

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Parámetros Técnicos Para Evaluar Interferencias en la Simulación de Enlaces Microondas, Aplicable a la Agencia Nacional del Espectro

Yinssy Charidufay Corredor Sánchez

Gefry Andrés Castro Jiménez

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica
Facultad de Ingeniería
Bogotá, Colombia
2017

Parámetros Técnicos Para Evaluar Interferencias en la Simulación de Enlaces Microondas, Aplicable a la Agencia Nacional del Espectro

Yinssy Charidufay Corredor Sánchez
Ingeniería en Telecomunicaciones
20161373002

Gefry Andrés Castro Jiménez
Ingeniería Electrónica
20092005059

Director Interno:

Ing. Juan Carlos Gómez Paredes
Docente Universidad Distrital

Director Externo:

Ing. Rafael Antonio Niño Vargas
Profesional Especializado
Gestión y Planeación Técnica del Espectro
Agencia Nacional del Espectro

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica
Facultad de Ingeniería
Bogotá, Colombia
2017

Página dejada en blanco intencionalmente

Resumen

Dentro de los recursos con los que cuenta un país para su explotación y desarrollo, se encuentra uno en particular, que si bien puede pasar desapercibido en ocasiones, es el más utilizado en la vida cotidiana de millones de personas, se trata del espectro radioeléctrico (ERE). Contar con servicios como televisión, radiodifusión, telefonía celular, Wi-Fi, enlaces microondas, radio astronomía, meteorología entre otros, no serían posibles sin una adecuada planeación, administración y control de este recurso.

Por lo tanto, cada nación, tomando como referencia las reglas técnicas emitidas en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (CMR), organizada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), debe contar con los mecanismos y organismos necesarios para gestionar, administrar, vigilar y controlar el ERE. En Colombia han surgido entidades como la Agencia Nacional del Espectro (ANE) creada por la ley 1341 de 2009 y cuyas funciones han sido actualizadas mediante el decreto 4169 de 2011. Es la entidad nacional que tiene por objeto brindar soporte técnico y asesoría al Ministerio de Tecnologías de la Información y las comunicaciones (MinTIC) para la gestión, planeación y ejercicio de la vigilancia y control del ERE, así como publicar, mantener y actualizar el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia (CNABF)[1]

En su organización se encuentra la subdirección de gestión y planeación técnica del espectro, la cual tiene entre sus funciones evaluar las solicitudes de viabilidad del uso del ERE. Estas actividades hacen parte de los Procesos de Selección Objetiva (PSO) que lleva a cabo el MinTIC[2]. Con base en lo anterior, el proyecto de pasantía busca la identificación y parametrización de valores típicos y condiciones generales para la evaluación de interferencias de radio enlaces microondas para el servicio fijo, como apoyo a la gestión técnica que realiza la entidad. Para tal fin, se tendrá acceso a un software de simulación utilizado por la ANE como herramienta para analizar las interferencias. La literatura disponible y las recomendaciones de entidades internacionales serán también tenidas en cuenta.

[1] http://cnabf.ane.gov.co/cnabf/
[2] Véase, http://www.mintic.gov.co/portal/604/w3-article-6202.html

Abstract

Within the resources that a country has for its exploitation and development, there is a particular one, which, although it may go unnoticed at times, is the most used in the daily life of millions of people, it is the Radioelectric Spectrum. Having services such as television, radio broadcasting, cellular telephony, Wi-Fi, microwave links, radio astronomy, meteorology, among others, would not be possible without adequate planning, administration and control of this resource.

Therefore, each nation, taking as a reference the technical rules issued at the World Radiocommunication Conference (WRC), organized by the International Telecommunication Union (ITU), have to define the mechanisms and agencies to manage, administer, monitor and control the Radiolectric Spectrum. In Colombia, the National Spectrum Agency (in Spanish *Agencia Nacional del Espectro ANE*) has been created by law 1341 of 2009 and whose functions have been updated by decree 4169 of 2011. It is the national entity that aims to provide technical support and advice to the Ministry of Information and Communication Technologies (in Spanish *MinTIC*) for the management, planning and exercise of surveillance and control of the Radioelectric Spectrum, as well as publish, maintain and update the National Frequency Band Allocation Table[3].

Among its dependencies is the Technical Spectrum Management and Planning Subaddress, which has on its functions to evaluate the feasibility requests for the use of the Radioelectric Spectrum. These activities are part of the objective selection processes carried out by the MinTIC [4]. Hence, the project seeks the identification and parameterization of typical values and general conditions for the evaluation of radio interference in fixed service microwave links, as a way to support the technical management performed by the entity. For this purpose, there will be access to a simulation software employed by the Agency as a tool to analyze interferences. The available literature and the recommendations of international entities will be also taken into account.

[3] http://cnabf.ane.gov.co/cnabf/

[4] See, http://www.mintic.gov.co/portal/604/w3-article-6202.html

Contenido

Resumen IV

Lista de Figuras IX

Lista de Tablas XI

1. Introducción 1

2. Objetivos 3
2.1. Objetivo General . . . 3
2.2. Objetivos Específicos . . . 3

3. Resultados Alcanzados Durante el Desarrollo de la Pasantía 4
3.1. Conceptos y simulación de interferencias . . . 4
3.2. Base de datos de enlaces, reducción y análisis . . . 5
3.2.1. Potencia de Recepción . . . 8
3.2.2. Figura de Ruido y KTBF . . . 10
3.3. Parámetros para evaluar interferencias . . . 11
3.3.1. Procedimiento para el análisis de interferencias . . . 14
3.3.2. IRF . . . 18
3.3.3. Margen de Desvanecimiento MD . . . 23
3.3.4. Umbral del Receptor . . . 28
3.3.5. C/I . . . 37
3.3.6. T/I . . . 41

4. Análisis de Resultados e Impactos del Trabajo de Grado 44

5. Alcance de los Objetivos de la Pasantía 47

6. Conclusiones y Recomendaciones 49
6.1. Conclusiones . . . 49
6.2. Recomendaciones . . . 50

A. Cronograma de Actividades 51

B. Decibeles **52**
B.1. Definición 52
B.2. Valores de Referencia 53
B.3. Aspectos Importantes 54

C. KTBF **58**
C.1. Ruido Térmico 58
C.2. Figura de Ruido 59
C.3. Temperatura de Ruido 60
C.4. Unidades 61
C.5. Simulador 62

D. Tablas C/I **63**

Bibliografía **65**

Lista de Figuras

3-1. Histograma para la potencia recibida. 8
3-2. Histograma P_{RX} después de la reducción de datos atípicos. 10
3-3. Contorno de coordinación definido por TIA TSB 10-F 15
3-4. Umbral, Ruido y Niveles de Interferencia 18
3-5. Comparación entre el espectro ideal y real de una señal OFDM. Tomada de [19] 18
3-6. Espectro real de la señal y del filtro. Tomada de [19] 19
3-7. Señal interferente a la entrada del demodulador. Tomada de [19] . . . 19
3-8. Opciones disponibles en ICS TELECOM para calcular el IRF 20
3-9. Resultado obtenido de la simulación de un enlace de ejemplo usando la opción CNC DNRc 61. 21
3-10. Grafica empleada para obtener el valor de α (IRF). 22
3-11. Mapa mundial zonal de precipitaciones 25
3-12. Gráfica de los umbrales máximos y sus respectivas regresiones. 31
3-13. Umbrales calculados a partir de los valores de ancho de banda y las ecuaciones obtenidas. 31
3-14. KTBF fijo (usando F = 4 dB) y KTBF dinámico (F varía según banda de frecuencia) 32
3-15. KTBF y Nivel de Umbral para la banda de 7 GHz - 8 GHz. 33
3-16. KTBF y Nivel de umbral fijo de -72 dBm 33
3-17. Resultados de viabilidad para dos valores de interferencia. 35
3-18. Porcentajes de viabilidad y no viabilidad sin interferencia para distintos esquemas de modulación 36
3-19. Porcentajes de viabilidad y no viabilidad con una interferencia de 5 dB para diferentes esquemas de modulación. 36
3-20. Porcentajes de viabilidad y no viabilidad con una interferencia de 15 dB para diferentes esquemas de modulación. 37
3-21. Arreglo de canales y polarización 40

4-1. Proceso realizado para la reducción y obtención de las bases de datos. 45

A-1. Cronograma de actividades 51

B-1. Sistema representando la señal de entrada y salida 53

B-2. Separarción de la ganancia de un dispositivo en valores de decibeles conocidos. 55
B-3. Diagrama de bloques ejemplificando la operación de suma equivocada. 56
B-4. Se debe realizar la suma en el dominio de la potencia para luego convertir el resultado a decibeles. 56

C-1. Diagrama simplificado de in amplificador. 59

Lista de Tablas

3-1. Fabricantes de radios más utilizados en las solicitudes tramitadas en la ANE 6
3-2. Modelos de radios según fabricante y cantidad 6
3-3. Lista de radios consultados 7
3-4. Distancias máximas recomendadas según banda de frecuencia 7
3-5. Resumen cálculos realizados. Potencia de Recepción 9
3-6. Análisis estadístico de P_{RX} 10
3-7. Figura de ruido típica para bandas desde 1.3 GHz - 55 GHz. 11
3-8. Comparación de los valores de $KTBF$ para bandas desde 10 GHz - 55 GHz. 11
3-9. Tipos de señales interferentes típicamente especificados con los CPI. . 13
3-10. Parámetros necesarios para especificar criterios de protección de interferencias 14
3-11. Criterios para la selección de la separación de canales 23
3-12. Cálculo del IRF 23
3-13. Coeficientes de atenuación según banda y polarización 24
3-14. Coeficientes de atenuación según banda y polarización (Cont.) 24
3-15. Disponibilidad según zona de precipitación 25
3-16. Distancias mínima y máxima segun banda de frecuencia 26
3-17. Estadísticas de la atenuación debida a la lluvia a largo plazo. Polarización Horizontal 27
3-18. Estadísticas de la atenuación debida a la lluvia a largo plazo. Polarización Vertical 27
3-19. Valores Típicos para Sistemas Microondas Digitales según TIA SBF 10-F 28
3-20. Nivel de Umbral en dBm para un BER de 10^{-6} en la banda de 6 GHz 28
3-21. Nivel de Umbral en dBm para un BER de 10^{-6} en la banda de 7-8 GHz 28
3-22. Nivel de Umbral en dBm para un BER de 10^{-6} en la banda de 10-11 GHz 29
3-23. Nivel de Umbral en dBm para un BER de 10^{-6} en la banda de 13 GHz 29
3-24. Nivel de Umbral en dBm para un BER de 10^{-6} en la banda de 15 GHz 29
3-25. Nivel de Umbral en dBm para un BER de 10^{-6} en la banda de 18 GHz 29
3-26. Nivel de Umbral en dBm para un BER de 10^{-6} en la banda de 23 GHz 30

3-27. Valores de umbral máximos resultantes para cada ancho de banda y tipo de modulación. 30
3-28. Anchos de Banda (MHz) registrados en el CNABF 31
3-29. Valores calculados de C/N (dB) entre los umbrales y el KTBF (Fijo y Dinámico) para la Banda de 7 GHz - 8 GHz. 32
3-30. C/N mínimo (dB) - Diferencias entre umbral fijo (-72 dBm) y KTBF Fijo (F = 4 dB). 34
3-31. Parámetros de interferencia usados por la ANE. 34
3-32. Porcentaje de viabilidad usando los criterios de la ANE y una interferencia de 5 dB. 34
3-33. Aplicabilidad de la serie de estándares ETSI 302 217 38
3-34. Clasificación según la eficiencia espectral 39
3-35. Características típicas de T/I en microondas digitales 42

B-1. Unidades en decibeles básicas para algunas magnitudes 54
B-2. Valores de potencia, logaritmo y su correspondiente valor en decibeles. 55

D-1. Valores de C/I para Co-canal, Primer y segundo canal adyacente en la banda de 1.4 GHz a 2.7 GHz 63
D-2. Valores de C/I para Co-canal y primer canal adyacente en la banda de 3 GHz a 11 GHz - Separación de canal hasta 30 MHz y 56/60 MHz 63
D-3. Valores de C/I para Co-canal y primer canal adyacente en la banda de 3 GHz a 11 GHz - Separación de canal de 40 MHz 64
D-4. Valores de C/I para Co-canal y primer canal adyacente en la banda de 13 GHz, 15 GHz y 18 GHz 64
D-5. Valores de C/I para Co-canal y primer canal adyacente en la banda de 13 GHz, 18 GHz y 18 GHz (Cont.) 65
D-6. Valores de C/I para Co-canal y primer canal adyacente en la banda de 23 GHz a 55 GHz 65

1. Introducción

El presente trabajo tiene como finalidad definir los parámetros técnicos para simular interferencias en enlaces microondas aplicable en la ANE. La agencia desde su creación en el año 2009 está conformada por un grupo de varias subdirecciones; la subdirección de gestión y planeación técnica del Espectro es una de ellas. La cual, tiene dentro de sus funciones estudiar y tramitar las solicitudes relacionadas con el uso del espectro radioeléctrico, así como proponer los procesos de ingeniería para la adecuada utilización de las diferentes bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico, incluyendo las satelitales.

Ahora bien, teniendo en cuenta el planteamiento del problema, se realizó un plan de trabajo que inicialmente consistió, en su etapa de recopilación de información, en una búsqueda de recomendaciones internacionales como la ITU, ETSI e IEEE, para dimensionar los parámetros utilizados y analizar los respectivos cálculos de los diferentes valores contemplados.

Por otro lado, se tuvo en cuenta algunas especificaciones técnicas como el umbral para unos radios específicos, los cuales fueron seleccionados mediante la depuración de la base de datos de equipos que se registran en las solicitudes de radioenlaces en la agencia. De igual forma, se realizó un análisis estadístico para establecer el comportamiento de la muestra que en este caso fue la base de datos suministrada por la agencia, donde se realizaron algunas depuraciones teniendo en cuenta criterios de distancia, así como un análisis estadístico de la potencia de recepción con el fin de depurar aún mas la base de datos.

Además, se utilizó el simulador con el que cuenta la entidad para realizar un acercamiento tanto a las herramientas de software empleadas por la entidad como al proceso de análisis de interferencias. El software usado es ICS TELECOM.

El simulador cuenta con una serie de herramientas para diseño de enlace e identificación de interferencias, entre otras. Muchos de los parámetros utilizados por la entidad son los establecidos por defecto en el simulador anteriormente mencionado. Uno de los retos del trabajo fue justificar estos parámetros y verificar si son los adecuados para el análisis que requiere la entidad.

De igual forma, se consultó documentación sobre los factores de rechazo de interferencias (en ingles *Interference Rejection Factor*) y se verificaron los valores que el simulador entrega para dos opciones de IRF. Se consultaron también estándares internacionales que deben ser tomados en cuenta por los fabricantes de los equipos de microondas. Allí se lograron obtener valores típicos para la figura de ruido, para la relación C/I y T/I que pueden ser usados en análisis posteriores.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Definir los parámetros técnicos para la simulación de interferencias en enlaces de microondas, mediante el análisis del comportamiento de los equipos a través de la información técnica de las hojas de datos de los mismos, estándares internacionales y opciones de configuración del software de simulación; con el fin de proveer a la ANE de los elementos necesarios para realizar los estudios de ingeniería de espectro.

2.2. Objetivos Específicos

- Recopilar y analizar la información de filtros IRF (Interference Rejection Filter) o discriminación de filtros en radios típicos para enlaces microondas, en cocanal, canal adyacente y segundo canal adyacente, de acuerdo con los manuales de los radios y documentación existente para obtener un rango de valores típicos usados.

- Recopilar y analizar la información de la sensibilidad - umbral de operación en radios microondas, teniendo en cuenta la capacidad de datos (Mbps), modulación adaptativa, tasa de error de bits, anchos de banda (MHz) y bandas de frecuencia (GHz), de acuerdo con los manuales de los radios y documentación existente para obtener un rango de valores típicos usados.

- Obtener rango de valores típicos según documentación existente de criterios de interferencia relacionados con C/I, T/I y Degradación de Umbral para diferentes condiciones técnicas aplicables.

- Obtener rango de valores de los comportamientos de enlaces microondas simulados teniendo en cuenta datos técnicos de operación de los radios, bandas de frecuencia y anchos de banda, para caracterizar criterios de interferencia como C/I, T/I y margen de degradación.

3. Resultados Alcanzados Durante el Desarrollo de la Pasantía

Una vez se dio comienzo con el proyecto de pasantía, la primera tarea en ser asignada fue la creación de un cronograma de actividades que refleje las distintas tareas que se llevarán a cabo para cumplir de forma satisfactoria los objetivos de la pasantía. El resultado de esta tarea se muestra en el anexo A. Cabe mencionar que en ocasiones algunas actividades se desarrollaron en menor tiempo del estipulado, así como otras que demandaron más tiempo. Sin embargo, se contempló siempre lo dispuesto en la fecha final del cronograma.

3.1. Conceptos y simulación de interferencias

Siguiendo con lo establecido por el cronograma, el grupo de actividades asociadas a la primera actividad general tienen como finalidad familiarizar a los pasantes con los términos y procedimientos generales que se emplean para analizar interferencias en enlaces microondas. Dentro de los conceptos sobre los cuales la entidad considera que se debe tener claridad es en el uso de los decibeles. Por tal motivo se ha escrito un breve apartado con los aspectos mas relevantes en el tratamiento de algunas magnitudes (principalmente potencias) expresadas en decibeles. El resultado de esta tarea se puede apreciar en el anexo B y se hará uso de los conceptos allí expuestos en el desarrollo de actividades posteriores.

De igual forma, otro aspecto que se tiene en cuenta para el análisis de las interferencias es el término que relaciona la potencia de ruido térmico con el ruido provocado por los elementos (especialmente amplificadores) que hacen parte del receptor de un radio microondas. Este termino se podría entender como la potencia de ruido térmico total en el receptor de un radio microondas y se denomina también en ocasiones como piso de ruido térmico y viene dado por la expresión $KTBF$. El anexo C explica cada uno de los términos involucrados; sus unidades y la unidad resultante. Se realiza también el cálculo y la comparación de este valor con los datos entregados por el simulador con el fin de lograr un acercamiento con la herramienta de software empleada por la entidad, ICS TELECOM.

Continuando con el desarrollo de las actividades propuestas por el cronograma, dentro de la primera actividad general, se considera que es importante familiarizarse no solo con la herramienta de simulación, sino con las opciones y procesos que la entidad realiza en el software para analizar las interferencias que puede ocasionar un enlace microondas solicitado por un operador, con los enlaces que se encuentran ya asignados y en funcionamiento.

3.2. Base de datos de enlaces, reducción y análisis

Durante el desarrollo de la pasantía se ha tenido acceso a las bases de datos que tiene la entidad donde se encuentra toda la información de los radio enlaces, ya sea que se encuentren en funcionamiento o en procesos de cancelación o modificación, junto con todos los datos técnicos que le permiten a la entidad realizar los análisis de interferencia correspondientes.

De las bases de datos proporcionadas, se realizaron dos reducciones importantes. Debido a que dentro de los objetivos de la pasantía se contempla la búsqueda de información y manuales de los equipos de radios microondas, es aquí donde se lleva a cabo la primera reducción. Se busca que a partir de todas las marcas y modelos de los radios registrados, se obtenga una lista con los nombres de los fabricantes mas utilizados junto con sus respectivos modelos. Esta nueva base de datos permitirá sentar las bases para encontrar información técnica directamente de los fabricantes, de los manuales o de las hojas de datos para ser usada en la selección de los rangos de valores que serán empleados en la evaluación de interferencias.

