

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y**  
**FORMALES**  
**PROGRAMA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**“EVALUACIÓN DE PERFORMANCE DE UN  
ENLACE MICROONDAS EN LA BANDA DE 5GHZ  
EN LA CIUDAD DE AREQUIPA”**

Tesis Presentada por:  
**ELFY DIEGO PALMA ALVAREZ**

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero Electrónico

**AREQUIPA – PERÚ**  
**2014**

# ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO I: EL PROBLEMA .....</b>	<b>11</b>
1.    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
2.    FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	12
3.    JUSTIFICACIÓN.....	12
4.    OBJETIVOS.....	12
4.1    GENERAL.....	12
4.2    ESPECÍFICOS.....	13
5.    ALCANCE .....	13
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
1.    PROPAGACIÓN.....	15
1.1    PRINCIPIOS DE PROPAGACIÓN .....	15
1.2    PROPAGACIÓN EN LA TROPÓSFERA.....	17
1.3    MODELOS DE PROPAGACIÓN .....	18
2.    DISEÑO DEL ENLACE INALÁMBRICO .....	20
2.1    DISEÑO DEL TRANSMISOR Y RECEPTOR DE RADIOENLACE .....	20
2.2    SOFTWARE PARA RADIO ENLACES.....	22
2.3    DISEÑO, FUNCIONAMIENTO Y TIPOS DE ANTENA.....	23
2.3.1    TIPOS DE ANTENAS: .....	28
2.4    MODELAMIENTO DE CANAL PARA SISTEMAS MICROONDAS.....	32
2.5    CÁLCULOS BALANCE DE POTENCIAS (LINK BUDGET).....	32
2.6    MARGEN DE DESVANECIMIENTO Y DISPONIBILIDAD.....	36
3.    TRANSMISIÓN DE DATOS SOBRE CANALES DE RADIO .....	37
3.1    SEÑALES DIGITALES MODULADAS EN CANALES AWGN.....	39
3.2    TÉCNICAS DE MODULACIÓN LINEAL .....	40
3.3    TRANSMISIÓN DE DATOS SOBRE CANALES DE DESVANECIMIENTO PLANO.....	43
3.3.1    CANALES DE DESVANECIMIENTO PLANO LENTAMENTE.....	44
3.3.2    CANALES DE DESVANECIMIENTO PLANO RÁPIDAMENTE.....	46
3.4    TRANSMISIÓN DE DATOS SOBRE CANALES DE DESVANECIMIENTO SELECTIVOS EN FRECUENCIA .....	47
3.5    MULTIPLEXIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIAS ORTOGONALES (OFDM) .....	48
4.    SISTEMAS DE DIVERSIDAD.....	50
4.1    PRINCIPIO Y MÉTODOS DE DIVERSIDAD .....	50
4.2    SISTEMAS CON MÚLTIPLES ANTENAS (MIMO) .....	54
5.    ERROR DE CONTROL DE CODIFICACIÓN .....	55
5.1    MODELOS DISCRETOS DE CANAL .....	56
5.2    PROPIEDADES, TIPOS Y DECODIFICACIÓN DE LOS CÓDIGOS DE BLOQUE.....	57
5.2.1    PROPIEDADES DE DISTANCIA.....	58
5.2.2    TIPOS DE CÓDIGOS DE BLOQUE.....	58
5.2.3    DECODIFICACIÓN DE CÓDIGOS DE BLOQUE .....	59
5.3    CÓDIGOS CONVOLUCIONALES.....	60

5.4	MÉTODOS DE CODIFICACIÓN PARA CANALES DE DESVANECIMIENTO.....	61
5.5	TÉCNICAS DE MODULACIÓN CODIFICADA.....	64
<b>6.</b>	<b>PAQUETES DE TRANSMISIÓN INALÁMBRICOS.....</b>	<b>65</b>
6.1	TRANSMISIÓN EN ENLACES INALÁMBRICOS.....	65
6.2	COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS ARQ Y FEC.....	67
<b>7</b>	<b>ETHERNET.....</b>	<b>69</b>
7.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DE ETHERNET.....	69
7.2	LA TRAMA ETHERNET.....	71
7.2.1	LA TRAMA: ENCAPSULACIÓN DEL PAQUETE.....	71
7.2.2	LA DIRECCIÓN MAC DE ETHERNET.....	72
7.2.3	CAPAS DE DIRECCIONAMIENTO.....	73
7.3	CONTROL DE ACCESO AL MEDIO DE ETHERNET.....	74
7.4	CAPA FÍSICA DE ETHERNET.....	75
7.5	PROTOCOLO DE RESOLUCIÓN DE DIRECCIONES (ARP).....	75
<b>CAPÍTULO III: PLANTEAMIENTO DE FACTORES, VARIABLES Y ESCENARIOS .....</b>		<b>77</b>
<b>1.</b>	<b>FACTORES Y VARIABLES:.....</b>	<b>77</b>
1.1	“THROUGHPUT”.....	77
1.2	MARGEN DE DESVANECIMIENTO.....	78
1.3	INSTALACIÓN DEL ENLACE.....	80
1.4	“DELAY”.....	83
1.5	CLIMA Y CONTAMINACIÓN.....	84
1.6	CORRECCIÓN DE ERRORES (FEC).....	86
1.7	MODULACIÓN.....	88
<b>2.</b>	<b>DETERMINACION DE ESCENARIOS.....</b>	<b>91</b>
2.1	DETERMINACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS ESCENARIOS.....	91
2.2	ESTUDIO DE FACTIBILIDAD.....	93
2.2.1	ESTUDIO PRELIMINAR.....	94
2.2.1.1	RESULTADOS DEL ESTUDIO PRELIMINAR.....	95
2.2.2	ESTUDIO FÍSICO.....	102
2.2.2.1	RESULTADOS DEL ESTUDIO FÍSICO.....	104
2.2.3	ESTUDIO DE RADIO FRECUENCIA.....	113
2.2.3.1	RESULTADOS DEL ESTUDIO DE RADIO FRECUENCIA.....	115
<b>3.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS.....</b>	<b>117</b>
3.1	ESCENARIO 1.....	119
3.2	ESCENARIO 2.....	121
3.3	ESCENARIO 3.....	123
<b>4.</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN DE LOS ESCENARIOS.....</b>	<b>125</b>
<b>5.</b>	<b>INSTRUMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>127</b>
<b>CAPÍTULO IV: DESARROLLO DEL PROYECTO.....</b>		<b>136</b>
<b>1.</b>	<b>RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO.....</b>	<b>136</b>
<b>2.</b>	<b>SIMULACIONES.....</b>	<b>138</b>
<b>3.</b>	<b>MEDICIONES.....</b>	<b>141</b>
<b>4.</b>	<b>CALCULOS.....</b>	<b>148</b>
<b>CAPÍTULO V: RESULTADOS .....</b>		<b>151</b>
<b>1.</b>	<b>ANÁLISIS DE ESPECTRO DEL ODU.....</b>	<b>151</b>
<b>2.</b>	<b>SIMULACIONES Y MEDICIONES.....</b>	<b>155</b>
2.1	“THROUGHPUT” Y RSSI.....	155
2.2	“DELAY”.....	160

<b>CAPÍTULO VI: EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>163</b>
<b>1. ANÁLISIS DE ESPECTRO.....</b>	<b>163</b>
1.1 ESCENARIO 1 .....	164
1.2 ESCENARIO 2 .....	166
1.3 ESCENARIO 3 .....	167
<b>2. EVALUACIÓN DE PERFORMANCE.....</b>	<b>169</b>
2.1 EVALUACIÓN ESCENARIO 1 .....	172
2.1.1 CON 36dBm DE PIRE.....	173
2.1.2 CON 39dBm DE PIRE.....	176
2.1.3 COMPARACIÓN ENTRE LOS PIRE (36dBm y 39dBm).....	179
2.2 EVALUACIÓN ESCENARIO 2 .....	179
2.2.1 CON 36 dBm DE PIRE.....	180
2.2.2 CON 39 dBm DE PIRE.....	181
2.2.3 COMPARACIÓN ENTRE LOS PIRE (36dBm y 39dBm).....	183
2.3 EVALUACIÓN ESCENARIO 3 .....	184
2.3.1 CON 36 dBm DE PIRE.....	184
2.3.2 CON 39 dBm DE PIRE.....	186
2.3.3 COMPARACIÓN ENTRE LOS PIRE (36dBm y 39dBm): .....	188
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>189</b>
<b>OBSERVACIONES.....</b>	<b>192</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>193</b>
<b>TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>193</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>194</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>197</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura [II.1] Componentes de onda propagados cerca a la superficie de la tierra.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura [II.2] Mecanismos de propagación.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura [II.3] Geometría del modelo Ikegami .....</i>	<i>19</i>
<i>Figura [II.4] Geometría del modelo COST. ....</i>	<i>20</i>
<i>Figura [II.5] Diagrama de bloques de un transmisor de radio simple .....</i>	<i>21</i>
<i>Figura [II.6] Receptor de frecuencia de radio sintonizada.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura [II.7] Receptor Súper Heterodino.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura [II.8] Receptor Súper Heterodino doble.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura [II.9] La antena como elemento circuital.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura [II.10] Calculo de la densidad de potencia usando un radiador isotrópico.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura [II.11] Ejemplo de patrón de radiación de la antena. ....</i>	<i>27</i>
<i>Figura [II.12] Patrón de radiación de una antena direccional.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura [II.13] a) Antena Dipolo, b) Patrón de radiación de un dipolo de media onda, c) Impedancia en el punto de alimentación.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura [II.14], a) La antena Vertical, b) Patrón de radiación (<math>h = \lambda/4, \lambda</math>). ....</i>	<i>29</i>
<i>Figura [II.15], a) Antena de Cable Largo, b) Ejemplo típico del patrón de radiación (<math>L \approx 3\lambda</math>).....</i>	<i>29</i>

<i>Figura [II.16] Arreglo de dipolos verticales.</i>	30
<i>Figura [II.17], a) Típica antena Yagui usando un dipolo plegado como elemento de alimentación.<sup>6</sup></i>	30
<i>Figura [II.18] Antena parabólica.</i>	31
<i>Figura [II.19] Modelo clásico para sistemas de comunicación</i>	32
<i>Figura [II.20] Cálculos link budget.</i>	34
<i>Figura [II.21] Modelo de un simple sistema inalámbrico de comunicación.</i>	37
<i>Figura [II.22] Pasa-bajo equivalente de un sistema de comunicación inalámbrico</i>	38
<i>Figura [II.23] Diagrama de constelación para 4PAM y 8PAM.</i>	41
<i>Figura [II.24] Diagramas de constelación para 4QAM y 16QAM.</i>	42
<i>Figura [II.25] Diagrama de constelación de QPSK y 8PSK.</i>	43
<i>Figura [II.26] a) Esquema de distribución Rayleigh b) Función de densidad de probabilidad de la distribución Rayleigh.</i>	45
<i>Figura [II.27] a) Esquema de distribución Rician b) Función de densidad de probabilidad de la distribución Rician.</i>	46
<i>Figura [II.28] Diagrama de bloques simplificado de un sistema basado en OFDM</i>	49
<i>Figura [II.29] Diagrama de bloques del transmisor de un sistema multi-portadora.</i>	49
<i>Figura [II.30] Señales OFDM vistas en el dominio de la frecuencia.</i>	50
<i>Figura [II.31] Principio de diversidad.</i>	51
<i>Figura [II.32] Clasificación de los tipos de diversidad.</i>	53
<i>Figura [II.33] Esquema del receptor con diversidad de espacio.</i>	53
<i>Figura [II.34] Esquema de un sistema MIMO, cada uno de los elementos <math>h_{ij}(t)</math> representa el canal generado entre la antena transmisora <math>j</math>, con <math>j = 1, \dots, M</math> y la antena receptora <math>i</math>, con <math>i = 1, \dots, N</math>.</i>	55
<i>Figura [II.35] Esquema de diversidad usado en los sistemas MIMO.</i>	55
<i>Figura [II.36] Modelo de sistema de comunicación digital</i>	57
<i>Figura [II.37] Diagrama de bloques simplificado de un decodificador convolucional.</i>	61
<i>Figura [II.38] Rendimiento de la tasa de código convolucional <math>1/2</math> en canales correlaciones con desvanecimiento Rayleigh, es utilizada decodificación suave y se ha supuesto la perfecta información del estado del canal.</i>	62
<i>Figura [II.39] Diagrama de bloques de un sistema de comunicación con entrelazado/desentrelazado.</i>	63
<i>Figura [II.40] Diagrama de bloques de un sistema de codificación codificado.</i>	64
<i>Figura [II.41] Ejemplo de dos sistemas de comunicación teniendo la misma eficiencia de ancho de banda</i>	65
<i>Figura [II.42] Sistema híbrido FEC/ARQ.</i>	68
<i>Figura [II.43] Ethernet en el modelo OSI.</i>	69
<i>Figura [II.44] Comparación del tamaño de campo y las estructuras de tramas IEE 802.3 y Ethernet.</i>	71
<i>Figura [II.45] Distintas capas de direccionamiento.</i>	74
<i>Figura [III.1] a) Equipo ODU-Vista frontal y posterior, b) Equipo IDU/PoE, c) Hub Sincronizador, d) Antena Parabólica Externa, e) Kit de Montaje.</i>	80
<i>Figura [III.2] Factor de Clima/Terreno.</i>	85
<i>Figura [III.3] Diagrama de Constelación BPSK.</i>	89
<i>Figura [III.4] Diagrama de Constelación QPSK.</i>	89
<i>Figura [III.5] Diagrama de Constelación 16QAM.</i>	90
<i>Figura [III.6] Diagrama de Constelación 64QAM.</i>	91
<i>Figura [III.7] Ubicación de las Sedes.</i>	92
<i>Figura [III.8] Arquitectura de los enlaces.</i>	93
<i>Figura [III.9] Proceso de Factibilidad del Enlace Microondas.</i>	94
<i>Figura [III.10] Topología PtM de Red A.</i>	96
<i>Figura [III.11] Topología PtP de Red B.</i>	97

<i>Figura [III.12] Topología creada con el simulador R-Planner.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura [III.13] Diagramas del Perfil a) Enlace sede Cayma – sede “La Salle”, b) Enlace sede Cayma – sede Jerusalén, c) Enlace sede Cayma – sede Gral. Morán. d) Enlace sede Cayma – sede Mercaderes. .....</i>	<i>100</i>
<i>Figura [III.14], Obstrucción sede Cayma. ....</i>	<i>106</i>
<i>Figura [III.15] a) Obstrucción sede “La Salle”, b) Obstrucciones sede General Morán.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura [III.16], Obstrucción Hotel Crismar .....</i>	<i>107</i>
<i>Figura [III.17] a) Ubicación sede Mercaderes b) Obstrucción sede Mercaderes .....</i>	<i>108</i>
<i>Figura [III.18] Obstrucción con a) sede Jerusalén, b) sede Gral. Morán, c) sede “La Salle” .....</i>	<i>108</i>
<i>Figura [III.19] Fuentes de interferencia sede Cayma. ....</i>	<i>111</i>
<i>Figura [III.20] Fuentes de interferencia sede “La Salle” .....</i>	<i>111</i>
<i>Figura [III.21] Fuentes de interferencias sedes Jerusalén y Gral. Morán.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura [III.22] Ubicación sedes a) Cayma, b) “La Salle”, c) Gral. Morán, d) Jerusalén.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura [III.23] Analizador de espectro portátil. ....</i>	<i>115</i>
<i>Figura [III.24] Análisis de espectro en la sede “La Salle”. ....</i>	<i>116</i>
<i>Figura [III.25] Diagrama de conexiones Escenario 1 .....</i>	<i>120</i>
<i>Figura [III.26] Diagrama de conexiones Escenario 2 .....</i>	<i>122</i>
<i>Figura [III.27] Diagrama de conexiones Escenario 3 .....</i>	<i>124</i>
<i>Figura [III.28] Implementación sede Cayma .....</i>	<i>125</i>
<i>Figura [III.29] Implementación sede “La Salle” .....</i>	<i>126</i>
<i>Figura [III.30] Implementación sede Jerusalén.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura [III.31] Implementación sede General Morán.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura [III.32] Equipo de radioenlace Radwin modelo 2000B.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura [III.33] Patrón de radiación antena “patch”.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura [III.34] Antena dual externa L-Com.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura [III.35] Patrón de radiación antena parabólica.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura [III.36] Servidor HP Proliant DL160.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura [III.37] Software de monitoreo y administración SNMPc v8 (versión de evaluación).....</i>	<i>130</i>
<i>Figura [III.38] Cámara IP HD Sony SNC-CH110.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura [III.39] Software de administración Sony RealShot Manager Lite.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura [III.40] Software de Simulación R-Planner.....</i>	<i>132</i>
<i>Figura [III.41] Software de Simulación de Enlaces Microondas Radio Mobile .....</i>	<i>133</i>
<i>Figura [III.42] Software Google Earth .....</i>	<i>133</i>
<i>Figura [III.43] Software de Administración Radwin Manager .....</i>	<i>134</i>
<i>Figura [III.44] Kit de analizador de espectro portátil Aaronia .....</i>	<i>135</i>
<i>Figura [III.45] Software Aaronia LCS Analyzer .....</i>	<i>135</i>
<i>Figura [III.46] Dispositivo de GPS GARMIN.....</i>	<i>135</i>
<i>Figura [IV.1] Resultado del Radio Mobile para el enlace microondas entre las sedes de Cayma y “La Salle” .....</i>	<i>140</i>
<i>Figura [IV.2] Topología de red creada en SNMPc .....</i>	<i>142</i>
<i>Figura [IV.3] Seleccionar la velocidad de bit en un ancho de banda de canal de 20MHz.....</i>	<i>143</i>
<i>Figura [IV.4] Resumen medición de “throughput” SNMPc.....</i>	<i>143</i>
<i>Figura [IV.5] Medición del “delay” usando DOS .....</i>	<i>144</i>
<i>Figura [IV.6] Resultado de análisis de espectro con los transeiver en las sedes de Cayma y General Morán .....</i>	<i>145</i>
<i>Figura [IV.7] Gráficos de Mediciones realizadas en las Sedes de Cayma y “La Salle”. .....</i>	<i>147</i>
<i>Figura [IV.9] Sistema de comunicación donde se encuentran los parámetros utilizados en los cálculos .....</i>	<i>150</i>

<i>Figura [V.1], Grafico análisis de espectro radioeléctrico Cayma – “La Salle”</i> .....	152
<i>Figura [V.2] Grafico análisis de espectro radioeléctrico La Salle – Cayma.</i> .....	152
<i>Figura [V.3] Grafico análisis de espectro radioeléctrico Cayma - Jerusalén</i> .....	153
<i>Figura [V.4] Grafico análisis de espectro radioeléctrico Jerusalén – Cayma</i> .....	153
<i>Figura [V.5] Grafico análisis de espectro radioeléctrico Cayma – Gral. Moran</i> .....	154
<i>Figura [V.6] Grafico análisis de espectro radioeléctrico Gral. Moran - Cayma</i> .....	154

## ÍNDICE DE TABLAS

<u><i>Tabla [III.1] Ubicaciones propuestas</i></u> .....	98
<u><i>Tabla [III.2] Resumen de Parámetros</i></u> .....	99
<u><i>Tabla [III.3] Propiedades del enlace microondas sede Cayma – sede “La Salle”</i></u> .....	101
<u><i>Tabla [III.4] Propiedades del enlace microondas sede Cayma – sede Jerusalén</i></u> .....	102
<u><i>Tabla [III.5] Propiedades del enlace microondas sede Cayma – Gral. Morán</i></u> .....	102
<u><i>Tabla [III.6] Propiedades del enlace microondas sede Cayma – sede Mercaderes</i></u> .....	102
<u><i>Tabla [III.7] Obstrucciones en las diferentes sedes</i></u> .....	105
<u><i>Tabla [III.8] Fuentes de Interferencia en las sedes de Cayma, “La Salle”, Jerusalén y Gral. Morán</i></u> ...	110
<u><i>Tabla [III.9] Resumen mástil o torres de comunicación</i></u> .....	112
<u><i>Tabla [III.10] Distribución de frecuencias de operación</i></u> .....	116
<u><i>Tabla [III.11] Velocidad de bit disponibles en el equipo Radwin 2000B</i></u> .....	117
<u><i>Tabla [III.12] Sensibilidad mínima por velocidad de bit</i></u> .....	118
<u><i>Tabla [III.13] Tráfico generado según la velocidad de bit</i></u> .....	118
<u><i>Tabla [III.14] Equipamiento enlace microondas sede Cayma – sede “La Salle”</i></u> .....	119
<u><i>Tabla [III.15] Velocidades de bit posibles en un ancho de banda de 5,10 y 20 MHz enlace sede Cayma – sede “La Salle”</i></u> .....	121
<u><i>Tabla [III.16] Equipamiento enlace microondas sede Cayma – sede Jerusalén</i></u> .....	121
<u><i>Tabla [III.17] Velocidades de bit posibles en un ancho de banda de 5,10 y 20 MHz con PIRE de 36 y 39 dBm sede Cayma – sede Jerusalén</i></u> .....	123
<u><i>Tabla [III.18] Equipamiento enlace microondas sede Cayma – sede “La Salle”</i></u> .....	123
<u><i>Tabla [III.19] Velocidades de bit posibles en un ancho de banda de 5,10 y 20 MHz con PIRE de 36 y 39 dBm sede Cayma – sede “La Salle”</i></u> .....	125
<u><i>Tabla [III.20] Características equipo Radwin 2000B</i></u> .....	128
<u><i>Tabla [V.1] Estructura de las tablas resumen</i></u> .....	156
<u><i>Tabla [V.2] Resumen de velocidades de bit del Escenario 1</i></u> .....	158
<u><i>Tabla [V.3] Resumen de velocidades de bit del Escenario 2</i></u> .....	158
<u><i>Tabla [V.4] Resumen de velocidades de bit del Escenario 3</i></u> .....	159
<u><i>Tabla [V.5] Resumen de mediciones de los escenarios 1, 2 y 3 respecto al “delay”</i></u> .....	162

## RESUMEN

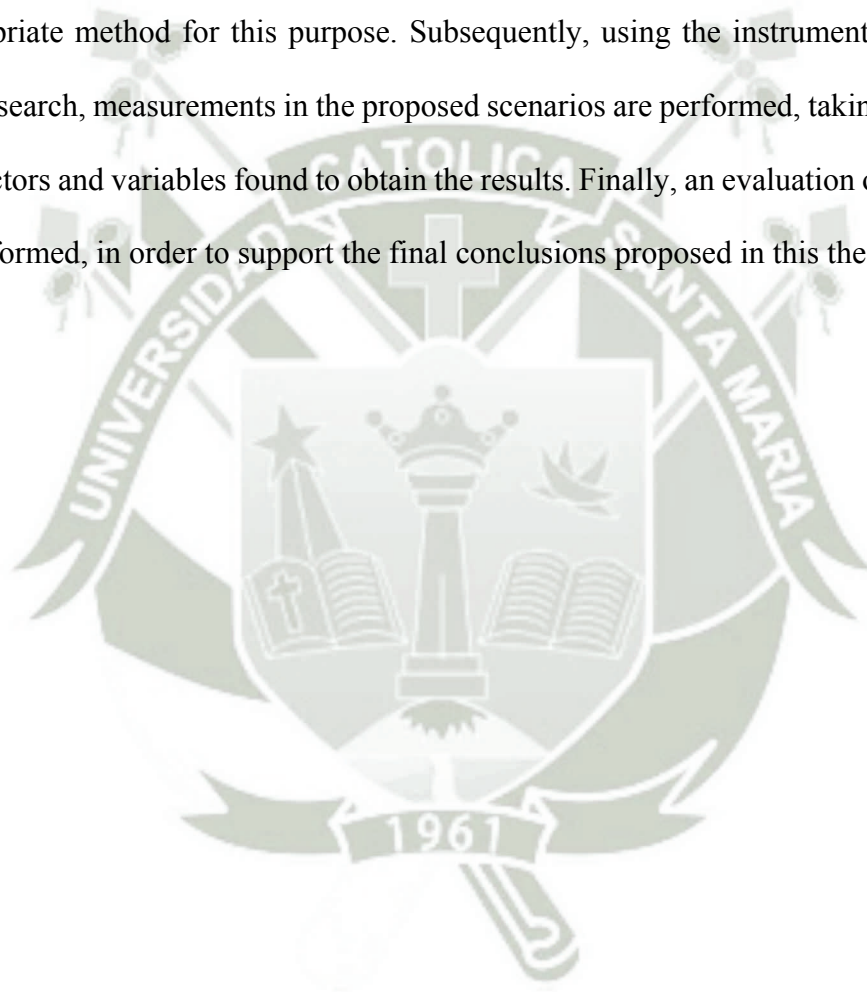
El presente trabajo de investigación tiene como objetivo determinar los factores así como las variables que permitan evaluar adecuadamente el performance de un enlace microondas en la banda de 5GHz, en la ciudad de Arequipa.

Dentro de tal perspectiva, en primer lugar, se presenta un estudio de factibilidad completo de los enlaces microondas para, en base a ello, proceder -acto seguido- al planteamiento de los escenarios y la implementación de los mismos, utilizando al efecto un método adecuado. Posteriormente, haciendo uso de los instrumentos determinados en ésta investigación, se realizan las mediciones en los escenarios propuestos, teniendo en cuenta los factores y variables encontrados para la obtención de los resultados. Finalmente, se realiza una evaluación de dichos resultados, a fin de sustentar las conclusiones finales propuestas en ésta tesis.

## ABSTRACT

The present research aims to determine the factors and variables that can adequately evaluate the performance of a microwave link in the 5GHz band in the city of Arequipa.

Within this perspective, first of all, a full feasibility study of microwave links are presented to, on this basis, proceed to scenario approach and implementation, using an appropriate method for this purpose. Subsequently, using the instruments identified in this research, measurements in the proposed scenarios are performed, taking into account the factors and variables found to obtain the results. Finally, an evaluation of these results is performed, in order to support the final conclusions proposed in this thesis.



# INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación consta de seis capítulos. Así, se tiene que el Capítulo I se ocupa del planteamiento del problema, la justificación, los objetivos y el alcance. El Capítulo II comprende el marco teórico que, como tal, describe la capa física del aire y correlativas propagación, técnicas de modulación, sistemas de diversidad, mecanismos de error de control de codificación, entre otros, inherentes a aquélla, así como el protocolo Ethernet en el que se desarrollan la capa física y la de enlace de datos necesarias para la comunicación de los dispositivos. En el Capítulo III se desarrolla el planteamiento de factores y variables, además de describirse cómo se implementan y miden los escenarios, con cuyo objeto se realiza un estudio de factibilidad previo, y finalmente se describen todos los instrumentos utilizados en la investigación. En el Capítulo IV se describen los procedimientos realizados para la evaluación del performance, dentro de los que se tienen: Las simulaciones, las mediciones u obtención de datos, y los cálculos. En el Capítulo V se muestran los resultados obtenidos del análisis de espectro, de las simulaciones y de las mediciones del “throughput”, RSSI y “delay”, siendo al efecto consolidados en tablas resumen. Y, finalmente, en el Capítulo VI se evalúan los acotados resultados obtenidos del análisis de espectro, y se evalúa el performance tomando en cuenta las mediciones de las diversos variables y factores.

# CAPÍTULO I: EL PROBLEMA

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A lo largo de los años, la ciudad de Arequipa ha venido progresando en los aspectos económico, social y cultural, lo que ha generado -entre otros efectos- no sólo un crecimiento de las empresas locales, sino también la aparición de muchas otras calificadas como no oriundas. A ello se suma el hecho de que, como no podía ser de otra manera, se ha incrementado asimismo el número y servicios de las entidades estatales.

Concomitantemente, sobreviene una demanda tecnológica importante que, como tal, origina la necesidad de implementar enlaces microondas para atender los requerimientos de interconexión entre las sedes de las diversas empresas, de las dependencias de los poderes estatales, de los gobiernos regionales y municipalidades, etc. La realidad evidencia, a su vez, que dichas organizaciones empresariales e instituciones públicas -en su gran mayoría- recurren al uso de la banda no licenciada de 5.8 GHz, esto con la finalidad de evitar pagar un canon por el empleo del respectivo espectro. Ello ha traído, como consecuencia, la proliferación de enlaces microondas -instalados en su gran mayoría de manera empírica-, de manera tal que ocupan en su totalidad dicha banda, saturándola así en el centro de la ciudad, como en otros sectores comerciales e industriales. El problema radica en los instaladores, debido a que, al no conocer los factores y variables para obtener un adecuado performance en un enlace microondas, obviando además un estudio de factibilidad, obtienen como resultado enlaces de bajo performance perjudicando principalmente las transmisiones de video y voz.

## 2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Considerando la problemática antes advertida, surge de manera natural la siguiente interrogante: ¿Es posible evaluar el performance de un enlace microondas en la banda de 5GHz en la ciudad de Arequipa?

La respuesta a dicha pregunta es positiva, es decir, consideramos que sí es posible. Ciertamente, para los fines propios de la citada evaluación del performance de un enlace microondas, corresponde recurrirse al empleo de factores y variables como son el “throughput”, el margen de desvanecimiento, la instalación del enlace, el “delay”, la corrección de errores (FEC) y la modulación.

## 3. JUSTIFICACIÓN

Esta investigación se justifica en la medida que, tras la realización de encuestas o entrevistas entre diversas empresas del medio que cuentan con uno o más enlaces microondas, se ha determinado que la gran mayoría de tales enlaces no sólo fueron realizados por personal no calificado, sino que además se utilizaron en algunos casos transceptores inadecuados para el medio. Ello trae como resultado un performance final inadecuado y ajeno a lo esperado, con correlativo detrimento de las proyecciones de las empresas.

## 4. OBJETIVOS

### 4.1 GENERAL

Determinar los factores y variables que permitan evaluar adecuadamente el performance de un enlace microondas en la banda de 5Ghz, en la ciudad de Arequipa.

## 4.2 ESPECÍFICOS

- a) Determinar el método de implementación más adecuado de un enlace microondas, a través de un estudio completo de factibilidad que comprende:  
Las simulaciones de escenario, la detección de obstrucciones, el análisis del espectro radioeléctrico, los procedimientos de instalación y la ubicación de las antenas.
- b) Proponer los escenarios para evaluar el performance de un enlace microondas.
- c) Implementar los enlaces microondas en la banda de 5GHz, teniendo como base el estudio de factibilidad previo y evitando así grandes diferencias entre la simulación y la implementación.
- d) Determinar los instrumentos de evaluación del performance más adecuados para la obtención de resultados claros y concisos en las mediciones, así como analizarlos a profundidad teniendo en cuenta los factores y variables.
- e) Comparar los resultados del estudio de factibilidad con los reales.
- f) Elaborar las conclusiones, observaciones y recomendaciones.

## 5. ALCANCE

A fin de satisfacer cabalmente los objetivos, se define el alcance de la investigación, circunscribiéndolo, en tal sentido, a la evaluación del performance correspondiente sólo a la ciudad de Arequipa metropolitana, utilizando con dicha finalidad equipos de radioenlace en topologías punto a punto.

Asimismo, considerando que la banda de 5GHz, según la regulación del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (Resolución Ministerial N° 777-2005-MTC/03) está dividida, a su vez, en las bandas de 5150 a 5250 MHz,

5250 a 5350 MHz, 5470 a 5725 MHz y de 5725 a 5850 MHz, ésta investigación únicamente se realiza en esta última (5725 a 5850 MHz) debido a que permite utilizar una Potencia Efectiva Isotrópica Radiada (PIRE) de 36dBm y además es la banda libre más utilizada.

Asimismo, se lleva a cabo un estudio de factibilidad de los enlaces microondas, en el cual, se utilizará un software del fabricante y se realizara un análisis de espectro utilizando un analizador de espectro portátil. Acto seguido, se implementan los correspondientes escenarios teniendo como base el estudio de factibilidad previo y, por último; se realizan mediciones en cada uno de dichos escenarios, las cuales se llevaran a cabo durante las horas más ocupadas del día, buscando de esta forma el peor de los escenarios. De esta manera, con los datos obtenidos, se realiza finalmente la evaluación del performance en la ciudad de Arequipa, en cada uno de los escenarios y evaluando los factores y variables.

# CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

## 1. PROPAGACIÓN

La propagación es el conjunto de fenómenos por los cuales las ondas de radio pueden viajar de un punto a otro.

La onda puede atravesar diferentes medios (Sustancias) o encontrarse con obstáculos y, como resultado de ello, sufrir importantes cambios de dirección e intensidad en el proceso. La propagación de las ondas dependerá del ambiente por el que viajan, pero también está condicionada en gran medida a su respectiva longitud de onda.

Las características eléctricas de la Tierra influyen en la propagación de señales de las ondas electromagnéticas. Asimismo, la presencia de obstáculos y la propia esfericidad de nuestro planeta, limitan la visibilidad entre las antenas transmisora y receptora.

### 1.1 PRINCIPIOS DE PROPAGACIÓN

**Mecanismos de Propagación:** Cuando se produce cerca de obstáculos o en la atmósfera con gases, ocurren diferentes mecanismos de propagación. Los mecanismos básicos de esta última, son: Espacio libre, reflexión, difracción y dispersión.

La propagación en espacio libre es una situación ideal que, ciertamente, no se da en nuestra atmósfera. Por consiguiente, asumir tal propagación sólo nos dará una aproximación de la verdadera. El campo es influenciado por la corteza terrestre y por diferentes obstáculos, al igual que por las propiedades del medio (Ej. gases de

la atmósfera). La superficie de la Tierra (Corteza terrestre) es parcialmente conductiva e influenciará el transporte del campo y la energía de diferentes maneras.

Dando una breve mirada a la propagación de energía entre dos antenas cercanas a la superficie terrestre -de acuerdo a la Figura [II,1]- se descompuso el campo en el receptor, en la siguiente forma:

- a) Onda Directa: Componente propagado con línea de vista entre el transmisor y el receptor.
- b) Onda Reflejada en Tierra: Componente propagado mediante una o más reflexiones sobre la Tierra.
- c) Onda Terrestre: Ésta es conducida en el borde eléctrico, entre el aire y la superficie terráquea.

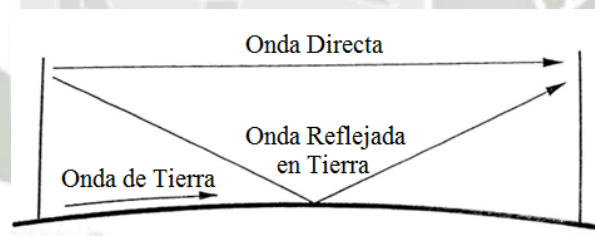


Figura [II.1] Componentes de onda propagados cerca a la superficie de la tierra

### **Reflexión, Difracción y Dispersión**

Dentro de los mecanismos de propagación, se tienen a la reflexión, la difracción y la dispersión. Así:

- a) La reflexión ocurre cuando una onda de radio colisiona contra un objeto con dimensiones mayores comparado con la longitud de onda de la onda de

propagación. Las reflexiones pueden ocurrir por edificios o por la superficie de la Tierra.

- b) La difracción se produce cuando el camino de la onda de radio es obstruido por una superficie con irregularidades. La señal viaja cerca de bordes afilados, como por ejemplo puertas, y cambia así su trayectoria, doblándose alrededor del borde.
- c) Finalmente, la dispersión se genera cuando la señal que viaja en el espacio, golpea contra una superficie rugosa o áspera u objetos pequeños en comparación con la longitud de onda, ocasionando que la señal se disperse hacia varias direcciones.

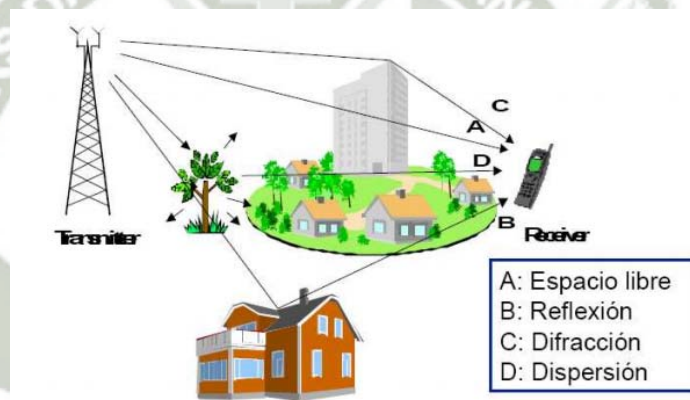


Figura [II.2] Mecanismos de propagación.<sup>1</sup>

## 1.2 PROPAGACIÓN EN LA TROPÓSFERA

Cuando consideramos una propagación en largas distancias y del tipo "con línea de vista", como por ejemplo en radio enlaces microondas, el impacto de las capas bajas de la atmósfera (Tropósfera) no debe ser descartado.

<sup>1</sup> Yáñez Arias Paulina C. "Estudio de los canales con desvanecimiento sobre redes fijas y móviles en sistemas de radio comunicación".

Dos mecanismos tienen una importancia particular en este contexto: Los efectos de refracción y atenuación.

a) Refracción: Las propiedades de refracción de la tropósfera son influenciadas por variaciones en la presión, la temperatura y la humedad. Es por este motivo que para una atmósfera normal, el índice de refracción disminuye con la altura. Aunque estos cambios parecen ser insignificantes, tienen en realidad un impacto considerable. La refracción está basada en la conocida "Ley de Snell".

b) Atenuación: Se verifica cuando las ondas que se propagan por el espacio vacío, se dispersan y resulta una reducción de la densidad de potencia.

La absorción molecular de los gases contenidos en la atmósfera y la atenuación producida por los hidrometeoros, como por ejemplo la lluvia o la nieve, son las principales causas de la atenuación atmosférica, presentándose tanto en el espacio libre, como en la atmósfera terrestre.

La atenuación tiene una elevada importancia únicamente en las radio comunicaciones por encima de los 10GHz.

### 1.3 MODELOS DE PROPAGACIÓN

Se describen dos tipos de estructuras de celdas: Macro Celdas y Micro Celdas.

a) Macro Celdas: Son las diseñadas para dar servicios móviles de cobertura a áreas urbanas, sub urbanas y rurales. El radio de las celdas varía de uno a algunas decenas de kilómetros. El sistema opera principalmente en la banda UHF.

- b) Micro Celdas: Diseñadas para dar servicios móviles de cobertura a áreas urbanas y sub urbanas. El radio de cobertura es alrededor de 500m. El sistema opera en las frecuencias superiores de la banda UHF y en las inferiores de la banda SHF.

### 1.3.1 MODELOS DE MACRO CELDAS

#### Modelo Okumura-Hata

Este modelo es probablemente el más usado para la predicción de pérdida de trayectoria en las macro celdas. Está basado en mediciones realizadas en Tokio, en las frecuencias entre 200MHz y 2GHz. Tiene tres escenarios llamados áreas abiertas, áreas sub urbanas y áreas urbanas.

#### Modelo COST 231-HATA

Dentro de la investigación de “European Co-operative for Science and Technical” (COST) se desarrolló una extensión del modelo Hata para expandir el rango de frecuencias a 2Ghz.

#### Modelo Ikegami

En el modelo Ikegami la difracción es calculada usando una sola aproximación en el borde de una construcción cercana al móvil. La geometría es ilustrada en la Figura [II.3]. El análisis asume que el móvil está en el centro de la calle.

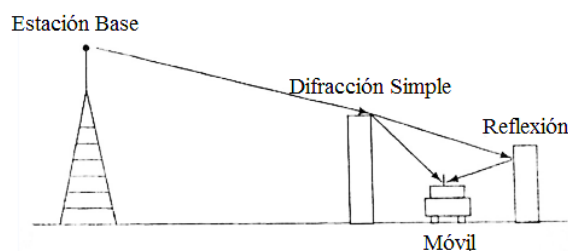


Figura [II.3] Geometría del modelo Ikegami

### Modelo Walfisch-Bertoni

Considera múltiples difracciones de edificios. El modelo está basado en la fórmula de la ley de potencia. Se puede comparar al modelo Ikegami.

### Modelo COST 231 / Walfisch-Ikegami

Modelo desarrollado para áreas urbanas. La geometría del mismo está presentada en la Figura [II.4]. Se representa un modelo sin línea de vista.

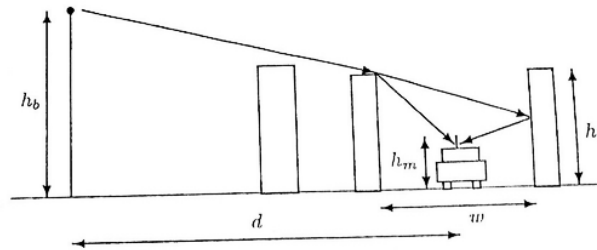


Figura [II.4] Geometría del modelo COST.<sup>2</sup>

## 2. DISEÑO DEL ENLACE INALÁMBRICO

### 2.1 DISEÑO DEL TRANSMISOR Y RECEPTOR DE RADIOENLACE

El diseño del transmisor y receptor es crucial en un sistema de comunicación.

La tarea del transmisor consiste en generar una frecuencia portadora adecuada y mezclarla con la señal de información para originar la señal modulada. Esta señal es luego amplificada y enviada a la antena. La potencia de salida varía desde algunos mW hasta 100KW (Para transmisores de radio y televisión). Los problemas de diseño radican principalmente en suprimir la radiación no deseada causada por la inter-modulación y los armónicos.

<sup>2</sup> Ahlin Lars, Zander Jens, Slimane Ben. "Principles of Wireless Communications"

Un diagrama de bloques de un transmisor simple es mostrado en la Figura [II.5] donde el oscilador genera la frecuencia portadora básica. La señal de información es después amplificada en dos instancias para generar finalmente la señal deseada.

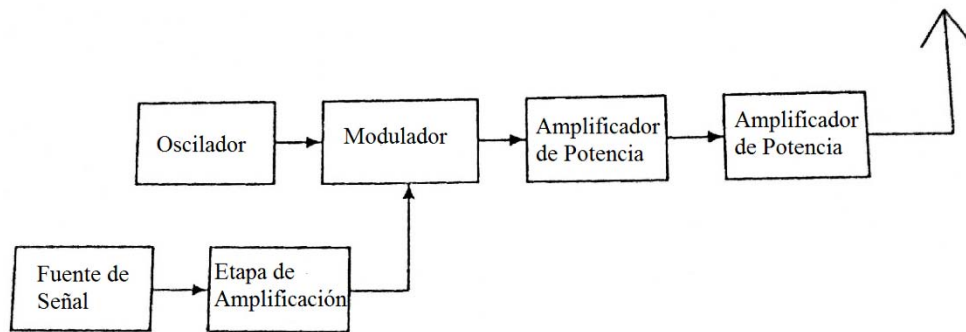


Figura [II.5] Diagrama de bloques de un transmisor de radio simple.

El objetivo del receptor consiste en que, entre todas las demás señales en el espacio, se pueda encontrar, filtrar y amplificar la señal deseada captada por la antena. La señal resultante es luego transpuesta a la banda base, donde pasa por una amplificación adicional. En la Figura [II.6] tenemos el diagrama del receptor más simple utilizado, que es el de frecuencia de una radio sintonizada.

Es fácil obtener una alta sensibilidad con este tipo de receptor. Se define sensibilidad como el nivel de señal requerida en la antena para obtener una relación de señal a ruido determinada. El problema es poder obtener una buena selectividad, entendiéndose por ésta la habilidad de seleccionar entre señales que están cerca una de otra en frecuencia.

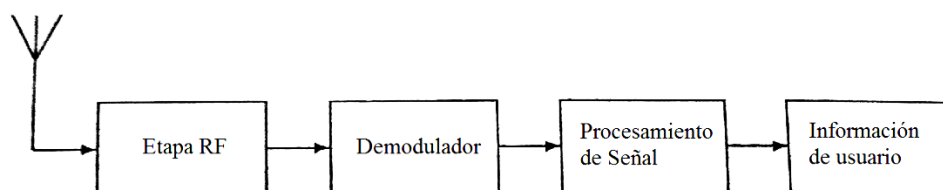


Figura [II.6] Receptor de frecuencia de radio sintonizada.

Para solucionar el problema de selectividad, se utiliza un receptor súper heterodino, como se observa en la Figura [II.7].

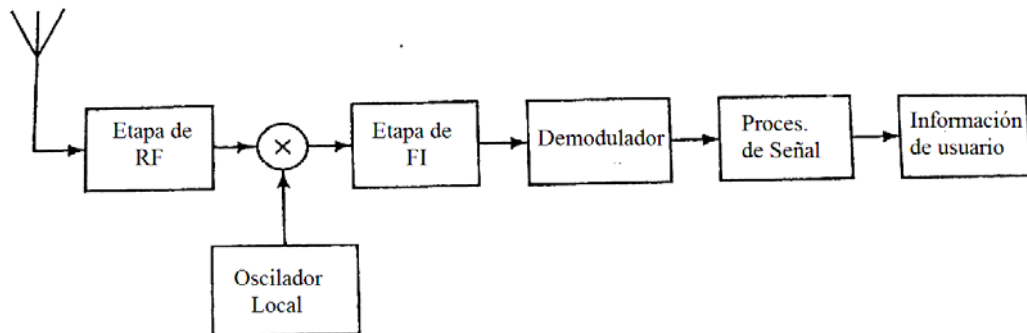


Figura [II.7] Receptor Súper Heterodino.

Un inconveniente con el receptor súper heterodino es la aparición de las llamadas “frecuencias espejo”. La solución es el receptor de conversión doble que se observa en la Figura [II.8] en el que la selectividad y amplificación son obtenidas en la segunda etapa de FI.

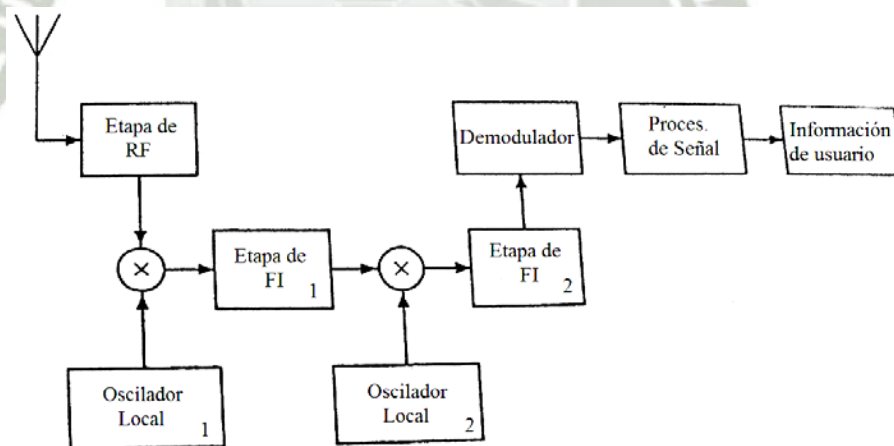


Figura [II.8] Receptor Súper Heterodino doble.

## 2.2 SOFTWARE PARA RADIO ENLACES

Técnicas digitales han sido usadas tradicionalmente en sistemas de radio para las funciones de pre-modulación y post-detección, tales como los codificadores de voz y decodificadores de canal. En los últimos años, el procesamiento digital de

señales (DSP) ha sido usado extensamente en el diseño de avanzados sistemas digitales de comunicación para funciones como la detección, demodulación, ecualización, filtrado de canales y síntesis de frecuencias.

El incremento del uso de técnicas digitales genera como resultado grandes mejoras en el performance y la confiabilidad de los sistemas de comunicación. El número de partes que requieren sintonización o cuyas características cambian con el tiempo o temperatura, han caído considerablemente. La complejidad de sistemas de radio comunicación se verá incrementada en el futuro con la aparición de sofisticados accesos-múltiples y esquemas de modulación, empleando avanzados procesamientos digitales de señales que serán la solución para obtener un compacto diseño de terminales inalámbricos.

### **2.3 DISEÑO, FUNCIONAMIENTO Y TIPOS DE ANTENA**

La antena es un componente muy importante en un sistema inalámbrico. Sobre el particular, a continuación se presenta la información básica más relevante.

La función de la antena es transformar la energía que sale del transmisor para ser irradiada por el espacio electromagnético. De igual forma, en el receptor esta transformación debe ser lo más eficiente posible.

Desde el punto de vista de la teoría de circuitos, se puede describir una antena como un dispositivo complejo de dos terminales, como se observa en la Figura [II.9]. Dichos terminales son conectados al transmisor/receptor por medio de un alimentador, cuyas características son muy importantes, pero para hacerlo más simple se va a descuidar la influencia directa del mismo, se asumirá que es parte del transmisor.

La antena puede ser descrita, asimismo, como una impedancia compleja  $Z_a = R_a + jX_a$ . Dependiendo del diseño de dicha antena así como de la frecuencia usada, la parte resistiva (Real) es:

$$R_a = R_{rad} + R_l$$

Donde  $R_{rad}$  es la resistencia de radiación y  $R_l$  es la resistencia de pérdida. Si la antena es usada para la transmisión (Figura [II.9, a]), la potencia radiada útil es como sigue:

$$P_{rad} = |I_a|^2 R_{rad}$$

Donde  $I_a$  es la corriente RMS que fluye a través de los terminales de la antena. Toda la otra potencia disipada en la antena (en  $R_l$ ) surge de pérdidas en los cables y otros. Si dichas pérdidas son pequeñas  $R_l \ll R_{rad}$  se puede decir:

$$P_{rad} \approx |I_a|^2 R_a = \frac{U_t^2 R_a}{|Z_a + Z_t|^2} \quad [II. 1]$$

Donde  $U_t$  es el voltaje generado por el transmisor y  $Z_t$  es la impedancia de salida. Por teoría de circuitos se sabe que la potencia transmitida es maximizada siempre que las partes imaginarias de la impedancia total se cancelen. En este caso el transmisor está igualado con la antena, la máxima potencia radiada está dada por:

$$P_{rad}^* \approx \frac{U_t^2}{R_a} \quad [II. 2]$$

Si esta igualdad no es ideal, el grado de desigualdad es descrito por la “relación de ondas”. Primero introducimos el coeficiente de reflexión:

$$\rho = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_a - Z_t}{Z_a + Z_t} \quad [II. 3]$$

Donde  $V_r$  y  $V_i$  son las amplitudes de las ondas reflejadas desde la antena al trasmisor e incidentes desde el trasmisor a la antena respectivamente. La Relación de Onda Estacionaria (ROE) (En inglés VSWR) es entonces definida como:

$$VSWR = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \quad [II.4]$$

La Figura [II.9, b] nos muestra la situación en el receptor. Para la máxima potencia de transmisión, la impedancia de entrada de la antena debe ser el complejo conjugado de la impedancia de salida del amplificador.

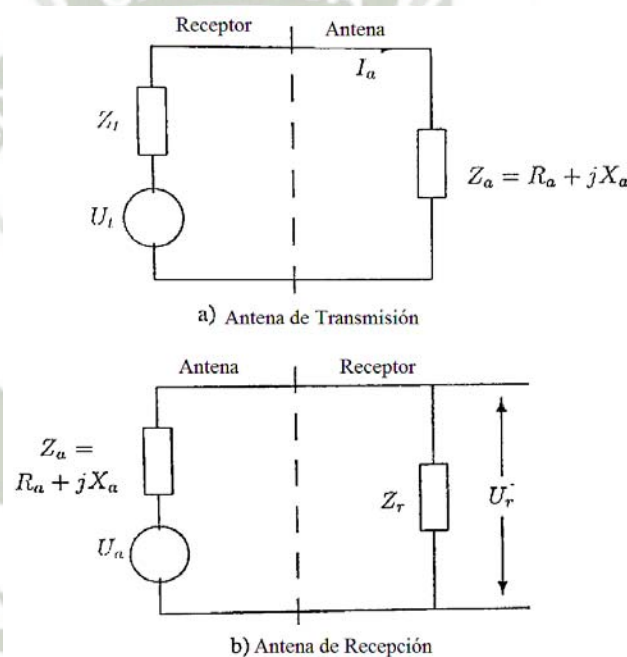


Figura [II.9] La antena como elemento circuital.

La pérdida de retorno es el cuadrado de la magnitud del coeficiente de reflexión.

Usualmente es expresado de forma logarítmica como:

$$R = 20 \log_{10}(|\rho|)$$

Donde una pérdida de retorno de -3dB indica que la mitad de la potencia incidente es reflejada.

En general, las antenas no irradian potencia uniformemente a sus alrededores, como lo hace una antena isotrópica, en lugar, la intensidad de los campos es mayor o menor, dependiendo de la dirección de la antena. Considerando la Figura [II.10] la densidad de potencia  $S_r$ , no solo depende de la distancia  $r$ , sino que también de los ángulos de coordenadas esféricas  $\theta$  y  $\phi$ , donde  $\phi$  es el ángulo en el plano horizontal (Azimut) ( $0 \leq \phi \leq 2\pi$ ) y  $\theta$  es el ángulo de elevación (Ángulo zenith) ( $0 \leq \theta \leq \pi$ ).

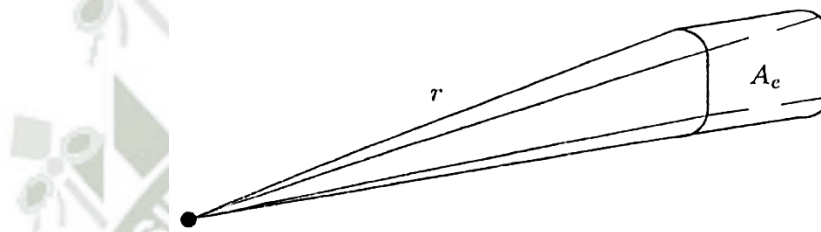


Figura [II.10] Cálculo de la densidad de potencia usando un radiador isotrópico.<sup>3</sup>

En el campo-lejano se pueden separar estas dos dependencias:

$$S_r = S_r(r, \theta, \phi) = \frac{P_t}{4\pi r^2} S(\theta, \phi) \quad [II. 5]$$

Donde  $S(\theta, \phi)$ , densidad de potencia relativa, tiene la propiedad de que se cumple que:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\pi S(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi = 4\pi \quad [II. 6]$$

Si dibujamos  $S(\theta, \phi)$  en el plano  $\phi$  se obtiene el patrón de radiación de la antena, la forma polar como observamos en la Figura [II.11] es la forma más popular de presentar este patrón de radiación.

