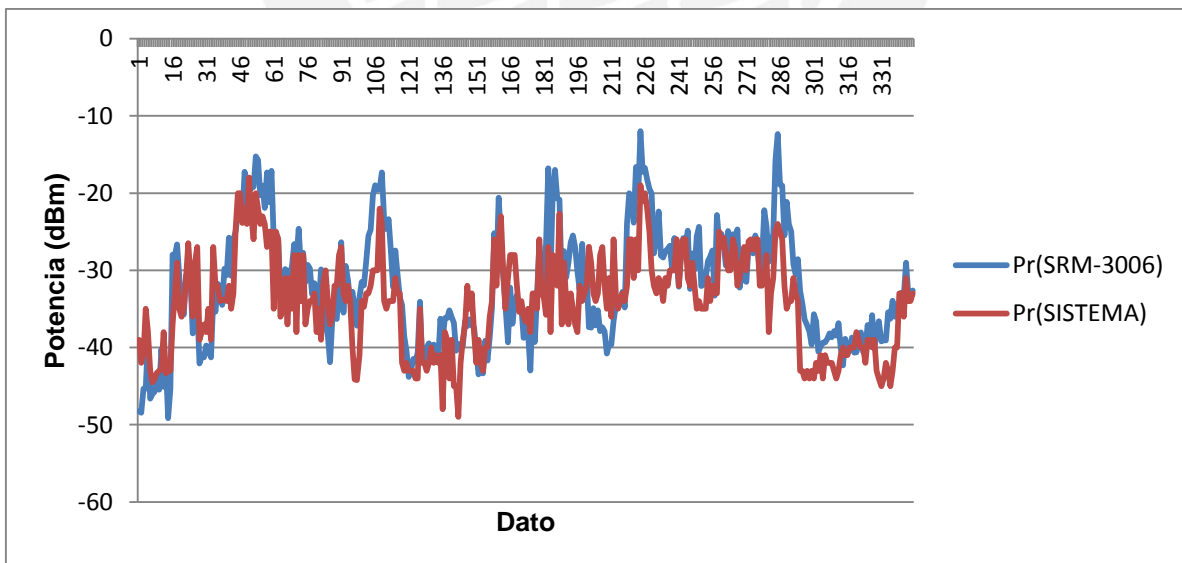


Figura 4.10: Comparación los valores de potencia recibida del sistema y del analizador para la prueba con la antena de retorno de 850 MHz

Fuente: Elaboración propia

Para corroborar que la potencia en un punto determinado no es un valor fijo en el tiempo se realizó una prueba adicional de ambos sistemas, el SRM-3006 y el propuesto, en un punto fijo como se muestra en la Figura 4.11.



Figura 4.11: Prueba de ambos sistema en un punto fijo utilizando la antena de retorno de 850 MHz
Fuente: Elaboración propia

La cantidad de medidas realizadas por el sistema propuesto fue de 900 muestras, mientras que para el SRM-3006 fue de 300 muestras. En ambos casos se graficó su histograma, para verificar si su distribución sigue una probabilidad tipo Rayleigh o Rice

