

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Sección de Ingeniería de Redes y Telecomunicaciones



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

***“DISEÑO DE RADIOENLACE MICROONDAS ISLA SAN LORENZO – CAMPUS
PUCP PARA EL PROYECTO PERU MAGNETO”***

Tesis para optar el título de
Ingeniero de las Telecomunicaciones

Presentado por el bachiller:

Ricardo Erick Díaz Vargas

ASESOR:

Jorge Arturo Heraud Pérez

Lima, diciembre del 2015



*A Dios por darme la vida y a mi familia,
quienes me apoyaron en todo mi camino,
por aquellas personas con las que cruzó mi destino
y ayudaron a forjar esta historia.*



RESUMEN

El presente trabajo se centra en la implementación de una red de transporte para la Integración de la estación PM-06, ubicada en la Isla San Lorenzo, del Proyecto “Perú-Magneto” con la red privada del Instituto de Radioastronomía (INRAS) de la Pontificia Universidad Católica del Perú. La finalidad del proyecto es que los datos recogidos por los equipos instalados en la isla puedan ser leídos, tabulados, analizados y posteriormente estos sirvan para la predicción de movimientos sísmicos.

En el capítulo 1 se muestran conceptos de propagación de ondas en el espacio libre, consideraciones y cálculos a tener en cuenta para conocer atenuaciones, confiabilidad, desvanecimiento, ganancias y pérdidas, entre otros.

En el capítulo 2 se realizó un análisis de la realidad de la Isla San Lorenzo y su sistema de comunicación actual. Esta información se usará para la determinación de la velocidad de señalización (*bit rate*) adecuada para las condiciones del servicio actuales y futuras.

En el capítulo 3 se determinó el mejor sistema de transmisión (fibra óptica, satélite y microondas) y la banda de frecuencia a usar teniendo en cuenta que la red de transporte a diseñar deberá ser escalable para poder soportar proyectos futuros.

En este punto se realizaron cálculos teóricos, y también cálculos apoyados por aplicaciones de software especializadas en el diseño de enlaces, las cuales se basan en modelos estadísticos y parámetros electromagnéticos.

En el capítulo 4 se describe las pruebas de campo con el enlace elegido (microondas), para las que se tuvo en cuenta la distancia del enlace, el clima, el tipo de zona (geografía) y la existencia o no de redes de comunicación interferentes con el enlace.

ÍNDICE

ÍNDICE	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABLAS	ix
INTRODUCCIÓN	x
CAPÍTULO 1	
Marco Teórico	1
1.1 Consideraciones sobre la Propagación por onda de espacio	1
1.1.1. Fenómenos de las Ondas Electromagnéticas	3
1.2. Características de los radioenlaces de microondas por visibilidad directa, LOS ..	8
1.2.1. Equipamiento de Radio	11
1.2.2. Normativa sobre radio enlaces en el Perú y a nivel mundial	12
1.3. Características de la Distorsión: Ruido e Interferencia	14
1.3.1. Ruido.....	14
1.3.2. Interferencia.....	15
CAPÍTULO 2	
Estado Actual y Requerimientos del Enlace para la Estación PM-06.	16
2.1. Isla San Lorenzo.....	16
2.1.1. Descripción Geográfica del Entorno	16
2.1.2. Geología	17
2.1.3. Tectónica del Sector Isla San Lorenzo	19
2.1.4. Acceso a la Isla San Lorenzo.....	20
2.1.5. Proyecto “Perú-Magneto”	20
2.2. Justificación de la Instalación.....	21
2.3. Requerimientos de la Red Expandida.....	22
2.3.1. Servicios a Implementar en la estación PM-06	22
2.3.2. Cálculo de Ancho de Banda.....	22
2.3.3. Canalización de las Redes: VLAN	23
CAPÍTULO 3	
Diseño y Simulación del Radio Enlace Isla San Lorenzo – PUCP	25
3.1. Diseño del Enlace.....	25
3.1.1. Locación de los Nodos:	25
3.1.2. Tecnologías	27
3.1.3. Comparación de Parámetros en Bandas.....	28
3.1.4. Link Power Budget	41
3.1.5. Propuesta	41
3.2. Diseño de la Red de Energía	45
3.2.1. Propuesta	46
3.3. Topología de la Red	48
3.3.1. Propuesta	49
3.4. Análisis de Ruido	50
CAPÍTULO 4	
Pruebas y Resultados	52
4.1. Prueba del Enlace	52
4.1.1. Prueba 1: Ancho de Banda	52
4.1.2. Prueba 2: Potencia	56
4.1.3. Prueba 3: Margen del Sistema.....	59
4.2. Prueba del Sistema de Energía	61
4.2.1. Estado del Sistema de Energía.....	62

CONCLUSIONES	65
RECOMENDACIONES	67
BIBLIOGRAFÍA	68



LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Tipos de Propagacion desde una fuente isotropica	1
Figura 2:	Propagación por Línea de Vista (ITU-R P.452).....	2
Figura 3:	Relación entre la Atenuación, Frecuencia y Tasa de Lluvia	3
Figura 4:	Atenuación Atmosférica Promedio contra Frecuencia (Polarización Horizontal)	4
Figura 5:	Atenuación de la onda de espacio por constituyentes atmosféricos a presión 1, temperatura 15K y Densidad de Vapor de Agua a 7.5gm-3... 4	4
Figura 6:	Refracción de las ondas de radio por la atmosfera.....	5
Figura 7:	Geometría asociada con la Ley de Snell-Descartes	6
Figura 8:	Onda directa y reflejada sobre la superficie terrestre.	7
Figura 9:	Difracción de la energía de un frente de onda hacia la zona de sombra detrás de un obstáculo; los círculos punteados indican el inicio de ondas esféricas originadas de cada punto del frente de onda de acuerdo al principio de Hyugens.....	7
Figura 10:	Enlace de Microondas Simple de Izquierda a Derecha	8
Figura 11:	Sistema de radio básico.....	9
Figura 12:	Radio Enlace en RadioMobile.....	11
Figura 13:	Regiones y Zonas del Mundo	13
Figura 14:	Ruido Natural y Artificial.....	15
Figura 15:	Principales Caletas, Playas y Puntas de la Isla San Lorenzo.....	16
Figura 16:	Mapa de Unidades Litológicas.....	18
Figura 17:	Mapa de Unidades Geomorfológicas	19
Figura 18:	VLAN's como Redes Logicas Definidas	24
Figura 19:	Mapa del Enlace.....	26
Figura 20:	Solapamiento de los canales en la banda de 2.4 GHz	31
Figura 21:	Canales en todas las regiones para la banda de 2.4 GHz.....	32
Figura 22:	Canales disponibles según región	32
Figura 23:	Solapamiento de los canales en la banda de 5.8 GHz	33
Figura 24:	Simulación del Enlace para la Banda de 2.4 GHz en RadioMobile	38
Figura 25:	Simulación del Enlace para la Banda de 5.8 GHz en RadioMobile	38
Figura 26:	Simulación del Enlace para la Banda de 2.4 GHz en AirLink	39
Figura 27:	Simulación del Enlace para la Banda de 5.8 GHz en AirLink	40
Figura 28:	MikroTik – BaseBox5	42
Figura 29:	Hyperlink – Antena con Reflector Dish	43

Figura 30: Hyper Link - Cable N - SMA.....	44
Figura 31: Simulación de la red de energía.....	45
Figura 32: Kyocera - Módulo Fotovoltaico	46
Figura 33: Sun Xtender – Batería VLRA.....	47
Figura 34: Controlador de Carga SunSaver-10	48
Figura 35: Diagrama de la Topología de Red entre el Campus PUCP y la Isla San Lorenzo.....	49
Figura 36: Prueba iPerf en Canal 5745 MHz.....	54
Figura 37: Prueba iPerf en Canal 5825 MHz.....	55
Figura 38: Prueba iPerf en Canal 5825 MHz.....	57
Figura 39: Prueba de Potencia en Canal 5825 MHz – AP	58
Figura 40: Prueba de Potencia en Canal 5825 MHz – Station.....	58
Figura 41: Margen Operativo del Sistema en Canal 5825 MHz – AP	60
Figura 42: Margen Operativo del Sistema en Canal 5825 MHz – Station	60
Figura 43: Formato de Muestra Estadística Diaria de los Valores de Energía.....	61
Figura 44: Estadísticas del Sistema de Energía – 11/11/15.....	62
Figura 45: Estadísticas del Sistema de Energía – 22/11/15.....	63
Figura 46: Estadísticas del Sistema de Energía – 01/12/15.....	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 1:	Dimensionamiento del Tráfico	23
Tabla 2:	Características de las Tecnologías.....	28
Tabla 3:	Modos HT20.....	35
Tabla 4:	Presupuesto de la Potencia del Enlace	41
Tabla 5:	MikroTik – BaseBox5	42
Tabla 6:	Hyperlink – Antena con Reflector Dish	43
Tabla 7:	Cable N - SMA	44
Tabla 8:	Costo del Enlace	44
Tabla 9:	Kyocera - Módulo Fotovoltaico	46
Tabla 10:	Sun Xtender – Batería VLRA.....	47
Tabla 11:	Controlador de Carga SunSaver-10	48
Tabla 12:	Costo de la red de energía	48
Tabla 13:	Parámetros del enlace obtenidos en el equipo MikroTik	56

INTRODUCCIÓN

El mundo siempre ha sido afectado por los fenómenos naturales, por lo que la humanidad persiste en tratar de desarrollar tecnologías que logren comprenderlos, y así lograr anticipar estos eventos y disminuir sus consecuencias. En el caso específico de este trabajo nos concentraremos en los fenómenos sísmicos, causantes de pérdidas tanto humanas como materiales.

El Perú se encuentra ubicado en el llamado “Cinturón de Fuego” del Pacífico, que concentra el 85% de la actividad sísmica mundial. Por otro lado, nuestro país es afectado por las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana. Por tanto, el Instituto de Radioastronomía (INRAS) de la Pontificia Universidad Católica (PUCP) ha decidido tomar la iniciativa de analizar el comportamiento de estos fenómenos sísmicos a través del proyecto de investigación “Perú Magneto”, dedicado al estudio de los fenómenos electromagnéticos vinculados a eventos sísmicos, con miras a contribuir al conocimiento global y a un eventual método fiable para la predicción de sismos.

Este proyecto cuenta actualmente con 10 estaciones ubicadas a lo largo de la costa del Perú. La conectividad de las estaciones se da a través del auspicio de la empresa Telefónica del Perú, que provee de comunicación con ayuda de su red celular. Sin embargo, la estación PM-06, ubicada en la Isla San Lorenzo frente a la costa de la Provincia Constitucional del Callao, posee problemas de comunicación, dada la pobre cobertura celular que tiene. La estación fue instalada en dicha isla dado a su provechoso entorno: no solo de investigación de los campos magnéticos generados previamente a un sismo, sino también de otros síntomas ligados a los fenómenos sísmicos, los que darían posibilidad a futuros proyectos.

El objetivo del presente trabajo es diseñar un modelo de radioenlace que se adecúe al contexto local limeño, el que presenta bandas de frecuencias saturadas, entornos con altos niveles de humedad y clima variable. Así, se busca aplicar este modelo para lograr un enlace confiable de comunicación entre la estación PM-06 en la Isla San Lorenzo y el Centro de Investigación del Instituto de Radioastronomía. [1]

CAPÍTULO 1

Marco Teórico

1.1 Consideraciones sobre la Propagación por onda de espacio

Se denomina onda de espacio a aquella trayectoria emitida por una fuente isotrópica que viaja directamente (*directa*) del transmisor al receptor conjuntamente con un rayo reflejado (*reflejada*) por el suelo.

1.7 Radio Wave Propagation Near the Earth

9

Fig. 1.4 How does the radiation from an isotropic source reach a receiver?

spherical propagation from an isotropic radiator

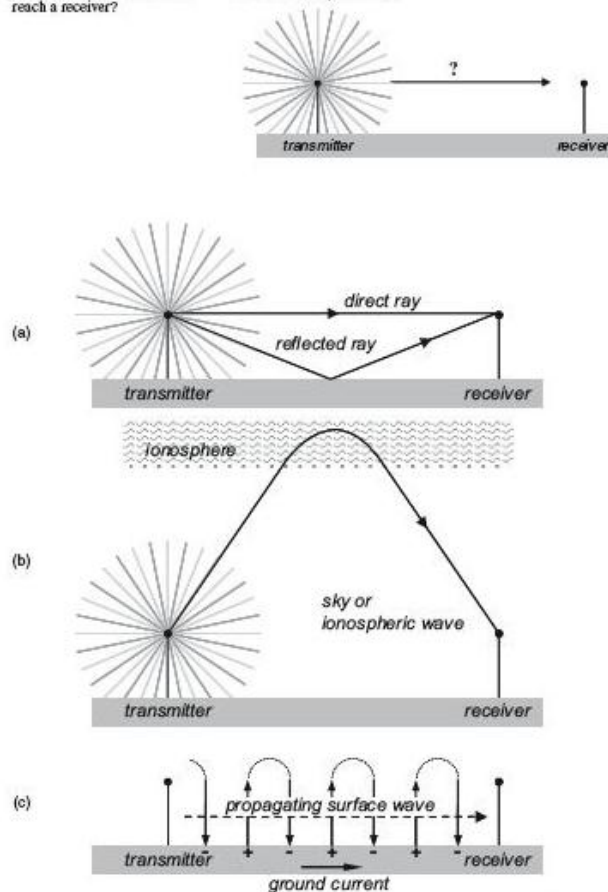


Figura 1: Tipos de Propagación desde una fuente isotrópica.
Fuente: [2]

Este tipo de propagación usa frecuencias superiores a 30 MHz, por sus grandes anchos de banda disponibles permiten implementar aplicaciones y servicios como: Radio FM, televisión, GPS, LAN inalámbrica, WiFi, y redes celulares. La propagación por línea de vista es una gran limitación para los servicios de onda de espacio; sin embargo, estas pueden resolverse mediante repetidores o el uso de comunicaciones satelitales.

En un sistema de radio punto-a-punto, un único transmisor se comunica con un único receptor. Tales sistemas generalmente usan antenas de alta ganancia con posiciones fijas para maximizar la potencia recibida y minimizar la interferencia que podrían estar operando aledañamente en el mismo rango de frecuencia. Típicamente son usados para comunicaciones satelitales, transferencia de data dedicada por compañías de utilidades, y *backhaul* de las estaciones base celulares. Estos sistemas son ventajosos porque son mucho menos costosos que la implementación de redes con gran ancho de banda de fibra óptica subterránea

Se dirá que la propagación es por línea de vista cuando no se encuentren obstáculos en el primer elipsoide de Fresnel y los efectos del fenómeno de difracción sean despreciables. [3]

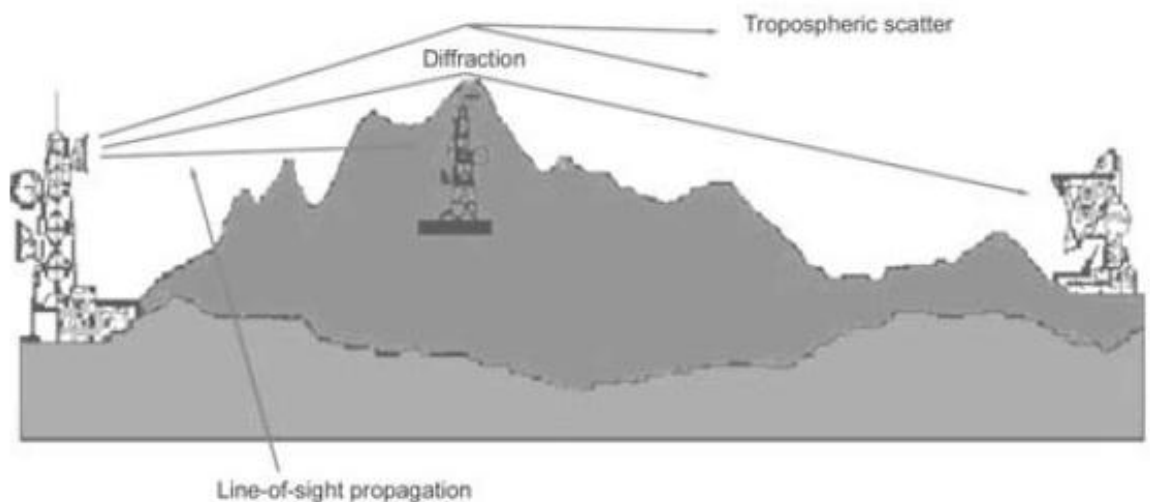


Figura 2: Propagación por Línea de Vista (ITU-R P.452)
Fuente: [3]

1.1.1. Fenómenos de las Ondas Electromagnéticas

Efectos de la Lluvia en la Propagación:

La lluvia puede ser un problema para la propagación de ondas de espacio para frecuencias mayores a 4 GHz. Principalmente, la lluvia causa atenuación de la señal transmitida por absorción. Gotas de lluvia no esféricas pueden generar rotación en la polarización durante la propagación.

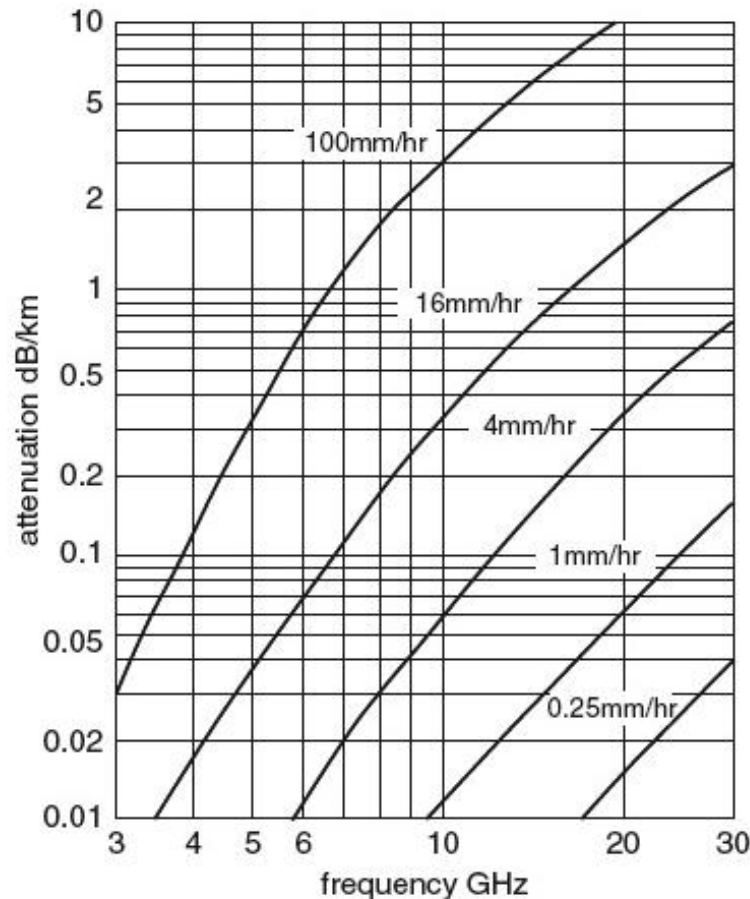


Figura 3: Relación entre la Atenuación, Frecuencia y Tasa de Lluvia
Fuente: [2]

Atenuación Atmosférica:

Es un efecto atmosférico, causado principalmente por la absorción de la energía de microondas por el vapor de agua u oxígeno molecular. La atenuación se toma como despreciable para frecuencias menores a 12 GHz. La máxima absorción ocurre cuando la frecuencia coincide con una de las resonancias magnéticas del agua u oxígeno, entonces la atenuación atmosférica tiene distintos picos a estas frecuencias.