<sup>3</sup> Ahlin Lars, Zander Jens, Slimane Ben. "Principles of Wireless Communications"

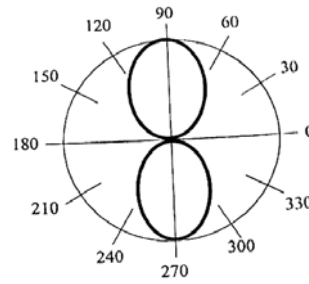


Figura [II.11] Ejemplo de patrón de radiación de la antena.<sup>4</sup>

Un gráfico del patrón de radiación para una antena direccional se aprecia en la Figura [II.12] donde el patrón de radiación muestra el lóbulo principal (Dirección de máxima radiación) el lóbulo posterior que esta opuesto al lóbulo principal y algunos lóbulos laterales separados por valores nulos (No hay radiación en las direcciones nulas). Algunos parámetros pueden ser definidos del patrón de radiación, como son el ancho del haz, la relación adelante-atrás y el nivel de lóbulos laterales.

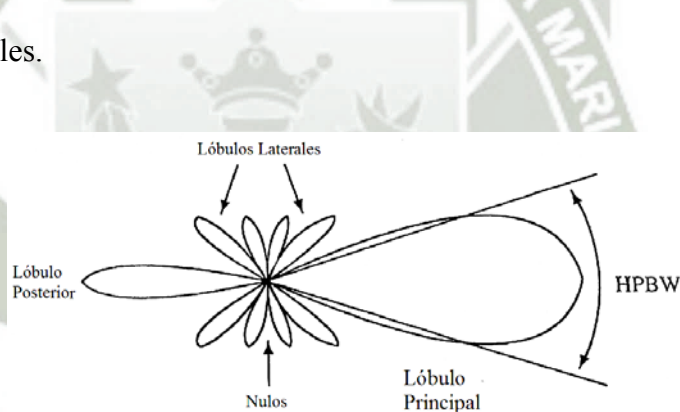


Figura [II.12] Patrón de radiación de una antena direccional.<sup>4</sup>

Asumiendo que orientamos la antena a la posición más favorable, ocurre entonces que la potencia recibida será más grande que la de un radiador isotrópico. Este incremento es definido como la ganancia de la antena (G).

$$G = \max_{\theta, \phi} S(\theta, \phi) \quad [II.7]$$

<sup>4</sup> Ahlin Lars, Zander Jens, Slimane Ben. "Principles of Wireless Communications"

La potencia recibida será  $G$  veces más grande comparada con una antena isotrópica. Entre mejor se encuentre alineada la antena la potencia recibida incrementará, la ganancia de la antena está expresada en dB o dBi. Otra importante caracterización de la antena es el rango de frecuencias en el cual puede operar. Por lo demás, el ancho de banda de la antena es definido como el rango de frecuencias sobre el que se mantiene la ganancia de potencia a menos de 3dB de su valor máximo.

### 2.3.1 TIPOS DE ANTENAS:

- a) Antenas Dipolo: Es el tipo más común, como podemos observar en la Figura [II.13a].

Consiste en un conductor de longitud  $L$ , el cual es dividido en el medio para producir dos puntos de alimentación, siendo conectado el alimentador en este punto. La impedancia en función de la longitud  $L$  para un dipolo hecho por un alambre delgado, se muestra en la Figura [II.13 c]. Asimismo, podemos observar la densidad de potencia en la Figura [II.13b].

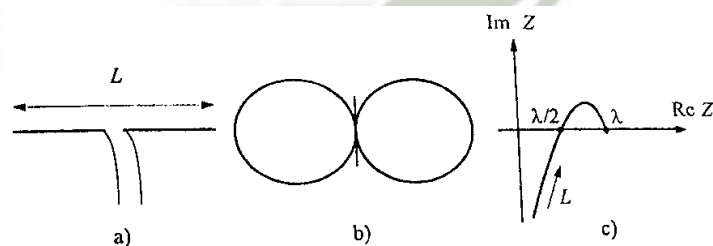


Figura [II.13] a) Antena Dipolo, b) Patrón de radiación de un dipolo de media onda, c) Impedancia en el punto de alimentación.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Ahlin Lars, Zander Jens, Slimane Ben. "Principles of Wireless Communications"

- a) Antenas Verticales: También llamadas monopolo vertical, son igualmente otro tipo común de antenas, como se ve en la Figura [II.14 a].

Constan de un conductor vertical colocado en una superficie conductora denominada "plano de tierra". Este plano puede ser, como su nombre lo indica, tierra o también un metal artificial construido de un número de conductores perpendiculares a este punto de alimentación. En la Figura [II.14 b] se muestra el patrón de radiación para algunas alturas de antena.

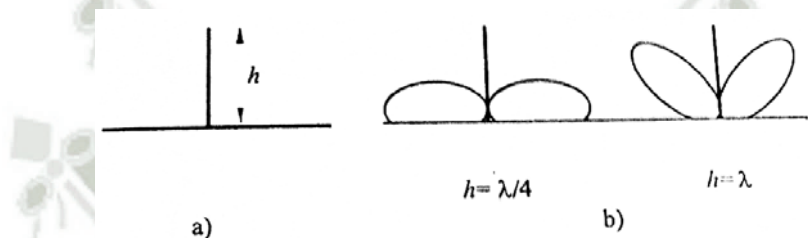


Figura [II.14], a) La antena Vertical, b) Patrón de radiación ( $h = \lambda/4, \lambda$ ).

- b) Antenas de Cable Largo: Modalidad simple de antena que consiste en un conductor recto, sobre y paralelo al suelo, como se aprecia en la Figura [II.15]. El cable puede ser terminado en un resistor  $R_t$  o dejado abierto ( $R_t = \infty$ ).

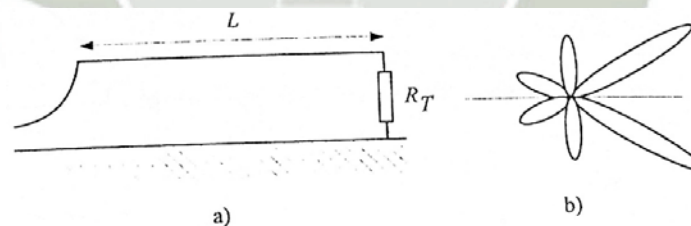


Figura [II.15], a) Antena de Cable Largo, b) Ejemplo típico del patrón de radiación ( $L \approx 3\lambda$ ).

- c) Antenas Direccionales:

- d.1) Arreglo de Antenas: Pueden ser lineales o planas.

Un arreglo plano es uno de dos dimensiones. Se trata de arreglos independientes en una estructura en cuadratura, siendo que además cuentan con dos dimensiones de control y puede producir un haz estrecho.

El arreglo más simple es el lineal uniforme: “m” dipolos verticales colocados en línea recta en intervalos regulares, según se aprecia en la Figura [II.16]. Todos los dipolos son omnidireccionales.

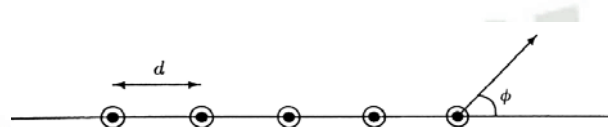


Figura [II.16] Arreglo de dipolos verticales.<sup>6</sup>

d.2) Antenas Yagui: Consisten en un número de dipolos, conforme se observa en la Figura [II.17].

Contrario al arreglo de antenas, sólo un dipolo del tipo Yagui es alimentado por el transmisor, mientras los otros actúan como "elementos parásitos" que, en la mayoría de los aspectos, actúan como si fueran alimentados directamente. La dirección principal de radiación es en el plano de los elementos. Variando los tamaños de los dipolos ligeramente, el patrón de radiación puede ser ajustado. En contraste con los arreglos de antenas, la antena Yagui puede ser diseñada para tener sólo un lóbulo principal.

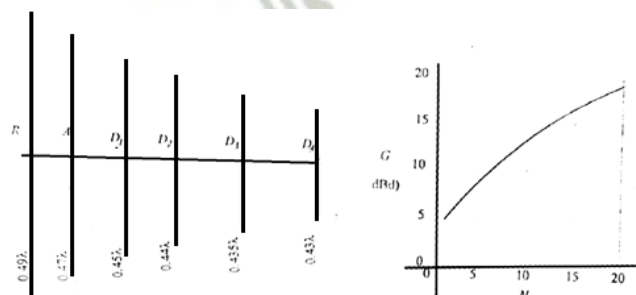


Figura [II.17], a) Típica antena Yagui usando un dipolo plegado como elemento de alimentación.<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Ahlin Lars, Zander Jens, Slimane Ben. “Principles of Wireless Communications”

d.3) Antenas Parabólicas: También llamadas "antena tipo reflector".

Utilizan superficies reflectantes a fin de concentrar la energía para el receptor. El "feeder" (Alimentador) está situado en el foco de un reflector parabólico grande (Hecho de un material conductor, como se ve en la Figura [II.18]). Para ser eficiente, el reflector debe ser grande, lo que hace que esta antena sea utilizada sólo para frecuencias muy altas (Mayores a 1Ghz).

La antena parabólica puede ser descrita como un arreglo infinito uniforme y el factor de tal arreglo es calculado con:

$$F_a = \frac{\text{sen}\left(\frac{\pi D_p \cos\phi}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi D_p \cos\phi}{\lambda}\right)} \quad [II. 8]$$

Por Rayleigh sabemos que la rugosidad de la superficie del reflector debe ser considerablemente menor que la longitud de onda. Si se cumplen estos requisitos, el reflector tendrá una pequeña influencia en las características de frecuencia de la antena y la polarización del campo. Dichas características son, en este caso, determinadas por el "feeder" de la antena, pudiendo ser un dipolo o una antena tipo "horn" (Bocina) si se utilizan guías de onda de microondas. Las antenas parabólicas son muy populares en aplicaciones microondas y en comunicaciones satelitales.

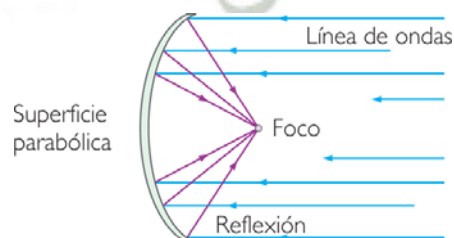


Figura [II.18] Antena parabólica.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> <http://maam891.files.wordpress.com/2011/05/foco.png>

## 2.4 MODELAMIENTO DE CANAL PARA SISTEMAS MICROONDAS

La Figura [II.19] es el punto de inicio en el análisis matemático de los sistemas de comunicación. Así, tenemos: La fuente, que es la información; los dispositivos de procesamiento de señal, que son el transmisor y el receptor; y, el canal, que describe el comportamiento del medio de transmisión.

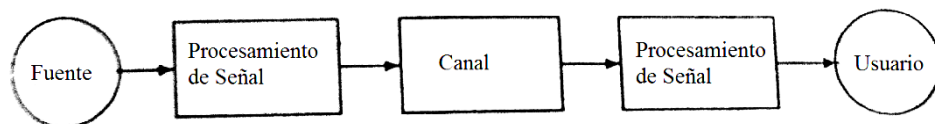


Figura [II.19] Modelo clásico para sistemas de comunicación.

Como ya se vio, las condiciones de propagación pueden cambiar en cualquier momento, por lo que no es tan fácil elaborar modelos precisos del canal. Podemos distinguir dos tipos: Modelos de diseño y de verificación. Para los fines propios del presente trabajo de investigación, son de mayor interés los primeros, ya que se diseñan varios enlaces usando software de simulación.

Los modelos de diseño más conocidos son los invariantes en el tiempo, los variantes en el tiempo y los estocásticos, que constituyen modelos que sacrifican precisión a cambio de simplicidad.

## 2.5 CÁLCULOS BALANCE DE POTENCIAS (LINK BUDGET)

Los cálculos Link Budget son aquellos que se realizan con el balance de potencias del enlace; es decir, potencia de transmisión, ganancias de antena y todos los fenómenos que producen atenuación de la señal.

**Ruido Aditivo:** Los problemas para la recepción de una señal son causados principalmente por la interferencia y el ruido, entre otros factores que no son susceptibles de ser controlados.

Lo que decide la calidad de un enlace de comunicación es la relación señal-ruido (SNR) la misma que relaciona la potencia de la señal recibida con la potencia de ruido del ambiente, como:

$$SNR = \frac{S}{R} = \frac{P_r}{N} \quad [II. 9]$$

Donde  $P_r = S$  es la potencia de la señal recibida y  $N$  es la potencia del ruido que podemos encontrar en el receptor. A continuación, las posibles fuentes de ruido:

- a) Ruido Térmico: Es el causado por el movimiento térmico de las partículas en todos los materiales. En un receptor, todos los componentes -como resistencias, transistores, etc.- están sujetos a estos movimientos, lo que causa una señal de ruido que es agregada a la señal recibida. El ruido térmico es fácilmente modelado como un proceso estocástico estacionario Gaussiano, con características espectrales planas. A éste se le llama “ruido blanco”.
- b) Ruido Atmosférico: Es provocado por diferentes fenómenos eléctricos en la atmósfera, como los relámpagos. Esta clase de ruido no tiene la continuidad como una de sus características. Más bien, tiene características impulsivas para frecuencias menores a 20Mhz. En definitiva, es un tipo de ruido considerado muy importante.
- c) Ruido Cósmico: Desde el espacio exterior caen muchas radiaciones sobre nuestro espectro radioeléctrico. Parte de estas radiaciones penetran la ionósfera y alcanzan la Tierra. La radiación puede ser causada por distintos cuerpos en el espacio, como el sol, el cual representa el mayor causante de problemas en esta materia

- d) Ruido producido por el hombre: Esta clase de ruido es causado por equipos eléctricos ubicados por inmediaciones del receptor, chispas en motores eléctricos o bugías del motor, entre otros. Generan un ruido impulsivo con alto ancho de banda ( $> 100$  MHz). Otro tipo de ruido producido por el hombre son las señales de interferencia generadas por otros transmisores.

**Potencia del Ruido:** El ruido térmico es comúnmente usado como referencia para la medición de la potencia relativa del ruido. Se puede modelar el ruido en los terminales de un componente, como un proceso estacionario estocástico Gaussiano blanco. El receptor está caracterizado por su figura de ruido del sistema ( $F_{sys}$ ), que describe el ruido total en el receptor, si se conecta a una fuente de ruido con una temperatura de ruido  $T_o$ . Tenemos que:

$$F_{sys} = F' + F_a \quad [II.10]$$

Donde  $F'$  es el ruido producido por el receptor y  $F_a$  que es el ruido térmico producido por la antena y por ruido externo.

**Link Budget:** La Figura [II.20] nos muestra las relaciones de potencia en un enlace de transmisión. Se aprecia que el transmisor proporciona una potencia  $P_t$  a la antena de transmisión. Se supone que esta antena tiene una ganancia  $G_t$  teniendo así:

$$PIRE = P_t G_t \quad [II.11]$$

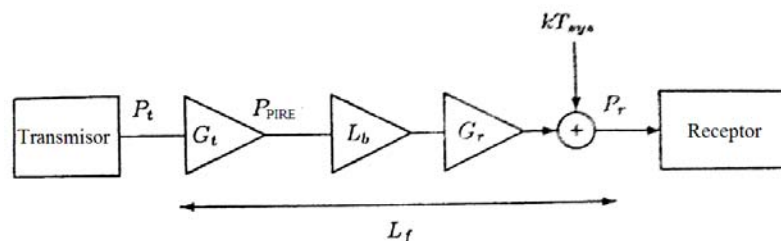


Figura [II.20] Cálculos link budget.

El PIRE es la “Potencia Efectiva Isotrópica Radiada” y es la potencia que será irradiada por la antena. En el camino entre el transmisor y el receptor, la señal será atenuada. La pérdida que sufre la señal es llamada “pérdida de trayectoria básica” denotada como  $L_b$ .

Si el receptor tiene una antena con una ganancia  $G_r$ , se obtiene la potencia recibida como:

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r}{L_b} = \frac{P_t}{L_f}$$

Donde tenemos la pérdida de trayectoria  $L_f = \frac{L_b}{G_t G_r}$ .

El receptor es caracterizado por el ruido térmico del sistema  $T_{sys}$  o por su factor de ruido  $F = \frac{T_{sys}}{T_0}$ .

Asumiendo que el sistema tiene un ancho de banda  $B$ , se puede expresar SNR como:

$$SNR = \frac{P_r}{N} = \frac{P_t G_t G_r}{L_b F k T_0 B}$$

Donde  $kT_0 = -174 \text{ dB/dbhz}$  a  $17^\circ$ ,


Convertimos la expresión SNR a dB:


$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB} = (P_t G_t)_{dB} - (L_b)_{dB} + (G_r)_{dB} - (F)_{dB} - (kT_0)_{dB} - (B)_{dB} \quad [II.12]$$


## 2.6 MARGEN DE DESVANECIMIENTO Y DISPONIBILIDAD


El margen de desvanecimiento se puede definir como la diferencia entre la señal puesta en los bordes del receptor y el nivel mínimo de potencia que asegura una determinada tasa de error BER, que se denomina la potencia de umbral del receptor  $P_u$  (Sensibilidad). El margen de desvanecimiento se define como:

$$F_m = 30 \log D + 10 \log(64ABf) - 10 \log(1 - R) - 70$$

  
 Efecto de  
trayectoria múltiple

  
 Sensibilidad  
del terreno

  
 Objetivos de  
Confiabilidad

  
 Constante

[II. 14]

Dónde:

$F_m$  = Margen de desvanecimiento [dB]; D = Distancia [Km]; F = Frecuencia [GHz];  
 R = Confiabilidad en tanto por uno (es decir, 99.99% = 0.9999 de confiabilidad);  
 1 - R = Objetivo de confiabilidad para una ruta de 400km en un sentido; A =  
 Factor de Rugosidad, 4 sobre agua o sobre un terreno muy liso, 1 sobre un terreno  
 promedio, 0.25 sobre un terreno muy áspero y montañoso; B = Factor para  
 convertir la peor probabilidad mensual en una probabilidad anual, 1 para pasar  
 una disponibilidad anual a la peor base mensual, 0.5 para áreas calientes y  
 húmedas, 0.25 para áreas continentales promedio, 0.125 para áreas muy secas o  
 montañosas.

La disponibilidad del enlace es el tiempo, generalmente anual o el correspondiente al peor mes, durante el cual el enlace microondas estará operando con un número de bits erróneos menor a una tasa determinada ( $BER=10^{-3}$  o  $10^{-6}$ ). Es decir, el número de bits erráticos no será mayor a uno por cada mil o por cada millón de bits transmitidos, según sea el caso. El cálculo de la disponibilidad de servicio

puede efectuarse utilizando el método de predicción Barnett-Vigants o los modelos de la ITU. El primero (Barnett-Vigants) predice la probabilidad de tiempo de falta de servicio basándose en el factor climático C:

$$Disponibilidad = 1 - 6 \times 10^{-7} \times Factor\ C \times Frecuencia_{GHz} \times (Rango\ Requerido_{Km})^3 \times 10^{\frac{-Margen\ de\ Desvanecimiento\ Esperado}{10}} \quad [II.15]$$

### 3. TRANSMISIÓN DE DATOS SOBRE CANALES DE RADIO

Un sistema de comunicación puede ser modelado por bloques, como se observa en la Figura [II.21]. De acuerdo ésta: a) En el lado del transmisor, el flujo de datos es procesado para generar componentes  $x(t)$  y  $y(t)$ . Los componentes en cuadratura son luego multiplicados por los componentes de la frecuencia portadora, para así obtener la señal pasa banda. b) En el lado del receptor, se lleva a cabo la transformación en banda base multiplicando ésta por la portadora para extraer los componentes en cuadratura de la señal recibida, seguido por algunos procesamientos de señal destinados a recuperar los datos transmitidos.

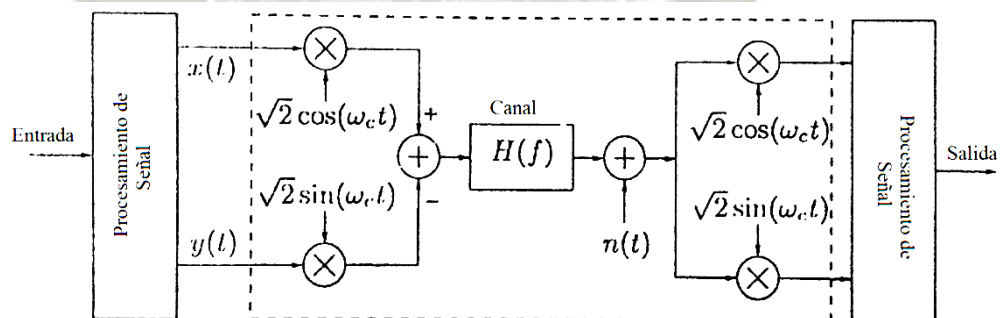


Figura [II.21] Modelo de un simple sistema inalámbrico de comunicación.<sup>8</sup>

Para la comunicación digital, el procesador tiene etapas básicas, como la codificación de fuente, el entrelazado, modulación, etc., según podemos observar

<sup>8</sup> Ahlin Lars, Zander Jens, Slimane Ben. "Principles of Wireless Communications"

en la Figura [II.22]. Aquí el codificador de fuente, el codificador de canal y el entrelazador generan un flujo de datos con una velocidad de  $R_b=1/T_b$  bits/s, que se pueden considerar como aleatorios, esta información de bits binarios son luego agrupados en grupos inconexos de  $k$  bits (Símbolo) por grupo, el modulador transforma cada símbolo en una forma de onda usando un procedimiento de mapeo uno a uno, en cada intervalo de tiempo de duración  $T_s=kT_b$  el modulador transmite uno de  $M = 2^k$  formas de onda posibles  $\{s_i(t), i = 0, 1, \dots, M - 1\}$  dependiendo del valor del símbolo, esto es el llamado modulación M-aria.

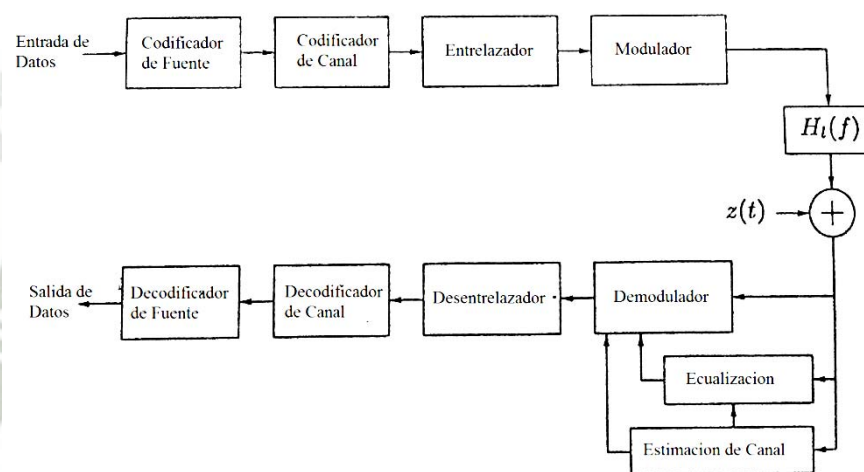


Figura [II.22] Pasa-bajo equivalente de un sistema de comunicación inalámbrico.

Varios diferentes esquemas de modulación digital son utilizados en los sistemas de comunicación inalámbricos modernos. No es una labor sencilla la selección de la técnica de modulación apropiada, pues es necesario tomar en cuenta diversos factores.

La “eficiencia del ancho de banda” describe la habilidad de transmitir datos de un esquema de modulación dentro de un ancho de banda. Incrementar la velocidad de bit significa incrementar, a su vez, el ancho de banda de la señal. Aquí hay una

inevitable relación entre velocidad de bit y ancho de banda ocupado. La eficiencia de ancho de banda se define como:

$$\eta_B = \frac{R_b}{B_{RF}} \text{ bps/Hz} \quad [II.16]$$

Donde  $R_b$  es la velocidad de bit en bits por segundo (bps) y  $B_{RF}$  es el ancho de banda ocupado por la señal RF.

### 3.1 SEÑALES DIGITALES MODULADAS EN CANALES AWGN

Cuando el canal de comunicación es ideal, la señal recibida es perturbada solamente por el ruido aditivo Gaussiano Blanco (AWGN) y por un posible desfase entre la frecuencia portadora y el oscilador local empleados en el receptor.

- a) Detección coherente: El receptor debe tener conocimiento de la fase de la frecuencia portadora. La información de dicha fase puede ser proporcionada al receptor mediante la transmisión de paquetes pilotos. Asimismo, la detección se puede hacer por un receptor del tipo correlación o equivalente por un receptor de tipo filtro adaptado, para cada intervalo de símbolos el receptor transforma la señal recibida en un vector de la señal (Demodulación de señal), y luego usa el mencionado vector para hacer la decisión más apropiada (Detección de señal) para el símbolo transmitido.
- b) Detección no coherente: No se requiere conocer la fase de la portadora. En su lugar, la detección se lleva a cabo a través de la comparación de energía entre las diferentes señales alternativas.

La detección no coherente reduce la complejidad del receptor; sin embargo, para deshacerse de la fase de la portadora, se requiere el doble número de

receptores de correlación (O filtros adaptados) esto comparándola con la detección coherente.

### 3.2 TÉCNICAS DE MODULACIÓN LINEAL

Las técnicas de modulación lineal proporcionan señales moduladas con un espectro muy compacto y una baja ocupación de ancho de banda. El precio de este ahorro en términos de ancho de banda, es la transmisión de potencia extra necesaria para aumentar el nivel de modulación. Hay muchas formas de modulación utilizadas para la comunicación de información de una frecuencia portadora. Se puede usar su amplitud, su fase, su frecuencia o una combinación de las mismas. Una técnica de comunicación es lineal si todos los cambios realizados a la señal portadora son linealmente relacionados a la información modulada en banda base.

#### a) **Modulación de Amplitud:**

- a.1) Modulación de Amplitud de Pulso (PAM): La amplitud de la señal es usada para la modulación, donde cada símbolo es asignado a una amplitud diferente. En este caso, la fase de la señal transmitida no cargará ninguna información y es la misma para todos los símbolos transmitidos. En la Figura [II.23] se puede observar el diagrama de constelación para 4PAM y 8PAM.

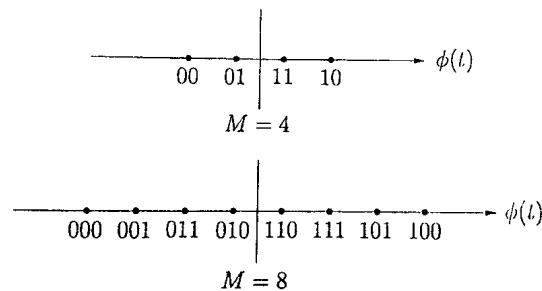


Figura [II.23] Diagrama de constelación para 4PAM y 8PAM<sup>9</sup>

a.2) Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM): Consta simplemente de dos esquemas PAM en paralelo. Uno es usado en el canal de fase (I) y el otro PAM es empleado en el canal de cuadratura (Q). Con esta estructura, tanto la amplitud como la fase de la señal portadora, llevan información. Para un nivel-M del esquema QAM, las M diferentes formas de onda están dadas por:

$$s_i(t) = (A_m + jB_k)g_t(t),$$

$$i = m\sqrt{M} + k \quad y \quad m, k = 0, 1, \dots, \sqrt{M} - 1 \quad [II.17]$$

Dónde:

$$A_m = (2m + 1 - \sqrt{M}) \sqrt{\frac{3E_s}{2(M-1)'}}$$

$$B_k = (2k + 1 - \sqrt{M}) \sqrt{\frac{3E_s}{2(M-1)'}}$$

Donde  $M = 2^k$  es el nivel de modulación,  $E_s$  es la energía promedio por símbolo y  $g_t(t)$  es el filtro de transmisión. En este caso, el equivalente “pasa-bajo” de la señal transmitida se puede escribir como:

<sup>9</sup> Ahlin Lars, Zander Jens, Slimane Ben. “Principles of Wireless Communications”.

$$s_i(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} s_i(n)(t - nT_s), \quad i(n) \in \{0,1, \dots, M - 1\} \quad [II.18]$$

El espacio de forma de onda de la señal QAM es bi-direccional y los vectores de señal correspondientes están dados por:

$$s_i(t) = [A_m + B_k], \quad i = m\sqrt{M} + k \quad y \quad m, k = 0,1, \dots, \sqrt{M} - 1$$

La Figura [II.24] nos muestra el diagrama de constelación para  $M = 4$  y  $M = 16$ .

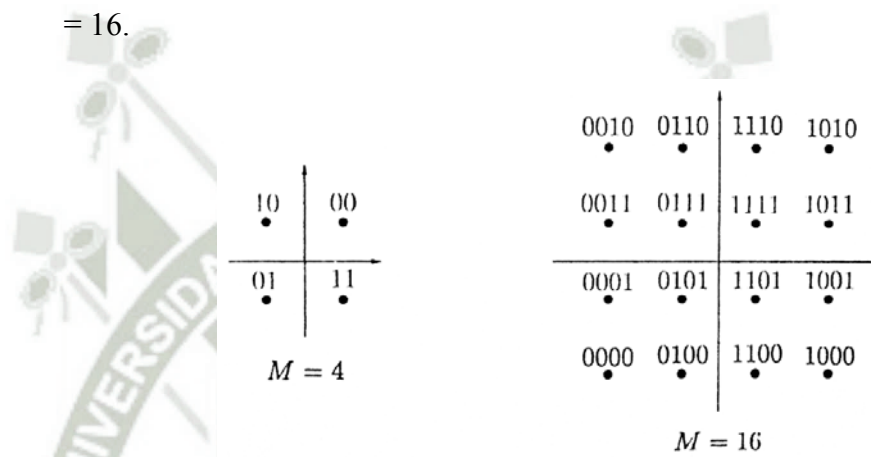


Figura [II.24] Diagramas de constelación para 4QAM y 16QAM.<sup>10</sup>

- b) Modulación coherente por desplazamiento de fase (PSK):** La fase de la señal portadora es usada para llevar información. La fase total de dicha señal es dividida en partes iguales entre los  $M$  posibles símbolos transmitidos. En este caso, la amplitud de la señal transmitida no lleva ninguna información y es la misma para todos los símbolos transmitidos. Con este tipo de modulación, las diferentes formas de onda de la señal para un esquema de modulación PSK  $M$ -aria está dada por:

$$s_i(t) = \sqrt{E_s} \exp \left[ j \left( \phi_0 + i \frac{2\pi}{M} \right) \right] g_t(t),$$

$$i = 0,1, \dots, M - 1 \quad [II.19]$$

<sup>10</sup> Ahlin Lars, Zander Jens, Slimane Ben. "Principles of Wireless Communications".

Donde  $\phi_0$  es la constante de fase,  $E_s$  es el promedio de energía por símbolo, y  $g_t(t)$  es el filtro de transmisión.

En la Figura [II.25] se explicita el diagrama de constelación de dos señales PSK (4PSK y 8PSK). Se observa que 4PSK tiene la misma constelación de señal que QPSK, que es un esquema de modulación muy popular y comúnmente conocido con la denominación “modulación por desplazamiento de fase en cuadratura” (QPSK). Este último puede verse como una combinación lineal de dos señales BPSK en paralelo, en fase y cuadratura. La popularidad de la modulación QPSK se debe a la eficiencia de su ancho de banda comparado con las modulaciones binarias.

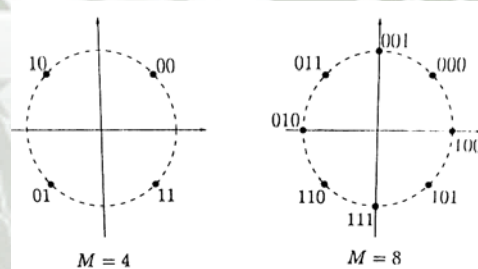


Figura [II.25] Diagrama de constelación de QPSK y 8PSK.<sup>11</sup>

### 3.3 TRANSMISIÓN DE DATOS SOBRE CANALES DE DESVANECIMIENTO PLANO

En este punto, se considerará el performance de los diferentes esquemas de modulación cuando la señal modulada es transmitida sobre un canal con desvanecimiento.

<sup>11</sup> Ahlin Lars, Zander Jens, Slimane Ben. “Principles of Wireless Communications”

### 3.3.1 CANALES DE DESVANECIMIENTO PLANO LENTAMENTE

Sabemos que el desvanecimiento multi-trayecto tiene un retardo de propagación mucho más pequeño que la duración del símbolo de la modulación utilizada, ello si es modelado como un canal de desvanecimiento plano. Este canal dará lugar a una distorsión multiplicativa de la señal transmitida.

Cuando el desvanecimiento va variando poco a poco, el factor multiplicativo de canal puede ser estimado en el receptor tanto para la amplitud y la fase, y una detección coherente puede ser alcanzada.

a) Canales de Desvanecimiento Rayleigh: Se producen cuando se ve interrumpida la línea de visión directa (LOS) por obstáculos o en caso de que su nivel sea inferior al nivel del ruido. En estas circunstancias, la suma de las contribuciones multi-trayecto permite la existencia de la comunicación. La gran mayoría de enlaces con telefonía móvil se llevan a cabo mediante enlaces con distribución Rayleigh, siendo que esto permite tener una cobertura en el interior de los edificios sin línea de vista directa con la antena transmisora. La función de densidad de probabilidad (fdp) de Rayleigh (Figura [II.26]) representa el desvanecimiento multi-trayectoria y es:

$$p_{(r)} = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right] & 0 \leq r \leq \infty \\ 0 & r < 0 \end{cases} \quad [II.20]$$

Donde  $r$  es la envolvente de la señal y  $\sigma$  es la desviación típica.

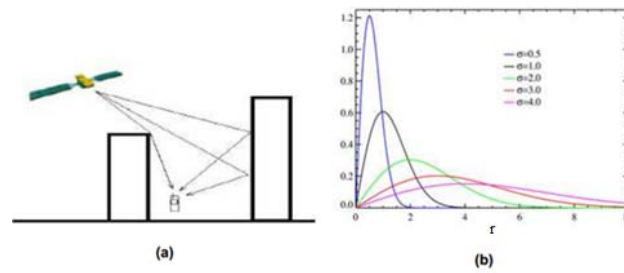


Figura [II.26] a) Esquema de distribución Rayleigh b) Función de densidad de probabilidad de la distribución Rayleigh.<sup>12</sup>

- b) Canales de Desvanecimiento Rician: Es propio de comunicaciones al aire libre y en espacios abiertos, donde la antena emisora tiene línea de vista directa con el receptor.

Una distribución Rician está caracterizada por la existencia de línea de vista directa (LOS) más varias ondas reflejadas entre el emisor y el receptor, siendo que su nivel de potencia está por encima de las señales multi-trayecto recibidas.

Rician se define con la siguiente expresión:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{(r^2-r_s^2)}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{rr_s}{\sigma^2}\right) \quad [II.21]$$

Donde  $\sigma$  es la desviación típica,  $r_s$  es la amplitud del rayo directo,  $r$  es la amplitud de la envolvente de la señal recibida y  $I_0$  es la función de Bessel de primera clase modificada y de origen 0.

La distribución Rician esta descrita usualmente en términos de un parámetro  $k$ , el cual define la tasa entre la potencia de la señal determinística y la varianza del multi-trayecto:

$$k = \frac{\text{potencia LOS}}{\text{potencia difractada}} = \frac{r_s^2}{2\sigma^2}$$

<sup>12</sup> Yáñez Arias Paulina C. “Estudio de los canales con desvanecimiento sobre redes fijas y móviles en sistemas de radio comunicación”.

Si la expresamos en dB tenemos:

$$k = 20 \log \frac{r_s}{2\sigma^2}$$

Se conoce a “k” como el factor de Rician y especifica completamente la distribución. La fdp de la distribución Rician se muestra en la Figura [II.27]

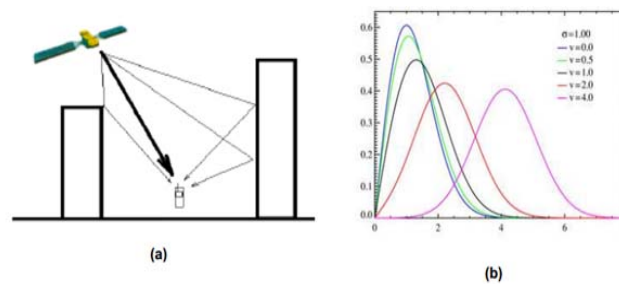


Figura [II.27] a) Esquema de distribución Rician b) Función de densidad de probabilidad de la distribución Rician.<sup>13</sup>

### 3.3.2 CANALES DE DESVANECIMIENTO PLANO RÁPIDAMENTE

La movilidad del receptor, del transmisor o de ambos, hará que varíe en tiempo el proceso de desvanecimiento. En un ambiente de desvanecimiento rápido, el proceso de desvanecimiento y -en particular- su fase, pueden variar rápidamente en el intervalo de símbolo. Esta modificación se debe a la modulación de frecuencia (FM) aleatoria causada por la dispersión Doppler variable en el tiempo, lo que, a su vez, es atribuible al movimiento del móvil. Una variación rápida en dicho proceso de desvanecimiento puede cambiar la forma del pulso transmitido y resultará en un desajuste en el receptor correlador (Filtro adaptado). El desvanecimiento rápido introduce la interferencia inter-simbólica (ISI) la cual depende de las variaciones de tiempo del canal de desvanecimiento y la forma de los filtros de transmisión/recepción. Cuando está presente esta ISI, degrada el

<sup>13</sup> Yáñez Arias Paulina C. “Estudio de los canales con desvanecimiento sobre redes fijas y móviles en sistemas de radio comunicación”.

performance del sistema y crea un bajo error en la probabilidad promedio de error de bit.

### **3.4 TRANSMISIÓN DE DATOS SOBRE CANALES DE DESVANECIMIENTO SELECTIVOS EN FRECUENCIA**

Si la señal transmitida tiene un ancho de banda de RF  $B_{RF}$  más grande que el ancho de banda coherente del canal  $B_m$  (Que se define como la medida del rango de frecuencias sobre el cual el canal se puede considerar plano), el canal en cuestión ya no puede ser considerado como uno con desvanecimiento plano. Se tiene, más bien, un canal selectivo en frecuencia con un tiempo de dispersión que no puede ser descuidado comparado con el tiempo del símbolo. El canal no sólo atenúa la señal de radio sino que también cambia su forma, siendo que, como resultado de ello, el desvanecimiento selectivo en frecuencia conduce a una interferencia inter-simbólica en el receptor, que causará cross-talk entre los símbolos consecutivos transmitidos. Este efecto se traduce en una baja probabilidad de error de bit irreducible. En comunicaciones inalámbricas modernas -donde se requiere la transmisión de altas velocidades de datos- el canal es a menudo considerado como desvanecimiento selectivo de frecuencia.

La interferencia inter-simbólica y la degradación de performance debido a canales con retardo de propagación, ocurren principalmente cuando se transmiten altas tasas de transmisión de datos en el canal de radiocomunicación. Para contrarrestar dicha interferencia inter-simbólica se requiere la colocación de un filtro denominado “ecualizador”, el cual puede ser tanto lineal como "no lineal".

### 3.5 MULTIPLEXIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIAS ORTOGONALES (OFDM)

OFDM es un esquema de modulación digital en el que se divide el espectro disponible en varios sub-canales de poco ancho de banda, cada uno de ellos centrado en una portadora, todos cercanos y ortogonales entre sí, siendo además que la transmisión de éstos se lleva a cabo en paralelo. Resuelve el problema de la interferencia inter-simbólica causada por el desvanecimiento en canales multi-trayecto, simplifica asimismo el diseño tanto del transmisor como del receptor, ya que no se requiere un filtro para cada sub-canal y, de otro lado, también nos permite una mayor eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico, acercándonos a la capacidad máxima del canal.

La transmisión entre dos puntos sin línea de vista ocurre cuando entre el transmisor y el receptor hay reflexiones o absorciones de la señal, lo que conlleva a una degradación de la señal recibida. Esto se da por los siguientes efectos: Atenuación plana, atenuación selectiva en frecuencia e interferencia inter-simbólica.

El principio de OFDM es similar a la modulación de donde la información de datos es modulada dos veces (Figura [II.28]), el flujo de datos de información de entrada son primero modulados en banda base utilizando modulaciones regulares como PSK o QAM, luego el flujo de datos modulado con la duración de símbolo  $T_s$ , es dividido en  $N$  diferentes flujos de datos, finalmente cada flujo de datos es modulado con una forma de onda diferente (Sub-portadora).

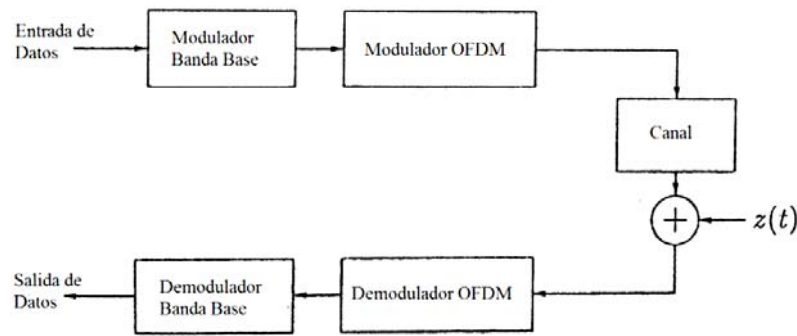


Figura [II.28] Diagrama de bloques simplificado de un sistema basado en OFDM.

Todos los flujos de datos modulados son luego reunidos para formar el "pasabaja" equivalente de la señal OFDM transmitida, como se observa en la Figura [II.29]. El resultado es una combinación lineal de varias señales moduladas linealmente en banda estrecha, según se muestra en la citada figura.

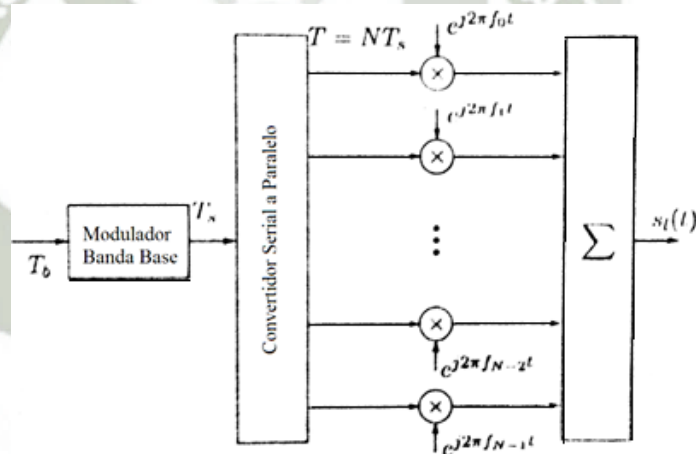


Figura [II.29] Diagrama de bloques del transmisor de un sistema multi-portadora.<sup>14</sup>

La ortogonalidad es lo que diferencia a OFDM de otros procedimientos de multiplexación en frecuencia, ya que el “espaciamiento adecuado” entre portadoras es óptimo. OFDM emplea N portadoras, por lo que se requieren, al menos, N muestras complejas en tiempo discreto para representar al símbolo OFDM.

<sup>14</sup> Ahlin Lars, Zander Jens, Slimane Ben. “Principles of Wireless Communications”

En la Figura [II.30] se muestran las señales OFDM vistas en el dominio de la frecuencia para el caso de cuatro sub-portadoras.

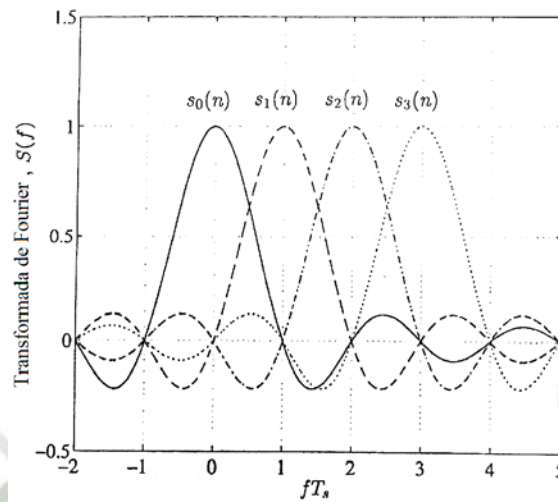


Figura [II.30] Señales OFDM vistas en el dominio de la frecuencia.<sup>15</sup>

#### 4. SISTEMAS DE DIVERSIDAD

Se entiende por diversidad, las técnicas que se utilizan con el fin de reducir el desvanecimiento de la señal y que usa las propiedades estocásticas del canal. Tiene tres grados de libertad: Tiempo, frecuencia y espacio.

##### 4.1 PRINCIPIO Y MÉTODOS DE DIVERSIDAD

Las técnicas de diversidad son utilizadas para mejorar el performance de la transmisión de datos sobre radio canales con desvanecimiento. La diversidad implica que el receptor es previsto de múltiples copias de información, transmitidas sobre dos o más canales de transmisión independientes. La idea básica es que la repetición de la información, junto con una apropiada combinación de las señales recibidas, reducirán en gran medida los efectos negativos del desvanecimiento, ya que cuando las réplicas de la misma señal de

<sup>15</sup> Ahlin Lars, Zander Jens, Slimane Ben. "Principles of Wireless Communications"

información son transmitidas sobre canales independientes con desvanecimiento, se reduce considerablemente la probabilidad de que todas las señales se desvanezcan simultáneamente. Como se muestra en la Figura [II.31] si se denota  $A_i$  que la señal  $r_i(t)$  está en desvanecimiento profundo luego con ramificaciones (Branches) no correlacionadas podemos escribir:

$$P(A_0, \dots, A_{M-1}) = \prod_{i=0}^{M-1} P(A_i) \ll P(A_i) \quad [II.22]$$

Lo que indica que aumentando el número de ramificaciones, el efecto negativo del desvanecimiento se reduce.

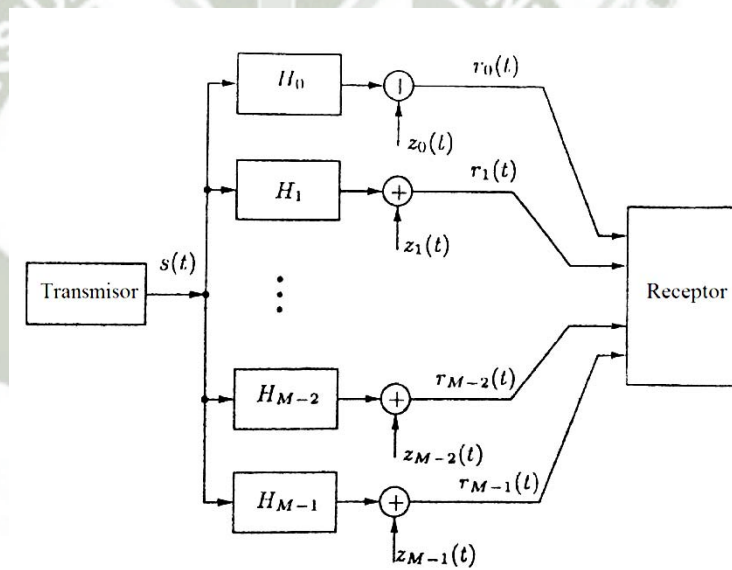


Figura [II.31] Principio de diversidad.<sup>16</sup>

Para reducir el desvanecimiento "long-term" y aminorar el desvanecimiento "short-term", es necesario utilizar las diversidades macroscópica y microscópica, respectivamente.

<sup>16</sup> Ahlin Lars, Zander Jens, Slimane Ben. "Principles of Wireless Communications".

#### 4.1.1 DIVERSIDAD MACROSCÓPICA:

La variación de la media local se debe a las fluctuaciones del contorno del terreno. Si sólo se utilizara una antena por cada estación base, una unidad móvil con movimiento no va a ser capaz de recepcionar la señal en ciertas ubicaciones geográficas, ello debido a las variaciones del terreno, cual es el caso de las colinas o montañas. Para solucionar este problema, se puede emplear la misma estación base, dos antenas separadas por una distancia  $X$ , para transmitir o recibir el mismo mensaje, y así, combinando ambas señales recibidas, se reducirá en definitiva el desvanecimiento "long-term".

#### 4.1.2 DIVERSIDAD MICROSCÓPICA:

Cuando nos encontramos en un ambiente de desvanecimiento, el promedio local de la señal recibida en un móvil se degrada mientras aumenta la distancia. También varía debido al contorno del terreno a lo largo del camino de la señal. A este promedio local de la señal se le denomina "media local" (O señal desvanecida long-term). El fenómeno multi-trayectoria nos trae como consecuencia un desvanecimiento de tipo Rayleigh.

Si se quieren obtener las dos señales no correlacionadas necesarias, los métodos se basan en disponer de dos o más antenas en el sitio de transmisión o utilizar dos frecuencias distintas. En la Figura [II.32] se aprecia la clasificación de los tipos de diversidad, de los cuales se describen, inmediatamente luego, los métodos más comunes.

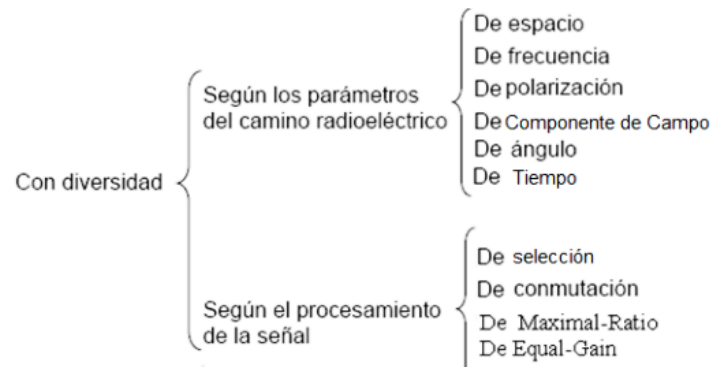


Figura [II.32] Clasificación de los tipos de diversidad.

- a) Diversidad de Frecuencia: Una forma de crear ramificaciones "no-correlacionadas", es por la transmisión de la información en dos o más frecuencias portadoras distintas. Separando suficientemente estas últimas, se puede obtener el proceso de desvanecimiento "no-correlacionado" en las ramificaciones.
- b) Diversidad de Tiempo: En esta técnica lo que se realiza es la transmisión de mensajes idénticos en diferentes "time slots", lo que generará dos señales desvanecidas "no-correlacionadas" en el receptor. La diversidad de tiempo es idónea para reducir la intermodulación en una estación multicanal.
- c) Diversidad de Espacio: Es el método más conocido y mayormente utilizado. Se emplean dos antenas separadas para dos receptores a una distancia "d", para de esta manera proveer, asimismo, dos señales con una baja correlación entre el desvanecimiento. La separación "d" varía, en general, de acuerdo con la altura "h" de la antena. Un ejemplo se puede observar en la Figura [II.33].

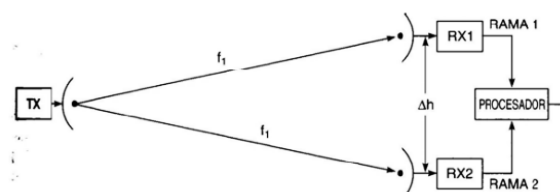


Figura [II.33] Esquema del receptor con diversidad de espacio.<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Yáñez Arias Paulina C. "Estudio de los canales con desvanecimiento sobre redes fijas y móviles en sistemas de radio comunicación".

- d) Diversidad de Polarización: Es aquí donde se transmitirán dos componentes de polarización horizontal  $E_x$  y polarización vertical  $E_y$ , a través de dos antenas polarizadas horizontal y verticalmente, lo cual proveerá dos señales desvanecidas "no-correlacionadas". Como desventaja se tiene que habrá una reducción de 3dB en la potencia de transmisión debido a la separación de la potencia en las dos antenas polarizadas.

#### 4.2 SISTEMAS CON MÚLTIPLES ANTENAS (MIMO)

El sistema de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO) es una técnica avanzada para el control tanto del desvanecimiento de señales de radio, como de problemas asociados a efectos de propagación multi-trayectoria. Asimismo, para la mitigación de la interferencia co-canal en sistemas móviles.

MIMO está basado en arreglos de antenas y procesamiento de señales espacio temporales, con los que se busca mejorar el desempeño de los sistemas inalámbricos, ello aumentando la capacidad de transmisión de datos bajo entornos dinámicos, haciendo uso de técnicas de codificación y diversidad.

Se tiene un esquema básico de un sistema MIMO en la Figura [II.34]: Consiste en el uso de  $M$  antenas transmisoras y  $N$  antenas receptoras para una misma potencia de transmisión y un mismo ancho de banda, las cuales funcionan de forma coordinada con el fin de optimizar el rendimiento del canal de transmisión, en términos de tasa de bit y propagación multi-camino.

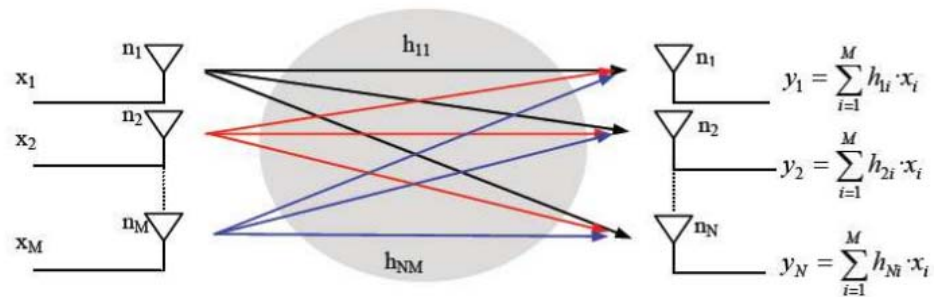


Figura [II.34] Esquema de un sistema MIMO, cada uno de los elementos  $h_{ij}(t)$  representa el canal generado entre la antena transmisora  $j$ , con  $j=1, \dots, M$  y la antena receptora  $i$ , con  $i=1, \dots, N$ .<sup>18</sup>

Con el diseño de las antenas MIMO se busca reducir la correlación entre las señales recibidas. Para esto se usan los diferentes modos de diversidad que se pueden dar en la recepción, cual es el caso de la diversidad de espacio, la de ganancia y la de polarización. Estas tres formas se observan en la Figura [II.35]:

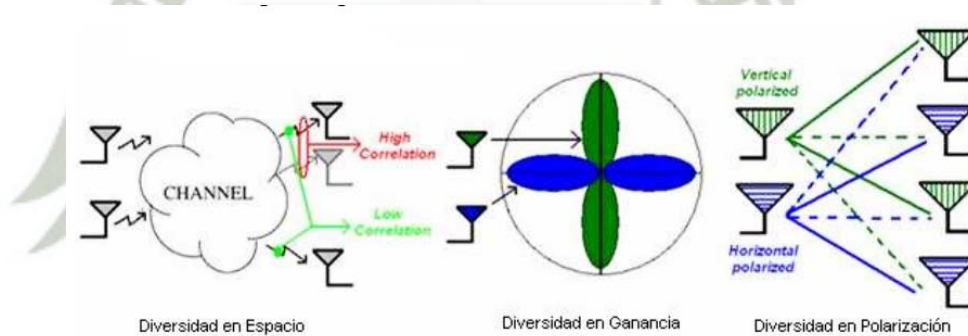


Figura [II.35] Esquema de diversidad usado en los sistemas MIMO.<sup>19</sup>

## 5. ERROR DE CONTROL DE CODIFICACIÓN

Las técnicas de codificación de canal han sido reconocidas, durante mucho tiempo, como efectivas para la protección de datos digitales de errores causados por el ruido, la interferencia, el desvanecimiento y otras deficiencias del canal. La idea de la codificación del canal consiste en introducir redundancia selectiva en

<sup>18</sup> Yáñez Arias Paulina C. “Estudio de los canales con desvanecimiento sobre redes fijas y móviles en sistemas de radio comunicación”.