De un total de 3040 registros que relacionan la marca y modelo de los equipos de radio, se llegó a un total de 71 registros eliminando las entradas duplicadas. Una vez obtenido un único nombre de fabricante, se procede a contar la cantidad de equipos que se encuentran registrados a cada uno. La tabla 3-1 muestra los fabricantes que tienen en el registro un número de equipos mayor a cien.

Después de haber obtenido la lista de las marcas de radios microondas más utilizados, se hace necesario obtener información adicional de cada uno, ya que existen varios modelos asociados a un mismo fabricante. A continuación se muestran los diferentes modelos pertenecientes a cada marca, así como la cantidad respectiva.
La idea detrás de la reducción de la base de datos por modelo y fabricante era obtener la información técnica de esos equipos ya que son los más utilizados según los registros. Sin embargo, no todos los fabricantes disponen un acceso a la información técnica de sus radios. Con base en esto, se trato de compensar la falta de información de los radios faltantes con datos técnicos de otros radios con información disponible.

Tabla 3-1.: Fabricantes de radios más utilizados en las solicitudes tramitadas en la ANE

Fabricantes	**Total Equipos**
NEC	1309
ERICSSON	442
DMC STRATEX	197
HUAWEI	147
HARRIS	121
NERA	106
SIEMENS	105
CERAGON	101

Tabla 3-2.: Modelos de radios según fabricante y cantidad

HUAWEI	
Modelo	**# Equipos**
RTN-620-23GHz	23
OPTIX-RTN910	20
OPTIX RTN 950	19
RTN-620-18GHz	13
RTN-620	10

DCM STRATEX	
Modelo	**#Equipos**
DART-E1-DS-1	46
QUANTUM-7	43
SPECTRUM-II-16E1	11
QUANTUM-8	11
CLASIC-II	10
DAR	10

HARRIS	
Modelo	**#Equipos**
MICROSTAR	44
MEGASTAR	43
MEGASTAR/155/6L	35
MICROSTAR-L	12
GLOBESTAR	9

NERA	
Modelo	**#Equipos**
NL-299	14
NL-295	12
NL-292	9
NL-290	8
NL-247	8

NEC	
Modelo	**# Equipos**
PASOLINK	219
PASOLINK NEO PDH	113
IPASOLINK	88
MINILINK-E	51
PASOLINK 23GHz	41

ERICSSON	
Modelo	**# Equipos**
MINILINK-E	51
MINI-LINK	43
MINI-LINK-7E	35
MINILINK-8E	29
MINILINK-13	28

CERAGON	
Modelo	**# Equipos**
IP-20G	13
IP-10G	13
IP-10-G	11
IP-20	6
IP-10G(40MHz)	6

SIEMENS	
Modelo	**# Equipos**
SRAL-XD	23
SRT-1F	10
CTR 190/7	9
CTR 190/8	7
CTR-190	5

La lista de los equipos consultados se muestra en la tabla 3-3.

La información técnica obtenida a partir de las hojas de datos y documentación disponible, será empleada para definir los niveles de umbral promedio para diferentes bandas de frecuencia de operación, esquemas de modulación y anchos de banda. Los resultados obtenidos se encuentran consignados en la sección 3.3.4 por tener estrecha relación con uno de los objetivos de la pasantía.

Continuando con la manipulación de las bases de datos, con el fin de obtener información tanto útil como realista, es decir, que los valores se encuentren dentro de rangos establecidos, se hace necesario aplicar ciertos criterios para depurar la base de datos de los enlaces cuyo número total de registros es 20145.

Tabla 3-3.: Lista de radios consultados

Fabricante	**Modelo**
NEC	IPasolinK 400 High Grade ODU
NEC	NEO High Grade ODU
NEC	IPASOLINK 200 IHG ODU
NEC	NHG2 ODU
ALCATEL	9500 MPR
CERAGON	Fiber Air IP-20C
ERICSSON	Mini Link TN

El primer criterio aplicado consiste en eliminar los registros cuyas distancias de enlace estén entre 500 metros y 200 km. La selección de estas distancias están dadas por la frecuencia de operación. Los enlaces microondas trabajan en la banda SHF luego las distancias para frecuencias bajas no pueden superar los 200 km mientras que para las frecuencias altas enlaces de 500 metros pueden ser aceptables. La reducción aplicando este criterio dejó como resultado 18990 registros.

El segundo criterio para la depuración también tiene en cuenta la distancia de los enlaces, sólo que relacionando esta vez la banda de operación para no superar la distancia máxima establecida según la tabla 3-4 proporcionada por la ANE. Reduciendo el número de registros a 18645.

Tabla 3-4.: Distancias máximas recomendadas según banda de frecuencia

Banda (GHz)	**Distancia Max (Km)**
4	180
6	150
7	75
8	70
10	50
11	35
13	30
15	30
18	25
23	15
27	10

Con la información de la base de datos reducida, se tuvo en cuenta un criterio adicional para eliminar posibles enlaces que hayan sido registrados con valores atípicos de potencias de transmisión o frecuencias de operación. Los apartados siguientes muestran como se redujo la base de datos teniendo en cuenta un análisis estadístico de la potencia de recepción y además como la información sobre la figura de ruido

estipulada en un estándar internacional puede afectar al piso de ruido $KTBF$.

3.2.1. Potencia de Recepción

Se realizó el cálculo de la potencia. Una vez calculada arrojó una serie de valores que se encontraban un poco desfasados y que podrían alterar los cálculos estadísticos posteriores. Ya que el histograma hallado indica valores poco significantes de la muestra, que se encuentran por fuera del promedio, como se aprecia en la figura 3-1.

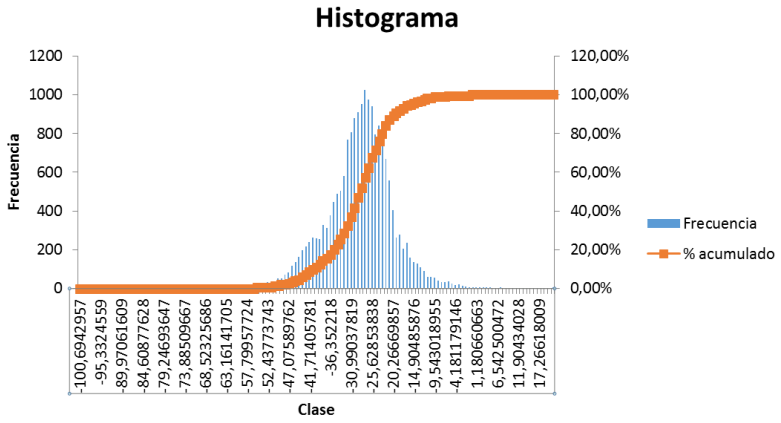


Imagen 3-1.: Histograma para la potencia recibida.

Para poder realizar cálculos más ajustados y precisos, se decidió no tener en cuenta los valores no significativos, para identificar estos valores, se realizó un análisis de *caja de bigote* que consiste en reconocer los valores atípicos que se encuentran más allá del límite superior e inferior de la muestra.

Inicialmente se ordenó de menor a mayor la muestra, la cual estaba conformada por 18645 datos que corresponden a las Potencias de Rx calculadas anteriormente. Una vez organizada la muestra se prosigue a calcular la moda que corresponde al valor de Potencia Rx con mayor frecuencia: -28.073915 dBm con 61 muestras que coinciden para este valor.

Después se prosigue a calcular la mediana, que corresponde al promedio total de la muestra que toma un valor de -29,2500826 dBm. Ahora bien, se realiza el cálculo de los cuartiles por medio de la siguiente fórmula

$$Q_k = \frac{k(n+1)}{4} \tag{3-1}$$

Donde

k = Número del cuartil que se va a calcular
n = muestra (cantidad)

Por otro lado, para los límites es necesario calcular el RIQ, el cual es la relación entre Q1 y Q3 tal que

$$RIQ = Q3 - Q1 \tag{3-2}$$

Teniendo que el límite inferior y superior corresponden a las ecuaciones (3-3) y (3-4).

$$Lim_{inf} = Q1 - (1{,}5 \times RIQ) \tag{3-3}$$

$$Lim_{Sup} = Q3 + (1{,}5 \times RIQ) \tag{3-4}$$

Los cálculos hallados se registran en la siguiente tabla con mayor claridad

Tabla 3-5.: Resumen cálculos realizados. Potencia de Recepción

Dato	**Valor (dBm)**
Moda	-28.073915
Mediana	-29,2500826
Media	-28,77169753
Q1	-33,83138599
Q2	-28,68849933
Q3	-24,1115738
RIQ	9,71981218
Límite Inferior	-48,4111
Límite Superior	-9,53185554

Ya teniendo el límite superior e inferior de la muestra se identifican los valores atípicos teniendo en cuenta el siguiente rango $-48,4111$ dBm $< x < -9,53185554$ dBm. De esta manera la muestra se reduce a 18027 datos. Una vez reducida la base de datos, se puede realizar el análisis estadístico con un porcentaje de precisión mayor.
De igual forma, se gráfica nuevamente el histograma teniendo en cuenta la reducción de la base de datos sin valores atípicos
Las conclusiones de este procedimiento serán discutidos en la sección 4.

Tabla 3-6.: Análisis estadístico de P_{RX}

$\mathbf{P_{RX}}$ **(dBm)**	
Media	-28,83006339
Error típico	0,057659472
Mediana	-28,50112597
Moda	-28,07390147
Desviación estándar	7,033930452
Varianza de a muestra	60,74403471
Curtosis	-0,154958004
Mínimo	-48,40106361
Máximo	-9,532490015

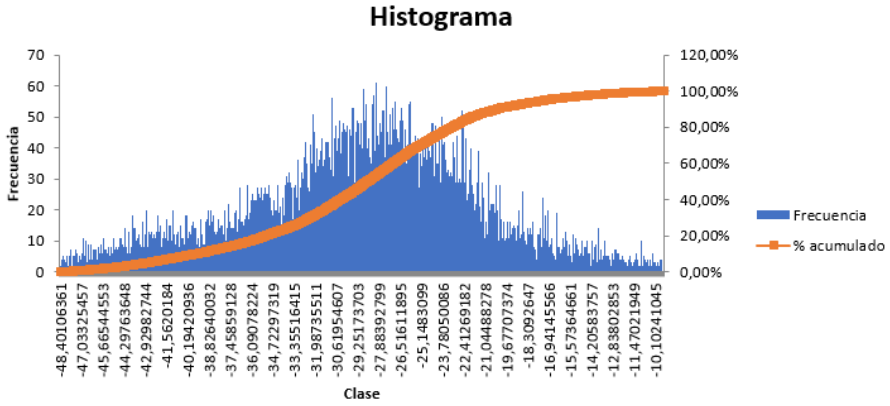


Imagen 3-2.: Histograma P_{RX} después de la reducción de datos atípicos.

3.2.2. Figura de Ruido y KTBF

Dentro de la documentación consultada, existe un estándar internacional ETSI EN 101 854 [5] que reúne información de varios fabricantes y consigue sintetizar en varias tablas valores de figura de ruido para distintas bandas de frecuencia como se aprecia en la tabla 3-7.

En el cálculo del piso de ruido $KTBF$ que realiza la entidad se empleaba independientemente de la banda de frecuencia el valor de 4 dB para la figura de ruido. Ahora bien, teniendo en cuenta la tabla 3-7. Se pretende realizar los cálculos correspondientes para cada enlace de la base de datos de solicitudes con el fin de compararlos con el KTBF normalizado, es decir el utilizado por la agencia. Sin embargo, es importante notar que los cálculos se realizan en decibeles, luego al termino KTB en dB, se le suma la figura de ruido F por lo que las diferencias entre los valores calculados será únicamente la diferencia entre el valor de la figura de ruido usada por la agencia y los valores típicos recomendados por la ETSI (para las bandas de 8 GHz en adelante)

Tabla 3-7.: Figura de ruido típica para bandas desde 1.3 GHz - 55 GHz.

Banda de Frecuencia (GHz)	**Figura de Ruido Típica (dB)**
1,3 - 5	4
6 - 8	4
10 - 11	4,5
13 - 18	5
23	5,5
26 - 28	6,5
32 - 42	7,5
48 - 55	10

como se muestra en la tabla 3-8. Ya que los anchos de banda empleados en el cálculo serían los mismos.

Tabla 3-8.: Comparación de los valores de $KTBF$ para bandas desde 10 GHz - 55 GHz.

Banda de Frecuencia (GHz)	$KTBF_{ETSI} - KTBF_{4dB}$
10 - 11	0,5
13 - 18	1
23	1,5
26 - 28	2,5
32 - 42	3,5
48 - 55	6

3.3. Parámetros para evaluar interferencias

Los apartados siguientes fueron escogidos de tal forma que estuvieran relacionados con los objetivos de la pasantía, y permitieran identificar los desarrollos logrados correspondientes para cada uno. Hasta este punto se han tratado algunos aspectos relacionados con interferencias en enlaces microondas, sin embargo resulta útil definir algunos términos que se encuentran también asociados a los criterios de protección de interferencias (en ingles *Interference Protection Criteria* o IPC). Estas definiciones se encuentran en [14], sección 2, que a su vez han sido tomadas de las regulaciones publicadas por la ITU y la FCC *Federal Communications Commission* , y se mencionan a continuación.

Interferencia Permisible es la interferencia observada o prevista que cumple con la interferencia cuantitativa y criterios de compartición contenidos en las regulaciones

y recomendaciones.

Interferencia Perjudicial es aquella que pone en peligro el funcionamiento, degrada, obstruye o interrumpe un servicio de radiocomunicación.

Relaciones de Protección son los mínimos valores de las relaciones de las señales deseadas a no deseadas (*Wanted to Unwanted* - W/U ratios) expresados en decibeles en la entrada de un receptor de forma tal que una calidad de recepción especificada de la señal deseada sea alcanzada a la salida del receptor.

Criterios de protección de interferencias CPI son niveles absolutos o relativos de una señal interferente definidos a la entrada del receptor, bajo ciertas condiciones, de forma que la degradación permitida de desempeño no sea excedida. Son definidos usualmente como un nivel absoluto de potencia interferente I, como una relación de potencias de interferencia a ruido I/N o como la relación de potencias de portadora a interferencia C/I.

En el documento mencionado anteriormente, se especifican los CPI para interferencias permisibles. Estos criterios pueden considerar tanto las interferencias causadas por varias señales o por un solo interferente. En el primer caso los CPI se derivan de los objetivos de desempeño, y de allí se derivan los criterios para el segundo caso, y estos a su vez son usados como criterios de compartición de espectro.

Los criterios de protección para muchos servicios son un tanto dependientes del tipo de señal interferente recibida. Sin embargo, un numero relativamente pequeño de clases genéricas de modulación de señales interferentes pueden definir las situaciones límite. La tabla 3-9 muestra una clasificación de los tipos de señales interferentes que serán de gran utilidad a la hora de recurrir a otras fuentes de información. A su vez, para un servicio dado u un tipo de sistema, los CPI deben incluir los parámetros que se muestran en la tabla 3-10 tanto para múltiples interferentes como para uno solo.

Tabla 3-9.: Tipos de señales interferentes típicamente especificados con los CPI.

Tipos de señal interferentes	**Definición**
CW (del ingles *Continuous Wave*)	Una señal continua con un ancho de banda mucho mas pequeña el de la banda base del receptor.
Tipo Ruido	Una señal continua que asemeja el ruido blanco Gaussiano en el ancho de banda de RF del receptor (una DEP uniforme) o produce el mismo efecto de tal señal
Pulso	Una señal que se enciende y apaga en función del tiempo y puede describirse en términos de ancho de pulso y tasa de repetición de pulso. Los pulsos pueden ocurrir con una tasa de repetición constante o variable.
Impulso	Una señal tipo pulso con un ancho de pulso muy corto (en ocasiones menor a un micro segundo). En general, cualquier señal tipo pulso que tenga un ancho de pulso mucho mas pequeño que la respuesta al impulso de la banda de paso del receptor, puede ser considerada como una señal tipo impulso
Igual que la Señal Deseada	Todos los parámetros de la señal son iguales que los de la señal deseada excepto por el contenido de información banda base (las frecuencias de las portadoras pueden cambiar)
Larga Duración	Niveles de señal interferente que están presentes la mayoría del tiempo. (por ejemplo, niveles no excedidos por mas del 80 % del tiempo)
Corta Duración	Niveles de señal interferente que son raramente excedidos. (por ejemplo, niveles no excedidos por mas de el 99.9 % del tiempo)

Los parámetros técnicos de los sistemas microondas digitales varían en un amplio rango y no pueden ser simplemente caracterizados. El desempeño de los sistemas microondas digitales están generalmente definidos en términos de los objetivos de desempeño y de error. Están diseñados para lograr valores muy bajos de error con una disponibilidad típica del 99.999 % o superior. Los valores para estos criterios están presentados en tres categorías; de larga duración (incluyen CW y señales tipo ruido); de corta duración (también para CW y señales tipo ruido); y señales interferentes tipo pulso. Una vez definidos los conceptos y términos anteriores, es de utilidad ahora conocer el proceso general de análisis de interferencias para un nuevo radioenlace, el cual consta de tres pasos principales para lo que nos concierne.

Tabla 3-10.: Parámetros necesarios para especificar criterios de protección de interferencias

Parámetro	**Unidades Típicas**	**Descripción**
Umbral de potencia	dBm, dBW, dB	Uno o mas niveles de potencia de señal interferente I, I/N, o C/I
Ancho de banda de referencia	Hz, KHz, MHz	Ancho de banda en el cual la potencia de la señal interferente debería ser calculado o medido
Porcentaje del tiempo	%	Para cada umbral, el porcentaje de tiempo durante el cual el umbral debería (C/I) o no (I o I/N) ser excedido
Porcentaje de ubicaciones	%	Para cada umbral, el porcentaje de ubicaciones en las cuales el umbral debería (C/I) o no (I o I/N) ser excedido. Usado en algunos servicios para proteger las operaciones dentro de un área de servicio
Condiciones especiales	Varios	Información necesaria para la interpretación o la aplicación de los umbrales, incluyendo como mínimo, si se trata de múltiples o un solo interferente; el tipo de señal interferente; y para umbrales de I/N y C/I los niveles de referencia correspondientes. Puede incluir duración de la superación de los umbrales permitidos.

3.3.1. Procedimiento para el análisis de interferencias

Esta sección está basada en el procedimiento descrito en [6] y permitirá apreciar de forma general el proceso de evaluación de interferencias en enlaces microondas digitales basados en la publicación TIA TSB 10-F, y como resultado la relación de protección I/N será mostrada.

Identificar enlaces existentes para análisis

En TIA TSB 10-F se define un contorno circular de coordinación, que permite identificar los enlaces que pueden considerarse para analizar interferencias. La imagen 3-3 muestra las partes que componen al contorno. Se define una distancia D_c definida como la distancia circular de coordinación que corresponde a 350° de la circunferencia. Los otros 10° restantes, son usados para determinar una sección en dirección del lóbulo principal de la antena, cuya distancia es D_k.