Las frecuencias afectadas se pueden ver en las figuras siguientes:

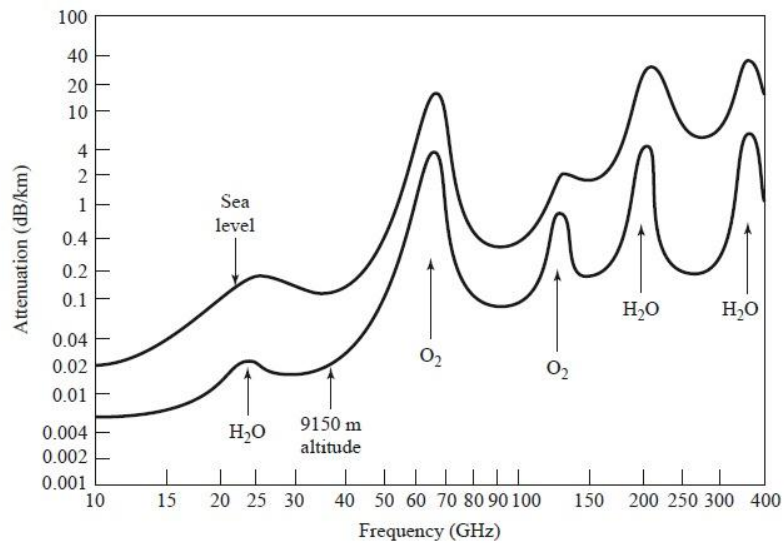


Figura 4: Atenuación Atmosférica Promedio contra Frecuencia (Polarización Horizontal)
Fuente: [4]

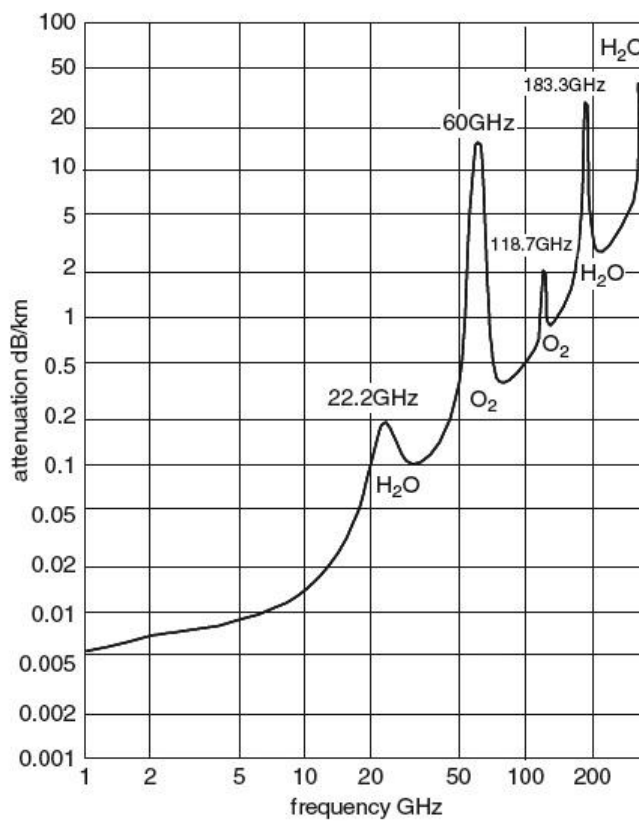


Figura 5: Atenuación de la onda de espacio por constituyentes atmosféricos a presión 1, temperatura 15K y Densidad de Vapor de Agua a 7.5gm-3
Fuente: [2]

Dispersión:

Cuando la velocidad de fase y la atenuación de un medio son constantes, es decir, que no cambian con la frecuencia, entonces la fase de la señal que contiene más de una componente de frecuencia no será distorsionada. Si la velocidad de fase es diferente para frecuencias distintas, entonces las componentes de frecuencia individuales no mantendrán sus relaciones originales de fase a lo largo de su transmisión en el medio y ocurrirá una distorsión de la señal llamada dispersión.

Refracción:

La permitividad relativa, unidad adimensional definida como la relación entre la permitividad del material o medio y la permitividad en el vacío:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad \text{Fm}^{-1}$$

Ecuación 1: Permitividad
Fuente: [4]

Es cercana a la unidad para la atmósfera, pero realmente es una función de la presión del aire, temperatura y humedad. Un resultado empírico que es útil para frecuencias microondas está dado por:

$$\epsilon_r = \left[1 + 10^{-6} \left(\frac{79P}{T} - \frac{11V}{T} + \frac{3.8 \times 10^5 V}{T^2} \right) \right]^2$$

Ecuación 2: Permitividad Relativa
Fuente: [4]

Esto demuestra que la permitividad generalmente decrece (acercándose a la unidad) en cuanto la altitud aumenta dado que la presión y humedad decaen con la altura más rápido de lo que lo hace la temperatura. Este cambio en la permitividad con la altitud causa a las ondas de radio que se curven hacia la Tierra, como se muestra en la Figura 6.

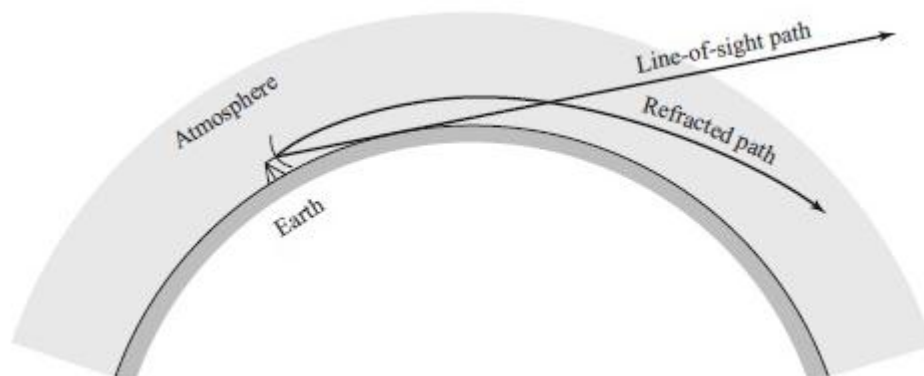


Figura 6: Refracción de las ondas de radio por la atmósfera
Fuente: [4]

La refracción no solo lleva a un rango extendido, en casos extremos puede llegar a una propagación anómala que lleva a la onda viajera por muy largas distancias. Esto es explicado por los cambios en el perfil del índice de refracción vertical de la atmósfera y cómo esta afecta a la onda. [2]

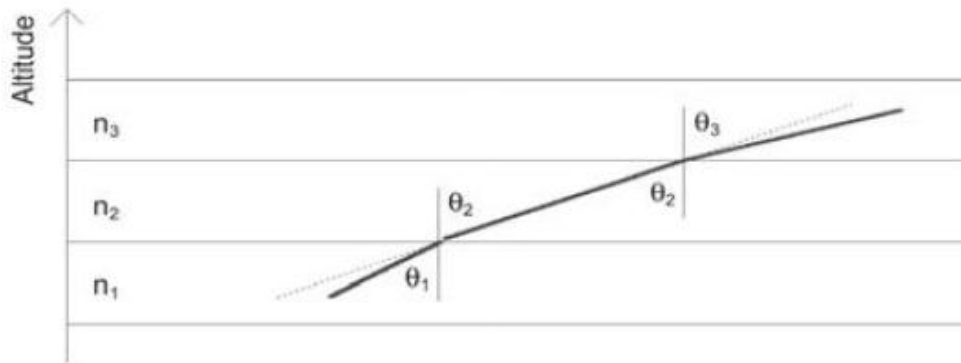


Figura 7: Geometría asociada con la Ley de Snell-Descartes
Fuente: [3]

Reflexión:

La reflexión es un fenómeno por el cual las ondas cambian de dirección debido a la presencia de una superficie de acuerdo a la ley de Snell-Descartes. Se llama reflexión difusa si es que toma lugar sobre una superficie áspera. [3]

El efecto más obvio de la presencia de suelo en la propagación de radiofrecuencia y microondas es la reflexión de la superficie de la Tierra, sea mar o tierra. La onda reflejada es generalmente más pequeña en amplitud que la onda directa por la larga distancia que viaja, el hecho es que generalmente irradia de la región del lóbulo lateral de la antena transmisora y el suelo no es un reflector perfecto. Sin embargo, la señal recibida en el receptor será el vector suma de dos componentes de onda y podría ser mayor o menor que la onda directa sola. Debido a que las distancias involucradas son normalmente muy largas en términos de longitud de onda eléctrica, aún una pequeña variación en la permitividad de la atmosfera puede causar desvanecimiento (fluctuación a largo plazo) o *centilación* (fluctuación a corto plazo) en la fuerza de la señal. Estos efectos también pueden ser causados por reflexiones y variaciones no homogéneas en la atmosfera. [4]

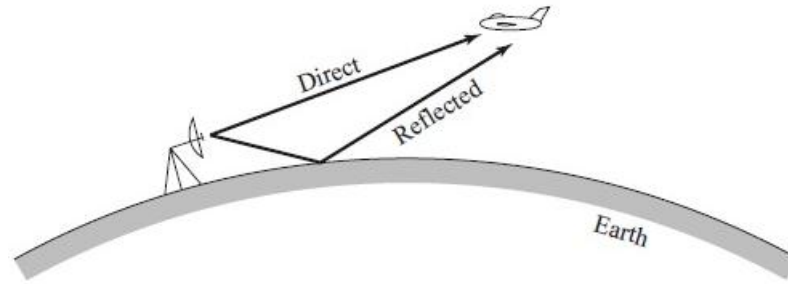


Figura 8: Onda directa y reflejada sobre la superficie terrestre.
Fuente: [4]

Difracción:

Otro efecto del suelo es la difracción, donde una onda de radio dispersa energía en la vecindad del límite de la línea de vista en el horizonte, dando un rango ligeramente más lejano al horizonte. Este efecto es usualmente muy pequeño para frecuencias de microondas. Por supuesto, cuando obstáculos como cerros, montañas, o construcciones están en el camino de propagación, los efectos de difracción son más fuertes. [4]

Las ondas viajan como frentes de onda esféricas transversales, en el receptor estas se estiman como frentes de onda planas transversales a la dirección de propagación. Cuando se encuentran con un obstáculo estas son difractadas, un fenómeno explicado por el principio de Huygens, que dice que cada punto del frente de onda puede ser tomado como un radiador isotrópico, así que el comportamiento futuro del frente de onda puede ser sintetizado de la interferencia entre estos radiadores secundarios. [2]

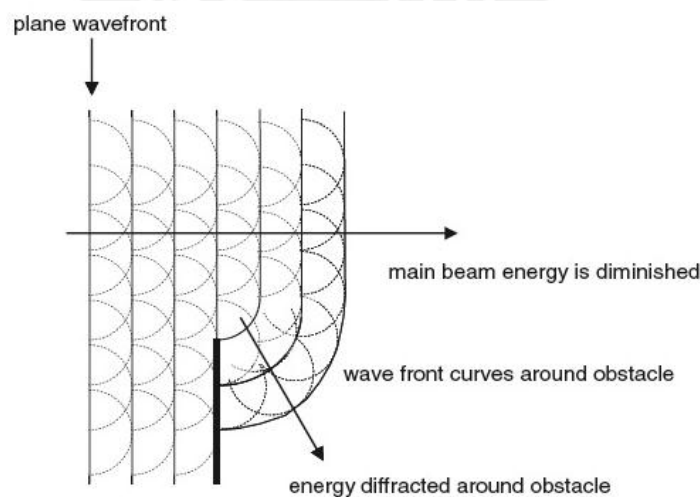


Figura 9: Difracción de la energía de un frente de onda hacia la zona de sombra detrás de un obstáculo; los círculos punteados indican el inicio de ondas esféricas originadas de cada punto del frente de onda de acuerdo al principio de Huygens.
Fuente: [2]

1.2. Características de los radioenlaces de microondas por visibilidad directa, LOS

Portadoras de banda VHF (30 a 300 MHz) o superiores son necesarias para soportar anchos de banda robustos requeridos para aplicaciones digitales de alta velocidad. Portadoras de 10 MHz y superiores necesitan de anchos de banda de 1 GHz o más para soportar múltiples servicios simultáneamente. A estas frecuencias, la propagación sin guía serán ondas de espacio con línea de vista.

Al posicionar las estaciones base fijas, se recomienda posicionarlas en montañas u otras regiones de alto relieve para maximizar el rango y evitar fallas topográficas.

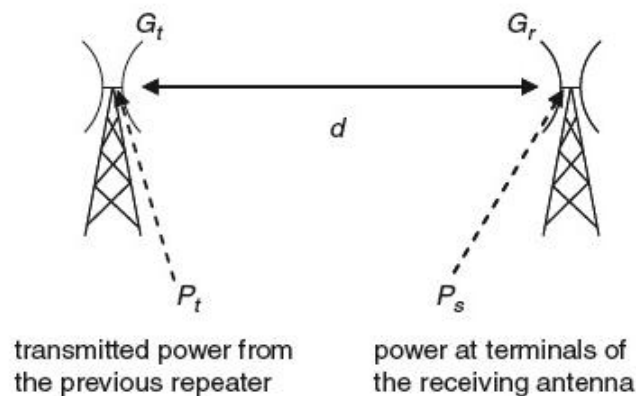


Figura 10: Enlace de Microondas Simple de Izquierda a Derecha
Fuente: [2]

Formula de Friss

En la Figura 11 se muestra un enlace general de sistema de radio, donde la potencia de transmisión es P_t , la ganancia de la antena de transmisión es G_t , la ganancia de la antena de recepción es G_r , y la potencia de recepción es P_r . Las antenas de transmisión y recepción están separadas por una distancia R .

En bases a cálculos con una antena anisotrópica integrada en una esfera de radio R y factor de eficiencia de radiación para transformar la directividad a ganancia y área efectiva se obtiene:

$$P_r = \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} P_t \text{ W.}$$

Ecuación 3: Formula de Friss

Se podrá estimar la máxima potencia de recepción posible mediante fórmula de Friis. Ya que esta podría disminuir por razones como: desacoplamiento de impedancias en ambas antenas, desacoplamientos de polarización entre antenas, efectos de propagación que lleven a atenuación o depolarización y efectos *multi-path* (multi-trayecto) que podrían causar parcial cancelación del campo recibido.

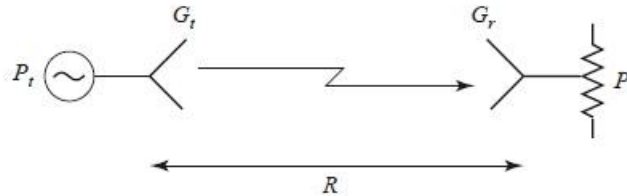


Figura 11: Sistema de radio básico
Fuente: [4]

Atenuación del Enlace (*Link Budget*)

Los varios términos en la fórmula de Friis son comúnmente tabulados por separado en un *Link Budget*, donde cada uno de los factores pueden ser considerados individualmente en términos de sus efectos de red a la potencia recibida. Factores de pérdidas adicionales, como pérdidas en la línea o desacoplamiento de impedancias en las antenas, atenuación atmosférica, y desacoplamiento de polarización también pueden ser añadidos al *Link Budget*. Uno de los términos en un *Link Budget* es la pérdida por trayectoria (*Path Loss*), que define la reducción en la fuerza de la señal en el espacio libre para la distancia entre el transmisor y el receptor.

Pérdida por trayectoria:

$$L_0(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) > 0.$$

Ecuación 4: Pérdida por trayectoria

Con la previa definición de pérdida por trayectoria podemos establecer los términos restantes de la fórmula de Friis en el siguiente *Link Budget*.

Términos Adicionales

Hemos incluido las pérdidas por atenuación atmosférica y de línea. Añadiendo estos términos podemos tener la potencia recibida como:

Potencia de transmisión	P_t
Pérdida en línea de la antena transmisora	$(-) L_t$
Ganancia de la antena transmisora	G_t
Pérdida en el espacio libre	$(-) L_0$
Atenuación atmosférica	$(-) L_A$
Ganancia de la antena receptora	G_r
Pérdida en línea de la antena receptora	$(-) L_r$
Potencia de recepción	P_r

Margen del Enlace (*Link Margin*)

En sistemas de comunicaciones prácticos es deseable tener un nivel de potencia de recepción superior que el nivel umbral que se requiere para la mínima calidad de servicio aceptable. A esta diferencia se le denomina margen del enlace.

$$LM = P_r - P_{r \text{ min}} > 0$$

Este margen siempre debe ser positivo, y sus valores comunes varían entre 3 y 20 dB. Tener un margen de enlace razonable garantiza una robustez del sistema contra variables como: el desvanecimiento de la señal por el clima, desplazamiento de un usuario móvil, problemas por propagación multi-trayecto (*multi-path*), y otros efectos impredecibles que pueden degradar la performance del sistema y calidad de servicio.

Incrementar el margen del enlace normalmente implica un incremento en costo y complejidad, así que incrementos excesivos de este son evitados.

Otro nombre para este parámetro es “margen operativo del sistema”, término que utilizaremos posteriormente en este documento.

Cálculo del Enlace

El cálculo del enlace debe hacerse mediante modelos de propagación que serán proporcionados por software de simulación. Estos simuladores trabajarán con bases de datos geográficos que permitirán obtener información sobre el entorno geográfico en la trayectoria del enlace; así como también adicionar las variables climáticas, temporales, estacionales, y locales del contexto. También estará incluida en la simulación información de los equipos de transmisión utilizados para el radioenlace.

RadioMobile

Software libre de simulación de propagación que sigue el modelo Longley Rice (*Irregular Terrain Model*) y trabaja para las frecuencias de 20 a 20000 MHz. [5]

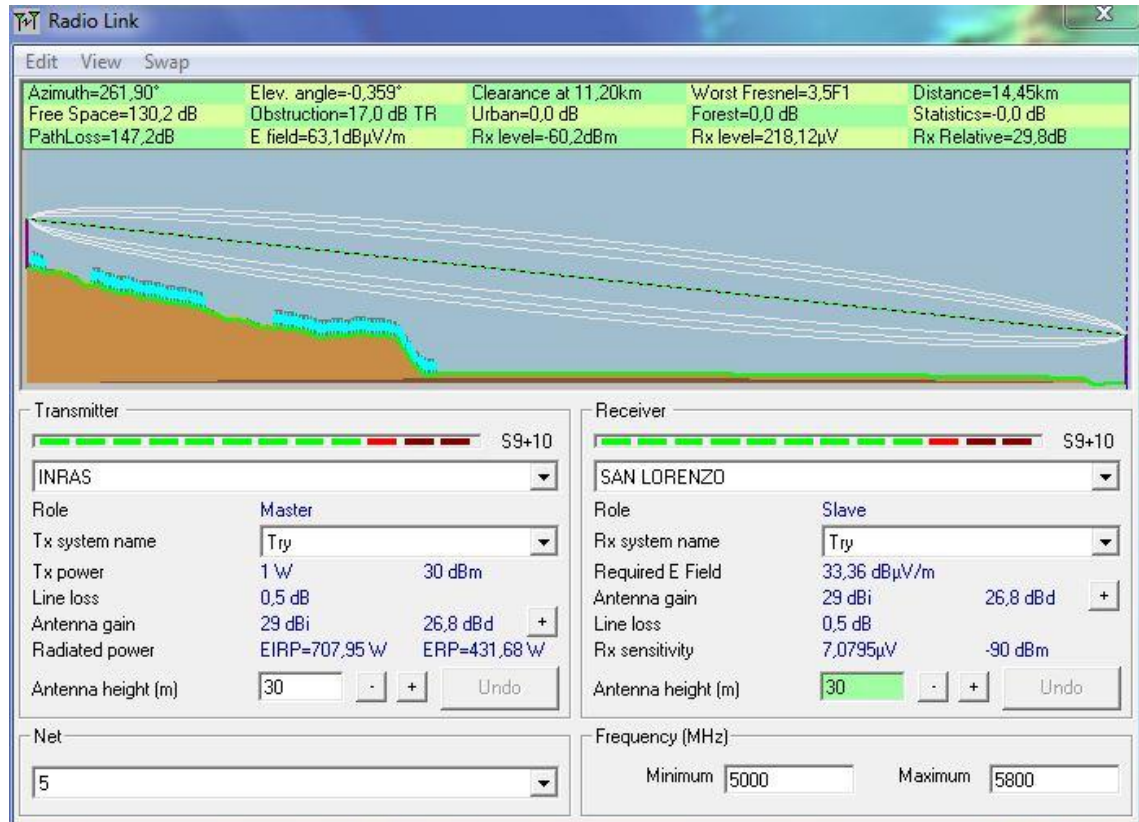


Figura 12: Radio Enlace en RadioMobile
Fuente: Propio

1.2.1. Equipamiento de Radio

Radio

Es el dispositivo transmisor que se encarga de emitir una señal, código o mensaje, a la vez este dispositivo será un receptor para dar la comunicación en ambos sentidos. Este será el encargado de dar la modulación y la codificación deseada a la señal transmitida.

Antena

Son dispositivos para la emisión o recepción de ondas de radio. Una antena emisora es un dispositivo alimentado por un generador de energía eléctrica a cierta frecuencia que emite ondas de radio en el espacio.

Las principales características de una antena son [3]:

- Patrón de Radiación
- Ganancia
- Directividad
- Ancho de Haz
- Apertura
- Polarización
- Altura Efectiva
- Impedancia

Torre

Estructura usada para soportar los equipos de telecomunicaciones necesarios para la comunicación.