<sup>19</sup> <http://wikitel.info/wiki/Imagen:Diversity1.jpg>

el flujo de datos transmitido, que se explota en el receptor para ayudar en la detección de la señal y corregir los errores inducidos en el canal. En los modernos sistemas de comunicación, la codificación de canal es una técnica clave para obtener eficiencia de potencia y ancho de banda en los sistemas. Los métodos de codificación pueden ser utilizados para dos propósitos diferentes: La corrección de errores (Conocido como “Forward Error Correction” - FEC) o la detección de errores y retransmisión (Identificado como “Automatic Repeat Request” - ARQ).

### 5.1 MODELOS DISCRETOS DE CANAL

Un diagrama de bloques simplificado de un sistema de comunicación digital empleando codificación/decodificación de canal, se muestra en la Figura [II.36]: Aquí el codificador de canal agrega redundancia al mensaje, de acuerdo a una regla prescrita en el lado del transmisor; y, en el lado del receptor, el decodificador de canal explota esta redundancia para decidir qué mensaje se transmitió. Agregar redundancia al mensaje significa que se está transmitiendo, a través del canal, más bits que la información de datos actual.

Denotado por  $\eta - \kappa$  el número de símbolos de redundancia adjuntos a un bloque de  $k$  símbolos de información, se define la tasa de código de un codificador de canal como:

$$R_c = \frac{\kappa}{\eta}, \quad 0 < R_c \leq 1 \quad [II.23]$$

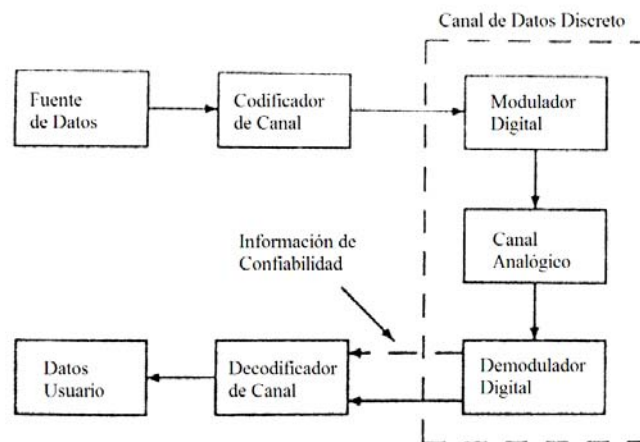


Figura [II.36] Modelo de sistema de comunicación digital.

## 5.2 PROPIEDADES, TIPOS Y DECODIFICACIÓN DE LOS CÓDIGOS DE BLOQUE

Un código de bloque consiste en un conjunto de secuencias de longitudes fijas e independientes, llamadas palabras de código. La longitud de una palabra de código es el número de códigos de símbolo (Bits) en la secuencia y es denotado como " $\eta$ ", la idea de los códigos de bloque es el de dividir la información del flujo de datos en bloques de " $\kappa$ " símbolos ( $\kappa < \eta$ ) y agregar  $\eta - \kappa$  símbolos verificados a cada bloque para obtener las palabras código correspondientes, y así tener la posibilidad de detectar y corregir los símbolos erróneos en el lado del receptor.

En un espacio del sistema con un alfabeto binario, hay  $2^n$  secuencias posibles de longitud " $n$ ", para estas secuencias podemos seleccionar cualquier conjunto de secuencias  $M = 2^k$  como posibles palabras de código y formar un código de bloque.

### 5.2.1 PROPIEDADES DE DISTANCIA

Con el fin de comparar el performance de los diferentes códigos, necesitamos una manera de calcular cuántos errores de un código específico se pueden corregir y/o detectar, las propiedades de distancia de un código determinan su capacidad de corrección y detección de errores.

- Peso Hamming: Denotado como  $w_H(c)$ , de una palabra código “c” es el primer número en la palabra de código.
- Distancia Hamming: Para un código lineal, la distancia Hamming entre dos palabras de código es solo el peso Hamming de su suma binaria:

$$d_H(c_i, c_k) = w_H(c_i \oplus c_k) \quad [II.24]$$

El parámetro clave que determina la capacidad de detección y corrección de error de un código es la “distancia mínima” ( $d_m$ ), esta es la menor distancia entre cualquier par de todas las palabras código en el código.

$$d_m = \min_{\forall i \neq j} d_H(c_i, c_j) \quad [II.25]$$

### 5.2.2 TIPOS DE CÓDIGOS DE BLOQUE

Se consideran algunos de los códigos de bloque más importantes, conforme al siguiente detalle:

- Códigos de Repetición: Son la forma más simple de un código de bloque lineal: Un mensaje simple de bits ( $k=1$ ) es codificado en un bloque de “n” bits idénticos.
- Códigos Hamming: Son códigos binarios, lineales y cíclicos.
- Códigos de Longitud Máxima: También llamados "códigos pseudo-ruido" (PN) porque tienen correlación y propiedades espectrales que son similares a las

propiedades de la secuencia de ruido blanco. Estos códigos son importantes en la secuencia de los sistemas directos de espectro ensanchado.

- d) Código Golay: Es un código binario (23, 12, 7) con un muy buen performance. Puede corregir todas las combinaciones de tres o más errores en cada bloque de 23 bits.
- e) Códigos Bose-Chaudhuri-Hocquenghen (BCH): Constituyen una de las más importantes clases de código entre los códigos cíclicos lineales, incluyendo tanto los binarios como los "no binarios".
- f) Códigos Reed-Solomon (RS): Son un subgrupo importante de los códigos "no binarios" BCH. Los códigos RS operan con símbolos (Múltiples bits) en lugar de bits individuales.

### 5.2.3 DECODIFICACIÓN DE CÓDIGOS DE BLOQUE

La tarea del decodificador es recuperar la palabra de código transmitida a partir de la señal ruidosa recibida, así como extraer los símbolos de información. En cada intervalo de bloque, el decodificador trata de encontrar la palabra código que es la más cercana a la palabra recibida dentro del total de palabras de código válidas.

**Decodificación de Decisión Dura:** El demodulador y el decodificador operan independientemente. El primero (Demodulador) toma una decisión en los símbolos individuales de la palabra recibida y luego pasa al decodificador los "valores duros" obtenidos. El segundo (Decodificador) usa estos valores y toma una decisión final sobre la palabra más probable de la transmisión de código.

**Probabilidad de Error de Bit:** Es bastante simple el principio en la determinación de la probabilidad de error de bit. La clave está en ver los eventos de error y encontrar el número de error de bits asociados con cada evento de error. Dentro de tal contexto, la probabilidad de error de bit está dada por:

$$P_b = \frac{1}{k} \sum_E f_E P(E) \quad [II.26]$$

**Decodificación de Decisión Suave:** Es un decodificador que hace uso de información confiable (Side information). Esta información puede derivarse del demodulador o de otra parte del receptor. En general, la decodificación de decisión suave se comporta mejor que la de decisión dura, pero a expensas del incremento de la complejidad del decodificador. El demodulador no toma la decisión final en los símbolos individuales de la palabra recibida; en lugar de ello, pasa los “valores suaves” de los símbolos al decodificador, donde éste usa dichos valores para tomar una decisión final en la palabra código transmitida más probable.

### 5.3 CÓDIGOS CONVOLUCIONALES

En una codificación convolucional el decodificador es una máquina de "estado-finito", la cual trata los bits de información de forma continua, en una forma de serie. La palabra código generada en un instante certero de tiempo, es una función de la entrada en este instante y el estado de la máquina.

#### **Propiedades básicas:**

Un decodificador binario convolucional puede ser visto como una máquina de estado finita con “k” registros de desplazamientos, “n” sumadores de modulo-2 y multiplexadores de entrada/salida. Cada registro de desplazamientos consiste en

“m” etapas con conexiones a “n” sumadores de modulo-2. Un multiplexador puede ser utilizado para convertir las salidas del sumador a palabras de código seriales. En la Figura [II.37] tenemos un diagrama de bloques simplificado de la velocidad de código convolucional k/n. Así:

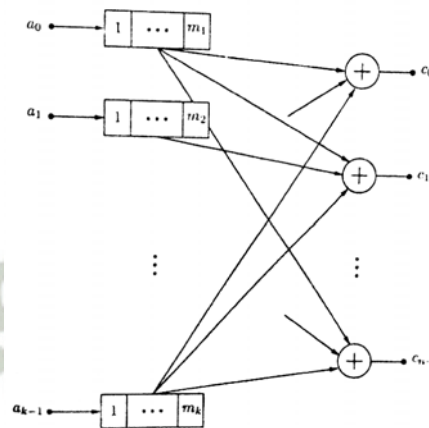


Figura [II.37] Diagrama de bloques simplificado de un decodificador convolucional.<sup>20</sup>

La memoria de un código convolucional juega un rol importante y tiene una gran influencia en el performance del código y en el diseño del decodificador.

#### 5.4 MÉTODOS DE CODIFICACIÓN PARA CANALES DE DESVANECIMIENTO

En la práctica, la mayoría de los canales de transmisión son correlacionados, ello debido al desvanecimiento, al ruido impulsivo, a las señales interferentes, a la interferencia, etc. Casi todos los canales de radio son de este tipo, siendo quizás la excepción los canales satelitales. Las propiedades de correlación del canal de radio móvil tienen una gran influencia en el performance de los esquemas de comunicación. Los códigos de corrección de errores (Que son diseñados para errores independientes) no son, en general, efectivos en la corrección de ráfaga de

<sup>20</sup> Ahlin Lars, Zander Jens, Slimane Ben. “Principles of Wireless Communications”.

errores. Como ejemplo podemos observar la Figura [II.38] la cual muestra los resultados de simulación para la probabilidad de error de bit en relación a una tasa de código convolucional de  $\frac{1}{2}$ , en canales con desvanecimiento de Rayleigh, para diferentes tasas de desvanecimiento, se observa que para el desvanecimiento lento de los móviles el esquema de FEC no provee ninguna ventaja comparado con el esquema no codificado en términos de performance. Cuando la tasa de desvanecimiento aumenta, la correlación entre símbolos consecutivos recibidos disminuye y el esquema de FEC se vuelve más y más efectivo.

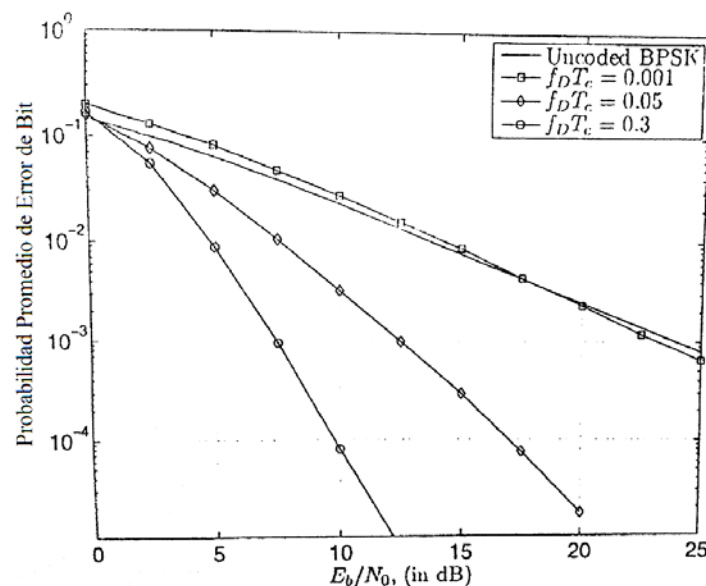


Figura [II.38] Rendimiento de la tasa de código convolucional  $\frac{1}{2}$  en canales correlaciones con desvanecimiento Rayleigh, es utilizada decodificación suave y se ha supuesto la perfecta información del estado del canal.<sup>21</sup>

### Codificación y Entrelazado

El uso del entrelazado con el envío de la codificación de control de errores, puede ser visto: Como un método para obtener diversidad de tiempo en un sistema de comunicación digital, sin añadir ninguna sobrecarga; o también como un esquema

<sup>21</sup> Ahlin Lars, Zander Jens, Slimane Ben. "Principles of Wireless Communications".

simple para crear grandes códigos. Se puede observar en la Figura [II.39] el diagrama de bloques del sistema digital de comunicaciones empleando codificación y entrelazado. Aquí el entrelazador puede ser visto como un segundo canal codificador con una tasa de código  $R_c = 1$  empleada en el transmisor y el desentrelazador como su decodificador de canal empleado en el receptor. Existen muchos métodos de entrelazado, pero comúnmente se restringen a dos formas: La estructura de bloques y la estructura de forma convolucional.

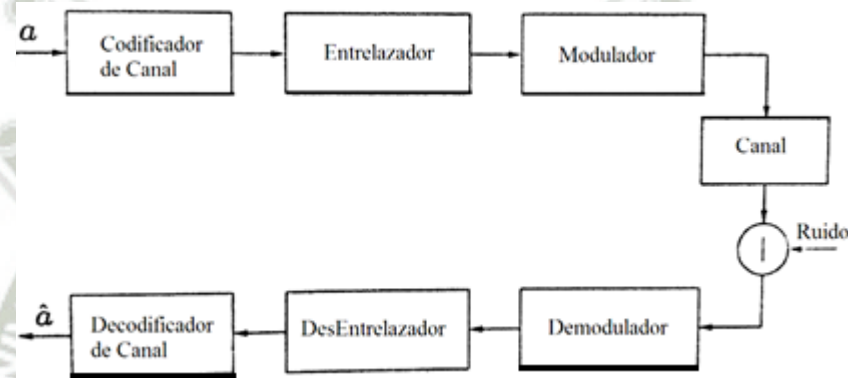


Figura [II.39] Diagrama de bloques de un sistema de comunicación con entrelazado/desentrelazado.

### **Códigos Concatenados:**

Códigos no binarios, como los códigos Reed-Solomon, pueden ser buenos para la corrección de errores de ráfaga, pues en lugar de bits, están diseñados a partir de símbolos de alfabetos más grandes. La construcción se asemeja a la idea de entrelazado. Si el número de bits en un símbolo es “ $m$ ”, ocurre que una ráfaga de error de, a lo sumo, “ $m$ ” bits, tendrá el mismo efecto que un error de un bit, ello siempre que toda la citada ráfaga afecte sólo a un símbolo.

## 5.5 TÉCNICAS DE MODULACIÓN CODIFICADA

La codificación de control de errores (FEC) mejora el performance de un sistema de comunicaciones digital, tanto en los canales AWGN como en los canales con desvanecimiento por multi-trayectoria. Sin embargo, esta mejora se obtiene a expensas de una expansión de ancho de banda o reducción de la velocidad de transmisión de información.

Para evitar la expansión del ancho de banda, se puede integrar un esquema FEC con una señal de eficaz ancho de banda expandido, conforme se puede constatar en la Figura [II.40].

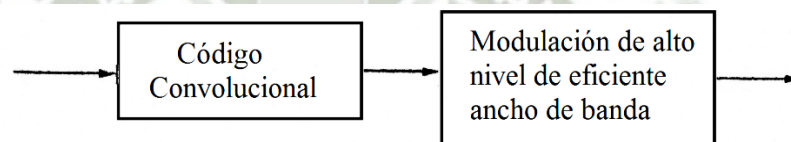


Figura [II.40] Diagrama de bloques de un sistema de codificación codificado.

Consideremos dos sistemas mostrados en la Figura [II.41]: El primero es un esquema de modulación QPSK sin codificación, el cual provee un “throughput” de 2 bits/s/Hz; y, el segundo, es un código convolutional de tasa 2/3 seguido de un esquema de modulación 8PSK. Desde que 8PSK proporciona un “throughput” de 3bits/s/Hz, el segundo sistema produce el mismo “throughput” que el esquema sin codificación QPSK, siendo además que ambos sistemas requieren el mismo ancho de banda para igual tasa de bit de información. Por lo tanto, ambos son sistemas son comparables y cualquier ganancia de codificación proporcionada por el esquema de codificación en comparación con el esquema sin codificar se traducirá en un ahorro de energía para el sistema, sin ningún sacrificio ni en la velocidad de bit o en el ancho de banda.

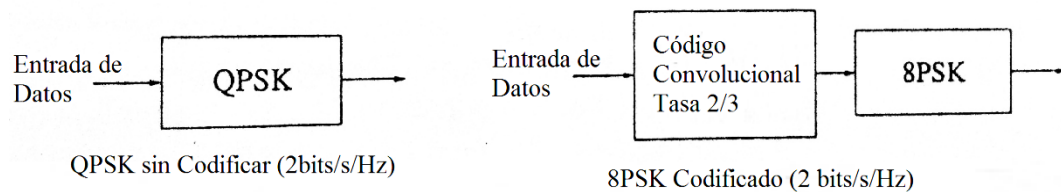


Figura [II.41] Ejemplo de dos sistemas de comunicación teniendo la misma eficiencia de ancho de banda.

## 6. PAQUETES DE TRANSMISIÓN INALÁMBRICOS

Una característica clave de un sistema de comunicación de datos, es que el flujo de información se divide en pequeñas unidades discretas, mensajes, paquetes o bloques, los que además requieren llegar al receptor intactos y en el orden correcto, pero con algunos diferentes retrasos. Tal entrega de datos con un ligero retraso, nos permite abrir dos posibilidades:

- a) La retransmisión de datos erróneos (ARQ) se puede utilizar en el enlace, lo que permite márgenes de enlace más bajos, tolerar más la interferencia y mantener las tasas de error muy bajas (Residuales).
- b) La indisponibilidad momentánea de los recursos del radio no es tan crítico. Los mensajes de datos se pueden poner en una cola para su transmisión en algún momento, cuando se disponga de recursos.

### 6.1 TRANSMISIÓN EN ENLACES INALÁMBRICOS

Uno de los protocolos utilizados para el control de errores en la transmisión de datos, garantizando de esta forma la integridad de tales datos, es el denominado “Automatic Repeat Request” (ARQ). Éste se suele emplear en sistemas que no operan en tiempo real, ya que puede ser importante el tiempo que se pierde en el reenvío. Esta técnica de control de errores está basada en el reenvío de paquetes de información que se detectan como erróneos. Para saber si es correcta la

recepción de un paquete, se utilizan ACKs (Acuse de recibo) y NACKs (Acuse de recibo negativo) de tal forma que cuando el receptor recibe un paquete, responde entonces con un ACK, si es correcto; y un NACK, si es incorrecto. En caso de que el emisor no reciba información sobre la recepción del paquete (ACK o NACK) durante un tiempo fijado (Timeout) dicho paquete se reenvía nuevamente. Para canales extremadamente perturbados, como radio canales con desvanecimiento, un sistema ARQ adecuadamente diseñado puede funcionar bastante bien en comparación con esquemas convencionales de corrección de errores.

En la práctica hay tres tipos básicos de esquemas o protocolos ARQ. Efectivamente:

- a) ARQ de Parada y Espera: Es el más sencillo y usado. Se envía un bloque a la vez sobre un canal. Después de la transmisión, el transmisor espera por una respuesta del receptor para recién transmitir el siguiente bloque.
- b) ARQ de Retroceder-N: Envía continuamente los bloques sobre el canal sin esperar una respuesta del receptor, aumentando así la eficiencia. Cuando recibe un NACK, se vuelve a la copia almacenada del bloque erróneo y se reenvía éste y todos los bloques que le seguían, con la finalidad de mantener el orden de la secuencia original.
- c) ARQ de Repetición Selectiva: De igual manera, en este tipo de esquema o protocolo, los bloques son transmitidos continuamente, pero cuando se recibe un NACK, sólo el bloque erróneo es retransmitido.

## 6.2 COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS ARQ Y FEC

Un sistema FEC, con una elección apropiada de código, brinda una mejora real en el performance sobre un canal, cuando la potencia de transmisión es restringida, pero donde es posible incrementar en ancho de banda. Una gran ventaja de los sistemas FEC está dada por el hecho de que no se requiere un canal de retorno y el “delay” es fijo. Así, los sistemas FEC tienen una eficiencia constante, pero un performance de error de bit variable que depende de la tasa de error de bit en el canal.

Los beneficios más importantes con ARQ radican en que la implementación de hardware se simplifica considerablemente y el usuario puede obtener muy bajas probabilidades de error de bit.

Una comparación entre los métodos FEC y ARQ muestra, entre otras cosas, que este último (ARQ) es más simple y ofrece una baja probabilidad de errores no detectados. No obstante, el gran inconveniente de este sistema radica en que la eficiencia decrece rápidamente cuando el canal se deteriora, ello debido a la tasa de error que conduce a incrementar el número de retransmisiones. De otro lado, los sistemas FEC puros tienen, a su vez, dos inconvenientes principales: El primero es que cada bloque decodificado es enviado al usuario independientemente de si es correcto o no, ya que la probabilidad de errores de decodificación es considerablemente más alta que la probabilidad de errores no detectados, siendo entonces difícil obtener una confiabilidad muy alta para un sistema FEC; el segundo problema es que para obtener un buen performance, se debe usar un código muy potente y un gran número de patrones de error debe ser corregible, lo que implica que el proceso de decodificación se vuelva complejo y

costoso. Por estas razones, los sistemas ARQ son los preferidos para el control de errores en sistemas de transmisión de datos y aplicaciones computadora a computadora, sin embargo los sistemas FEC son preferidos para sistemas digitales de comunicación que toleran tasas moderadas de error de bit, como las transmisiones de voz o la transmisión de información con una redundancia inherente. En canales de comunicación donde no hay un canal de retorno, un sistema FEC es la única alternativa.

Para mejorar la eficiencia se pueden utilizar las ventajas de uno y otro sistema (FEC y ARQ) dando forma a uno híbrido (FEC/ARQ):

Un sistema híbrido consta de un sistema FEC dentro de un sistema ARQ, conforme se muestra en la Figura [II.42]. La salida de un sistema ARQ da la baja probabilidad de errores no detectados requerida, mientras que el sistema FEC incrementa la eficiencia mediante la reducción del número de retransmisiones. Como podemos observar en la citada Figura [II.42] el codificador y decodificador en un sistema FEC, junto con el canal, pueden ser considerados como un “súper canal” del sistema ARQ. Luego, la tasa de error en este último (Súper canal) es la probabilidad de error resultante en un sistema FEC.

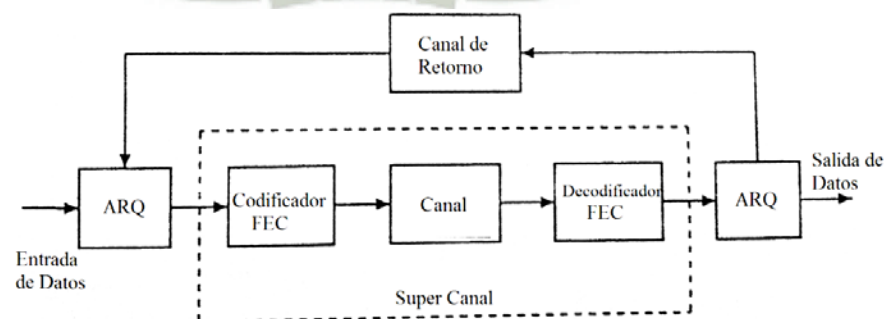


Figura [II.42] Sistema híbrido FEC/ARQ.<sup>22</sup>

<sup>22</sup> Ahlin Lars, Zander Jens, Slimane Ben. “Principles of Wireless Communications”.

## 7 ETHERNET

Ethernet es, en la actualidad, la tecnología LAN dominante a nivel mundial. El mantenimiento de los protocolos y servicios funcionales para el conjunto de protocolos TCP/IP de las capas superiores, es realizado por el grupo de trabajo de internet (IETF); mientras que los servicios funcionales de la capa de enlace de datos y la capa física del modelo OSI, son mantenidos por diversas organizaciones especializadas en ingeniería (IEE, ANSI, ITU) o por empresas privadas (Protocolos propietarios). Debido a que Ethernet está compuesto por estándares en estas capas inferiores, se puede decir que, en términos generales, se entiende mejor con referencia al modelo OSI, el cual separa las funciones de la capa de enlace de datos de entramado, direccionamiento y acceso a los medios. Los estándares de Ethernet están definidos por los protocolos de Capa 2 y las tecnologías de Capa 1.

### 7.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE ETHERNET

Según los estándares para las LAN -que fueron publicados por la IEEE y comienzan con el número 802- el estándar para Ethernet es el 802.3, el cual cumple con las necesidades de la Capa 1 y de las porciones inferiores de la Capa 2 del modelo OSI, como podemos observar en la Figura [II.43].

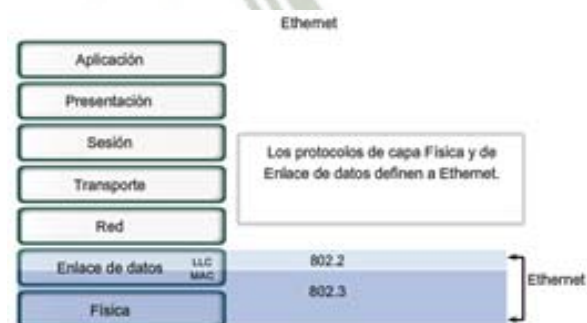


Figura [II.43] Ethernet en el modelo OSI.<sup>23</sup>

<sup>23</sup> CISCO CCNA v4.0. "Aspectos Básicos de Networking"

Ethernet en la Capa 1 implica: Señales, flujos de datos que se transportan en los medios, componentes físicos que van a transmitir las señales a los medios y distintas topologías. Ethernet funciona en la capa 1 –donde tiene un papel clave– y en parte de la capa 2 para suplir las limitaciones de la capa 1. Dentro de las funciones que cumple la capa 2, tenemos: Conectarse con las capas superiores mediante el control de enlace lógico (LLC), utilizar esquemas de direccionamiento para identificar dispositivos, emplear tramas para organizar los bits en grupos y usar el control de acceso al medio (MAC) para identificar fuentes de transmisión.

Ethernet separa las funciones de la capa de enlace de datos (Capa 2) en dos sub-capas: La de Control de Enlace Lógico (LLC) y la de Control de Acceso al Medio (MAC), cuyas funciones son descritas, en el estándar de la IEE 802.2 y 802.3 respectivamente, como se observa en la Figura [II.43]

La sub-capa LLC se encarga de la comunicación entre el software de red, las capas superiores y las inferiores (Generalmente el hardware). Toma los datos del protocolo de red (Paquete IPv4) y agrega información y control para ayudar a entregar el paquete al nodo de destino. A manera de ejemplo, se puede considerar el LLC como el controlador de la tarjeta de interfaz de red (NIC).

La sub-capa MAC tiene dos responsabilidades principales: La encapsulación de datos y el control de acceso al medio. A su vez, el primero tiene como funciones la delimitación de las tramas, además del direccionamiento y la detección de errores; mientras que al segundo le corresponde el control de la colocación de la

trama dentro y fuera de los medios, así como la recuperación de estos últimos (Los medios).

## 7.2 LA TRAMA ETHERNET

### 7.2.1 LA TRAMA: ENCAPSULACIÓN DEL PAQUETE

La estructura de la trama de Ethernet agrega encabezados y trailers a la PDU de Capa 3 para encapsular el mensaje que se envía. Tanto el tráiler como el encabezado, tienen varias secciones de información utilizadas por el protocolo Ethernet. Tenemos dos estilos de tramas Ethernet: El IEE 802.3 (Original) y el IEE 802.3 revisado (Ethernet) según se puede apreciar en la Figura [II.44]. Las diferencias entre ambas tramas son mínimas, siendo las más significativas, en todo caso, el agregado de un delimitador de inicio de trama (SFP) y un cambio pequeño en el campo tipo que incluye la longitud.



Figura [II.44] Comparación del tamaño de campo y las estructuras de tramas IEE 802.3 y Ethernet.<sup>24</sup>

<sup>24</sup> CISCO CCNA v4.0. “Aspectos Básicos de Networking”

El tamaño de la trama de Ethernet va de 64 a 1522 bytes (IEE 802.3ac). Si la extensión de una trama transmitida es menor que el mínimo o superior al máximo antes indicados, el receptor simplemente descartará la trama.

Para la IEE 802.3, los campos preámbulo y delimitador de inicio de trama se usan para la sincronización entre los dispositivos de envío y de recepción. El campo Dirección MAC de destino, es el identificador del receptor deseado el cual ayudará a determinar a los dispositivos, si la trama es dirigida para ellos o no. Por su parte, al campo Dirección MAC de origen le corresponde identificar la NIC o interfaz que origina la trama. El campo Longitud/Tipo es, de otro lado, el que define la longitud exacta del campo Datos de la trama. El campo Datos y el Relleno son los que contienen los datos encapsulados de una capa superior, la cual es una PDU de Capa 3 genérica o un paquete IPv4 y finalmente el Campo Secuencia de Verificación de la Trama que se utiliza para detectar errores en la trama.

### **7.2.2 LA DIRECCIÓN MAC DE ETHERNET**

El valor de la dirección MAC es uno único (Hexadecimal) regulado por las normas de la IEE para los proveedores, con la finalidad de garantizarlo. Para esto se respetan dos normas simples:

- a) Las direcciones MAC asignadas a una NIC u otro equipo Ethernet, deben en su totalidad utilizar el OUI (Identificador Exclusivo de Organización) que, a su vez, se le asignó a dicho proveedor, como los tres primeros bytes.
- b) Se debe asignar un valor exclusivo a todas las direcciones MAC con el mismo OUI en los últimos tres bytes.

Al enviar un dispositivo (Origen) un mensaje a una red Ethernet, se adjuntará la información del encabezado dentro de la dirección MAC. El dispositivo de origen envía los datos por la red, donde cada NIC de esta última ve la información para lograr determinar si la dirección MAC coincide con su dirección física. En caso de no encontrarse la coincidencia, el dispositivo descarta la trama. Si la trama llega a su destino (Donde la MAC de la NIC coincide con la MAC de destino de la trama) la NIC pasa entonces la trama hasta las capas OSI, donde se podrá llevar a cabo la desencapsulación.

### 7.2.3 CAPAS DE DIRECCIONAMIENTO

En la capa de Enlace de Datos (Capa 2) se utilizan las direcciones MAC de Ethernet para transportar la trama a través de los medios locales. Estas direcciones dan una dirección de host única, pero no son jerárquicas, siendo por tal razón que no tienen ningún significado fuera de los medios de la red local.

Tanto las direcciones de la capa de Red (Capa 3) como las de IPv4 nos dan un direccionamiento en general y local que se comprenden en el origen y en el destino. Para llegar a su último destino, un paquete transporta la respectiva dirección de destino de capa 3 desde su origen; sin embargo, ya que diferentes protocolos de capa 2 la traman durante el trayecto, la dirección MAC que recibe cada vez se aplicará sólo a esa porción local del trayecto y sus medios.

En conclusión, la dirección de capa 3 permite el envío del paquete a su destino y, por su parte, la dirección de capa 2 permite el transporte del paquete utilizando los medios locales a través de cada segmento. Esto lo podemos observar en la Figura [II.45].



Figura [II.45] Distintas capas de direccionamiento.<sup>25</sup>

### 7.3 CONTROL DE ACCESO AL MEDIO DE ETHERNET

Al tener un medio compartido, todos los dispositivos tendrán un acceso garantizado a este, pero sin tener ninguna prioridad, ya que, si más de un dispositivo realiza una transmisión a la vez, las señales físicas colisionan y la red debe recuperarse para que se pueda continuar la comunicación. Ethernet usa el acceso múltiple por detección de portadora y detección de colisiones (CSMA/CD). Dado que todos los dispositivos que emplea Ethernet envían sus mensajes al mismo tiempo, se usa un esquema de coordinación distribuida (CSMA) con la finalidad de detectar la actividad eléctrica en el cable, siendo así como un dispositivo puede transmitir.

Si es que la distancia que hay entre dos dispositivos es tal que la latencia (“Retraso entre el momento en que se comienza un proceso y el momento en que se detectan sus efectos”<sup>26</sup>) de las señales de un dispositivo denota que un segundo dispositivo no detecta las señales entonces el segundo dispositivo también transmitirá, en consecuencia los medios tienen dos dispositivos que transmiten sus señales en el

<sup>25</sup> CISCO CCNA v4.0. “Aspectos Básicos de Networking”

<sup>26</sup> CISCO CCNA v4.0. “Aspectos Básicos de Networking”

mismo tiempo, estas señales se propagan y se encuentran en alguna parte de la red produciéndose una colisión. Cuando se detecta una colisión, se envía una señal de congestión y se invoca un "algoritmo de postergación", el cual hace que todos los dispositivos dejen de transmitir durante un período aleatorio, permitiéndose así la disminución de las señales de colisión.

#### **7.4 CAPA FÍSICA DE ETHERNET**

Las diferencias que hay entre el Ethernet Estándar, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet, 10 Gigabit Ethernet, entre otros, tienen lugar en la capa física también llamada "Ethernet PHY".

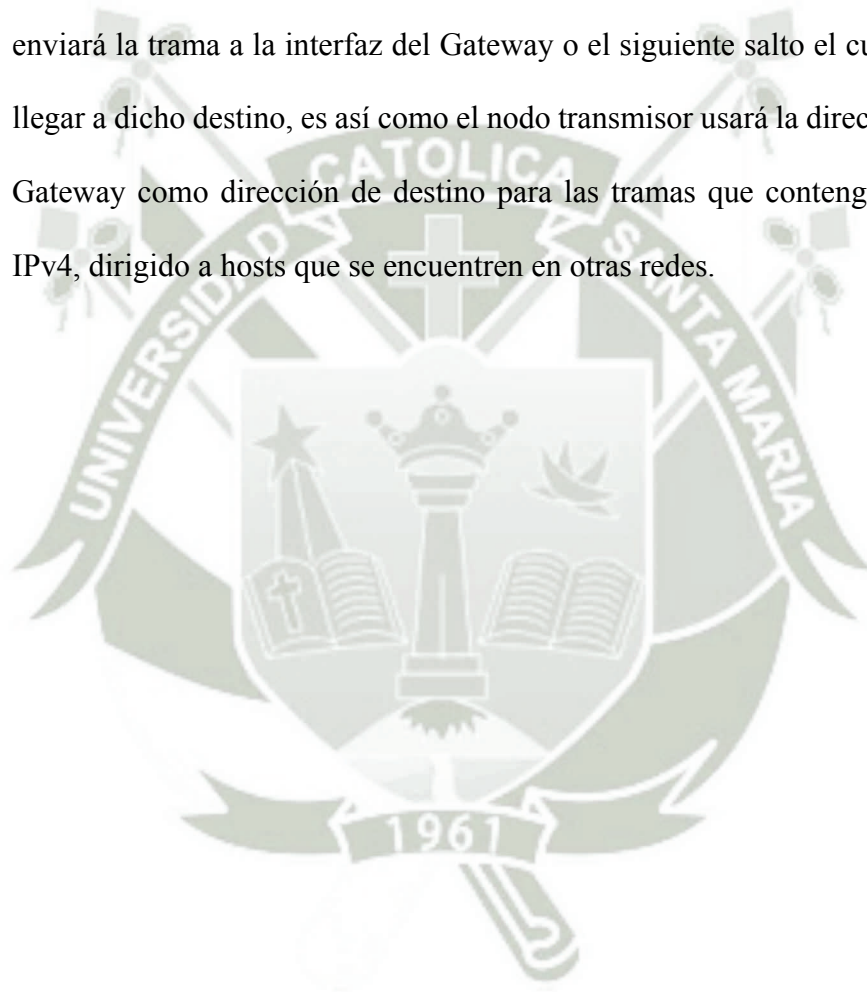
Ethernet se gobierna por los estándares de la IEE 802.3, en los que actualmente se definen cuatro velocidades de datos para los efectos del funcionamiento con cables de fibra óptica y de par trenzado: 10 Mbps (Ethernet 10Base-T), 100Mbps (Fast Ethernet), 1000 Mbps (Gigabit Ethernet) y 10 Gbps (10 Gigabit Ethernet).

#### **7.5 PROTOCOLO DE RESOLUCIÓN DE DIRECCIONES (ARP)**

El Protocolo ARP nos proporciona dos funciones básicas: La resolución de direcciones IPv4 a direcciones MAC y el mantenimiento de una cache de las asignaciones. Para que se pueda colocar una trama en los medios de la LAN, se debe contar con una dirección MAC de destino. Cuando se envía un paquete a la capa de enlace de datos para que sea encapsulado en una trama, el nodo consultará una tabla en su memoria, para así encontrar la dirección de la capa de enlace de datos que se mapea a la dirección IPv4 de destino. Dicha tabla es la llamada "Tabla ARP", la cual es almacenada en la RAM del dispositivo y contiene en cada fila un

par de valores: Una dirección IP y otra MAC, siendo que la relación entre ambos valores se denomina mapa.

Cuando un dispositivo transmisor no conoce la dirección MAC del dispositivo receptor, no se puede encapsular la trama -en consecuencia- buscará a alguien que le responda una solicitud ARP (Trama de Broadcast), de no obtener respuesta el paquete se descarta, si el destino no se encuentra en la red local, el nodo transmisor enviará la trama a la interfaz del Gateway o el siguiente salto el cual utiliza para llegar a dicho destino, es así como el nodo transmisor usará la dirección MAC del Gateway como dirección de destino para las tramas que contengan un paquete IPv4, dirigido a hosts que se encuentren en otras redes.



# CAPÍTULO III: PLANTEAMIENTO DE FACTORES, VARIABLES Y ESCENARIOS

## 1. FACTORES Y VARIABLES:

Para hacer posible la evaluación del performance de un enlace microondas, es necesario determinar algunos factores y variables, como pueden ser el “throughput”, el margen de desvanecimiento, la instalación del enlace, el “delay”, el clima y contaminación, la corrección de errores (FEC) y la modulación.

### 1.1 “THROUGHPUT”

El “throughput” (Rendimiento)<sup>27</sup> es una variable importante, pues es la tasa promedio de mensajes entregados con éxito en un canal de comunicación. El “throughput” es usualmente medido en bits por segundo [bps] y, algunas veces, en paquetes por segundo o paquetes por "time slot". El “throughput” agregado es la suma de la tasa de datos que son enviados a todos los terminales de la red.

La velocidad de bits en el aire seleccionada definirá el “throughput” neto.

La velocidad de bits es el número de bits enviados por segundo o (bits/seg). Por ejemplo, con un alfabeto basado en 64 símbolos, cada símbolo es representado por seis bits y la velocidad de datos es seis veces la velocidad de símbolos.

---

<sup>27</sup> <http://www.wordreference.com/es/translation.asp?tranword=throughput>

La velocidad de bits en el aire se obtiene mediante la aplicación de diferentes esquemas de modulación y tasas de codificación. Cada velocidad de dichos bits en el aire es caracterizada por el tipo de modulación, tasa de codificación (FEC), potencia de transmisión, sensibilidad del receptor y su robustez ante interferencias.

El “throughput” neto del sistema en una distancia determinada es una función de tres parámetros:

- Velocidad de bits permisible para una distancia específica.
- Uso del Sistema (SystemOverhead).
- Retardo de Propagación.

El “throughput” neto de un enlace dado puede ser calculado con:

$$TP = DR \times \left[ 1 - \text{Overhead} - \left( 2 \times \frac{PD}{RF_T} \right) \right] \times TDD_{DC} \quad [III.1]$$

Donde,

TP = “Throughput” full duplex [Mbps], DR= Velocidad de bits en el aire [Mbps]

Overhead = Uso de PHY (Físico) y MAC (Acceso al medio),  $RF_T$  = Tiempo de duración de la trama de radio [ms],  $TDD_{DC}$  = Ciclo de funcionamiento TDD, PD = Retardo de propagación.

## 1.2 MARGEN DE DESVANECIMIENTO

Dentro de todos los factores que influyen en la propagación, tenemos una variable importante denominada margen de desvanecimiento (Fade Margin, en inglés).


Como sabemos cuándo una onda electromagnética se propaga por la superficie terrestre, la señal presenta pérdidas intermitentes de intensidad, además de la pérdida normal en la trayectoria, esta variación en la pérdida de la señal se denomina “desvanecimiento” y se atribuye a perturbaciones climáticas, al efecto multi-trayectoria, a una superficie terrestre irregular y a interferencias electromagnéticas encontradas en el medio.

El margen de desvanecimiento es una variable que toma en consideración el desvanecimiento en un enlace microondas debido a que se define como la diferencia entre el RSSI (Que es el indicador de intensidad de la señal de recepción) y la sensibilidad del receptor. Entre mayor sea este valor se tendrá un enlace más robusto y activo, mientras que, la disminución del mismo tendrá como significado que: Las perturbaciones climáticas, el efecto multi-trayectoria la superficie terrestre o las interferencias electromagnéticas están afectando al enlace microondas pudiendo producir pérdidas de comunicación.


Por todos los factores que producen una disminución del margen de desvanecimiento, la señal nunca llega tal cual fue emitida, por lo que se requiere establecer un margen de desvanecimiento (En la simulación) que permita hacer frente a estos factores.

El margen de desvanecimiento para grandes distancias se define como:


$$F_m = 30 \log D + 10 \log(64ABf) - 10 \log(1 - R) - 70$$




Efecto de  
trayectoria múltiple



Sensibilidad  
del terreno



Objetivos de  
Confiability



Constante

Dónde:

$F_m$  = Margen de desvanecimiento [dB];  $D$  = Distancia [Km];  $f$  = Frecuencia [GHz];  
 $R$  = Confiabilidad en tanto por uno (Es decir, 99.99% = 0.9999 de confiabilidad);  
 $1 - R$  = Objetivo de confiabilidad para una ruta de 400km en un sentido;  $A$  =  
Factor de Rugosidad, 4 sobre agua o sobre un terreno muy liso, 1 sobre un terreno  
promedio, 0.25 sobre un terreno muy áspero y montañoso;  $B$  = Factor para  
convertir la peor probabilidad mensual en una probabilidad anual, 1 para pasar  
una disponibilidad anual a la peor base mensual, 0.5 para áreas calientes y  
húmedas, 0.25 para áreas continentales promedio, 0.125 para áreas muy secas o  
montañosas.

### 1.3 INSTALACIÓN DEL ENLACE

La instalación es un factor muy importante, ya que si no se realiza de la mejor manera, los enlaces microondas se verán afectados en su “throughput” final.

En la Figura [III.1] podemos observar los componentes básicos de un enlace microondas: El ODU (Outdoor Data Unit) que es el equipo de radioenlace; el IDU (Indoor Data Unit)/PoE, que es la unidad de interior y sirve para proveer de energía al ODU así como permitir el intercambio de datos con el ODU; el hub sincronizador; la antena parabólica externa (Si es necesaria) y el kit de montaje.



Figura [III.1] a) Equipo ODU-Vista frontal y posterior, b) Equipo IDU/PoE, c) Hub Sincronizador, d) Antena Parabólica Externa, e) Kit de Montaje

Para la implementación de los escenarios se debe seguir un método de implementación adecuado, el mismo que se divide en: Las prácticas de seguridad y la secuencia de instalación del hardware.

### **Prácticas de Seguridad**

Prácticas elementales para evitar accidentes al momento de la instalación y posteriores a la misma. Así, se deben cumplir las siguientes:

- a) Las unidades al aire libre y las antenas deben ser instaladas sólo por profesionales experimentados y que además estén familiarizados con las torres, mástiles, postes de telecomunicaciones y las normas de seguridad para trabajos en altura, siendo de resaltar que estos últimos sólo se pueden realizar hasta las 17:00 horas, según Ordenanza del Municipio Provincial de Arequipa.
- b) El instalador debe protegerse contra la exposición excesiva (Sobre exposición) a la energía RF, no debiendo colocarse directamente delante de la antena cuando el sistema se encuentre en funcionamiento, se debe considerar la distancia mínima de seguridad.
- c) Todos los equipos de radioenlaces deben estar conectados a tierra durante su operación, debiendo observarse las recomendaciones del Código Nacional Eléctrico.
- d) Las torres de comunicación deben contar con dispositivos de protección contra rayos (Pararrayos) instalados por un experto.

## Secuencia de Instalación

Los siguientes pasos son necesarios para instalar un sistema de enlaces microondas:

1. Instalación de la torre/mástil de comunicación: Debe ser realizada por personal calificado, teniendo en cuenta, además, todas las medidas de seguridad.
2. Montaje de ODUs: El ODU puede ser montado en una torre, mástil o una pared. En ambas sedes se utiliza el kit de montaje de cada fabricante para asegurar el ODU. Un enlace microondas opera con 2 ODUs con la misma configuración. Antes de conectar los cables al ODU, el terminal de protección a tierra del mismo debe encontrarse conectado al conductor externo de tierra o a un pozo a tierra.
3. Montaje de las antenas externas (Si se utilizan): Para montar esta clase de antenas, se debe utilizar el kit de montaje adecuado suministrado por el fabricante de aquélla, evitando así antenas mal instaladas.
4. Montaje de los dispositivos de protección contra rayos: Es fundamental para reducir el riesgo de pérdida total del equipo causada por la descarga de un rayo. Los pararrayos son vitales, especialmente en la sierra de nuestro país.
5. Realizar una correcta conexión de los dispositivos al aire libre: Como la conexión entre el ODU y la antena externa, las conexiones a tierra para todos los dispositivos, la conexión de red y energía entre el ODU y el IDU, entre otros.

6. Montaje de IDUs: El IDU es la unidad que le da energía al ODU (PoE) esto mediante un cable Ethernet, y por el cual, también pasan los datos. Esta debe estar conectada a tierra y colocada correctamente.
7. Conexión del ODU al IDU: El cable ODU-IDU conduce todo el tráfico entre el IDU y el ODU, ofreciendo además alimentación a este último (ODU). La longitud máxima del citado cable es de 100m, de conformidad con las normas 10/100 BaseT.
8. Alineación de ODUs/Antenas: Es de vital importancia para una correcta alineación del sistema. Se debe realizar con los dos equipos al mismo tiempo, en el sitio A y el de B, de tener un tono audible o leds que indiquen el estado de alineamiento de los equipos, utilizarlos como ayuda. Para la alineación se debe tomar en cuenta el estudio de factibilidad previo para tener el azimut y elevación correctos.

#### 1.4 “DELAY”

El “delay” de propagación es otra variable importante, ya que es la cantidad de tiempo que la cabecera de la señal toma en viajar desde el emisor hacia el receptor. Dicho de otra manera, mide la cantidad de tiempo que tarda un paquete en viajar desde el origen hacia el destino. Conjuntamente con el ancho de banda, define la velocidad de una red.

Se ve influenciado por tres factores:

- a) La distancia a través de la cual los datos deben viajar.
- b) El tamaño de los paquetes.
- c) Número de redes entre los terminales.

Dentro de la distancia por la que los datos deben viajar, tenemos el “delay” de propagación, el cual, puede ser calculado en función a la relación entre la longitud del enlace y la velocidad de propagación en el medio específico.

El citado “delay” de propagación es igual a  $D/S$ , donde  $D$  es la distancia y  $S$  es la velocidad de propagación de la onda, que en las comunicaciones inalámbricas es la velocidad de la luz. Como ejemplo tenemos que el retardo de propagación en 1 km es igual a 3.3us, siendo tal retardo en un medio sin desvanecimientos, por lo que no considera multi-trayectorias, reflexiones, difracciones, etc., que podrían significar retardos de hasta unos cuantos segundos.

El retardo de propagación es el mayor obstáculo cuando se requiere de una red a gran velocidad, pues si se tiene paquetes muy grandes, entonces aumenta también el tráfico, y si se enfrenta limitaciones del medio, se crea un cuello de botella y el “delay” aumenta.

Dentro del número de redes entre los terminales, tenemos un “delay” producido por el procesamiento de la capa 2 de los distintos terminales (Tarjetas de red, switches, routers, entre otros).

La influencia de estos tres factores nos dará como resultado el “delay” del sistema de comunicación.

## **1.5 CLIMA Y CONTAMINACIÓN**

El clima es también un factor importante para los efectos del buen funcionamiento de un enlace microondas.

Si bien en Arequipa contamos con un clima templado y soleado la mayor parte del año, durante aproximadamente tres meses dicho clima es lluvioso y nublado. La lluvia constituye una variable determinante en las frecuencias encima de 10GHz, esto debido a que la longitud de onda es bloqueada por las gotas de lluvia. La presente investigación se basa en la banda de 5.8 GHz, motivo por el cual la lluvia no es un factor determinante, pero si considerable pues trae consigo vientos fuertes que, como tales, pueden desalinearse los equipos de comunicación microondas y/o doblar las torres de comunicación.

Viendo el clima desde la perspectiva del “Factor de Clima/Terreno” o factor C, observamos que Arequipa tiene un valor C entre 2 y 4.

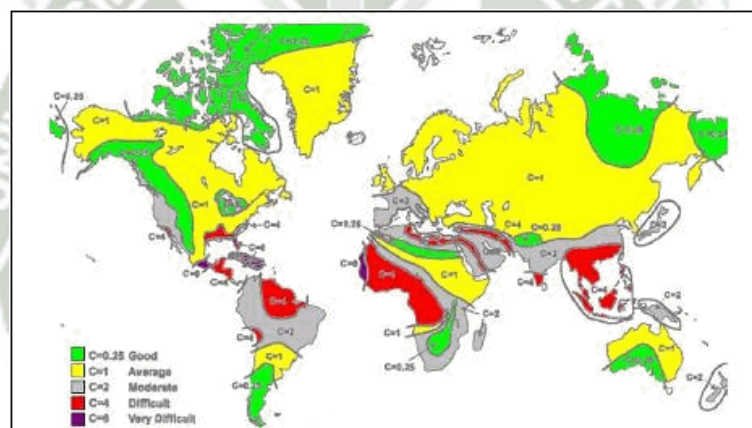


Figura [III.2] Factor de Clima/Terreno.<sup>28</sup>

De acuerdo a la Figura [III.2] constatamos que el factor C determina el grado de dificultad del terreno donde:

C = 0.25 bueno, Montañas y Clima Seco; C = 1 Promedio, Terreno y Clima Promedio; C = 2 Moderado, Terreno y Clima Moderado; C = 4 Difícil, Sobre agua o clima húmedo; C= 6 Muy Difícil, Clima de humedad extrema.

<sup>28</sup> <http://www.e-band.com/index.php?id=68>

Una variable importante es también la contaminación existente en la ciudad de Arequipa, más aún si ha aumentado considerablemente debido al crecimiento del parque automotor que, a su vez, se produce como consecuencia del incremento de la población. Efectivamente, el aumento de la cantidad de pobladores genera una mayor demanda de vehículos de transporte privado y público. Es más, gran parte de estos últimos ya han cumplido su vida habitualmente útil de funcionamiento, a lo que se suma la mala calidad del combustible fósil con el que contamos. Los automóviles, camiones, combis y demás unidades vehiculares liberan grandes cantidades de óxidos de nitrógeno y de carbono, así como hidrocarburos y partículas, ello al quemar gasolina y gasóleo, provocándose de esta manera la creación de una capa de Esmog<sup>29</sup> en nuestra ciudad. Esto es perjudicial para un enlace microondas, pues cuando las ondas electromagnéticas atraviesan el espacio, al toparse con el Esmog, se agravan los desvanecimientos. Por ende, se concluye que esta variable está correlacionada con el margen de desvanecimiento, en la medida que el clima y la contaminación producen desvanecimientos, por lo que no se tomarán en cuenta como factor.

## 1.6 CORRECCIÓN DE ERRORES (FEC)

El FEC es igualmente otra variable importante. Es una técnica usada para el control de errores en la transmisión de datos sobre canales de comunicación ruidosos o poco estables. Funcionalmente, nos permite tener una redundancia, ya que el emisor codifica su mensaje de una forma redundante, usando el código de corrección de errores.

---

<sup>29</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Esmog>

Con la finalidad de que puedan corregirse sin la necesidad de una retransmisión, la redundancia permite al receptor detectar un número limitado de errores, los que ciertamente pueden producirse en cualquier parte del mensaje. El FEC brinda al receptor la capacidad de corregir errores sin la necesidad de un canal inverso que solicite la retransmisión de datos; sin embargo, esto tiene como costo un ancho de banda de canal de transmisión fijo y alto o, en su caso, un mayor esquema de modulación.

El procesamiento del FEC en un receptor puede ser aplicado a un flujo de bits digital o en la demodulación de una portadora modulada digitalmente. El FEC es una parte integral de la conversión analógica-digital inicial en el receptor.

La corrección de errores se obtiene añadiendo al mensaje enviado unos bits de redundancia. Son agregados por el codificador, obteniendo en la salida del mismo la palabra código. Ésta es enviada al receptor, donde utilizando una adecuada decodificación y aplicando algoritmos de corrección de errores, se puede obtener el mensaje original. Los principales tipos de FEC usados son los códigos de bloque y los códigos convolucionales.

Los transceptores utilizados en este trabajo de investigación para fines de corrección de errores, usan algoritmos que son específicamente diseñados para las distintas condiciones de la banda libre de 5.8GHz y garantizan una comunicación rápida, robusta y libre de errores. Asimismo, se utilizan las siguientes tasas de FEC [k=]: 1/2, 2/3, 3/4 y 5/6.

## 1.7 MODULACIÓN

La modulación es el conjunto de técnicas que se utilizan para transportar la información sobre una onda portadora, la cual es generalmente una onda sinusoidal. Estas técnicas nos permiten un mejor aprovechamiento del canal de comunicación, lo que significa poder transmitir mayor información simultáneamente y mejorar además la resistencia contra posibles ruidos e interferencias.