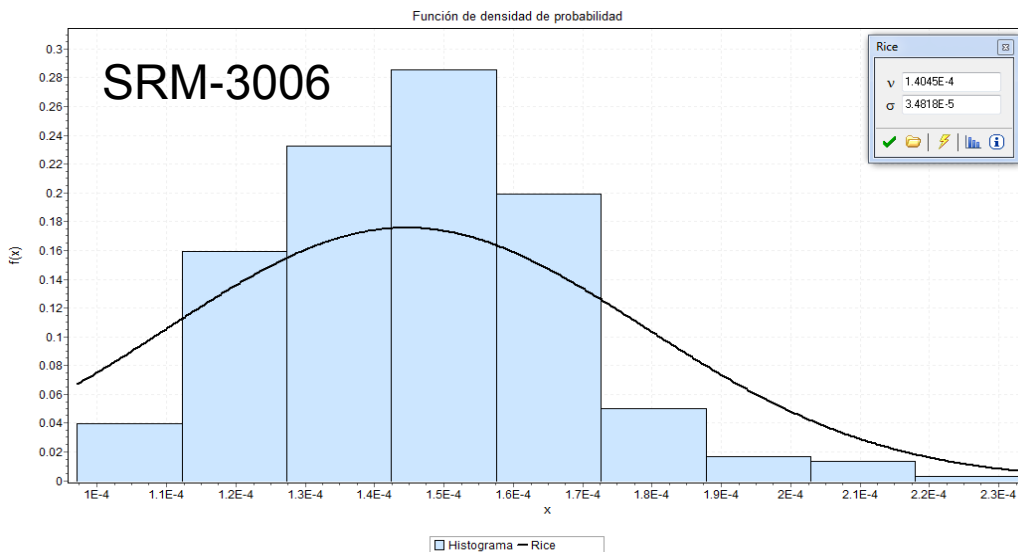


Figura 4.12: Histograma de las muestras del SRM-3006 en valores de amplitud.
Fuente: Elaboración propia

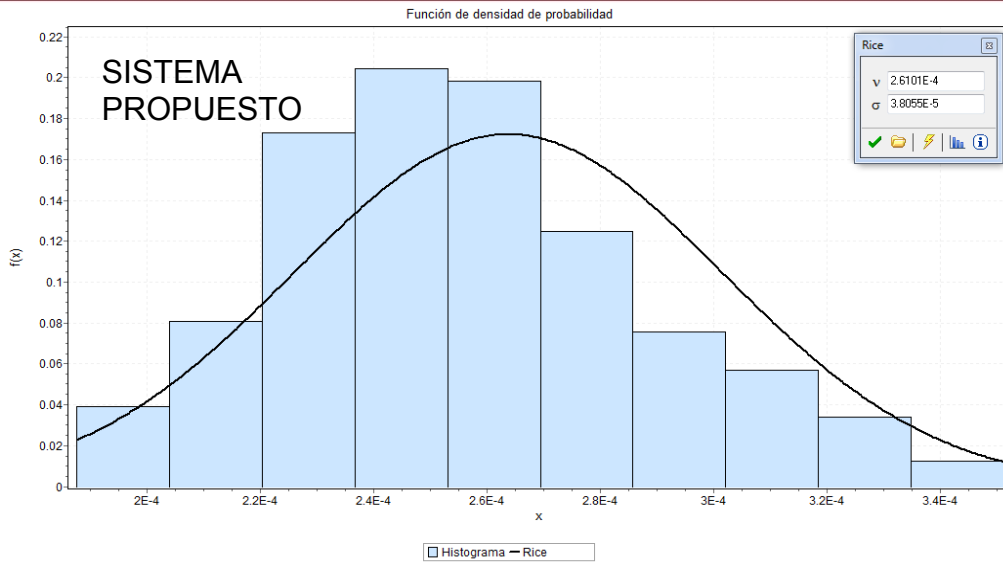


Figura 4.13: Histograma de las muestras del sistema propuesto en valores de amplitud.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.12 y Figura 4.13 se observa una potencia variante en el tiempo y se aproximó ambos histogramas a la distribución Rice, la cual es representada por la curva de color negro. Según las referencias [50] [51] [52], para poder aproximar las mediciones a una distribución conocida, se debe realizar un muestreo mínimo de 100 000 mediciones. En este caso, debido a que las muestras son mínimas sería muy prematuro mencionar que se asimilan a una distribución tipo Rice o tipo Rayleigh, es por ello que la aproximación a la distribución tipo Rice no encaja exactamente con sus respectivos histogramas.

4.5 PRESUPUESTO

Como ya se mencionó líneas arriba, para la implementación del sistema se tuvo que importar dos tarjetas de evaluación y adquirir los demás componentes. El presupuesto está descrito en el siguiente cuadro:

Descripción	Precio (\$)*
Microcontrolador Arduino UNO	33.82
Modulo GPS ITAED v1.1	47.35
Tarjeta de evaluación CN0150	69.43
Tarjeta de evaluación CN0178	65.25
Regulador de voltaje DC-DC LM2596	5.75
Bateria LiPO + Cargador**	108.22
Componentes electrónicos	33
Elaboración del chasis	33
Computadora personal ***	879.27
Gastos de envío	100
TOTAL	1375.09

Tabla 4.4: Costos para la elaboración del sistema

Fuente: Elaboración propia

- * Para el cambio de moneda de soles a dólares se consideró una tasa de cambio de 2.96 soles el dólar.
- ** El precio de la batería es un valor aproximado basado en la página de MercadoLibre.
- *** Se está considerando el costo de la computadora personal; sin embargo esta solo sería útil para cargar las calibraciones del sistema (a distintas frecuencia o para una mejora de la misma frecuencia) y para el caso de un drive test o alguna aplicación similar en la que se requiera una visualización de la data en tiempo real o su monitoreo las 24hx7días.