1.2.2. Normativa sobre radio enlaces en el Perú y a nivel mundial

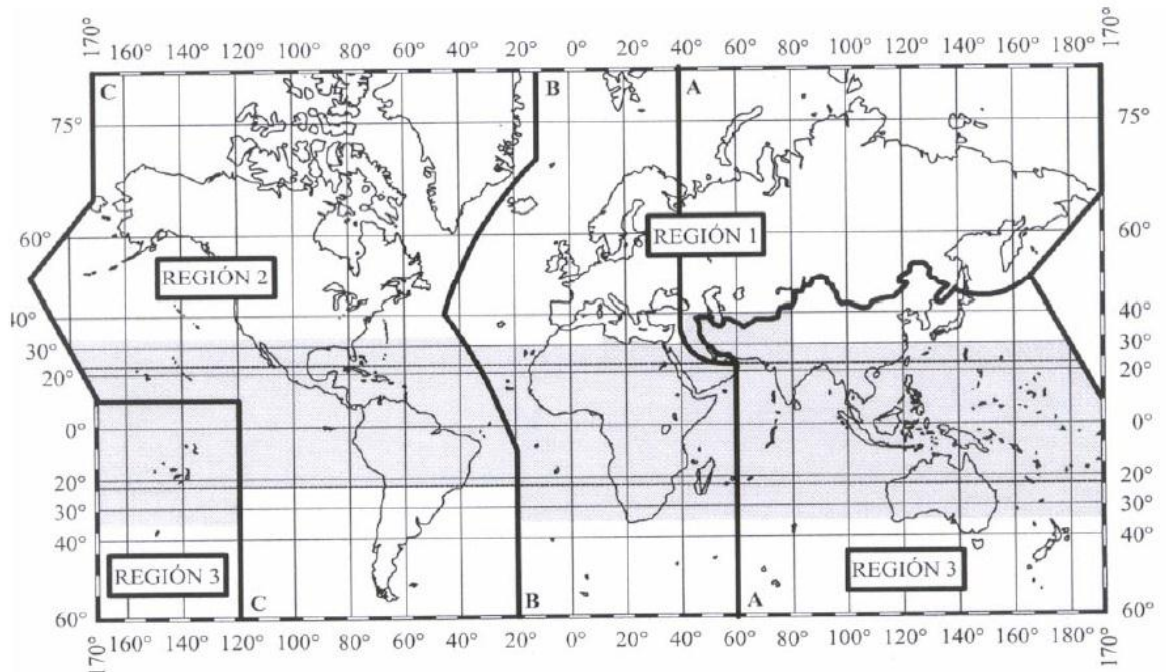
Plan Nacional de Atribución de Frecuencias:

Cada país posee un trámite para la consigna de licencias para enlaces de radio de microondas. Estos regulan los transmisores utilizados, y a la vez ofrece protección contra la interferencia que puede obtener el receptor. Los costos de licencia están vinculados con el tamaño del espectro ocupado por la señal y son comúnmente influenciados por los reguladores locales.

En el Perú esto está regulado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) dentro del Plan Nacional de Atribución de Frecuencias (PNAF). Esta asigna a cada banda servicios primarios, permitidos y secundarios. Los servicios primarios se diferencian de los permitidos en que los servicios primarios serán los primeros en escoger frecuencias.

Las ventajas que posee un servicio primario o permitido son protección y prevención contra interferencia perjudicial por un servicio secundario; sin embargo, los servicios secundarios pueden tener derecho a protección contra interferencias

perjudiciales pero solo de aquellas causadas por estaciones del mismo servicio u otros servicios secundarios con frecuencias asignadas posteriormente.



La parte sombreada representa la Zona Tropical

Figura 13: Regiones y Zonas del Mundo
Fuente: [6]

Aplicaciones ICM:

Las siguientes bandas están destinadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM):

- 13 553 – 13 567 kHz (frecuencia central 13 560 kHz),
- 26 957 – 27 283 kHz (frecuencia central 27 120 kHz),
- 40.66 – 40.70 MHz (frecuencia central 40.68 MHz),
- 2 400 – 2 500 MHz (frecuencia central 2 450 MHz),
- 5 725 – 5 875 MHz (frecuencia central 5 800 MHz), y
- 24 – 24.25 GHz (frecuencia central 24.125 GHz)

Los servicios de radiocomunicaciones que funcionan en estas bandas deben aceptar la interferencia perjudicial resultante de estas aplicaciones y en ningún caso podrán causar interferencias a aplicaciones industriales, científicas o médicas (ICM). [6]

Este grupo de frecuencias, denominadas Bandas No Licenciadas, son bandas que no necesitan de una solicitud de licencia para ser utilizadas, por tanto tampoco de

un pago. Por esta misma razón, muchos usuarios hacen usos de estas bandas. Contrastantemente, la gran cantidad de usuarios puede llegar a saturar estas bandas en ciertas zonas geográficas con muy poco derecho a reclamos por interferencia.

1.3. Características de la Distorsión: Ruido e Interferencia

1.3.1. Ruido

El efecto del ruido es crítico para el comportamiento de la mayoría de comunicaciones por radio frecuencia y microondas, radares y sistemas de sensores remotos dado que este determina el umbral para el mínimo de señal, o sensibilidad, que puede ser detectado confiablemente por un receptor.

El ruido en un sistema de microondas puede provenir de fuentes externas o generarse dentro de sí mismo. En cualquier caso, el nivel de ruido de un sistema determina el mínimo de potencia de una señal para que pueda ser detectada en presencia de ruido. Es deseable minimizar el nivel de ruido residual de un receptor de comunicaciones para lograr la mejor performance.

Ruido externo puede ser introducido al sistema por la antena receptora o por acoplamiento electromagnético. Algunas de las fuentes de ruido de radiofrecuencia externa son:

- Ruido térmico del suelo
- Ruido cósmico del cielo
- Descargas eléctricas atmosféricas
- Lámparas de descarga de gas
- Estaciones de radio, TV o celulares
- Dispositivos inalámbricos
- Hornos de microondas
- Dispositivos de interferencia deliberados

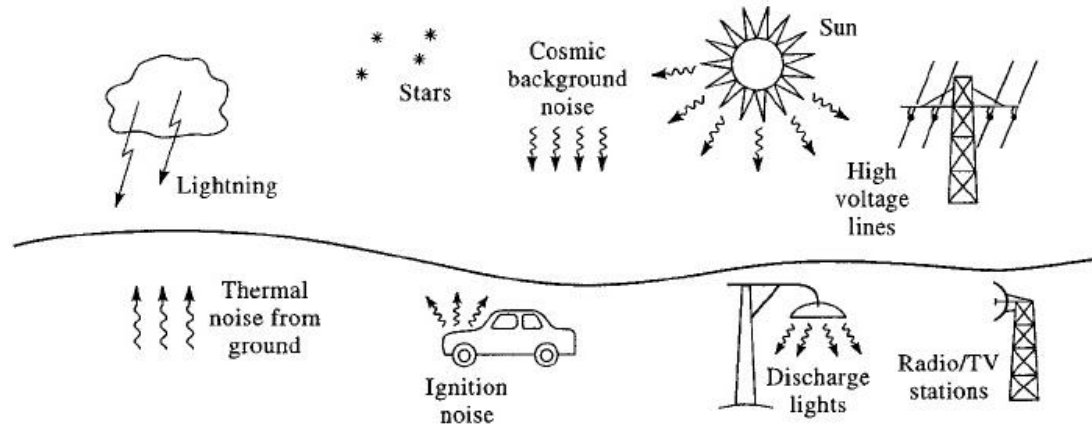


Figura 14: Ruido Natural y Artificial
Fuente: [4]

1.3.2. Interferencia

Cuando existen dos o más ondas de igual naturaleza y frecuencia que viajan en el mismo medio, se puede aplicar el principio de superposición para obtener la perturbación resultante llamada interferencia. La suma algebraica de todas las ondas componentes es el resultado de las ondas interferentes. [7]

Estas interferencias pueden ser constructivas o destructivas dependiendo si llegan en fase o no. El movimiento de los puntos varía dentro de una figura de interferencia pasando por regiones iluminadas y oscuras, que resultan en el desvanecimiento de la señal. [3]

CAPÍTULO 2

Estado Actual y Requerimientos del Enlace para la Estación PM-06.

2.1. Isla San Lorenzo

2.1.1. Descripción Geográfica del Entorno

La isla San Lorenzo es la isla más grande en el Perú sobre el Océano Pacífico. Incorporada a la Provincia Constitucional del Callao por el presidente Andrés Avelino Cáceres Dorregaray el 18 de noviembre de 1899. Esta, junto a su isla vecina El Frontón se encuentran frente a la línea de la playa de La Punta en el Callao con coordenadas entre los paralelos 77°16' - 77°11' de longitud Oeste y 12°3.8' - 12°7.5' de Latitud Sur. Posee una extensión de 16.5 km² [8] con aproximadamente 8 km de largo y 2.2 km de ancho y desniveles topográficos desde 0 a 396 msnm, siendo su punto más alto el cerro La Mina.



Figura 15: Principales Caletas, Playas y Puntas de la Isla San Lorenzo
Fuente: [9]

La isla San Lorenzo comprende las siguientes caletas, playas y puntas como se muestran en la Figura 15:

- | | |
|------------------------------------|---------------------------------|
| 1. El Cabezo o Cabo de San Lorenzo | 15. La Ballena |
| 2. Vela Tendida | 16. La Cocina |
| 3. Sombreroete o Galeras | 17. Calavera |
| 4. De los Presos | 18. Playa Grande |
| 5. Sanitaría | 19. San Juan o Tres Cruces |
| 6. El Panteón o Playa Hermosa | 20. El Colorado o El Arenal |
| 7. El Infiernillo | 21. El Alfaque o Bradley |
| 8. Factoría o El Paraíso | 22. Almagra |
| 9. La Cueva o caleta Chica | 23. La Meseta |
| 10. Pescadores o La Pesquería | 24. Lobería o Piedra Gorda |
| 11. Las Gaviotas | 25. Cerro del Cabezo o del Faro |
| 12. La Cruz o de Los Muertos | 26. Cerro del cañón o La Mina |
| 13. Punta La Muñeca | 27. Cerro Encantado |
| 14. Punta El Sauce | 28. Cerro Guanay |

2.1.2. Geología

El Instituto Metropolitano de Planificación nos da información detallada sobre la caracterización del medio físico en la Isla San Lorenzo.

Los materiales presentan particularidades en la distribución y tipos de materiales, las cuales ha permitido tratarlas en unidades homogéneas para la Isla San Lorenzo en las siguientes unidades:

Material de cobertura: Depósitos eólicos (Qr-e), Depósito marino (Qr-m)

Roca de basamento: Fm Herradura (Ki-h), Fm Marcavilca (Ki- m)

Por otro lado vamos a mencionar la configuración y sectores que cubren el ámbito de la Provincia Constitucional del Callao, entre ellos mencionamos los siguientes.

Sectores la Isla San Lorenzo, cabinzas y Palominos

Corresponden a los macizos líticos insulares ubicados a 4 km aproximadamente al Oeste de la zona continental, conformados a partir de los materiales de cobertura y de la roca de basamento como se presentan a continuación:

Material de Cobertura

Depósitos eólicos (Qr-e), Depósito marino (Qr-m)

En el borde occidental de la Isla San Lorenzo y ocupando franjas angostas y alargadas, las aguas de mar acumulan arena gruesa y media con algunos restos de conchas conformando los depósitos marinos siendo más limitado en el borde oriental.

En cambio en el frente occidental las corrientes de aire son intensas, lo cual produce el arrastre y la acumulación de arenas gruesas en amplias extensiones de los relieves ocupando mayor altitud para conformar los depósitos eólicos.

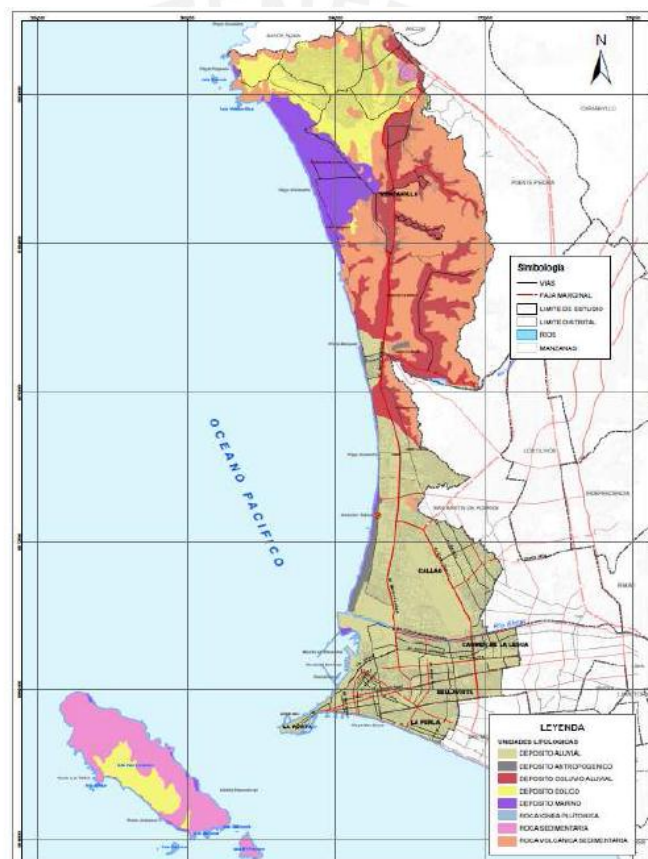


Figura 16: Mapa de Unidades Litológicas
Fuente: [10]

Roca de Basamento

Fm Herradura (Ki-h), Fm Marcavilca (Ki- m)

Las Islas San Lorenzo y El Frontón se ha configurado en una secuencia de rocas sedimentarias clásticas, donde los niveles inferiores están constituidos de lutitas muy friables y fracturadas hacia la parte superior consiste de una arenisca cuarzosa

dura inclinadas al Oeste. Se anota que esta secuencia sedimentaria se presenta en el Cerro Morro Solar-Chorrillos.

2.1.3. Tectónica del Sector Isla San Lorenzo

Se reporta estructuras tectónicas (falla de orientación Noroeste – Sureste) que recortan la prolongación del macizo rocoso del Cerro Morro Solar, y que al ser proyectadas hacia el Norte coincide con alguna estructura que levantó y puso en posición actual las Islas San Lorenzo, Cabinza y Los Palominos (en la Isla San Lorenzo la secuencia de rocas sedimentarias son las que se distribuyen en el Morro Solar).

En esta parte se tienen el mismo estilo estructural del Cerro Morro Solar, donde los estratos de las rocas sedimentarias mantienen ligeros cambios en la posición debido a la falla que la atraviesan y en los trazos se ha generado zonas de debilidad y de intenso proceso de meteorización química (oxidación e hidroclastía). Las fracturas atraviesan las rocas y facilitan la separación de bloques de roca en forma individual. [10]

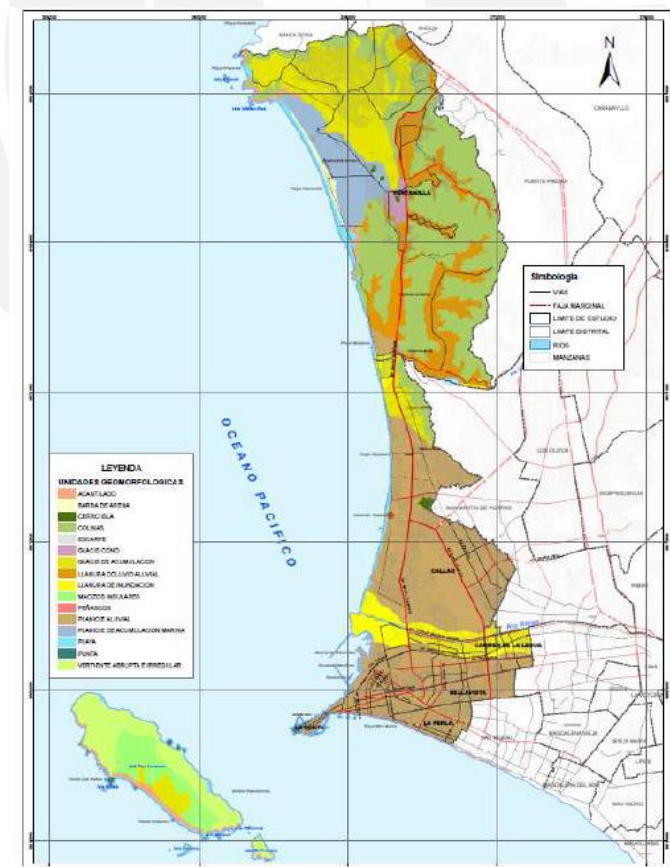


Figura 17: Mapa de Unidades Geomorfológicas
Fuente: [10]

2.1.4. Acceso a la Isla San Lorenzo

La isla siempre estuvo despoblada, pero actualmente existe una base naval. En 1926 se inaugura la Base Naval San Lorenzo durante el segundo gobierno de Augusto B. Leguía, desde entonces hasta la actualidad, la isla cumple funciones militares de seguridad nacional.

Desde el 2011, San Lorenzo no está abierto al público. Es un área restringida controlada por la Marina de Guerra del Perú, en raras ocasiones profesionales especializados pueden solicitar y recibir permisos extraordinarios para acceder a la isla. Los buques civiles requieren mantener de una distancia de 300 metros de la orilla de la isla.

2.1.5. Proyecto “Perú-Magneto”

“Perú-Magneto” es un proyecto de investigación del Instituto de Radioastronomía (INRAS) de la Pontificia Universidad Católica (PUCP) que estudia la relación entre los fenómenos electromagnéticos en el subsuelo y la actividad sísmica, con la donación de 9 magnetómetros por parte de la subdivisión Quakefinder de la compañía norteamericana Stellar Solutions (California, EE.UU.) y un décimo por Telefónica del Perú.

Basándose en investigaciones previas que postulan que en el momento en que sucede un sismo, dada la presión de las placas tectónicas una contra otra, se generan cargas eléctricas que generan diversos efectos, como viajar a la superficie y se manifiestan de diferentes formas, como luminiscencias. Asumiendo así que estas son una manera de prever que se acerca un sismo.

Este proyecto cuenta actualmente con 10 estaciones ubicadas a lo largo de la costa del Perú que hacen uso de magnetómetros para medir la actividad en el campo magnético local. La conectividad de las estaciones se da a través del auspicio de la empresa Telefónica del Perú que provee de comunicación con ayuda de su red celular, así los datos recopilados son enviados al INRAS para su procesamiento y estudio.

Adicionalmente, existen estudios complementarios para validar el progreso obtenido en la investigación, como: el registro continuo del cielo en busca de luminiscencia pre-sísmica y co-sísmica, el registro de ondas de radio de baja frecuencia y su asociación con actividad sísmica, y el registro de micro-desplazamientos de la corteza terrestre a través de un sistema de GPS de alta precisión

Esto permitió el análisis de los datos tomados y obtener logros como: la primera alerta temprana de sismos realizada para el sismo del 22 de octubre del 2010, comunicada con anticipación de 15 días y los primeros eventos de triangulación electromagnética de sismos, ambos realizados por primera vez a nivel mundial en el INRAS. [1]

2.1.5.1. Estación PM-06

Uno de los 10 magnetómetros del Proyecto “Perú-Magneto” está posicionado en la Isla San Lorenzo, ubicado aquí por las grandes ventajas geográficas de la isla como su gran extensión libre de interferencias electromagnéticas y previos registros de fenómenos luminiscentes pre-sísmicos y co-sísmicos, fundamentándose en esto se logró el permiso de la Marina de Guerra del Perú para instalar una estación en la Isla.

Las coordenadas de la estación son:

Latitud : 12° 5'1.57"S

Longitud : 77°12'47.12"O

2.1.5.2. Equipos de Telecomunicaciones

La comunicación actual se da montada en la red celular 2G y 3G del operador Movistar y se envían los datos a la red de paquetes mediante los protocolos GPRS o UMTS dependiendo de la conexión.

Se utilizaron dos tipos de antenas para las pruebas de establecimiento de conexión de la estación PM-06 con la estación base celular:

- Antena Omnidireccional
- Antena Direccional Yagi

2.2. Justificación de la Instalación

La propuesta de instalación de este enlace tiene como objetivo lograr la autonomía de red entre los datos cifrados exclusivamente para Stellar Solutions en California y los datos recolectados de los experimentos en la Isla San Lorenzo propietarios del INRAS.

Adicionalmente, el enlace tiene como objetivo la escalabilidad de los proyectos a realizar en la isla en un futuro, dado que la isla posee gran potencial de investigación por su entorno con muchos factores de análisis.