“La modulación es el proceso o el resultado del proceso de variar una característica de una portadora de acuerdo con una señal que transporta información. El propósito de la modulación es sobreponer señales en las ondas portadoras”.<sup>30</sup>

Muchas modulaciones digitales se utilizan en sistemas de telecomunicaciones, como por ejemplo, con el estándar IEE 802.16 solo son soportadas 4 que son: BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM, los transeptores utilizados en este trabajo de investigación no cumplen con el estándar IEE 802.16 pero si utilizan los 4 esquemas de modulación soportados por el estándar como se describen a continuación:

- a) **BPSK (Manipulación por Desplazamiento Binario de Fase) (M (nivel de estado)=2):** Para una sola frecuencia portadora son posibles dos fases de salida, la fase de la señal portadora varía entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ . Conforme la señal digital binaria cambia de estado, la fase de la portadora de salida se desplaza

---

<sup>30</sup> American National Standard for Telecommunications

entre dos ángulos que están  $180^\circ$  fuera de fase. Podemos apreciar su diagrama de constelación en la Figura [III.3].

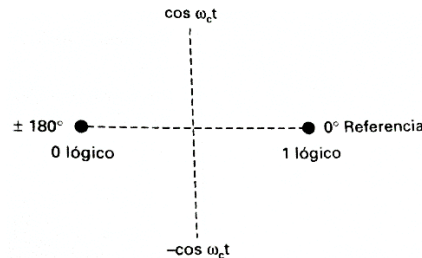


Figura [III.3] Diagrama de Constelación BPSK.<sup>31</sup>

**b) QPSK (Codificación por desplazamiento de fase en cuadratura) (M=4):**

Para una sola frecuencia portadora son posibles cuatro fases de salida diferentes, por lo que tienen que haber, asimismo, igual cantidad de diferentes condiciones de entrada. Se requieren dos bits en la entrada del modulador para obtener cuatro posibles condiciones: 00, 01, 10 y 11 a la salida. Como consecuencia, los datos de entrada binarios se combinan en grupos de dos bits llamados dibits. Cada código dibit genera cuatro fases de entrada. Tiene el doble de eficiencia en ancho de banda que BPSK. Tenemos el diagrama de constelación, en la Figura [III.4].

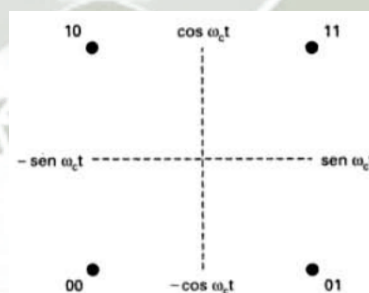


Figura [III.4] Diagrama de Constelación QPSK.<sup>32</sup>

**c) QAM (Modulación de Amplitud en Cuadratura):** Es una modulación digital en la que el mensaje está contenido tanto en la amplitud como en la fase

<sup>31</sup> Tomasi Wayne. “Sistemas de Comunicaciones Electrónicas”

<sup>32</sup> Tomasi Wayne. “Sistemas de Comunicaciones Electrónicas”

de la señal transmitida. Se basa en la transmisión de dos mensajes independientes por un único camino. Esto se consigue modulando una misma portadora, desfasada  $90^\circ$  entre uno y otro mensaje, lo que supone la formación de dos canales ortogonales en el mismo ancho de banda, con lo que se mejora en eficiencia de ancho de banda. Los transceptores utilizados en esta investigación modulan en 16QAM y 64QAM, conforme a la siguiente descripción:

**c.1) 16QAM (M=16):** Tiene tres amplitudes y doce fases. Maneja mejor el ruido debido a una gran relación de desplazamiento de fase a amplitud y produce una más eficiente transmisión en ancho de banda en comparación con otras modulaciones digitales, como BPSK o QPSK. Su diagrama de constelación puede visualizarse en la Figura [III.5].

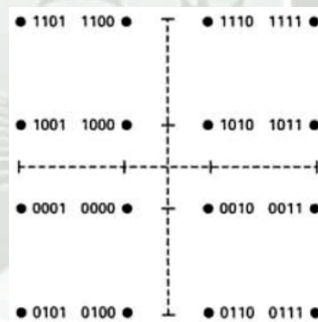


Figura [III.5] Diagrama de Constelación 16QAM.<sup>33</sup>

**c.2) 64QAM (M=64):** Tiene sesenta y cuatro estados y envía seis bits por símbolo. Esta modulación es muy eficiente en ancho de banda; sin embargo, al estar los símbolos muy cerca unos de otros, el sistema se vuelve muy sensible al ruido y a la distorsión, lo que hace que se deba transmitir con mayor potencia. En la Figura [III.6] tenemos el diagrama de constelación.

<sup>33</sup> Tomasi Wayne. “Sistemas de Comunicaciones Electrónicas”

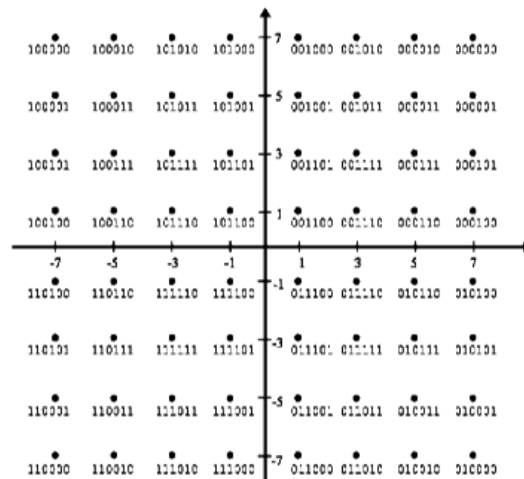


Figura [III.6] Diagrama de Constelación 64QAM.<sup>34</sup>

Finalmente, a manera de conclusión en esta parte, podemos señalar que se han determinado como variables encontradas para la evaluación del performance de un enlace microondas al “throughput”, al margen de desvanecimiento, a la corrección de errores (FEC), a la modulación y al “delay”, además de un factor, el cual es la instalación del enlace.

## 2. DETERMINACION DE ESCENARIOS

Se requiere determinar los escenarios donde se realizarán pruebas y mediciones, lo cual permitirá obtener los datos, necesarios y requeridos, que permitan cumplir con los objetivos de este trabajo de investigación.

### 2.1 DETERMINACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS ESCENARIOS

Se requiere colocar enlaces microondas con el objetivo de caracterizar el canal de comunicación de Arequipa metropolitana, la cual se encuentra dentro de un radio de 3km aproximadamente, teniéndose además como centro la Plaza Mayor de la

<sup>34</sup> <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/ads2004a/dtv/dtv0222.html>

ciudad (Fig. [III.7]). Para así evaluar el comportamiento de los enlaces microondas en la zona, buscando tener las peores condiciones por desvanecimientos.

Se ubicaron cinco puntos estratégicos (Fig. [III.7]) en las calles Jerusalén, Mercaderes y General Morán, así como en las avenidas “La Salle” y Cayma, en los cuales funciona una empresa de comunicaciones que dará las facilidades para realizar esta investigación.

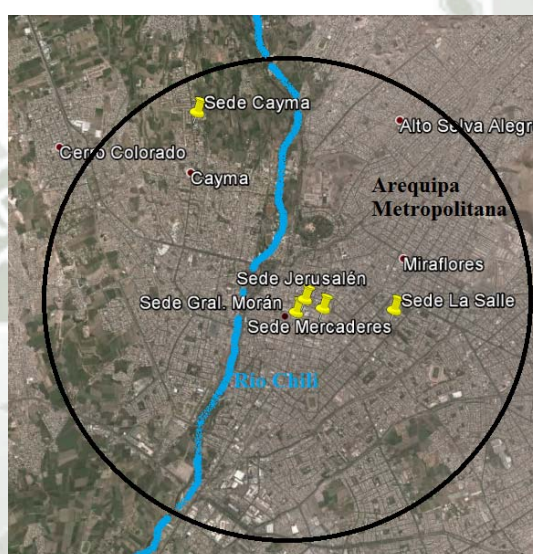


Figura [III.7] Ubicación de las Sedes.<sup>35</sup>

Se determinó realizar los enlaces microondas entre las diferentes sedes, como se puede observar en la Figura [III.8]. La sede de Cayma opera como estación central por tener mayor altura sobre el nivel del mar y obligando así, que todos los enlaces microondas crucen el río Chili donde hay una disminución de altura considerable, lo que significará tener mayores problemas de propagación, además los enlaces microondas cruzaran el espacio con esmog teniendo así problemas por desvanecimientos.

<sup>35</sup> Mapa de Google Earth

Figura [III.8] Arquitectura de los enlaces.<sup>36</sup>

## 2.2 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD

Se realiza un estudio de factibilidad para –valga la redundancia- evaluar la factibilidad de los enlaces microondas. Efectivamente, para que sean viables se necesita realizar tres estudios fundamentales (Fig. [III.9]) y que arrojen resultados positivos, siendo tales estudios, los siguientes:

- a) **Estudio Preliminar:** Los enlaces microondas se analizan y simulan con la ayuda de mapas topográficos -como el Google Earth- y simuladores de propagación -como el R-Planner y Radio Mobile- para así determinar las ubicaciones idóneas, las alturas requeridas, la distancia del enlace, la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE), el Indicador de Intensidad de la Señal de Recepción (RSSI) comúnmente conocido como nivel de recepción, el margen de desvanecimiento, las zonas de Fresnel y el “throughput” requerido. Y así se dimensionar el equipamiento físico.
- b) **Estudio Físico:** Se determinan las ubicaciones finales adecuadas para la colocación de los equipos de interior (IDU) y exterior (ODU) teniendo en cuenta

---

<sup>36</sup> Mapa de Google Earth.

la altura requerida por el estudio preliminar. Se precisan las ubicaciones de las fuentes de interferencia. Se establece asimismo la ubicación de un mástil, un brazo, una torre ventada de comunicación y una torre auto soportada, donde irá colocado el ODU.

- c) **Estudio de la Radio Frecuencia (RF):** El área de instalación debe ser escaneada por un analizador de espectro, para de esta forma identificar la interferencia de RF y determinar los canales libres para el enlace microondas, así como la factibilidad del mismo.



Figura [III.9] Proceso de Factibilidad del Enlace Microondas.

### 2.2.1 ESTUDIO PRELIMINAR

Antes de visitar posibles lugares de instalación, es necesario un estudio preliminar. A tanto detalle como sea posible, se debe obtener información de los dos sitios de instalación donde irán instalados los equipos ODU, así como la distancia entre ellos.

Para llevar a cabo dicho estudio preliminar es menester ejecutar las siguientes fases:

1. Usar instrumentos de simulación, como el R-Planner o Google Earth, y marcar los dos lugares designados -para la instalación- en el mapa topográfico.
2. Medir la distancia entre los lugares designados, para comprobar que se encuentren dentro del rango especificado de los equipos a emplear.

3. Buscar en el mapa urbano las áreas desarrolladas ubicadas entre los sitios de instalación, prestando atención a dichas áreas al realizar la inspección del lugar físico, pues pueden haber edificios altos, torres de RF o transmisores que causen interferencias al enlace, debiendo entonces tomar nota de los mismos para observarlos en la visita y evaluar si obstruyen o no la línea de vista.
4. Verificar asimismo en el área existente entre los dos sitios designados la eventual existencia de obstrucciones tales como:
  - a) Cerros, colinas o montañas.
  - b) Bosques, lagos o grandes cuerpos de agua. Sobre esto último, se destaca que el agua tiene un efecto de reflexión en las señales de RF, como si fuera un edificio. Este tipo de reflexión provoca que la amplitud recibida sea reducida. Como regla, la presencia de una gran masa de agua entre los sitios del enlace, puede duplicar el requerimiento de altura de la antena.
5. Determinar y registrar el azimut y la elevación con respecto al norte.
6. Si hay obstrucciones entre ambos sitios, es necesario calcular la Zona de Fresnel, usando al efecto el R-Planner y Google Earth; así como anotar la claridad, debiendo como mínimo pasar 0.6 de la primera zona de Fresnel y siendo lo óptimo tener 1.0 F1.
7. Si el sitio elegido no reúne los requisitos, entonces habrá que tener en cuenta otros sitios alternativos.
8. Usar el software de cálculos del fabricante de los ODU, para comprobar si el “throughput” requerido cumple con la performance esperada del equipo.

### **2.2.1.1 RESULTADOS DEL ESTUDIO PRELIMINAR**

Del estudio Preliminar de esta investigación obtenemos los siguientes resultados:

En la Figura [III.10] tenemos la topología de red que, como tal, comprende un enlace microondas Punto a Punto (PtP) entre las sedes de Cayma y "La Salle", así como tres enlaces microondas Punto Multipunto (PtM). Además, se tiene como Estación Base (HBS) a la mencionada sede Cayma y como suscriptores (HSU) a las sedes de General Morán, Jerusalén y Mercaderes.

El equipo de comunicación marca Radwin - modelo 5000, es la Estación Base (HBS) pero lamentablemente no permite la variación de dos variables elementales de nuestra investigación, cuales son el FEC y la modulación. Esto se debe a que lo realiza de manera automática y, por consiguiente, no permite ejecutarlo de forma manual. Atendiendo a estos inconvenientes, se cambió la topología de red, conforme se muestra en la Figura [III.11].

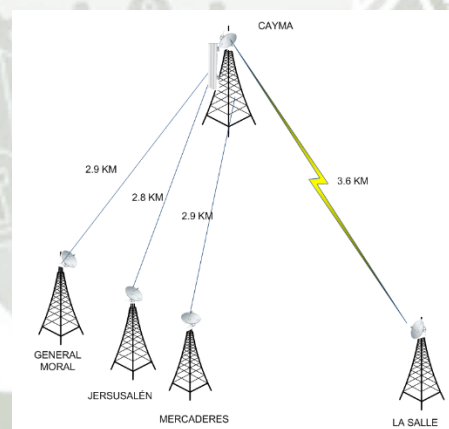


Figura [III.10] Topología PtM de Red A.

Según se observa en la Figura [III.11] tenemos la topología de red final que comprende cuatro enlaces Punto a Punto (PtP), siendo los siguientes: De la sede de Cayma hacia la sede de "La Salle"; de la sede de Cayma hacia la de General Morán; de la citada sede de Cayma hacia la de Jerusalén; y, finalmente, siempre de la acotada sede de Cayma hacia la sede de Mercaderes.

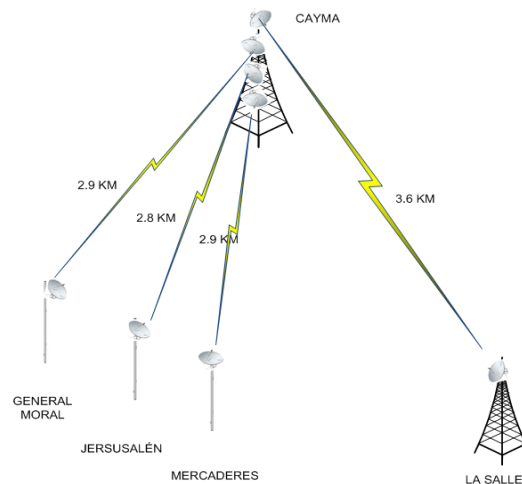


Figura [III.11] Topología PtP de Red B.

### Simulaciones con R-Planner:

El R-Planner es una herramienta de simulación de propiedad de la marca de equipos Radwin. En este trabajo de investigación se utiliza dicha herramienta para los fines propios de la simulación de los enlaces microondas. En la Figura [III.12] tenemos la topología de red ya simulada para obtener el mejor performance de los distintos enlaces microondas. Sobre dicha simulación se obtienen diferentes resultados, los que se muestran a continuación.

Se simularon cuatro enlaces microondas Punto a Punto (PtP) en forma independiente, siendo los siguientes: Sede de Cayma hacia la sede de “La Salle”; sede de Cayma hacia la de Jerusalén; sede de Cayma hacia la de General Morán; y siempre de la mencionada sede de Cayma hacia la sede de Mercaderes. El R-Planner será descrito con más detalle en las secciones y capítulos posteriores.

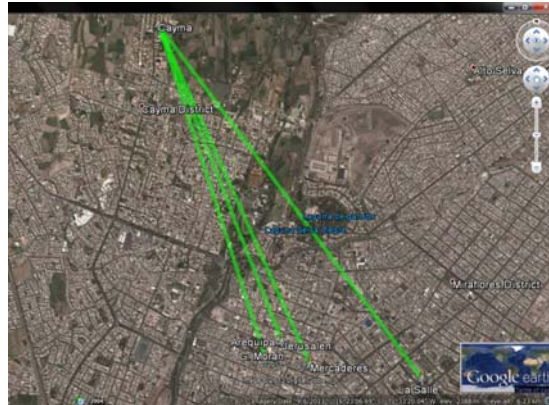


Figura [III.12] Topología creada con el simulador R-Planner.

En la tabla de resultados [III.1] observamos el nombre de las ubicaciones con sus respectivas coordenadas geográficas. Asimismo, la altura necesaria en cada una de las sedes, de manera que sea posible el enlace microondas.

Nombre del Sitio	Latitute	Longitute	Altura
Sede Cayma	-16.375598	-71.544293	18
Sede Jerusalén	-16.398504	-71.53492	15
Sede Mercaderes	-16.400118	-71.532828	18
Sede G. Moran	-16.399786	-71.536131	16
Sede “La Salle”	-16.400987	-71.524638	33

Tabla III.1] Ubicaciones propuestas.

La tabla [III.2] es un resumen de los cuatro enlaces microondas. En ella se aprecia la distancia entre ambas sedes a enlazarse, la cual es un parámetro fundamental ya que interviene en la determinación de la disponibilidad alcanzada, el tipo de antena y la ganancia requerida, el esquema de modulación que se puede alcanzar y el FEC que debe utilizarse, entre otros. También tenemos el ancho de banda de canal, siendo que en el presente caso, para alcanzar el “throughput” máximo, usamos asimismo el valor máximo de canal que es 20MHz. Igualmente, la polarización, en este caso dual, para alcanzar el citado “throughput” máximo.

Asimismo, el tipo de antena, el cual -para los efectos del enlace microondas de la sede de Cayma con la de “La Salle”- está dado por el empleo de antenas parabólicas externas a fin de mejorar la recepción, esto debido a la distancia; mientras que tratándose de los demás enlaces, se utilizan antenas integradas. También se calcula la frecuencia de operación, de forma tal que no se interfiera con los demás equipos de comunicación colocados en la misma torre de comunicación, proponiéndose finalmente el equipo Radwin 2000B, pues el mismo cumple con entregar 50Mbps de “throughput” agregado, el cual se puede lograr bajo condiciones sin interferencias.

Parámetro	Sede Cayma hacia			
	Sede La Salle	Sede Jerusalén	Sede Gral. Morán	Sede Mercaderes
<b>Distancia</b>	3.516 Km	2.737 Km	2.828 Km	2.989 Km
<b>Ancho de Canal</b>	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz
<b>Polarización</b>	Dual	Dual	Dual	Dual
<b>Antena</b>	Externa	Integrada	Integrada	Integrada
<b>Velocidad de Bit Máxima</b>	130 Mbps	78 Mbps	78 Mbps	78 Mbps
<b>Modulación – FEC Máximo</b>	64QAM – 5/6	16 QAM 3/4	16 QAM 3/4	16 QAM 3/4
<b>Disponibilidad</b>	100%	99.9996%	99.9995%	99.9997%
<b>Frecuencia</b>	5.855 GHz	5.735 GHz	5.765 GHz	5.790 GHz
<b>Equipo</b>	Radwin 2000B	Radwin 2000B	Radwin 2000B	Radwin 2000B
<b>“Throughput”</b>	50 Mbps Agregado	50 Mbps Agregado	50 Mbps Agregado	50 Mbps Agregado

Tabla [III.2] Resumen de Parámetros.

El Simulador R-Planner también nos entrega un Diagrama de Perfil, el cual es graficado como distancia [km] versus altura [m]. El diagrama nos muestra los dos puntos a enlazar en ambos extremos y la altura a la que éstos se encuentran sobre el suelo, de tal manera que se pueda tener total línea de vista.

La línea marrón es la curvatura de la Tierra por encima de la cual atraviesa el enlace. La línea verde, es el haz que nos permite tener línea de vista (LOS). Las líneas azules punteadas y celestes, por su parte, representan 0.6 y 1 de Fresnel, respectivamente. Por lo demás, en la parte superior se muestra que, para que un enlace con línea de vista sea exitoso, la claridad como mínimo es de 0.6 F1.

Se tienen cuatro Diagramas de Perfil para los cuatro enlaces microondas, según se puede observar en la Figura [III.13]

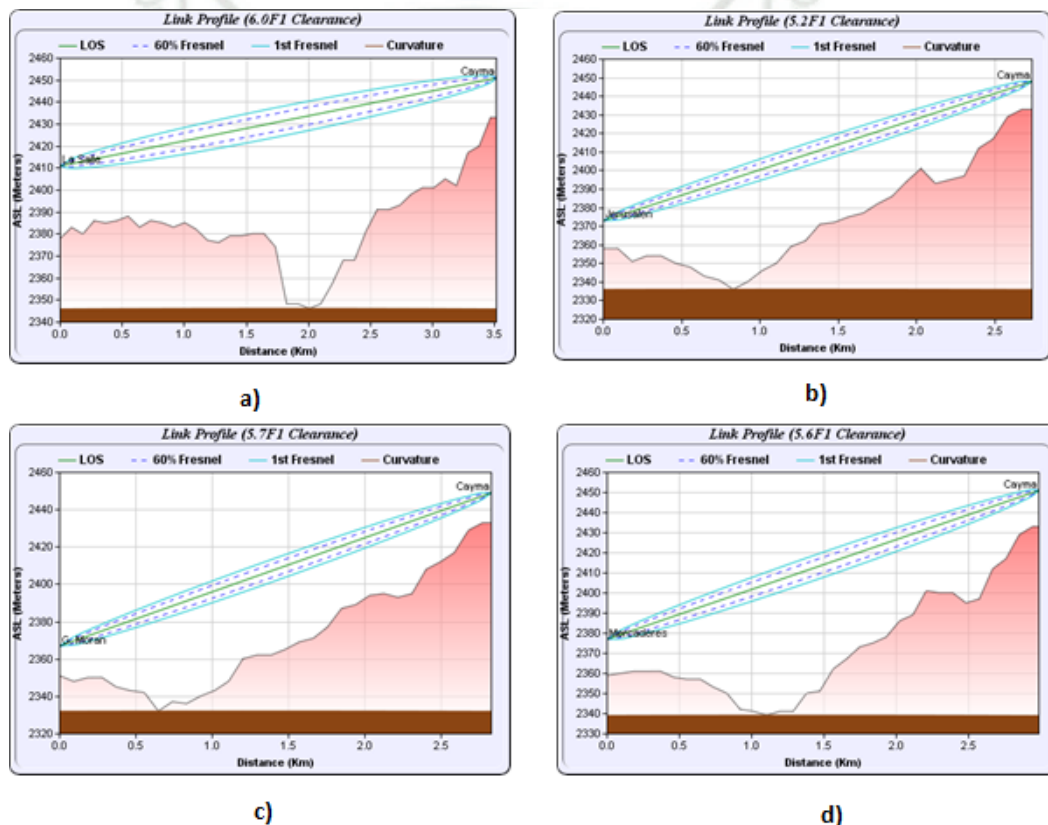


Figura [III.13] Diagramas del Perfil a) Enlace sede Cayma – sede “La Salle”, b) Enlace sede Cayma – sede Jerusalén , c) Enlace sede Cayma – sede Gral. Morán. d) Enlace sede Cayma – sede Mercaderes. <sup>37</sup>

Finalmente, del R-Planner también podemos obtener las Tablas [III.3, III.4, III.5, III.6] en las cuales se tienen: La altura de cada sitio sobre el nivel del mar; la

<sup>37</sup> Perfil creado por R-Planner

altura en la que se encontrará el equipo de enlace microondas sobre la torre/mástil; la banda utilizada que, en este caso, es la banda libre de 5.8 GHz; la ganancia de la antena seleccionada en el cálculo de simulación, ya sea externa o integrada; la potencia de transmisión; el PIRE que, por regulación del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, debe ser como máximo de 36dBm; asimismo, el RSSI que debe lograrse en la implementación para alcanzar el “throughput” simulado; el margen de desvanecimiento, siendo que -como mínimo- se debe utilizar 6dB; y, por último, también nos da el azimut y la elevación para los efectos de la correcta alineación del enlace.

<i>Propiedades</i>	<i>“La Salle”</i>	<i>Cayma</i>
Altura m.s.n.m.	2411 m	2451 m
Altura de la Antena	33 m	18 m
Banda Utilizada	5.8 GHz	5.8 GHz
Antena	28.5 dBi Externa	28.5 dBi Externa
Potencia de TX	6 dBm	6 dBm
PIRE	36 dBm	36 dBm
RSSI	-58.7 dBm	-58.7 dBm
Margen de Desvanecimiento	8.3 dB	8.3 dB
Azimut	323.4°	143.4°
Elevación	0.7°	-0.7°

Tabla [III.3] Propiedades del enlace microondas sede Cayma – sede “La Salle”

<i>Propiedades</i>	<i>Jerusalén</i>	<i>Cayma</i>
Altura m.s.n.m.	2370 m	2448 m
Altura de la Antena	12 m	15 m
Banda Utilizada	5.8 GHz	5.8 GHz
Antena	15 dBi Integrada	15 dBi Integrada
Potencia de TX	18 dBm	18 dBm
PIRE	36 dBm	36 dBm
RSSI	-70.5 dBm	-70.5 dBm
Margen de Desvanecimiento	6.5 dB	6.5 dB

Azimut	338.6°	158.6°
Elevación	1.6°	-1.6°

Tabla [III.4] Propiedades del enlace microondas sede Cayma – sede Jerusalén

<i>Propiedades</i>	<i>Gral. Moran</i>	<i>Cayma</i>
Altura m.s.n.m.	2363 m	2449 m
Altura de la Antena	12 m	16 m
Banda Utilizada	5.8 GHz	5.8 GHz
Antena	15 dBi Integrada	15 dBi Integrada
Potencia de TX	18 dBm	18 dBm
PIRE	36 dBm	36 dBm
RSSI	-70.8 dBm	-70.8 dBm
Margen de Desvanecimiento	6.2 dB	6.2 dB
Azimut	342.1°	162.1°
Elevación	1.7°	-1.7°

Tabla [III.5] Propiedades del enlace microondas sede Cayma – Gral. Morán

<i>Propiedades</i>	<i>Mercaderes</i>	<i>Cayma</i>
Altura m.s.n.m.	2370 m	2451 m
Altura de la Antena	12 m	16 m
Banda Utilizada	5.8 GHz	5.8 GHz
Antena	15 dBi Integrada	15 dBi Integrada
Potencia de TX	18 dBm	18 dBm
PIRE	36 dBm	36 dBm
RSSI	-68.2 dBm	-68.2 dBm
Margen de Desvanecimiento	8.8 dB	8.8 dB
Azimut	335.8°	155.8°
Elevación	1.4°	-1.4°

Tabla [III.6] Propiedades del enlace microondas sede Cayma – sede Mercaderes

### 2.2.2 ESTUDIO FÍSICO

En el estudio físico se examina el entorno del lugar de instalación propuesto, de forma que se pueda garantizar que los sitios del enlace sean adecuados para la red

inalámbrica. Los resultados del respectivo estudio físico deben ser fotografiados y guardados.

Para llevar a cabo el proceso propio del estudio físico, es necesario poner en práctica las siguientes fases:

1. En base a las lecturas de azimut de R-Planner y Google Earth tomadas en el estudio preliminar, se busca la dirección donde se encuentre el ODU remoto.
2. Usando unos binoculares, se buscan asimismo posibles obstrucciones, tales como árboles, edificios altos, colinas, montañas u otras torres de radiofrecuencia entre los dos sitios seleccionados. De ser el caso, marcar en el mapa las ubicaciones de tales obstrucciones.
3. Determinar la ubicación del ODU (Teniendo en cuenta la instalación sobre mástiles, brazos, torres ventadas, torres auto soportadas, entre otros). Considerando la zona de Fresnel, se debe estar por encima de cualquier obstrucción.
4. Si es necesario instalar el ODU en una torre, corresponde asegurar que la misma esté bastante alejada de las líneas eléctricas aéreas que puedan existir.
5. Determinar la ubicación para el equipamiento interior e IDU. Éste debe estar lo más cerca posible del ODU. En un sitio existente, es probable que haya una sala de equipos con una ruta de canales por donde pase el cable.

Nota: El límite de longitud de cable del IDU-ODU es de 100m, de conformidad con la interfaz 10/100BaseT.

6. Medir y registrar la longitud de la trayectoria del cable, desde la posición del ODU y hasta el cuarto de equipos interior.

7. Determinar la ubicación del pozo a tierra, así como los puntos de conexión eléctricas de la instalación. El ODU y el IDU han de estar necesariamente conectados a tierra.
8. Utilizando un telurómetro (Equipo que mide el pozo a tierra) medir y registrar la resistencia, debiendo ser esta última inferior a 10 ohmios.
9. Indagar sobre las temperaturas y humedad máximas y mínimas del sitio, así como también la cantidad de polvo. Con estos datos podremos escoger el equipo adecuado (IP55 – IP66).
10. Revisar los resultados de las fases anteriores para decidir si el sitio es o no adecuado para los fines propios de la instalación de la red inalámbrica.

#### **2.2.2.1 RESULTADOS DEL ESTUDIO FÍSICO**

Del estudio Físico de esta investigación obtenemos los siguientes resultados:

Luego de tener las ubicaciones simuladas gracias al estudio preliminar practicado, se procede a realizar el correspondiente estudio físico. Para ello, se visitaron las cuatro posibles ubicaciones y se determinaron:

- a) Obstrucciones físicas.
- b) Fuentes de interferencia electromagnética.
- c) Ubicación de los equipos de comunicación.

##### **a) Obstrucciones Físicas:**

Dentro de las obstrucciones físicas tenemos en cuenta las correspondientes al terreno y la naturaleza, como son las colinas, montañas, árboles -entre otros- así como las obstrucciones humanas, cual es el caso de los edificios, paneles publicitarios y demás semejantes. Estas obstrucciones muchas veces no son

detectadas por las herramientas de simulación, por lo que entonces deben ser identificadas e ingresadas manualmente. Las herramientas de simulación empleadas en este trabajo de investigación para ubicar dichas obstrucciones y determinar si impiden o no la línea de vista (LOS) son: El R-Planner y el Google Earth. De otro lado, es de resaltar que el respectivo procedimiento para determinar si impiden o no la viabilidad del enlace, será descrito con detalle en el Capítulo IV.

Citando la Tabla [III.1] de ubicaciones propuestas, podemos delimitar las alturas máximas de las sedes.

Se detectaron obstrucciones en las cuatro sedes, conforme se aprecia en la Tabla [III.7]. Tales obstrucciones pueden o no afectar a la viabilidad del enlace microondas. Así:

Sede más cercana a la obstrucción	Obstrucción	¿Afecta la viabilidad del Enlace Microondas?
<b>Cayma</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Edificio de 18m de Altura</li> </ul>	NO
<b>“La Salle”</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Seguro Social de Arequipa de 20m de Altura</li> </ul>	NO
<b>Jerusalén</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hotel Crismar de 16m de Altura</li> </ul>	NO
<b>Gral. Morán</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Portal de Flores</li> <li>Catedral de Arequipa</li> </ul>	NO
<b>Mercaderes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Edificio de 13m de Altura</li> </ul>	SI

Tabla [III.7] Obstrucciones en las diferentes sedes

Para sortear la obstrucción de la sede de Cayma (Fig. [III.14]) se determinó la conveniencia de mover la torre de comunicación (Propuesta en la simulación) que albergará los ODUs, de forma que se evite así perder la línea de vista (LOS).



Figura [III.14], Obstrucción sede Cayma.<sup>38</sup>

Para establecer si las obstrucciones de las sedes “La Salle” (Fig. [III.15 a]) y Gral. Morán (Fig. [III.15 b]) afectan al enlace microondas, se utilizó la función “perfil de elevación” de Google Earth. De esta forma se determinó que 0.6F1 pasaba por encima de las obstrucciones en mención, no afectando consecuentemente al enlace microondas.

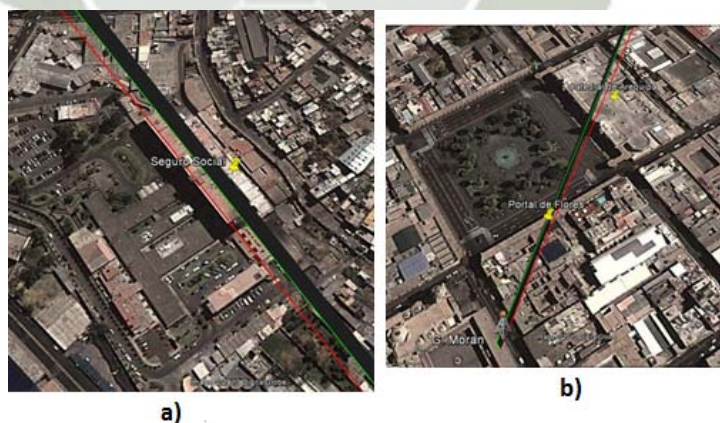


Figura [III.15] a) Obstrucción sede “La Salle”, b) Obstrucciones sede General Morán.<sup>38</sup>

<sup>38</sup> Mapa de Google Earth.

De otro lado, para determinar si la obstrucción de la sede de Jerusalén (Fig. [III.16]) afecta al enlace microondas, se emplearon las funciones “extrude/include” del R-Planner (Herramienta que permite sombrear el área desde el haz hasta el terreno en la ruta del enlace) y "street view" de Google Earth. Así se determinó que 0.6F1 pasaba por un costado de la obstrucción, no comprometiendo consecuentemente el enlace microondas.



Figura [III.16], Obstrucción Hotel Crismar<sup>39</sup>

De acuerdo al estudio preliminar, en la sede de Mercaderes (Fig. [III.17 a]) se requiere colocar el ODU a una altura de 12m, a fin de lograr una comunicación entre aquella (Mercaderes) y Cayma. Tras efectuar el estudio físico, se estableció la no viabilidad del enlace, por no poder sortearse la obstrucción consistente en un edificio de 13m de altura (Ver Fig. [III.17 b]). Es de resaltar, en este punto, que tampoco pudo conseguirse el permiso del propietario de dicho inmueble ni de la respectiva Municipalidad para los efectos de colocar una torre ventada y así lograr superar la obstrucción, motivo por el cual se opta entonces por utilizar una conexión por internet.

---

<sup>39</sup> Mapa de Google Earth.

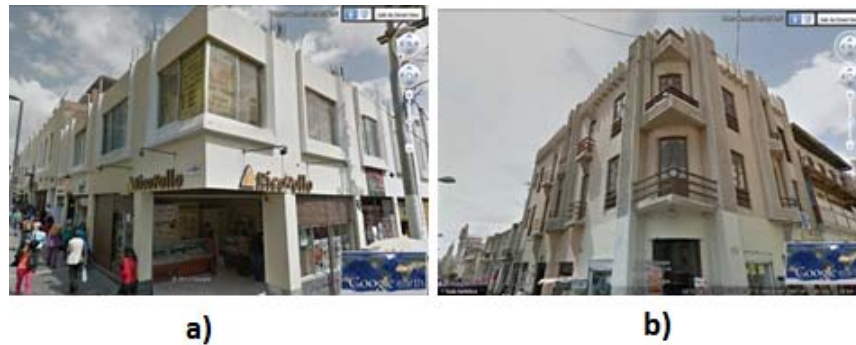


Figura [III.17] a) Ubicación sede Mercaderes b) Obstrucción sede Mercaderes.

Se intentó enlazar la sede de Mercaderes utilizando las otras tres sedes como repetidores, sin igualmente tenerse éxito con ninguna de aquéllas por encontrarse obstrucciones, conforme al siguiente detalle:

- i) En el enlace microondas de las sedes Mercaderes – Jerusalén: Obstrucción consistente en un edificio de 18m correspondiente a la empresa Estilos (Ver Figura [III.18 a]).
- ii) En el enlace microondas de las sedes Mercaderes - General Morán: Obstrucción dada por un edificio de 17m de la RENIEC (Figura [III.18 b]).
- iii) En el enlace microondas de las sedes Mercaderes – “La Salle”: Obstrucción por un edificio de 24m de la Clínica AUNA (Figura [III.18 c]).

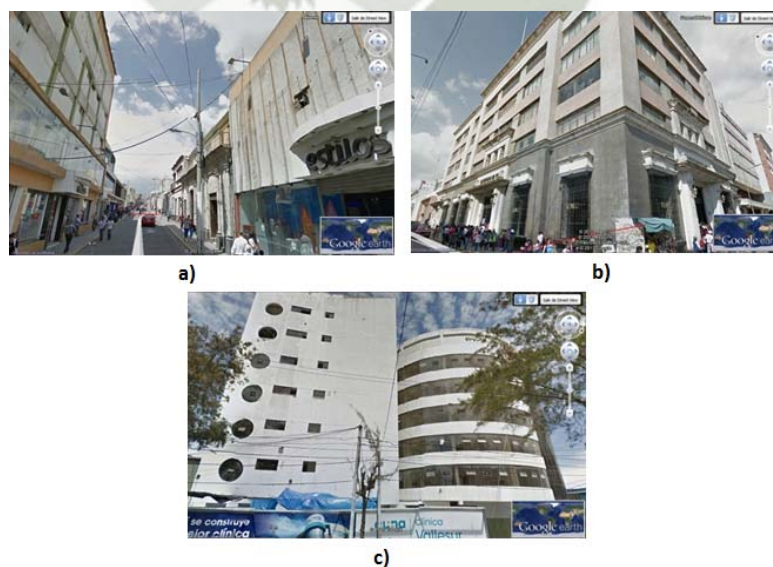


Figura [III.18] Obstrucción con a) sede Jerusalén, b) sede Gral. Morán, c) sede “La Salle”.

**b) Fuentes de Interferencia Electromagnética:**

Luego de realizar el estudio del sitio, se ubicaron ciertas fuentes de interferencia consistentes básicamente en torres de comunicación (Donde se encuentran más de dos equipos microondas), torres troncales de seguridad ciudadana y estaciones base celular visibles, mas no las mimetizadas. No se marcaron mástiles o torres de un solo equipo microondas, así como tampoco los puntos de las cámaras de seguridad ciudadana, observándose que cada una de dichas cámaras cuenta con equipo microondas.

En la Tabla [III.8] tenemos las fuentes de interferencia en las sedes de Cayma, “La Salle” y Jerusalén/General Morán. De dichas fuentes detectadas, las más perjudiciales son las torres de comunicación de seguridad ciudadana, pues en ellas se encuentran hasta diez equipos microondas por cada una, que enlazan las diferentes cámaras dentro de los distritos.

Sede	Fuentes de Interferencia
Cayma	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Torres de Comunicación                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Hospital de Policía</li> <li>○ Subida de Cayma</li> <li>○ Municipalidad de Yanahuara</li> </ul> </li> <li>• BTS detrás del hospital de Policía</li> <li>• Torres de Comunicaciones para Seguridad Ciudadana                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Comisaria de Cayma</li> <li>○ Estadio de Cayma</li> </ul> </li> </ul>
“La Salle”	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Torres de Comunicaciones                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Panamericana Televisión</li> <li>○ Universidad Nacional de San Agustín (UNSA)</li> </ul> </li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Calle San José</li> <li>○ Edificio Héroes Anónimos</li> <li>● BTSs             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Centro Comercial Siglo XX</li> <li>○ Calle Santa Marta</li> <li>○ Calle Paucarpata</li> </ul> </li> <li>● Torres de Seguridad Ciudadana             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Seguro Social</li> <li>○ Municipalidad de Arequipa</li> </ul> </li> </ul>
<p><b>Jerusalén y Gral. Morán</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Torres de Comunicaciones:             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Caja Arequipa</li> <li>○ Banco de Crédito</li> <li>○ Estilos</li> <li>○ San José</li> <li>○ Estilos</li> <li>○ SUNAT</li> <li>○ Caja Nuestra Gente</li> <li>○ Hotel Crismar</li> <li>○ La Positiva</li> <li>○ SUNARP</li> </ul> </li> <li>● BTSs:             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Edificio Arequipa</li> <li>○ Plaza de Armas</li> <li>○ Calle General Moran</li> <li>○ Calle Ugarte</li> <li>○ Calle Santo Domingo</li> <li>○ Calle Santa Marta</li> </ul> </li> </ul> <p>Torre de Seguridad Ciudadana Plaza de Armas</p>

Tabla [III.8] Fuentes de Interferencia en las sedes de Cayma, “La Salle”, Jerusalén y Gral. Morán

En las Figuras [III.19, III.20 y III.21] están graficadas las fuentes de interferencia identificadas para las sedes de Cayma, "La Salle" y Jerusalén/General Morán, respectivamente.

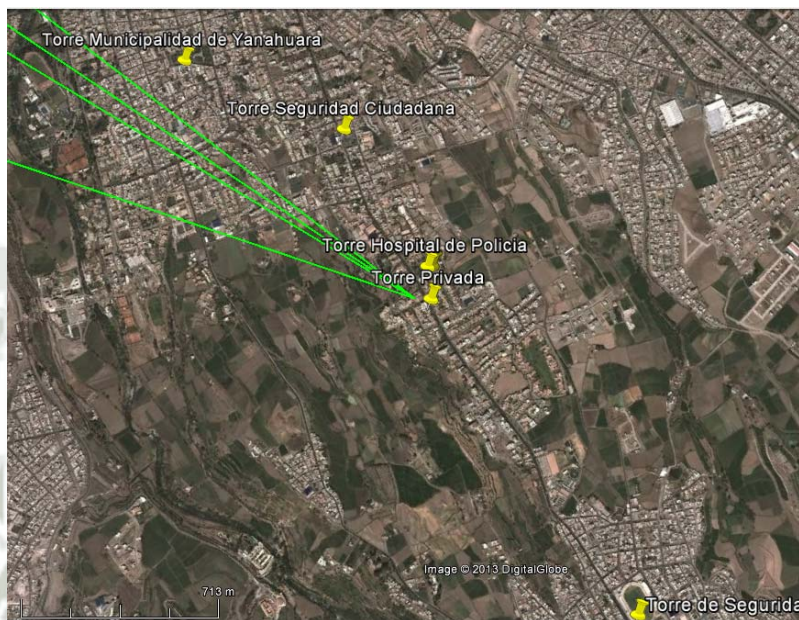


Figura [III.19] Fuentes de interferencia sede Cayma.<sup>40</sup>

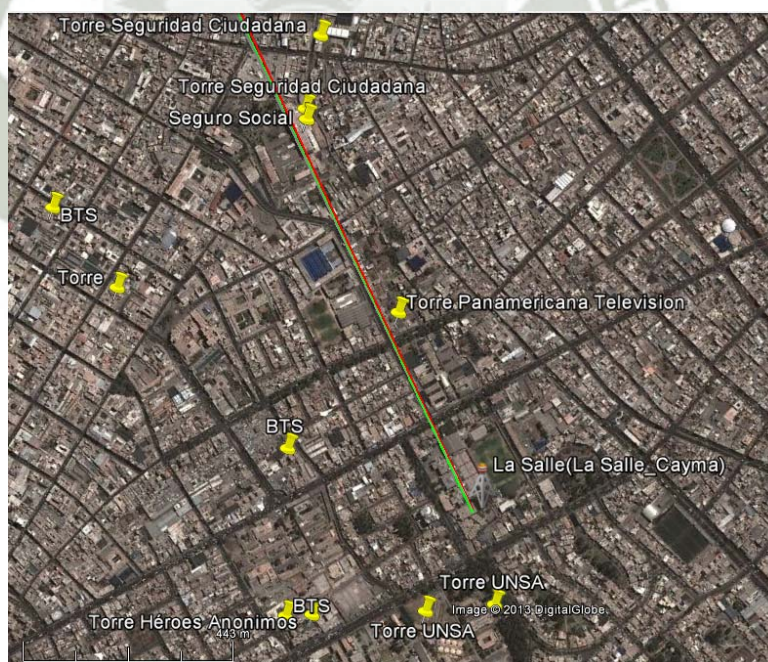


Figura [III.20] Fuentes de interferencia sede "La Salle".<sup>40</sup>

<sup>40</sup> Mapa de Google Earth.



Figura [III.21] Fuentes de interferencias sedes Jerusalén y Gral. Morán.<sup>41</sup>

**c) Ubicación de los Equipos de Comunicación (ODU):**

Luego de realizar la visita a los lugares de instalación, identificar obstrucciones y determinar las fuentes de interferencias, se establecieron las ubicaciones más óptimas para los ODU, en las sedes de Cayma (Fig. [III.22 a]), “La Salle” (Fig. [III.22 b]), Jerusalén (Fig. [III.22 c]) y Gral. Morán (Fig. [III.22 d]). Asimismo, se definió la colocación de mástiles o torres ventadas de comunicación. Podemos observar un resumen en la Tabla [III.9]:

<i>Sede</i>	<b>Mástil de Comunicación</b>	<b>Torre Ventada de Comunicación</b>
<i>Cayma</i>	X	12m
<i>“La Salle”</i>	X	30m
<i>Jerusalén</i>	3m	X
<i>Gral. Morán</i>	3m	X

Tabla [III.9] Resumen mástil o torres de comunicación

<sup>41</sup> Mapa de Google Earth.

Como vemos en dicha Tabla [III.9] se cumple con la Ordenanza Municipal, relativa a la altura máxima permitida para las torres/mástiles de comunicaciones a instalarse en el centro histórico de la ciudad de Arequipa.



Figura [III.22] Ubicación sedes a) Cayma, b) “La Salle”, c) Gral. Morán, d) Jerusalén.

### 2.2.3 ESTUDIO DE RADIO FRECUENCIA

El estudio de radiofrecuencia (RF) examina el entorno de radiofrecuencia inalámbrica en el sitio, para así determinar si existen canales disponibles dentro de la respectiva banda de operación. Para la realización de dicho estudio se emplea un analizador de espectro.

De otro lado, se debe efectuar el citado estudio de RF en los dos sitios propuestos para cada enlace, y además durante un tiempo muy ocupado del día, esto último para juzgar el peor escenario de las interferencias de radio.

Nota: Es posible instalar el enlace y usar el software del fabricante para encontrar el canal libre. Cada canal de frecuencia debe ser evaluado por turnos. La obtención del citado canal libre es indicado por el marcador de calidad, en la ventana de

canal de cada software de fabricante. Sin embargo, no todos los equipos cuentan con un analizador de espectros, razón por la cual es mejor tener un analizador de espectro portátil.

En ésta investigación se realizó un análisis de espectro utilizando un analizador de espectro portátil marca Aaronia, así como el respectivo analizador de espectro integrado en el equipo (ODU).

Las interferencias pueden tener las siguientes causas:

- a) Interferencias de transmisores de radiofrecuencia colocados por uno mismo en la misma torre de comunicación.
- b) Otros dispositivos de radiofrecuencia instalados en el mismo medio.

Para evitar o, en todo caso, minimizar las interferencias, se deben seguir las recomendaciones que a continuación se detallan:

1. Para varias unidades de radiofrecuencia (ODU) ubicadas en una misma torre de comunicación, se debe utilizar la sincronización, resaltándose al efecto que cada fabricante cuenta con una solución.
2. Si una o más unidades no son del mismo fabricante o de otro servicio (Como antenas de celulares, radio troncalizado, etc.) asegurarnos entonces que haya una separación física de, al menos, tres metros entre cada unidad de radioenlace colocada en el sitio. Esto también nos servirá para ubicar la altura donde se instalará la antena.
3. Usar el mayor intervalo de frecuencia posible entre estas unidades.
4. Elegir los mejores canales de frecuencia (Tan libre como sea posible de la interferencia).

5. La disminución de la potencia de transmisión de un enlace reducirá, a su vez, la interferencia en los enlaces colocados en la misma torre.

### 2.2.3.1 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE RADIO FRECUENCIA

Del Estudio de Radio Frecuencia de esta investigación obtenemos los siguientes resultados:

Se llevó a cabo un análisis de espectro utilizando un analizador portátil de la marca Aaronia modelo HF-6065, que se muestra en la siguiente Figura [III.23]:



Figura [III.23] Analizador de espectro portátil.<sup>42</sup>

El gráfico de análisis de espectro radioeléctrico nos muestra el nivel de interferencia versus frecuencia. Donde la frecuencia expresada en MHz, en la banda no licenciada de 5.8 GHz, la cual va de 5725 a 5850 MHz. El nivel de interferencia esta graficado desde -120 a -30 dBm.

La medición del espectro radioeléctrico se realizó en polarización, tanto horizontal como vertical.

Se efectuó el análisis de espectro para los enlaces microondas en todas las sedes como, por ejemplo, se muestra en la Figura [III.24] la cual es, la pantalla obtenida del respectivo analizador marca Aaronia, ello respecto de la sede de “La Salle”, observamos que: La línea verde corresponde a la última medición del nivel de

<sup>42</sup> <http://www.aaronia.es/productos/analizadores-de-espectro/Paquete-de-inicio/>

interferencias; la amarilla, al promedio de las mediciones; y, finalmente, la roja, a los máximos niveles de interferencia hallados.



Figura [III.24] Análisis de espectro en la sede “La Salle”.

Para analizar los resultados del estudio de radiofrecuencia es menester poder interpretar los resultados del mismo y para ello es necesario, asimismo, conocer los rangos de nivel de interferencia. Así:

- a) En el rango de -120 dBm a -80 dBm → Nivel de interferencia baja
- b) En el rango de -80 dBm a -70 dBm → Nivel de interferencia media
- c) En el rango de -70 dBm a -30 dBm → Nivel de interferencia alta

#### Asignación de Canales:

Analizando los resultados y buscando los canales con el menor nivel de interferencia, se determinaron las frecuencias de operación para cada enlace microondas, como se muestra en la Tabla [III.10].

<i>Enlace Microondas</i>	<i>Frecuencia de Operación</i>
<i>Sede Cayma – Sede “La Salle”</i>	5755 MHz
<i>Sede Cayma – Sede Jerusalén</i>	5735 MHz
<i>Sede Cayma – Sede Gral. Moran</i>	5735 MHz

Tabla [III.10] Distribución de frecuencias de operación

### 3. DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS

A fin de realizar las mediciones, se usaron los transeptores de los equipos de radio enlace marca Radwin - modelo 2000B. El monitoreo y registro de dichas mediciones se ejecutó empleando el software SNMPC del fabricante Castle Rock, alojado en un servidor HP Proliant DL-160. Y, finalmente, para la generación de tráfico en el radioenlace, una cámara IP de alta definición (HD) de la marca Sony - modelo SNC-CH110.

Los equipos de radio enlace de la marca Radwin permiten modificar la velocidad de bits, variando el ancho de banda (BW) del canal, la modulación, el FEC y la potencia máxima de transmisión, como podemos observar en la Tabla [III.11].

<b>Velocidad de Bit [Mbps] – BW Canal 20MHz</b>	26	39	52	78	104	117	130
<b>Velocidad de Bit [Mbps]– BW Canal 10MHz</b>	13	19.5	26	39	52	58.5	65
<b>Velocidad de Bit [Mbps]– BW Canal 5MHz</b>	6.5	9.75	13	19.5	26	29.25	32.5
<b>Modulación</b>	<b>QPSK</b>		<b>16 QAM</b>		<b>64 QAM</b>		
<b>FEC</b>	<b>1/2</b>	<b>3/4</b>	<b>1/2</b>	<b>3/4</b>	<b>2/3</b>	<b>3/4</b>	<b>5/6</b>
<b>Potencia Máxima de Transmisión [dBm]</b>	25		24	21	19	18	

Tabla [III.11] Velocidad de bit disponibles en el equipo Radwin 2000B

Para obtener la velocidad de bit deseada, se requiere que los equipos cumplan con la sensibilidad mínima requerida, hallándose detallada ésta en la Tabla [III.12].

Así:

<b>Velocidad de Bit [Mbps]</b>	26	39	52	78	104	117	130
<b>– BW Canal 20MHz</b>							
<b>Sensibilidad [dBm]</b>	-86	-83	-81	-77	-72	-70	-67
<b>Velocidad de Bit [Mbps]</b>	13	19.5	26	39	52	58.5	65
<b>– BW Canal 10MHz</b>							
<b>Sensibilidad [dBm]</b>	-89	-86	-84	-80	-75	-73	-70
<b>Velocidad de Bit [Mbps]</b>	6.5	9.75	13	19.5	26	29.25	32.5
<b>– BW Canal 5MHz</b>							
<b>Sensibilidad [dBm]</b>	-92	-89	-87	-83	-78	-76	-73

Tabla [III.12] Sensibilidad mínima por velocidad de bit.

Tratándose de la generación de tráfico en el enlace microondas, se empleó una cámara IP HD. Ciertamente, ésta fue la encargada de la mencionada generación de tráfico proporcional a la velocidad de bit configurada en el equipo por cada medición, todo con el objetivo de emular un ambiente de tráfico en el enlace microondas. En la Tabla [III.13] se aprecia el flujo de datos (streaming) producido para cada velocidad de bit.

MOD.	FEC	CANAL 20 MHz		CANAL 10 MHz		CANAL 5MHz	
		Velocidad de Bit [Mbps]	Tráfico [Kbps]	Velocidad de Bit [Mbps]	Tráfico [Kbps]	Velocidad de Bit [Mbps]	Tráfico [Kbps]
QPSK	0.5	26	1638.4	13	819.2	6.5	409.6
QPSK	0.75	39	2457.6	19.5	1228.8	9.75	614.4
16QAM	0.5	52	3276.8	26	1638.4	13	819.2
16QAM	0.75	78	4915.2	39	2457.6	19.5	1228.8
64QAM	0.66	104	6553.6	52	3276.8	26	1638.4
64QAM	0.75	117	7372.8	58.5	3686.4	29.25	1843.2
64QAM	0.83	130	8192	65	4096	32.5	2048
Adaptativa		Adaptativa	8192	Adaptativa	4096	Adaptativa	2048

Tabla [III.13] Tráfico generado según la velocidad de bit

Adicionalmente, antes de efectuar cada medición por velocidad de bit, se realiza un análisis de espectro con una duración de 240s, empleando al efecto el analizador de espectro integrado por hardware en el ODU de Radwin.

Se determinan tres escenarios, detallados a continuación:

- a) Escenario 1: Enlace microondas sede Cayma – sede “La Salle”
- b) Escenario 2: Enlace microondas sede Cayma – sede Jerusalén
- c) Escenario 3: Enlace microondas sede Cayma – sede Gral. Morán

Cada escenario fue medido independientemente, encontrándose encendidos únicamente los equipos correspondientes al escenario que está siendo medido, evitándose de esta manera interferencias producidas por antenas colocadas en la misma torre (collocated interference).