Este contorno de coordinación tiene en cuenta la directividad de las antenas, por lo tanto es dependiente de la frecuencia como se muestra a continuación

Por debajo de 15 GHz, $D_k = 400$ km y $D_c = 200$ km
Por encima de 15 GHz, $D_k = 140$ km y $D_c = 75$ km

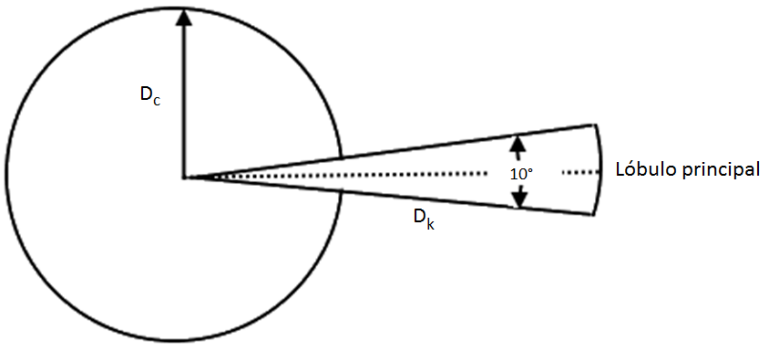


Imagen 3-3.: Contorno de coordinación definido por TIA TSB 10-F

Con base en estos criterios se define el contorno de coordinación que a su vez permitirá identificar las estaciones que pueden verse interferidas por la presencia de un nuevo enlace.

Calcular interferencias

El calculo del nivel de interferencia I, sigue un proceso similar al calculo de la potencia recibida de un enlace microondas normal con polarizaciones iguales. Sin embargo, en un escenario mas real, la discriminación por polarización cruzada se tiene en cuenta, siendo entonces la ecuación usada escrita como

$$I = P_{TX} - L_{TX} + G_{TX} - L_P + G_{RX} - L_{RX} - DISCR_{TX+RX} \tag{3-5}$$

Donde
I = Nivel de potencia interferente en el receptor interferido en dBm
P_{TX} = Potencia de transmisión en dBm del transmisor interferente
L_{TX} = Pérdidas de transmisión en dB
G_{TX} = Ganancia de la antena transmisora interferente en dBi
L_P = Pérdidas de propagación
G_{RX} = Ganancia de la antena receptora interferida en dBi
L_{RX} = Perdidas de recepción
$DISCR_{TX+RX}$ = Discriminación total de las antenas y discriminación por polarización cruzada en dB

La ecuación (3-5) puede reescribirse como

$$I = EIRP_{TX} - L_P + G_{RX} - L_{RX} - DISCR_{TX+RX} \tag{3-6}$$

Donde

$$EIRP_{TX} = P_{TX} - L_{TX} + G_{TX} \tag{3-7}$$

Cabe aclarar que las perdidas por transmisión y recepción, según la información que solicita la agencia, ya deben ser contempladas por los operadores. El valor del nivel de potencia de interferencia es dependiente de tres aspectos importantes.

Modelo de progpagación

Se recomienda, según TSB 10-F realizar un análisis inicial bajo la suposición que todos los enlaces tienen linea de vista (LOS en ingles *Line Of Sight*). Así, en caso de realizar un análisis usando solo el modelo de propagación de espacio libre y encontrar frecuencias libres de interferencias, no es necesario realizar otro análisis ya que el peor caso (en el que las señales no sufren otros efectos y por tanto se propagan a mayor distancia) ha sido tenido en cuenta.

En caso contrario, donde se hayan identificado interferencias, TSB 10-F recomienda usar el modelo de propagación de Longley-Rice[1] que provee métodos para la predicción de las perdidas de propagación, teniendo en cuenta los aspectos del terreno y los obstáculos.

Patron de radiación de la antena

Para determinar las ganancias de las antenas interferentes e interferidas, TSB 10.F recomienda el uso de los valores de ganancia y discriminación dados por los fabricantes con el fin de determinar el valor del término $DISCR_{TX+RX}$.

Potencia de Transmisión

La potencia del transmisor interferente P_{TX} en la ecuación (3-5) es escogida usualmente como la máxima potencia de transmisión autorizada. Sin embargo, en ocasiones esta potencia no siempre representa el valor máximo, pues existen ocasiones donde el equipo de radio transmisor tiene habilitado el control automático de potencia de transmisión (ATPC en ingles *Automatic Transmit Power Control*).

[1] Usado en el rango de 20 Mhz - 20 GHz, denominado tambien como ITM (*Irregular Terrain Model*), donde la variación de la señal es determinada de acuerdo a los cambios atmosféricos, perfil topográfico y espacio libre

Determinar objetivos de interferencia

Para determinar si un transmisor esta interfiriendo con un receptor, se deben considerar el nivel de interferencia máximo permitido (I_{max}) que el receptor interferido puede tolerar antes que la degradación se vuelva inaceptable. Luego, el valor de I_{max} es comparado con el valor de interferencia previsto I para determinar si éste es mayor o menor que I_{max}.

Cuando se analizan las interferencias en los sistemas digitales, TSB 10-F calcula dos objetivos, el valor de I_{max} o T/I. El objetivo para I_{max} está definido como la máxima interferencia permitida que previene la degradación del umbral estático[2] del receptor (T) en 1 dB. Por otra parte el objetivo para T/I esta definido como la relación entre el umbral estático del receptor e I_{max}. Las definiciones para estos dos objetivos son aplicables a todo tipo de señales interferentes (digitales, FM, AM, etc.).

El objetivo para T/I varia dependiendo de una variedad de factores como las características de filtrado de los receptores digitales, la densidad espectral de potencia de las señales interferentes, y la separación de frecuencia entre la señal interferente y deseada. Por lo tanto estas situaciones implican un objetivo para co-canal y otro para frecuencias cercanas a la de operación.

Co-canal

Suponiendo que la señal interferente es del tipo ruido con un ancho de banda igual o menor que el de la señal deseada, los valores teóricos de T/I están 6 dB por encima de los valores teóricos co-canal para C/N. Por lo tanto, I_{max} tiene que esta al menos 6 dB por debajo de el ruido térmico (N) del receptor interferido para prevenir una degradación de 1 dB. La imagen 3-4 muestra la situación descrita.
De donde se puede observar que

$$I_{max} = N - 6 \text{ dB} \tag{3-8}$$

Existiendo también la posibilidad de emplear este valor como un objetivo para evaluar las interferencias. Es decir, que I_{max}/N debe ser menor que igual a -6 dB.

Canales semi-adyacentes y adyacentes

Para ciertos canales que se encuentran cercanos, la separación entre las frecuencias de las señales interferentes y las obtenidas en el receptor (interferido) causa que los

[2]Valor de umbral del receptor para el cual la tasa de error de bit (BER) es igual a 10^{-6}

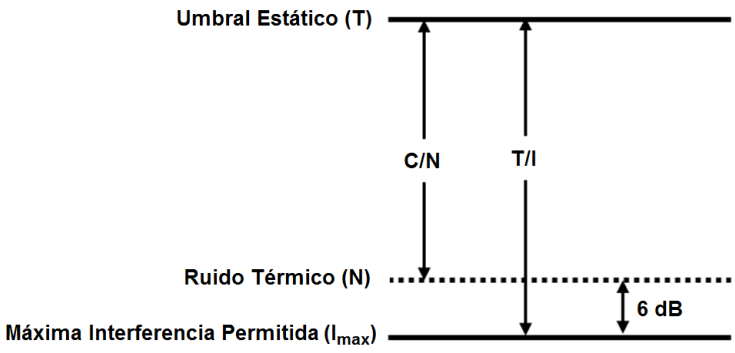


Imagen 3-4.: Umbral, Ruido y Niveles de Interferencia

valores de T/I cambien debido al denominado factor de reducción de interferencias (que será tratado en la sección 3.3.2). Este valor toma en cuenta el proceso que el filtro del receptor realiza en la señal interferente.

3.3.2. IRF

IRF (Interference Rejection Factor) denominado también como NFD (*Net Filter Discrimination*) [12] o FDR (*Frecuency Dependent Rejectio*) es un valor de protección necesario donde el ancho de banda de la señal interferente se superpone parcialmente con el ancho de banda de la señal deseada haciendo que una parte de la potencia interferente afecte el rendimiento del sistema.

En la figura 3-5 se puede observar que el espectro de una señal no es perfecto y trae consigo una serie de lóbulos secundarios. Tanto en la señal de recepción como en la de transmisión.

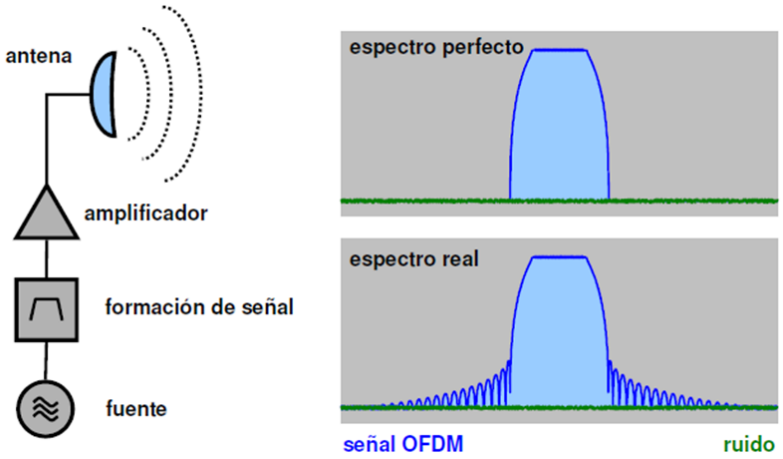


Imagen 3-5.: Comparación entre el espectro ideal y real de una señal OFDM. Tomada de [19]

Por esta razón se hace necesario utilizar un filtro NFD para garantizar la integridad de la señal y evitar de esta manera las interferencias en canal adyacente.

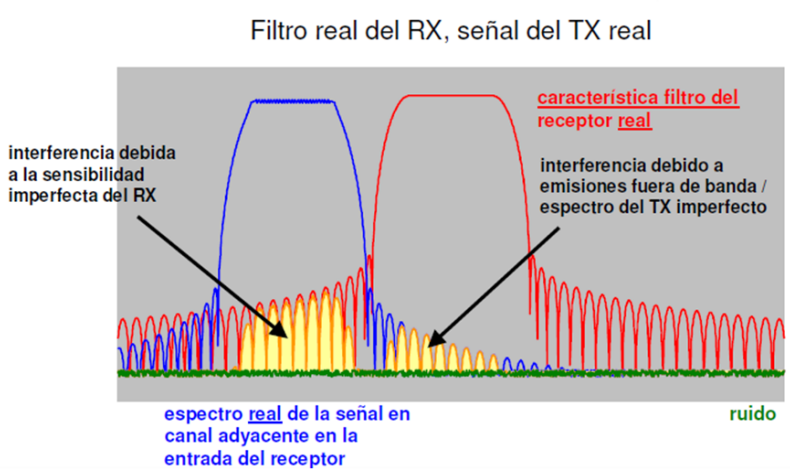


Imagen 3-6.: Espectro real de la señal y del filtro. Tomada de [19]

La NFD o IRF es la parte de la señal interferente considerada por el demodulador comparada con la potencia total y la interferencia de la señal en la entrada del receptor [19].

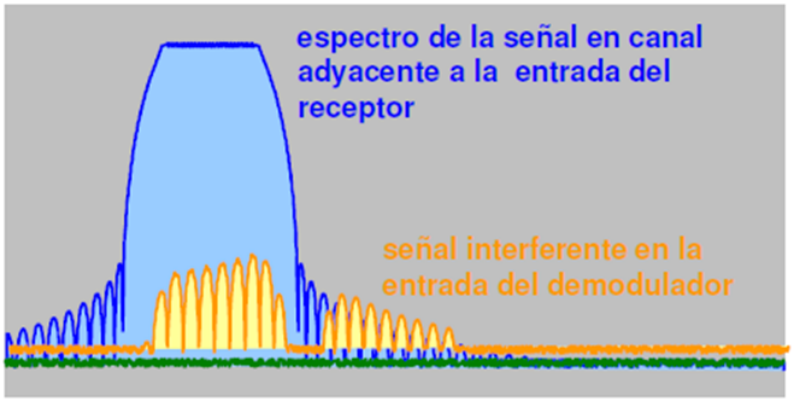


Imagen 3-7.: Señal interferente a la entrada del demodulador. Tomada de [19]

EL valor de NFD es evaluado para todas las posibles frecuencias y posibles combinaciones de sistemas de transmisión y recepción. Una vez se calcula este valor, es restado de los valores obtenidos para las relaciones de señales deseadas a no deseadas (*Wanted to Unwanted Ratios*).

$$W/U = \text{Valor obtenido en co-canal} - NFD \tag{3-9}$$

Ahora, consideraremos un ejemplo usando el software de simulación, con el fin de

aterrizar más el concepto de los valores de IFR. La imagen 3-8 muestra los posibles escenarios de selección de valores para este parámetro.

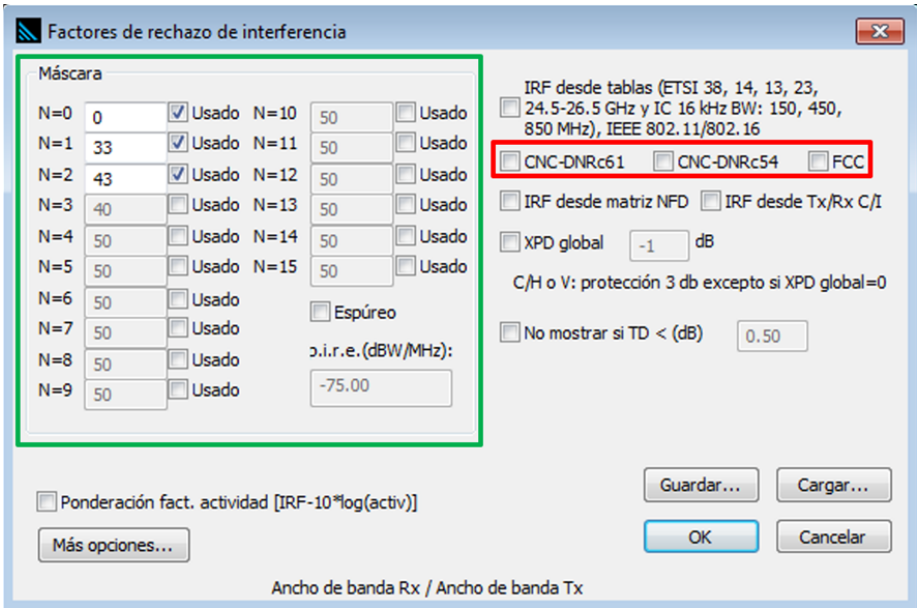


Imagen 3-8.: Opciones disponibles en ICS TELECOM para calcular el IRF

Es de importancia describir la prioridad que tiene cada una de estas opciones, aclarando que solo se tendrá en cuenta la opción seleccionada de mayor prioridad. Se han comprobado sólo dos prioridades, la prioridad mas baja de las dos opciones esta dada por la opción Máscara (señalada en verde), donde los valores son ingresados de manera manual. La prioridad siguiente esta dada por el grupo de las tres opciones enmaradas en rojo.

Entre estas opciones se encuentran el procedimiento dispuestos por la Comisión Nacional de Comunicaciones de Argentina en la directiva general DNRc 61, el cual se explicará a continuación. Los resultados de un enlace de ejemplo con la opción CNC DNRc 61 seleccionada se muestra en la figura 3-9.

Las frecuencias de recepción del receptor interferido y del transmisor interferente son 17755 MHz y 17712 MHz respectivamente. Ambos con un ancho de banda de 55 MHz.Ahora, según la DNRc 61-02, el IRF (α), se expresará en dB, el cual se calcula a partir de la diferencia de frecuencias normalizada.

$$DF = \frac{|F_t - Fr|}{B_n} \tag{3-10}$$

Donde

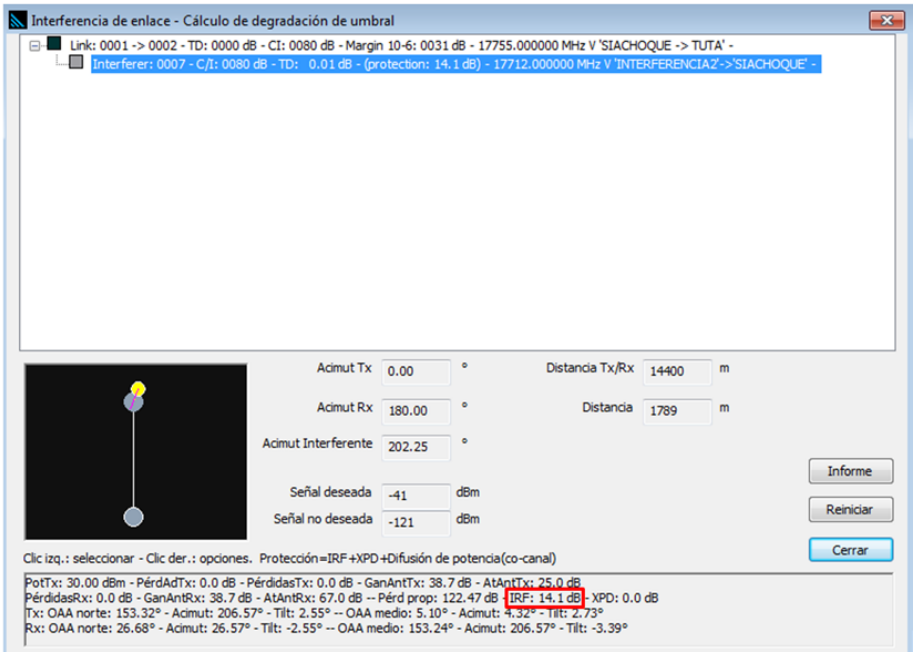


Imagen 3-9.: Resultado obtenido de la simulación de un enlace de ejemplo usando la opción CNC DNRc 61.

DF= Diferencia de frecuencia normalizada
F_t = Frecuencia del transmisor interferente MHz
F_r = Frecuencia del receptor interferido en MHz
B_n = Toma el mayor valor entre:
B_{nI} = Ancho de banda de la señal interferente
B_{nU} =Ancho de banda de la señal Útil

Para el ejemplo que nos concierne DF será

$$DF = \frac{|17712 - 17755|}{55} = 0{,}7818 \tag{3-11}$$

Realizado este cálculo, utiliza la gráfica para obtener el valor de α.
Luego con base en el siguiente criterio, se define el valor final de α

$$f(x) = \begin{cases} \text{Valor de la gráfica} & si \quad B_{nI} \leq B_{nU} \\ \text{Valor de la gráfica} + 10\log_{10}\left(\frac{B_{nI}}{B_{nU}}\right) & si \quad B_{nI} > B_{nU} \end{cases} \tag{3-12}$$

Para este caso los anchos de banda son iguales, por lo tanto, el valor de α sólo viene dado por la gráfica, siendo este cercano a 14 dB. La diferencia de este resultado con

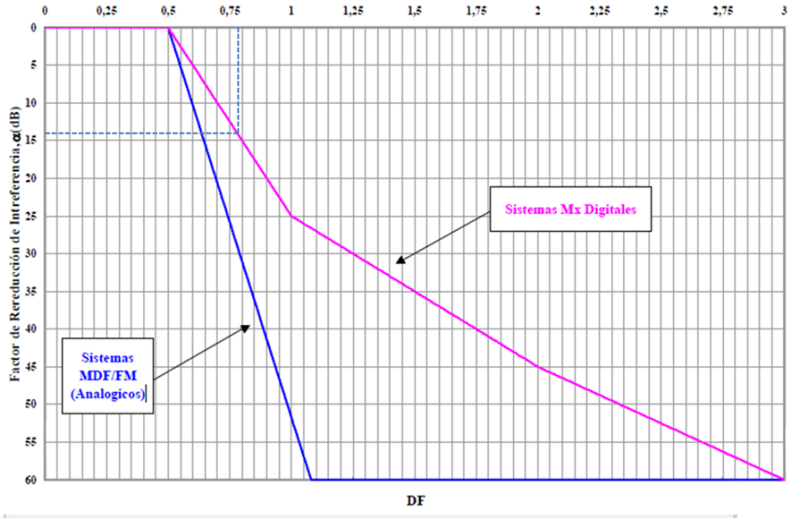


Imagen 3-10.: Grafica empleada para obtener el valor de α (IRF).

el obtenido en el simulador radica en la aproximación realizada en la lectura de la gráfica.