2.3. Requerimientos de la Red Expandida

2.3.1. Servicios a Implementar en la estación PM-06

Actualidad:

- Magnetómetro

Expansión:

- Sensor de Campos Eléctricos
- Sensor de Desplazamiento
- Cámara de Video
- Cámara Infrarroja

2.3.2. Cálculo de Ancho de Banda

Para dimensionar el tráfico utilizamos bases de datos de perfiles de tráfico en sus máximas tasas de transmisión según protocolos. No usaremos el dimensionamiento para “Hora Cargada” dado que los datos se envían de una manera plana y continua:

Magnetómetro:

Se envía un paquete 300 kB diariamente, este será un tráfico de ráfaga (*burst*), normalizando este valor a lo largo del mes se obtiene un valor de 0.028 kbps. Aproximaremos este valor a 1 kbps como un perfil de tráfico de mensajes de texto. [11]

Sensor de Desplazamiento:

Se enviará data en serie continuamente, pero esta no será un flujo de video. Estos dispositivos poseen de una salida RS485. Se aproxima al tráfico de un radar y se tendrá 64 kbps. [12]

Sensor de Campos Eléctricos

Se utiliza un método parecido al anterior aproximando la tasa a la de sensores para equipos submarinos obteniendo así 128 kbps. [12]

Cámara Infrarroja:

Trafico continuo utilizando códec MPEG4 en *Simple Profile* con cuadros CIF (352x228) necesitara una tasa de transmisión promedio de 384 kbps. [13]

Cámara de Video:

Utilizando el códec H264 con resolución de 640x360 (16:9) o 640x480 (4:3) tendremos una tasa máxima de 800 kbps. Aunque con esta misma tasa de transmisión también soportaremos códec de hasta 1280x720 (16:9). [14]

Total de Tráfico:

Todas estas cargas dan un total de 1377 kbps, tomando un margen de alrededor de 10% nos dará un aproximado de 1,5 Mbps

Servicio	kbps
Magnetómetro	1
Sensor de Desplazamiento	64
Sensor de Campos Eléctricos	128
Cámara Infrarroja	384
Cámara de Video	800
Total	1377
Margen	10%
Total con Margen	1514.7

Tabla 1: Dimensionamiento del Tráfico
Fuente: Propio

2.3.3. Canalización de las Redes: VLAN

Una VLAN, *Virtual Local Area Network*, es una red conmutada segmentada lógicamente por función, equipo de proyecto, o aplicación, sin importar la locación física de los usuarios. VLAN's tienen las mismas propiedades que las LAN's físicas, pero pueden agrupar estaciones terminales aun si estas no están ubicadas físicamente en el mismo segmento LAN.

Usualmente asociadas con subredes IP. El tráfico entre VLAN's debe ser ruteado.

Una red de capa 2 puede ser particionada para crear múltiples dominios distintos, mutuamente aislados para que el tráfico de paquetes pase solo entre ellos vía uno o más *routers* o *switches*.

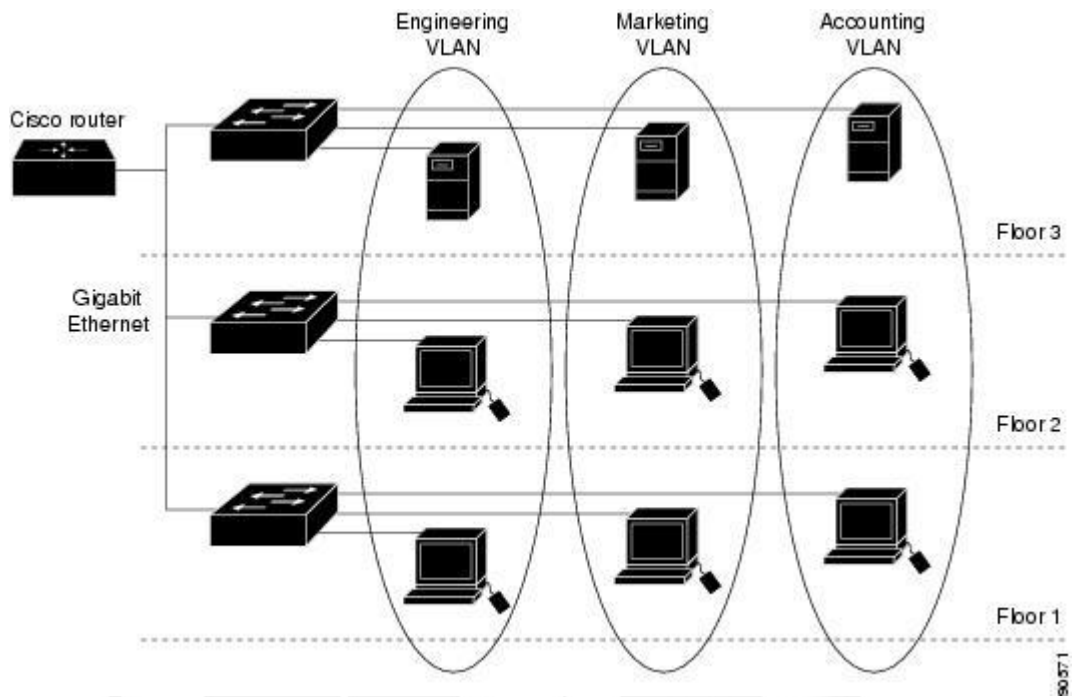


Figura 18: VLAN's como Redes Lógicas Definidas
Fuente: [CISCO]

CAPÍTULO 3

Diseño y Simulación del Radio Enlace

Isla San Lorenzo – PUCP

El objetivo principal de este trabajo de tesis es el lograr habilitar a la Isla San Lorenzo con una tasa de transmisión de 1.5 Megabits por segundo (Mbps). Esto será posible con el apoyo de la Pontificia Universidad Católica del Perú y la implementación de los equipos requeridos por parte del Grupo de Telecomunicaciones Rurales (GTR).

El diseño de este radioenlace debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Enlace entre dos nodos con tasa de 1.5 Mbps (Capítulo 2)
- Red de energía que soporte al sistema durante todo el año

3.1. Diseño del Enlace

3.1.1. Locación de los Nodos:

Se cuenta solo con dos puntos específicos para la conexión punto a punto:

- Complejo McGregor, ubicado en el Campus PUCP, del cual se utilizará el techo donde se encuentran las torres de comunicaciones de DIRINFO a una altura de 120 m.s.n.m.

La dirección del Complejo es Av. Universitaria 1801, San Miguel Lima 32.

Las coordenadas de mismo son -12.068602, -77.078613.

La locación en la cima de la torre McGregor nos otorga una elevación suficiente para tener una línea de vista completamente libre de obstáculos. Adicionalmente, reduce el efecto de la interferencia producida por los demás sistemas inalámbricos en medio de la trayectoria, por ello esta locación es la más óptima dentro de todo el Campus de la PUCP.

- Centro de Comunicaciones ubicado en la Isla San Lorenzo, donde se dispondrá de una caseta previamente utilizada por la Marina de Guerra del Perú, a una altura de 60 m.s.n.m.

Las coordenadas del nodo dentro de la isla son -12.083769, -77.213113

El punto más alto de la isla es el centro de telecomunicaciones ubicado a 80 m.s.n.m. Sin embargo, al no contar acceso a este, el punto a escoger será una caseta militar donde se albergarán los equipos necesarios. Esta se encuentra a 60 m.s.n.m.

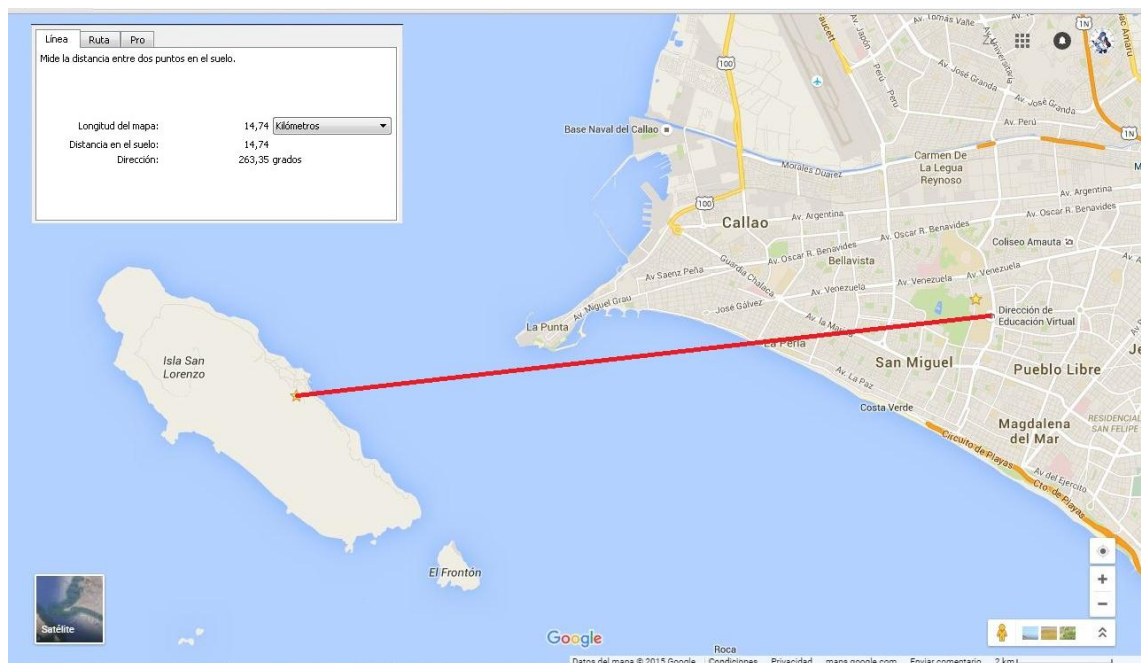


Figura 19: Mapa del Enlace
Fuente: Google Maps

Descripción del enlace entre la Isla San Lorenzo y el Campus PUCP:

La distancia lineal entre ambos nodos del enlace es de 14.74 km.

Entre dichos nodos, se posee línea de vista y además:

65% de la trayectoria va sobre el mar y

35% de la trayectoria pasa sobre los distritos del Callao y San Miguel

Como fue explicado dentro del Capítulo 2, la sección del enlace que atraviesa el mar será afectada por la interferencia multi-trayecto, la cual es generada por la reflexión de las ondas sobre el mar, y la sección que va sobre las zonas urbanas será afectada por la interferencia de otros sistemas inalámbricos que utilicen la misma banda de frecuencia.

3.1.2. Tecnologías

Las comunicaciones a largas distancias pueden lograrse de modos distintos, de entre los cuales analizaremos las comunicaciones por redes satelitales o celulares y los enlaces punto a punto o multipunto.

Para el problema presentado (capítulo 2), una solución satelital resultaría muy cara, dado que requiere de una gran inversión y costos de operación. Por otro lado, de elegirse una solución celular, la cobertura es dependiente del despliegue de infraestructura del operador móvil que la brinda. Por ello, no se podría obtener un acceso a la red celular del operador para la zona en que se ubica el segundo punto, Isla San Lorenzo.

Los enlaces de microondas son enlaces de línea de vista (*Line Of Sight*, LOS), lo cual significa que los obstáculos en la trayectoria generan pérdidas en la conectividad. Sin embargo, esta tecnología es de fácil adquisición e instalación.

	Satelital	Celular	Radio LOS
Cobertura	Siempre	Depende del Operador	0-400 km Punto a Punto Dependiendo de la trayectoria de los puntos
Ancho de Banda	Bajo	2G: 200 kHz 3G: 5 MHz 4G: 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz (3GPP)	802.11 a: 20 MHz (5 GHz) b: 22 MHz (2.4 GHz) g: 22 MHz (2.4 GHz) n: (2.4 y 5 GHz simultáneos) ac: 160 MHz (5 GHz) (IEEE) [15]

Velocidad de Transmisión	DL: 3 Mbps UL: 1Mbps	2.5 G: GPRS DL: 32-48 kbps UL: 15kbps 3G: W-CDMA DL: 800 kbps UL: 60 kbps 4G: LTE DL: 172.8 Mbps (2x2) UL: 86.5 Mbps (3GPP)	802.11 a: 20 Mbps b: 5.9 Mbps g: 22 Mbps n: 600 Mbps ac: 433x3 Mbps (IEEE) [15]
Costo	Mensual: 80 USD Instalación: 100 USD (Movistar Chile) [16]	Depende del Operador	-Bandas Licenciadas: Depende del país -Bandas No Licenciadas: No hay gasto

Tabla 2: Características de las Tecnologías
Fuente: Propio

3.1.3. Comparación de Parámetros en Bandas

A continuación presentaremos una comparación de los parámetros electromagnéticos, explicados previamente dentro del Capítulo 1, calculados para cada banda de frecuencia:

Longitud de Onda:

Es la distancia espacial en que se repite el periodo de la onda. A menores frecuencias, tendremos longitudes de onda más grandes y viceversa, como fue explicado dentro del capítulo 1.

En el caso de una frecuencia de **2.4 GHz**, la longitud de onda será de **12.5 cm**.

En el caso de una frecuencia de **5.8 GHz**, la longitud de onda será de **5.1724 cm**.

Zona de Fresnel:

Es el lóbulo que se genera para la propagación de la señal y es dependiente de la frecuencia. Se recomienda mantener el 60% de la primera zona de Fresnel sin obstrucciones para obtener enlaces óptimos.

En el medio del enlace de una distancia total de 14,74 km se tendrán los siguientes valores para la zona de Fresnel:

En el caso de una frecuencia de **2.4 GHz**, el radio de la primera zona de Fresnel será de **21 m** y el radio que deberá estar libre para una transmisión óptima, 60% de la primera zona de Fresnel, será de **17 m**.

En el caso de una frecuencia de **5.8 GHz**, el radio de la primera zona de Fresnel será de **14 m** y el radio que deberá estar libre para una transmisión óptima, 60% de la primera zona de Fresnel, será de **11 m**.

La banda de 5.8 GHz posee una menor zona de Fresnel, por lo cual será más fácil evitar los obstáculos en la trayectoria del enlace y, por consecuencia, tener una mayor calidad de enlace.

Pérdida por Trayectoria (*Path Loss*):

Es el valor de pérdida o atenuación en el espacio libre. Se obtiene usando la fórmula del *Path Loss*. Esta se calcula para un enlace en el vacío con una trayectoria ideal. Para nuestro caso la aplicaremos para una distancia de **14.74 Km**, y obtendremos los siguientes valores para cada banda:

Utilizando la ecuación siguiente:

$$L_0(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) > 0.$$

$$R = 14.74 \text{ km} = 14740 \text{ m}$$

$$\lambda = 12.5 \text{ cm} = 0.125 \text{ m}$$

$$L_0 = 123.4 \text{ dB}$$

En el caso de una frecuencia de **2.4 GHz**, tendremos una pérdida por trayecto de **123.4 dB**.

$$R = 14.74 \text{ km} = 14740 \text{ m}$$

$$\lambda = 5.1724 \text{ cm} = 0.051724 \text{ m}$$

$$L_0 = 131.1 \text{ dB}$$

En el caso de una frecuencia de **5.8 GHz**, tendremos una pérdida por trayecto de **131.1 dB**.

Atenuación Atmosférica:

La atenuación atmosférica es la atenuación adicional que tiene la onda al pasar por distintos entornos durante su trayectoria.

De las **Figuras 4 y 5** obtenemos el factor de atenuación atmosférica correspondiente a cada frecuencia (Fig. 5) y sumamos un factor de corrección para transportarla al nivel del mar (Fig. 4.). Calculamos el factor de atenuación y la atenuación total para un enlace de 14.74 Km de distancia:

En el caso de una frecuencia de **2.4 GHz**, notamos una constante de atenuación de **0.007 dB/Km** con un factor de corrección a nivel del mar de **0.015 dB/Km**, con lo que obtenemos un total de **0,022 dB/Km**.

Para nuestro enlace de 14.74 Km de distancia se tendrá una atenuación total de **0.32428 dB** para la banda de **2.4 GHz**.

$$L_A(f) = (F_1 + F_2) * R$$

L_A : Pérdida por atenuación atmosférica [dB]

F_1 : Factor de atenuación atmosférica [dB/km]

F_2 : Factor de corrección a nivel del mar

R : Distancia del enlace [Km]

f : Frecuencia del enlace [GHz]

$$F_1(2.4) = 0.007$$

$$F_2(2.4) = 0.015$$

$$F_1 + F_2(2.4) = 0.022 \text{ dB/Km}$$

$$L_A(2.4) = 0.022 * 14.74 = 0.32428 \text{ dB}$$

En el caso de una frecuencia de **5.8 GHz**, notamos una constante de atenuación de **0.01 dB/Km** con un factor de corrección a nivel del mar de **0.015 dB/Km**, con lo que obtenemos un total de **0.025 dB/Km**.

Para nuestro enlace de 14.74 Km de distancia se tendrá una atenuación total de **0.37435 dB** para la banda de **5.8 GHz**.

La atenuación total es menor para la banda de 2.4 GHz, pero la diferencia entre los valores para cada banda es muy pequeña y por tanto, despreciable para una comparación contra el beneficio de cada banda en este enlace.

Interferencia

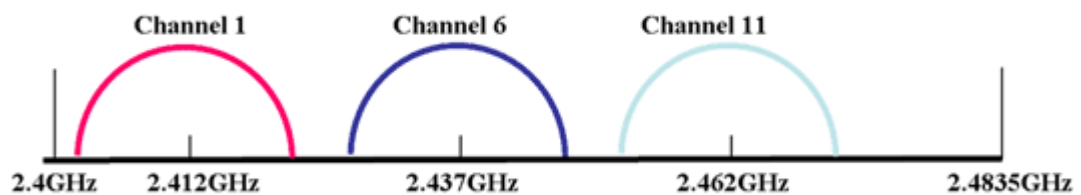
Esta sucede cuando dos ondas viajan sobre el mismo medio y por tanto, a más redes existan en la trayectoria del enlace, más interferencia se producirá y tendremos una menor calidad de enlace. El manejo de selección de frecuencias dentro de cada banda se da mediante la configuración de canales. Estos canales o portadoras pueden o no solaparse entre ellos, dependiendo del estándar que siga cada banda, equipo o fabricante.

a) Interferencia en la banda 2.4 GHz:

Esta banda posee 11 canales, hasta 14 para ciertas regiones, regidos por el estándar IEEE 802.11 b/g, cuya gran mayoría se solapa entre ellas por excepción de aquellas que se diferencia por 5 canales. Ejemplo: los canales 1, 6 y 11.

Podemos notar el solapamiento de canales en las siguientes figuras:

DSSS First Set: 3 non-overlapping channels:



DSSS Second Set: 6 half-overlapping channels

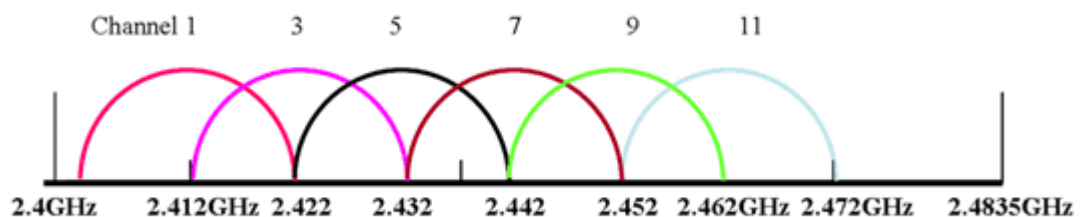


Figure 1. Wi-Fi Channelization

Figura 20: Solapamiento de los canales en la banda de 2.4 GHz
Fuente: [17]

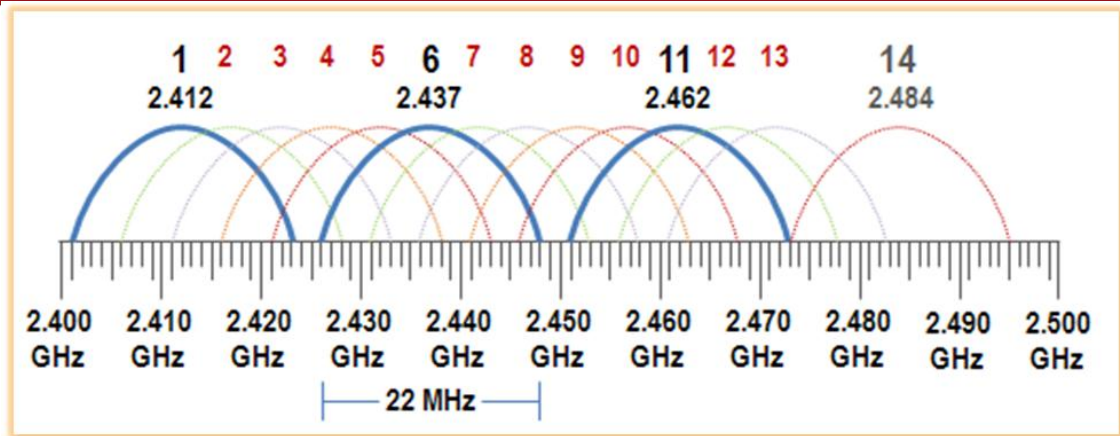


Figura 21: Canales en todas las regiones para la banda de 2.4 GHz
Fuente: [18]

DSSS IEEE 802.11 and HR/DSSS IEEE 802.11b Channels

Channel	Center Frequency (GHz)	North America	Europe	Spain	France	Japan
1	2.412	X	X			X
2	2.417	X	X			X
3	2.422	X	X			X
4	2.427	X	X			X
5	2.432	X	X			X
6	2.437	X	X			X
7	2.442	X	X			X
8	2.447	X	X			X
9	2.452	X	X			X
10	2.457	X	X	X	X	X
11	2.462	X	X	X	X	X
12	2.467		X		X	X
13	2.472		X		X	X
14	2.484					X

Figura 22: Canales disponibles según región
Fuente: [19]

b) Interferencia en la banda 5.8 GHz:

Se cuentan con cerca de 40 canales, de acuerdo al estándar IEEE 802.11a, dependiendo de la región. Cada uno de estos canales se solapa muy poco con los otros en comparación a la banda de 2.4; esto se da por la forma de onda que se utiliza para el protocolo en esta banda.