### 3.1 ESCENARIO 1

Este escenario se lleva a cabo en el enlace microondas entre las sedes de Cayma y “La Salle”, teniendo el siguiente equipamiento (Tabla [III.14]).

<b>Equipos</b>	Radwin 2000B
<b>Antenas</b>	Externa de 28.5 dBi
<b>Altura Antena Sede Cayma</b>	18m
<b>Altura Antena Sede “La Salle”</b>	33m

Tabla [III.14] Equipamiento enlace microondas sede Cayma – sede “La Salle”

La topología de red de este escenario está detallada en la Figura [III.25] en la que se observan las antenas parabólicas, los ODU Radwin 2000B, un servidor para el almacenamiento de las mediciones, una cámara IP HD para la generación de tráfico, un monitor destinado a la visualización de la cámara, y un switch donde se concentran los enlaces microondas.

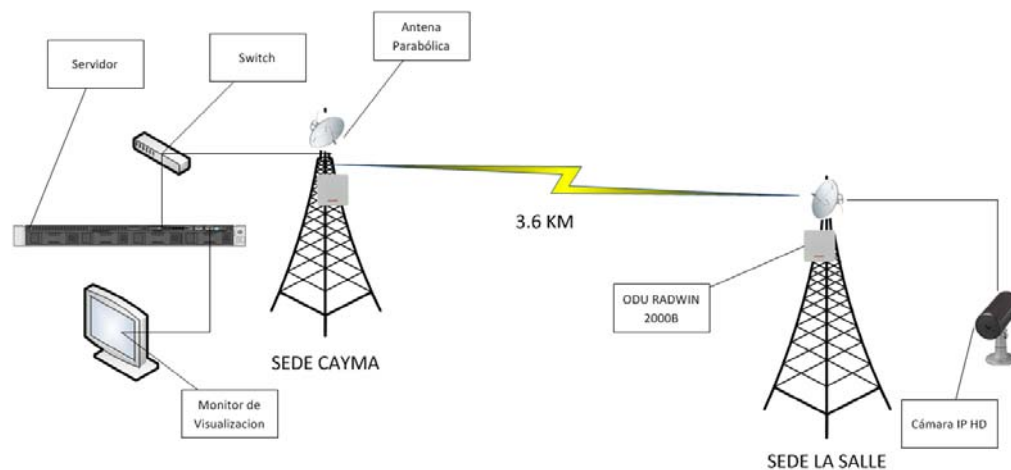


Figura [III.25] Diagrama de conexiones Escenario 1.

Según las normas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, el PIRE debe ser como máximo 36dBm. En este escenario es que se realizan mediciones, teniendo en cuenta un PIRE = 36 dBm y el PIRE = 39dBm.

Para los fines propios del monitoreo y almacenamiento -de los datos entregados por los transceptores microondas-, se recurrió al uso del software SNMPc. Se almacenaron así los datos medidos de “throughput” y RSSI con 500 muestras cada uno por velocidad de bit.

Con el objeto de medir el “delay”, se enviaron paquetes ICMP entre el servidor y el equipo de radioenlace remoto. De otro lado, se obtuvieron igualmente 500 muestras por cada velocidad de bit.

Con los dos valores de PIRE, se efectúan mediciones modificando todas las velocidades de bit -con los diferentes canales de comunicación-, permitidas por los equipos de radioenlace según las simulaciones. Esto se puede observar en la Tabla [III.15] la misma que muestra las citadas velocidades posibles para un ancho

de banda de canal de 5,10 y 20 MHz (De acuerdo a la simulación). En total se deben realizar cuarenta y ocho mediciones con las diferentes velocidades de bit.

BW Canal	PIRE 36 dBm			PIRE 39 dBm		
	5MHz	10MHz	20MHz	5MHz	10MHz	20MHz
Velocidad de Bit	6.5	13	26	6.5	13	26
	9.75	19.5	39	9.75	19.5	39
	13	26	52	13	26	52
	19.5	39	78	19.5	39	78
	26	52	104	26	52	104
	29.25	58.5	117	29.25	58.5	117
	32.5	65	130	32.5	65	130
	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativa

Tabla [III.15] Velocidades de bit posibles en un ancho de banda de 5,10 y 20 MHz enlace sede Cayma – sede “La Salle”

### 3.2 ESCENARIO 2

Este escenario se despliega en el enlace microondas entre las sedes de Cayma y Jerusalén, teniendo el siguiente equipamiento (Tabla [III.16]):

<b>Equipos</b>	Radwin 2000B
<b>Antenas</b>	Integrada de 15dBi
<b>Altura Antena Sede Cayma</b>	15m
<b>Altura Antena Sede Jerusalén</b>	12m

Tabla [III.16] Equipamiento enlace microondas sede Cayma – sede Jerusalén

La topología de red se halla detallada en la Figura [III.26] en la que se observan los ODU Radwin 2000B con antena integrada, un servidor para el almacenamiento de las mediciones, una cámara IP HD para la generación de tráfico, un monitor destinado a la visualización de la cámara, y un switch para concentrar los enlaces microondas.

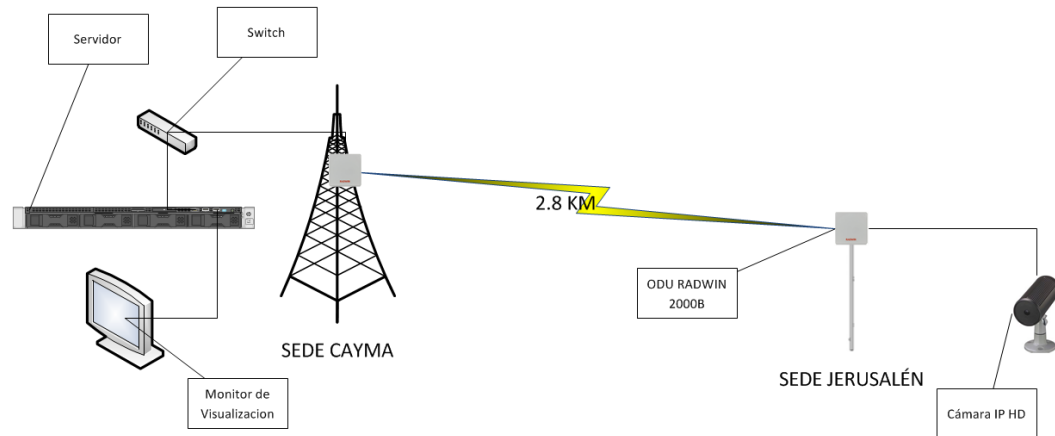


Figura [III.26] Diagrama de conexiones Escenario 2.

Con arreglo a las normas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, el PIRE debe ser como máximo 36dBm, conforme ya fue antes advertido. Dentro de tal contexto, se realizarán mediciones considerando un PIRE = 36 dBm y el PIRE = 39dBm.

Se utilizó en software SNMPc para el monitoreo y almacenamiento –de los datos entregados por los equipos de radioenlace-. Se almacenaron así los datos medidos del “throughput” y RSSI con también 500 muestras cada uno por velocidad de bit. Entre el servidor y el equipo de radioenlace remoto para medir el “delay”, se enviaron paquetes ICMP. De igual forma, se obtuvieron 500 muestras por cada velocidad de bit.

En base a los dos valores de PIRE, se practican mediciones modificando igualmente todas las velocidades de bit -con los diferentes canales de comunicación-, permitidas por los equipos de radioenlace según las simulaciones. Así se constata en la Tabla [III.17] misma que muestra las velocidades posibles para un ancho de banda de canal de 5,10 y 20 MHz (Conforme a la simulación).

Se deben ejecutar, en total, treinta y dos mediciones con las diversas velocidades de bit.

	PIRE 36 dBm			PIRE 39 dBm		
BW Canal	5MHz	10MHz	20MHz	5MHz	10MHz	20MHz
Velocidad de Bit	6.5	13	26	6.5	13	26
	9.75	19.5	39	9.75	19.5	39
	13	26	52	13	26	52
	19.5	39	78	19.5	39	78
	26	X	X	26	X	X
	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativa

Tabla [III.17] Velocidades de bit posibles en un ancho de banda de 5,10 y 20 MHz con PIRE de 36 y 39 dBm sede Cayma – sede Jerusalén

### 3.3 ESCENARIO 3

Es en el enlace microondas entre las sedes de Cayma y General Morán, que se concreta este escenario. Teniendo el siguiente equipamiento como se observa en la Tabla [III.18]:

<b>Equipos</b>	Radwin 2000B
<b>Antenas</b>	Integrada de 15dBi
<b>Altura Antena Sede Cayma</b>	16m
<b>Altura Antena Sede Gral. Morán</b>	12m

Tabla [III.18] Equipamiento enlace microondas sede Cayma – sede “La Salle”

La topología de red de este escenario consta de una cámara IP HD para la generación de tráfico, antenas parabólicas, un servidor para el almacenamiento de las mediciones, los ODU Radwin 2000B, un monitor para la visualización de la cámara y un switch para concentrar los enlaces microondas, conforme se aprecia en la Figura [III.27]

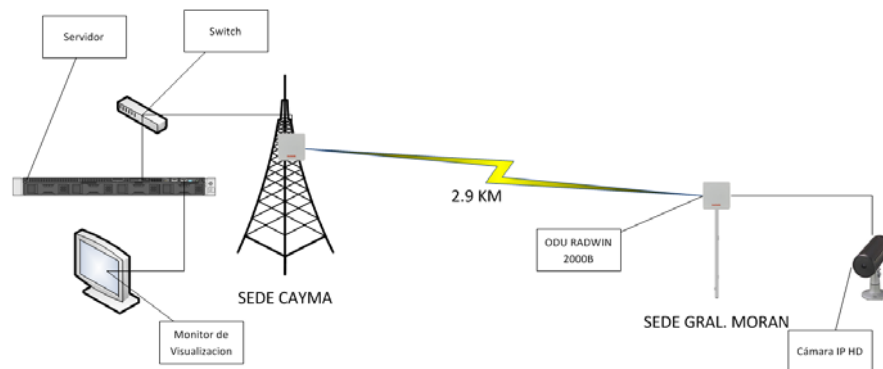


Figura [III.27] Diagrama de conexiones Escenario 3.

Considerando las ya antes citadas normas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, una vez más el PIRE no debe sobrepasar 36dBm. Con base a ello, se realizan mediciones teniendo nuevamente en cuenta el PIRE = 36 dBm y el PIRE = 39dBm.

Se almacenaron los datos medidos del “throughput” y RSSI –entregados por los equipos Radwin 2000B- con 500 muestras cada uno por velocidad de bit, utilizándose el software SNMPc para el monitoreo y almacenamiento.

Para medir el “delay”, hubo que enviarse paquetes ICMP entre el servidor y el equipo de radioenlace remoto. Igualmente se obtuvieron 500 muestras por cada velocidad de bit.

Las mediciones se hicieron con los dos valores de PIRE, modificando las velocidades de bit -con los diferentes canales de comunicación-, toleradas por los equipos de radioenlace de acuerdo a las simulaciones. De acuerdo a la simulación, para un ancho de banda de canal de 5,10 y 20 MHz, las velocidades de bit posibles se explicitan en la Tabla [III.19]. Por lo demás, deben efectuarse un total de treinta y dos mediciones con las diversas velocidades de bit.

	PIRE 36 dBm			PIRE 39 dBm		
BW Canal	5MHz	10MHz	20MHz	5MHz	10MHz	20MHz
Velocidad de Bit	6.5	13	26	6.5	13	26
	9.75	19.5	39	9.75	19.5	39
de Bit	13	26	52	13	26	52
	19.5	39	78	19.5	39	78
	26	X	X	26	X	X
	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativa

Tabla [III.19] Velocidades de bit posibles en un ancho de banda de 5,10 y 20 MHz con PIRE de 36 y 39 dBm sede Cayma – sede “La Salle”

#### 4. IMPLEMENTACIÓN DE LOS ESCENARIOS

Con el sustento aportado por el estudio de factibilidad, se procede a la implementación de los escenarios, la cual fue realizada exitosamente en todas las sedes, como se detalla a continuación:

**Sede de Cayma:** Sobre una torre de comunicaciones de 12m, se colocaron los transceptores para los tres enlaces microondas, dos con antena integrada y uno con una externa, según se aprecia en la Figura [III.28]



Figura [III.28] Implementación sede Cayma.

**Sede de “La Salle”:** Se instaló el transceptor para un enlace microondas con antena externa, en una torre de comunicaciones de 30m, conforme se ve en la Figura [III.29]. Es del caso tener presente que los demás enlaces microondas que se encuentran en esta torre se ubican en otra banda de frecuencia.



Figura [III.29] Implementación sede “La Salle”.

**Sede de Jerusalén:** Sobre un mástil de comunicaciones de 3m, se ubicó el tranceptor del enlace microondas con antena integrada, según podemos apreciar en la Figura [III.30].



Figura [III.30] Implementación sede Jerusalén.

**Sede de General Morán:** Se empleó un mástil de comunicaciones de 3m para instalar el tranceptor para el enlace microondas el cual cuenta con antena integrada (Figura [III.31]).



Figura [III.31] Implementación sede General Morán.

## 5. INSTRUMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los instrumentos son los recursos de los que se vale este trabajo de investigación, para evaluar el performance. Así, se han utilizado los siguientes: Equipo de radioenlace, antena parabólica, cámara IP HD, R-Planner, Radio Mobile, Google Earth, SNMPC, Radwin Manager, analizador de espectro, servidor y dispositivo GPS. Sin duda, tales instrumentos ayudaron, de forma directa, en la obtención de los objetivos planteados.

### 5.1 EQUIPO DE RADIOENLACE:

Se recurrió al uso de los equipos de radioenlace de la marca Radwin - modelo 2000B (Fig. [III.32]) empleándose seis equipos que constituyen los transceptores que, en parejas, forman un enlace microondas. Su función es primordial pues haciendo uso de sus transceptores, nos permiten realizar las mediciones para evaluar el performance.



Figura [III.32] Equipo de radioenlace Radwin modelo 2000B.<sup>43</sup>

A continuación ciertas características del equipo:

Característica	Descripción
Tipo de radio	Wireless Bridge/ IP OUTDOOR
Modulación	OFDM
Alimentación	POE
Interfaces	Lan: IEEE 802.3 Ethernet: 10/100 base-T con auto negociación Cable STP 5e
Calidad de Servicio	QoS y soporte de Vlan

<sup>43</sup> Datasheet Radwin 2000B-RW-2050-B350

	Priorización de tráfico y filtrado multicast dinámico
<b>“Throughput”</b>	25 Mbps full dúplex
<b>Chasis resistente de fabrica</b>	Certificación IP67
<b>Selección automática de canales</b>	Soporta
<b>Selección de control de potencia</b>	Soporta
<b>Ethernet</b>	IEEE 802-3 – 10 BaseT
<b>FastEthernet</b>	IEEE 802-3u – 10/100 BaseTx
<b>Modulación OFDM</b>	OFDM (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM)
<b>Normas de comunicaciones</b>	Certificación FCC
<b>Frecuencia de operación</b>	4.9, 5X Ghz
<b>Modos de operación</b>	Punto a Punto
<b>Monitoreo</b>	Herramienta basada en leds para verificar calidad de señal, vía software
<b>Protocolos para la protección de datos</b>	AES
<b>Estadísticas de trafico</b>	Contador de tramas recibidas Contador de tramas enviadas “Throughput” de ingreso Software de monitoreo del enlace
<b>Sistema Operativo</b>	Cuenta con la última versión de software
<b>Antena</b>	Integrada de 15dBi

Tabla [III.20] Características equipo Radwin 2000B

En la Figura [III.33] tenemos el patrón de radiación de la antena “patch” integrada al Radwin 2000B.

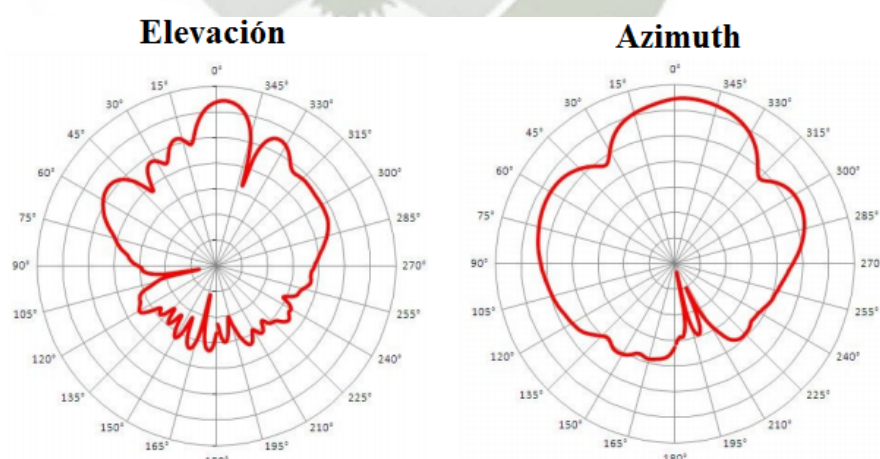


Figura [III.33] Patrón de radiación antena “patch”.<sup>44</sup>

<sup>44</sup> Datasheet Radwin 2000B-RW-2050-B350

En el anexo II se encuentra la hoja de datos completa para más detalles.

## 5.2 ANTENA PARABÓLICA:

Se emplean antenas duales parabólicas de la marca L-Com modelo HG5158DP-29D, según se aprecia en la Figura [III.34].



Figura [III.34] Antena dual externa L-Com.<sup>45</sup>

Para el enlace microondas entre las sedes de Cayma y “La Salle”, se utilizaron antenas externas a fin de obtener una mayor directividad y así mitigar interferencias. Estas antenas tienen una ganancia de 28.5 dBi en la banda de 5.8 GHz.

En la Figura [III.35] tenemos el patrón de radiación de la citada antena parabólica dual externa.

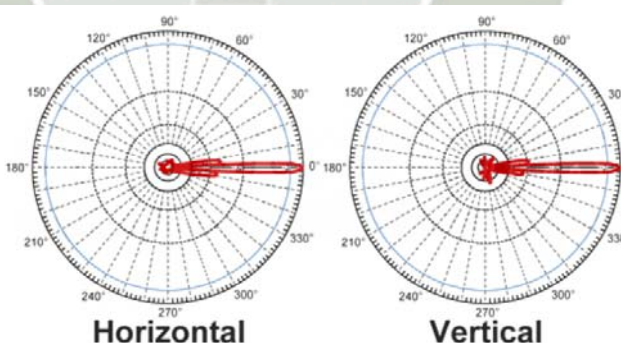


Figura [III.35] Patrón de radiación antena parabólica.<sup>45</sup>

La respectiva hoja de datos completa, con más detalles, se encuentra en el Anexo III.

<sup>45</sup> [http://www.l-com.com/multimedia/datasheets/DS\\_HG5158DP-29D.PDF](http://www.l-com.com/multimedia/datasheets/DS_HG5158DP-29D.PDF)

### 5.3 SERVIDOR:

Se utilizó un servidor HP Proliant - modelo DL160 (Fig. III.36) con un sistema operativo Windows Server 2012, para el alojamiento de las herramientas de software SNMPc, RealShot Manager Lite, Radwin Manager, el almacenamiento de datos de mediciones obtenidas y el monitoreo de la cámara IP.



Figura [III.36] Servidor HP Proliant DL160.<sup>46</sup>

### 5.4 SNMPc:

Se recurre al uso del software de monitoreo y administración SNMPc V.8 - versión de evaluación, correspondiente el fabricante Castle Rock (Fig. [III.37]).

Se instalaron las MIBs de los equipos Radwin 2000B que están disponibles en los CDs de configuración, los que permiten monitorear y registrar el RSSI así como el “throughput” a través del protocolo de gestión de red SNMP.

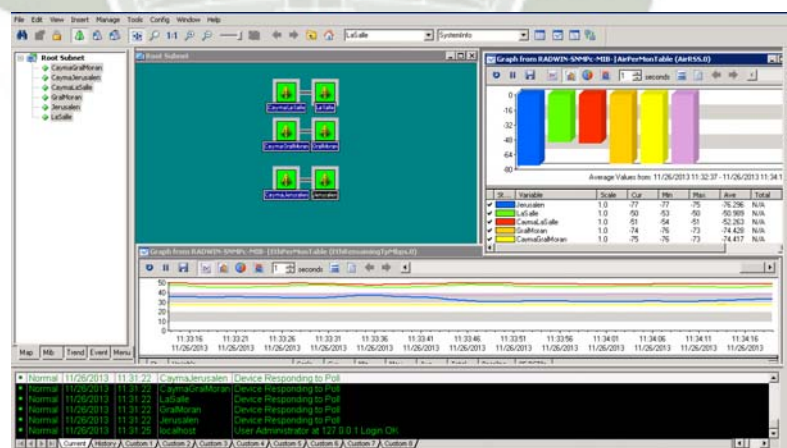


Figura [III.37] Software de monitoreo y administración SNMPc v8 (versión de evaluación)

<sup>46</sup>[http://www.hp.com/hpinfo/newsroom/press\\_kits/2011/poweryourdream/HP\\_ProLiant\\_DL120\\_G7\\_D\\_atasheet.pdf](http://www.hp.com/hpinfo/newsroom/press_kits/2011/poweryourdream/HP_ProLiant_DL120_G7_D_atasheet.pdf)

Este software es usado para el monitoreo y almacenamiento de las mediciones de todos los enlaces microondas implementados en este trabajo de investigación.

Para el acceso a mayores detalles, se incluye en el Anexo IV la respectiva hoja de datos completa.

## 5.5 CÁMARA IP HD:

Es utilizada una cámara IP de 1.3 megapíxeles HD de la marca Sony modelo SNC-CH110 (Fig. [III.38]) cuya función es la de generar tráfico de datos en los enlaces microondas para así emular un enlace con flujo de tráfico.



Figura [III.38] Cámara IP HD Sony SNC-CH110.<sup>47</sup>

Se emplea el software propietario de Sony “RealShot Manager Lite” para la configuración y visualización de la cámara (Fig. [III.39])

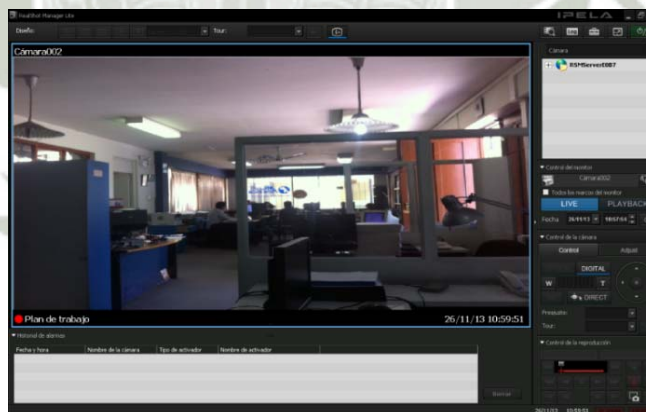


Figura [III.39] Software de administración Sony RealShot Manager Lite

<sup>47</sup> <https://vdgsecurity.com/product/snc-ch110/>

## 5.6 R-PLANNER:

El R-Planner (Fig. [III.40]) es un potente software de simulación de enlaces microondas on-line, tanto punto a punto como punto-multipunto. Utiliza los mapas del software Google Earth y es de propiedad de Radwin. En esta investigación se emplea -en su versión 1.11.0.0- para realizar simulaciones de los enlaces microondas y, sobretodo, para obtener un “throughput” estimado.

Al ser una herramienta licenciada, no se pueden dar muchos detalles de la misma. En todo caso, se brinda la hoja de datos contenida en el Anexo V.

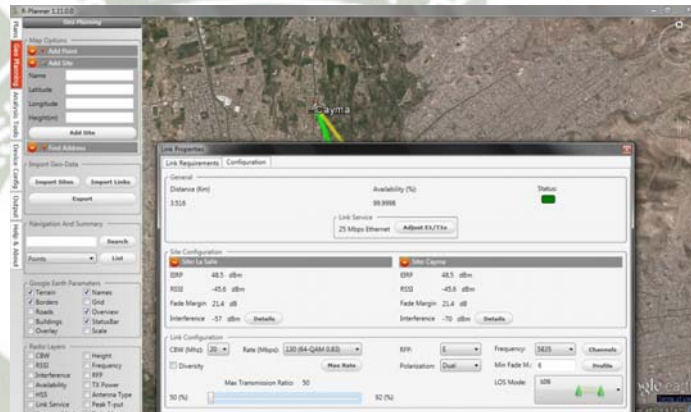


Figura [III.40] Software de Simulación R-Planner.

Para mayor detalle consultar la hoja de datos en el anexo V.

## 5.7 RADIO MOBILE:

Muy difundida y utilizada por su licenciamiento gratuito, el Radio Mobile (Fig. [III.41]) es una herramienta de simulación de enlaces microondas.

Se ha usado en la presente investigación, ello en la versión 11.2.9, para realizar las simulaciones de todos los enlaces microondas, con el específico fin de poder analizar la propagación en el espacio radioeléctrico.



Figura [III.41] Software de Simulación de Enlaces Microondas Radio Mobile.

En relación a este producto, en el Anexo VI se encuentra la respectiva hoja de datos.

## 5.8 GOOGLE EARTH:

El Google Earth (Fig. [III.42]) constituye indudablemente una herramienta de mapas sumamente popular e importante. Cuenta así con mapas de las ciudades, vistas en 3D y vistas a nivel del suelo por fotografías (Street View) entre otros.

Para los efectos propios de este trabajo de investigación, se ha empleado el Google Earth - versión 7.1.1.18868, específicamente para: i) Exportar los enlaces simulados por el R-Planner y Radio Mobile, ubicarlos en sus mapas y poder así analizar detenidamente el entorno geográfico con imágenes reales. ii) Utilizar las herramientas "street view" y "perfil de elevación", entre otros.

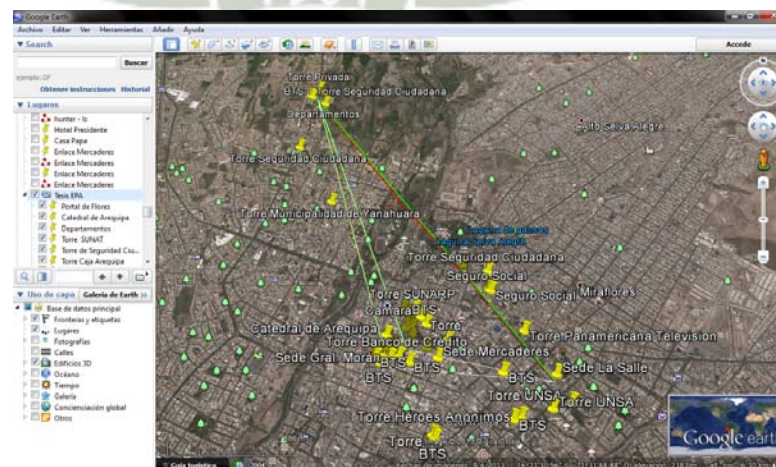


Figura [III.42] Software Google Earth.

## 5.9 RADWIN MANAGER:

Se trata de un software de administración de propiedad de Radwin (Fig. [III.43]) mediante el cual se realiza la configuración de los equipos de radioenlace, la obtención de diagnósticos, la visualización del “throughput” actual y el tráfico enviado por los enlaces. Cuenta con las herramientas de “analizador de espectro” y “estimación de throughput”, la misma que, como su nombre lo indica, estima el “throughput” rellenando al máximo las tramas ethernet en el aire, entre otras.

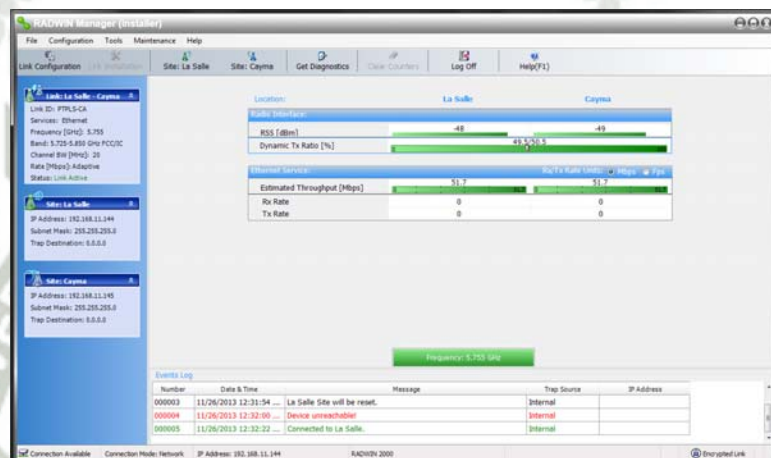


Figura [III.43] Software de Administración Radwin Manager.

La mencionada herramienta (Radwin Manager versión 9.5.0) es empleada en la presente investigación, para configurar la totalidad de los enlaces microondas, permitiendo elegir parámetros como frecuencia, velocidad de bit, PIRE y direccionamiento IP. También se usa el analizador de espectro propio de dicho instrumento, con la finalidad de obtener y almacenar mediciones del espectro electromagnético.

## 5.10 ANALIZADOR DE ESPECTRO:

El analizador de espectro portátil de la marca Aaronia modelo NF-6060V4 (Fig. [III.44]) que opera en un rango de frecuencias de 10Mhz hasta 6GHz, adicionalmente emplea una antena Yagui de la serie Hyperlog 7060. Ha sido

utilizado para efectuar las mediciones del espectro radioeléctrico durante el estudio de factibilidad, para de esta forma poder determinar, asimismo, la factibilidad del enlace y las frecuencias de operación de los enlaces microondas.



Figura [III.44] Kit de analizador de espectro portátil Aaronia.

La visualización de los datos medidos por el analizador de espectro portátil se concretó gracias a su software de administración/visualización Aaronia LCS Analyzer versión 2.0.0, como podemos observar en la Figura [III.45].

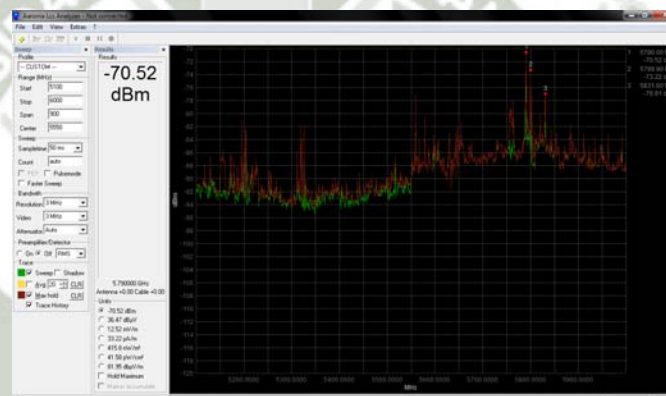


Figura [III.45] Software Aaronia LCS Analyzer.

## 5.11 DISPOSITIVO DE GPS:

Se utiliza un dispositivo de GPS de la marca GARMIN - modelo eTrexLegend H (Figura [III.46]) para tomar las coordenadas geográficas de las ubicaciones exactas en las distintas sedes, a fin de ingresar las coordenadas al R-Planner y Radio Mobile para su simulación.



Figura [III.46] Dispositivo de GPS GARMIN.<sup>48</sup>

<sup>48</sup> <https://buy.garmin.com/en-US/US/on-the-trail/discontinued/etrex-legend-h/prod30120.html>

# CAPÍTULO IV: DESARROLLO DEL PROYECTO

En el presente Capítulo se describen los procedimientos realizados para la evaluación del performance, así como para las simulaciones, mediciones y cálculos.

## 1. RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO

- a) Se llevó a cabo el respectivo estudio de factibilidad, comprendiendo así tres etapas: El estudio preliminar, el estudio físico y el estudio de radio frecuencia.
- b) Con el estudio preliminar se determinó la topología de red (PtP). Luego, utilizando el R-Planner, se simularon los enlaces microondas. Acto seguido, para contrastar lo simulado por el R-Planner, se realizaron simulaciones con el Radio Mobile y, como complemento, se efectuaron además cálculos de todos los enlaces microondas. Tanto las simulaciones del R-Planner como las del Radio Mobile, fueron exportadas al Google Earth.
- c) Siguiendo con el estudio físico, se determinaron las ubicaciones adecuadas para colocar los ODUs e identificaron además las obstrucciones y fuentes de interferencia.
- d) Los resultados del estudio físico se ingresaron en los simuladores R-Planner y Radio Mobile para determinar las ubicaciones exactas y las alturas de las torres/mástiles. Utilizando el mapa de Google Earth, se ubicaron y analizaron las obstrucciones y fuentes de interferencias, además de determinarse la inviabilidad del enlace entre las sedes de Cayma y Mercaderes, ello debido a las obstrucciones.

- e) Con el analizador de espectro portátil, se realizaron mediciones del espectro radioeléctrico en las tres sedes, con el objeto de ejecutar el estudio de radiofrecuencia, para así, determinar la viabilidad en frecuencias.
- f) Teniendo como base el estudio de factibilidad, se procedió luego a la implementación de los tres escenarios.
- g) Se volvió a usar el R-Planner para simular los tres escenarios, de forma tal que se pudiesen obtener el “throughput” y el RSSI esperados. Los datos logrados igualmente se ingresan en las tablas resumen por escenario (Descritas en el Capítulo V) para su posterior comparación con las mediciones.
- h) Asimismo, se procede a realizar las mediciones para los tres escenarios. Con tal objeto: Se configuran los transceivers con el PIRE y la velocidad de bit a medir; se genera el tráfico adecuado con la cámara IP según la Tabla [III.13]; se mide el espectro radioeléctrico con el analizador de espectro del ODU; en la línea de comandos DOS del servidor, se configura enviar 500 paquetes ICMP para medir el “delay”; y, por último, utilizando el software SNMPc, asimismo se configura almacenar 500 muestras de “throughput” y de RSSI.
- i) Son consolidadas las mediciones en hojas de excel (Una por cada velocidad de bit) consignándose los resultados de las quinientas muestras medidas de “throughput”, de RSSI y “delay” con la finalidad de obtener gráficos de las muestras obtenidas (Fig. [IV.7]) y subsiguiente evaluación de resultados.
- j) De igual manera, los promedios de las mediciones fueron ingresados en las respectivas tablas resumen por escenario (descritas en el capítulo V) para realizar la evaluación de resultados.

A continuación, se procede a describir en forma detallada el procedimiento por cada uno de los recursos (Instrumentos) empleados. Así:

## 2. SIMULACIONES

Habiéndose recurrido a la utilización de los software de simulación R-Planner, Radio Mobile y Google Earth, resultó que:

### 2.1 R-PLANNER

Se efectuaron simulaciones empleando dicho software, siguiendo al efecto los siguientes pasos:

- a) Al iniciar el R-Planner, se ingresa el usuario y la contraseña que nos darán acceso a su plataforma online.
- b) Se crea un nuevo proyecto donde se ingresa el nombre del mismo, en nuestro caso es “Evaluación de Performance “. De igual manera se ingresan el factor de clima, el “throughput” esperado y los demás datos pertinentes.
- c) Con la herramienta “AddSite”, se introducen las coordenadas geográficas para graficar las sedes así como la altura tentativa de la antena que se colocará en el sitio, altura que puede ser modificada posteriormente, si fuere el caso. Luego se unen dos puntos para crear el enlace microondas, seleccionando la opción PtP y la respectiva banda de frecuencia (En este caso, 5800 MHz).
- d) Teniendo creado el enlace PtP, se procede, acto seguido, a verificar el “Link Profile” (Figura [III.13]), en el cual se observan: Ambos puntos con las alturas precedentemente ingresadas; la distancia entre dichos puntos en kilómetros; y la respectiva claridad, la cual -como mínimo- debe ser 0.6F1 para que el enlace resulte exitoso.

- e) Dentro de “Link Properties” se seleccionan los transeptores que se emplearán, además del tipo de antena (Interna o externa) y su ganancia, la potencia de transmisión de cada transeptor (una de las variables que determina el PIRE), el ancho de banda de canal (5, 10 o 20 MHz) y, por último, la velocidad de bit con la que trabajarán los citados transeptores.
- f) Una vez introducidos todos los datos dentro de “General”, observamos el indicador del estado del enlace, el cual debe estar en color verde, significando entonces que con los parámetros ingresados -luego de realizados los cálculos del simulador- se obtiene que ciertamente el enlace microondas es exitoso.
- g) Se puede utilizar la herramienta “Generate KMZ”, en la medida que nos permite exportar la simulación al Google Earth.

## 2.2 RADIO MOBILE

Se tiene la siguiente secuencia para la simulación de un enlace microondas:

- a) Dentro de “Propiedades de las Unidades”, se agregaron las coordenadas de las sedes.
- b) En la ventana “Propiedades de las Redes” se procede al ingreso de los parámetros, el tipo de topología, los miembros y los sistemas de los enlaces microondas.
- c) Finalmente, en la ventana “Enlace de Radio”, pueden apreciarse los resultados de la simulación.

Se tiene un ejemplo del resultado de la ventana “Enlace de Radio” correspondiente al enlace microondas entre la sedes de Cayma y “La Salle”, en la Figura [IV.1] en

la que podemos observar parámetros como el azimut, la elevación, el peor Fresnel (claridad en R-Planner) el nivel de Rx (RSSI esperado en R-Planner) entre otros.

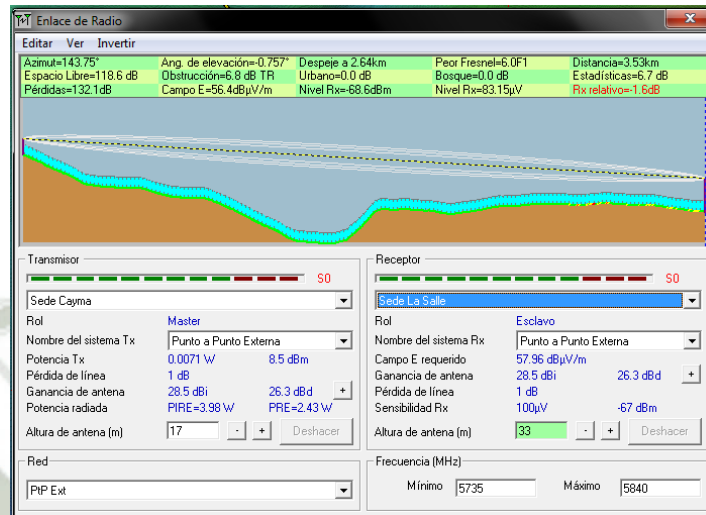


Figura [IV.1] Resultado del Radio Mobile para el enlace microondas entre las sedes de Cayma y “La Salle”.

## 2.3 GOOGLE EARTH

Se ejecutaron las siguientes tareas:

- Se ubicaron las posibles obstrucciones, utilizando el estudio físico y la herramienta “Street View” que nos da una visión de las calles de la ciudad, ello a nivel del suelo y mediante fotografías.
- Se utilizó la herramienta “Marca de Posición” para colocar en el mapa las diferentes fuentes de interferencias, como son las torres de comunicación de seguridad ciudadana, estaciones base celular torres de comunicación de empresas privadas y públicas. Asimismo, se consignaron en el mapa las diferentes obstrucciones.
- Por último, se pudo determinar si el obstáculo impide o no el paso de 0.6F1 de un enlace microondas, empleándose para esto la herramienta “Perfil de Elevación”.

### **3. MEDICIONES**

Usando el analizador de espectro portátil, los transeptores microondas administrados por el SNMPc, la línea de Comandos DOS y el analizador de espectro del ODU, se practicaron mediciones de acuerdo al detalle que a continuación se precisa:

#### **3.1 ANALIZADOR DE ESPECTRO PORTÁTIL**

Se ejecutaron mediciones en las tres sedes, siguiendo el siguiente procedimiento:

- a) Posicionándose en las respectivas ubicaciones, se instaló el analizador de espectro apuntando hacia la dirección del sitio remoto, configurándolo para que realice mediciones en la banda de 5.8GHz.
- b) Se realizaron mediciones de 30min por sede para ambas polarizaciones (15 minutos horizontal y 15 minutos vertical) utilizando la antena Hyperlog 7060.

#### **3.2 SNMPc**

Al ser un software de monitoreo y administración, el SNMPc permitió administrar los transeptores Radwin 2000B esto gracias a la instalación de las MIBs correspondientes (que se encuentran disponibles en los CDs de los equipos). A continuación, se procedió a crear una topología de red (Figura [IV.2]) y de esta forma poder realizar tareas de administración, configuración, así como también monitorear y almacenar los datos medidos por dichos transeptores.

El uso del SNMPc fue para los tres escenarios materia del presente trabajo de investigación.

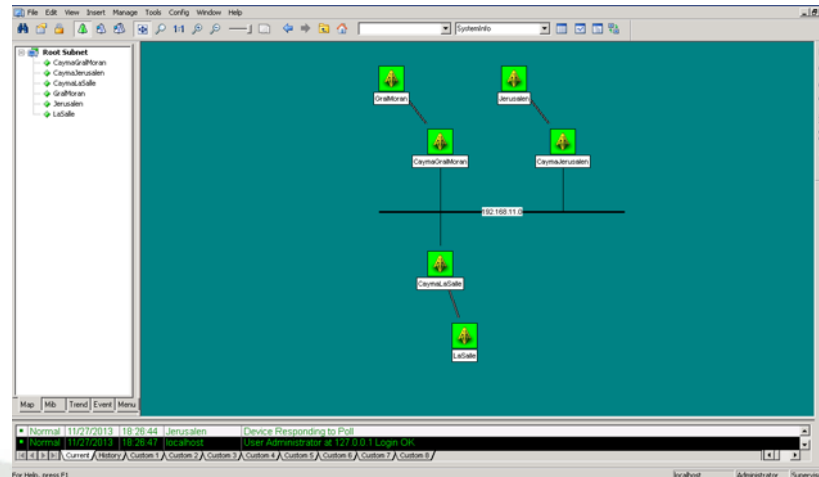


Figura [IV.2] Topología de red creada en SNMPc.

A continuación se pormenoriza el procedimiento seguido para realizar una de las noventa y seis mediciones realizadas:

- a) Se configura la velocidad de bit deseada –ya habiendo seleccionado el PIRE (36 o 39 dBm)- en el enlace microondas para proceder a su medición (Figura [IV.3]). Se resalta que tal configuración de la velocidad de bit significa, a su vez, modificar las variables modulación y FEC.
- b) Utilizando las herramientas “Ethernet Performance Monitor” y “Air Performance Monitor”, las que permiten monitorear y almacenar las mediciones de “throughput” y RSSI, respectivamente, se logró grabar un total de quinientas muestras para cada uno. Tras efectuarse la medición, se observa entonces una pantalla resumen. Tenemos un ejemplo en la Figura [IV.4] la cual contiene el resumen de la medición de “throughput” del enlace microondas entre la sedes de Cayma y Jerusalén, con un ancho de banda de canal de 5MHz, una velocidad de bit de 6.5Mbps (Modulación QPSK FEC 1/2) y un PIRE de 36dBm.
- c) Las mediciones son almacenadas en archivos de datos, lo que permite analizar los resultados posteriormente.

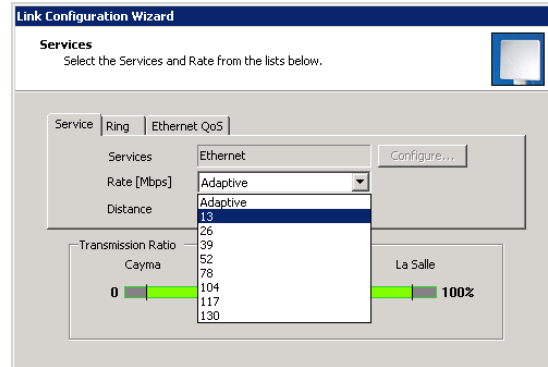


Figura [IV.3] Seleccionar la velocidad de bit en un ancho de banda de canal de 20MHz.

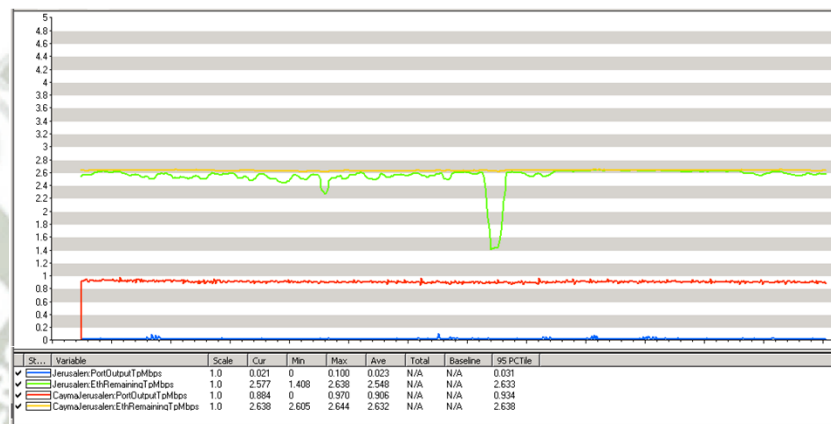


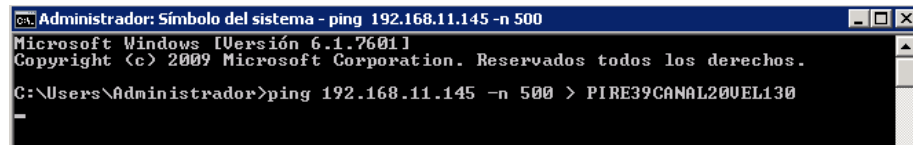
Figura [IV.4] Resumen medición de “throughput” SNMPc.

### 3.3 LÍNEA DE COMANDOS DOS

La medición del “delay”, al igual que el “throughput” y RSSI, se realizó en los tres escenarios. Para ello, se utilizan paquetes ICMP, de los cuales se enviaron 500 de 32 bytes cada uno por cada velocidad de bit –con los 2 valores de PIRE-, siendo transmitidos desde la tarjeta de red del servidor HP en la sede de Cayma hacia las tarjetas de red de los transeceptores remotos.

Un ejemplo de la medición del “delay” en el citado enlace entre las sedes de Cayma y “La Salle”, se ofrece en la figura [IV.5]: Observamos así el comando “ping” para enviar paquetes ICMP, la dirección IP del transeiver remoto, “-n500” que significa el envío de 500 paquetes ICMP y finalmente “> Nombre”, el que

permite guardar los datos en un archivo “Nombre” dentro de la carpeta "Mis Documentos".



```
cs: Administrador: Símbolo del sistema - ping 192.168.11.145 -n 500
Microsoft Windows [Versión 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.
C:\Users\Administrador>ping 192.168.11.145 -n 500 > PIRE39CANAL20UEL130
```

Figura [IV.5] Medición del “delay” usando DOS.

### 3.4 ANALIZADOR DE ESPECTRO DEL ODU

Las mediciones con el analizador de espectro del ODU se ejecutaron igualmente en los tres escenarios objeto de esta investigación, teniendo una duración de 240s por medición y se realizaron en total noventa y seis mediciones del espectro radioeléctrico.

El analizador de espectro integrado nos da como resultados: Un archivo de las mediciones realizadas y una pantalla con los resultados de la medición actual. De ésta se muestra un ejemplo en la Figura [IV.6] la cual refleja la medición del espectro en las sedes de Cayma y General Morán para las dos polarizaciones (Antena A = Polarización Horizontal / Antena B = Polarización Vertical) siendo que en el eje X tenemos las frecuencias en MHz y en el eje Y, la potencia en dBm. En el gráfico observamos además que las barras están con colores distintos, de manera tal que: El color azul muestra el valor de la última medición; el amarillo, el valor promedio de las mediciones; y, finalmente, el celeste refleja el máximo valor de las mediciones.



Figura [IV.6] Resultado de análisis de espectro con los transceiver en las sedes de Cayma y General Morán.

Se reunieron los datos de las mediciones de espectro -por cada sede- para obtener gráficos de Excel, los mismos que serán presentados y explicados en los Capítulos V y VI respectivamente.

**Finalmente** las muestras de “throughput”, RSSI, “delay” y nivel de interferencias medidas en los tres escenarios, fueron consolidadas en hojas de excel, obteniendo en total 96 hojas. Asimismo, con tales muestras se realizaron gráficos de excel con todas las variables medidas. Una vez más, un ejemplo es presentado a continuación en la Figura [IV.7] siendo los gráficos obtenidos del enlace microondas entre las sedes de Cayma y “La Salle”, con un PIRE de 39dBm, un ancho de banda de canal de 10MHz y una velocidad de bit de 26Mbps (Modulación 16QAM FEC 1/2). Explicitando con más detalle dicha figura, se tiene:

- a) En la parte superior se observa el gráfico promedio de “throughput” transmitido, correspondiendo el color azul a la sede de Cayma, el rojo a la de “La Salle” y el verde, al tráfico generado por la cámara. A continuación se aprecia el gráfico promedio de RSSI, en el cual se ve la sede Cayma en color

- verde y, en rojo, la de “La Salle”. Seguidamente, el gráfico promedio de “delay”. Todos estos promedios son el resultado de la fórmula:  $\frac{\sum \text{de las muestras}}{500}$ .
- b) En la parte media se tiene el gráfico # de Muestras versus Throughput Estimado, donde se tiene las curvas del “throughput” full dúplex transmitido durante las 500 muestras. Se observa la curva de color azul, la misma que corresponde a la sede Cayma y la de color rojo, a la sede de “La Salle”.
- c) También en la parte media se aprecia el gráfico # de Muestras versus RSSI, en el que se consignan las curvas del RSSI durante las 500 muestras, siendo la curva de color verde la de la sede de Cayma y la de color rojo, correspondiente a la sede “La Salle”.
- d) El gráfico Tiempo versus # de Muestras, es el que se ubica en la parte baja, apreciándose una curva de color azul que muestra las 500 mediciones del “delay” y el tiempo que tardaron en milisegundos.
- e) Finalmente, siempre en la parte baja, se tiene un pequeño cuadro constituido por: Un resumen en porcentaje de los paquetes ICMP recibidos y perdidos que resultan de las formulas:  $\frac{\# \text{ de paquetes ICMP recibidos}}{500} \times 100$  y  $\frac{\# \text{ de paquetes ICMP perdidos}}{500} \times 100$  respectivamente, el porcentaje de Actividad del Enlace que resulta de la formula  $\frac{\# \text{ de muestras con el Enlace Activo}}{500} \times 100$ , y las interferencias en ambas sedes con ambas polarizaciones. Cada uno de los valores de interferencia que constituyen el citado cuadro, son el resultado de un promedio de la sumatoria de los “valores promedios” de cada canal de 5MHz entre el número de valores.

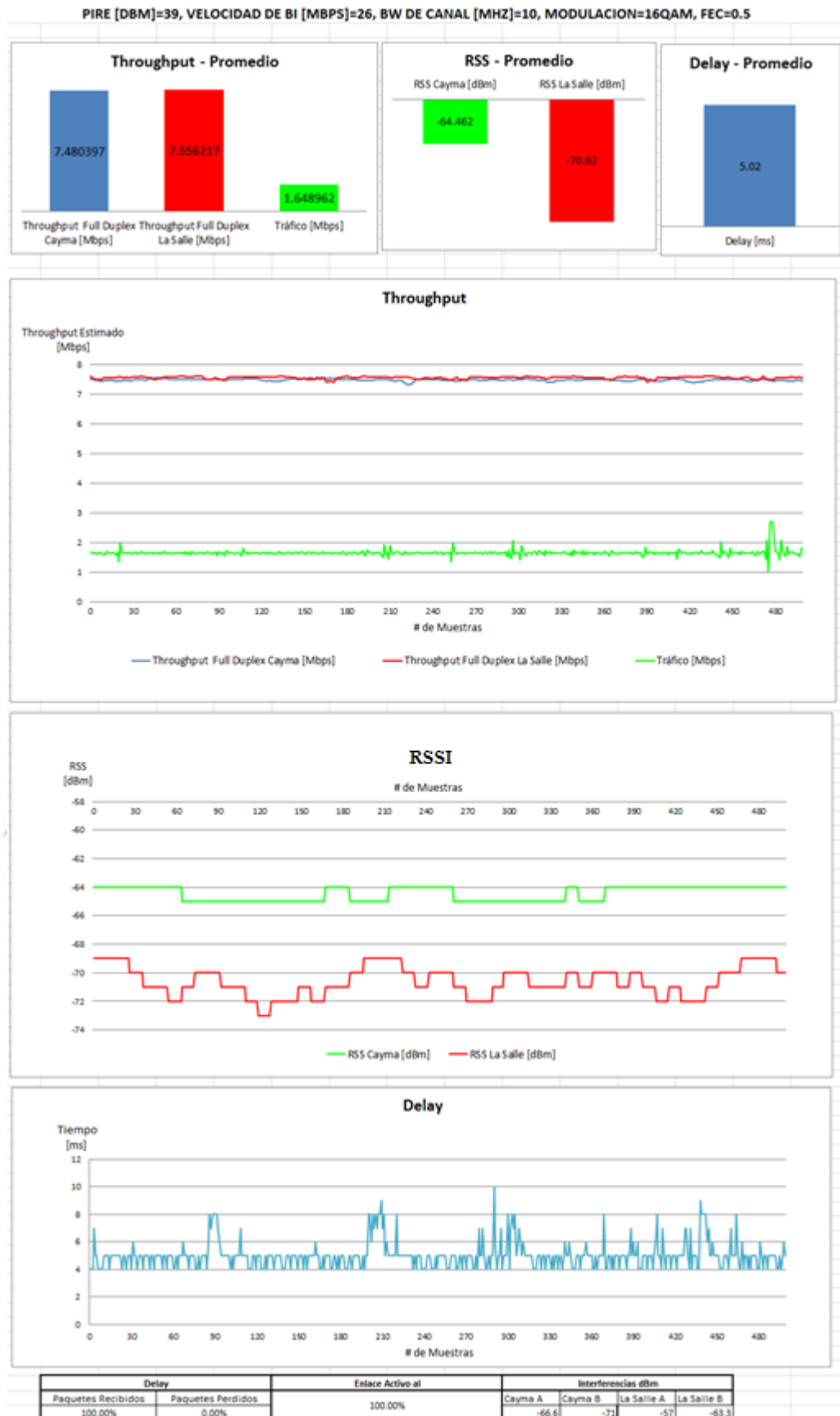


Figura [IV.7] Gráficos de Mediciones realizadas en las Sedes de Cayma y “La Salle”.