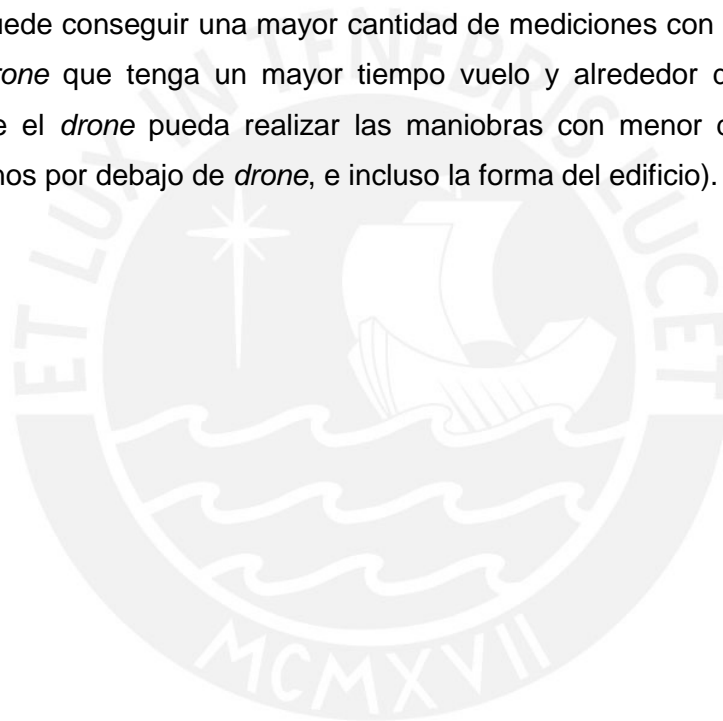
Considerando un tiempo invertido en la investigación del presente trabajo de 20 horas semanales por un lapso de 6 meses (480 horas invertidas en total o 20 días) y un costo por hora de S/. 10.00, tendríamos un costo por honorarios de S/.4800.00.

CONCLUSIONES

1. En la presente tesis se logró diseñar e implementar un sistema de medición de radiaciones no ionizantes sencillo, de funcionalidad práctica que opera en un rango de frecuencia de 1 MHz a 8 GHz y que puede montarse en un dispositivo aéreo no tripulado.
2. Se logró analizar el sistema para las radiaciones no ionizantes producidas por las antenas de telefonía celular en las bandas de retorno de 850 MHz y 1900 MHz dentro del campus de la universidad. Las antenas implementadas son de tipo microstrip.
3. Se validó los resultados medidos por el sistema a través de las calibraciones realizadas utilizando el generador de señales analógicas de la empresa Agilent y realizando una comparación con un analizador de campos electromagnéticos SRM-3006 de la empresa Narda, ambos equipos se encuentran disponibles en el laboratorio. Dicho analizador es utilizado por las entidades supervisoras y reguladoras del Perú para validar los límites máximos permisibles.
4. Los resultados de las pruebas realizadas muestran un nivel de densidad de potencia muy por debajo de los límites máximos permisibles, siendo el máximo nivel de densidad de potencia de $1.75 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$, el cual representa el 0.0362% del límite máximo permisible, para la prueba a nivel del suelo y un máximo de $164.69 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$, el cual representa el 3.41% del límite máximo permisible, para la prueba de vuelo con el *drone* alrededor de la antena a una distancia de 2 metros de radio, ambos en la banda de retorno de 1900 MHz.
5. Se concluye que el sistema propuesto puede ser de gran utilidad en distintas aplicaciones, como regulador de los LMP, análisis de rendimiento de la red en los *drive tests* sobre todo en puntos de difícil acceso e incluso como un sensor de punto fijo para los sistemas *standalone*.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar las calibraciones del sistema para todo el rango lineal de operación de la tarjeta de evaluación CN0150, con el fin de minimizar los errores de la medición.
2. Realizar las pruebas pertinentes de las antenas microstrip para calcular el valor exacto de su ganancia. Este tipo de antenas tienen una ganancia típica entre 5 a 8 dBi.
3. Se puede conseguir una mayor cantidad de mediciones con el uso de otro tipo de *drone* que tenga un mayor tiempo vuelo y alrededor de una antena en donde el *drone* pueda realizar las maniobras con menor dificultad (árboles, alumnos por debajo de *drone*, e incluso la forma del edificio).