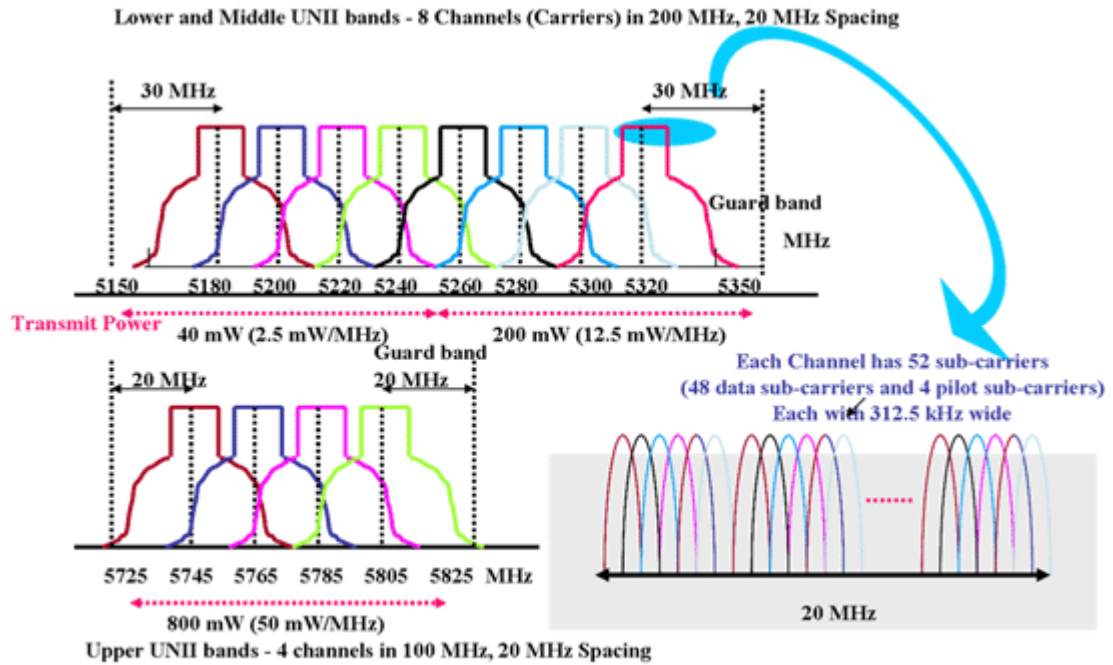


Figure 2. IEEE 802.11a Channelization

Figura 23: Solapamiento de los canales en la banda de 5.8 GHz
Fuente: [17]

La banda de 5.8 GHz posee menos usuarios en comparación con la banda de 2.4 GHz, por lo que tendremos menor interferencia con otras redes aledañas. Adicionalmente, el tener una menor zona de Fresnel y/o lóbulo de propagación ayudarán a obtener menor interferencia.

Ancho de Banda Disponible:

Los anchos de bandas disponibles dependerán de los estándares, IEEE u otros, que soporten cada equipo de radio, dependiendo de sus fabricantes. Los más comunes para los equipos en cada banda son los siguientes:

En el caso de la banda de frecuencia de **2.4 GHz**, los equipos de radio soportan los estándares IEEE **802.11 b/g/n**, cuyas portadoras poseen un ancho de banda de **20 MHz** cada una.

En el caso de la banda de frecuencia de **5.8 GHz**, los equipos de radio soportan los estándares IEEE **802.11 a/n**, cuyas portadoras poseen un ancho de banda de **5, 10, 20 o 40 MHz** cada una.

Tasas de Modulación y Codificación (MSC Rates)

Con el estándar 802.11n se puede usar un nuevo conjunto de configuraciones designadas específicamente para *high throughput* (HT). En la Tabla 3 se encuentran las tasas de Modulaciones y Esquemas de Codificación HT (*Modulation and Coding Schemes: MCS*) y sus símbolos dependientes. Estos vienen de la sección 20.6 del estándar 802.11n D5 (2010). [20]

Leyenda:

nSS	Número de flujos espaciales
R	Tasa de codificación
nBPCSS(iSS)	Número de bits codificados por señal de portadora para cada flujo espacial, $iSS = 1 \dots, nSS$
nSD	Número de data compleja por flujo espacial por símbolo OFDM
nSP	Número de valores piloto por símbolo OFDM
nCBPS	Número de bits codificados por símbolo OFDM
nDBPS	Número de bits de data por símbolo OFDM

Ratios HT20

El modo HT20 utiliza canales de 20 MHz y MCS de acuerdo a la siguiente tabla:

MCS Index	nSS	Modulación	R	nBPCSS (iSS)	nSD	nSP	nCBPS	nDBPS	Mbps (800 ns GI)	Mbps (400 ns GI)
0	1	BPSK	1/2	1	52	4	52	26	6.5	7.2
1	1	QPSK	1/2	2	52	4	104	52	13.0	14.4
2	1	QPSK	3/4	2	52	4	104	78	19.5	21.7
3	1	16-QAM	1/2	4	52	4	208	104	26.0	28.9
4	1	16-QAM	3/4	4	52	4	208	156	39.0	43.3
5	1	64-QAM	2/3	6	52	4	312	208	52.0	57.8
6	1	64-QAM	3/4	6	52	4	312	234	58.5	65.0
7	1	64-QAM	5/6	6	52	4	312	260	65.0	72.2
8	2	BPSK	1/2	1	52	4	104	52	13.0	14.4

9	2	QPSK	1/2	2	52	4	208	104	26.0	28.9
10	2	QPSK	3/4	2	52	4	208	156	39.0	43.3
11	2	16-QAM	1/2	4	52	4	416	208	52.0	57.8
12	2	16-QAM	3/4	4	52	4	416	312	78.0	86.7
13	2	64-QAM	2/3	6	52	4	624	416	104.0	115.6
14	2	64-QAM	3/4	6	52	4	624	468	117.0	130.0
15	2	64-QAM	5/6	6	52	4	624	520	130.0	144.0
16	3	BSSK	1/2	1	52	4	156	78	19.5	21.7
17	3	QPSK	1/2	2	52	4	312	156	39.0	43.3
18	3	QPSK	3/4	2	52	4	312	234	58.5	65.0
19	3	16-QAM	1/2	4	52	4	624	312	78.0	86.7
20	3	16-QAM	3/4	4	52	4	624	468	117.0	130.0
21	3	64-QAM	2/3	6	52	4	936	624	156.0	173.3
22	3	64-QAM	3/4	6	52	4	936	702	175.5	195.0
23	3	64-QAM	5/6	6	52	4	936	780	195.0	216.7
24	4	BPSK	1/2	1	52	4	208	104	26.0	28.9
25	4	QPSK	1/2	2	52	4	416	208	52.0	57.8
26	4	QPSK	3/4	2	52	4	416	312	78.0	86.7
27	4	16-QAM	1/2	4	52	4	832	624	156.0	173.3
28	4	16-QAM	3/4	4	52	4	832	624	156.0	173.3
29	4	64-QAM	2/3	6	52	4	1248	832	208.0	231.1
30	4	64-QAM	3/4	6	52	4	1248	936	234.0	260.0
31	4	64-QAM	5/6	6	52	4	1248	1040	260.0	288.9

Tabla 3: Modos HT20
Fuente: [20]

Como vemos los ratios están ordenados según número de antenas:

- Los modos HT-20 0 al HT-20 7 utilizan solo 1 antena
- Los modos HT-20 8 al HT-20 15 utilizan 2 antenas
- Los modos HT-20 16 al HT-20 23 utilizan 3 antenas
- Los modos HT-20 24 al HT-20 31 utilizan 4 antenas

El número de antenas para transmisiones punto a punto están actualmente limitadas a 2. Por lo cual, solo podremos utilizar los ratios del HT-20 0 al HT-20 15.

Para cubrir la necesidad de tráfico con un margen del 10% de la tasa de transferencia máxima, teóricamente, bastará con los modos de HT20-2 (19,5 Mbps), que utiliza una sola antena, o HT20-8 (13,0 Mbps), que utiliza tecnología MIMO 2x2.

Los modos variarán dinámicamente, dependiendo de la calidad del enlace en el entorno y de la potencia de recepción que necesitemos para cada una.

Cobertura del enlace:

Un estimado de la distancia de cobertura para un enlace punto a punto se da a continuación, este es brindado por los fabricantes de los equipos y dependen del ancho de banda usado para la comunicación:

En el caso de la banda de frecuencia de **5.8 GHz**, el fabricante Ubiquiti Networks, Inc. nos brinda las siguientes distancias de cobertura, de acuerdo a los anchos de banda con los que el transmisor esté funcionando:

Para una portadora con un ancho de banda **40 MHz**, se podrá tener un enlace punto a punto de **26.5 km**.

Para una portadora con un ancho de banda 20 MHz, se podrá tener un enlace punto a punto de 57.3 km.

Para una portadora con un ancho de banda 10 MHz, se podrá tener un enlace punto a punto de 116 km.

Para una portadora con un ancho de banda **5 MHz**, se podrá tener un enlace punto a punto de **232.9 km**. [21]

La capacidad de cobertura para equipos de la banda de 2.4 GHz es mayor, dado que se mantienen en anchos de banda menores y poseen una mayor longitud de onda, lo cual los hace más resistentes a la interferencia por obstáculos y menos afectados por la atenuación.

Equipos disponibles en el mercado:

La disponibilidad de los equipos en el mercado es un factor muy importante para el diseño, pues la posibilidad de conseguir los equipos adecuados dará las limitaciones en cuestiones de potencias, ganancias, codificaciones y tamaños, restringiendo así modelos ideales.

Se disponen de radios y antenas de mayor potencia para frecuencias mayores. Conseguir equipos de menor frecuencia con potencias cercanas a las brindadas por los equipos en bandas superiores supondrá una inversión más grande de dinero, dado que estos no son equipos comerciales.

En la banda de **2.4 GHz** podemos encontrar en el mercado equipos de radio con una máxima potencia de **20 dBm** y antenas direccionales con una ganancia máxima de **24 dBi**.

En la banda de **5.8 GHz** podemos encontrar en el mercado equipos de radio con una máxima potencia de **30 dBm** y antenas direccionales con una ganancia máxima de **34 dBi**. [20]

Esto da una ventaja de potencias disponibles para la banda de 5.8 GHz, además de sus costos muy cercanos a los equipos de menor potencia de la banda de 2.4 GHz. [22]

Simulaciones:

A continuación se presenta simulaciones del enlace entre la Isla San Lorenzo y el Campus PUCP en los simuladores RadioMobile y AirLink para las bandas de 2.4 y 5.8 GHz con equipos de la mayor potencia y ganancia disponibles en el mercado. Estos simuladores utilizan modelos estadísticos para sus cálculos. [5]

Simulación en Radio Mobile:

Potencia de transmisión	30 dBm
Ganancia de antenas	29 dBi
Pérdida en cable	0.5 dB
Sensibilidad	-97 dBm @ 6 Mbps

Simulación para la banda 2.4 GHz:

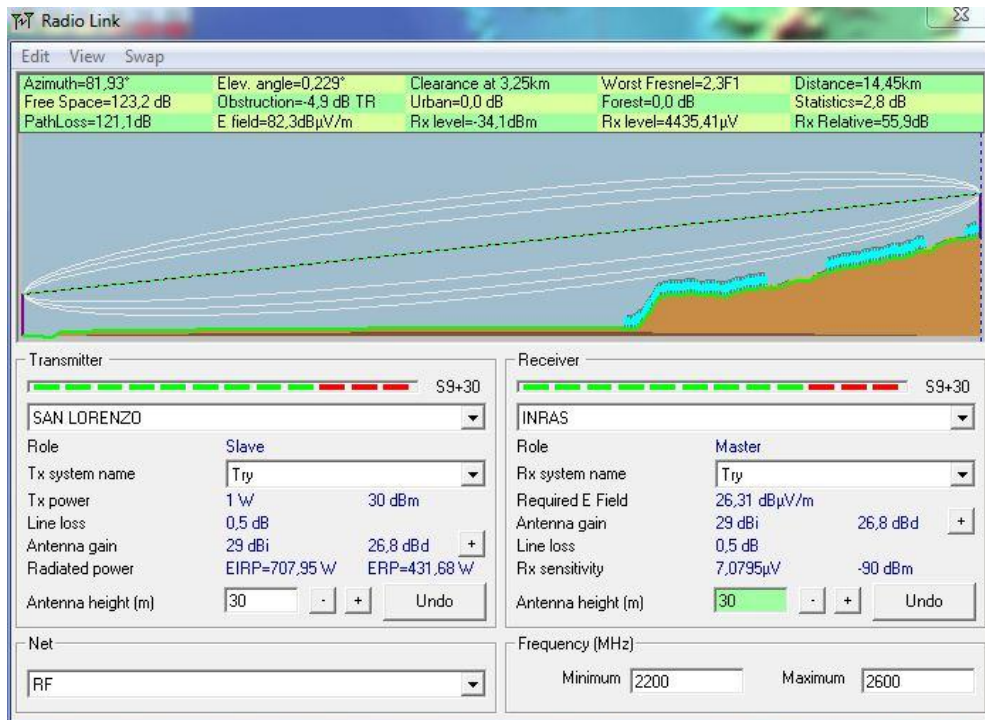


Figura 24: Simulación del Enlace para la Banda de 2.4 GHz en RadioMobile Fuente: Propio

Simulación para la banda 5.8 GHz

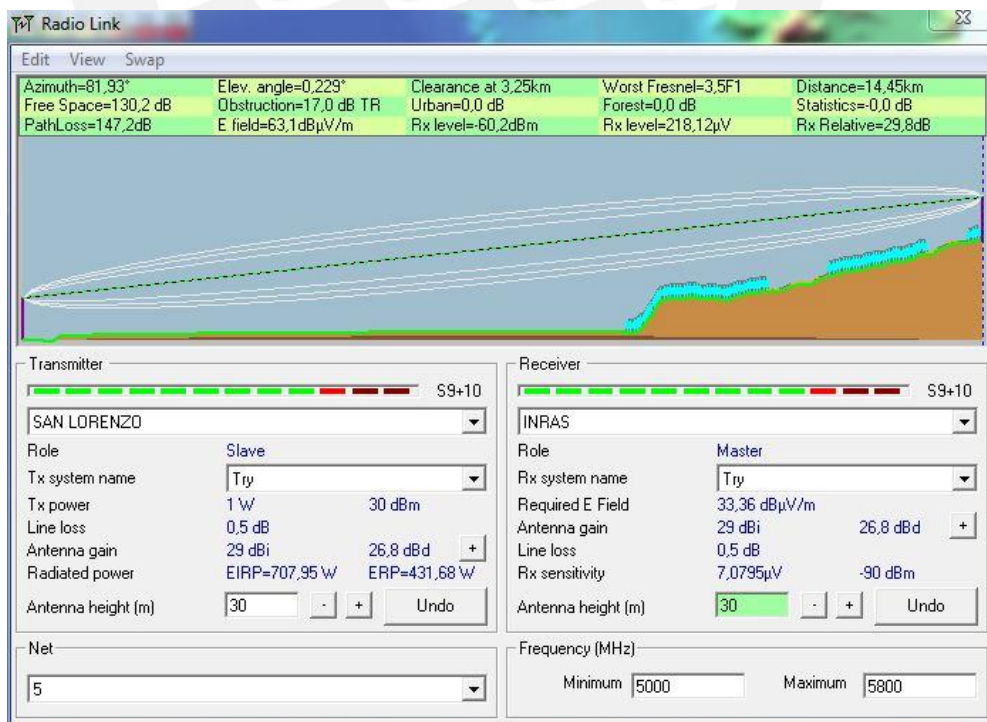


Figura 25: Simulación del Enlace para la Banda de 5.8 GHz en RadioMobile Fuente: Propio

Simulación en AirLink de Ubiquiti:

Simulación para la banda 2.4 GHz:

Potencia de transmisión	27 dBm
Ganancia de antenas	24 dBi
Sensibilidad	-84 dBm @ MCS12
Equipos:	Rocket M2 / RD-2G-24

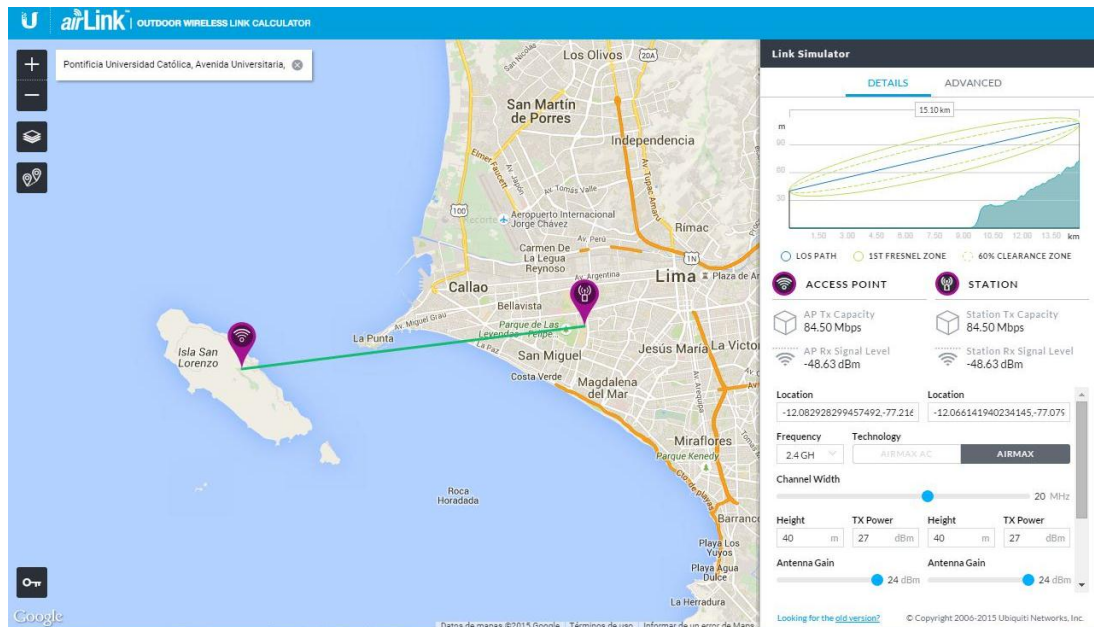


Figura 26 Simulación del Enlace para la Banda de 2.4 GHz en AirLink de Ubiquiti
Fuente: Propio/Ubiquiti

Se obtiene una potencia de recepción de -48.63 dBm, lo cual nos daría una margen operativo del sistema de 35.37 dB.