Los resultados de los gráficos promedio de “throughput”, RSSI y “delay” son ingresados a las tablas resumen por cada escenario. Dichas tablas son presentadas y descritas en los Capítulos V y VI, respectivamente.

#### 4. CALCULOS

Se efectuaron los siguientes cálculos de ingeniería con la finalidad de comprender los cálculos realizados por los simuladores.

##### **PIRE:**

$$PIRE = Potencia\ de\ Tx_{SitioA} + Ganancia\ de\ la\ Antena_{SitioA} - Pérdida\ del\ Cable_{SitioA} \quad [IV.1]$$

##### **RSSI Esperado y Margen de Desvanecimiento:**

*RSSI Esperado =*

$$PIRE - Pérdida\ de\ Propagación + Ganancia\ de\ la\ Antena_{SitioB} - Pérdida\ del\ Cable_{SitioB} \quad [IV.2]$$

Dónde:

Sitio A es el sitio del transmisor

Sitio B es el sitio del receptor

La pérdida de propagación es calculada de acuerdo al modelo del espacio libre,

$$Pérdida\ de\ Propagación = 32.45 + 20 \times \log_{10}(Frecuencia_{MHz}) + 20 \times \log_{10}(Distancia_{Km}) \quad [IV.3]$$

$$Margen\ de\ Desvanecimiento\ Esperado = RSSI\ Esperado - Sensibilidad \quad [IV.4]$$

Donde la sensibilidad depende de la velocidad de bit.

##### **Disponibilidad:**

Es calculada basándose en el método Vigants Barnett el cual predice probabilísticamente el tiempo sin servicio basado en el factor de clima (Factor C)

$$Disponibilidad = 1 - 6 \times 10^{-7} \times Factor\ C \times Frecuencia_{GHZ} \times (Rango\ Requerido_{Km})^3 \times 10^{\frac{-Margen\ de\ Desvanecimiento\ Esperado}{10}} \quad [IV.5]$$

### Altura de las Antenas:

La altura de la antena recomendada para sistemas con línea de vista es calculada como la suma de la altura de la zona de Fresnel y la altura del obstáculo.

La altura de la primera zona de Fresnel es:

$$R = \sqrt{\frac{300}{Frecuencia_{GHZ}} \times d_1 \times d_2} \quad [IV.6]$$

Con la distancia en kilómetros

Para la configuración más conservadora, se toma el punto medio entre las antenas, teniendo:

$$d_1 = d_2 = \frac{D}{2}$$

Lo que nos da:

$$R = \sqrt{\frac{300}{Frecuencia_{GHZ}} \times \left[\frac{D}{2}\right]^2 \times \frac{D}{\frac{D}{2} + \frac{D}{2}}}$$

Simplificando a:

$$R = 8.6 \times \sqrt{\frac{D_{Km}}{Frecuencia_{GHZ}}} \quad [IV.7]$$

### Claridad:

Se calcula la claridad requerida para asegurar la propagación en el espacio libre. Todos los obstáculos potenciales deben estar por encima de un valor específico. Se debe asegurar además que la claridad sea mayor a 0.6 del radio de la primera zona de Fresnel

Según la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) al diseñar un enlace microondas se debe garantizar como mínimo el 60% de la citada primera zona de Fresnel.

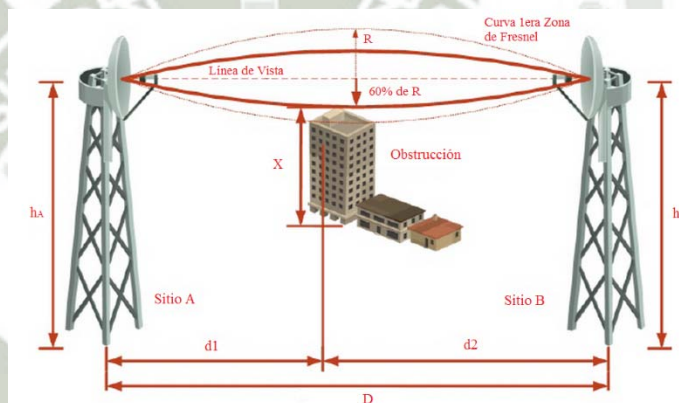


Figura [IV.9] Sistema de comunicación donde se encuentran los parámetros utilizados en los cálculos.

Encontramos un ejemplo de los cálculos de ingeniería realizados en el anexo VIII

# CAPÍTULO V: RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, los cuales son: Del análisis de espectro del ODU, de las simulaciones y las mediciones.

## 1. ANÁLISIS DE ESPECTRO DEL ODU

Los gráficos de análisis de espectro radioeléctrico nos muestran la frecuencia versus el nivel de interferencia. La frecuencia en MHz en la banda no licenciada de 5.8 GHz (de 5730 a 5840 MHz). El nivel de interferencia esta graficado desde -30 a -90 dBm. Al ser transeptores de polarización dual, tenemos la “Antena A” que es la polarización horizontal y la “Antena B” que es la polarización vertical.

En los gráficos podemos apreciar: El nivel de interferencia promedio de las antenas tanto "A" (Color celeste) como "B" (Color verde); asimismo, el nivel de interferencia máxima de las antenas igualmente "A" (Color azul) y "B" (Color rojo).

El sombreado de color amarillo representa el ancho de banda de canal 20MHz y la frecuencia central está encerrada por el cuadrado de color negro.

Fueron agrupadas la totalidad de mediciones de espectro obtenidas para todos los enlaces microondas, conforme se describe detalladamente a continuación:

- a) ESCENARIO 1: Sede Cayma – Figura[V.1], Sede “La Salle” – Figura [V.2]
- b) ESCENARIO 2: Sede Cayma – Figura[V.3], Sede Jerusalén – Figura[V.4]
- c) ESCENARIO 3: Sede Cayma – Figura[V.5], Sede General Morán – Figura[V.6]

## 1.1 ENLACE CAYMA – “LA SALLE”

Sede Cayma:

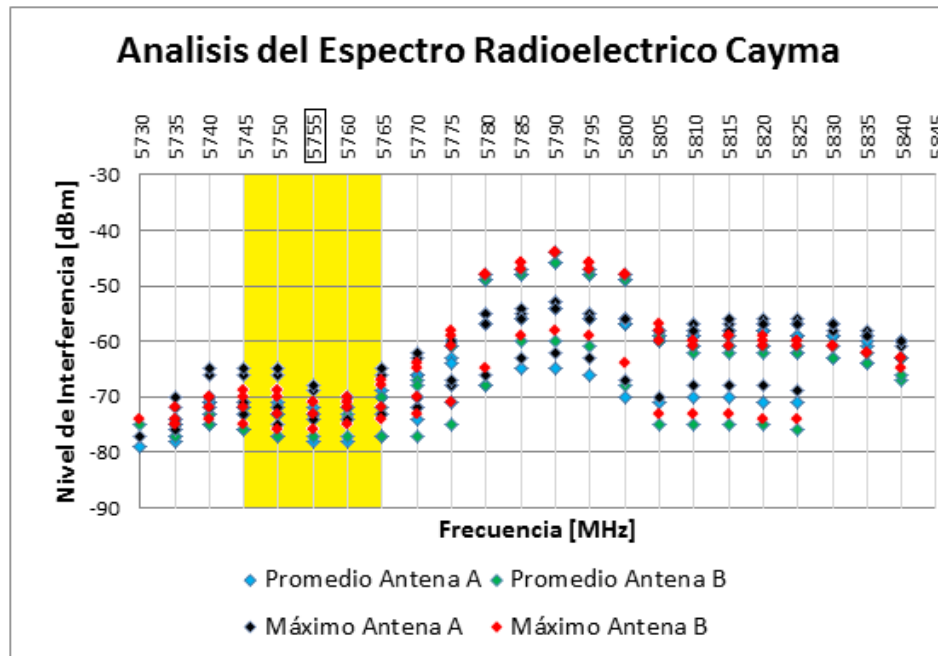


Figura [V.1], Grafico análisis de espectro radioeléctrico Cayma – “La Salle”.

Sede “La Salle”:

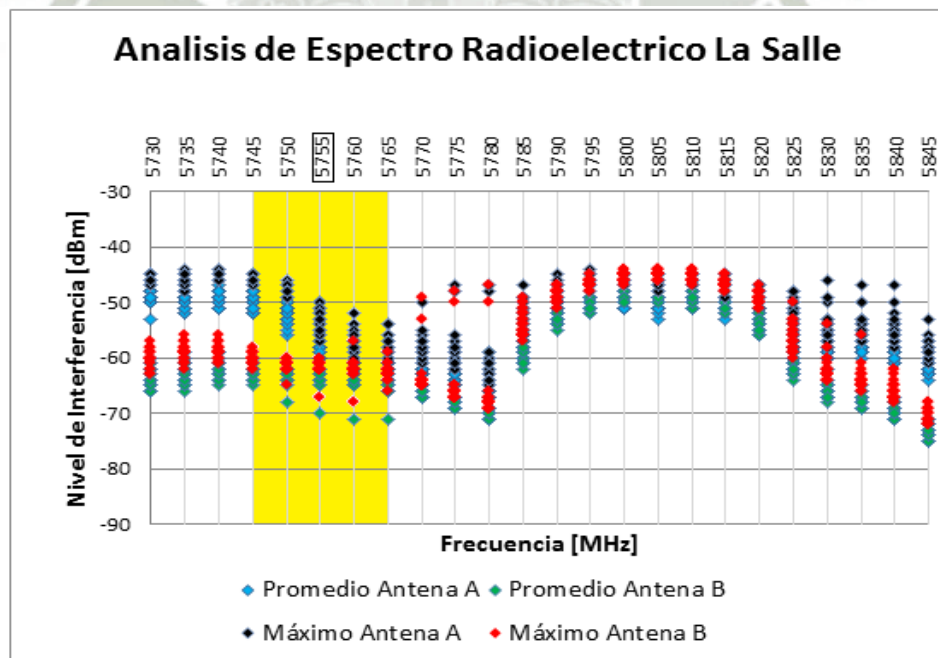


Figura [V.2] Grafico análisis de espectro radioeléctrico “La Salle” – Cayma.

## 1.2 ENLACE CAYMA – JERUSALÉN

Sede Cayma:

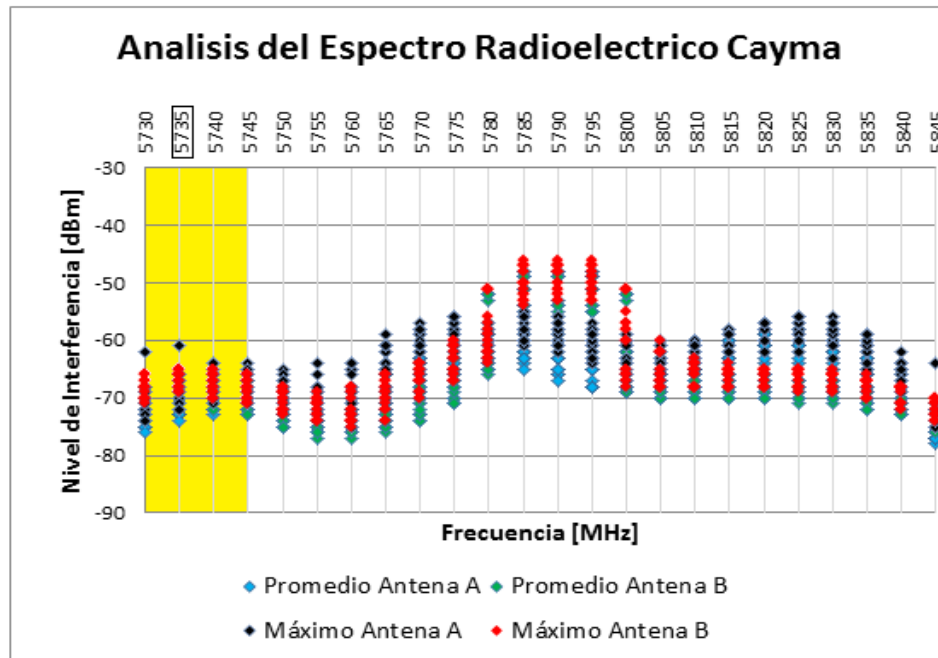


Figura [V.3] Grafico análisis de espectro radioeléctrico Cayma – Jerusalén.

Sede Jerusalén:

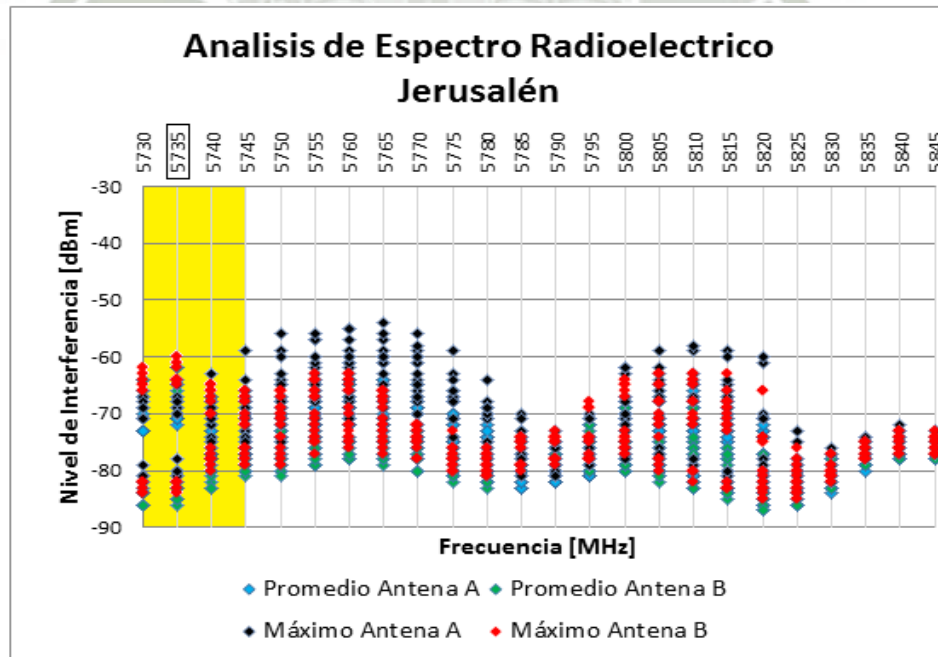


Figura [V.4] Grafico análisis de espectro radioeléctrico Jerusalén – Cayma.

### 1.3 ENLACE CAYMA – GENERAL MORÁN

Sede Cayma:

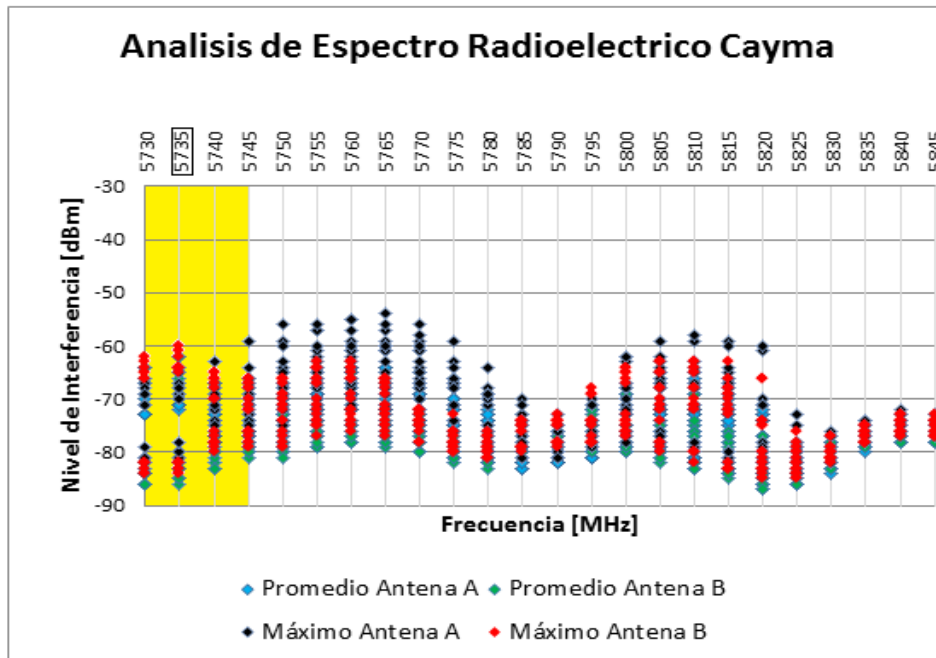


Figura [V.5] Grafico análisis de espectro radioeléctrico Cayma – Gral. Moran

Sede General Morán:

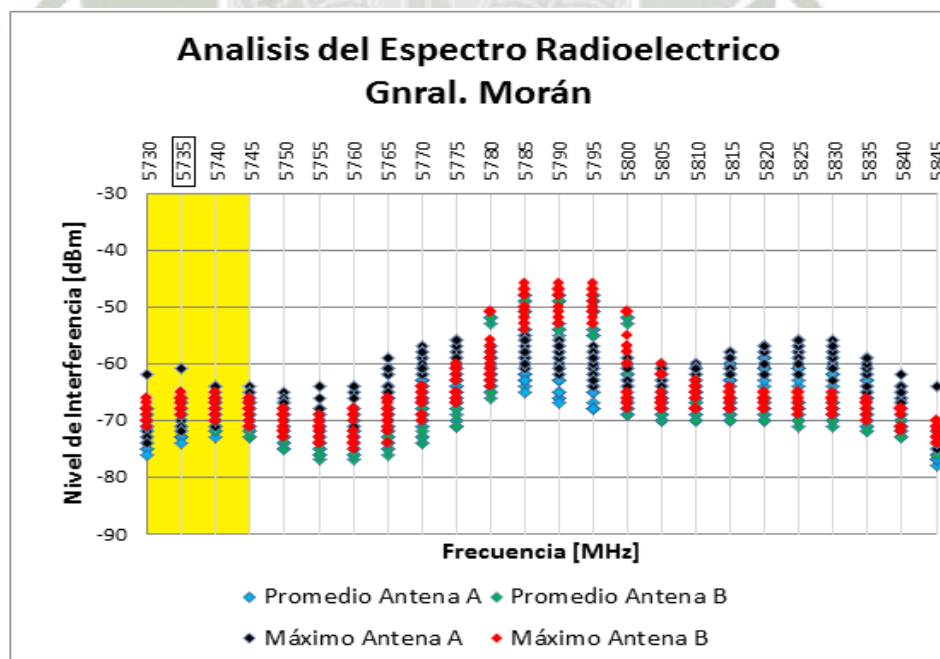


Figura [V.6] Grafico análisis de espectro radioeléctrico Gral. Moran – Cayma.

## 2. SIMULACIONES Y MEDICIONES

### 2.1 “THROUGHPUT” Y RSSI

Teniendo los resultados de las simulaciones y mediciones de los enlaces microondas, fueron luego consolidados en una tabla por escenario. Se muestran así los resultados que nos ayudarán a analizar los correspondientes “throughput” y RSSI.

La estructura de las tablas por escenario es como se muestra en la Tabla [V.1]. Se puede apreciar que esta última se divide en tres grandes grupos, que son:

**Datos de los escenarios:** Donde tenemos los datos teóricos correspondientes a los escenarios, dentro de los cuales se tienen el PIRE (36dBm y 39dBm), el ancho de banda del canal, la velocidad de bit, las modulaciones, el FEC y la sensibilidad. También se considera "el peor Fresnel" pues, aunque no es en realidad un valor teórico ya que se obtuvo de las simulaciones, por motivos de espacio es agrupado aquí.

**Indicador de Intensidad de la Señal de Recepción (RSSI):** Comprende los datos de RSSI simulado, medido, el margen de desvanecimiento o “Fade Margin”, y una comparación entre los resultados del RSSI simulado y medido (que es la diferencia entre el valor simulado y el valor medido), de ambas sedes que conforman el enlace microondas.

**“Throughput”:** De igual manera, abarca los datos del “throughput” simulado, medido y una comparación entre los resultados del “throughput” simulado y medido (que es el porcentaje de reducción calculado por

$\frac{\text{Throughput Simulado} - \text{Throughput Medido}}{\text{Throughput Simulado}} \times 100$ ), para ambas sedes que conforman

el enlace microondas.

Adicionalmente se tienen los nombres de los escenarios y el porcentaje del enlace activo, el cual -como se describió en el Capítulo IV- se calculó con la fórmula

$\frac{\# \text{ de muestras con el Enlace Activo}}{500} \times 100$ .

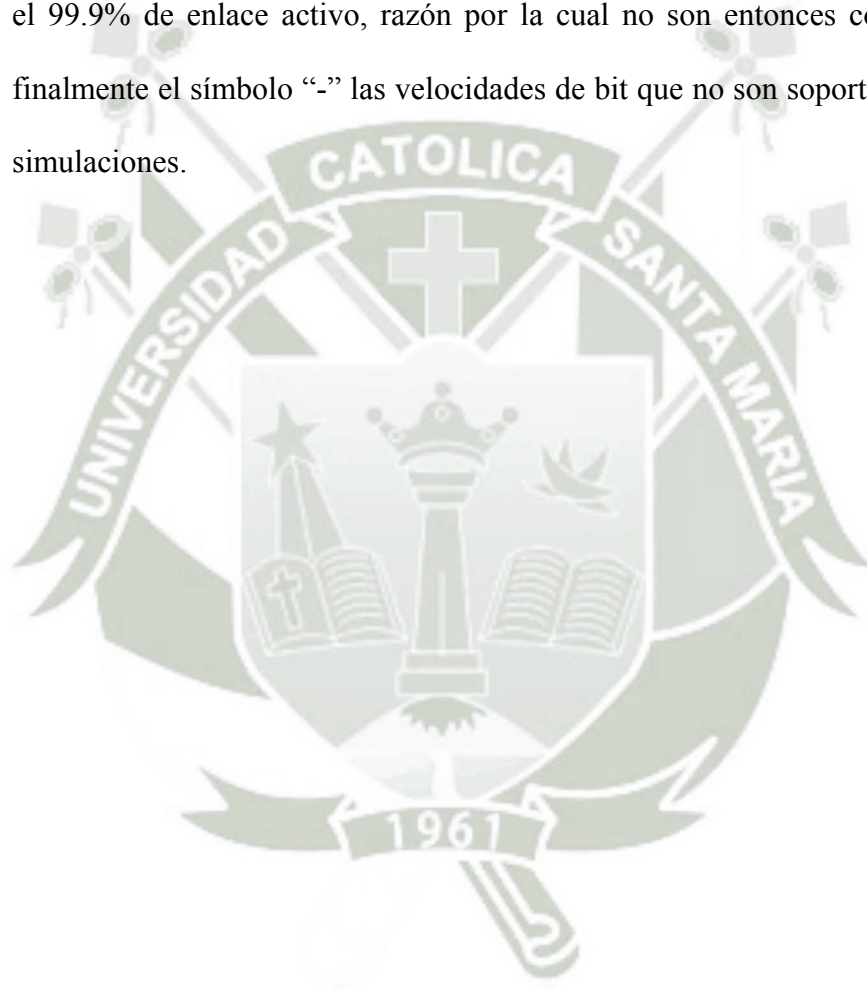
Escenario Sedes	Datos de los Escenarios	RSSI			“Throughput”		
		RSSI Simulaciones	RSSI Mediciones	Resultados Comparación RSSI	“Throughput” Simulaciones	“Throughput” Mediciones	Resultados Comparación “Throughput”
Nombre de los escenarios y las sedes	Datos teóricos de los escenarios	Resultados del RSSI de las simulaciones	Resultados del RSSI de las Mediciones	Resultados de la Comparación entre los RSS Medidos	Resultados del “Throughput” de las simulaciones	Resultados del “Throughput” de las Mediciones	Resultados de la Comparación entre los “Throughputs” Medidos

Tabla [V.1] Estructura de las tablas resumen

En el anexo VII se presentan las tablas resumen para los tres escenarios respecto al “throughput” y RSSI. Al efecto, se destaca lo siguiente:

- a) Escenario 1 – Tabla [1]: Enlace inalámbrico entre las sedes de Cayma y “La Salle”. La distancia es 3.51km, utilizándose asimismo transeptores Radwin 2000B y antenas externas de 28.5dBi.
- b) Escenario 2 – Tabla [2]: Enlace inalámbrico entre las sedes de Cayma y Jerusalén. Aquí la distancia es 2.8 km, empleándose igualmente transeptores Radwin 2000B y, a diferencia del escenario anterior, antenas integradas de 15dBi.
- c) Escenario 3 – Tabla [3]: Enlace inalámbrico entre las sedes de Cayma y General Morán. La distancia es ahora de 2.9 km, usándose igualmente transeptores Radwin 2000B y antenas integradas de 15dBi

En la evaluación de resultados sólo se consideran las velocidades de bit cuyo porcentaje de enlace activo cumpla con el 99.9%. En las Tablas [V.2], [V.3] y [V.4] se tienen, en cada caso, el respectivo resumen de las velocidades de bit que serán analizadas para los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente. De otro lado, se resalta el hecho de que en dichas Tablas el símbolo “√” representa las velocidades de bit objeto a evaluación; el símbolo “X” las velocidades que no cumplieron con el 99.9% de enlace activo, razón por la cual no son entonces consideradas; y finalmente el símbolo “-” las velocidades de bit que no son soportadas según las simulaciones.



SCENARIO 1										
			CANAL 20			CANAL 10			CANAL 5	
MODULACION	FEC	VEL DE BIT	36 PIRE	39 PIRE	VEL DE BIT	36 PIRE	39 PIRE	VEL DE BIT	36 PIRE	39 PIRE
QPSK	0.5	26	√	√	13	√	√	6.5	√	√
QPSK	0.75	39	√	√	19.5	√	√	9.75	√	√
16QAM	0.5	52	√	√	26	√	√	13	√	√
16QAM	0.75	78	X	√	39	√	√	19.5	√	√
64QAM	0.66	104	X	X	52	√	√	26	√	√
64QAM	0.75	117	X	X	58.5	X	√	29.25	X	√
64QAM	0.83	130	X	X	65	X	X	32.5	X	X
Adaptativa			√	√		√	√		√	√

Tabla [V.2] Resumen de velocidades de bit del Escenario 1

ESCENARIO 2										
			CANAL 20			CANAL 10			CANAL 5	
MODULACION	FEC	VEL DE BIT	36 PIRE	39 PIRE	VEL DE BIT	36 PIRE	39 PIRE	VEL DE BIT	36 PIRE	39 PIRE
QPSK	0.5	26	X	√	13	X	√	6.5	√	√
QPSK	0.75	39	X	X	19.5	X	√	9.75	X	√
16QAM	0.5	52	X	X	26	X	√	13	X	√
16QAM	0.75	78	X	X	39	X	X	19.5	X	X
64QAM	0.66	104	-	-	52	-	-	26	X	X
Adaptativa			X	√		√	√		√	√

Tabla [V.3] Resumen de velocidades de bit del Escenario 2

ESCENARIO 3										
MODULACION	FEC	CANAL 20				CANAL 10			CANAL 5	
		VEL DE BIT	36 PIRE	39 PIRE	VEL DE BIT	36 PIRE	39 PIRE	VEL DE BIT	36 PIRE	39 PIRE
QPSK	0.5	26	X	X	13	X	✓	6.5	✓	✓
QPSK	0.75	39	X	X	19.5	X	✓	9.75	✓	✓
16QAM	0.5	52	X	X	26	X	✓	13	X	✓
16QAM	0.75	78	X	X	39	X	X	19.5	X	X
64QAM	0.66	104	-	-	52	-	-	26	X	X
Adaptativa			X	✓		✓	✓		✓	✓

Tabla [V.4] Resumen de velocidades de bit del Escenario 3



## 2.2 “DELAY”

Realizadas las mediciones en los tres escenarios propuestos, se procede a consolidar en la Tabla [V.5] los resultados obtenidos del “delay” para aquéllos.

Así, en la citada Tabla podemos hallar un “delay” promedio que representa la media aritmética de las 500 muestras y el porcentaje de paquetes ICMP recibidos, siendo que dentro de estos últimos, los paquetes que no obtuvieron respuesta, son entonces representados por 1000ms.<sup>49</sup>



<sup>49</sup> [http://technet.microsoft.com/es-es/library/cc732509\(v=ws.10\).aspx](http://technet.microsoft.com/es-es/library/cc732509(v=ws.10).aspx)

		ESCENARIO 1				ESCENARIO 2				ESCENARIO 3			
		CAYMA – “LA SALLE”				CAYMA - JERUSALÉN				CAYMA – GRAL. MORAN			
PIRE [dBm]	BW Canal [MHz]	Velocidad de Bit [Mbps]	Modulación	Valor “FEC” [k=]	“Delay” Promedio [ms]	Paquetes Recibidos	“Delay” Promedio [ms]	Paquetes Recibidos	“Delay” Promedio [ms]	Paquetes Recibidos			
36	20	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	44.33	100.00%	62.74	89.60%	49.16	95.60%			
		26	QPSK	1/2	5.39	100.00%	355.64	29.80%	320.52	45.40%			
		39		3/4	5.68	100.00%	340.98	42.00%	x	x			
		52	16QAM	1/2	6.58	100.00%	x	x	x	x			
		78		3/4	16.49	96.80%	x	x	x	x			
		104		2/3	169.07	41.80%	-	-	-	-			
	118	64QAM	3/4	432.66	23.40%	-	-	-	-				
	130		5/6	2059.92	19.00%	-	-	-	-				
	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	8.04	100.00%	27.89	100.00%	14.53	100.00%				
	13	QPSK	1/2	5.91	100.00%	90.08	85.20%	37.39	94.60%				
	19.5		3/4	5.12	100.00%	712.96	27.80%	284.57	53.40%				
	26	16QAM	1/2	5.78	100.00%	x	x	469.89	29.40%				
	39		3/4	6.08	100.00%	x	x	x	x				
	52		2/3	8.50	100.00%	-	-	-	-				
	58.5	64QAM	3/4	294.27	50.00%	-	-	-	-				
65		5/6	755.64	9.00%	-	-	-	-					
Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	7.15	100.00%	10.63	100.00%	22.79	100.00%					
6.5	QPSK	1/2	5.67	100.00%	12.00	100.00%	9.61	100.00%					
9.75		3/4	7.64	100.00%	32.11	95.60%	10.41	100.00%					
13	16QAM	1/2	6.97	100.00%	656.36	20.20%	278.23	53.60%					
19.5		3/4	6.85	100.00%	x	x	x	x					
26		2/3	9.97	100.00%	x	x	x	x					
29.25	64QAM	3/4	293.42	34.80%	-	-	-	-					
32.5		5/6	625.09	9.20%	-	-	-	-					

39	20	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	23.70	100.00%	7.58	100.00%	7.79	100.00%
		26	QPSK	1/2	5.40	100.00%	4.89	100.00%	11.94	98.40%
		39	QPSK	3/4	5.34	100.00%	35.36	93.20%	13.86	98.20%
		52	16QAM	1/2	5.39	100.00%	88.16	81.20%	62.40	94.80%
		78	16QAM	3/4	6.55	100.00%	x	x	x	x
	104	64QAM	2/3	53.63	72.00%	-	-	-	-	
	118	64QAM	3/4	187.13	69.00%	-	-	-	-	
	130	64QAM	5/6	3267.33	32.80%	-	-	-	-	
	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	5.36	100.00%	7.01	100.00%	7.28	100.00%	
	13	QPSK	1/2	5.33	100.00%	5.02	100.00%	7.72	100.00%	
19.5	QPSK	3/4	5.21	100.00%	4.95	100.00%	7.14	100.00%		
26	16QAM	1/2	5.02	100.00%	7.88	100.00%	10.08	100.00%		
39	16QAM	3/4	5.01	100.00%	783.83	13.40%	x	x		
52	64QAM	2/3	8.50	100.00%	-	-	-	-		
58.5	64QAM	3/4	8.85	100.00%	-	-	-	-		
65	64QAM	5/6	128.04	90.20%	-	-	-	-		
Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	8.43	100.00%	15.71	100.00%	12.47	100.00%		
6.5	QPSK	1/2	5.60	100.00%	8.82	100.00%	20.93	100.00%		
9.75	QPSK	3/4	7.64	100.00%	6.54	100.00%	23.13	100.00%		
13	16QAM	1/2	6.57	100.00%	5.79	100.00%	11.04	100.00%		
19.5	16QAM	3/4	6.43	100.00%	513.83	23.80%	195.64	64.40%		
26	64QAM	2/3	7.21	100.00%	x	x	x	x		
29.25	64QAM	3/4	9.80	100.00%	-	-	-	-		
32.5	64QAM	5/6	603.16	24.80%	-	-	-	-		

Tabla [V.5] Resumen de mediciones de los escenarios 1, 2 y 3 respecto al “delay”

# CAPÍTULO VI: EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Habiéndose ejecutado un extenso trabajo de simulaciones y mediciones para lograr evaluar el performance, a continuación se presenta la evaluación de los resultados obtenidos para los tres escenarios.

En tal sentido, dichos resultados se dividen en dos: Una primera parte en la se describen los resultados conseguidos del análisis de espectro; y en la segunda, los resultados obtenidos de la evaluación de performance. Esta última, a su vez, se divide en dos partes de manera tal que en la primera sub-parte se detallan los resultados repetitivos encontrados en todos los escenarios; y en la segunda, los respectivos resultados más detallados por escenario y PIRE.

## 1. ANÁLISIS DE ESPECTRO

Se realiza el análisis de los resultados obtenidos por el análisis de espectro, ello por cada enlace microondas y sede.

Dentro de tal perspectiva, para analizar adecuadamente tales resultados del estudio de radiofrecuencia, es necesario conocer los rangos de nivel de interferencia, siendo los siguientes:

- a) En el rango de -120 dBm a -80 dBm → Nivel de Interferencia Baja
- b) En el rango de -80 dBm a -70 dBm → Nivel de Interferencia Media
- c) En el rango de -70 dBm a -30 dBm → Nivel de Interferencia Alta

Se describen, a continuación, los resultados obtenidos del análisis de espectro:

- a) Como la banda de 5.8 GHz está canalizada en canales de 5 MHz, al usar un mayor ancho de banda existe una menor probabilidad de que se tenga interferencia constante. Ello se debe a que para un ancho de 20 MHz hay cuatro canales de 5MHz, con posibles diferentes interferencias; en cambio, en un ancho de banda de 5 MHz sólo hay un canal de 5 MHz, con interferencia constante.
- b) Para equipos con tecnología MIMO se debe realizar el análisis de espectro para la polarización vertical y horizontal independientemente, esto debido a que en dicha tecnología en realidad son dos los equipos que transmiten en forma igualmente independiente.

## 1.1 ESCENARIO 1

Frecuencia central en 5755 MHz

**Sede Cayma (Figura [V.1]):**

- a) Hay una interferencia media en la frecuencia 5745 MHz. Tenemos que para la antena horizontal, su máximo es -64 dBm y su promedio es -71dBm, mientras que para la antena vertical el máximo es -70 dBm y -72 dBm el promedio.
- b) Existe una interferencia media en la frecuencia 5750 MHz. Así, para la antena horizontal su máximo es -64 dBm y su promedio -71dBm, en tanto que para la antena vertical -71 dBm es su máximo y su promedio -72 dBm.
- c) En la frecuencia 5755 MHz, hay una interferencia media. Ciertamente, para la antena horizontal su máximo y su promedio es -68 dBm y -71dBm respectivamente; en cambio, para la antena vertical el máximo es -71 dBm y el promedio -73 dBm.

- d) Tratándose de la frecuencia 5760 MHz, existe también una interferencia media, teniéndose que: Para la antena horizontal su máximo es -72 dBm y su promedio es -74dBm, mientras que para la antena vertical el máximo es -70 dBm y el promedio -72 dBm.
- e) Finalmente, hay una interferencia alta en la frecuencia 5765 MHz, habida cuenta que tratándose de la antena horizontal, su máximo es -64 dBm y su promedio es -68dBm y en relación a la antena vertical, su máximo y promedio son -67 dBm y -70 dBm, respectivamente.

**Sede “La Salle” (Figura [V.2]):**

- a) Se verifica una interferencia alta en la frecuencia 5745 MHz. Así, tenemos que para la antena horizontal, su máximo es -45 dBm y su promedio -46 dBm; mientras que para la antena vertical, el máximo y promedio son -57 dBm y -60 dBm, respectivamente.
- b) Tratándose de la frecuencia 5750 MHz, hay una interferencia alta. Efectivamente, para la antena horizontal su máximo es -46 dBm y su promedio -48 dBm; en cambio, -60 dBm y -62 dBm son el máximo y promedio, respectivamente, para la antena vertical.
- c) Existe una interferencia alta en la frecuencia 5755 MHz: Siendo el máximo -50 dBm y el promedio -52 dBm para la antena horizontal, respectivamente; en la vertical, su máximo es -60 dBm y su promedio -63 dBm.
- d) La interferencia es alta en la frecuencia 5760 MHz, siendo que para la antena horizontal su máximo es -53 dBm y su promedio -57 dBm; en cambio, los valores máximo y promedio para la antena vertical son de -57 dBm y -63 dBm respectivamente.

- e) Hay una interferencia alta en la frecuencia 5765 MHz. Respecto de la antena horizontal, su máximo es -54 dBm y su promedio -60 dBm, mientras que en relación a la antena vertical, su máximo es -58 dBm y su promedio -63 dBm.

## 1.2 ESCENARIO 2

Frecuencia Central en 5735 MHz

**Sede Cayma (Figura [V.3]):**

- a) En la frecuencia 5730 MHz hay una interferencia alta. Para la antena horizontal, su máximo es -63 dBm y su promedio -68 dBm, mientras que tratándose de la antena vertical, el máximo y promedio son -66 dBm y -69 dBm, respectivamente.
- b) La interferencia es igualmente alta en la frecuencia 5735 MHz: Respecto de la antena horizontal, su máximo y promedio son, respectivamente, -61 dBm y -66 dBm. En relación a la antena vertical, su máximo es -64 dBm y su promedio es -67 dBm.
- c) Es también alta la interferencia en la frecuencia 5740 MHz, habida cuenta que: Para la antena horizontal, su máximo es -62 dBm y su promedio -66 dBm. Y para la antena vertical, -64 dBm y -67 dBm son su máximo y promedio, respectivamente.
- d) Lo propio ocurre en la frecuencia 5745 MHz, pues la interferencia es alta. Así tenemos que para la antena horizontal, su máximo es -63 dBm y su promedio es -66 dBm; mientras que para la vertical, su máximo es -66 dBm y su promedio -69 dBm.

**Sede Jerusalén (Figura [V.4]):**

- a) Se verifica baja interferencia en la frecuencia 5730 MHz. Ciertamente, se tiene que el máximo y promedio para la antena horizontal, son -77 dBm y -82 dBm, respectivamente. Tratándose de la antena vertical, su máximo es -80 dBm y su promedio -82 dBm.
- b) En la frecuencia 5735 MHz se verifica una interferencia media: Para la antena horizontal, su máximo es -73 dBm y su promedio -77 dBm; en cambio, -77 dBm y -80 dBm son el máximo y promedio para la antena vertical, respectivamente.
- c) En la frecuencia 5740 MHz se constata igualmente una interferencia media: Ciertamente, el máximo y promedio para la antena horizontal, son -72 dBm y -76 dBm, respectivamente, y tratándose de la antena vertical, su máximo es -76 dBm y su promedio -80 dBm.
- d) Lo mismo ocurre en la frecuencia 5745 MHz, en la que también hay una interferencia media. Tenemos así que tratándose de la antena horizontal, -73 dBm es su máxima y su promedio es -76 dBm; y respecto de la antena vertical, -74 dBm y -79 dBm son su máximo y promedio, respectivamente.

**1.3 ESCENARIO 3**

Frecuencia Central en 5735 MHz

**Sede Cayma (Figura [V.5]):**

- a) Hay una interferencia alta en la frecuencia 5730 MHz. Respecto de la antena horizontal, su máximo es -66 dBm y su promedio -68 dBm, mientras que para la antena vertical, el máximo es -62 dBm y el promedio -63 dBm.

- b) También es alta la interferencia en la frecuencia 5735 MHz: Su máxima y promedio son -64 dBm y -66 dBm, respectivamente, para la antena horizontal. Tratándose de la antena vertical, su máximo es -60 dBm y su promedio -62 dBm.
- c) En la frecuencia 5740 MHz, también hay una interferencia alta. Tenemos que para la antena horizontal, su máximo es -63 dBm y -67 dBm su promedio. En relación a la antena vertical, el máximo es -64 dBm y su promedio -67 dBm.
- d) Existe una interferencia también alta tratándose de la frecuencia 5745 MHz: Para la antena horizontal, su máximo y promedio son -59 dBm y -65 dBm, respectivamente. Respecto de la antena vertical, su máximo es -65 dBm y su promedio -67 dBm.

**Sede General Morán (Figura [V.6]):**

- a) Existe interferencia alta en la frecuencia 5730 MHz. Para la antena horizontal, su máximo es -62 dBm y su promedio -70 dBm. Tratándose de la antena vertical, su máximo y promedio son -65 dBm y -66 dBm respectivamente.
- b) En la frecuencia 5735 MHz, la interferencia también es alta: Tenemos que para la antena horizontal, su máximo es -61 dBm y su promedio -68 dBm, mientras que para la antena vertical, el máximo es -64 dBm y el promedio -65 dBm.
- c) Hay una interferencia alta en la frecuencia 5740 MHz, teniéndose que para la antena horizontal su máximo es -63 dBm y su promedio es -67 dBm. Para la antena vertical su máximo es -64 dBm y su promedio es -65 dBm.
- d) Hay una interferencia alta en la frecuencia 5745 MHz. Tenemos así que, para la antena horizontal, su máximo es -63 dBm y su promedio -67 dBm; mientras

que para la antena vertical, -65 dBm y -66 dBm son su máximo y promedio, respectivamente.

## 2. EVALUACIÓN DE PERFORMANCE

Se detalla, a continuación, lo obtenido como consecuencia de la respectiva evaluación de resultados, tomando en cuenta las mediciones que alcanzaron el 99.9% de enlace activo (Tabla [V.5], [V.6], [V.7]). Inicialmente se presentan los resultados que son repetitivos en los 3 escenarios.

- a) El “throughput” medido es menor que el obtenido en la simulación, porque el RSSI igualmente medido es inferior que el simulado, lo que conlleva a un margen de desvanecimiento menor. Esto se debe a las interferencias del canal de comunicación medias y altas.
- b) En las mediciones, cuando se obtiene un margen de desvanecimiento mayor, el “throughput” medido es más cercano al simulado. La razón es que en las simulaciones de “throughput” de los enlaces, no se consideran los desvanecimientos, y cuando el RSSI es mucho mayor que la sensibilidad del receptor el enlace está protegido contra los desvanecimientos y los resultados serán más cercanos a la simulación.
- c) El valor del margen de desvanecimiento de 6dB en la simulación del “throughput”, no es el adecuado. Se debe a que los resultados obtenidos están por debajo de los esperados, tanto en “throughput” como en RSSI, esto tratándose de enlaces microondas con distancias superiores a 2.5km, las que, por cierto, representan una distancia común de los enlaces dentro de una área metropolitana.

- d) El lado del enlace de microondas que tiene un mejor margen de desvanecimiento presenta un mayor porcentaje de reducción de “throughput”.  
La causa de esto está dada por el hecho de que, al tener un mejor margen de desvanecimiento (igualmente un mejor RSSI), el otro extremo será capaz de generar un mayor “throughput”.
- e) Cuando hay una mayor interferencia en el canal de comunicación, el margen de desvanecimiento disminuye, lo cual es atribuible a los desvanecimientos selectivos de frecuencia.
- f) La modulación adaptativa es la más disponible en los tres escenarios.  
Efectivamente, ello es debido a que el enlace permanece activo en mayor porcentaje de tiempo.
- g) La modulación adaptativa es la más efectiva en “throughput”, lo que ocurre porque este mecanismo de modulación estima el canal en el receptor y alimenta tal estimación hacia el transmisor, de modo que el esquema de transmisión se puede adaptar a las características del canal y, de esta forma, puede asimismo ser más efectivo en “throughput”.
- h) En un enlace microondas que tenga diferentes valores del margen de desvanecimiento en sus lados, ocurre que el mecanismo de modulación adaptativa estimará esquemas de modulación distintos para cada extremo y, por tanto, el enlace será asimétrico. Ciertamente, es gracias a estas características que es capaz de utilizar un esquema de modulación con un FEC determinado en un lado y uno distinto en el otro.
- i) Respecto de la evaluación de resultados del “delay”, no se obtuvieron resultados coherentes. La causa radica en que en el “delay” varían dos

parámetros: El primero está constituido por los desvanecimientos del canal de comunicación, pues viajan con multi-trayectoria y las sub-portadoras llegan con diferentes tiempos; y el segundo es que la tarjeta de red tiene que recomponer los datos de las sub-portadoras con presencia del tráfico del enlace microondas. Para determinar porque el valor del “delay” aumenta o disminuye, se requiere comparar los datos logrados en un instante determinado con los datos del RSSI obtenidos. En tal sentido, sucede que ello no fue posible debido a que el “delay” fue conseguido con el "comando ping" (Protocolo ICMP) que arroja resultados en milisegundos y el RSSI fue registrado usando el SNMPc, en el cual como mínimo se puede registrar una muestra por segundo. Por tanto, no se les puede comparar, ya que sería necesario para ello utilizar otro instrumento. Como resultado de lo dicho, en el presente estudio no se tomará en cuenta el “delay” y, en todo caso, se proyectará para un trabajo futuro.

- j) El incremento de “throughput” al pasar de un ancho de banda de 5MHz a otro de 10MHz o de 10MHz a 20MHz, es en más del 100%. Esto se debe a que los enlaces microondas cuentan con la tecnología MIMO, la que nos permite tener una doble transmisión con, a su vez, doble ancho de banda.
- k) El FEC se hace más efectivo en los esquemas de modulación de mayor velocidad de bit, pues estos esquemas requerirán un mejor margen de desvanecimiento para cumplir con la sensibilidad requerida. De no tener un buen margen, los mecanismos del FEC corregirán los errores y mantendrán el enlace activo.

- l) No es posible obtener un adecuado performance siguiendo las normas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones relativas al uso de 36dBm de PIRE. Debido a que los niveles de interferencia electromagnética son elevados y no se logra el margen de desvanecimiento apropiado para alcanzar el esquema de modulación adecuado, esto para enlaces microondas cuya distancia supere los 2.5 km.
- m) El aumentar la potencia en 3dBm permite utilizar mayores velocidades de bit, pues se mejora el margen de desvanecimiento, permitiendo así cumplir con la sensibilidad requerida para el empleo de velocidades de bit más elevadas.
- n) Con una antena externa directiva se obtiene un mejor performance que con la antena integrada “patch”, lo que ciertamente se pudo comprobar con la evaluación de resultados entre el escenario 1 y los escenarios 2 y 3.

Los resultados de la evaluación obtenidos para los valores de PIRE de 36 dBm y 39 dBm, en los tres escenarios, así como las comparaciones de los mismos, se explicitan a continuación.

## 2.1 EVALUACIÓN ESCENARIO 1

Se acotan las siguientes características:

- a) Antena directiva externa parabólica de 28.5 dBi.
- b) Interferencia del canal de comunicación: Alta

Se obtienen los siguientes resultados repetitivos, gracias a la evaluación del escenario 1:

- a) En la modulación QPSK comparando el “throughput” entre los FEC 1/2 y 3/4, tenemos que al aumentar el FEC de 1/2 a 3/4 el “throughput” tiene un

incremento del 50% , debido a que QPSK es una modulación de baja velocidad de bit, en este caso el FEC no es efectivo.

- b) La modulación adaptativa escoge la velocidad de bit más disponible que llega al “throughput” máximo del equipo.
- c) El enlace con FEC menor tiene un porcentaje de reducción menor, debido a que el enlace es más robusto (es más inmune a las interferencias) y se acerca más a lo simulado.

### **2.1.1 CON 36dBm DE PIRE**

Las mediciones realizadas con un ancho de banda de canal de 20Mhz cumplieron con alcanzar el 99.9% de enlace activo con las modulaciones: QPSK FEC 1/2, 3/4, 16QAM FEC 1/2 y adaptativa. Con un ancho de banda de canal de 10Mhz es posible el enlace con las modulaciones: QPSK FEC 1/2, 3/4, 16QAM FEC 1/2, 3/4, 64QAM FEC 2/3 y adaptativa. Y con el ancho de banda de 5Mhz es posible el enlace con las modulaciones QPSK FEC 1/2, 3/4, 16QAM FEC 1/2, 3/4, 64QAM FEC 2/3 y adaptativa.

#### **2.1.1.1 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 20 MHZ**

- a) En las modulaciones 16QAM FEC 3/4, 64QAM FEC 2/3, 3/4, 5/6 se obtuvo valores menores a 99.9% de enlace activo, debido a que el RSSI no alcanza a la sensibilidad mínima.
- b) La modulación adaptativa escoge la modulación más disponible que tiene el mayor “throughput” que en este caso es 16QAM FEC 1/2, cuando debería escoger 16QAM FEC 3/4.

### 2.1.1.2 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 10 MHZ

- a) En la modulación 16QAM comparando el “throughput” entre los FEC 1/2 y 3/4, tenemos que: Al aumentar el FEC de 1/2 a 3/4 el “throughput” tiene un incremento de 23.9% en Cayma y 50% en “La Salle”. Debido a que la modulación 16 QAM tiene una velocidad de bit más alta haciendo el FEC más efectivo.
- b) En la modulación 64QAM FEC 3/4, 5/6 se obtuvo valores menores a 99.9% de enlace activo, debido a que el RSSI no alcanza a la sensibilidad mínima.
- c) La modulación adaptativa escoge la modulación más disponible que tiene el mayor “throughput” que en este caso es 64QAM FEC 2/3, cuando debería escoger 64QAM FEC 3/4.

### 2.1.1.3 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 5MHZ

- a) En la modulación 16QAM comparando el “throughput” entre los FEC 1/2 y 3/4, tenemos que: Al aumentar el FEC de 1/2 a 3/4 el “throughput” tiene un incremento de 41.7% en Cayma y 52.17% en “La Salle”. Debido a que se tiene un ancho de banda menor es más robusto y por tanto el FEC no es efectivo.
- b) En la modulación 64QAM FEC 3/4, 5/6 se obtuvo valores menores a 99.9% de enlace activo, debido a que el RSSI no alcanza a la sensibilidad mínima.
- c) La modulación adaptativa escoge modulación más disponible que tiene el mayor “throughput” que en este caso es 64QAM FEC 2/3, cuando debería escoger 64QAM FEC 3/4.

#### 2.1.1.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS ANCHOS DE BANDA DE CANAL DE 5, 10 Y 20 MHZ

- a) Comparando los 3 anchos de banda de canal tenemos que: El canal de 10MHz es el que tiene el mayor porcentaje de reducción de “throughput”, seguido por el canal de 20Mhz y el canal de 5Mhz. En consecuencia el canal de 10 MHz sería el más afectado por el medio, esto debido a que el canal de 10 MHz tiene 2 canales de 5 MHz donde si uno es interferido le afecta el 50%; en cambio para uno de 20 MHz que tiene 4 canales de 5MHz si se interfiere uno de ellos será afectado solo el 25%; y finalmente para un ancho de banda de 5MHz solo tiene un canal de 5MHz y es más fácil colocarlo en las frecuencias menos interferidas.
- b) El incremento en “throughput” entre los canales de 5, 10 y 20 MHz con la modulación QPSK y FEC 1/2 es:
- a.1) En Cayma: del canal de 5Mhz a 10Mhz hay un incremento del 179.1% y del canal 10Mhz a 20Mhz hay un incremento del 136.4%.
  - b.2) En “La Salle”: del canal de 5Mhz a 10Mhz hay un incremento del 185.4% y del canal 10Mhz a 20Mhz hay un incremento del 137.4%.
- c) El incremento en “throughput” entre los canales de 5, 10 y 20 MHz con la modulación 16QAM y FEC 1/2 es:
- c.1) En Cayma: del canal de 5Mhz a 10Mhz hay un incremento del 187.95% y del canal 10Mhz a 20Mhz hay un incremento del 86.2%.
  - c.2) En “La Salle”: del canal de 5Mhz a 10Mhz hay un incremento del 174.6% y del canal 10Mhz a 20Mhz hay un incremento del 129.8%.

### 2.1.2 CON 39dBm DE PIRE

Las mediciones realizadas con un ancho de banda de canal de 20Mhz cumplieron con alcanzar el 99.9% de enlace activo con las modulaciones: QPSK FEC 1/2, 3/4, 16QAM FEC 1/2, 3/4 y adaptativa. Con un ancho de banda de canal de 10Mhz es posible el enlace con las modulaciones: QPSK FEC 1/2, 3/4, 16QAM FEC 1/2, 3/4, 64QAM FEC 2/3, 3/4 y adaptativa. Y con el ancho de banda de 5Mhz es posible el enlace con las modulaciones QPSK FEC 1/2, 3/4, 16QAM FEC 1/2, 3/4, 64QAM FEC 2/3, 3/4 y adaptativa.

#### 2.1.2.1 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 20 MHZ

- a) En la modulación 16QAM comparando el “throughput” entre los FEC 1/2 y 3/4, tenemos que: Al aumentar el FEC de 1/2 a 3/4 el “throughput” tiene un incremento de 20.4% en Cayma y 47% en “La Salle”. Debido a que la modulación 16 QAM tiene una velocidad de bit más alta haciendo más efectivo el FEC.
- b) En la modulación 64QAM FEC 2/3, 3/4, 5/6 se obtuvo valores menores a 99.9% de enlace activo, debido a que el RSSI no alcanza a la sensibilidad mínima.
- c) La modulación adaptativa escoge la modulación más disponible que tiene el mayor “throughput” que en este caso es 16QAM FEC 3/4.

#### 2.1.2.2 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 10 MHZ

- a) En la modulación 16QAM comparando el “throughput” entre los FEC 1/2 y 3/4, tenemos que: Al aumentar el FEC de 1/2 a 3/4 el throughput tiene un incremento de 43% en Cayma y 51% en “La Salle”. Debido a que la

modulación 16 QAM tiene una velocidad de bit más alta y el FEC se hace más efectivo.