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Andrei N. Tchernitchin, Rubén Riveros. “Efectos de la Radiación Electromagnética sobre la Salud,” Cuad Méd Soc, Chile., pp. 221-234, 2004. [WEB]
http://cms.colegiomedico.cl/Magazine%5C2004%5C44%5C4%5C44_4_5.pdf
- [2] Martín Inzaurrealde, Jorge Isi, Javier Garderes. “Telefonía Celular,” Universidad de la Republica, Montevideo - Uruguay., Facultad de Ingeniería. [WEB]
<http://cyberkamate.host56.com/celul.pdf>
- [3] World Health Organization. [2014, 10], Ionizing radiation: What is Ionizing Radiation? [WEB]
http://www.who.int/ionizing_radiation/about/what_is_ir/en/
- [4] World Health Organization. [2014, 10], Health topics: Radiation, Non-ionizing [WEB]
http://www.who.int/topics/radiation_non_ionizing/en/
- [5] Víctor Cruz Ornetta. “La Telefonía Móvil y su Salud,” Instituto Nacional de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones, Perú. [WEB]
http://www.who.int/peh-emf/publications/en/esp_mobphonehealthbk.pdf
- [6] Sandra Ocaña. “Telefonía celular (móvil). Funcionamiento y generaciones,” [WEB]
<http://www.mailxmail.com/curso-telefonía-celular-movil-funcionamiento-generaciones>
- [7] Pablo Guzmán Fernández. “Estudio de las antenas celulares dentro de una red de telefonía móvil,” Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2009. Facultad de Ingeniería. [WEB]
http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb2009/pb2009_004.pdf
- [8] Fernando Arturo Gallegos Paz. “Software aplicativo para el análisis predictivo del comportamiento de los niveles de campo eléctrico y la distribución de potencia producida por las estaciones de telefonía móvil,” Universidad Católica de Santa María, Perú, 2009. Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales. [WEB]
http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/04/3.1_Trabajo_de_Tesis.pdf
- [9] Organización Mundial de la Salud [2014, 10], Acerca de la OMS [WEB]
<http://www.who.int/about/es/>

- [10] Organización Mundial de la Salud [2014, 10], Campos electromagnéticos (CEM).
¿Qué es el Proyecto CEM? [WEB]
http://www.who.int/peh-emf/project/EMF_Project/es/index1.html
- [11] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) [2014, 11],
AIM, STATUS & HISTORY [WEB]
<http://www.icnirp.org/en/about-icnirp/aim-status-history/index.html>
- [12] U.S. Food and Drug Administration (FDA) [2014, 11], About FDA. What We Do [WEB]
<http://www.fda.gov/AboutFDA/WhatWeDo/default.htm>
- [13] U.S. Food and Drug Administration (FDA) [2014, 11], Cell Phones [WEB]
<http://www.fda.gov/Radiation-emittingProducts/RadiationEmittingProductsandProcedures/HomeBusinessandEntertainment/CellPhones/default.htm>
- [14] Federal Communications Commission (FCC) [2014, 11], What We Do [WEB]
<http://www.fcc.gov/what-we-do>
- [15] World Health Organization [2014, 11], International Agency for Research on Cancer.
“IARC CLASSIFIES RADIOFREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS AS POSSIBLE
CARCINOGENIC TO HUMANS,” 2011. [WEB]
http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2011/pdfs/pr208_E.pdf
- [16] Ministerio de Transportes y Comunicaciones [2014, 11], Preguntas frecuentes. [WEB]
http://www.mtc.gob.pe/portal/faq.htm#it2_2
- [17] Ministerio de Transportes y Comunicaciones [2014, 11], Aprueban Reglamento de la
Ley N 29022, Ley para la Expansión de Infraestructura en Telecomunicaciones. [WEB]
http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_1335.pdf
- [18] “MTC: Se necesitarán 22 mil antenas de celulares al 2016,” (2014, 4 de Junio). El
Comercio [WEB]
<http://elcomercio.pe/economia/peru/mtc-se-necesitaran-22-mil-antenas-celulares-al-2016-noticia-1734002>
- [19] Programa de televisión nacional Panorama (2013, 6 de Octubre). “Antenas bajo la
mira: radiación por telefonía móvil causa temor en San Isidro” [Cinta de Video]. Lima,