Simulación para la banda 5.8 GHz:

Potencia de transmisión	27 dBm
Ganancia de antenas	34 dBi
Sensibilidad	-84 dBm @ MCS12
Equipos	Rocket M5 / RD-5G-35

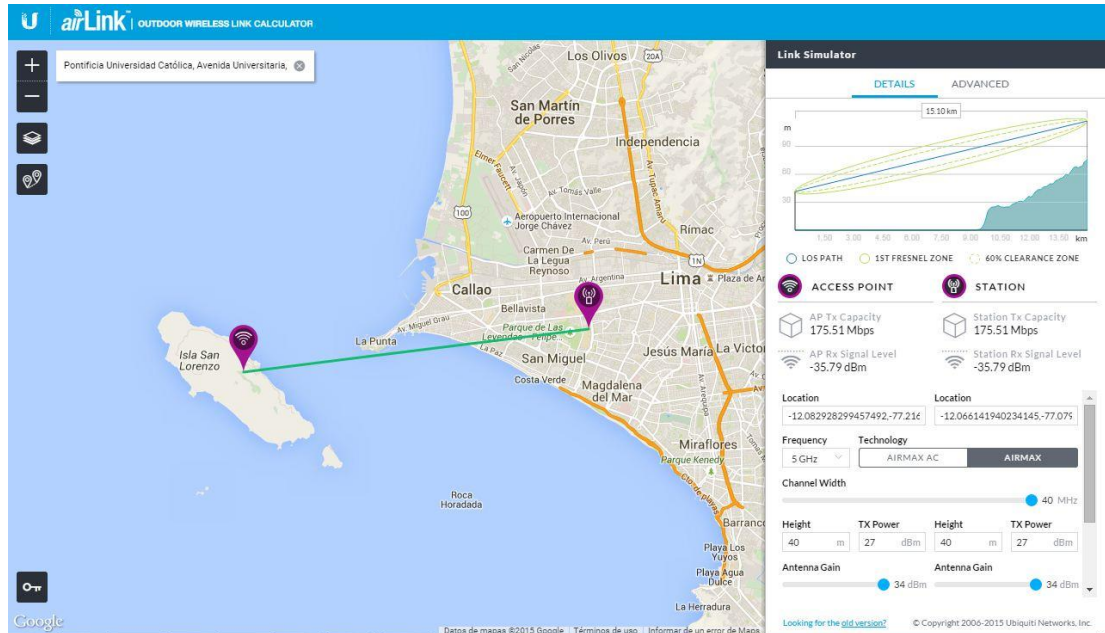


Figura 27: Simulación del Enlace para la Banda de 5.8 GHz en AirLink de Ubiquiti
Fuente: Propio/Ubiquiti

Se obtiene una potencia de recepción de -35.79 dBm, lo cual nos daría un margen operativo del sistema de 48.21 dB, superior al margen calculado para la banda de 2.4 GHz.

Ambas simulaciones demuestran que el enlace es factible para ambas bandas, sin embargo, difieren en la calidad presentada para cada frecuencia:

El simulador **RadioMobile** presenta mayor calidad para la banda de **2.4 GHz**, con una potencia de recepción de -34.1 dBm comparada contra -48.63 dBm, obtenidos con el simulador AirLink.

Y el simulador **AirLink** de Ubiquiti presenta para la banda de **5.8 GHz** una mayor potencia de recepción, -35.79 dBm, comparada contra -60.2 dBm, obtenidos con el simulador RadioMobile.

3.1.4. Link Power Budget

	2.4 GHz	5.8 GHz
Longitud de Onda	12.5 cm	5.1724 cm
1era Zona de Fresnel	21 m	14 m
60% de Fresnel	17 m	11 m
Interferencia	Mayor	Menor
LINK BUDGET (14 Km)		
Atenuación Atmosférica	0.32428 dB	0.37435 dB
<i>Path Loss</i>	123.4 dB	131.1 dB
Máxima Potencia Radio	20 dBm	30 dBm
Máxima Potencia Antena	24 dBi	34 dBi
Pérdidas por Cables y Conectores	-2 dB	-2 dB
PIRE	42 dBm	62 dBm
Máxima Potencia Antena	24 dBi	34 dBi
Pérdidas por Cables y Conectores	-2 dB	-2 dB
Potencia Recibida	-69.72428 dBm	-37.47435 dBm
Máxima Sensibilidad	-97 dBm @1-24Mbps	-94 dBm @6-24 Mbps
Margen	30.27572 dB	56.52565 dB
Máxima Tasa de Transferencia	84.50 Mbps	175.51 Mbps

Tabla 4: Presupuesto de la Potencia del Enlace
Fuente: Propio

3.1.5. Propuesta

Dado que existen equipos de mayor potencia y a menor costo en la banda de 5.8 GHz, preferiremos esta banda. Adicionalmente, la diferencia entre pérdidas y atenuaciones de las bandas es muy pequeña comparada a la potencia ganada por los equipos en esta banda.

Los siguientes equipos, los cuales serán utilizados para realizar las pruebas, fueron facilitados por la PUCP con el apoyo del GTR.

Equipo de Radio:

Marca	Mikrotik
Modelo	BaseBox5 – RouterBoard 912 UAG
Banda de Frecuencia	5 GHz
Interfaces	- Gigabit LAN - Universal Serial Bus (USB) - mini-PCI
Potencia TX	27 dBm @ 6-24 Mbps
Potencia RX	-94 dBm @ 6-24 Mbps
Costo	115.00 USD

Tabla 5: MikroTik – BaseBox5



Figura 28: MikroTik – BaseBox5

Antena:

Marca	HyperLink
Modelo	MIMO HG1958DP-34D
Frecuencia	4750-5850 GHz
Ganancia	31 dBi (4.9 - 5.3 GHz) 34 dBi (5.4 – 5.8 GHz)
Ancho de Haz Horizontal/Vertical	3.3° / 3.3°
Costo	390.00 USD

Tabla 6: Hyperlink – Antena con Reflector Dish



Figura 29: Hyperlink – Antena con Reflector Dish

Cable

Marca	HyperLink
Modelo	CA-SMNMA002
Conector	N (macho) / SMA (macho)
Longitud	60 cm
Costo	15.00 USD

Tabla 7: Cable N - SMA



Figura 30: Hyper Link - Cable N - SMA

Costos:

Ítem	Descripción	Costo (\$)	Cantidad	Total
1	Radio BaseBox5	115.00	2	230.00
2	Antena Dish Hyper Link MIMO	390.00	2	780.00
3	Cable N – SMA (<i>Pigtail</i>)	15.00	4	60.00
4	Cobertura <i>Radome</i>	50.00	1	50.00
5	Mano de Obra de Instalación	100.00		100.00
6	Movilización	100.00		100.00
Total				1,320.00

Tabla 8: Costo del Enlace
Fuente: Propio

3.2. Diseño de la Red de Energía

Debido a que la Isla San Lorenzo no posee de fuentes de energía por proveedores tradicionales deberemos utilizar fuentes de energía alternas propias para poder abastecer de esta a los equipos a utilizar en la isla.

A continuación se muestra una lista de los equipos activos que se instalarán en la isla y sus cargas correspondientes:

El radio transmisor de Mikrotik, modelo RouterBoard, tiene una carga continua de 14 W, por lo cual tomaremos un total con margen de 20 W para casos de emergencia y escalabilidad.

Se presenta una simulación en el programa NSolVx de la red energía basada en la carga con margen para la locación real en la isla San Lorenzo, esta simulación nos dará un estimado de las especificaciones y cantidades de baterías y módulos de paneles solares que necesitaremos:

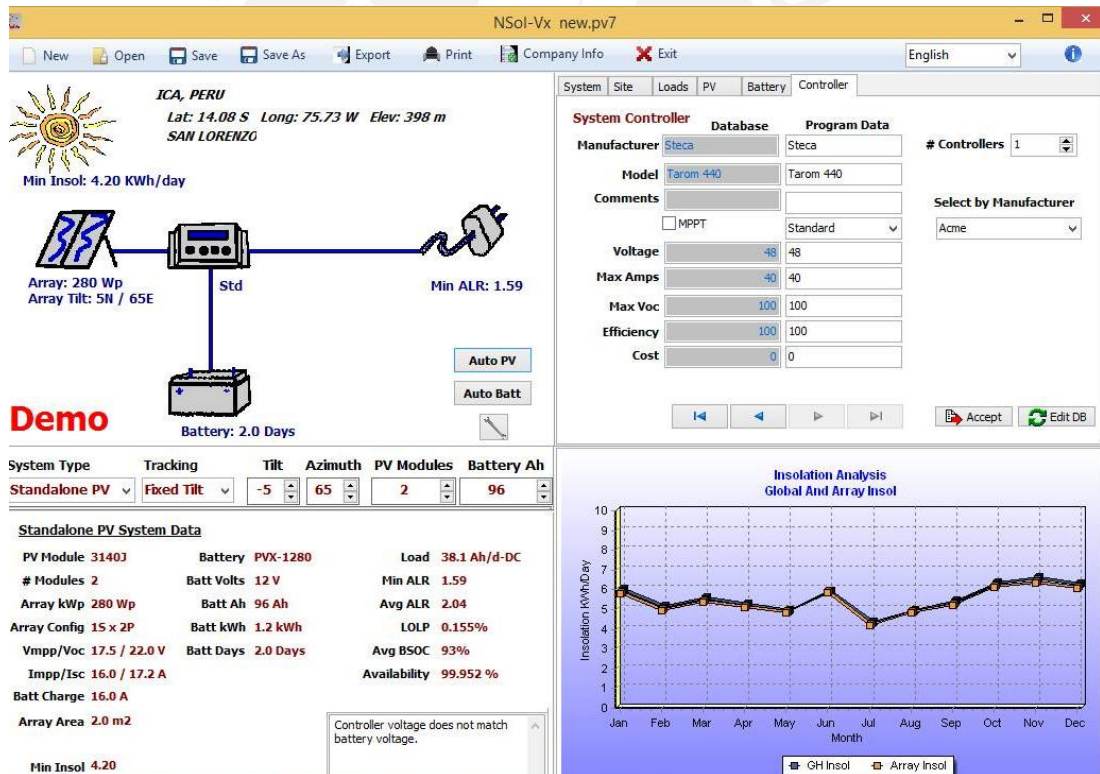


Figura 31: Simulación de la red de energía
Fuente: Propio/NSolVx

Un panel solar de 140 W, como podemos ver en la simulación, no entrega la potencia total durante todo el año dado el entorno nublado que tenemos, por lo cual el sobredimensionamiento de la potencia de los paneles solares es coherente.

3.2.1. Propuesta

Se utilizarán equipos para la red de energía similares a los utilizados previamente por el INRAS para sus diversos proyectos en la isla San Lorenzo, conformado por dos módulos fotovoltaicos (140 W), una batería (104 Amp Hr) y un controlador de carga. Los equipos seleccionados son los siguientes:

Módulo Fotovoltaico:

Marca	Kyocera
Modelo	KD140SX-UPU
Potencia Máxima	140 Watts
Voltaje a Máxima Potencia	17.7 Voltios
Corriente a Máxima Potencia	7.91 Amperios
Máximo Voltaje del Sistema	600 Voltios
Costo	285.00 USD

Tabla 9: Kyocera - Módulo Fotovoltaico



Figura 32: Kyocera - Módulo Fotovoltaico
Fuente: Solar-Electric

Batería VLRA:

Marca	Sun Xtender
Modelo	PVX 1040T
Tipo	Separador de vidrio absorbente (<i>Absorbed Glass Mat, AGM</i>)
Voltaje Nominal	12 Voltios
Capacidad Amperio-Hora @ Ratio 24 Horas	104 Amperio-Hora
Carga Masiva/Absorción 2.37 a 2.40 Voltios/celda @ 77 F	14.2 a 14.4 Voltios
Carga de Flotación. 2.24 a 2.23 Voltios/celda @ 77 F	13.2 a 13.4 Voltios
Costo	300.00 USD

Tabla 10: Sun Xtender – Batería VLRA

Figura 33: Sun Xtender – Batería VLRA
Fuente: Solar-Electric

Controlador de Carga:

Marca	MorningStar
Modelo	SunSaver-10 SS10L12V
Carga Nominal	12 Voltios DC
Máxima Entrada	30 Voltios
Corriente Solar	10 Amperios
Corriente de Carga	10 Amperios
Costo	60.00 USD

Tabla 11: Controlador de Carga SunSaver-10



Figura 34: Controlador de Carga SunSaver-10
Fuente: Morningstar Corporation

COSTOS

Ítem	Descripción	Costo (\$)	Cantidad	Total
1	Paneles Solares 140W	285.00	2	570.00
2	Batería	300.00	1	300.00
3	Controlador de Carga	60	1	60.00
4	Mano de Obra de Instalación	100.00		100.00
5	Movilización	100.00		100.00
			Total	1,130.00

Tabla 12: Costo de la red de energía
Fuente: Propio

3.3. Topología de la Red

Se busca lograr una independencia entre el flujo de datos transmitido desde el magnetómetro y el flujo de datos que será transmitido por proyectos diferentes a este, por lo que se plantea el uso de redes independientes para ambas utilizando la tecnología brindada por la radio transmisora, esta deberá poseer funciones como: ruteo y configuración de VLAN's.

Al conseguir un equipo que soporte estas funciones podremos utilizar la topología de red siguiente:

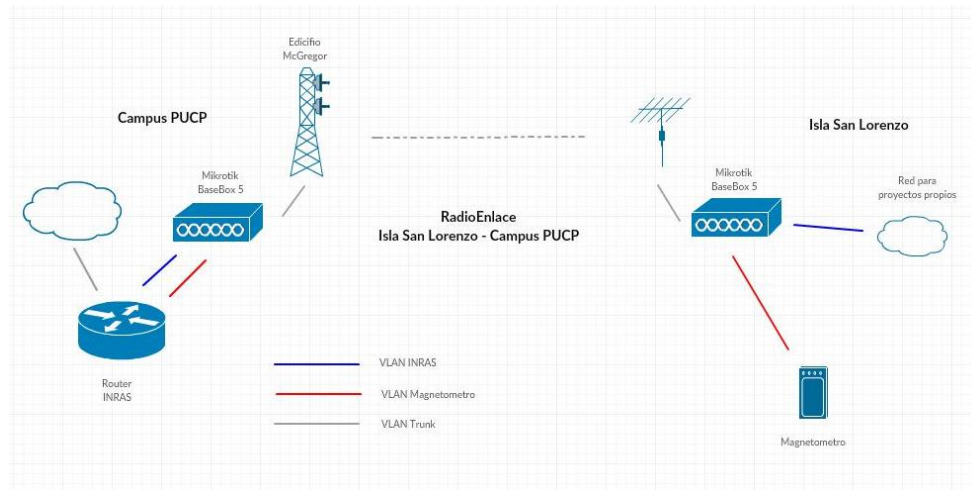


Figura 35: Diagrama de la Topología de Red entre el Campus PUCP y la Isla San Lorenzo
Fuente: Propio/Creately

Se tendrán dos redes independientes, la primera será la “VLAN Magnetómetro”, que será exclusiva para la transferencia de datos desde el magnetómetro y la segunda será la “VLAN INRAS” que abarcará todos los proyectos actuales y futuros. Ambas de estas redes serán llevadas por la “VLAN Trunk” y así transmitidas en un único enlace.

El balanceo de carga, o el ancho de banda designado para cada red, será configurado en el equipo de radio, teniendo la “VLAN Magnetómetro” una tasa de transferencia máxima de 300 kbps y un flujo de señal del tipo *burst* predefinido para transmitir a ciertas horas del día.

El ancho de banda restante se dejará libre para pruebas de redundancia en el enlace y la red para demás experimentos

3.3.1. Propuesta

Se mantiene la propuesta de utilizar las radios transmisoras de la marca Mikrotik ya que poseen un sistema operativo flexible de código abierto, RouterOS, que permite distintas configuraciones personalizadas, como las mencionadas previamente, además de poseer no solo funciones de radio transmisor sino también aquellas de un *router*, por lo cual es la opción más adecuada para este caso.

3.4. Análisis de Ruido

Cuando se realiza un análisis de espectro es importante definir el rango límite del *Access Point* basándose en la tasa de Relación Señal a Ruido (*Signal to Noise Ratio*, SNR), el cual es el nivel de la señal (dBm) menos el nivel de ruido (dBm)

El SNR que es medido en el dispositivo receptor, decrece en cuanto la distancia se incrementa dado que la pérdida en espacio libre entre ambos dispositivos reduce la señal recibida. Un incremento en la interferencia electromagnética, sea de hornos microondas, teléfonos u otras fuentes, también aumentará el nivel de ruido por lo que consecuentemente el SNR disminuirá.

El rango de valores comunes de rendimiento según SNR es el siguiente [23]:

- > 40 dB SNR: Señal excelente, siempre asociado, sumamente rápido
- 25 dB – 40 dB SNR: Señal muy buena, siempre asociado, muy rápido
- 15 dB – 25 dB SNR: Señal baja, siempre asociado, usualmente rápido
- 10 dB – 15 dB SNR: Señal muy baja, usualmente asociado, lento
- 5 dB – 10 dB SNR: Señal nula, no asociado, no hay transmisión

Cuando se tiene un nivel bajo de SNR, primero se debe determinar si el problema es debido a la potencia de la señal o al nivel de ruido. Y para resolverlo se deberá incrementar la potencia transmitida o disminuir el ruido, este es un proceso muy complicado por lo cual la solución más sencilla siempre es aumentar la potencia, en lugar de disminuir el ruido. A continuación presentamos alternativas según sea el caso [24]:

Señal de Baja Potencia:

- Optimizar la locación del dispositivo
- Remover dispositivos cercanos innecesarios
- Utilizar una antena diferente
- Incrementar la potencia del transmisor
- Reconfigurar la seguridad WEP para solo una llave
- Reducir el ancho de banda

Alto Nivel de Ruido

- Utilizar una banda de frecuencia distinta
- Utilizar un canal de portadora distinto
- Identificar la fuente de ruido en el entorno
- Proteger al transmisor del equipo que genera ruido
- Utilizar una banda licenciada



CAPÍTULO 4: Pruebas y Resultados

4.1. Prueba del Enlace

Para las pruebas se instalaron los equipos de radio junto a un módulo de pruebas en las locaciones designadas: el dispositivo configurado como *Access Point* se encuentra en la Isla San Lorenzo y el equipo configurado como *Station*, el cual recibe todos los datos de las pruebas, en el Edificio “McGregor”, para facilitar las modificaciones en la configuración con un rápido acceso.

Las pruebas constan de tomas de datos automáticas ejecutadas cada 15 minutos. Estas fueron diseñadas para medir el ancho de banda del enlace y los parámetros del enlace.

En el Anexo 4.1 se podrán encontrar las pruebas en detalle.

4.1.1. Prueba 1: Ancho de Banda

IPERF

iPerf3 es una herramienta para la medición activa del máximo ancho de banda alcanzable en una red IP. Soporta la configuración de varios parámetros relacionados al tiempo, buffers y protocolos (TCP, UDP, SCTP con IPv4 e IPv6). Para cada prueba reporta el ancho de banda, pérdida, y otros parámetros. Esta es una nueva implementación que no comparte su código con el iPerf original y tampoco es retro-compatible. iPerf fue desarrollado originalmente por NLANR/DAST. iPerf3 está desarrollado principalmente por ESnet / Lawrence Berkeley National Laboratory. Está lanzado bajo tres cláusulas de la licencia BSD.