- b) En la modulación 64QAM comparando el “throughput” entre los FEC  $2/3$  y  $3/4$ , tenemos que: Al aumentar el FEC de  $2/3$  a  $3/4$  el “throughput” tiene una disminución de 3.96% en Cayma y disminuye 4.20% en “La Salle”. Debido a que la modulación 64QAM es de alta velocidad de bit, es así, que se comprueba la efectividad del FEC.
- c) En la modulación 64QAM FEC  $5/6$  se obtuvo valores menores a 99.9% de enlace activo, debido a que el RSSI no alcanza a la sensibilidad mínima.
- d) La modulación adaptativa escoge la modulación más disponible que tiene el mayor “throughput” que en este caso es 64QAM FEC  $3/4$ .

### **2.1.2.3 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 5MHZ**

- a) En la modulación 16QAM comparando el “throughput” entre los FEC  $1/2$  y  $3/4$ , tenemos que: Al aumentar el FEC de  $1/2$  a  $3/4$  el “throughput” tiene un incremento de 42.8% en Cayma y 52.7% en “La Salle”. Debido a que se tiene un ancho de banda menor es más robusto y por tanto el FEC no es efectivo.
- b) En la modulación 64QAM comparando el “throughput” entre los FEC  $2/3$  y  $3/4$ , tenemos que: Al aumentar el FEC de  $2/3$  a  $3/4$  el “throughput” tiene una disminución de 17% en Cayma y aumenta 8% en “La Salle”. Debido a que la modulación 64QAM es de alta velocidad de bit se comprueba la efectividad del FEC.
- c) En la modulación 64QAM FEC  $5/6$  se obtuvo valores menores a 99.9% de enlace activo, debido a que el RSSI no alcanza a la sensibilidad mínima.

- d) La modulación adaptativa escoge la modulación más disponible que tiene el mayor “throughput” que en este caso es 64QAM FEC 2/3, cuando debería escoger 64QAM FEC 3/4.

#### **2.1.1.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS ANCHOS DE BANDA DE CANAL DE 5, 10 Y 20 MHZ**

- a) Se obtiene que el canal de 10MHz es el que tiene el mayor porcentaje de reducción de “throughput”, seguido por el canal de 20Mhz y el canal de 5Mhz, ello debido a que el canal de 10 MHz tiene 2 canales de 5 MHz, si uno es interferido le afecta el 50%; en cambio para uno de 20 MHz que tiene 4 canales de 5MHz, si se interfiere uno de ellos será afectado solo el 25%; y finalmente para un ancho de banda de 5MHz solo tiene un canal de 5MHz y es más fácil colocarlo en las frecuencias menos interferidas.
- b) El incremento en “throughput” entre los canales de 5, 10 y 20 MHz con la modulación QPSK y FEC 1/2 es:
- b.1) En Cayma: del canal de 5Mhz a 10Mhz hay un incremento del 182% y del canal 10Mhz a 20Mhz hay un incremento del 140%.
- b.2) En “La Salle”: del canal de 5Mhz a 10Mhz hay un incremento del 181% y del canal 10Mhz a 20Mhz hay un incremento del 100%.
- c) El incremento en “throughput” entre los canales de 5, 10 y 20 MHz con la modulación 16QAM y FEC 3/4 es:
- c.1) En Cayma: del canal de 5Mhz a 10Mhz hay un incremento del 177% y del canal 10Mhz a 20Mhz hay un incremento del 86.6%.
- c.2) En “La Salle”: del canal de 5Mhz a 10Mhz hay un incremento del 172.14% y del canal 10Mhz a 20Mhz hay un incremento del 124.41%.

### 2.1.3 COMPARACIÓN ENTRE LOS PIRE (36dBm y 39dBm)

- a) Haciendo una comparación entre los resultados obtenidos con un PIRE de 36dBm y un PIRE de 39dBm, tenemos con 39dBm un “throughput” más estable, y se puede percibir una mejora en la capacidad del “throughput”, no obstante esta mejora es más considerable en el lado de Cayma por ser el menos interferido.
- b) El “throughput” no aumenta considerablemente ya que un aumento de 36 dBm a 39 dBm no es suficiente para obtener un margen de desvanecimiento óptimo, para que así el enlace se haga inmune a los desvanecimientos.
- c) Para poder aumentar una velocidad de bit (a la siguiente) se requiere mejorar el margen de desvanecimiento en aproximadamente 3dBm o más.
- d) Con 39 dBm de PIRE la modulación adaptativa escoge una mayor velocidad de bit, obteniendo cierta mejora en “throughput” comparativamente con 36 dBm de PIRE.
- e) El incremento de 3dBm permitió alcanzar la modulación 16QAM FEC 3/4 en el canal de 20Mhz, la modulación 64QAM FEC 3/4 en el canal de 10Mhz, y la modulación 64QAM FEC 3/4 en el canal de 5Mhz. Debido a que mejora el margen de desvanecimiento.

## 2.2 EVALUACIÓN ESCENARIO 2

Se acotan las siguientes características:

- a) Con antena integrada tipo “patch” de 15.5 dBi.
- b) Interferencia del canal de comunicación: Media.

### **2.2.1 CON 36 dBm DE PIRE**

Las mediciones realizadas con todas las modulaciones con un ancho de banda de canal de 20Mhz no cumplieron con alcanzar el 99.9% de enlace activo, por tanto el enlace no es confiable. Con un ancho de banda de canal de 10Mhz solo es posible el enlace utilizando a modulación adaptativa. Y finalmente con el ancho de banda de canal de 5Mhz solo es posible el enlace con la modulación QPSK FEC 1/2 y adaptativa.

#### **2.2.1.1 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 20 MHZ**

Las mediciones realizadas con las modulaciones QPSK FEC 1/2, 3/4, 16QAM FEC 1/2 y adaptativa no cumplen con alcanzar el 99.9% de enlace activo, motivo por el cual no se realizó una evaluación de resultados.

#### **2.2.1.2 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 10 MHZ**

- a) Las mediciones realizadas con las modulaciones QPSK FEC 1/2, 3/4, no cumplen con alcanzar el 99.9% de enlace activo, debido a que el RSSI no alcanza a la sensibilidad mínima.
- b) La modulación adaptativa escoge la modulación más disponible, en este caso al no obtener datos con un porcentaje de enlace activo del 99.9% y no contar con una modulación activa a seleccionar, la modulación adaptativa utilizara la modulación BPSK FEC 1/2 que es la modulación de instalación.

#### **2.2.1.3 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 5MHZ**

- a) En las modulaciones QPSK FEC 3/4, 16QAM 1/2, se obtuvo valores menores a 99.9% de enlace activo, debido a que el RSSI no alcanza a la sensibilidad mínima.

- b) La modulación adaptativa escoge la modulación más disponible que tiene el mayor “throughput” que en este caso es QPSK FEC 1/2, cuando debería escoger 64QAM FEC 2/3.

#### **2.2.1.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS ANCHOS DE BANDA DE CANAL DE 5, 10 Y 20 MHZ**

Comparando los 3 anchos de banda de canal tenemos que: En el canal de 20MHz no es posible el enlace, por tanto solo comparemos el de 5 y 10 MHz, donde el que tiene el mayor porcentaje de reducción de “throughput” es el canal de 10Mhz seguido por el canal de 5Mhz.

#### **2.2.2 CON 39 dBm DE PIRE**

- a) Con un ancho de banda de canal de 20Mhz solo es posible el enlace con las modulaciones: QPSK FEC 1/2 y adaptativa ya que cumplieron con alcanzar el 99.9% de enlace activo. Con un ancho de banda de canal de 10Mhz solo es posible el enlace con las modulaciones: QPSK FEC 1/2, 3/4, 16QAM FEC 1/2 y adaptativa. Y con el ancho de banda de 5Mhz solo es posible el enlace con las modulaciones: QPSK FEC 1/2, 3/4, 16QAM FEC 1/2 y adaptativa.
- b) En la modulación QPSK comparando el “throughput” entre los FEC 1/2 y 3/4, tenemos que: Al aumentar el FEC de 1/2 a 3/4 el “throughput” tiene un incremento del 50%, ello debido a que QPSK es una modulación de baja velocidad de bit, en este caso el FEC no es efectivo.

##### **2.2.2.1 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 20 MHZ**

- a) Las mediciones realizadas con las modulaciones QPSK FEC 3/4, 16QAM FEC 1/2, no cumplen con alcanzar el 99.9% de enlace activo, debido a que el RSSI no alcanza a la sensibilidad mínima.

- b) La modulación adaptativa escoge la modulación más disponible la cual tiene el mayor “throughput” que en este caso es QPSK FEC 1/2, cuando debería escoger 16QAM FEC 3/4.

#### **2.2.2.2 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 10 MHZ**

- a) Las mediciones realizadas con la modulación 16QAM FEC 3/4 no cumplen con alcanzar el 99.9% de enlace activo, debido a que el RSSI no alcanza a la sensibilidad mínima.
- b) La modulación adaptativa escoge la modulación más disponible que tiene el mayor “throughput” que en este caso es 16QAM FEC 1/2, cuando debería escoger 16QAM FEC 3/4.

#### **2.2.2.3 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 5MHZ**

- a) Las mediciones realizadas con la modulación 16QAM FEC 3/4 no cumplen con alcanzar el 99.9% de enlace activo, debido a que el RSSI no alcanza a la sensibilidad mínima
- b) La modulación adaptativa escoge la modulación más disponible que tiene el mayor “throughput” que en este caso es 16QAM FEC 1/2, cuando debería escoger 16QAM FEC 3/4.

#### **2.2.2.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS ANCHOS DE BANDA DE CANAL DE 5, 10 Y 20 MHZ**

- a) Comparando los 3 anchos de banda de canal tenemos que: El canal de 10MHz es el que tiene el mayor porcentaje de reducción de “throughput”, seguido por el canal de 20Mhz y el canal de 5Mhz; ello debido a que el canal de 10 MHz

tiene 2 canales de 5 MHz, si uno es interferido le afecta el 50%; en cambio para uno de 20 MHz que tiene 4 canales de 5MHz, si se interfiere uno de ellos será afectado solo el 25%; y finalmente para un ancho de banda de 5MHz solo tiene un canal de 5MHz y es más fácil colocarlo en las frecuencias menos interferidas.

b) El incremento en “throughput” entre los canales de 5, 10 y 20 MHz con la modulación QPSK y FEC 1/2 es:

b.1) En Cayma: del canal de 5Mhz a 10Mhz hay un incremento del 185.6% y del canal 10Mhz a 20Mhz hay un incremento del 144.6%.

b.2) En Jerusalén: del canal de 5Mhz a 10Mhz hay un incremento del 184.7% y del canal 10Mhz a 20Mhz hay un incremento del 143.4%.

c) El incremento en “throughput” entre los canales de 5, 10 MHz con la modulación 16QAM y FEC 1/2 es:

c.1) En Cayma: del canal de 5Mhz a 10Mhz hay un incremento del 175.63%.

c.2) En Jerusalén: del canal de 5Mhz a 10Mhz hay un incremento del 157.4%.

No se considera el canal de 20MHz porque no alcanza la modulación 16QAM.

### 2.2.3 COMPARACIÓN ENTRE LOS PIRE (36dBm y 39dBm)

a) Haciendo una comparación entre los resultados obtenidos con los PIRE de 36dBm y 39dBm, tenemos con 39dBm un “throughput” más estable, y se puede percibir una mejora considerable en “throughput” en el lado de Jerusalén (más del 100%), que es el menos interferido.

b) El incremento de 3dBm permitió alcanzar las modulaciones QPSK FEC 1/2 y adaptativa en el canal de 20Mhz; las modulaciones QPSK FEC 1/2, 3/4 y

16QAM 1/2 en el canal de 10Mhz; y las modulaciones QPSK FEC 3/4 y 16QAM FEC 1/2 en el canal de 5Mhz. Debido a que mejora el margen de desvanecimiento.

- c) El “throughput” tiene un incremento interesante, ya que al incrementarse el PIRE en 3dBm, el margen de desvanecimiento aumenta dando principalmente una mayor robustez a los esquemas de modulación de baja velocidad de bit, lo que se traduce en cierta mejora de “throughput” dependiendo del valor de ancho de banda de canal; por el contrario dicho incremento aún no es suficiente para esquemas de modulación más exigentes.

### **2.3 EVALUACIÓN ESCENARIO 3**

Se acotan las siguientes características:

- a) Con antena integrada tipo “patch” de 15.5 dBi.
- b) Interferencia del canal de comunicación: Media

#### **2.3.1 CON 36 dBm DE PIRE**

Las mediciones realizadas con todas las modulaciones con un ancho de banda de canal de 20Mhz no cumplieron con alcanzar el 99.9% de enlace activo, por tanto el enlace no es confiable. Con un ancho de banda de canal de 10Mhz solo es posible el enlace con la modulación adaptativa. Y con el ancho de banda de 5Mhz solo es posible el enlace con la modulación QPSK FEC 1/2, 3/4 y adaptativa.

##### **2.3.1.1 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 20 MHZ**

Las mediciones realizadas con las modulaciones QPSK FEC 1/2 y adaptativa no cumplen con alcanzar el 99.9% de enlace activo, motivo por el cual no se realizó una evaluación de resultados.

### 2.3.1.2 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 10 MHZ

- a) Las mediciones realizadas con las modulaciones QPSK FEC 1/2, 3/4, 16QAM FEC 1/2 no cumplen con alcanzar el 99.9% de enlace activo, debido a que el RSSI no alcanza a la sensibilidad mínima.
- b) La modulación adaptativa escoge la modulación más disponible, en este caso al no obtener datos con un porcentaje de enlace activo del 99.9% y no contar con una modulación activa, la modulación adaptativa utilizara la modulación BPSK FEC 1/2 que es la modulación de instalación.

### 2.3.1.3 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 5MHZ

- a) En la modulación 16QAM FEC 1/2 se obtuvo valores menores a 99.9% de enlace activo, debido a que el RSSI no alcanza a la sensibilidad mínima.
- b) La modulación adaptativa escoge la modulación más disponible que tiene el mayor “throughput” que en este caso es QPSK FEC 3/4, cuando debería escoger 64QAM FEC 2/3.

### 2.3.1.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS ANCHOS DE BANDA DE CANAL DE 5, 10 Y 20 MHZ

Comparando los 3 anchos de banda de canal tenemos que: En el canal de 20MHz no es posible el enlace, por tanto, solo compararemos el de 5 y 10 MHz; donde el que tiene el mayor porcentaje de reducción de “throughput” es el canal de 10Mhz seguido por el canal de 5Mhz, esto debido a que el canal de 5MHz es más fácil colocarlo en las frecuencias menos interferidas.

### 2.3.2 CON 39 dBm DE PIRE

- a) Con un ancho de banda de canal de 20Mhz solo es posible en enlace con la modulación adaptativa ya que cumplió con alcanzar el 99.9% de enlace activo. Con un ancho de banda de canal de 10Mhz solo es posible el enlace con las modulaciones: QPSK FEC 1/2, 3/4, 16QAM FEC 1/2 y adaptativa. Y con el ancho de banda de 5Mhz solo es posible el enlace con las modulaciones QPSK FEC 1/2, 3/4, 16QAM FEC 1/2 y adaptativa.
- b) En la modulación QPSK comparando el “throughput” entre los FEC 1/2 y 3/4, tenemos que al aumentar el FEC de 1/2 a 3/4 el “throughput” tiene un incremento del 50%, debido a que QPSK es una modulación de baja velocidad de bit, en este caso el FEC no es efectivo

#### 2.3.2.1 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 20 MHZ

- a) Las mediciones realizadas con las modulaciones QPSK FEC 1/2, 3/4, 16QAM FEC 1/2 no cumplen con alcanzar el 99.9% de enlace activo, debido a que el RSSI no alcanza a la sensibilidad mínima.
- b) La modulación adaptativa escoge la modulación más disponible, en este caso al no obtener datos con un porcentaje de enlace activo del 99.9% y no contar con una modulación activa, la modulación adaptativa utilizara la modulación BPSK FEC 1/2 que es la modulación de instalación.

#### 2.3.2.2 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 10 MHZ

La modulación adaptativa escoge la modulación más disponible que tiene el mayor “throughput” que en este caso es 16QAM FEC 1/2, cuando debería escoger 16QAM FEC 3/4.

### 2.3.2.3 ANCHO DE BANDA DE CANAL DE 5MHZ

- a) Las mediciones realizadas con las modulaciones 16QAM FEC 3/4 no cumplen con alcanzar el 99.9% de enlace activo, debido a que el RSSI no alcanza a la sensibilidad mínima.
- b) La modulación adaptativa escoge la modulación más disponible que tiene el mayor “throughput” que en este caso es 16QAM FEC 1/2, cuando debería escoger 16QAM FEC 3/4.

### 2.3.2.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS ANCHOS DE BANDA DE CANAL DE 5, 10 Y 20 MHZ

- a) Comparando los 3 anchos de banda de canal tenemos que: El canal de 20MHz es el que tiene el mayor porcentaje de reducción de “throughput” seguido por el canal de 10Mhz y el canal de 5Mhz, ello debido a que: El canal de 20 MHz que tiene 4 canales de 5MHz, si se interfiere uno de ellos será afectado solo el 25%, pero la tener un mayor ancho de banda e interferencia constante resultara más afectado. El canal 10 MHz tiene 2 canales de 5 MHz, si uno es interferido le afecta el 50%. Y finalmente para un ancho de banda de 5MHz solo tiene un canal de 5MHz y es más fácil colocarlo en las frecuencias menos interferidas.
- b) El incremento en “throughput” entre los canales de 5, 10 y 20 MHz con la modulación QPSK y FEC 1/2 es:
  - b.2) En Cayma: del canal de 5Mhz a 10Mhz hay un incremento del 182.56%.
  - b.2) En Gral. Morán: del canal de 5Mhz a 10Mhz hay un incremento del 181.8%.

No se considera el canal de 20MHz porque no alcanza la modulación QPSK.

c) El incremento en “throughput” entre los canales de 5, 10 y 20 con la modulación 16QAM y FEC 1/2 es:

c.1) En Cayma: del canal de 5Mhz a 10Mhz hay un incremento del 167.27%.

c.2) En Gral. Morán: del canal de 5Mhz a 10Mhz hay un incremento del 121.43%.

No se considera el canal de 20MHz porque no alcanza la modulación 16QAM.

### 2.3.3 COMPARACIÓN ENTRE LOS PIRE (36dBm y 39dBm):

- a) Haciendo una comparación entre los resultados obtenidos con los PIRE de 36dBm y 39dBm, tenemos con 39dBm un “throughput” más estable, y se puede percibir una mejora considerable en “throughput” en el lado de Gral. Morán (más del 100%), que es el menos interferido.
- b) El incremento de 3dBm permitió alcanzar la modulación adaptativa en el canal de 20Mhz; las modulaciones QPSK FEC 1/2, 3/4, 16QAM FEC 1/2, en el canal de 10Mhz; y la modulación 16QAM FEC 1/2 en el canal de 5Mhz, debido a que mejora el margen de desvanecimiento.
- c) El “throughput” tiene un incremento interesante, ya que al incrementarse el PIRE en 3dBm, el margen de desvanecimiento aumenta dando principalmente una mayor robustez a los esquemas de modulación de baja velocidad de bit, lo que se traduce en cierta mejora de “throughput” dependiendo del valor de ancho de banda de canal; por el contrario dicho incremento aún no es suficiente para esquemas de modulación más exigentes.

## CONCLUSIONES

Como resultado de la evaluación del performance de un enlace microondas en la banda de 5.8 GHz en la ciudad de Arequipa, materia del presente trabajo de investigación, se extraen las siguientes conclusiones:

- 1° La evaluación de performance de un enlace microondas en la banda de 5GHz en nuestra ciudad, se consigue con las variables “throughput”, margen de desvanecimiento, corrección de errores (FEC), modulación y “delay”, así como con el factor instalación del enlace.
- 2° Es mediante la variable “throughput” que se consigue medir el performance de un enlace microondas.  
  
Con tal objeto, debe considerarse que para variar el “throughput” de un enlace microondas y poder evaluarlo, se requiere la modificación de las correspondientes “variables” y del “factor”, de la siguiente manera: *i)* Modulación, seleccionando al efecto entre los diferentes esquemas de modulación. *ii)* FEC, escogiendo entre las diversas tasas. *iii)* Margen de desvanecimiento, el cual varía según el RRSI obtenido. *iv)* Y tratándose del factor instalación del enlace, el mismo variará el performance cuando haya un mal alineamiento de ODU - Antenas y/o pérdidas por una instalación deficiente.
- 3° El margen de desvanecimiento es una variable que: *i)* Afecta el “throughput” estimado en cada lado de un enlace microondas. *ii)* Es además independiente en cada extremo del enlace, por presentar condiciones de canal distintas.

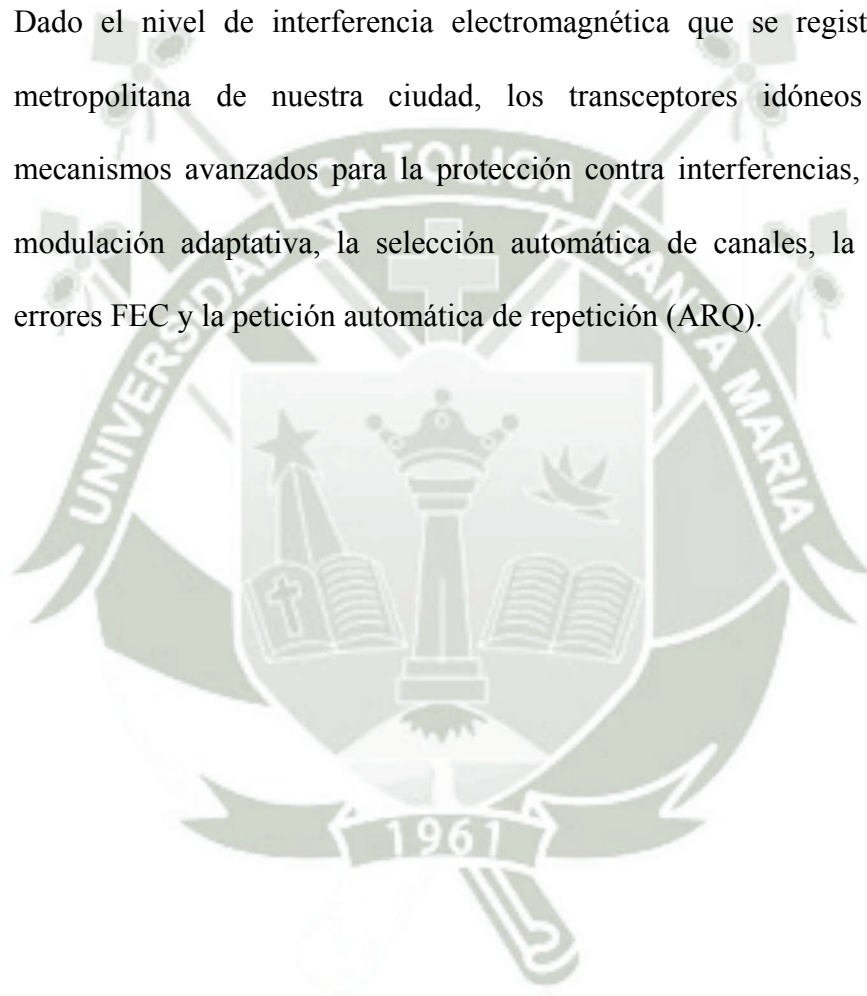
4° Siendo la modulación otra variable, al emplear esquemas de modulación que permitan una mayor velocidad de bit, dichos esquemas serán también más exigentes con las características del canal.

Tratándose de un canal con grandes desvanecimientos, corresponde utilizarse el esquema de modulación que cumpla con la sensibilidad mínima, siendo el mismo esquema para ambos extremos del enlace microondas. Situación distinta ocurre con la modulación adaptativa, la que resulta siendo más disponible y efectiva en “throughput” por ser capaz de adaptarse a las características del canal, de modo que puede estimar distintos esquemas de modulación con un FEC diferente para cada lado del enlace microondas, dependiendo de las relaciones señal a ruido que tengan los correspondientes lados.

5° Siendo el FEC una variable cuyos mecanismos corrigen errores y mantienen el enlace activo, en esquemas de modulación que permiten una mayor velocidad de bit, aquél se hace más efectivo, siendo que en Arequipa metropolitana -por tenerse un canal con grandes desvanecimientos- para obtener un “throughput” mayor y más estable empleando un esquema de modulación exigente, se debe utilizar una tasa de FEC menor.

6° Se determina que el método de implementación más adecuado para un enlace microondas, requiere: *i)* Realizar inicialmente un Estudio de Factibilidad que comprende los estudios preliminar, físico y de radio frecuencia. *ii)* Posteriormente, en la implementación propiamente dicha, se deben cumplir las prácticas de seguridad y la secuencia de instalación. Satisfechos estos dos requerimientos, se tendrá entonces un enlace microondas adecuado.

- 7° El uso de una “antena parabólica externa” es fundamental para la ciudad de Arequipa metropolitana, ya que mejora considerablemente el performance en comparación con el uso de una “antena integrada patch”, en la medida que cuenta con una mejor directividad; lo expuesto se determinó debido a que aunque se realizaron mediciones doblando la potencia a 39dBm este incremento fue ineficiente.
- 8° Dado el nivel de interferencia electromagnética que se registra en el área metropolitana de nuestra ciudad, los transceptores idóneos deben tener mecanismos avanzados para la protección contra interferencias, tales como la modulación adaptativa, la selección automática de canales, la corrección de errores FEC y la petición automática de repetición (ARQ).



## OBSERVACIONES

- 1° Al utilizarse un ancho de banda de canal de 20 MHz existe una menor probabilidad de presentarse una interferencia constante, ya que, la banda de 5.8GHz esta canalizada
- 2° a en canales de 5MHz. Por lo tanto, en 20MHz se tendría 4 canales de 5MHz, por el contrario el recurrir a un canal de 5MHz -de ancho de banda- observamos una interferencia constante por emplearse solamente un canal de 5MHz.
- 3° En el presente trabajo de investigación se determina 2 tipos de margen de desvanecimiento: i) Un valor de margen de desvanecimiento fijo que se ingresa manualmente en las simulaciones con el R-Planner, y ii) El margen de desvanecimiento que se obtiene de las mediciones realizadas.
- 4° Para obtener un “throughput” medido más cercano al simulado, se requiere considerar en la simulación un valor de margen de desvanecimiento esperado mayor a 6dB, en la medida que, las simulaciones del mencionado “throughput” con el R-Planner no consideran desvanecimientos. Lo expuesto para enlaces microondas con una distancia mayor de 2.5km.
- 5° Los resultados de evaluación de performance obtenidos de un enlace microondas en la banda de 5.8 Ghz, son solo para topologías “punto a punto” (PtP) no considerándose las tipo “punto a multipunto” (PtM).

## RECOMENDACIONES

- 1° Para implementar enlaces microondas en la ciudad de Arequipa es recomendable emplear “antenas parabólicas externas”, a fin de mejorar el performance considerando la mejor directividad que se obtiene.
- 2° Atendiendo a los resultados logrados con motivo del presente trabajo, se aconseja utilizar transeptores que cuenten con mecanismos avanzados de protección contra interferencias.
- 3° Dada la alta interferencia electromagnética encontrada y correlativa afectación del performance de los enlaces microondas que aquélla genera, se recomienda realizar estudios futuros del espectro radioeléctrico de la ciudad, así como analizar el PIRE de los diversos transeptores con la finalidad de asegurar que cumplan con la Resolución Ministerial No. 777-2005-MTC/03 o, de ser el caso, determinar si es necesaria una actualización de dicha regulación.

## TRABAJOS FUTUROS

- 1° Buscar y utilizar instrumentos de medición de las variables para la evaluación del performance que, como tales, permitan comparar las mediciones de las variables “throughput” y RSSI con la variable “delay”. Dicho cotejo será posible si se sincronizan las mediciones de las mencionadas variables, para así obtener todos datos medidos en el mismo instante.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Ahlin Lars, Zander Jens, Slimane Ben. “Principles of Wireless Communications”. Narayana Press, 2006.
2. Tomasi Wayne. “Sistemas de Comunicaciones Electrónicas”. Pearson Education, 4ta edición, 2003.
3. Manning Trevor. “Microwave Radio Transmission Desing Guide”, Artech House Microwave Library, 1999.
4. Brandon James Carroll. “CCNA Wireless Official Exam Certification Guide”, Cisco Press, 2009
5. Phillips Estelle; Derek PUGH. “La Tesis Universitaria”, PROFIT, 2008.
6. Project Management Institute (PMI). “Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK)”, Project Management Institute, 2009
7. CISCO CCNA v4.0. “Aspectos Básicos de Networking”, 2007.
8. Miranda José M.; Sebastián José L.; Sierra Manuel; Margineda José. “Ingeniería de Microondas Técnicas Experimentales”. Pearson Alhambra, 2002.
9. Freeman Roger L. “Radio System Desing for Telecommunications”, Jhon Wiley & Sons, 2007
10. Griffiths Jhon. “Radio Wave Propagation and Antennas”. Prentice Hall, 1986.
11. Proakis Jhon; Salehi Masoud. “Digital Communications”. McGraww-Hill Science/Engineering/Math, 5ta edición, 2007.
12. Saunders S. R. “Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems”. Wiley-Blackwell, 2da edición, 2007.

13. Rappaport Theodore.S. “Wireless Communications”. Prentice Hall, 2da edición, 2002.
14. Cajahuaringa Camaco Armando A. “Diseño de un Sistema WiMAX para una Zona Rural”. Tesis de grado presentada como requisito para obtener el título de Ing. Electrónico, UNI, 2009
15. Yáñez Arias Paulina C. “Estudio de los canales con desvanecimiento sobre redes fijas y móviles en sistemas de radio comunicación”, Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional de Ecuador, 2009.
16. Thontadharya H.J.; Shwetha D.; SubramanyaBhat M.S.; Devaraju J.T. “Simulation and Emulation Approach for the Performance”, International Journal of Computer Applications, vol. 44, Abril 2012.
17. Grewal Vinit; Sharma Ajay K. “Performance Evaluation of WiMAX Network with AMC and MCCDMA for Mobile Enviroments”, International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, Octubre 2012.
18. Sarkar Tapan K.; KimKyungjung; JiZhong; MedouriAbdellatif; Salazar Palma, Magdalena. “Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication”, IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 45, Junio 2003.
19. Yang H. C.; Alouini M. S.”Performance Analysis of Multibranch Switched Diversity Systems”. Communications, IEEE Transactions on vol. 51, 2003.
20. Alamouti S. M. “A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications”. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on vol. 16, 2002.

21. "USER MANUAL - RADWIN 2000 BROADBAND WIRELESS TRANSMISSION SYSTEM". Release 2.8.00.
22. "USER MANUAL - RADWIN 5000 POINT TO MULTIPOINT BROADBAND WIRELESS" Release 3.4.50.
23. "USER MANUAL AARONIA SPECTRAN ANALYZER", Version 1.21-D.
24. ITU-R 530. "Revisión de Error de Performance y Disponibilidad"
25. ITU-R F.1093-2. "Efectos de la Propagación Multitrayecto en el Diseño y Funcionamiento de los Sistemas Inalámbricos Fijos Digitales con Visibilidad Directa".
26. ITU-T G.827. "Parámetros y Objetivos de disponibilidad para Trayectos Digitales Internacionales de Extremo a Extremo de Velocidad Binaria Constante"
27. ITU-R F.302-3. "Limitación de las Interferencias Causadas por los Sistemas de Radioenlaces Transhorizonte"
28. UIT-R F.1705. "Análisis y Optimización de las Características de Error de los Sistemas Inalámbricos fijos Digitales a los Fines de la Puesta en Servicio y Mantenimiento".
29. IEEE 802.11 a/b/g/n. "Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specification".
30. IEEE 802.16m. "Air Interface for Broadband Wireless Access System".





Lima, sábado 5 de noviembre de 2005

**NORMAS REGIDAS** El Decum Pág. 303641

presentar un informe al Despacho Ministerial, con copia a la Oficina General de Administración del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, describiendo las acciones realizadas y los resultados obtenidos durante el viaje autorizado.

**Artículo 4º.-** La presente Resolución Ministerial no dará derecho a exoneración o liberación de impuestos o derechos aduaneros, cualquiera fuera su clase o denominación.

Regístrese, comuníquese y publíquese.

JOSÉ JAVIER ORTIZ RIVERA  
Ministro de Transportes y Comunicaciones

18681

**Autorizan viaje de Inspector de la Dirección General de Aeronáutica Civil a EE.UU., en comisión de servicios**

**RESOLUCIÓN MINISTERIAL  
Nº 773-2005-MTC/02**

Lima, 31 de octubre de 2005

**CONSIDERANDO:**

Que, la Ley Nº 27519 que regula la autorización de viajes al exterior de servidores y funcionarios públicos, en concordancia con sus normas reglamentarias aprobadas por Decreto Supremo Nº 047-2002-PCM, establece que para el caso de los servidores y funcionarios públicos de los Ministerios, entre otras entidades, la autorización de viaje se otorgará por Resolución Ministerial del respectivo Sector, la que deberá ser publicada en el Diario Oficial El Peruano con anterioridad al viaje, con excepción de las autorizaciones de viajes que no impliquen gastos al Estado;

Que, el Decreto de Urgencia Nº 015-2004 dispone que los viajes al exterior que impliquen gasto al Tesoro Público, de funcionarios, servidores públicos o representantes del Poder Ejecutivo, a que se refieren el primer y segundo párrafo del artículo 1º de la Ley Nº 27519, quedan prohibidos por el ejercicio fiscal 2005, prohibición que no es aplicable a los sectores Relaciones Exteriores y Comercio Exterior y Turismo, así como la Dirección de Aeronáutica Civil del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, en cuyos casos los viajes serán autorizados a través de resolución del Titular del Pliego respectivo, la misma que deberá ser publicada en el Diario Oficial El Peruano antes del inicio de la comisión de servicios;

Que, la Ley Nº 27261 - Ley de Aeronáutica Civil del Perú, establece que la Autoridad Aeronáutica Civil es ejercida por la Dirección General de Aeronáutica Civil como dependencia especializada del Ministerio de Transportes y Comunicaciones;

Que, la Dirección General de Aeronáutica Civil, a fin de cumplir con los estándares aeronáuticos internacionales establecidos en el Convenio de Chicago sobre Aviación Civil y poder mantener la calificación de Categoría "A" otorgada al Perú por la Organización de Aviación Civil Internacional, debe mantener un programa anual de vigilancia sobre la seguridad operacional a través de la ejecución de inspecciones técnicas a los explotadores aéreos en el país, basado en las disposiciones establecidas en el citado Convenio y en los estándares de la Organización de Aviación Civil Internacional;

Que, la empresa Wayra Perú S.A.C., con Carta Cart057\_05\_Ops, del 12 de octubre de 2005, en el marco del Procedimiento Nº 13 de la sección correspondiente a la Dirección General de Aeronáutica Civil (Evaluación de Personal), establecido en el Texto Único de Procedimientos Administrativos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, aprobado por Decreto Supremo Nº 008-2002-MTC, solicita a la Dirección General de Aeronáutica Civil, efectuar los chequeos técnicos en simulador de vuelo del equipo Fokker 100, en el Centro de Entrenamiento American Airlines de la ciudad de Fort Worth, a su personal aeronáutico

propuesto, durante los días 8, 9 y 10 de noviembre de 2005;

Que, conforme se desprende de los Recibos de Acotación Nº 29109 y 29110, la solicitante ha cumplido con el pago del derecho de tramitación correspondiente al Procedimiento a que se refiere el considerando anterior, ante la Dirección de Tesorería del Ministerio de Transportes y Comunicaciones;

Que, en tal sentido, los costos del respectivo viaje de inspección, están íntegramente cubiertos por la empresa solicitante del servicio, incluyendo el pago de los viáticos y la Tarifa Única de Uso de Aeropuerto;

Que, la Dirección de Seguridad Aérea de la Dirección General de Aeronáutica Civil, ha emitido la Orden de Inspección Nº 2030-2005-MTC/12.04-SDO designando al Inspector Ricardo Rafael Pazos Raygada, para realizar los chequeos técnicos en simulador de vuelo del equipo Fokker 100, en el Centro de Entrenamiento American Airlines, al personal aeronáutico propuesto por la empresa Wayra Perú S.A.C., en la ciudad de Fort Worth, Texas, Estados Unidos de América, durante los días 07 al 10 de noviembre de 2005;

Que, por lo expuesto, resulta necesario autorizar el viaje del referido inspector de la Dirección General de Aeronáutica Civil para que, en cumplimiento de las funciones que le asigna la Ley Nº 27261 y su Reglamento, pueda realizar los chequeos técnicos a que se contrae la Orden de Inspección Nº 2030-2005-MTC/12.04-SDO; De conformidad con la Ley Nº 27261, Ley Nº 27519, el Decreto de Urgencia Nº 015-2004 y el Decreto Supremo Nº 047-2002-PCM;

**SE RESUELVE:**

**Artículo 1º.-** Autorizar el viaje del señor Ricardo Rafael Pazos Raygada, Inspector de la Dirección General de Aeronáutica Civil del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, a la ciudad de Fort Worth, Texas, Estados Unidos de América, durante los días 7 al 10 de noviembre de 2005, para los fines a que se contrae la parte considerativa de la presente Resolución.

**Artículo 2º.-** El gasto que demande el viaje autorizado precedentemente, ha sido íntegramente cubierto por la empresa Wayra Perú S.A.C. a través de los Recibos de Acotación Nº 29109 y 29110, abonados a la Dirección de Tesorería del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, incluyendo las asignaciones por concepto de viáticos y tarifa por uso de aeropuerto, de acuerdo al siguiente detalle:

Viáticos	US\$ 880.00
Tarifa por Uso de Aeropuerto	US\$ 26.24

**Artículo 3º.-** Conforme a lo dispuesto por el Artículo 10º del Decreto Supremo Nº 047-2002-PCM, el inspector mencionado en el Artículo 1º de la presente Resolución Ministerial, dentro de los quince (15) días calendario siguientes de efectuado el viaje, deberá presentar un informe al Despacho Ministerial, con copia a la Oficina General de Administración del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, describiendo las acciones realizadas y los resultados obtenidos durante el viaje autorizado.

**Artículo 4º.-** La presente Resolución Ministerial no dará derecho a exoneración o liberación de impuestos o derechos aduaneros, cualquiera fuera su clase o denominación.

Regístrese, comuníquese y publíquese.

JOSÉ JAVIER ORTIZ RIVERA  
Ministro de Transportes y Comunicaciones

18678

**Establecen condiciones técnicas de servicios de telecomunicaciones y modifican el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias**

**RESOLUCIÓN MINISTERIAL  
Nº 777-2005-MTC/03**

Lima, 31 de octubre de 2005



**CONSIDERANDO:**

Que, mediante Resolución Ministerial N° 626-2004-MTC/15.03, de fecha '19' de agosto de 2004, se aprobó las condiciones de operación de los servicios cuyos equipos utilizan las bandas 902 - 928 MHz, 2 400 - 2 483,5 MHz, 5 150 - 5 250 MHz, 5 725 - 5 850 MHz;

Que, el artículo 28° del Texto Único Ordenado del Reglamento General de la Ley de Telecomunicaciones, aprobado por Decreto Supremo N° 027-2004-MTC, establece que están exceptuados de la clasificación de servicios de la Ley, del Reglamento y de los Reglamentos Específicos que se dicten, de contar con concesión, asignación del espectro radioeléctrico, autorización, permiso o licencia, las telecomunicaciones instaladas dentro de un mismo inmueble que no utilizan espectro radioeléctrico y no tienen conexión con redes exteriores y aquellos servicios cuyos equipos utilizan las bandas 902 - 928 MHz, 2 400 - 2 483,5 MHz, 5 150 - 5 250 MHz, 5 250 - 5 350 MHz y 5 725 - 5 850 MHz, entre otras bandas, transmiten en una potencia no superior a la señalada en dicho artículo;

Que, asimismo, el citado artículo establece que aquellos que hagan uso de las frecuencias indicadas deberán respetar las normas técnicas emitidas o que emita el Ministerio;

Que, la Nota P23 del Plan Nacional de Atribución de Frecuencias, aprobado mediante Resolución Ministerial N° 187-2005-MTC/03 establece que las bandas 902 - 928 MHz, 2 400 - 2 483,5 MHz, 5 150 - 5 250 MHz, están atribuidas a título secundario para los servicios fijo y/o móvil, público y/o privado. Aquellos que hagan uso de las frecuencias antes indicadas deberán sujetarse a la normativa establecida o que establezca el Ministerio;

Que, las Notas P82 y P83 del referido Plan establezcan que la banda 5 150 - 5 250 MHz está atribuida a título secundario para servicios fijo y/o móvil públicos y/o privados de telecomunicaciones para su uso en interiores y que la banda 5 250 - 5 350 MHz está atribuida a título secundario para los sistemas de acceso inalámbrico para la prestación de servicios públicos de telecomunicaciones fijos y/o móviles. Aquellos que hagan uso de las frecuencias antes indicadas deberán sujetarse a la normativa establecida o que establezca el Ministerio;

Que, con fecha 16 de agosto de 2005, se publicó en el Diario Oficial El Peruano, el proyecto de norma que otorga mayor flexibilidad para la operación de los equipos en las bandas 902 - 928 MHz, 2 400 - 2 483,5 MHz, 5 150 - 5 250 MHz, 5 250 - 5 350 MHz, 5 470 - 5 725 MHz y 5 725 - 5 850 MHz, habiéndose recibido y evaluado los comentarios de los interesados;

Que, el Comité Consultivo del Plan Nacional de Atribución de Frecuencias, mediante el Informe N° 012-2005-MTC-CCPNAF, recomienda modificar la Nota P83 del Plan Nacional de Atribución de Frecuencias y agregarla a los cuadros de atribución de frecuencias de las bandas 5 470 - 5 570 MHz, 5 570 - 5 650 MHz y 5 650 - 5 725 MHz;

Que, con la finalidad de promover el desarrollo de los servicios de telecomunicaciones y permitir la coexistencia de los servicios en determinadas bandas de frecuencias resulta necesario atribuir la banda 5 470 - 5 725 MHz a título secundario para los sistemas de acceso inalámbrico para la prestación de servicios públicos de telecomunicaciones fijos y/o móviles, otorgar mayor flexibilidad para la operación de los equipos en las bandas 902 - 928 MHz, 2 400 - 2 483,5 MHz y 5 725 - 5 850 MHz y establecer las condiciones técnicas para la operación en las bandas 5 150 - 5 250 MHz, 5 250 - 5 350 y 5 470 - 5 725 MHz;

Que, en tal sentido resulta necesario emitir las nuevas condiciones técnicas aplicables para los servicios cuyos equipos utilizan las bandas 902 - 928 MHz, 2 400 - 2 483,5 MHz, 5 150 - 5 250 MHz, 5 250 - 5 350 MHz, 5 470 - 5 725 MHz y 5 725 - 5 850 MHz y modificar el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias;

De conformidad con lo dispuesto en la Ley N° 27791 y los Decretos Supremos N°s. 013-93-TCC y 027-2004-MTC;

**SE RESUELVE:**

**Artículo 1°.-** Aprobar las condiciones de operación de los servicios cuyos equipos utilizan las bandas 902 -

928 MHz, 2 400 - 2 483,5 MHz, 5 150 - 5 250 MHz, 5 250 - 5 350 MHz, 5 470 - 5 725 MHz y 5 725 - 5 850 MHz, de acuerdo al anexo que forma parte integrante de la presente resolución.

**Artículo 2°.-** Modificar la Nota P83 del Plan Nacional de Atribución de Frecuencias, aprobado mediante Resolución Ministerial N° 187-2005-MTC/03, con el siguiente texto:

\*Nota P83: Las bandas 5 250 - 5 350 MHz y 5 470 - 5 725 MHz están atribuidas a título secundario para los sistemas de acceso inalámbrico para la prestación de servicios públicos de telecomunicaciones fijos y/o móviles. Aquellos que hagan uso de las frecuencias antes indicadas deberán sujetarse a la normativa establecida o que establezca el Ministerio;

**Artículo 3°.-** Agregar la Nota P83 a los cuadros de atribución de frecuencias de las bandas 5 470 - 5 570 MHz, 5 570 - 5 650 MHz y 5 650 - 5 725 MHz;

**Artículo 4°.-** Dejar sin efecto la Resolución Ministerial N° 626-2004-MTC/15.03 que aprobó las condiciones de operación de los servicios cuyos equipos utilizan las bandas 902 - 928 MHz, 2 400 - 2 483,5 MHz y 5 725 - 5 850 MHz;

Regístrese, comuníquese y publíquese.

JOSÉ JAVIER ORTIZ RIVERA  
Ministro de Transportes y Comunicaciones

**ANEXO**

**CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LOS SERVICIOS CUYOS EQUIPOS UTILIZAN LAS BANDAS 902 - 928 MHz, 2 400 - 2 483,5 MHz, 5 150 - 5 250 MHz, 5 250 - 5 350 MHz, 5 470 - 5 725 MHz y 5 725 - 5 850 MHz**

**Artículo 1°.- ALCANCES**

La presente norma técnica se aplica a los servicios cuyos equipos utilizan las siguientes bandas de frecuencias para servicios fijos y/o móviles:

- a) Banda de 902 - 928 MHz.
- b) Banda de 2 400 - 2 483,5 MHz.
- c) Banda de 5 150 - 5 250 MHz.
- d) Banda de 5 250 - 5 350 MHz.
- e) Banda de 5 470 - 5 725 MHz.
- f) Banda de 5 725 - 5 850 MHz.

**Artículo 2°.- TÉCNICAS DE TRANSMISIÓN O MODULACIÓN DIGITAL**

Los equipos que operen en las bandas mencionadas en el artículo anterior deberán emplear técnicas de transmisión o modulación digital que permitan la mutua coexistencia.

**Artículo 3°.- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE OPERACIÓN**

Los servicios deberán cumplir con las siguientes características, de acuerdo a la banda de operación:

a) La potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) máxima deberá sujetarse a las siguientes características:

- a.1) Para las bandas 902 - 928 MHz, 2 400 - 2 483,5 MHz y 5 725 - 5 850 MHz, la PIRE máxima utilizada no deberá exceder de 36 dBm (4 W).
- a.2) Para la banda 5 150 - 5 250 MHz, la PIRE máxima utilizada no deberá exceder de 23 dBm (200 mW) en espacio cerrado;
- a.3) Para la banda 5 250 - 5 350 MHz y 5 470 - 5 725 MHz, la PIRE máxima utilizada no deberá exceder de 30 dBm (1 W).

b) La potencia pico máxima de salida de un transmisor:

Espacio cerrado.-Espacio fijo dentro de una estructura con paredes y techo

b.1) No debe exceder de 30 dBm (1 W) para las bandas 902 - 928 MHz, 2 400 - 2 483,5 MHz y 5 725 - 5 850 MHz.

b.2) No debe exceder de 24 dBm (250 mW) para las bandas 5 250 - 5 350 MHz y 5 470 - 5 725 MHz.

Parámetros máximos a tener en cuenta para la instalación de equipos:

Banda de frecuencias (MHz)	Potencia de salida del transmisor			Ganancia máxima de la antena (dB)	PIRE máxima (dBm)
	(W)	(mW)	(dBm)		
902 - 928	1	1 000	30	6	36
2 400 - 2 483,5	0,5	500	27	9	36
5 725 - 5 850	0,25	250	24	12	36
5 250 - 5 350	0,25	250	24	6	30
5 470 - 5 725	0,125	125	21	9	30

c) Está prohibido el uso de amplificadores transmisores o cualquier otro dispositivo similar que altere las condiciones de PIRE máxima establecidas en el literal a) del presente artículo.

d) Para las aplicaciones en espacio abierto<sup>2</sup>, el transmisor deberá estar instalado en un ambiente de fácil acceso a fin de facilitar la labor de supervisión por parte del Ministerio.

e) Los equipos que operen en las bandas 5 250 - 5 350 MHz y 5 470 - 5 725 MHz deberán emplear un mecanismo de control de transmisión de potencia, debiendo tener capacidad para operar al menos a 6 dB por debajo del valor medio de PIRE.

f) Los equipos que operen en las bandas 5 250 - 5 350 MHz y 5 470 - 5 725 MHz deberán emplear un mecanismo de detección de radar de selección dinámica de frecuencia. El umbral de detección para equipos con una PIRE entre 200 mW a 1W es -54 dBm.

g) Para enlaces punto a multipunto, las antenas podrán ser:

- En zonas urbanas (no permitido para el servicio privado en la provincia de Lima y la Provincia Constitucional del Callao): sectoriales con un ancho de lóbulo de hasta 90°.

- En zonas rurales y en los lugares considerados de preferente interés social no hay restricciones de antenas.

h) Para aplicaciones de espacio cerrado, no hay restricciones de antenas

#### Artículo 4º.- MODALIDADES DE OPERACIÓN

Las personas naturales o jurídicas podrán utilizar equipos que operen bajo los alcances de la presente norma técnica, en las modalidades punto a punto y punto a multipunto, para servicios públicos y privados de telecomunicaciones, excepto para el caso del servicio privado punto a multipunto que no podrá ser utilizado en las zonas urbanas de la provincia de Lima y la Provincia Constitucional del Callao.

#### Artículo 5º.- CONDICIONES DE OPERACIÓN

Las personas naturales o jurídicas que utilicen equipos que operen bajo los alcances de la presente norma técnica deben:

a) Aceptar la interferencia perjudicial resultante de las aplicaciones industriales, científicas y médicas en las bandas 902-928 MHz, 2 400-2 483,5 MHz y 5 725 - 5 850 MHz, y en ningún caso podrán causar interferencias a éstas.

b) No causar interferencia perjudicial a las estaciones de un servicio primario, permitido o secundario.

c) Para el caso de los servicios privados, no reclamar protección contra interferencias perjudiciales causadas por estaciones de un servicio primario, permitido o secundario.

d) Aceptar la supervisión técnica del Ministerio, con el fin de verificar la operación de sus sistemas conforme a lo establecido en la presente norma.

e) Adoptar las medidas pertinentes para prevenir, reducir y eliminar cualquier interferencia perjudicial atribuible a su sistema que afecte a otros sistemas o servicios de telecomunicaciones.

#### Artículo 6º.- INSTALACIÓN

Para la instalación de estaciones radioeléctricas, las personas naturales y jurídicas deberán:

a. Presentar información técnica al Ministerio sobre las estaciones radioeléctricas, en un plazo máximo de un (1) mes a partir de la instalación de los equipos, de acuerdo al formato que forma parte integrante de la presente resolución y que podrá ser modificado por la Dirección General de Gestión de Telecomunicaciones, para efectos de contar con una base de datos sobre la ubicación y características de las mismas. Quedan exceptuados de esta obligación las aplicaciones en espacio cerrado.

b. Observar los límites máximos permisibles de radiaciones no ionizantes en telecomunicaciones aprobadas por Decreto Supremo Nº 038-2003-MTC, así como las demás normas complementarias que emita el Ministerio.

c. Cumplir con las normas técnicas de protección para las estaciones de comprobación técnica filias pertenecientes al Sistema Nacional de Gestión del Espectro Radioeléctrico.

d. Obtener de las municipalidades y demás organismos públicos, las autorizaciones que resulten exigibles para proceder a la instalación y construcciones respectivas.

#### Artículo 7º.- HOMOLOGACIÓN

Para el internamiento, comercialización y operación, los equipos que operen bajo los alcances de la presente norma técnica, deberán contar con el respectivo Certificado de Homologación.

Para su comercialización, los equipos que utilicen el espectro radioeléctrico y que transmitan en una potencia igual o inferior a 10 milivatios (mW) en antena (potencia efectiva irradiada), no requerirán ser homologados.

#### Artículo 8º.- INFRACCIONES Y SANCIONES

Serán de aplicación las infracciones y sanciones establecidas en el Texto Único Ordenado de la Ley de Telecomunicaciones y en su Reglamento General.

#### Artículo 9º.- INFORMACIÓN

Las empresas que comercializan equipos y aparatos de telecomunicaciones que se encuentren dentro de los alcances de la presente norma técnica deberán difundirla a sus clientes.

#### Artículo 10º.- AUTORIZACIÓN

Están exceptuados de contar con concesión, asignación del espectro radioeléctrico, autorización, permiso o licencia, los servicios cuyos equipos transmiten con una potencia en antena (potencia efectiva irradiada) no superior a la establecida en el Artículo 2º del Texto Único Ordenado del Reglamento General de la Ley de Telecomunicaciones.

Asimismo, sólo para la prestación y/o instalación de servicios en áreas rurales y en lugares considerados de preferente interés social, y previa obtención de la concesión, autorización, asignación del espectro radioeléctrico, permiso o licencia correspondiente, está permitido operar equipos en las bandas 902 - 928 MHz, 2 400 - 2 483,5 MHz, 5 250 - 5 350 MHz, 5 470 - 5 725 MHz y 5 725 - 5 850 MHz, utilizando antenas de mayor ganancia que permitan superar los respectivos valores de la PIRE señalado en el artículo 3º de la presente norma técnica.

#### DISPOSICIÓN TRANSITORIA

##### Primera.- PRESENTACIÓN DE FORMATO

Las personas naturales y jurídicas que vienen operando equipos que se encuentren bajo los alcances de la presente norma técnica deberán cumplir con presentar el formato a que se refiere el literal a) del artículo 6º en un plazo máximo de un (1) mes de publicada la presente norma.

<sup>2</sup> Espacio abierto.-Espacio físico al aire libre, fuera de una estructura con paredes y techo.

## ANEXO

INFORMACIÓN TÉCNICA PARA LA OPERACIÓN EN LAS BANDAS  
902 - 928 MHz, 2 400 - 2 483,5 MHz, 5 150 - 5 250 MHz, 5 250 - 5 350 MHz,  
5 470 - 5 725 MHz y 5 725 - 5 850 MHz

<b>DATOS DEL USUARIO/OPERADOR:</b>			
Apellidos y nombres / Razón Social			
Domicilio Legal			
( ) D.N.I.	( ) R.U.C.	Nº	Teléfono:

<b>DATOS DE LA ESTACIÓN:</b>		
Ubicación (Jr., Calle, Av., etc.)		
Distrito	Provincia	Departamento

<b>BANDA DE OPERACIÓN (MHz):</b>		
( ) 902 - 928	( ) 2 400 - 2 483,5	( ) 5 150 - 5 250
( ) 5 250 - 5 350	( ) 5 470 - 5 725	( ) 5 725 - 5 850

<b>TRANSMISOR:</b>			
Marca	Modelo	Código de Homologación	Potencia de Transmisión (dBm)

<b>SISTEMA RADIANTE (ANTENA):</b>			
Marca	Modelo	Código de Homologación	Ganancia (dBi)

<b>ENLACE:</b>	
Ubicación de la(s) estación(es) a enlazar (Jr., Calle, Av., etc.)	Distancia (Km)
1.	
2.	
3.	