El documento que describe el procedimiento anterior junto con especificaciones adicionales sobre los procesos que realiza la Comisión Nacional de Comunicaciones frente a la evaluación de interferencias se puede encontrar en la web[3].

En cuanto a la otra opción, también dispuesta por la Comisión Nacional de Comunicaciones de Argentina, la DNRc 54 emplea la siguiente ecuación para el valor n que será tenido en cuenta para el posterior calculo del IRF.

$$n = \frac{\Delta f}{S} = \frac{F_{TX} - F_{RX}}{S} \tag{3-13}$$

Donde, S puede tomar valores según la separación entre canales adyacentes, según la frecuencia de transmisión F_{TX} como se aprecia en la tabla 3-11. luego el valor de n es usado para calcular el valor de IRF según se muestra en la tabla 3-12.

Es de notar que las frecuencias que se trabajan en microondas son lo suficientemente grandes como para hacer que n sea mayor a 3, por lo tanto el IRF calculado en estos casos será de 72 dB.

La última opción del grupo, consideramos que consiste en los valores que la FCC

[3]https://www.enacom.gob.ar/multimedia/noticias/archivos/201408/archivo_20140822103439_9682.pdf

especifica en el Título 47 de la CFR parte 101, sección 101.111[4], Sin embargo, los valores no fueron comparados directamente empleando fórmulas, sino evaluando los resultados obtenidos con los arrojados por la opción DNRc 61, donde se aprecia que los valores de IRF para la FCC son mayores y por lo tanto emplean a nuestro parecer una política más restrictiva en este aspecto.

Tabla 3-11.: Criterios para la selección de la separación de canales

S	**Condición**
20 KHz	Para FRX $<$ 174 MHz
25 KHz	Para FRX $>$ 174 MHz, excepto para los 2 casos siguientes
250 KHz	Para Radiodifusión de TV en las bandas 225 MHz - 232,5 MHz
500 KHz	Para Radiodifusión de TV en las bandas 232,5 MHz - 240,5 MHz

Tabla 3-12.: Cálculo del IRF

n	**IRF (dB)**
$0 \leq n \leq 1$	$64n$
$1 < n \leq 2$	$64n + 58$
$2 < n \leq 3$	$2n + 66$
$n > 3$	72

3.3.3. Margen de Desvanecimiento MD

Mediante la Recomendación ITU-R P.530-16 [2] numeral 2.4.1, Estadísticas de la atenuación debida a la lluvia a largo plazo. Se realizó el cálculo de la atenuación en la trayectoria para el 0.01 % del tiempo. Tal como se indica a continuación

Inicialmente a partir de la tabla de coeficientes para el cálculo de la atenuación de la lluvia, disponible en la recomendación UIT-R P.838-3 [16]. Se obtienen los coeficientes de atenuación tanto para polarización horizontal como vertical. En las tablas 3-13 y 3-14 se observa esta relación.

[4] https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=ecc2302de697e60349df8884a3a918b7&mc=true&node=se47.5.101_1111&rgn=div8

Tabla 3-13.: Coeficientes de atenuación según banda y polarización

Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
1	0,0000259	0,9691	0,0000308	0,8592
1,5	0,0000443	1,0185	0,0000574	0,8957
2	0,0000847	1,0664	0,0000998	0,9490
2,5	0,0001321	1,1209	0,0001464	1,0085
3	0,0001390	1,2322	0,0001942	1,0688
3,5	0,0001155	1,4189	0,0002346	1,1387
4	0,0001071	1,6009	0,0002461	1,2476
4,5	0,0001340	1,6948	0,0002347	1,3987
5	0,0002162	1,6969	0,0002428	1,5317
5,5	0,0003909	1,6499	0,0003115	1,5882
6	0,0007056	1,5900	0,0004878	1,5728
7	0,001915	1,4810	0,001425	1,4745
8	0,004115	1,3905	0,003450	1,3797
9	0,007535	1,3155	0,006691	1,2895

Tabla 3-14.: Coeficientes de atenuación según banda y polarización (Cont.)

Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
10	0,01217	1,2571	0,01129	1,2156
11	0,01772	1,2140	0,01731	1,1617
12	0,02386	1,1825	0,02455	1,1216
13	0,03041	1,1586	0,03266	1,0901
14	0,03738	1,1396	0,04126	1,0646
15	0,04481	1,1233	0,05008	1,0440
16	0,05282	1,1086	0,05899	1,0273
17	0,06146	1,0949	0,06797	1,0137
18	0,07078	1,0818	0,07708	1,0025
19	0,08084	1,0691	0,08642	0,9930
20	0,09164	1,0568	0,09611	0,9847
21	0,1032	1,0447	0,1063	0,9771
22	0,1155	1,0329	0,1170	0,9700
23	0,1286	1,0214	0,1284	0,9630
24	0,1425	1,0101	0,1404	0,9561
25	0,1571	0,9991	0,1533	0,9491
26	0,1724	0,9884	0,1669	0,9421
27	0,1884	0,9780	0,1813	0,9349
28	0,2051	0,9679	0,1964	0,9277

Se tienen en cuenta los valores correspondientes a las bandas comprendidas entre 4 GHz y 27 GHz. Ahora bien, como se indica que el cálculo MD se va a realizar sobre la zona N, se consulta la tabla zonal donde se indica la rata de lluvia dependiendo de la zona específica. Esta se puede encontrar en la recomendación ITU-R P.837-1 [15] Se puede observar en la siguiente tabla, los valores correspondientes a la zona N.

Tabla 3-15.: Disponibilidad según zona de precipitación

Porcentaje de tiempo (%)	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
1,0	< 0,1	0,5	0,7	2,1	0,6	1,7	3	2	8	1,5	2	4	5	12	24
0,3	0,8	2	2,8	4,5	2,4	4,5	7	4	13	4,2	7	11	15	34	49
0,1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65	72
0,03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105	96
0,01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115
0,003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200	142
0,001	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250	170

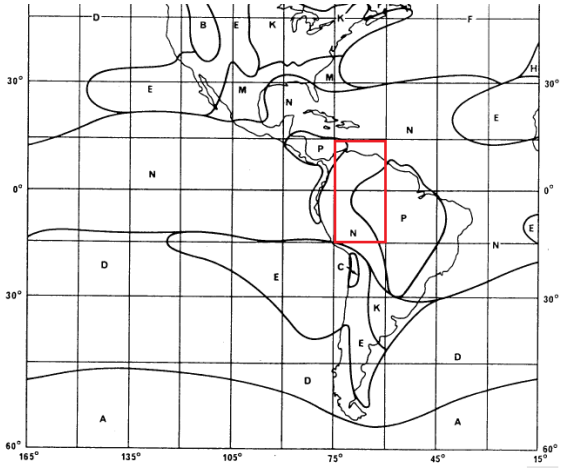


Imagen 3-11.: Mapa mundial zonal de precipitaciones

Entonces,

$$RMAX(0{,}01\,\%) = 95mm/hr$$

Ahora bien, para cuantificar el exceso de atenuación producto de la lluvia, mediante la relación aproximada entre la atenuación A y la rata de lluvia R. Se tiene la siguiente ecuación

$$\gamma_R = KR^{\alpha} \tag{3-14}$$

Donde
α y k = Coeficientes de atenuación
R = Rata máxima de lluvia expresada en mm/hr

Luego, se procede a calcular la longitud efectiva de la trayectoria mediante el factor de reducción

$$r = \frac{1}{(0{,}477d^{0{,}633})(R_{0{,}01}^{0{,}073\alpha}) - (10{,}579(1 - exp(-0{,}024d)))} \tag{3-15}$$

Donde
$d =$ es la distancia del enlace
$R_{0,01} =$ rata de lluvia dependiendo de la zona específica, que en este caso es 95
$f =$banda de frecuencia de trabajo

Cabe aclarar que el valor r máximo que puede existir es 2.5, por lo cual si el resultado al operar el denominador de la ecuación es menor a 0.4,utilice r =2.5.

Para realizar el cálculo de la longitud efectiva, se tuvo en cuenta la distancias máximas y mínimas recomendadas para una determinada banda, tal como se indica en la tabla 3-16. No se consideraron las distancias registradas en la base de datos suministrado por la ANE de solicitudes de enlaces, ya que estos valores difieren a los recomendados.

Cabe aclarar que los valores registrados en la tabla 3-16 son los recomendados y se pretenden estandarizar en un futuro para las solicitudes de enlaces, pero aún no están vigentes. Para tener un cálculo más cercano de la atenuación se hizo uso de la recomendación.

Tabla 3-16.: Distancias mínima y máxima segun banda de frecuencia

Banda (GHz)	**Distancia Mínima (km)**	**Distancia Máxima (km)**
4	45	180
6	40	150
7	35	75
8	35	70
10	8	50
11	8	35
13	5	30
15	5	30
18	5	25
23	5	15
27	5	10

Se realiza el cálculo de la longitud efectiva mínima y máxima que corresponde al rango de distancias mínimo y máximo de cada banda de frecuencias. Ahora es necesario

calcular la atenuación de trayectoria para el 0.01 % del tiempo. Utilizando la ecuación

$$A_{0,01\,\%} = \gamma dr \tag{3-16}$$

Igualmente, se realiza el cálculo de $A_{0,01\,\%}$ mínimo y máximo, ya que difieren según la longitud efectiva. Finalmente es necesario realizar este procedimiento tanto para polarización vertical como polarización horizontal, ya que los coeficientes de atenuación dependen del tipo de polarización y a partir de ese valor difieren los demás cálculos. En las tablas 3-17 y 3-18 se puede observar los valores calculados anteriormente descritos, para cada una de las polarizaciones.

Tabla 3-17.: Estadísticas de la atenuación debida a la lluvia a largo plazo. Polarización Horizontal

POLARIZACIÓN HORIZONTAL						
BANDA (GHz)	DISTANCIA MÍNIMA (KM)	DISTANCIA MÁXIMA (KM)	r min	r max	A0.01% min (dB)	A0.01% max (dB)
4	45	180	0,26785965	0,06518072	1,892548435	1,842123915
6	40	150	0,2569279	0,07263434	10,1160359	10,72438388
7	35	75	0,29411905	0,15583281	16,74050812	19,00630052
8	35	70	0,305597	0,17269698	24,75207673	27,97546424
10	8	50	0,5752459	0,24702367	17,15656913	46,04638121
11	8	35	0,57834978	0,32331563	20,63957444	50,47948476
13	5	30	0,68212525	0,35132171	20,28808788	62,69504764
15	5	30	0,67491383	0,34541262	25,18663824	77,34127484
18	5	25	0,66450476	0,36920622	32,42500522	90,07846348
23	5	15	0,65264731	0,44031081	43,94772695	88,94846702
27	5	10	0,64653546	0,50087569	52,34279859	81,10068765

Tabla 3-18.: Estadísticas de la atenuación debida a la lluvia a largo plazo. Polarización Vertical

POLARIZACIÓN VERTICAL						
BANDA (GHz)	DISTANCIA MÍNIMA (KM)	DISTANCIA MÁXIMA (KM)	r min	r max	A0.01% min (dB)	A0.01% max (dB)
4	45	180	0,39286462	0,08009514	1,276365392	1,040874193
6	40	150	0,26091066	0,07336527	6,566852985	6,924481334
7	35	75	0,29588702	0,15663614	12,16640536	13,80134955
8	35	70	0,30873628	0,17424974	19,95905933	22,5296541
10	8	50	0,5919794	0,25697422	13,55849044	36,78530096
11	8	35	0,59973539	0,34059699	16,47662459	40,93807612
13	5	30	0,71120363	0,37593076	16,63016868	52,74263261
15	5	30	0,70821663	0,37334337	20,58466898	65,1084661
18	5	25	0,69705696	0,39779462	25,8135594	73,65606904
23	5	15	0,67578487	0,46168829	34,82501582	71,37612567
27	5	10	0,6632686	0,51653145	42,46499181	66,14063737

Los valores hallados anteriormente corresponden a una atenuación por lluvia para el 0.001 % del tiempo. Sin embargo, es necesario tener en cuenta los objetivos de disponibilidad típicos de los sistemas microondas digitales. La tabla 3-19 muestra un conjunto de valores típicos que pueden ser usados para propósitos de coordinación de frecuencias según lo establecido por TIA SBF 10-F.

Tabla 3-19.: Valores Típicos para Sistemas Microondas Digitales según TIA SBF 10-F

Parámetros		Valor por defecto
Objetivo de disponibilidad anual		99,999 %
Margen de Desvanecimiento para un BER de 10^{-6}	Banda 2 GHz	35 dB
	Banda 6 GHz	40 dB
	Banda 11 y 13 GHz	45 dB
	Banda 18 GHz	40 dB

3.3.4. Umbral del Receptor

Con los radios seleccionados, se prosigue a realizar una nueva base de datos que contenga la información detallada del nivel de umbral para una tasa de error de bit (en ingles *Bit Error Rate*) de 10^{-6} considerada por cada fabricante. Así como el tipo de modulación en un rango de frecuencias y con un ancho de banda específico, que varía desde 7 hasta 56 MHz. Una vez recopiladas las especificaciones técnicas de algunos de los radios seleccionados. Se prosigue a agrupar por cada banda de frecuencia desde 6 GHz hasta 23 GHz. Luego se realizan promedios por cada ancho de banda con su respectiva modulación, teniendo como resultados los valores registrados en las siguientes tablas.

Tabla 3-20.: Nivel de Umbral en dBm para un BER de 10^{-6} en la banda de 6 GHz

Banda de 6 GHz				
Ancho de Banda (MHz)	7	14	28	56
QPSK	-92,65	-89,79	-87,15	-84,43
16QAM	-87,57	-84,50	-80,95	-78,22
32QAM	-84,00	-81,07	-77,65	-74,94
64QAM	-80,29	-77,43	-74,25	-72,61
128QAM	-76,79	-74,43	-71,45	-68,72
256QAM	-75,50	-70,58	-68,22	-65,28

Tabla 3-21.: Nivel de Umbral en dBm para un BER de 10^{-6} en la banda de 7-8 GHz

Banda de 7-8 GHz				
Ancho de Banda (MHz)	7	14	28	56
QPSK	-92,65	-89,75	-86,99	-83,99
16QAM	-86,63	-83,59	-80,86	-77,79
32QAM	-83,09	-80,21	-77,20	-74,14
64QAM	-80,20	-77,21	-74,15	-71,27
128QAM	-76,74	-74,21	-70,95	-68,27
256QAM	-74,17	-70,90	-67,87	-65,27

Tabla 3-22.: Nivel de Umbral en dBm para un BER de 10^{-6} en la banda de 10-11 GHz

Banda de 10-11 GHz				
Ancho de Banda (MHz)	7	14	28	56
QPSK	-91,63	-88,75	-86,21	-83,85
16QAM	-86,25	-82,66	-80,00	-77,44
32QAM	-82,87	-79,99	-77,00	-73,95
64QAM	-79,09	-76,42	-73,75	-70,90
128QAM	-75,51	-73,42	-70,63	-67,62
256QAM	-73,75	-69,37	-67,33	-64,25

Tabla 3-23.: Nivel de Umbral en dBm para un BER de 10^{-6} en la banda de 13 GHz

Banda de 13 GHz				
Ancho de Banda (MHz)	7	14	28	56
QPSK	-91,57	-88,79	-85,89	-83,43
16QAM	-85,86	-82,57	-79,61	-76,94
32QAM	-82,75	-79,83	-76,63	-73,63
64QAM	-79,29	-76,43	-73,33	-71,39
128QAM	-75,50	-73,43	-70,33	-67,63
256QAM	-73,25	-69,50	-67,06	-64,44

Tabla 3-24.: Nivel de Umbral en dBm para un BER de 10^{-6} en la banda de 15 GHz

Banda de 15 GHz				
Ancho de Banda (MHz)	7	14	28	56
QPSK	-91,40	-88,86	-85,76	-83,13
16QAM	-85,86	-82,60	-79,47	-76,70
32QAM	-82,75	-79,79	-76,38	-73,43
64QAM	-79,29	-76,44	-73,23	-71,07
128QAM	-75,23	-73,37	-70,12	-67,13
256QAM	-73,30	-69,37	-66,81	-63,73

Tabla 3-25.: Nivel de Umbral en dBm para un BER de 10^{-6} en la banda de 18 GHz

Banda de 18 GHz				
Ancho de Banda (MHz)	7	14	28	56
QPSK	-91,29	-88,43	-85,83	-83,24
16QAM	-85,50	-82,29	-79,44	-76,81
32QAM	-82,25	-79,33	-76,44	-73,38
64QAM	-78,93	-76,07	-73,22	-71,17
128QAM	-75,20	-73,07	-70,11	-67,11
256QAM	-73,25	-69,10	-66,83	-63,83

Tabla 3-26.: Nivel de Umbral en dBm para un BER de 10^{-6} en la banda de 23 GHz

Banda de 23 GHz				
Ancho de Banda (MHz)	7	14	28	56
QPSK	-91,20	-88,71	-85,72	-83,35
16QAM	-85,79	-82,57	-79,33	-76,91
32QAM	-82,58	-79,67	-76,31	-73,50
64QAM	-79,21	-76,36	-73,11	-71,38
128QAM	-75,13	-73,36	-70,00	-67,19
256QAM	-73,25	-69,30	-66,72	-63,88

De las tablas 3-20 - 3-26 es posible observar que los valores para los niveles de umbral en las diferentes bandas de frecuencia son muy cercanos. Por lo tanto, se procede a escoger los valores máximos (considerados, desde el punto de vista del radio, como el peor caso) para cada ancho de banda y tipo de modulación. El resultado se aprecia en la tabla 3-27.

Tabla 3-27.: Valores de umbral máximos resultantes para cada ancho de banda y tipo de modulación.

Ancho de Banda (MHz)	7	14	28	56
QPSK	-91,20	-88,43	-85,72	-83,13
16QAM	-85,50	-82,29	-79,33	-76,70
32QAM	-82,25	-79,33	-76,31	-73,38
64QAM	-78,93	-76,07	-73,11	-70,90
128QAM	-75,13	-73,07	-70,00	-67,11
256QAM	-73,25	-69,10	-66,72	-63,73

Una gráfica de estos valores permite observar mejor el comportamiento de los datos. Estos, a su vez permitirán obtener a través de una regresión los valores de umbral para otros anchos de banda en cada una de las modulaciones. El resultado se aprecia en la imagen 3-12.

Ahora, teniendo la ecuación de la curva correspondiente a cada modulación, es posible hallar valores de umbral para diferentes anchos de banda, no solo teniendo en cuenta los registrados en los datasheets de los radios, sino los consolidados tanto en el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia (CNABF), que son mostrados en la tabla 3-28, como los registrados en las solicitudes de los operadores.