Perú. [WEB]

<http://www.panamericana.pe/panorama/salud/138412-antenas-mira-radiacion-telefoniamovil-causa-temor-san-isidro>

[20] J. D. Kraus. Electromagnetic International Edition. 4th ed. New York: McGraw-Hill, Inc. 1992.

[21] Davida Coggon. Health risks from mobile phone base stations, 2006. [WEB]
<http://oem.bmj.com/content/63/5/298.full>

[22] Dayang Azra Awang Mat, Franky Kho, Annie Joseph, Kuryati Kipli, Shafrida Sahrani, Kasumawati Lias, Ade Syaheda Wani Marzuki. "Electromagnetics Radiation from Mobile Phone near Ear-skull Region," IEEE, pp. 1-5, Mayo 2010.

[23] Aiman Ismail, Norashidah Md Din, Md Zaini Jmaluddin, Nagaletchuni Balasubramaniam. "Electromagnetic Assessment for Mobile Phone Base Stations at Major Cities in Malaysia," IEEE, pp. 150-153, Diciembre 2009.

[24] Okonigene R.E. "Siting of GSM Base Station Antenna And Its Health Consequences," IEEE, pp. 613-618, 2010.

[25] "Un nuevo estudio relaciona el uso de los celulares con la aparición del cáncer," (2013, 6 de Setiembre). El Comercio. [WEB]
<http://www.slideshare.net/angieivo/cancer-25964540>

[26] Zunwei Wang. "The Public Electromagnetic Radiation Environment Comparison between China and Germany," IEEE, pp. 317-320, 2011.

[27] ICNIRP. "ON HEALTH ISSUES RELATED TO THE USE OF HAND-HELD RADIOTELEPHONES AND BASE TRANSMITTERS," ICNIRP PUBLICATION, 1996.
[WEB]

<http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPradiotelephones.pdf>

[28] Dhiraj Kumar Singh, "Exposure Limits for Non-Ionizing Radiation," IEEE, pp. 447-450, Febrero 2006.

[29] UNITED STATES DEPARTMENT OF LABOR, [2014, 10]. Occupational Safety & Health Administration. Electromagnetic Radiarion: Field Memo. [WEB]

https://www.osha.gov/SLTC/radiofrequencyradiation/electromagnetic_fieldmemo/electromagnetic.html#section_2

[30] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, [2014, 11]. NOSOTROS [WEB]
<http://www.mtc.gob.pe/portal/nosotros.htm>

[31] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, [2014, 11]. REGLAMENTOS DE ORGANIZACIÓN Y FUNCIONES DEL MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES [WEB]
http://www.mtc.gob.pe/portal/home/transparencia/mlegal/rof/ROF_MTC.pdf

[32] Instituto Nacional de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones, [2014, 10]. Equipos. [WEB]
<http://rni.inictel-uni.edu.pe/index.php/equipos>

[33] Operating Manual of EMR-20/-30, EMR-21, EMR-200/-300 Radiarion Meters. [2014, 11] [WEB]
http://www.narda-sts.us/pdf_files/OperatingManuals/EMR-Series-Manual.pdf

[34] Operating Manual of SRM-3006. Selective Radiation Meter. [2014, 11] [WEB]
http://www.narda-sts.us/pdf_files/OperatingManuals/SRM3006_Manual.pdf

[35] User's Manual of AREA MONITOS BROADBAND AMB-8057. [2014, 11] [WEB]
<http://www.gruppompb.uk.com/public/upload/USERS-MANUAL-8057-20119-2%2011.pdf>

[36] User's Manual of EFA-300 Field Analyzer. [2014, 11] [WEB]
https://www.atecorp.com/ATECorp/media/pdfs/data-sheets/Narda_EFA300_DataSheet.pdf

[37] Wurl A. Hapsarl, Anil Umesh, Mikio Iwamura. "Minimization of Drive Test Solution in 3GPP," IEEE, pp. 28-36, Junio 2012.