<b>REPRESENTANTE LEGAL:</b>	
Apellidos y Nombres:	
Documento de identidad:	Firma
( ) DNI	
( ) C.I.	
( ) Pasaporte	
( ) C.E. Nº	

18669

**Reconocen a Radio Integridad S.A.C. como titular de la autorización del servicio de radiodifusión sonora comercial en FM, en el departamento de La Libertad**

**RESOLUCIÓN VICEMINISTERIAL  
Nº 514-2005-MTC/03**

Lima, 26 de octubre del 2005

VISTAS, las Solicitudes registros Nros. 2001-000317, 2001-001303, 2001-001817, 2002-001496 y 2002-002716 de la empresa RADIO INTEGRIDAD S.A.C., sobre reconocimiento de titularidad de autorización, renovación y modificación de características técnicas de una estación del servicio de radiodifusión sonora en Frecuencia Modulada (FM), en el distrito y provincia de Trujillo, departamento de La Libertad;

## CONSIDERANDO:

Que, con Resolución Ministerial Nº 560-95-MTC/15.17 del 28 de diciembre de 1995 se autorizó a la empresa JESUS FERNANDO DUENAS IPARRAGUIRRE E.I.R.L., la operación de una estación del servicio de radiodifusión sonora comercial en Frecuencia Modulada (FM), en el distrito y provincia de Trujillo, departamento de La Libertad, por el plazo de diez (10) años, con fecha de vencimiento al 24 de julio de 2001;

Que, mediante Resolución Directoral Nº 029-2000-MTC/15.19 del 8 de marzo de 2000 se autorizó el cambio de ubicación de los Estudios y Planta, y el cambio de tipo de emisión de la estación en Frecuencia Modulada (FM), en el distrito y provincia de Trujillo, departamento de La Libertad, autorizada a la empresa JESUS FERNANDO DUENAS IPARRAGUIRRE E.I.R.L., por Resolución Ministerial Nº 560-95-MTC/15.17;

Que, por Resolución Viceministerial Nº 268-2001-MTC/15.03, del 16 de abril de 2001, se aprobó la transferencia de la autorización del servicio de

## RADWIN B-Series

### RW-2050-B350



### RW-2050-B350

RW-2050-B350 is a carrier-class radio supporting the 5.x GHz bands and complying with FCC, IC (Canada), MII (China) and WPC (India) regulations (factory default: 5.8 GHz FCC/IC).

The multi-band radio is part of the RADWIN 2000 B-Series that delivers highest capacity and extended range for carriers' backhaul needs.

Packing native TDM and Ethernet over a single wireless link, the RADWIN 2000 B-Series provides 50 Mbps net aggregate throughput (up to 8E1/T1 plus Ethernet) at a range of up to 120 km/75 miles.

RADWIN RW-2050-B350 includes an embedded antenna and connectors for use with external antennas, offering a single Small Form Factor radio configuration

### Product Highlights

- 50 Mbps Ethernet net throughput and up to 8E1s/T1s
- Native TDM transport
- Single Small Form factor with embedded antenna and connectorized for external antenna
- Long range – up to 120 km/75 miles
- Adaptive asymmetric throughput – dynamic allocation between uplink and downlink
- Single radio supporting multiple bands 5.x GHz
- Advanced MIMO, OFDM and Diversity technologies
- Robust and reliable to operate in tough conditions, extreme temperatures and non line-of-sight scenarios

## Product Specifications

Configuration	
Architecture	Small Form Factor ODU Unit with embedded antenna and Connectorized for External Antenna
IDU to ODU Interface	Outdoor CAT-5e cable; Maximum cable length: 100 m
Radio	
Capacity	50 Mbps net aggregate throughput (up to 8E1s/T1s plus Ethernet)
Range	Up to 120 km / 75 miles
Channel Bandwidth	Configurable: 5,10, or 20 MHz
Modulation	2x2 MIMO-OFDM (BPSK/QPSK/16QAM/64QAM)
Adaptive Modulation & Coding	Supported
Automatic Channel Selection	Supported
Diversity	Supported
Spectrum View	Supported
Max Tx Power	25 dBm
Duplex Technology	TDD
Error Correction	FEC k = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6
Encryption	AES 128
Supported Indoor Units	IDU-C Series (RW-72XX-2000), IDU-E Series (RW-71XX-1000) RADWIN PoE device (RW-9921-001X)
QoS	Packet classification to 4 queues according to 802.1p and Diffserv, Dynamic scheduling according to air interface changes
VLAN	Supported
Ethernet Ring Protection	Supported, including Ethernet 1+1
Hub Site Synchronization (HSS)	Up to 16 collocated links (RADWIN 2000 and/or WinLink 1000)
Monitored Hot Standby (MHS)	1+1 with RADWIN 2000 link or WinLink 1000 link

Supported Bands		
Band	Occupied Frequency Range	Radio Compliance
5.8 GHz FCC/IC*	5.725 - 5.850 GHz	FCC 47CFR, Part 90, Subpart C and IC RSS-210
5.9 GHz Universal	5.730 - 5.950 GHz	
5.8 GHz FCC/IC	5.725 - 5.850 GHz	FCC 47CFR, Part 15, Subpart C and IC RSS-210
5.8 GHz MII China	5.730 - 5.845 GHz	MII for 5.8 GHz
5.8 GHz WPC India	5.825 - 5.875 GHz	WPC GSR-38
5.4 GHz FCC	5.480 - 5.715 GHz	FCC 47CFR, Part 15, Subpart E
5.4 GHz IC	5.480 - 5.715 GHz	IC RSS-210
5.4 GHz Universal	5.490 - 5.710 GHz	
5.3 GHz FCC/IC	5.260 - 5.340 GHz	FCC 47CFR, Part 15, Subpart E and IC RSS-210
5.3 GHz Universal	5.140 - 5.345 GHz	

### \* Factory Default

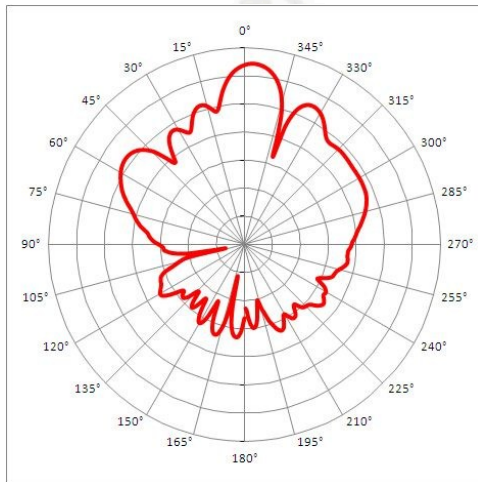
Mechanical	
Dimensions	19.5(w) x 27.0(h) x 8.0(d) cm
Weight	1.8 kg / 3.6 lbs
Power	
Power Feeding	Power provided over ODU-IDU cable
Power Consumption	<35W (IDU + ODU)
Environmental	
Operating Temperatures	-35°C - 60°C / -31°F - 140°F
Humidity	100% condensing, IP67 (totally protected against dust and against immersion up to 1m)
Safety	
FCC/IC (cTUVus)	UL 60950-1, UL 60950-22, CAN/CSA C22.2 60950-1, CAN/CSA C22.2 60950-22
ETSI	EN/IEC 60950-1, EN/IEC 60950-22
EMC	
FCC	CFR47 Class B, Part15, Subpart B
ETSI	EN 300 386, EN 301 489-1, EN 301 489-4
CAN/CSA-CEI/IEC	CISPR 22-04 Class B
AS/NZS	CISPR 22-2004 Class B

### Integrated Antenna

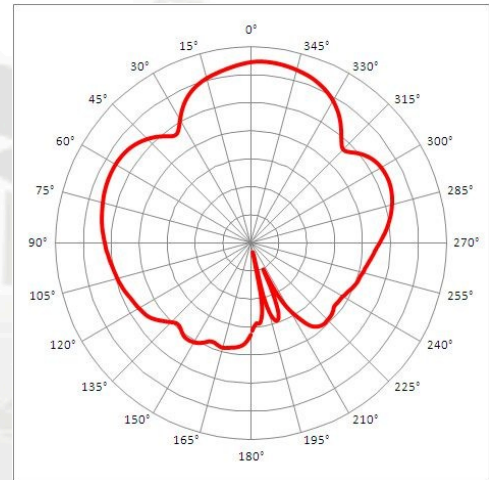
Minimum Peak Gain	15.0 ± 1.0 dBi @ 5.15-5.47 GHz 15.5 ± 1.0 dBi @ 5.47-5.875 GHz 12.5 ± 1.0 dBi @ 5.875-6.02 GHz
VSWR	1.5 : 1 (typ) 2 : 1(max)
Azimuth 3 dB Beamwidth	35° (typ)
Elevation 3 dB Beamwidth	15° (typ)
AZ & EL Beam Squint	± 2.5° Port V & Port H
Polarization	Dual Linear (Vertical and Horizontal)
Sidelobes Level	ETSI EN 302 085 V1.1.2, TS1-TS3
Cross Polarization	ETSI EN 302 085 V1.1.2, TS1-TS3
F/B Ratio	20 dB (max)
Port To Port Isolation	40 dB (min)
Lightning Protection	DC grounded

### Antenna Pattern

Elevation @ 5.8GHz



Azimuth @ 5.8GHz



## Ordering Information

**Part Number:** RW-2050-B350

**Description:**

RADWIN 2000 B- Series ODU with embedded antenna and connectorized, supporting 5.x GHz multi frequency bands ,  
factory default 5.8 GHz FCC/IC

For external antennas, see the RADWIN Product Catalog.

**Corporate Headquarters,** T. +972.3.766.2900, E. sales@radwin.com, www.radwin.com

The RADWIN name is a registered trademark of RADWIN Ltd.

© All rights reserved, May 2011

DS RW-2050-B350/05.11

## HyperLink Wireless 5.1 GHz to 5.8 GHz 28.5 dBi Broadband Dual Polarized Solid Parabolic Dish Antenna

### Applications and Features

---

Model: HG5158DP-29D

[http://www.novanetwork.com.br/files/produtos/antenas/DS\\_HG5158DP-29D\\_datasheet.pdf](http://www.novanetwork.com.br/files/produtos/antenas/DS_HG5158DP-29D_datasheet.pdf)





*“Castle Rock’s depth of knowledge in the network arena is extremely impressive. With our OEM agreement in place, we are confident that we can now offer our customers the very best in network management functionality.”*

Doug Elsley, ITSM Product Manager - Touchpaper Software plc.

# SNMPc 8

## General Information



### Feature Specification

Internet Addressing:	IPv4 and IPv6
SNMP Protocols:	V1, V2c, V3 with SHA/MD5, AES-128bit Authentication and DES Encryption
Device Discovery:	Automatically discovers and polls SNMP and ICMP (Ping) devices.
Service Discovery:	Performs service discovery on each device, including SNMP, ICMP, Telnet, FTP, HTTP, SMTP, and four user-specified TCP ports.
Service Polling:	Up to 16 user defined TCP ports per icon. Each with configurable send/reply string. External polling with custom applications
Topology Layout:	Multiple Level Hierarchies. Segmented by Polling Agent. Tree, Ring, or Snaked Bus networks.
Event Notification:	Ignore, Ignore Duplicates, Forward, Email, SMS, Display Alarm Box, or Execute Application.
Reporting:	Graph, Bar Chart, Distribution, and Summary. Printed and WEB Export.
Backup:	Live/Standby server support with automated failover.
External Interfaces:	ODBC and Text Export. Event Forwarding using SNMP Traps.
Customization:	Private MIB Import. Custom Tables, Expressions, and Menus. Execute applications from map double-click, on event reception, and during custom polling.
Programming Interfaces:	Proprietary object-oriented interface for C/C++ applications. SNMPc 4.0 DDE Interface. WinSNMP de-facto standard interface. Utilities for Scripting language support.

### Product Options

Enterprise Edition:	Base system for a scalable multi-user environment. Enterprise Edition includes the SNMPc Server license, unlimited JAVA Console support, unlimited Remote Console licenses, and ten Remote Poller licenses.
SNMPc OnLine:	An advanced reporting engine for the SNMPc Network Manager with a dynamic web based front-end. Flexible presentation options include NetFlow/sFlow recording, Microsoft Visio graphics, pre-canned reports, high-level summaries, and custom dashboards.

### Requirements

Parameter	
CPU:	Intel 2GHz
Memory:	4 GB
Disk:	10 GB
Operating Systems:	Windows 8, 7, 2008R2



12930 Saratoga Ave, Saratoga, CA 95070 USA

408.366.6540

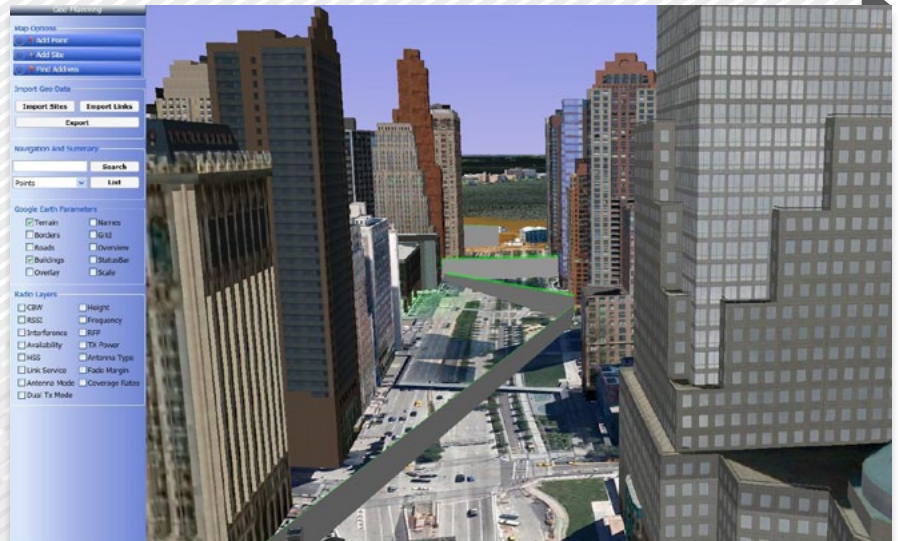
fax: 408.252.2379

sales@castlerock.com

www.castlerock.com

# RADWIN R-Planner

## Optimize Network Planning



RADWIN R-Planner is a powerful software tool that enables users to effectively plan and enhance the performance of their RADWIN-based wireless networks. R-Planner projects the actual performance of RADWIN's point-to-point and point-to-multipoint links by taking into account crucial parameters such as line-of-sight obstructions, weather conditions, topography and collocation interference.

**Through accurate emulation of real-world conditions, RADWIN R-Planner ensures that network planning simulations are aligned with link performance and throughput experienced in the field.**

### Google Earth Web Browser

R-Planner incorporates the Google Earth web browser plug-in which depicts sites with visually impacting 3D views, allowing users to easily plan link locations and facilitating smart network design decisions.

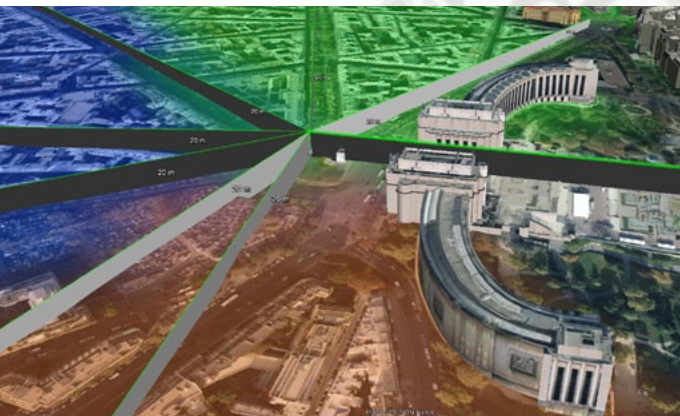
R-Planner accurately predicts link behavior prior to equipment installation to assure effective planning and accurate budgeting for optimal ROI.

### R-Planner Users

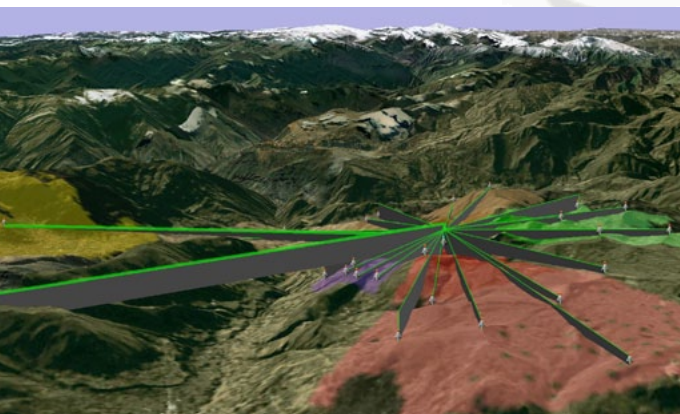
- » Wireless operators
- » System integrators
- » Enterprise users
- » Private network operators



Point-to-point & Point-to-multipoint topology planning



Enhanced line-of-sight coverage configuration



Line-of-sight analysis view

### R-Planner Benefits

- » Accurately predict link performance under real-world conditions
- » Improve efficiency of network planning and optimization processes
- » Simplify network planning using Google Earth platform
- » Quickly detect and overcome challenges to link performance (e.g., line-of-sight obstacles, collocation interference)
- » Emulate conditions in dense urban environments using 3D building data
- » Improve quality of service and network capacity through accurate network planning

### R-Planner Highlights

- » Intuitive user-interface
- » Ability to import link site coordinates from CSV to simplify the planning process
- » Fast and simple report generation for improved network design decisions
- » Channel Selection (ACS) feature to eliminate mutual interference
- » Bill of Material (BoM) generation for commercial purposes

“The R-Planner network planning tool ensures that our installations are optimally configured.”

**Nico Els, General Manager  
Altech Fleetcall, South Africa**

#### **RADWIN Ltd Corporate Headquarters**

+972.3.769.2820 sales@radwin.com

[www.radwin.com](http://www.radwin.com)

The RADWIN name is a registered trademark of RADWIN Ltd.  
Specifications are subject to change without prior notification.

© All rights reserved, January 2013

**RADWIN**

## Radio Mobile Data Sheet

### Radio propagation model

Title	ITS Irregular Terrain Model (Longley-Rice)						
Code	Original FORTRAN code translated to C++ DLL						
Frequency Range	20 to 20000 MHz						
Surface Refractivity Range	250 to 400 N-Units						
Antenna heights Range	.5 to 2999m						
Elevation records	up to 158						
Elevation Range	-999m to 20000m						
Climates	Equatorial	Continental Subtropical	Maritime Sub-Tropical	Desert	Continental Temperate	Maritime Temperate Over Land	Maritime Temperate Over Sea
Modes of variation	Spot   Accidental   Mobile   Broadcast						
Statistical parameters	Time   Location   Situation						
Ground parameters	Conductivity   Relative Permittivity						

### System parameters

Tx power	1.0E-8 to 1.0E+6 Watts
Receiver threshold	0.01 to 2000 $\mu$ Volt
Line Loss	0 to 500 dB
Antenna gain	-10 to 100 dBi

### Networks

Number of networks	up to 50
--------------------	----------

Number of units	up to 1000						
Number of systems	up to 255						
Topologies	Voice net	Data net, Star	Data net, Cluster				
Link parameters	Tx Power	Tx Line Loss	Tx Antenna Gain	Propagation Loss	Rx Antenna Gain	Rx Line Loss	Rx Sensitivity

### Elevation data matrix

Source Type	SRTM 1, 3	DTED 0, 1, 2	GTOPO30	GLOBE	BIL
Source Resolution	1/3, 1, 3, or 30 Arcsecond				
Matrix Size	up to 2000 x 2000 records				
Matrix Coverage	up to 5000 km				
Matrix Projection	Rectangular (aligned to latitude and longitude) compressed horizontally according to latitude				
Interpolation	Bi-linear				

DATOS DE LOS ESCENARIOS				INDICADOR DE INTENSIDAD DE LA SEÑAL DE RECEPCIÓN (RSSI)										"THROUGHPUT"																														
				RSSI SIMULACIONES					RSSI MEDICIONES					RESULTADOS COMPARACION RSSI		"THROUGHPUT" SIMULACIONES		"THROUGHPUT" MEDICIONES		RESULTADOS COMPARACION "THROUGHPUT"		% Eñace Activo																						
ESCENARIO Sedes	PIRE [dbm]	BW Canal [MHz]	Peor Fresnel	Velocidad de Bit [Mbps]	Modulación	Valor "FEC" [k]	Sensibilidad [dbm]	RSSI Esperado Cayma [dbm]	RSSI Esperado La Salle [dbm]	Fade Margín Cayma - La Salle [dB]	RSSI Esperado Cayma [dbm]	RSSI Esperado La Salle [dbm]	Fade Margín Cayma [dB]	Fade Margín La Salle [dB]	Diferencia Cayma [dbm]	Diferencia La Salle [dbm]	Throughput La Salle Full Duplex [Mbps]	Throughput Cayma Full Duplex [Mbps]	Throughput La Salle Full Duplex [Mbps]	Throughput Cayma Full Duplex [Mbps]	% Reducción La Salle		% Reducción Cayma																					
Escenario 1	36	10	6.0F1	Adeparativa	Adeparativa	Adeparativo	-86	-58.7	-58.7	27.3	-69.21	-73.02	16.79	12.98	10.51	14.32	25.85	25.85	25.78	18.41	0.27%	28.78%	100.00%																					
																								26	QPSK	1/2	-86	-58.7	-58.7	27.3	-67.37	-70.21	18.63	15.79	8.67	11.51	10	10	8.81	8.51	11.86%	14.90%	100.00%	
																								39	QPSK	3/4	-83	-58.7	-58.7	24.3	-69.21	-73.52	13.79	9.48	10.51	14.82	15.1	15.1	12.99	11.57	13.97%	23.38%	100.00%	
																								52	16QAM	1/2	-81	-58.7	-58.7	22.3	-68.51	-73.54	12.49	7.46	9.81	14.84	20.3	20.3	17.42	13.35	14.19%	34.24%	100.00%	
																								78	16QAM	3/4	-77	-58.7	-58.7	18.3	-68.26	-69.96	8.74	7.04	9.56	11.26	25.85	25.85	23.17	16.31	10.37%	36.91%	96.80%	
																								104	64QAM	2/3	-72	-58.7	-58.7	13.3	-76.86	-77.28	-4.86	-5.28	18.16	18.58	25.85	25.85	10.31	7.29	60.12%	71.80%	41.80%	
																								118		3/4	-70	-58.7	-58.7	11.3	-82.46	-82.47	-12.46	-12.47	23.76	23.77	25.85	25.85	5.95	4.40	76.98%	82.98%	23.40%	
																								130	Adeparativa	Adeparativo	5/6	-67	-58.7	-58.7	8.3	-83.94	-84.12	-16.94	-17.12	25.24	25.42	25.85	25.85	4.81	3.92	81.39%	84.84%	19.00%
																								Adeparativa			Adeparativo	-89	-58.7	-58.7	30.3	-67.55	-73.19	21.45	15.81	8.85	14.49	23.4	23.4	15.54	8.88	33.59%	62.05%	100.00%
																								13	QPSK	1/2	-89	-58.7	-58.7	30.3	-68.64	-71.58	20.36	17.42	9.94	12.88	4.4	4.4	3.71	3.60	15.68%	18.18%	100.00%	
																								19.5		3/4	-86	-58.7	-58.7	27.3	-68.66	-70	17.34	16	9.96	11.30	6.8	6.8	5.66	5.40	16.76%	20.59%	100.00%	
																								26	64QAM	1/2	-84	-58.7	-58.7	25.3	-67.92	-73.53	16.08	10.47	9.22	14.83	9.1	9.1	7.58	7.17	16.70%	21.21%	100.00%	
																								39		3/4	-80	-58.7	-58.7	21.3	-67.48	-71.7	12.52	8.3	8.78	13.00	13.9	13.9	11.39	8.86	18.06%	36.26%	100.00%	
																								52	64QAM	2/3	-75	-58.7	-58.7	16.3	-65.52	-69.76	9.48	5.24	6.82	11.06	18.6	18.6	14.04	8.08	24.52%	56.56%	100.00%	
																								58.5		3/4	-73	-58.7	-58.7	14.3	-74.37	-74.73	-1.37	-1.73	15.67	16.03	21	21	7.24	3.79	65.52%	81.95%	50.00%	
65	Adeparativa	Adeparativo	5/6	-70	-58.7	-58.7	11.3	-87.14	-87.21	-17.14	-17.21	28.44	28.51	23.4	23.4	1.42	0.71	93.93%	96.97%	9.00%																								
Adeparativa			Adeparativo	-92	-58.7	-58.7	33.3	-68.65	-72.22	23.35	19.78	9.95	13.52	8	8	6.39	3.56	20.13%	55.50%	100.00%																								
Sede La Cayma Salle	5	6.0F1	Adeparativa	Adeparativa	Adeparativo	-92	-58.7	-58.7	33.3	-68.65	-72.22	23.35	19.78	10.58	13.52	8	8	6.39	3.56	20.13%	55.50%	100.00%																						
																							6.5	QPSK	1/2	-92	-58.7	-58.7	33.3	-68.78	-72	23.22	20	10.08	13.30	1.325	1.325	1.30	1.29	1.89%	2.64%	100.00%		
																							9.75	QPSK	3/4	-89	-58.7	-58.7	30.3	-70.53	-73.83	18.47	15.17	11.83	15.13	2.2	2.2	2.03	1.96	7.73%	10.91%	100.00%		
																							13		1/2	-87	-58.7	-58.7	28.3	-69.28	-70.04	17.72	16.96	10.58	11.34	3	3	2.76	2.49	8.00%	17.00%	100.00%		
																							19.5	16QAM	3/4	-83	-58.7	-58.7	24.3	-69.02	-71.63	13.98	11.37	10.32	12.93	4.6	4.6	4.20	3.53	8.70%	23.26%	100.00%		
																							26		2/3	-78	-58.7	-58.7	19.3	-69.12	-70.62	8.88	7.38	10.42	11.92	6.3	6.3	5.31	2.93	15.71%	53.49%	100.00%		
																							29.25	64QAM	3/4	-76	-58.7	-58.7	17.3	-81.05	-81.34	-5.05	-5.34	22.35	22.64	7.1	7.1	1.94	0.97	72.68%	86.34%	34.80%		
																							32.5		5/6	-73	-58.7	-58.7	14.3	-87.6	-87.7	-14.6	-14.7	28.90	29.00	8	8	0.54	0.28	93.25%	96.50%	9.20%		

DATOS DE LOS ESCENARIOS										INDICADOR DE INTENSIDAD DE LA SEÑAL DE RECEPCIÓN (RSSI)										"THROUGHPUT"									
ESCENARIO Sedes	PIRE [dbm]	BW Canal [MHz]	Peor Fresnel	Velocidad de Bit [Mbps]	Modulación	Valor "FEC" [k=]	Sensibilidad [dbm]	RSSI SIMULACIONES			RSSI MEDICIONES			RESULTADOS COMPARACION RSSI		"THROUGHPUT" SIMULACIONES		"THROUGHPUT" MEDICIONES		RESULTADOS COMPARACION "THROUGHPUT"		% Reducción Cayma	% Enlace Activo						
								RSSI Esperado Cayma [dbm]	RSSI Esperado La Salle [dbm]	Fade Margen Cayma - La Salle	RSSI Esperado Cayma [dbm]	RSSI Esperado La Salle [dbm]	Fade Margen Cayma [db]	Fade Margen La Salle [db]	Diferencia Cayma [dbm]	Diferencia La Salle [dbm]	Throughput La Salle [Mbps]	Throughput Cayma [Mbps]	Throughput La Salle [Mbps]	Throughput Cayma [Mbps]	% Reducción La Salle			% Reducción Cayma					
Escenario 1	39	10	6.0F1	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	-86	-55.6	-55.6	30.4	-65.62	-71.28	20.38	14.72	10.02	15.68	25.85	25.85	25.85	19.53	0.00%	24.45%	100.00%						
								26	-55.6	-55.6	30.4	-65.37	-72.93	20.63	13.07	9.77	17.33	10	10	8.94	8.81	10.60%	11.90%	100.00%					
								39	-55.6	-55.6	27.4	-75.11	-73.86	7.89	9.14	19.51	18.26	15.1	15.1	12.99	12.70	13.97%	15.89%	100.00%					
								52	-55.6	-55.6	25.4	-65.16	-67.63	15.84	13.37	9.56	12.03	20.3	20.3	17.42	16.62	14.19%	18.13%	100.00%					
								78	-55.6	-55.6	21.4	-64.75	-67.82	12.25	9.18	9.15	12.22	25.85	25.85	25.66	20.01	0.74%	22.59%	100.00%					
								104	-55.6	-55.6	16.4	-66.4	-66.45	5.6	5.55	10.80	10.85	25.85	25.85	18.61	12.00	28.00%	53.58%	72.00%					
								118	-55.6	-55.6	14.4	-67.63	-67.71	2.37	2.29	12.03	12.11	25.85	25.85	17.84	13.20	30.99%	48.94%	69.00%					
								130	-55.6	-55.6	11.4	-78.67	-78.93	-11.67	-11.93	23.07	23.33	25.85	25.85	8.27	6.52	68.01%	74.78%	32.80%					
								Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	-89	-55.6	-55.6	33.4	17.46	9.56	15.94	23.4	23.4	18.52	10.47	20.85%	55.26%	100.00%					
								13	-55.6	-55.6	33.4	-64.65	-68.68	24.35	20.32	9.05	13.08	4.4	4.4	3.70	3.66	15.91%	16.82%	100.00%					
								19.5	-55.6	-55.6	30.4	-64.21	-68.15	21.79	17.85	8.61	12.55	6.8	6.8	5.63	5.58	17.21%	17.94%	100.00%					
								26	-55.6	-55.6	28.4	-64.46	-70.62	19.54	13.38	8.86	15.02	9.1	9.1	7.56	7.48	16.92%	17.80%	100.00%					
								39	-55.6	-55.6	24.4	-64.18	-68.14	15.82	11.86	8.58	12.54	13.9	13.9	11.43	10.72	17.77%	22.88%	100.00%					
								52	-55.6	-55.6	19.4	-65.52	-69.76	9.48	5.24	9.92	14.16	18.6	18.6	14.04	8.08	24.52%	56.56%	100.00%					
								58.5	-55.6	-55.6	17.4	-68.23	-72.56	4.77	0.44	12.63	16.96	21	21	13.45	7.76	35.95%	63.05%	100.00%					
								65	-55.6	-55.6	14.4	-75.3	-75.35	-5.3	-5.35	19.70	19.75	23.4	23.4	6.94	4.52	70.34%	80.68%	52.40%					
								Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	-92	-55.6	-55.6	36.4	21.16	9.54	15.24	8	8	6.96	4.36	13.00%	45.50%	100.00%					
								Sede La Cayma	5	6.0F1	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	-92	-55.6	-55.6	36.4	-65.14	-70.84	26.86	21.16	9.54	15.24	8	8	6.96	4.36	13.00%	45.50%
6.5	-55.6	-55.6	36.4	-65.08	-69.28	26.92	22.72								9.48	13.68	1.325	1.325	1.31	1.30	1.13%	1.89%	100.00%						
9.75	-55.6	-55.6	33.4	-65.41	-68.13	23.59	20.87								9.81	12.53	2.2	2.2	2.02	2.03	8.18%	7.73%	100.00%						
13	-55.6	-55.6	31.4	-66.35	-68.38	20.65	18.62								10.75	12.78	3	3	2.75	2.72	8.33%	9.33%	100.00%						
19.5	-55.6	-55.6	27.4	-65.29	-69.82	17.71	13.18								9.69	14.22	4.6	4.6	4.20	3.87	8.70%	15.87%	100.00%						
26	-55.6	-55.6	22.4	-65.91	-71	12.09	7								10.31	15.40	6.3	6.3	5.63	4.41	10.63%	30.00%	100.00%						
Sede La Cayma	5	6.0F1	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	-92	-55.6	-55.6	20.4	-64.87	-69.08	11.13	6.92	9.27	13.48	7.1	7.1	6.13	3.66	13.66%	48.45%	100.00%							
							29.25	-55.6	-55.6	17.4	-82.83	-83.04	-9.83	-10.04	27.23	27.44	8	8	1.53	0.74	80.88%	90.75%	24.80%						
							32.5	-55.6	-55.6	17.4	-82.83	-83.04	-9.83	-10.04	27.23	27.44	8	8	1.53	0.74	80.88%	90.75%	24.80%						

Tabla [1] Resumen de Simulaciones y Mediciones del Escenario 1 respecto al "throughput" y RSSI

DATOS DE LOS ESCENARIOS										INDICADOR DE INTENSIDAD DE LA SEÑAL DE RECEPCIÓN (RSSI)										"THROUGHPUT"																								
ESCENARIO Sedes	PIRE [dbm]	BW Canal [MHz]	Pwr Fresnel	Velocidad de Bit [Mbps]	Modulación	Valor "FEC" [k=]	Sensibilidad [dbm]	RSSI SIMULACIONES		RSSI MEDICIONES		RESULTADOS COMPARACION RSSI		"THROUGHPUT" SIMULACIONES		"THROUGHPUT" MEDICIONES		RESULTADOS COMPARACION "THROUGHPUT"		% Enlace Activo																								
								RSSI Esperado Cayma [dbm]	RSSI Esperado Jerusalén [dbm]	RSSI Esperado Cayma [dbm]	RSSI Esperado Jerusalén [dbm]	Fade Margín Cayma [db]	Fade Margín Jerusalén [db]	Diferencia Cayma [dbm]	Diferencia Jerusalén [dbm]	Throughput Jerusalén Full Duplex [Mbps]	Throughput Cayma Full Duplex [Mbps]	Throughput Jerusalén Full Duplex [Mbps]	Throughput Cayma Full Duplex [Mbps]		% Reducción Jerusalén	% Reducción Cayma																						
Escenario 2	36	10	5.2F1	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	-86	-70.5	-70.5	15.5	-90.81	-82.36	-4.81	3.64	20.31	11.86	25.85	25.85	2.55	14.17	90.14%	45.18%	89.60%																					
																								26	Adaptativa	1/2	-86	-70.5	-70.5	15.5	-85.11	-84.5	0.89	1.5	14.61	14.00	10.1	10.1	4.29	4.96	57.52%	50.89%	60.20%	
																								39	QPSK	3/4	-83	-70.5	-70.5	12.5	-88.35	-97.9	-5.35	-14.9	17.85	27.40	15.3	15.3	2.53	3.22	83.46%	78.95%	29.80%	
																								52	16QAM	1/2	-81	-70.5	-70.5	10.5	-87.64	-85.41	-6.64	-4.41	17.14	14.91	20.5	20.5	4.49	6.51	78.10%	68.24%	42.00%	
																								78	Adaptativa	3/4	-77	-70.5	-70.5	6.5	x	x	x	x	x	x	25.85	25.85	x	x	x	x	x	
																								Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	-89	-70.5	-70.5	18.5	-85.46	-79.05	3.54	9.95	14.96	8.55	13.9	13.9	1.75	9.79	87.41%	29.57%	100.00%	
	36	10	5.2F1	Adaptativa	QPSK	1/2	-89	-70.5	-70.5	18.5	-87.29	-80.82	1.71	8.18	13.77	14.38	7.73	4.4	4.4	2.20	3.15	50.00%	28.41%	85.80%																				
																									13	Adaptativa	1/2	-89	-70.5	-70.5	18.5	-87.29	-80.82	1.71	8.18	16.79	10.32	4.4	4.4	2.20	3.15	50.00%	28.41%	85.80%
																									9.75	QPSK	3/4	-89	-70.5	-70.5	18.5	-87.7	-77.83	1.3	11.17	17.20	7.33	2.3	2.3	1.38	1.93	40.00%	16.09%	95.60%
																									13	16QAM	1/2	-87	-70.5	-70.5	16.5	-94.24	-92.33	-7.24	-5.33	23.74	21.83	3.1	3.1	0.24	0.50	92.26%	83.87%	20.20%
																									19.5	Adaptativa	3/4	-83	-70.5	-70.5	12.5	x	x	x	x	x	x	4.9	4.9	x	x	x	x	x
																									26	64QAM	2/3	-78	-70.5	-70.5	7.5	x	x	x	x	x	x	6.6	6.6	x	x	x	x	x
	39	10	5.2F1	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	-89	-67.4	-67.4	21.6	-77.94	-76	11.06	13	10.54	8.60	13.9	13.9	6.83	11.21	50.86%	19.35%	100.00%																					
																								13	Adaptativa	1/2	-89	-67.4	-67.4	21.6	-79.49	-70.21	9.51	18.79	12.09	2.81	4.4	4.4	3.73	3.77	15.23%	14.32%	100.00%	
																								19.5	QPSK	3/4	-86	-67.4	-67.4	18.6	-79.5	-70	6.5	16	12.10	2.60	6.8	6.8	5.34	5.73	21.47%	15.74%	100.00%	
																								26	16QAM	1/2	-84	-67.4	-67.4	16.6	-79.26	-70.93	4.74	13.07	11.86	3.53	9.1	9.1	7.13	7.69	21.65%	15.49%	100.00%	
																								39	Adaptativa	3/4	-80	-67.4	-67.4	12.6	-93.93	-93.18	-13.93	-13.18	26.53	25.78	13.9	13.9	0.73	1.44	94.75%	89.64%	13.40%	
																								Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	-92	-67.4	-67.4	24.6	-80.61	-77.15	11.39	14.85	13.21	9.75	6.6	6.6	2.54	5.81	61.52%	11.97%	100.00%	
5		5.2F1	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	-92	-67.4	-67.4	24.6	-80.61	-77.15	11.39	14.85	13.21	9.75	6.6	6.6	2.54	5.81	61.52%	11.97%	100.00%																						
																							6.5	Adaptativa	1/2	-92	-67.4	-67.4	24.6	-79.71	-68.9	12.29	23.1	12.31	1.50	1.4	1.4	1.31	1.32	6.43%	5.71%	100.00%		
																							9.75	QPSK	3/4	-89	-67.4	-67.4	21.6	-77.35	-69.21	11.65	19.79	9.95	1.81	2.3	2.3	2.03	2.05	11.74%	10.87%	100.00%		
																							13	16QAM	1/2	-87	-67.4	-67.4	19.6	-77.52	-68.05	9.48	18.95	10.12	0.65	3.1	3.1	2.77	2.79	10.65%	10.00%	100.00%		
																							19.5	Adaptativa	3/4	-83	-67.4	-67.4	15.6	-92.11	-90.41	-9.11	-7.41	24.71	23.01	4.9	4.9	0.56	1.00	88.57%	79.59%	23.80%		
																							26	64QAM	2/3	-78	-67.4	-67.4	10.6	x	x	x	x	x	x	6.6	6.6	x	x	x	x	x		

Tabla [2] Resumen de Simulaciones y Mediciones del Escenario 2 respecto al "throughput" y RSSI

ESCENARIO Sedes	DATOS DE LOS ESCENARIOS										INDICADOR DE INTENSIDAD DE LA SEÑAL DE RECEPCIÓN (RSSI)										"THROUGHPUT"									
	PIRE [dbm]	BW Canal [MHz]	Peor Fresnel	Velocidad de bit [Mbps]	Modulación	Valor "FEC" [k-]	Sensibilidad [dbm]	RSSI SIMULACIONES		RSSI MEDICIONES		RESULTADOS COMPARACION RSSI		"THROUGHPUT" SIMULACIONES		"THROUGHPUT" MEDICIONES		RESULTADOS COMPARACION "THROUGHPUT"		% Reducción Cayma Activo										
								RSSI Esperado Cayma [dbm]	RSSI Esperado G.Morán [dbm]	Fade Margín Cayma - G.Morán [db]	RSSI Esperado Cayma [dbm]	RSSI Esperado G.Morán [dbm]	Fade Margín Cayma [db]	Fade Margín G.Morán [db]	Diferencia Cayma [dbm]	Diferencia G.Morán [dbm]	Throughput G.Morán Full Duplex [Mbps]	Throughput Cayma Full Duplex [Mbps]	Throughput G.Morán Full Duplex [Mbps]		Throughput Cayma Full Duplex [Mbps]	% Reducción G.Morán	% Reducción Cayma							
Escenario 3	36	10	5.7F1	26	Adaptativa	Adaptativo	-86	-70.8	-70.8	15.2	-86.61	-81.44	-0.61	4.56	15.81	10.64	25.85	25.85	4.07	18.81	84.26%	27.23%	95.60%							
					26	Adaptativa	Adaptativo	-86	-70.8	-70.8	15.2	-92.41	-89.26	-6.41	-3.26	21.61	18.46	10.1	10.1	2.20	3.92	78.22%	61.19%	45.40%						
					39	QPSK	3/4	-83	-70.8	-70.8	12.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
				52	16QAM	1/2	-81	-70.8	-70.8	10.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
				78	Adaptativa	Adaptativo	-77	-70.8	-70.8	6.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
				Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	-89	-70.8	-70.8	18.2	-85.6	-77.33	3.4	11.67	14.80	6.53	13.9	13.9	3.34	12.20	75.97%	12.23%	100.00%							
		13	QPSK	1/2	-89	-70.8	-70.8	18.2	-85.25	-79.52	3.75	9.48	14.45	8.72	4.4	4.4	3.07	3.51	30.23%	20.23%	94.60%									
		19.5	16QAM	3/4	-86	-70.8	-70.8	15.2	-90.75	-86.85	-4.75	-0.85	19.95	16.05	6.8	6.8	1.60	2.87	76.47%	57.79%	53.40%									
		26	16QAM	1/2	-84	-70.8	-70.8	13.2	-91.78	-90.85	-7.78	-6.85	20.98	20.05	9.1	9.1	1.11	2.19	87.80%	75.93%	29.40%									
		39	16QAM	3/4	-80	-70.8	-70.8	9.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								
		Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	-92	-70.8	-70.8	21.2	-83.83	-75.81	8.17	16.19	13.03	5.01	6.6	6.6	1.63	6.17	75.30%	6.52%	100.00%									
		6.5	QPSK	1/2	-92	-70.8	-70.8	21.2	-86.18	-77.17	5.82	14.83	15.38	6.37	1.4	1.4	1.27	1.32	9.29%	5.71%	100.00%									
	9.75	16QAM	3/4	-89	-70.8	-70.8	18.2	-84.47	-76.41	4.53	12.59	13.67	5.61	2.3	2.3	1.82	2.05	20.87%	10.87%	100.00%										
	13	16QAM	1/2	-87	-70.8	-70.8	16.2	-88.83	-85.01	-1.83	1.99	18.03	14.21	3.1	3.1	1.03	1.50	66.77%	51.61%	53.60%										
	19.5	16QAM	3/4	-83	-70.8	-70.8	12.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								
	26	64QAM	2/3	-78	-70.8	-70.8	7.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								
	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	-86	-67.8	-67.8	18.2	-81.95	-79.48	4.05	6.52	14.15	11.68	25.85	25.85	10.67	12.61	58.72%	51.22%	100.00%										
	26	QPSK	1/2	-86	-67.8	-67.8	18.2	-81.62	-75.84	4.38	10.16	13.82	8.04	10.1	10.1	8.58	8.82	15.05%	12.67%	98.40%										
	39	QPSK	3/4	-83	-67.8	-67.8	15.2	-79.86	-77.51	3.14	5.49	12.06	9.71	15.3	15.3	8.63	12.61	43.59%	17.58%	98.20%										
	52	16QAM	1/2	-81	-67.8	-67.8	13.2	-82.91	-79.38	-1.91	1.62	15.11	11.58	20.5	20.5	8.83	13.27	56.93%	35.27%	84.40%										
	78	16QAM	3/4	-77	-67.8	-67.8	9.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								
	Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	-89	-67.8	-67.8	21.2	-81.04	-79.95	7.96	9.05	13.24	12.15	13.9	13.9	6.35	7.37	54.32%	46.98%	100.00%										
	13	QPSK	1/2	-89	-67.8	-67.8	21.2	-81.26	-76.89	7.74	12.11	13.46	9.09	4.4	4.4	3.72	3.73	15.45%	15.23%	100.00%										
	19.5	QPSK	3/4	-86	-67.8	-67.8	18.2	-81.13	-76.97	4.87	9.03	13.33	9.17	6.8	6.8	4.10	5.65	39.71%	16.91%	100.00%										
26	16QAM	1/2	-84	-67.8	-67.8	16.2	-81.97	-75.33	2.03	8.67	14.17	7.53	9.1	9.1	4.34	7.43	52.31%	18.35%	100.00%											
39	16QAM	3/4	-80	-67.8	-67.8	12.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x									
Adaptativa	Adaptativa	Adaptativo	-92	-67.8	-67.8	24.2	-76.72	-76.08	15.28	15.92	8.92	8.28	6.6	6.6	3.13	6.16	52.58%	6.67%	100.00%											
6.5	QPSK	1/2	-92	-67.8	-67.8	24.2	-76.86	-73.08	15.14	18.92	9.06	5.28	1.4	1.4	1.32	1.32	5.71%	5.71%	100.00%											
9.75	QPSK	3/4	-89	-67.8	-67.8	21.2	-76.03	-72.42	12.97	16.58	8.23	4.62	2.3	2.3	1.99	2.04	13.48%	11.30%	100.00%											
13	16QAM	1/2	-87	-67.8	-67.8	19.2	-76.14	-72.34	10.86	14.66	8.34	4.54	3.1	3.1	1.96	2.78	36.77%	10.32%	100.00%											
19.5	16QAM	3/4	-83	-67.8	-67.8	15.2	-85.93	-86.5	-2.93	-3.5	18.13	18.70	4.9	4.9	1.47	1.62	70.00%	66.94%	64.40%											
26	64QAM	2/3	-78	-67.8	-67.8	10.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x									

Tabla [3] Resumen de Simulaciones y Mediciones del Escenario 3 respecto al "Throughput" y RSSI

## Cálculos Adicionales

Se realizara un cálculo a mayor detalle tomando como ejemplo el Escenario 3, donde en la sede Cayma la torre de comunicación ira sobre un segundo piso (6m), y en la sede General Morán de igual forma sobre un segundo piso de sillar (8m), luego tenemos las obstrucciones “Catedral de Arequipa” (Obstáculo 1) de 12m de altura, y el “Edificio de departamentos” (Obstáculo 2) de 12m de altura (4 pisos).

Finalmente tenemos los parámetros: Ganancia de la antena dual = 15dBi, potencia del transmisor = 18dBm, sensibilidad = -77 dBm, frecuencia = 5735 Mhz, distancia total = 2.828 km, el factor de clima = 2, ancho de banda de canal=20Mhz y velocidad de bit=78Mbps.

**Calculamos el PIRE:**

$$PIRE = 18 \text{ dBm} + 15 \text{ dBi}$$

$$PIRE = 33 \text{ dBm}$$

Al PIRE se le suma 3dB por usar una antena DUAL, entonces PIRE =36dBm

**Se calcula la pérdida de propagación**

*Pérdida de Propagación*

$$= 20 \times \log_{10} \left( \frac{4\pi 10^6 10^3}{3 \times 10^8} \right) + 20 \times \log_{10}(5735_{\text{MHz}}) + 20 \times \log_{10}(2.828_{\text{Km}})$$

$$\text{Pérdida de Propagación} = 116.65 \text{ dB}$$

**Cálculo de Refractividad:**

$$N_s = 179.3 \times \ln \left[ \frac{1}{0.046665} \times \left( 1 - \frac{1}{4/3} \right) \right]$$

$$N_s = 300.98 \approx 301$$

### Cálculo del RSSI esperado

$$RSSI_{Esperado} = 36dBm - 116.65 dB + 15dBi - 0dB$$

$$RSSI_{Esperado} = -65.65 dBm$$

### Calculamos el margen de desvanecimiento (Fade Margin)

$$\text{Margen de Desvanecimiento Esperado} = -65.65 dBm - (-77 dBm)$$

$$\text{Margen de Desvanecimiento Esperado} = 11.35 dB$$

### Se calcula la disponibilidad:

$$\text{Disponibilidad} = 1 - \left( 6 \times 10^{-7} \times 2 \times 5.735_{GHz} \times (2.828_{Km})^3 \times 10^{\frac{-11.35}{10}} \right)$$

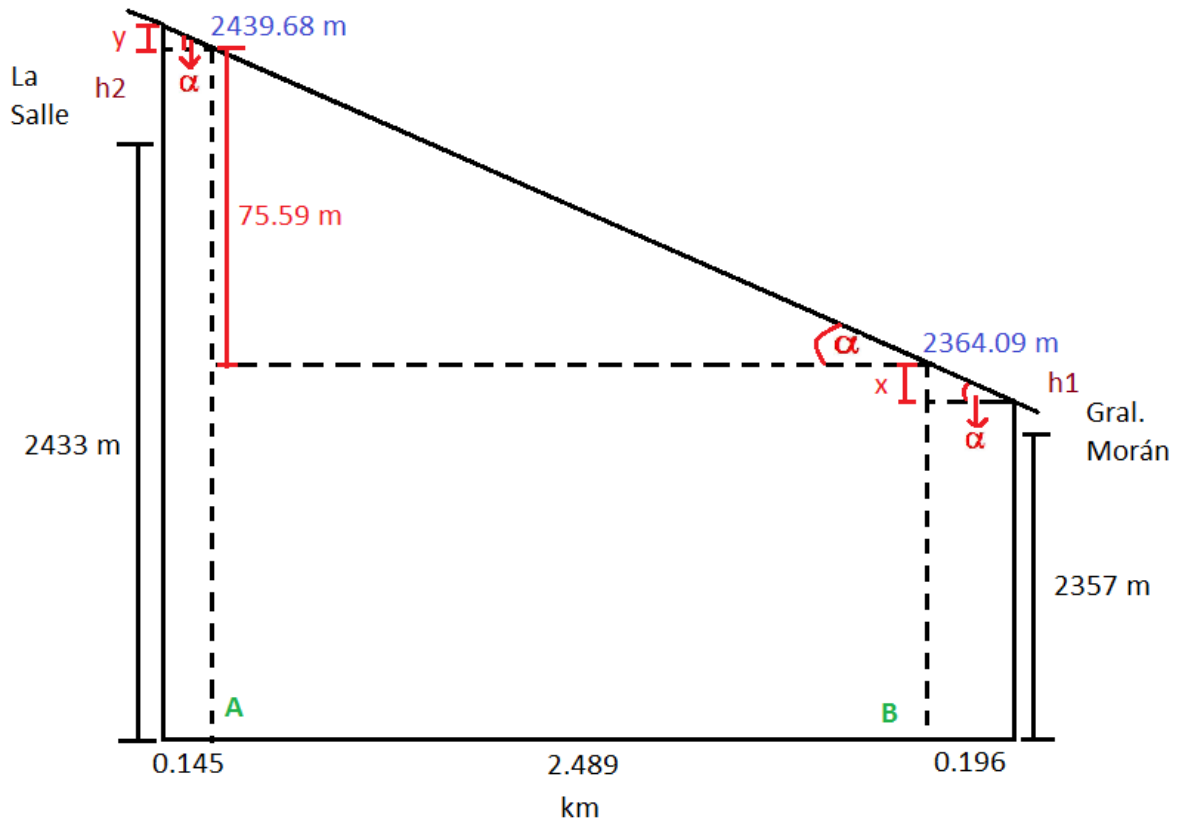
$$\text{Disponibilidad} = 0.998 = 99.998\%$$

### Se calcula la altura de las antenas:

$\text{Altura Cayma} = 2427_{m.s.n.m} + 6_m$ $\text{Altura Cayma} = 2433 m$	$\text{Altura Gral. Morán} = 2349_{m.s.n.m} + 8_m$ $\text{Altura Gral. Morán} = 2357m$
---	--

### Se calcula la zona de Fresnel en los puntos A y B:

$R_A = \sqrt{\frac{300}{5.735_{GHz}} \times 0.145 \times 2.688}$ $R_A = 2.685m$	$R_B = \sqrt{\frac{300}{5.735_{GHz}} \times 0.196 \times 2.632}$ $R_B = 3.089m$
$\text{Obst. A} = 2425_{m.s.n.m} + 12_m + 2.685_m$ $\text{Altura Obst. A} = 2439.68 m$	$\text{Obst. B} = 2349_{m.s.n.m} + 12_m + 3.089_m$ $\text{Altura Obst. B} = 2364.09m$



Entonces por trigonometría:

$\tan(\alpha) = \frac{75.59}{2.489} = \frac{y}{0.145}$	$\tan(\alpha) = \frac{75.59}{2.489} = \frac{x}{0.196}$
$y = 4.40m$	$x = 5.95m$
$2439.68 + 4.40 = 2444.08$	$2364.09 - 5.95 = 2358.14$
$h_2 = 2444.08 - 2433$	$h_1 = 2358.14 - 2357$
$h_2 = 11.08m \Rightarrow \text{torre ventada de } 12m$	$h_1 = 1.14m \Rightarrow \text{mastil de } 3m$

**Se calcula la claridad:**

En el punto A:

$$h_c = 2444.08 - \frac{0.145_{km}}{2.828_{km}} (2444.08 - 2360) - \frac{0.145 \times 2.632}{2 \times \frac{4}{3} \times 6370} \times 10^3 - 2437$$

$$h_c = 2.74m$$

En el punto B:

$$h_c = 2360 - \frac{0.196_{km}}{2.828_{km}} (2360 - 2444.08) - \frac{0.196 \times 2.632}{2 \times \frac{4}{3} \times 6370} \times 10^3 - 2361$$

$$h_c = 4.78m$$

Margen de Claridad en los puntos A y B:

Punto A:	Punto B:
$h_{cm} = h_c - R_A$	$h_{cm} = h_c - R_B$
$h_{cm} = 2.74 - 2.685$	$h_{cm} = 4.78 - 3.089$
$h_{cm} = 0.05m \Rightarrow \text{si existe LOS}$	$h_{cm} = 1.691m \Rightarrow \text{si existe LOS}$

**Se calcula la relación S/N:**

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB} = 36_{dBm} - 116.65_{dB} + 15_{dBi} - \left(-174 \frac{dB}{dBHz}\right) - (73)_{dB}$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB} = 35.6_{dB}$$

**Throughput:**

$$TP = 78 \times \left[ 1 - 0.3 - \left( 2 \times \frac{\frac{2.828 \times 10^3}{3 \times 10^8}}{1 \times 10^{-3}} \right) \right] \times \frac{1}{2}$$

*TP = 26.56 Mbps full duplex*