Por lo tanto, empleando las ecuaciones obtenidas y los anchos de banda mencionados, se obtiene la gráfica mostrada en la imagen 3-13, que permite observar el comportamiento de los valores de nivel de umbral en función del ancho de banda.

Ahora bien, se procede a calcular el KTBF bajo estas dos consideraciones, con una

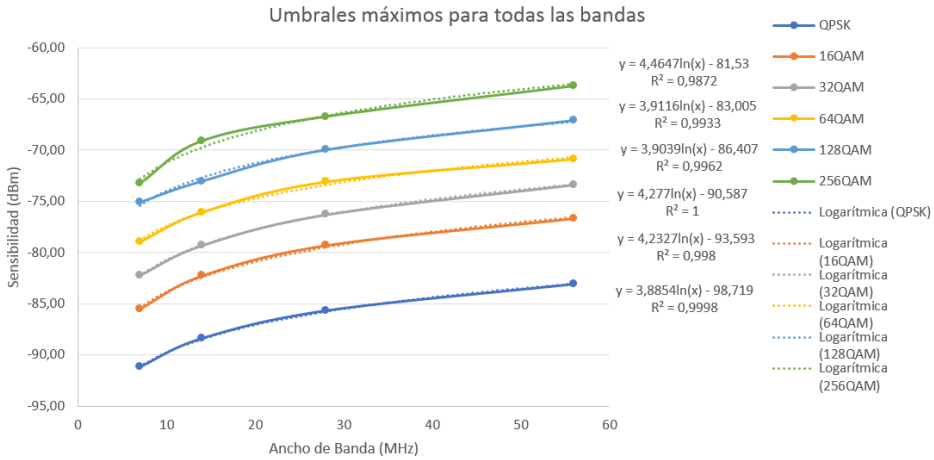


Imagen 3-12.: Gráfica de los umbrales máximos y sus respectivas regresiones.

Tabla 3-28.: Anchos de Banda (MHz) registrados en el CNABF

2	27,5	56
3,5	28	60
5	29	80
7	29,65	100
10	30	110
13,75	40	112
14	50	250
20	55	

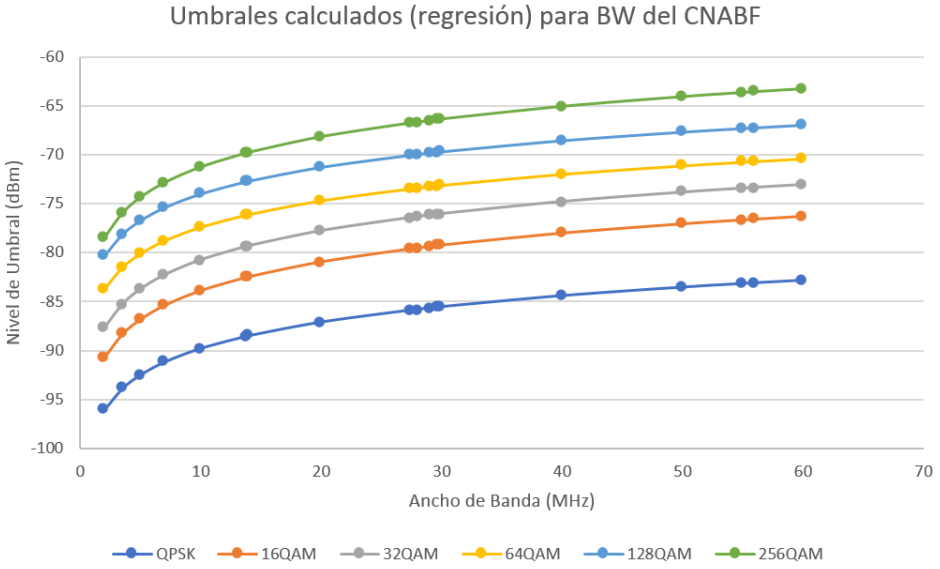


Imagen 3-13.: Umbrales calculados a partir de los valores de ancho de banda y las ecuaciones obtenidas.

figura de ruido constante de 4 dB y por otro lado con una figura de ruido dinámica que varía según la banda de trabajo (Tabla 3-7). Obteniendo la gráfica mostrada en la imagen 3-14.

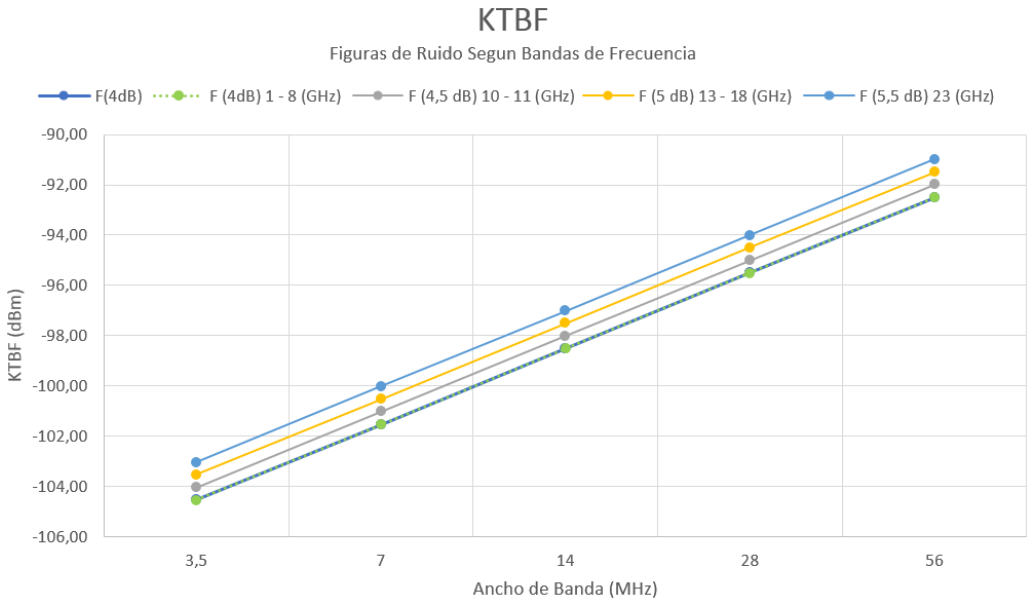


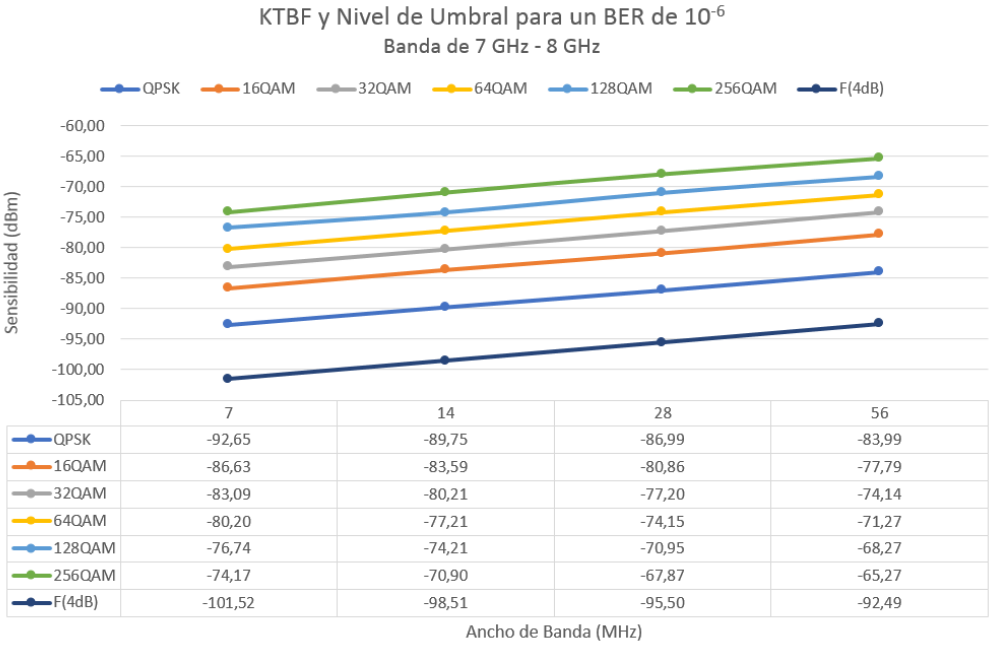
Imagen 3-14.: KTBF fijo (usando F = 4 dB) y KTBF dinámico (F varía según banda de frecuencia)

Se puede observar que entre mayor sea la figura de ruido, mayor es el valor de KTBF. De igual forma, entre mayor sea el ancho de banda, el piso de ruido aumenta progresivamente. Una vez hallado el KTBF, es posible calcular el valor de C/N mínimo que corresponde a la diferencia entre el nivel de umbral y el piso de ruido. Los resultados se exponen de manera gráfica en la imagen 3-15, junto con la tabla 3-29 que muestra los valores calculados de C/N.

Tabla 3-29.: Valores calculados de C/N (dB) entre los umbrales y el KTBF (Fijo y Dinámico) para la Banda de 7 GHz - 8 GHz.

Ancho de Banda (MHz)	7	14	28	56
QPSK	8,8708564	8,7595149	8,5168648	8,5064602
16QAM	14,896001	14,922982	14,645735	14,705614
32QAM	18,433181	18,301768	18,307239	18,348471
64QAM	21,327403	21,301543	21,356948	21,220746
128QAM	24,781948	24,301543	24,556948	24,220746
256QAM	27,357536	27,613902	27,636936	27,220746

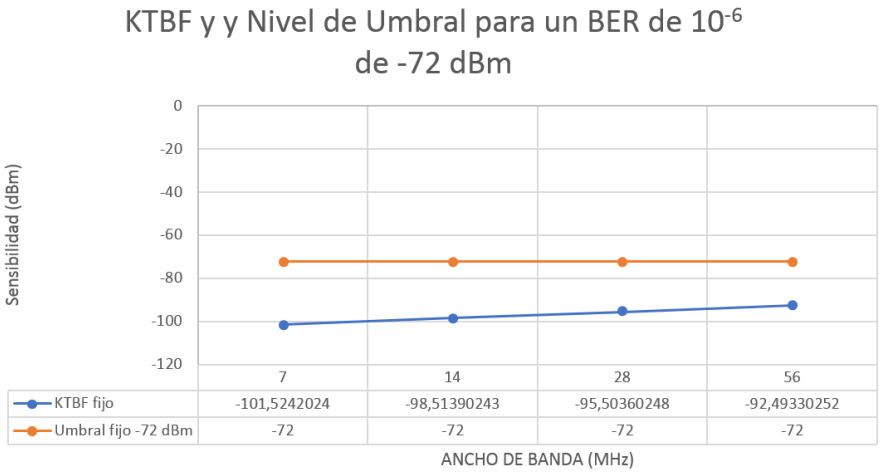
Las otras bandas presentan comportamientos comparables, se enseña esta banda ya que es de las más críticas para la Agencia. Se puede concluir que la relación portadora ruido C/N es independiente de la banda y ancho de banda y solo varía dependiendo de la modulación.



	7	14	28	56
QPSK	-92,65	-89,75	-86,99	-83,99
16QAM	-86,63	-83,59	-80,86	-77,79
32QAM	-83,09	-80,21	-77,20	-74,14
64QAM	-80,20	-77,21	-74,15	-71,27
128QAM	-76,74	-74,21	-70,95	-68,27
256QAM	-74,17	-70,90	-67,87	-65,27
F(4dB)	-101,52	-98,51	-95,50	-92,49

Imagen 3-15.: KTBF y Nivel de Umbral para la banda de 7 GHz - 8 GHz.

Por otro lado, se realizó también el cálculo de C/N mínimo pero para una figura de ruido constante de 4 dB, y un nivel de umbral fijo de -72 dBm, valor que utiliza la agencia para los respectivos análisis de interferencias. Los resultados se aprecian en la imagen 3-16 y en la tabla 3-30.



	7	14	28	56
KTBF fijo	-101,5242024	-98,51390243	-95,50360248	-92,49330252
Umbral fijo -72 dBm	-72	-72	-72	-72

Imagen 3-16.: KTBF y Nivel de umbral fijo de -72 dBm

Se puede observar que al contrario que el anterior caso, cuando se tiene un nivel de umbral fijo de -72 dbm y una figura de ruido de 4 dB, el C/N mínimo no es constante en todos los anchos de banda, varia notablemente. De igual forma, los valores de C/N

Tabla 3-30.: C/N mínimo (dB) - Diferencias entre umbral fijo (-72 dBm) y KTBF Fijo (F = 4 dB).

Ancho de Banda (MHz)	C/N
7	29,524202
14	26,513902
28	23,503603
56	20,493303

corresponden a los registrados en las modulaciones más altas (64 QAM-256 QAM). Lo cual indica que los análisis realizados por la Agencia Nacional del Espectro se realizan bajo las modulaciones más altas de 64 QAM-256 QAM.

Parámetros ANE

Teniendo en cuenta los parámetros establecidos por la Agencia para el análisis de interferencias, donde se mantiene un nivel constante de -72 dBm y una figura de ruido constante de 4 dB y demás parámetros registrados en la tabla 3-31.

Tabla 3-31.: Parámetros de interferencia usados por la ANE.

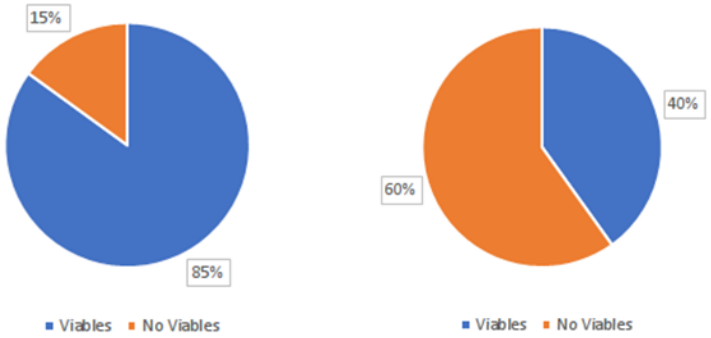
TD	5
MD	< 30
C/I	< 50
Nivel de Umbral	-72 dBm

Se calcula C/I general, Margen de degradación con y sin interferencia en la base de datos suministrada por la ANE, esto con el fin de verificar la viabilidad del enlace al cumplir los parámetros estipulados por la Agencia. Los resultados indicaron que el 85 % de los enlaces son viables y el 15 % restante no son viables, con una interferencia mínima de 5 dB como se aprecia en la tabla 3-32 y en la imagen 3.17(a).

Tabla 3-32.: Porcentaje de viabilidad usando los criterios de la ANE y una interferencia de 5 dB.

Enlaces	Registros	Porcentaje %
Viables	15323	85
No Viables	2704	15
Total	18027	100

Se debe tender en cuenta que al aumentar la interferencia, la viabilidad de los enlaces disminuye notoriamente, tal como se aprecia en la figura 3.17(b) donde se ha empleado un valor para la interferencia de 15 dB.



(a) Viabilidad usando 5 dB de interferencia

(b) Viabilidad usando 15 dB de interferencia

Imagen 3-17.: Resultados de viabilidad para dos valores de interferencia.

Parámetros Pasantía

Por otro lado, se realiza nuevamente el anterior procedimiento, pero no tomando como constante de nivel de umbral sino siendo esta variable dependiendo el tipo de modulación, se calcula un Margen de degradación con y sin interferencia para cada tipo de modulación y así determinar la viabilidad de la solicitudes de enlaces registrados en la base de datos, esto con el fin de determinar el tipo de modulación más apto para desarrollar los análisis de interferencias.

Sin Interferencia

Los resultados de viabilidad sin interferencia para cada tipo de modulación se registran en la imagen 3-18. Se puede observar que en la modulaciones más altas existe una viabilidad de 100 % sin interferencia, por otro lado, en las modulaciones más altas (64 QAM,128 QAM Y 256 QAM) existe no viabilidad, pero en un porcentaje muy bajo.

Con Interferencia

Ahora bien, se calcula la viabilidad de los enlaces con una interferencia mínima de 5 dB, obteniendo los resultados que se muestran en la imagen 3-19. Se puede observar que al tener una interferencia mínima de 5dB, las modulaciones bajas desde 16QAM presentan un porcentaje de *no* viabilidad bajo, pero que es significativo en modulaciones altas (256QAM) con un porcentaje de 26.07 %, siendo éste un valor considerable.

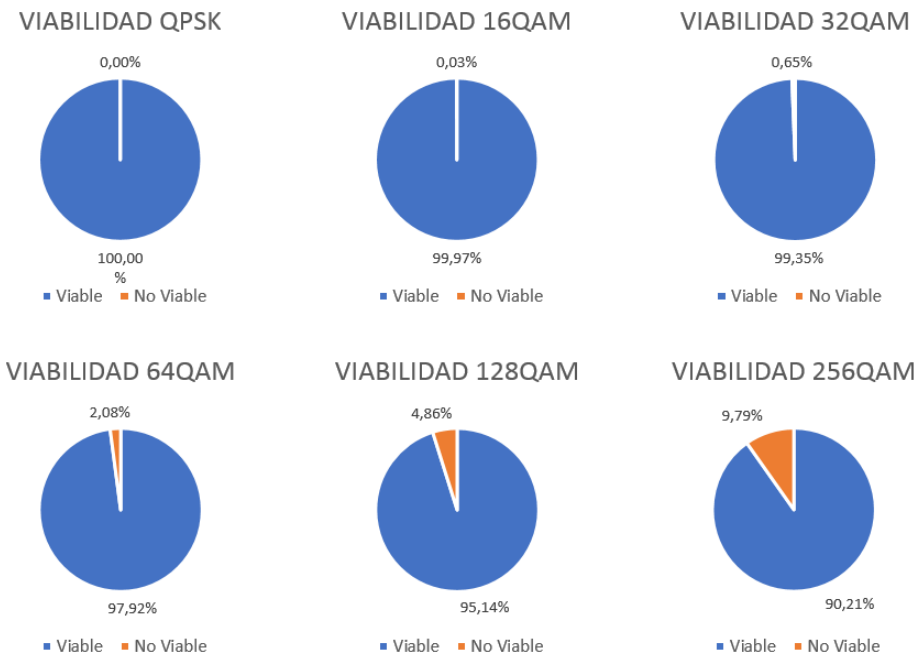


Imagen 3-18.: Porcentajes de viabilidad y no viabilidad sin interferencia para distintos esquemas de modulación

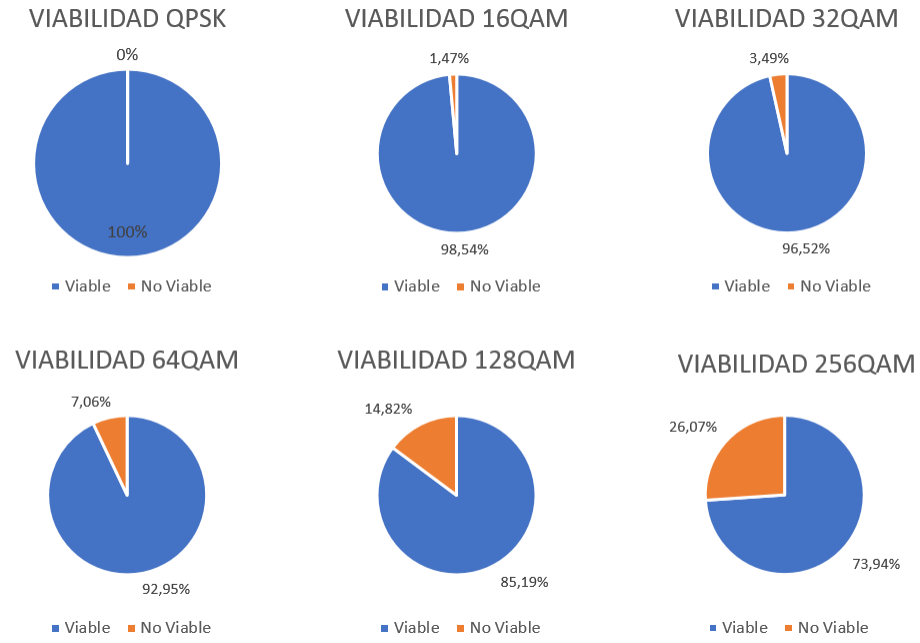


Imagen 3-19.: Porcentajes de viabilidad y no viabilidad con una interferencia de 5 dB para diferentes esquemas de modulación.