Características

TCP y SCTP

- Calcula ancho de banda
- Reporta tamaños de MSS/MTU and lecturas observadas
- Soporte para el tamaño de ventana TCP vía buffers de sockets

UDP

- El cliente puede crear flujos UDP de ancho de banda específico
- Medición de la pérdida de paquetes
- Medición del jitter (retraso)
- Capaz de multicast
- Multi-plataforma: Windows, Linux, Android, MacOS X, FreeBSD, OpenBSD, NetBSD, VxWorks, Solaris
- Multi-Hilo: Cliente y servidor pueden terminar múltiples conexiones simultáneas
- El Servidor maneja múltiples conexiones, en lugar de terminarlas luego de un test
- Puede ejecutarse en un tiempo específico, en lugar de una cantidad de data a transferir [25]

Prueba en Canal 5745 MHz

MIMO 2x2

C0: Polarización Vertical

C1: Polarización Horizontal

Inicio: 16:15 horas, 16 de Noviembre del 2015

Fin: 17:45 horas, 18 de Noviembre del 2015

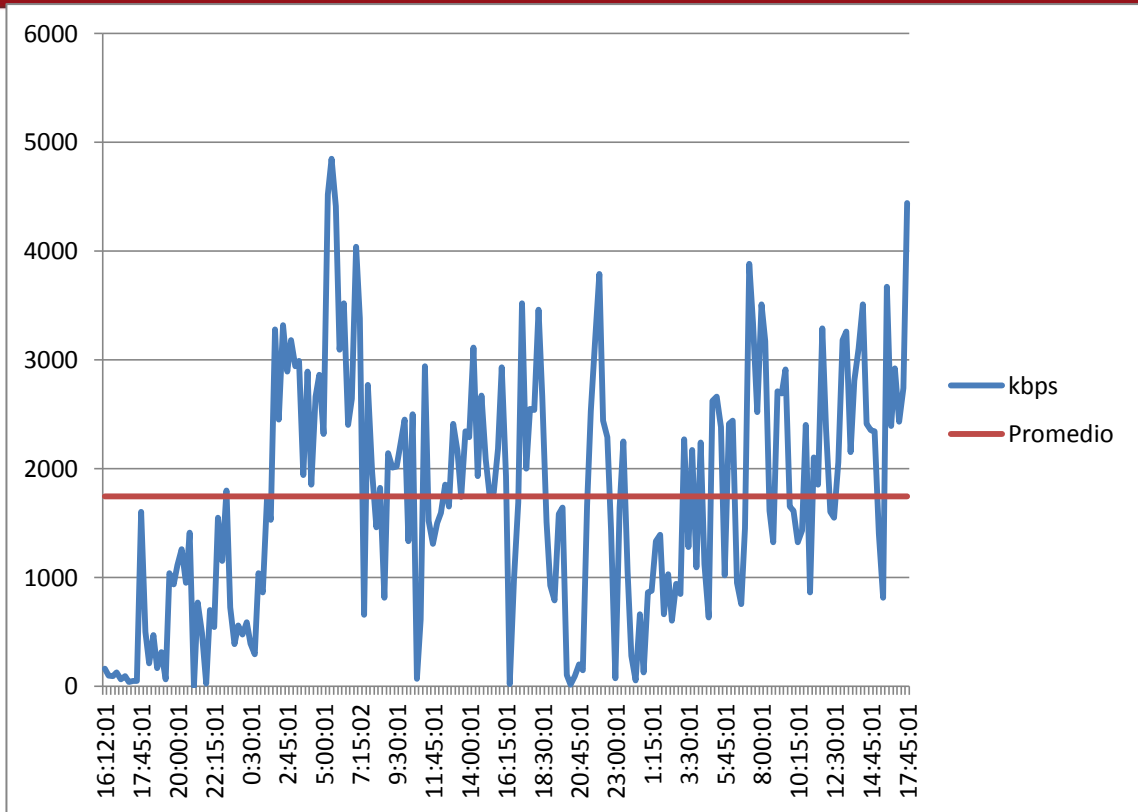


Figura 36: Prueba iPerf en Canal 5745 MHz
Fuente: Propio

Tasa de transmisión promedio: 1.742 Mbps

Prueba en Canal 5825 MHz

MIMO 2x2

C0: Polarización Vertical

C1: Polarización Horizontal

Inicio: 18:15 horas, 18 de Noviembre del 2015

Fin: 9:00 horas, 1 de Diciembre del 2015

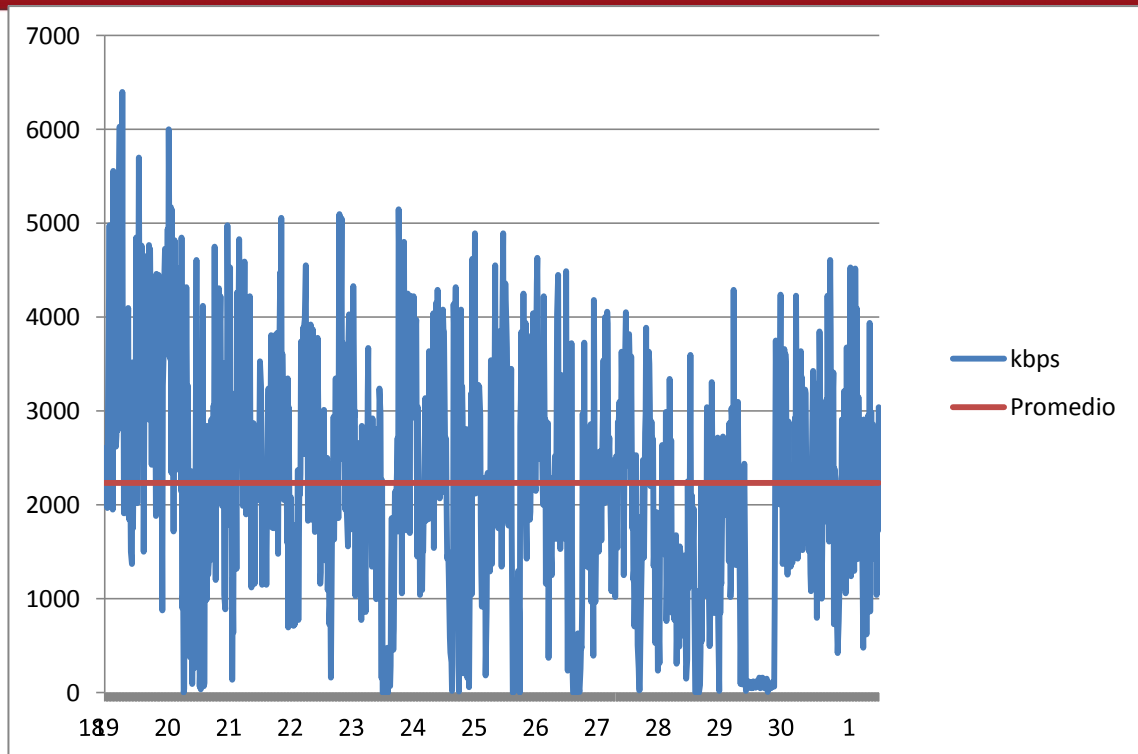


Figura 37: Prueba iPerf en Canal 5825 MHz
Fuente: Propio

Tasa de transmisión promedio: 2.235 Mbps

Desviación estándar: 1.249 Mbps

Estos valores superan la tasa de transmisión promedio requerido por el sistema dando un margen de alrededor del 50%, por lo cual el enlace será aceptable y superior al estimado.

Para poder tener un enlace de mayor estabilidad y sin picos se debería tener una potencia de recepción mayor. Esta podrá ser obtenida mediante la optimización de las locaciones de las estaciones, especialmente en el nodo de la Isla San Lorenzo, lo cual requeriría de trámites con la Marina de Guerra del Perú para permisos de instalación y nuevas estructuras de soporte para la antena. Aumentar la potencia de la antena o transmisor no es una opción, dado que estas pruebas exceden el PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente) máximo establecido para la banda, 36 dBm [26], se necesitará solicitar permisos para poder sobrepasar este límite, teniendo como punto a favor para esta solicitud la trayectoria del enlace, en la cual no hay obstrucciones por zonas pobladas (dentro de la zona de Fresnel).

4.1.2. Prueba 2: Potencia

Los parámetros obtenidos por la prueba son los siguientes [27]:

signal-strength	Potencia promedio (número entero) de la potencia de la señal del cliente hacia el AP en dBm
signal-strength-ch0	Potencia recibida de la señal del cliente hacia el AP en el "chain 0" en dBm
signal-strength-ch1	Potencia recibida de la señal del cliente hacia el AP en el "chain 1" en dBm
signal-to-noise	Diferencia entre la potencia promedio recibida y el piso de ruido en dB
tx-ccq	<i>Client Connection Quality</i> (CCQ) para la transmisión
rx-ccq	<i>Client Connection Quality</i> (CCQ) para la recepción
p-throughput	<i>Throughput</i> estimado aproximado (número entero) que se espera llegue al otro punto, tomando en cuenta 5 segundos

Tabla 13: Parámetros del enlace obtenidos en el equipo MikroTik
Fuente: MikroTik

Client Connection Quality (CCQ)

Es un valor en porcentaje que muestra que tan efectivo es el ancho de banda utilizado comparado al máximo teórico disponible. CCQ es un promedio ponderado de los valores T_{min}/T_{real} , que se calculan para cada trama transmitida, donde T_{min} es el tiempo que tomaría transmitir dicha trama a la velocidad más alta sin reintentos y T_{real} es el tiempo que tomo transmitir la trama en realidad (tomando en cuenta los reintentos necesarios).

Las pruebas nos dieron los valores siguientes:

Prueba en el Canal 5825 MHz

MIMO 2x2

C0: Polarización Vertical

C1: Polarización Horizontal

Inicio: 14:00 horas, 27 de Noviembre del 2015

Fin: 06:30 horas, 28 de Noviembre del 2015

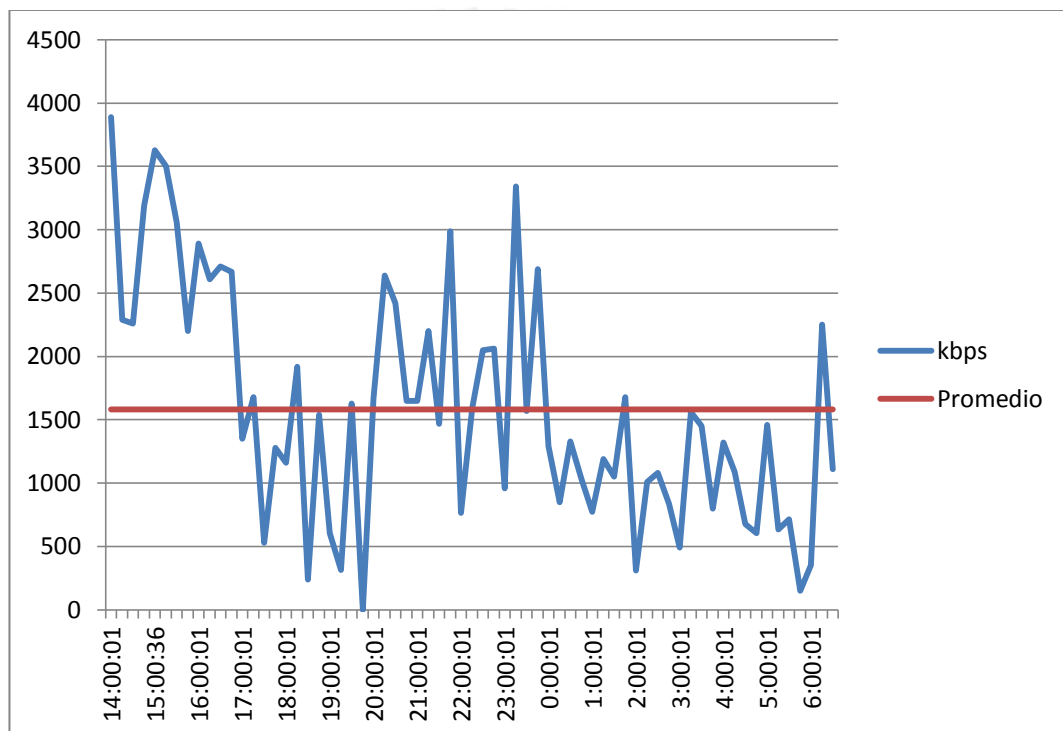


Figura 38: Prueba iPerf en Canal 5825 MHz
Fuente: Propio

Tasa de transmisión promedio: 1.581 Mbps

AP:

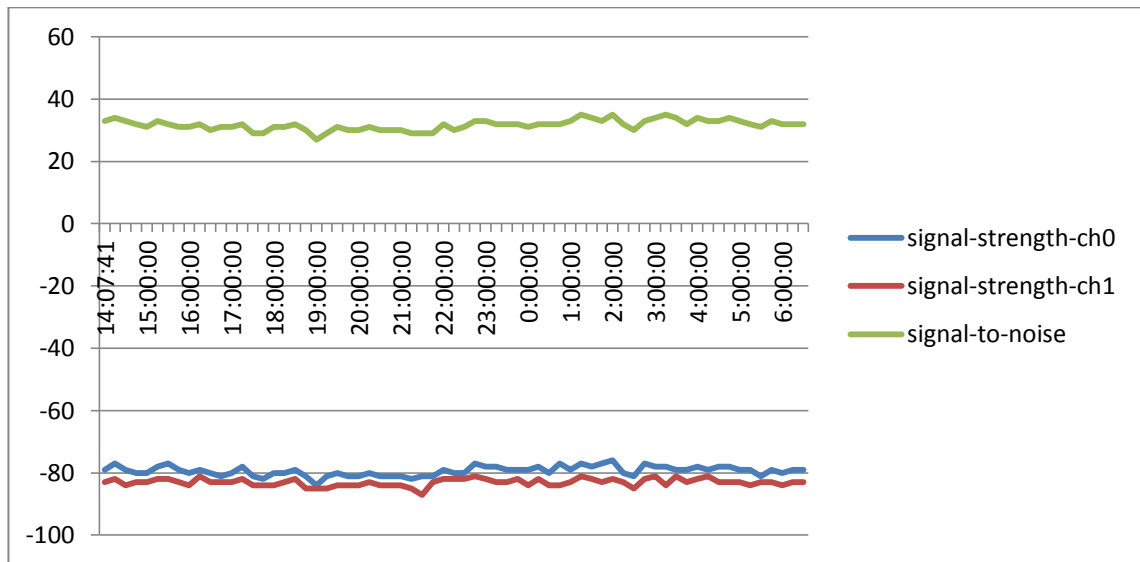


Figura 39: Prueba de Potencia en Canal 5825 MHz – AP
Fuente: Propio

Potencia recibida promedio: -77.59 dBm

SNR promedio: 31.70 dB

STATION:

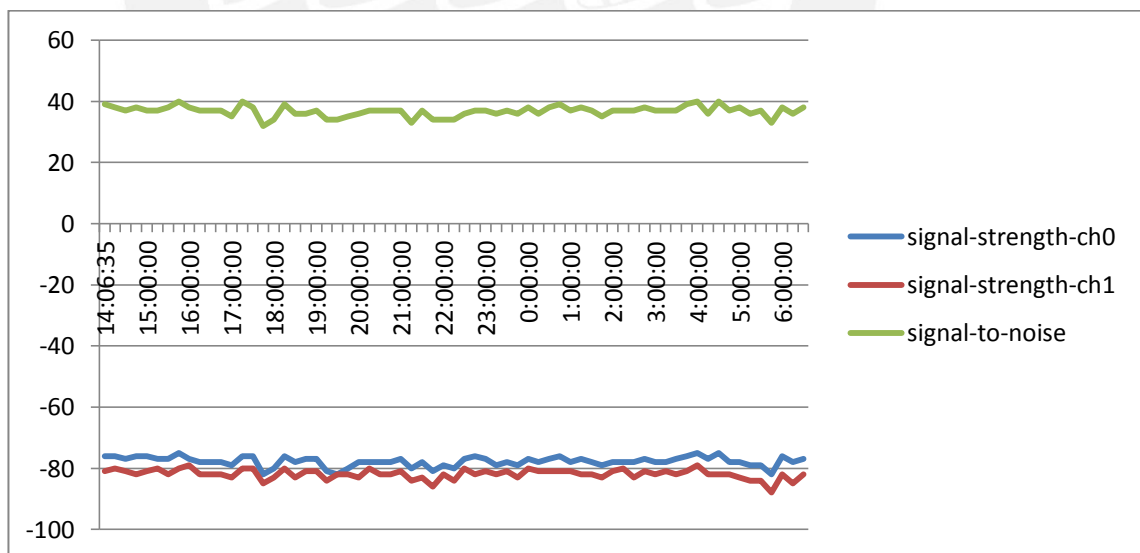


Figura 40: Prueba de Potencia en Canal 5825 MHz – Station
Fuente: Propio

Potencia Recibida Promedio: -76.16

SNR Promedio: 36.78 dB

El valor promedio de SNR, 34.24 dB, es un valor óptimo que permite gran estabilidad del enlace y alta tasa de transmisión, muy cercano al valor por excelencia, superior a 40 dB; por lo cual el ruido en el sistema no será un problema para el enlace.

Como se puede ver, los intervalos en que la conexión se ha perdido se dan con valores normales de SNR y de potencia, por lo cual estas pérdidas no se deben a interferencias, es muy probable que estos fueran dados debido a fallas de red en el módulo de pruebas.

Adicionalmente, podemos notar que el canal con polarización vertical ha sido más eficiente que el canal con polarización horizontal para este caso. Esto va de acuerdo con múltiples proyectos de investigación, *papers* [28], que afirman que la polarización vertical es más efectiva para trayectorias sobre el mar que la polarización horizontal.

4.1.3. Prueba 3: Margen del Sistema

El margen del sistema que obtuvimos a lo largo de las pruebas fue:

Prueba en el Canal 5825 MHz

MIMO 2x2

C0: Polarización Vertical

C1: Polarización Horizontal

Inicio: 14:00 horas, 27 de Noviembre del 2015

Fin: 06:30 horas, 28 de Noviembre del 2015

AP:

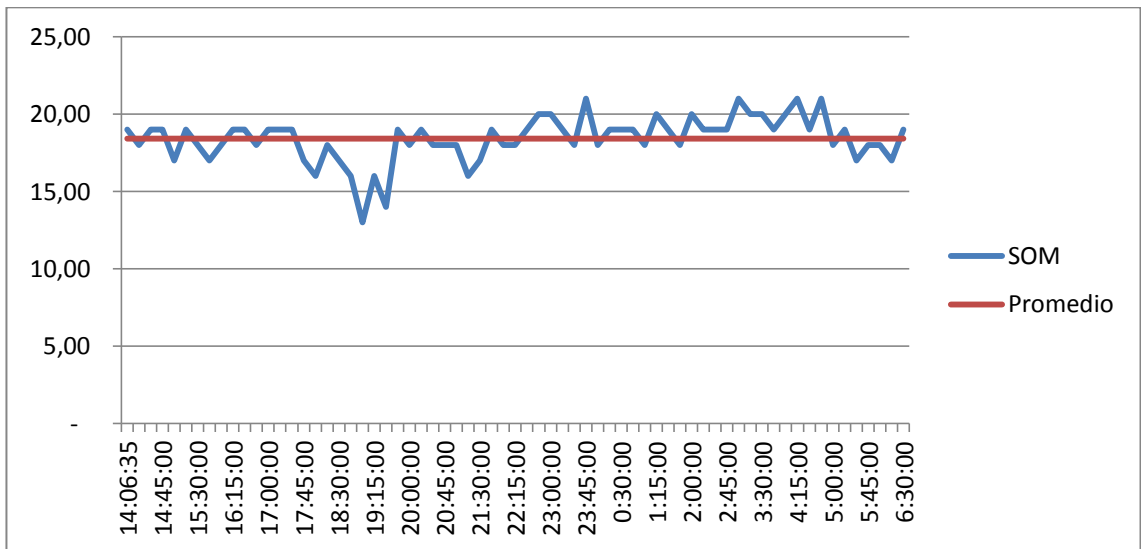


Figura 41: Margen Operativo del Sistema en Canal 5825 MHz – AP
Fuente: Propio

Potencia recibida promedio: -77.59 dBm

Margen del sistema promedio: 18.40 dB

STATION:

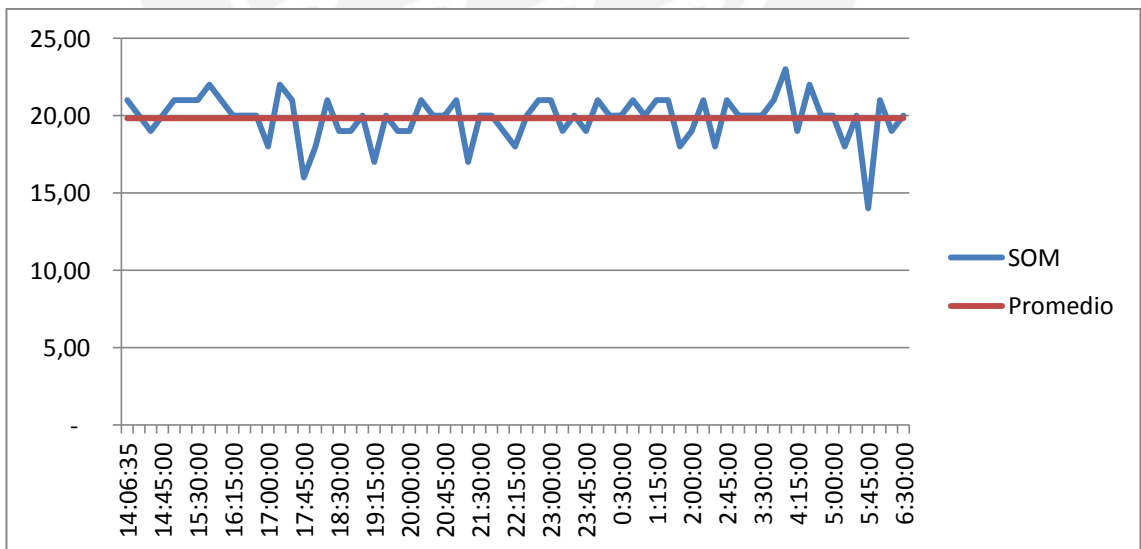


Figura 42: Margen Operativo del Sistema en Canal 5825 MHz – Station
Fuente: Propio

Potencia recibida promedio: -76.16

Margen del sistema promedio: 19.84 dB

Se ve que la potencia recibida está por encima del valor mínimo requerido (sensibilidad) por el receptor en ambas direcciones. El valor promedio del margen del sistema para esta prueba es de 19 dB, el cual es un valor muy cercano al recomendable, 20 dB, para un sistema de alta disponibilidad.

La potencia de recepción esperada según el simulador Radiomobile es de -60.2 dBm y según el cálculo de Link Budget teórico de -37.47435 dBm. La potencia recibida promedio obtenida en las pruebas fue de -76.875 dBm, dándole una mayor confiabilidad a las estimaciones de Radiomobile sobre otros métodos de cálculo.