[38] Technical Report. "Study on Minimization of drive-tests in Next Generation Networks" [2014, 10] [WEB]
<http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/36805-900.pdf>

[39] James H. Schaffner, Arthur Bekaryan, Hyok J. Song, Timothy Talty, Duane Carper, Eray Song, Timothy Talty, Duane Carper, Eray Yasan, Ayman Duzdar. "A Drive Test Measurement Approach to Characterize On-Vehicle 2x2 LTE-MIMO Antennas," IEEE, pp. 85-88, 2013.

[40] Cristian Castro. "INTRODUCCIÓN AL PLANEAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN RF DE UNA RED MÓVIL," Guía del laboratorio de comunicaciones móviles de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

[41] Instituto Nacional de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones, [2014, 10]. Que son Radiaciones No Ionizantes. [WEB]
<http://rni.inictel-uni.edu.pe/index.php/que-son-radiaciones-no-ionizantes>

[42] Pedro Valera. [2014, 10]. "La telefonía celular en el Perú: el espectro con las operadoras nuevas," Octubre 2014. [WEB]
<http://blog.pucp.edu.pe/item/189148/la-telefon-a-celular-en-el-per-el-espectro-con-las-operadoras-nuevas>

[43] Arduino [2014, 11]. WHAT IS ARDUINO? [WEB]
<http://www.arduino.cc/>

[44] Arduino [2014, 11]. Arduino Uno [WEB]
<http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>

[45] RoyalTek [2014, 10]. REB-4216 Operational Manual [WEB].
ftp://imall.iteadstudio.com/IM120417017_Arduino_GPS_shield/REB_4216_operational_manual_v0.55_20120912.pdf

[46] CHANGHONG [2014, 10]. GPS ACTIVE 28Db MAGNETIC ANTENNA DATASHEET [WEB].
<http://www.adafruit.com/datasheets/GPS-01.pdf>

[47] Digi-Key [2014, 08]. RF Detectors: ADL5906 [WEB]
http://www.digikey.com/product-search/en?Keywords=adl5906&WT.z_header=search_go

[48] Digi-Key [2014, 08]. RF Detectors: ADL5902 [WEB]
<http://www.digikey.com/product-search/en/rf-if-and-rfid/rf-detectors/3539651?k=adl5902>

[49] Digi-Key [2014, 08]. RF Detectors: ADL8319 [WEB]
http://www.digikey.com/product-search/en?Keywords=ad8319&WT.z_header=search_go

[48] TEXAS INSTRUMENTS [2014, 10]. LM2596 VOLTAGE REGULATOR DATASHEET [WEB].
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>

[49] A. Castro Lechtaler, A. Foti, C. Guaraglia, O. Campastro. “Evaluación y desarrollos de Monitores de Radiaciones No Ionizantes (RNI),” Congreso de Microelectrónica Aplicada, pp. 185-190, 2010.

[50] Mariano Molina-García, Alfonso Fernández-Durán, José. Alonso. “Application of Extreme Value Distribution to Model Propagation Fading in Indoor Mobile Radio Environments,” IEEE, pp. 97-100, Enero 2008.

[51] Ghassan S. Dahman, Robert J. C. Bultitude, Roshdy H. M. Hafez. “Identifying and Modelling Multipath Clusters in Propagation Measurement Data,” IEEE, pp. 1-5, Setiembre 2010.

[52] William F. Young, Kate A. Remley, Christopher L. Holloway, Galen Koepke, Dennis Camell, John Ladbury, Colton DUnlap. “Radiowave Propagation in Urban Environments with Application to Public-Safety Communications,” IEEE, pp. 88-107, Agosto 2014.

[53] Dr. Silvia Caino, Paula Adamo, Enrique O. Abeyá-Gilardon, Horacio Lejarraga. “Comparación de dos técnicas de medición de peso en niños menores de cuatro años,” SCIELO, Mayo/Junio 2006 [WEB]

http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S0325-00752006000300005&script=sci_arttext