Se realiza el mismo análisis pero con una interferencia máxima de 15 dB, el comportamiento cambia notoriamente como se observa en la figura 3-20.

Con una interferencia máxima el porcentaje de *no* viabilidad aumenta significativamente desde las modulaciones más bajas, siendo más del 50 % en modulaciones desde 64QAM - 256 QAM, presentando en la modulación mas alta un valor de 75.70 %.

Teniendo en cuenta el análisis realizado, y el deber de la ANE de proteger los enlaces vigentes, se decide realizar los futuros análisis bajo una modulación alta, no la máxima ya que presenta porcentajes muy altos de *no* viabilidad y la entidad tampoco puede denegar un número tan alto de enlaces. Por lo cual, se propone realizar los análisis bajo modulaciones de 64 QAM y 128 QAM.

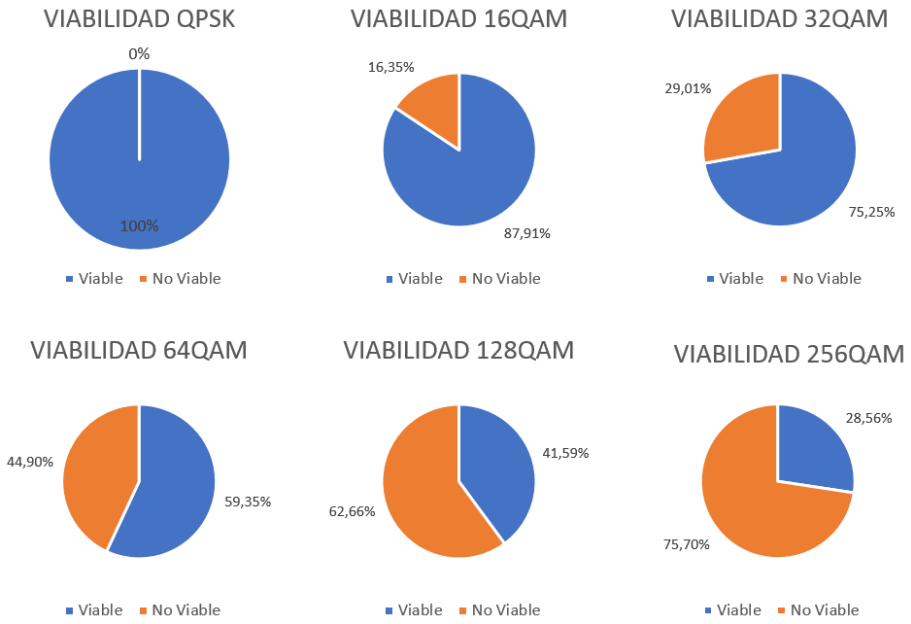


Imagen 3-20.: Porcentajes de viabilidad y no viabilidad con una interferencia de 15 dB para diferentes esquemas de modulación.

3.3.5. C/I

En primer lugar daremos una definición breve sobre la relación C/I, seguido de algunas características que han de ser tenidas en cuenta a la hora de clasificar los equipos empleados para obtener un valor de C/I correspondiente. Para esta sección del documento, se tomará como referencia el estándar ETSI EN 302 217-2-2 [4].

Uno de los problemas en la asignación de nuevos enlaces es el impacto en cuanto a las interferencias que estos puedan causar sobre los enlaces ya existentes. Estas interferencias generalmente se describen como una función de la relación portadora

a interferencia o C/I. Este criterio ha sido empleado en los sistemas microondas terrestres, así como en Norte América para los sistemas analógicos, y aún sigue siendo popular internacionalmente para sistemas satelitales. En este aspecto, las recomendaciones ITU-R S.741 y SF.766 siguen siendo los referentes en temas satelitales de C/I. De hecho las metodologías de estimación están mejor desarrolladas para sistemas satelitales internacionales que para sistemas microondas punto a punto, cuya coordinación esta usualmente definida e implementada por los administradores locales y no por la ITU-R.[11].

Sin embargo, teniendo en cuenta que los fabricantes de equipos microondas deben regirse por varios estándares en la fabricación de sus equipos, consideramos que tomar como base los estándares mencionados al inicio de esta sección puede ser adecuado para consultar valores de C/I.

Antes de continuar, se hace necesario mencionar algunos aspectos relacionados con la información consignada en los estándares. En primer lugar, se tendrá en cuenta la aplicabilidad, como se muestra en la tabla 3-33.

Tabla 3-33.: Aplicabilidad de la serie de estándares ETSI 302 217

Parametro	**Rango**
Banda de Frecuencia	Desde 1 GHz a 86 GHz
Capacidades de trafico	Desde 9,6 kbit/s a 622 Mbit/s y hasta Gbit/s en las bandas altas
Separación de Canales	Desde 25 KHz a 112 MHz y hasta GHz en las bandas altas
Formatos de Modulación	Desde 2 estados hasta 2048 estados

A su vez, la serie de estándares ETSI 302 217 clasifica a los equipos según su eficiencia espectral[5], como se muestra en la tabla 3-34.

Todos los equipos hasta la clase 4H, para cualquier separación de canal (CS *Channel Separation*), y las clases 5L, 5H, 6L, 6H, 7, y 8, para CS $<$ 27.5 MHz son aptos para operación ACCP (*Adjacent Channel Co-Polarization*) y en principio cuando sea apropiado puede ser expandible a CCDP (*Co-Channel Dual Polarization*). Equipos de clase 5L, 5H, 6L, 6H, 7 y 8 solo para CS $\geq$ 27.5 MHz se subdividen en dos Subclases.

Subclase A; equipos de clase 5LA, 5HA, 6LA, 6HA, 7A y 8A, pueden funcionar sólo en operación ACAP (*Adjacent Channel Alternated Polarization*)

[5] Podría definirse de forma breve como la cantidad de bits que pueden ser transmitidos en un ancho de banda determinado.

Tabla 3-34.: Clasificación según la eficiencia espectral

Indice de Modulación	**Clase de eficiencia espectral**	**Descripción**
1	1	Equipos con eficiencia espectral basada en esquemas de modulación de 2 estados (2FSK, 2PSK)
2	2	Equipos con eficiencia espectral basada en esquemas de modulación de 4 estados (4FSK, 4QAM)
3	3	Equipos con eficiencia espectral basada en esquemas de modulación de 8 estados (8PSK)
4	4L	Equipos con eficiencia espectral basada en esquemas de modulación de 16 estados (16QAM, 16APSK)
5	4H	Equipos con eficiencia espectral basada en esquemas de modulación de 32 estados (32QAM, 32APSK)
6	5L	Equipos con eficiencia espectral basada en esquemas de modulación de 64 estados (64QAM)
7	5H	Equipos con eficiencia espectral basada en esquemas de modulación de 128 estados (128QAM)
8	6L	Equipos con eficiencia espectral basada en esquemas de modulación de 256 estados (256QAM)
9	6H	Equipos con eficiencia espectral basada en esquemas de modulación de 512 estados (512QAM)
10	7	Equipos con eficiencia espectral basada en esquemas de modulación de 1024 estados (1024QAM)
11	8	Equipos con eficiencia espectral basada en esquemas de modulación de 2048 estados (2048QAM)

Subclase B; equipos de clase 5LB, 5HB, 6LB, 6HB, 7B y 8B, pueden funcionar sólo en operación ACCP, y en principio, cuando sea necesario pueden funcionar en CCDP. Los posibles arreglos de canal mencionados anteriormente se muestran a continuación con fines aclaratorios.

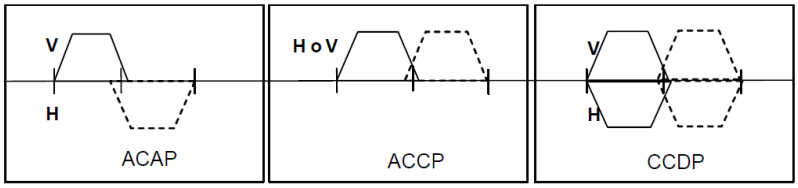


Imagen 3-21.: Arreglo de canales y polarización

A partir de esta información y clasificación, es posible interpretar los datos que el estándar relaciona para diferentes valores de C/I. Debido a la longitud de las tablas que allí se presentan se optó por incluirlas en el anexo D.

3.3.6. T/I

En muchas situaciones (especialmente en bandas donde varios servicios son usados), el margen de desvanecimiento del receptor no es conocido o son diferentes para distintos usuarios o servicios en la misma banda de frecuencia. En estas situaciones, es deseable determinar los objetivos de interferencia que limiten la degradación del receptor a un nivel definido sin importar el margen de desvanecimiento. La interferencia está definida de forma tal que solo disminuya el desempeño del receptor en una cantidad especificada. El parámetro usado en este caso es la relación T/I [9], siendo T el umbral estático [6] del receptor e I el valor del la potencia de interferencia

Dentro de las recomendaciones hechas por el TSB 10-F se encuentra en lo posible obtener objetivos de T/I directamente de los fabricantes de radio, sin embargo, reconoce que se trata de un procedimiento no práctico para los fabricantes proveer objetivos de T/I para todas las posibles combinaciones de radios. Por lo tanto, es posible recurrir a la documentación para obtener valores de T/I que puedan ser tenidos en cuenta dependiendo de algunas características generales de los sistemas.

La información que se muestra a continuación fue tomada de [9] capitulo 14.4 que a su vez está basado en el documento TIA TSB 10-F. Este documento menciona que en principio se debería tener acceso a los valores de T/I en función de la separación de frecuencias para todos los posibles interferentes, eso implica conocer y tener acceso a las curvas típicas de T/I.

Según TIA TSB 10-F un valor aceptable de interferencia en un proceso de coordinación, I_{coord} en dBm está dado por

$$I_{coord} = T_s - TI_{sp}\left(f_d\right) - MEA \tag{3-17}$$

Con

$$MEA = \text{el mayor entre 5 o } 10\log_{10}\left(BW_V/BW_I\right)$$

Donde
T_s = Potencia de umbral estático para BER de 10^{-6} (dBm)
$TI_{sp}\left(f_d\right)$ = Curva específica de T/I (dB)
f_d = separación de las frecuencias interferente e interferida)
MEA = Tolerancia a la exposición múltiple (*Multiple Exposure Allowance*)(dB)
BW_V = Ancho de banda RF del receptor interferido (MHz)

[6] Valor de umbral del receptor para el cual la tasa de error de bit (BER) es igual a 10^{-6}

BW_I = Ancho de banda RF del interferente (MHz)

La MEA tiene en cuenta la congestión de espectro que se puede derivar de los planes con distintos anchos de banda. Como acuerdo general un MEA de 5 dB es usado según el TSB 10-F. Adicionalmente es posible expresar las ecuaciones anteriores en términos de C/I para un solo interferente como

$$C/I = C - T_s + TI_{sp} = TFM_s + TI_{sp} \tag{3-18}$$

Donde el término TMF_s[7] es el margen de desvanecimiento térmico estático para un BER de 10^{-6} en dB. Tomando como referencia las Reglas y Regulaciones de la FCC antes de 1994, para portadoras en bandas comunes, la coordinación de frecuencias estaba basada en objetivos de C/I, que se puede definir como

$$(C/I)_{obj} = TMF_s + TI_{sp} + MEA \tag{3-19}$$

Los valores para TMF_s para los cuales los objetivos de C/I están basados fueron los siguientes; 35 dB para la banda de 2 GHz, 40 dB para las bandas de 6 GHz y 18 GHz y 45 para las bandas de 11 GHz y 13 GHz. Estos valores fueron tomados de [9] que a su vez se baso en la sección 4.2.3 de TIA TSB 10-F [1].

A continuación la tabla 3-35 relaciona varios tipos de modulación con sus correspondientes eficiencias espectrales, así como las velocidades de transmisión para algunas bandas de frecuencia, con valores típicos de T/I co-canal.

Tabla 3-35.: Características típicas de T/I en microondas digitales

Modulación	**T/I Co-canal típico (dB)**	**Eficiencia Espectral Típica (bps/Hz)**	**Mbps Típicos (Banda, GHz)**
4L FSK	23,6	2	13 (18)
QPSK	19,5	2	45 (18)
9 QPR	22,5	2	6, 4 (2)
25 QPR	26,8	3,17	13 (2, 10)
16 QAM	26,9	4	90 (6, 11)
32 QAM	30	5	13 (2, 6)
81 QPR	31,5	4,64	45 (2, 6)
64 QAM	33,1	6	45 (2, 6)
128 QAM	36,1	7	155 (6, 11)
256 QAM	38,6	8	19 (2)
512 QAM	41,5	9	155 (6)

[7] Denominado tambien en ingles como *Flat Fade Margin*

Los valores de la tabla fueron obtenidos del Anexo B, Tabla B-1, página B-5 del TIA TSB 10-F. Estos datos si bien no contemplan todas las posibles combinaciones de modulaciones y bandas de operación podría ser una primera aproximación a los valores que se pueden tener en cuenta en los resultados que el simulador arroje al analizar las interferencias de los enlaces propuestos.

4. Análisis de Resultados e Impactos del Trabajo de Grado

Uno de los primeros resultados encontrados en el desarrollo de la pasantía está relacionado con la figura de ruido. En ETSI EN 101 854 [5] Anexo D[1], pg. 20, se relacionan valores típicos de figura de ruido recopilados por distintos fabricantes de radio según las bandas de operación. En primera medida, el valor de factor de ruido no es un valor único de 4dB sino varía dependiendo la banda de frecuencias de trabajo, llegando a 10 dB para las frecuencias más altas. Esta variable cambia notoriamente el KTBF o piso de ruido del enlace, aumentando su valor a medida que se trata de una banda de frecuencia mayor. Pero para los análisis desarrollados por la ANE es más propicio realizar el análisis con un KTBF normalizado o único de 4dB para frecuencias bajas porque la diferencia respecto al KTBF dinámico no es significativa y tener un piso de ruido más bajo es una mejor opción ya que éste es menos flexible frente a interferencias, lo cual asegura protección a los enlaces ya existentes.

Por otro lado, los enlaces que trabajan en frecuencias más altas por arriba de 23 GHz es recomendable trabajar con el KTBF dinámico, es decir el calculado puesto que al utilizar el KTBF normalizado, se estaría sobre protegiendo los enlaces existentes y negando solicitudes inofensivas.

Otro parámetro que se trató de analizar fue el margen de desvanecimiento el cual corresponde al rango en el cual se puede mover la señal sin perder la comunicación, entre mayor sea este rango menos vulnerable será el enlace frente a interferencias. Este valor se calculó usando la misma base de datos empleada para calcular las potencias de recepción, y es único por cada enlace y depende del porcentaje de disponibilidad, la longitud del enlace, la banda de frecuencias y el nivel de precipitación de la zona, este se puede calcular mediante la recomendación de la ITU -R P. 530-16 [2] donde se establecen una serie de pasos para obtener el margen de desvanecimiento. De igual forma, el MD es mayor en las frecuencias más altas teniendo en cuenta las tablas 3-17 y 3-18 las cuales están calculadas con el rango de distancias recomendadas.

[1] También se relacionan valores de S/N para un un BER de 10^{-6}

A su vez, se realizo la reducción de la base de datos de los registros que la entidad tiene de todas las solicitudes de enlaces microondas, teniendo en cuenta varios criterios. A continuación se emplea un esquema que describe de forma general las depuraciones realizadas en las bases de datos y los resultados obtenidos, mostrado en la figura 4-1.

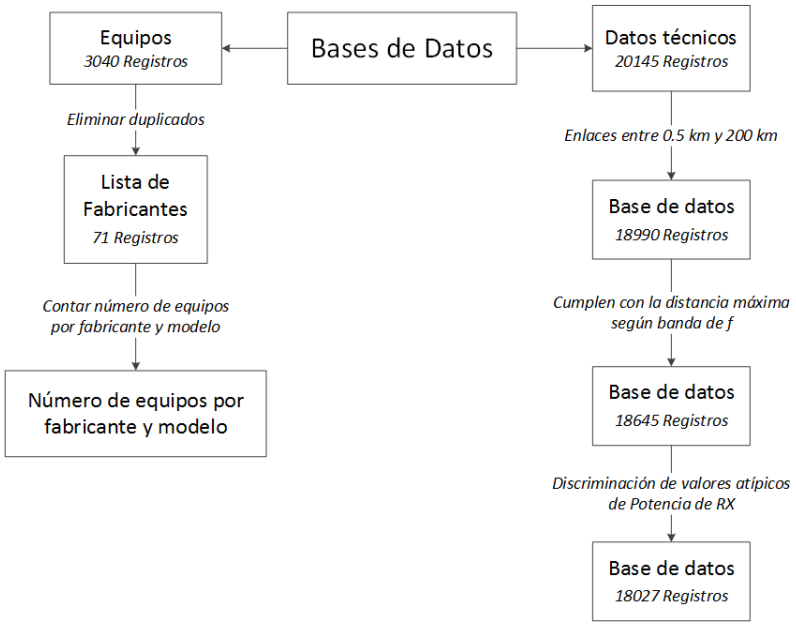


Imagen 4-1.: Proceso realizado para la reducción y obtención de las bases de datos.

Se espera que esta depuración sea de utilidad para la agencia en cuanto le permita tenerla en cuenta para análisis posteriores, incluso para calcular valores que puedan ser sometidos a un proceso estadístico que permita encontrar parámetros que puedan ser comparados con algún estándar internacional a fin de adaptar según las condiciones particulares del país criterios de interferencias.

Por otra parte, la ANE emplea niveles de umbral de radio de -72 dBm y -76 dBm para un BER de 10^{-6} y 10^{-3} respectivamente. Dentro de la información consultada de los manuales y datasheets de los radios se encontró información que relaciona los niveles de umbral para un BER de 10_{-6} para diferentes bandas de frecuencia, esquemas de modulación y anchos de banda. Se espera que estos resultados puedan ser usados por la entidad para emplear en un futuro análisis que incluyan modulación adaptativa y realizar cálculos de criterios de protección de interferencias. Por ahora, se podría escoger un tipo de modulación específico y dependiendo de la banda de frecuencia y el ancho de banda, seleccionar de las tablas 3-20 - 3-26 el valor correspondiente.

Teniendo también en cuenta que los fabricantes de equipos se deben regir por estándares internacionales, cumpliendo los criterios allí establecidos para disminuir el riesgo de interferencias que estos puedan causar durante su operación, se encontró adicionalmente información del umbral de los radios que pueden ser encontrados en la recomendación ETSI EN 302 217-2 [3][2] según la banda de frecuencia, la separación de canal, la eficiencia espectral (relacionada con el esquema de modulación según se muestra en la tabla 3-34) y valores de BER. Los fabricantes deben especificar valores de umbral que superen los valores de la recomendación, como se especifica en el mismo estándar[3].