4.2. Prueba del Sistema de Energía

Obtuvimos los informes de los valores eléctricos en los paneles solares y baterías en la base de datos de “QuakeFinder”, estos siguen el siguiente formato:

La data de cada canal se distribuye en histogramas X e Y, en un intervalo de un día. Cada cuadro incluye en el área izquierda:

- El índice del canal
- La hora PST

En el área derecha

- El máximo de los valores en el intervalo
- El mínimo de los valores en el intervalo
- El delta de los valores en el intervalo
- El histograma-logarítmico de los valores, acumulados en el intervalo.

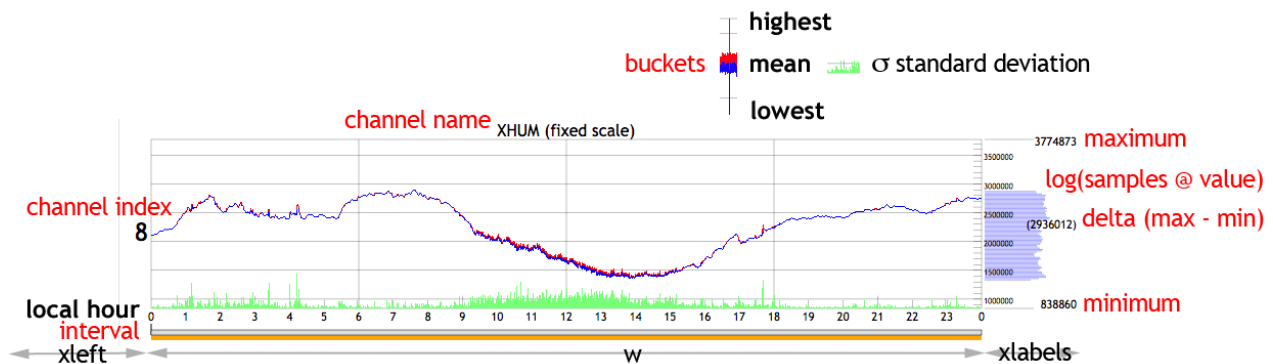


Figura 43: Formato de Muestra Estadística Diaria de los Valores de Energía
Fuente: [29]

El número de cuadros por día es interpretado como un número de pixeles.

Los histogramas son dibujados con rectas SVG en un color

- Azul es graficado verticalmente desde el más bajo al medio de cada cuadro X
- Rojo es graficado verticalmente desde el medio al más alto de cada cuadro X
- Gris es graficado horizontalmente hacia la derecha, proporcional a la cantidad de tiempo que el valor ocupó el pixel
- Verde es graficado verticalmente desde el fondo hacia la desviación estándar de cada cuadro X, el verde se extiende hacia arriba proporcionalmente al cambio en el canal de data. [29]

4.2.1. Estado del Sistema de Energía

La primera gráfica muestra la tensión del panel fotovoltaico.

La segunda gráfica muestra la tensión de la batería utilizada.

La tercera gráfica muestra la temperatura en Kelvin del controlador de baterías.

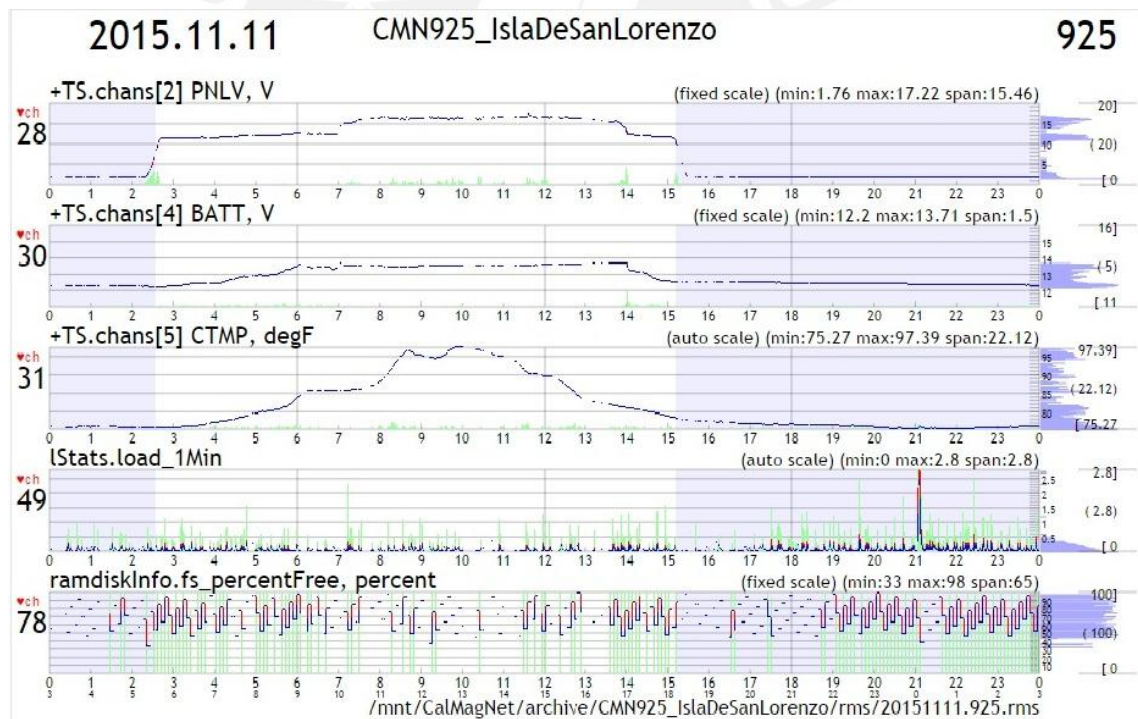


Figura 44: Estadísticas del Sistema de Energía – 11/11/15
Fuente: QuakeFinder

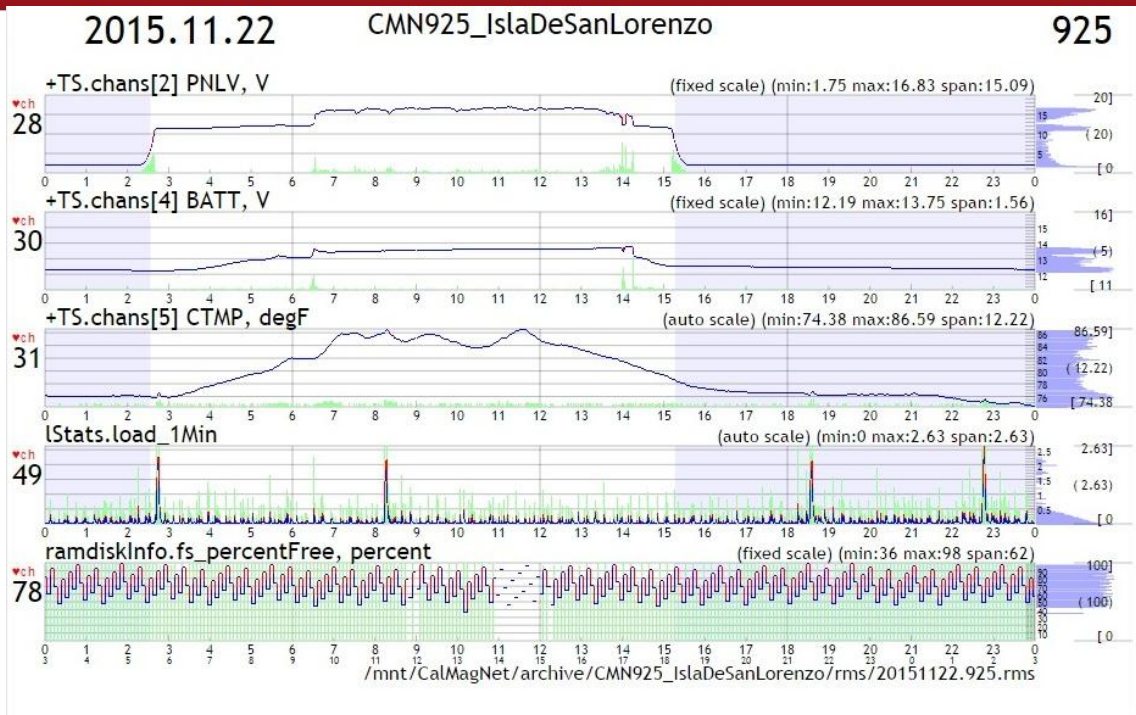


Figura 45: Estadísticas del Sistema de Energía – 22/11/15
Fuente: QuakeFinder

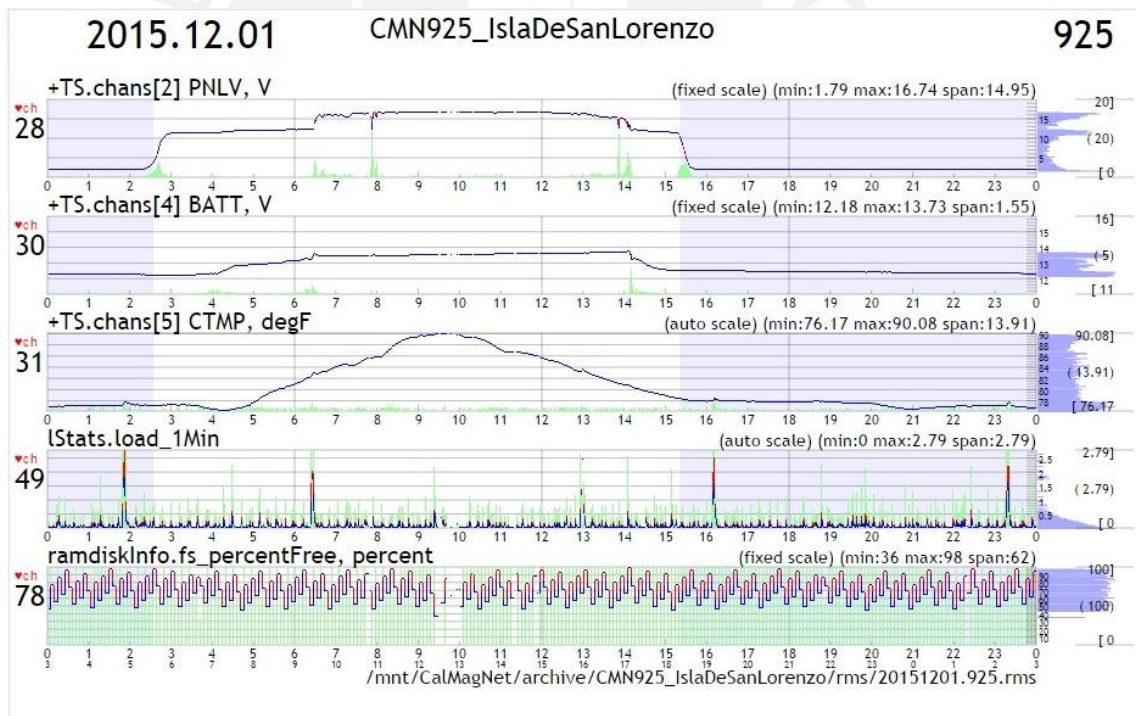


Figura 46: Estadísticas del Sistema de Energía – 01/12/15
Fuente: QuakeFinder

Podemos notar que el sistema de energía tiene un perfil estable, el cual siempre logra brindar de energía suficiente al sistema de comunicaciones a lo largo de todo el día.

La prueba se llevó a cabo durante la temporada de primavera, por lo cual hacer una prueba adicional durante la temporada de invierno, la cual es el peor caso, será de gran beneficio para la confiabilidad de este sistema a lo largo de todo el año.



CONCLUSIONES

- El desarrollo de la tesis comprende una solución para que la estación PM-06 del proyecto “Perú-Magneto” posea un medio de comunicación adecuado, teniendo en cuenta la implicancia económica y la demanda de servicios que se observa en la zona. Como punto a favor, el sistema de microondas tiene un costo más reducido que los demás (fibra óptica, red celular y satelital). Como se observó en el capítulo 3, la relación de los costos con la facilidad de la instalación y la demanda existente, hacen de este sistema el mejor.
- Se demuestra que la banda de frecuencia de 5.8 GHz es mucho más ventajosa en cuestión de economía y facilidad de adquisición de equipos, dado que es una banda liberada.
- Se logra demostrar que es posible lograr un enlace que satisface el requerimiento de transmisión de por lo menos 1,5 Mbps para el Proyecto “Perú-Magneto” del Instituto de Radioastronomía, con trayectoria entre la Isla San Lorenzo y el Campus de la Pontificia Universidad Católica, en la banda de 5.8 GHz. Se obtuvo durante las pruebas una tasa de transmisión promedio de 2.235 Mbps.
- Se tienen valores promedio de SNR y de margen operativo del sistema que superan los parámetros de exigencia comunes. Se obtuvo un SNR de 34.24 dB, valor óptimo que permite gran estabilidad del enlace y una alta tasa de transmisión, muy cercano al valor por excelencia: superior a 40 dB. También se obtuvo un margen operativo del sistema de 19 dB, el cual es un valor muy cercano al recomendable, 20 dB, para un sistema de alta disponibilidad.
- El software propio de equipo muestra valores de transmisión promedio de 5 Mbps, mientras que el módulo de prueba nos demuestra que la tasa real es de 2.235 Mbps. Esto nos lleva a discutir la confiabilidad de las tasas de transmisión mostradas en los equipos de radio.
- El sistema presenta una disponibilidad del 97.11%.
- La alta desviación estándar, 1.249 Mbps, en la tasa de transmisión puede haber sido causada efectos de la propagación multi-trayecto generada por el mar, para poder confirmar esto se necesitarán de más pruebas.
- Se logra diseñar un sistema de energía basada en fuentes alternativas que mantiene a los equipos energizados durante las 24 horas del día con una autonomía de alrededor de 2 días.

- Se logra observar que los datos obtenidos en las pruebas reales difieren con un margen del 10% contra el simulador RadioMobile, por lo que sería más confiable incluso que los simuladores propietarios de los equipos utilizados.
- Lo anchos de banda obtenidos son muchos menores a los esperados a pesar de tener valores favorables de potencia de recepción y SNR.



RECOMENDACIONES

- Si la interferencia aumenta, se recomienda cambiar la frecuencia del enlace a una que se encuentre en una banda licenciada, como la banda de 3 GHz o 10 GHz. Para estas dos bandas, existen equipos disponibles en el mercado. También se podrían utilizar otras bandas, pero se necesitaría importar equipos que trabajen en estas frecuencias.
- Utilizar equipos con mayor potencia. Para que esto funcione, se tendrá que solicitar permisos especiales al MTC, dado que se supera el PIRE máximo establecido: 36 dBm.
- Utilizar un *radome*. Este ayudará a que la radio no sea afectada por el viento y así mantener el ángulo de su haz estable. Adicionalmente, permitirá un mantenimiento óptimo de los equipos, lo cual es especialmente importante para una zona con vientos y arena como es la Isla San Lorenzo.
- Utilizar una locación más alta para el nodo ubicado en la isla San Lorenzo ayudara a evitar la creciente saturación en la banda, al evitar la interferencia causada por los lóbulos de transmisión de otras redes. Así como también disminuir el efecto de la propagación multi-trayecto causada por el mar al alejarnos de la superficie marítima.
- El uso de la tecnología de antenas MIMO podría o bien ayudar a disminuir el nivel de potencia requerido dada su capacidad de redundancia, o bien aumentar la tasa de transmisión mediante su capacidad de multiplexación.
- Es óptimo tener un acceso en tiempo real a los dispositivos de transmisión, para así poder lograr una reconfiguración de los parámetros del enlace. A su vez, también es importante tener acceso en línea en tiempo real a los módulos de pruebas. Ambas recomendaciones se pueden lograr mediante la facilitación de una conexión inalámbrica hacia el módulo de pruebas.
- Mantenimiento preventivo y correctivo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Instituto de Radioastronomía, «Proyecto Perú-Magneto,» 2014. [En línea]. Available: <http://inras.pucp.edu.pe/proyectos/peru-magneto/?lang=es>. [Último acceso: Junio 2015].
- [2] J. A. Richards, Radio Wave Propagation: An Introduction for the Non-Specialist, Springer, 2008.
- [3] H. Sizun, Radio Wave Propagation: Telecommunication Applications, 2005.
- [4] D. M. Pozar, Microwave Engineering, Wiley, 2012.
- [5] Radio Mobile, «Radio Mobile Data Sheet,» Marzo 2015. [En línea]. Available: <http://www.cplus.org/rmw/data.html>. [Último acceso: Junio 2015].
- [6] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Plan Nacional de Asignación de Frecuencias, Lima, 1997.
- [7] H. Medina Guzman, Física II, Lima: PUCP, 2000.
- [8] Instituto Nacional de Estadística e Informática, Compendio Estadístico, Lima, 2007.
- [9] J. A. Hudtwalcker Moran, «Geografía y Paisaje de la Isla San Lorenzo,» *Revista Marina*, nº 1, p. 7, 2009.
- [10] Instituto Metropolitano de Planificación, Plan de Desarrollo Urbano de la Provincia Constitucional del Callao 2011-2022, Callao, 2010.
- [11] R. Flickenger, Wireless Networking in the Developing World, 2013.
- [12] A. N. Ince, Principles of Integrated Maritime Surveillance Systems, Springer, 1999.
- [13] J. v. d. Meer, RFC 3640: RTP Payload Format for Transport of MPEG-4 Elementary Streams, The Internet Society, 2003.

- [14] Microsoft, «Network bandwidth requirements for media traffic in Lync Server 2013,» 24 Septiembre 2015. [En línea]. Available: [https://technet.microsoft.com/en-us/library/jj688118\(v=ocs.15\).aspx](https://technet.microsoft.com/en-us/library/jj688118(v=ocs.15).aspx).
- [15] IEEE, «Get 802 Program,» 2015. [En línea]. Available: <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>. [Último acceso: Junio 2015].
- [16] Movistar Chile, «Banda Ancha Satelital,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.movistar.cl/PortalMovistarWeb/internet/banda-ancha-satelital>. [Último acceso: Junio 2015].
- [17] Federal Communications Commission, «Topic 10: License-Exempt Wireless Applications for Public Safety,» 2010. [En línea]. Available: <https://transition.fcc.gov/pshs/techttopics/techttopics10.html>. [Último acceso: Septiembre 2015].
- [18] Aruba Networks, «Real world examples and discussion around WiFi channels,» 2013. [En línea]. Available: <http://community.arubanetworks.com/t5/Technology-Blog/Real-world-examples-and-discussion-around-WiFi-channels/ba-p/66712>. [Último acceso: Septiembre 2015].
- [19] Mikrotik, «MikroTik Wireless Networks,» Diciembre 2013. [En línea]. Available: http://wiki.mikrotik.com/wiki/Testwiki/MikroTik_Wireless_Networks. [Último acceso: Septiembre 2015].
- [20] IEEE, 802.11 Accumulated Maintenance Changes D5, 2010.
- [21] Ubiquiti, «airMAX - When to enable long range PtP link mode?,» Agosto 2015. [En línea]. Available: <https://help.ubnt.com/hc/en-us/articles/205202670-airMAX-When-to-enable-long-range-PtP-link-mode->. [Último acceso: Septiembre 2015].
- [22] Ubiquiti Networks Inc, «airLink - Outdoor Wireless Link Calculator,» [En línea]. Available: <https://airlink.ubnt.com/#/>. [Último acceso: 2015].
- [23] QuinnStreet Inc., «WiFi: Define Minimum SNR Values for Signal Coverage,» 2015. [En línea]. Available:

<http://www.enterprisenetworkingplanet.com/netsp/article.php/3747656/WiFi-Define-Minimum-SNR-Values-for-Signal-Coverage.htm>.

- [24] NetSpot, «Troubleshooting SNR Issues,» [En línea]. Available: <http://help.netspotapp.com/troubleshooting-snr/>.
- [25] ESnet, «iPerf - The TCP, UDP, SCTP network bandwidth measurement tool,» [En línea]. Available: <https://iperf.fr/>. [Último acceso: Noviembre 2015].
- [26] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Resolución Ministerial No 777-2005-MTC, Lima, 2005.
- [27] MikroTik, «Manual: Wireless FAQ - MikroTik,» 23 Enero 2014. [En línea]. Available: http://wiki.mikrotik.com/wiki/Manual:Wireless_FAQ#What_is_CCQ_and_how_are_the_values_determined.3F. [Último acceso: Diciembre 2015].
- [28] M. A. Sletten, Ultrawide-Band Radar Observations of Multipath Propagation Over the Sea Surface, IEEE, 1996.
- [29] QuakeFinder, «QuakeFinder >> Data,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.quakefinder.com/data/>. [Último acceso: Noviembre 2015].
- [30] IEEE Std 211-1997, Standard Definitions of Terms for Radio Wave Propagation, 1997.