El análisis estadístico realizado a la potencia de recepción permitió observar un valor medio de -28,77169753 dBm y una moda de -28,07390147. Un valor de curtosis de -0,154958004 indica que los valores no se encuentran concentrados en un solo punto y una desviación estándar de 7,033930452 deja ver una variación considerable respecto a la media. También se observan los valores mínimo ($\approx -48,401 dBm$) y máximo ($\approx -9,532490015 dBm$). A su vez, se solicito información técnica a varios fabricantes y operadores de los cuales Direct TV fue uno de los que brindó datos relacionados. Para este operador, los niveles de recepción en sus enlaces según la información enviada es de -30 dBm, resultando en una diferencia de 1.926 dB para la moda.

Con relación a los valores de IRF, se logró evidenciar que si bien es posible emplear un conjunto de valores fijos para el calculo de IRF (como los que usa el simulador por defecto en la opción máscara, ver figura 3-8), los resultados obtenidos y la información consultada muestran que para realizar el calculo de IRF se debe tener en cuenta los anchos de banda y las frecuencias de operación para cada una de las estaciones involucradas (interferida e interferente) haciendo que los valores sean dinámicos dependiendo de las características mencionadas para cada enlace. También se logró reconocer el proceso de obtención de los valores de IRF según las recomendaciones de entidades de regulación argentinas. Cabe mencionar que los valores que usa la FCC son mas altos para IRF, luego adoptan en ese aspecto una política mas proteccionista.

Así como los valores de umbral están definidos para diferentes características de los sistemas de radio enlaces, los datos obtenidos para C/I y T/I son dependientes también de estas características, como la banda de operación, la separación de canal

[2] Anexos B - H, Secciones X.4.2, donde X es la letra correspondiente al anexo
[3] Pg 42, Sección 4.3.2.

5. Alcance de los Objetivos de la Pasantía

La propuesta está compuesta por una serie de objetivos que se describen a continuación, así como el alcance que se le dio a cada uno de ellos durante el desarrollo de la pasantía.

- Recopilar y analizar la información de filtros IRF (*Interference Rejection Factor*) o discriminación de filtros en radios típicos para enlaces microondas, en cocanal, canal adyacente y segundo canal adyacente, de acuerdo con los manuales de los radios y documentación existente para obtener un rango de valores típicos usados.

Alcance: Se propone como análisis de filtros IRF o Factor de Rechazo de Interferencia el uso del procedimiento propuesto por la Comisión Nacional de Comunicaciones de Argentina en la directiva general DNRc 61 para calcular los valores correspondientes por tratarse de un modelo práctico y sencillo de aplicar y sus resultados permiten ser comprobados de manera manual.

- Recopilar y analizar la información de la sensibilidad - umbral de operación en radios microondas, teniendo en cuenta la capacidad de datos (Mbps), modulación adaptativa, tasa de error de bits, anchos de banda (MHz) y bandas de frecuencia (GHz), de acuerdo con los manuales de los radios y documentación existente para obtener un rango de valores típicos usados.

Alcance: Tras una depuración de la base de datos suministrada por la entidad, se recopila datos técnicos de varios de los principales radios utilizados por los operadores y se genera una nueva base de datos que contiene el umbral de operación según bandas de frecuencias, ancho de banda y esquema de modulación. Se propone a la entidad escoger un tipo de modulación específica para realizar los análisis de interferencias y utilizar los valores registrados en las tablas 3-20 - 3-26.

- Obtener rango de valores típicos según documentación existente de criterios de interferencia relacionados con C/I, T/I y Degradación de Umbral para diferentes condiciones técnicas aplicables.

Alcance:En la recomendación ETSI EN 302 217-2 [3] se encuentran valores de C/I que dependen del tipo de modulación (catalogado según su eficiencia espectral según la tabla 3-34), la separación del canal, la banda de frecuencia de trabajo y la capacidad de transmisión. Los resultados se encuentran consignados en las tablas D-1 - D-6

Los valores típicos de T/I según el tipo de modulación y la velocidad de transmisión se encuentran registrados en la tabla 3-35 que se tomaron de [9], que a su vez fueron extraídos del Informe TSB 10-F emitido por la TIA *Telecommunications Industry Association* [1].

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

Teniendo en cuenta los aspectos técnicos de la pasantía, se desarrollan a continuación conclusiones de forma ordenada para cada uno de los objetivos

En cuanto a los valores que se deben estandarizar para el cálculo del IRF, se considera que es preferible escoger dentro del simulador una opción de mayor prioridad como los procedimientos de la Comisión Nacional de Comunicaciones de Argentina o de la FCC.

Se obtuvo a partir de la documentación y hojas de datos de varios de los equipos más utilizados por los operadores las tablas de datos que permiten relacionar los valores de umbral - sensibilidad de los radios con los diferentes esquemas de modulación, separaciones de canal y bandas de frecuencia de operación.

Se logró obtener un conjunto de valores para C/I y T/I relacionados con los diferentes esquemas de modulación, separación de canales, bandas de frecuencia y velocidad de transmisión de datos.

Dentro de los aspectos no técnicos de la pasantía, consideramos que la asignación de tareas es uno de los aspectos más importantes en el desarrollo de cualquier proyecto, pues permite no sólo definir unos objetivos a corto plazo sino que también alienta al uso eficiente del tiempo. En relación a estos aspectos, creemos que la definición de las actividades a través de un cronograma representa una buena estrategia para lograr los fines propuestos.

Como estudiantes, resulta motivante adquirir nuevos conocimientos y experiencias y más aun en las áreas de estudio relacionadas. Es por eso que en primer lugar agradecemos la oportunidad de desarrollar este proyecto de pasantía en una entidad, que puede en ocasiones pasar desapercibida para la mayoría de ciudadanos, pero que presta un servicio verdaderamente importante para el país. De igual forma, agradecer también por la oportunidad de asistir a los eventos y reuniones que realiza la entidad, en miras de mejorar y dar a conocer sus procesos.

6.2. Recomendaciones

Consideramos que, en cuanto a la información que la ANE o el MinTIC pide registrar a los operadores, sería de gran utilidad solicitar información relacionada con el tipo de modulación que emplearán los equipos de radio. Ya que a partir de estos es posible determinar otros parámetros que permiten definir el comportamiento de los radio enlaces, como por ejemplo el umbral de operación de los equipos de radios (que son dependientes de la modulación).

Creemos que para el futuro cuando la entidad tenga la necesidad de mejorar aún más sus procesos, puede considerar solicitar información a los operadores en relación al funcionamiento de los equipos en cuanto a si emplean o no modulación adaptativa (ACM *Adaptative Coding and Modulation*), teniendo en cuenta los datos de umbral obtenidos en el desarrollo de la pasantía o alguna consideración respecto al control automático de potencia (ATPC *Automatic Transmit Power Control*), con el fin de ajustarse mas a las características reales y prácticas de los radio enlaces.

Dentro de la búsqueda de información llevada a cabo durante el desarrollo de la pasantía se evidenció un alto indice de documentos que hacen referencia a el documento TIA TSB 10-F (emitido por la *Telecommunications Industry Association - Telecommunication System Bulletin 10-F*) que tiene por nombre *Interference Criteria for Microwave Systems)*. Es por eso que se podría pensar adquirir una copia de dicho documento. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la versión actual data de 1994 por lo que puede ser probable que una nueva edición sea emitida en los próximos años. Su precio ronda entre los 280 dolares.

A. Cronograma de Actividades

Actividades General	Actividad Específica	Plazo
Diseño de un enlace microondas utilizando ICS Telecom	Identificar parámetros para diseñar un enlace microondas.	1 día
	Determinar dos puntos para realizar el enlace (Coordenadas, Distancias).	1 día
	Consultar manual ICS Telecom.	16 días
	Diseñar enlace para los puntos seleccionados (sin interferencias).	5 días
	Realizar análisis de los parámetros del enlace propuesto sin interferencias.	2 días
	Usar otro enlace para interferir el diseñado e identificar el comportamiento de los parámetros.	1 día
	Comparar los valores de los parámetros en ambos casos (sin interferencia, con interferencia).	1 día
Identificar los equipos mas utilizados y sus caracteristicas según la base de datos proporcionada por la ANE	Reducir la base de datos, identificando los equipos (radios y antenas) más usados en el mercado y de tecnología reciente.	7 días
	A partir de las hojas de datos crear una nueva base de datos que contenga las especificaciones técnicas de los equipos seleccionados.	10 días
	Realizar análisis estadístico para determinar la banda de frecuencia más utilizada por los equipos y visualizar los resultados en gráficas.	10 días
Obtener rango de valores típicos según documentación existente de criterios de interferencia de microondas.	Identificar los parámetros que se deben tener en cuenta para el análisis de interferencias.	5 días
Consultar documentación internacional de los procesos regulatorios en el manejo de interferencias en enlaces microondas	Realizar la busqueda de los principales entes regulatorios en las diferentes regiones y los procesos que se llevan a cabo para el control de interferencias.	5 días
	Establecer los estándares regulatorios internacionales empleados en la administración del espectro.	2 días
Integrar los parámetros identificados en el software de simulación (ICS Telecom y Sistema de Simulación en linea)	Realizar la simulación en el software ICS Telecom	2 días
	Realizar la simulación en el Sistema de Simulació en Linea	2 días
	Comparar los valores obtenidos en cada simulador	2 días
Realizar el documento		Todos los días

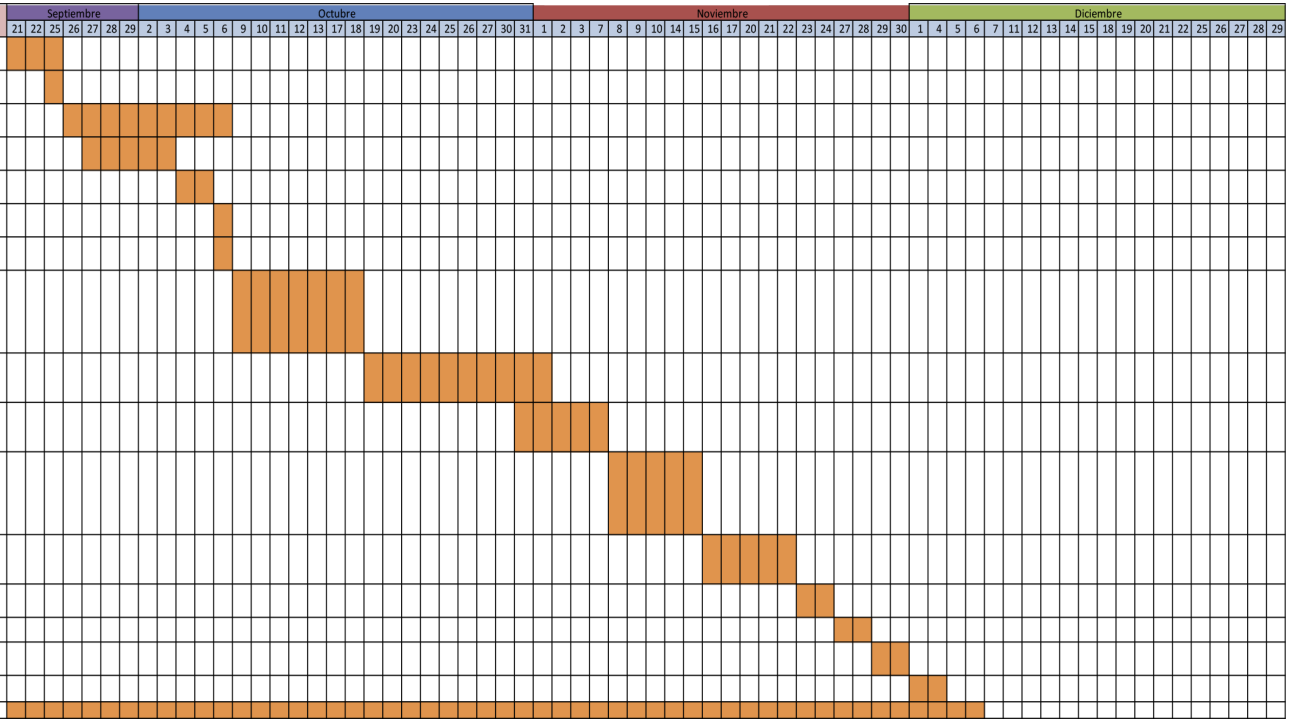


Imagen A-1.: Cronograma de actividades

B. Decibeles

Este apartado busca acercar al lector, a través de una pequeña introducción, a una de las unidades más empleadas en el campo de las telecomunicaciones con el fin de evitar ligeras confusiones que resultan de su manejo y sus operaciones. De igual forma, a lo largo de este anexo se hace referencia a varios documentos que pueden ser consultados en caso tal que se desee profundizar en este tema.

B.1. Definición

Se puede definir como la unidad que indica la relación entre dos magnitudes, como potencia, tensión, corriente, presión acústica, un campo eléctrico, una velocidad o una densidad de carga [21]. Esta unidad hace uso de los logaritmos y sus propiedades, por lo que resulta conveniente mencionarlas de forma breve.

$$\log_a (P \times Q) = \log_a (P) + \log_a (Q) \tag{B-1}$$

$$\log_a (P/Q) = \log_a (P) - \log_a (Q) \tag{B-2}$$

$$\log_a (P/Q) = \log_a (P) - \log_a (Q) \tag{B-3}$$

Obsérvese la capacidad que tienen los logaritmos, y por ende los decibeles[1], de convertir el logaritmo de una multiplicación en la suma de logaritmos (B-1); el logaritmo de una división en la resta de logaritmos (B-2); y el logaritmo de una cantidad elevada a una potencia, en el logaritmo de dicha cantidad multiplicada por la potencia (B-3). Estas propiedades, sumado al hecho de tratarse de una función no lineal que permite reducir el número de dígitos que resultan de operar cantidades muy grandes o muy pequeñas, hace de los decibeles una herramienta útil en el campo de las telecomunicaciones.

[1] En honor a Alexander Graham Bell, siendo la unidad original el Bel o Belio. Sin embargo esta unidad de medida es considerada muy grande para fines prácticos, por lo tanto, se emplean los decibeles. Teniendo en cuenta que 10 decibeles equivalen a un Bel, es decir, 10 dB = 1 Bel ó 1 dB = 1/10 Bel.

Con base en lo anterior, representando de forma general a los elementos que hacen parte de un sistema de telecomunicaciones como un diagrama de bloques, y considerando que una de las magnitudes más empleadas es la potencia, es posible definir a los decibeles como se muestra a continuación.



Imagen B-1.: Sistema representando la señal de entrada y salida

$$\text{Valor en dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_o}{P_i} \right) \tag{B-4}$$

Si el valor en dB obtenido es positivo, significa que la potencia de salida es mayor que la de entrada y se considera que el elemento amplifica la señal, es decir, exhibe una ganancia. Si por el contrario el valor es negativo, el elemento produce una atenuación sobre la señal de entrada, y por lo tanto, se consideran como pérdidas. Los valores de ganancia se suelen escribir solos o acompañados del signo + (3 dB, +10 dB, +5 dB, 30 dB, etc.) y los valores para las pérdidas o atenuación van precedidas del signo - (-3 dB, -12 dB, -23 dB, etc.).

De la ecuación (B-4) se puede observar que la potencia de salida P_o se está comparando con el valor de la potencia de entrada P_i, luego el valor en decibeles que resulta de ésta operación será un indicador de cuantas veces es más grande o pequeño la potencia de salida en relación a la potencia de entrada (o de referencia).

B.2. Valores de Referencia

Dependiendo del tipo de referencia que se emplee, es posible distinguir dos tipos de decibeles, los que se usan para expresar una magnitud de relación (relativos) y los que expresan magnitud de medida (absolutos) [13].

Los relativos dan una idea de la relación entre dos potencias (u otras magnitudes) aunque no indiquen de forma explícita los valores comparados. En este grupo aparecen unidades como el dB, dBi, y dBd. Los dB muestran la relación de atenuación o ganancia que sufre una señal sin tener en cuenta una unidad absoluta o magnitud

de referencia. El dBi muestra la relación que existe entre la ganancia de una antena particular y la ganancia de una antena isotrópica ideal (irradia en todas las direcciones), mientras que el dBd tiene como referencia la ganancia de una antena dipolo $\lambda/2$. La relación que existe entre estas dos unidades es la siguiente

$$G_{[dBi]} = G_{[dBd]} + 2{,}15 \tag{B-5}$$

Por otra parte, los absolutos permiten emplear los decibeles como una unidad de medida al hacer que la magnitud de referencia sea una cantidad conocida. Dentro de este conjunto, y en el campo de las comunicaciones y la electrónica se encuentran un gran número de unidades. A continuación se muestran algunas de las unidades básicas más empleadas para algunas magnitudes [13] [18].

Tabla B-1.: Unidades en decibeles básicas para algunas magnitudes

Magnitud	**Referencia R**	**Unidad L**	**Expresión**
Potencia, P	1 mW	dBm	$L = 10\ \log_{10}\left(\frac{P_{[\mathrm{mW}]}}{R}\right)$
	1 W	dBW	$L = 10\ \log_{10}\left(\frac{P_{[\mathrm{W}]}}{R}\right)$
	1 kW	dBkW	$L = 10\ \log_{10}\left(\frac{P_{[\mathrm{kW}]}}{R}\right)$
Voltaje, V	0,755 V	dBV	$L = 20\ \log_{10}\left(\frac{V_{[\mathrm{V}]}}{R}\right)$
	1 mV	dBmV	$L = 20\ \log_{10}\left(\frac{V_{[\mathrm{mV}]}}{R}\right)$
	1 μV	dBμV	$L = 20\ \log_{10}\left(\frac{V_{[\mu\mathrm{V}]}}{R}\right)$
Campo Eléctrico, E	1 μV/m	dBμ	$L = 20\ \log_{10}\left(\frac{E_{[\mu\mathrm{V/m}]}}{R}\right)$

B.3. Aspectos Importantes

Existen varios aspectos importantes a tener en cuenta cuando se tratan con decibeles. En primer lugar, resulta útil conocer de manera inmediata algunos valores típicos de decibeles con el fin de facilitar los cálculos. Existen valores notables en decibeles que son sencillos de recordar especialmente si son múltiplos de diez, como se muestra en la tabla B-2 [8].

Ahora, sería posible de forma automática pasar del dominio de la potencia al de los decibeles y viceversa tomando en consideración la lógica de la tabla anterior. Es importante también tener en cuenta otro valor en el cual la potencia (o la magnitud

Tabla B-2.: Valores de potencia, logaritmo y su correspondiente valor en decibeles.

Potencia	**Logaritmo**	**Decibeles**
$10^0 = 1$	$\log_{10}(1) = 0$	$10\ \log_{10}(1) = 0$
$10^1 = 10$	$\log_{10}(10) = 1$	$10\ \log_{10}(10) = 10$
$10^2 = 100$	$\log_{10}(100) = 2$	$10\ \log_{10}(100) = 20$
$10^3 = 1000$	$\log_{10}(1000) = 3$	$10\ \log_{10}(1000) = 30$
$10^4 = 10000$	$\log_{10}(100000) = 4$	$10\ \log_{10}(100000) = 40$, etc...
$10^{-1} = 0{,}1$	$\log_{10}(0{,}1) = -1$	$10\ \log_{10}(0{,}1) = -10$
$10^{-2} = 0{,}01$	$\log_{10}(0{,}01) = -2$	$10\ \log_{10}(0{,}01) = -20$
$10^{-3} = 0{,}001$	$\log_{10}(0{,}001) = -3$	$10\ \log_{10}(0{,}001) = -30$
$10^{-4} = 0{,}0001$	$\log_{10}(0{,}0001) = -4$	$10\ \log_{10}(0{,}0001) = -40$, etc...

empleada) ha sido reducida a la mitad de su valor. En este caso se dice que ha sufrido una atenuación aproximada de 3 dB (-3 dB). El caso contrario ocurre cuando la magnitud ha duplicado su valor, para lo cual habrá sido amplificada 3 dB (+3 dB).

Con base en lo anterior es posible calcular de manera casi inmediata las diferentes ganancias o atenuaciones que sufre una magnitud al pasar por un sistema particular al emplear combinaciones de los valores de decibles conocidos. Por ejemplo, una señal de 1 mW que pasa por un amplificador con una ganancia de 47 dB puede calcularse al expresar este valor en términos conocidos como 50 dB - 3 dB = 47 dB. Por lo tanto, según se puede apreciar en la siguiente figura, la señal en el punto A será amplificada 100000 veces y luego se verá reducida a la mitad, obteniendo a la salida una potencia de 50 W.

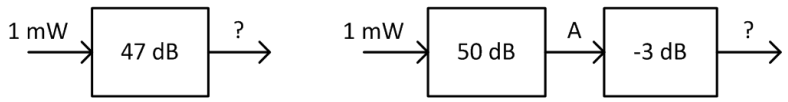


Imagen B-2.: Separarción de la ganancia de un dispositivo en valores de decibeles conocidos.

Cabe tener en cuenta que el resultado anterior es aproximado ya que el valor calculado es 50.1187234 W. La diferencia radica en la aproximación realizada al reducir la potencia a la mitad empleando los -3 dB ya que no es exactamente ese valor. Sin embargo, para fines prácticos puede ser considerado una buena aproximación.

Del ejemplo anterior, también hubiera sido factible convertir la señal de entrada a decibeles absolutos (dBm) y luego sumar de forma directa la ganancia de 47 dB. Dicha operación implicaría la suma de unidades en dBm con dB, lo cual es posible, ya que las unidades relativas sólo expresan la cantidad de veces que una señal se ve afectada, ya sea atenuada o amplificada, y el resultado estará en unidades de deci-

beles absolutos, es decir, en dBm.

Sin embargo, no es posible sumar de forma directa dos cantidades con unidades absolutas (dBm con dBm; dBm con dBW; dB con dB, etc.). Lo anterior obedece al hecho de tratarse en muchos casos de dos fuentes de señal independientes sumado a la situación de estar realizando operaciones en una escala no lineal. Con el fin de aclarar esta situación, suponga que a un sistema llegan dos señales con diferentes niveles de potencia en dBm como se muestra en la imágen B-3. Según lo mencionado anteriormente no es posible sumarlas de forma directa, por lo que el resultado no sería 8 dBm + 5 dBm = 13 dBm. Cuando se trata de operar unidades iguales (dBm con dBm, dBW con dBW o dB con dB, etc.) es necesario convertirlas del dominio de los decibeles al dominio de la magnitud que estemos empleando (Potencia, Voltaje, Corriente, etc.) para poder así operarlas y pasarlas por último de nuevo a decibeles.

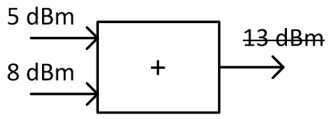


Imagen B-3.: Diagrama de bloques ejemplificando la operación de suma equivocada.

Empleando la ecuación B-4 se despeja el valor de potencia teniendo disponible un valor en decibeles, para lo cual se tiene que

$$P_o = P_i \times 10^{(\text{Valor en dB}/10)} \tag{B-6}$$

Una vez convertidas al dominio de la potencia empleando la ecuación (B-6) es posible sumar ambos valores y posteriormente pasarlos a decibeles como se muestra a continuación.

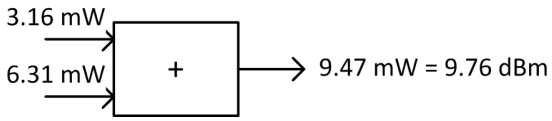


Imagen B-4.: Se debe realizar la suma en el dominio de la potencia para luego convertir el resultado a decibeles.

En cuanto a la resta de decibeles con unidades absolutas, para la mayoría de aplicaciones, es correcto realizar la operación de forma directa siempre y cuando se traten de dB relativos o tengan las mismas unidades, es decir, se esté operando dBm con dBm (mismas unidades), dB con dB (mismas unidades), para lo cual el resultado estará en dB, o dBm con dB (absolutos con relativos), dBm con dBi (absolutos con

relativos), con lo que el resultado estará en decibeles absolutos etc.

En caso tal que se necesite realizar operaciones entre decibeles absolutos con las unidades de referencia para los decibeles absolutos sean diferentes, es necesario convertir los valores a una referencia común para luego realizar las operaciones correspondientes según se trate de suma o resta. Una forma sencilla de lograr esta conversión es tener en cuenta que los múltiplos y submúltiplos de las unidades en el S.I. (sistema internacional de unidades) varían en forma consecutiva en múltiplos de 1000. Este último valor convertido en decibeles será 30 dB. Por lo tanto, al pasar de una unidad de referencia menor a una mayor, bastará con restar 30 dB, mientras que en caso contrario sólo será suficiente sumar 30 dB [10]. Un ejemplo con fines aclaratorios se muestra a continuación.

Suponiendo una potencia P en vatios, su valor en decibeles será

$$P_{[\mathrm{dBW}]} = 10 \log_{10}\left(P_{[\mathrm{W}]}\right) \tag{B-7}$$

Ahora si se desea expresar la potencia P en dBm, será como sigue

$$P_{[\mathrm{dBm}]} = 10 \log_{10}\left(\frac{P_{[\mathrm{W}]}}{1\ \mathrm{mW}}\right) = 10 \log_{10}\left(P_{[W]}\right) - 10 \log_{10}\left(10^{-3}\right) \tag{B-8}$$

La ecuación (B-8) hace uso de la propiedad mostrada en la ecuación (B-2), luego, empleando la propiedad descrita en la ecuación (B-3) se tiene que

$$P_{[\mathrm{dBm}]} = 10 \log_{10}\left(P_{[W]}\right) - 10(-3) \log_{10}(10) = 10 \log_{10}\left(P_{[W]}\right) + 30 \log_{10}(10) \tag{B-9}$$

Por último, realizando las operaciones restantes se obtiene

$$P_{[\mathrm{dBm}]} = P_{[\mathrm{dBW}]} + 30 \tag{B-10}$$

De la ecuación (B-10) se aprecia las conversiones entre diferentes unidades de referencia de forma directa. Si se tratase de expresar un valor de potencia en dBW a dBkW por ejemplo, bastaría solo con restar 30. Si por otra parte se tuviera un valor en dBkW y fuera necesario convertirlo a dBm sería suficiente con sumar 60 para obtener las unidades deseadas.

C. KTBF

Para entender a qué corresponde el término KTBF como parámetro que se emplea para caracterizar el piso de ruido en los equipos de radio microondas, es necesario definir algunos términos que serán útiles para tal fin.

C.1. Ruido Térmico

En la ausencia de interferencias externas, el factor limitante en los equipos de radio es el ruido térmico introducido por sus componentes, y especialmente por los amplificadores en el receptor. El ruido térmico, también denominado ruido interno define el movimiento rápido y aleatorio de los electrones dentro de un conductor, producido por la agitación térmica. Los electrones en el interior tienen una carga negativa cuya velocidad es proporcional a su temperatura absoluta, y éstos al chocar con las moléculas producen un nivel de corriente que a su vez produce un pequeño voltaje a través del componente resistivo del conductor.

El valor de este voltaje puede ser obtenido teniendo en cuenta consideraciones tomadas de la mecánica cuántica a frecuencias de microondas, con lo que resulta

$$V_n = \sqrt{4KTBR} \tag{C-1}$$

Donde
K = Constante de Boltzmann = $1{,}380 \times 10^{-23}$ [J/K]
T = Temperatura en grados Kelvin [K]
B = Ancho de banda del sistema [Hz]
R = Resistencia en [Ω]

Con el fin de obtener la potencia de ruido térmico se hace uso de una resistencia de igual valor (R) para obtener la máxima transferencia de potencia, siendo entonces

$$N = KTB \tag{C-2}$$

La ecuación (C-2) permite obtener la potencia de ruido máxima disponible de un componente a una temperatura T [17]. Nótese que no depende de la frecuencia, pero si del ancho de banda del sistema. Cabe mencionar que no se deben confundir la letra designada para la constante de Boltzman K con la unidad de temperatura de grados Kelvin [K].

C.2. Figura de Ruido

Este parámetro se utiliza para caracterizar el ruido presente en los elementos que hacen parte de los equipos de comunicaciones. Se define como la degradación que sufre la relación señal a ruido de la entrada con respecto a la relación señal a ruido de salida, y viene dada por

$$F = \frac{\frac{S_i}{N_i}}{\frac{S_o}{N_o}} \tag{C-3}$$

Ahora, si consideramos un amplificador como el que se muestra en la figura siguiente, es posible obtener una expresión alternativa para la figura de ruido.



Imagen C-1.: Diagrama simplificado de in amplificador.

Se tiene entonces que

$N_i = KT_0B$, Potencia de ruido a la entrada
$N_o = KGB(T_0 + T_e)$, Potencia de ruido a la salida, es la suma del ruido amplificado a la entrada y el ruido interno.
$S_o = S_iG$, Señal de salida.

Usando estas expresiones en la ecuación (C-3) se obtiene

$$F = \frac{S_i}{S_o}\frac{N_o}{N_i} = \frac{S_i}{GS_i}\frac{KGB\,(T_0 + T_e)}{KT_0B} = \frac{T_0 + T_e}{T_0} = 1 + \frac{T_e}{T_0} \tag{C-4}$$

En la literatura es posible encontrar de forma intercambiable los términos figura de ruido y factor de ruido, sin embargo, en ocasiones se hace la distinción entre estos, al mencionar a la figura de ruido como el valor en dB del factor de ruido [18]. El

término T_0 se usa como temperatura de referencia cuyo valor es generalmente 290 K, considerado como temperatura ambiente (16.85 °C). Se mencionará en breve el término relacionado con T_e.

C.3. Temperatura de Ruido

Este es otro parámetro que se emplea para caracterizar el ruido presente en los elementos de los sistemas de comunicaciones. Si tenemos una fuente de ruido arbitraria, y consideramos que es ruido blanco , es posible modelarla mediante una fuente de ruido térmico caracterizada por una temperatura de ruido equivalente.

La temperatura de ruido equivalente es aquella que permite modelar una fuente de ruido de forma tal que a dicha temperatura entregue la misma cantidad de potencia de ruido a una carga determinada. Esta temperatura viene dada por

$$T_e = \frac{N}{B} \tag{C-5}$$

Aunque también es posible usar la ecuación (C-4) para expresarla en función de la figura de ruido

$$T_e = (F-1)T_0 \tag{C-6}$$

En los receptores de los equipos de radio, el ruido introducido por los primeros amplificadores juega un papel importante, denominado en inglés como *front end noise*, y es el encargado de degradar la relación señal a ruido de la señal recibida. Con base en esto, es necesario cuantificar la contribución que hace el receptor al ruido térmico. El valor que cumple con este propósito es la Figura de Ruido, luego resulta importante encontrar una relación entre este valor y la potencia de ruido [8]. Para un amplificador, la potencia de ruido (*front end noise*) puede ser calculada teniendo en cuenta el efecto que éste adiciona a causa de su temperatura equivalente [11], por lo tanto

$$N = K(T_0 + T_e)B \tag{C-7}$$

Y usando la ecuación (C-6) se tiene que

$$N = K(T_0 + (F-1)T_0)B = K(T_0(1+F-1))B \tag{C-8}$$

Obteniendo finalmente

$$N = KT_0BF \tag{C-9}$$

C.4. Unidades

A continuación se busca aclarar la unidades resultantes correspondientes al desarrollo de la ecuación (C-9). Se tiene entonces que las unidades para los términos de KTB son las siguientes

$K = [\text{J/K}]$
$T = [\text{K}]$
$B = [\text{Hz}] = [1/\text{s}]$

De igual forma las unidades de energía [J] (Joules) viene dada por

$J = [\text{Ws}]$ (Vatio $\times$ segundo)

Adicionalmente, es importante tener en cuenta e término correspondiente a F. Si se trata de resolver la ecuación (C-9), F debería estar en veces, por lo que según lo mencionado en el anexo B se estaría hablando del factor de ruido, y efectivamente se multiplicaría con los demás términos Por lo tanto, reemplazando en la fórmula original. Sin embargo es común encontrar en las especificaciones de los equipos y literatura valores en dB para la figura de ruido, así pues, se hace necesario operar primero los términos KTB, convertir el resultado a decibeles y por último sumar la figura de ruido F.

$$N = \left[\frac{J}{K}\right] T\,[K]\, B[Hz] = K\left[\frac{Ws}{K}\right] T\,[K]\, B\left[\frac{1}{s}\right] = KTB[W] \tag{C-10}$$

EL resultado anterior convertido a decibeles (dBm) será

$$N_{[\text{dBm}]} = 10\,\log_{10}\left(\frac{KTB[W]}{1\text{ mW}}\right) \tag{C-11}$$

Por lo que solo faltaría sumarle la figura de ruido en decibeles. Nótese que se trataría de la suma de unidades en dBm y dB respectivamente, luego las unidades resultantes (según lo mencionado en el anexo B) serán dBm.

$$N_{[\text{dBm}]} = 10 \log_{10} \left(\frac{KTB[W]}{1 \text{ mW}} \right) + F[dB] \tag{C-12}$$

C.5. Simulador

Ahora, con el fin de comprobar el valor que entrega el simulador para $KTBF$, se realizó el respectivo cálculo tomando los siguientes parámetros

$B = 55$ MHz
$F = 4$ dB

Con estos valores, la herramienta calculó un $KTBF$ de -93dBm. Realizando la comprobación del cálculo empleando el procedimiento descrito anteriormente con los valores mencionados se tiene que

$$KTB = \left(1{,}380 \times 10^{-23}\right)(290)\left(55 \times 10^{6}\right) = 2{,}2011 \times 10^{-13} \text{ W} \tag{C-13}$$

Ahora, usando la ecuación (C-12) se obtiene

$$\begin{aligned} N_{[\text{dBm}]} &= 10 \log_{10} \left(\frac{2{,}2011 \times 10^{-13}}{1 \text{ mW}} \right) + 4 \text{ dB} = -95{,}573 \text{ dBm} + 4 \text{ dB} \\ &= -92{,}573 \text{ dBm} \end{aligned} \tag{C-14}$$

Al comparar el resultado obtenido por parte del simulador y el calculado, podemos observar que son comparables, su resultado varia teniendo en cuenta las cifras significativas usadas durante los cálculos.

D. Tablas C/I

Los valore que se muestran a continuación fueron tomados de la recomendación ETSI EN 301 217-2-2 [4], anexos B - H sección X.4.3, donde X es la letra correspondiente del anexo.

Tabla D-1.: Valores de C/I para Co-canal, Primer y segundo canal adyacente en la banda de 1.4 GHz a 2.7 GHz

Spectral efficiency		Channel separation (MHz)	C/I (dB) for BER ≤ 10^{-6} RSL degradation of 1 dB		
Reference index	Class		Co-channel interference C/I (dB)	First adjacent channel interference C/I (dB)	Second adjacent channel interference C/I (dB)
1	1	0,025 to 14	23	0	-25
2	2	0,025 to 14	23	0	-25
4	4L	0,025 to 14	30	0	-25

Tabla D-2.: Valores de C/I para Co-canal y primer canal adyacente en la banda de 3 GHz a 11 GHz - Separación de canal hasta 30 MHz y 56/60 MHz

Spectral efficiency		Minimum RIC rate (Mbit/s) (see note)	Channel separation (MHz) (see note)	C/I for BER ≤ 10^{-6} RSL degradation of 1 dB or 3 dB			
				Co-channel interference		First adjacent channel interference	
Reference index	Class			1 dB	3 dB	1 dB	3 dB
2	2	2; 4; 8; 16; 32; 64	1,75; 3,5; 7; 14 to 15; 28 to 30; 56 to 60	23	19	0	-4
3	3	3; 6; 12; 24; 48; 96	1,75; 3,5; 7; 14 to 15; 28 to 30; 56 to 60	27	23	-1	-5
4	4L	4; 8; 16; 32; 64; 128	1,75; 3,5; 7; 14 to 15; 28 to 30; 56 to 60	30	26,5	-3	-7
		45	20	30	26,5	-8	-12
5	4H	24; 49; 98; 196	7; 14 to 15; 28 to 30; 56 to 60	33	29	-5	-9
6	5L	29; 58	7; 14 to 15	34	30	-3	-7
	5LB	117; 235	28 to 30; 56 to 60 (ACCP)				
	5LA	117; 235	28 to 30; 56 to 60 (ACAP)	34	30	4	1
7	5H	34; 64	7; 14 to 15	37	33	-2	-6
	5HB	137	28 to 30; 56 to 60 (ACCP)	35	32	-5	-8
	5HA	137; 274	28 to 30; 56 to 60 (ACAP)	37	33	3	-1
8	6L	39	7	40	36	0	-4
		78	14 to 15				
	6LB	156; 313	28 to 30; 56 to 60 (ACCP)	40	36	0	-4
	6LA	156; 313	28 to 30; 56 to 60 (ACAP)	40	36	10	7
9	6H	88	14 to 15	43	39	0	-4
	6HB	176; 352	28 to 30; 56 to 60 (ACCP)				
	6HA	176; 352	28 to 30; 56 to 60 (ACAP)	43	39	10	6
10	7	98	14 to 15	46	42	0	-4
	7B	196; 392	28 to 30; 56 to 60 (ACCP)				
	7A	196; 392	28 to 30; 56 to 60 (ACAP)	46	42	13	9
11	8	107	14 to 15	50	46	0	-4
	8B	215; 431	28 to 30; 56 to 60 (ACCP)				
	8A	215; 431	28 to 30; 56 to 60 (ACAP)	50	46	17	13
NOTE: Minimum RIC and Channel separation series of values in each row are intended one to one coupled in their orders.							

Tabla D-3.: Valores de C/I para Co-canal y primer canal adyacente en la banda de 3 GHz a 11 GHz - Separación de canal de 40 MHz

Spectral efficiency		Minimum RIC rate (Mbit/s)	Channel separation (MHz)	C/I for BER ≤ 10^{-6} RSL degradation of 1 dB or 3 dB			
				Co-channel interference		First adjacent channel interference	
Reference index	Class			1 dB	3 dB	1 dB	3 dB
6	5LA	168	40 (ACAP)	33	29	3	0
	5LB	STM-1 or 137	40 (ACCP)	33	29	-4	-8
		168		33	29	-3	-7
7	5HA	196	40 (ACCP)	37	33	7	4
	5HB/28	STM-1 or 137	40 (ACCP)	37	33	-4	-8
	5HB	196	40 (ACCP)	37	33	-3	-7
8	6LA	224	40 (ACAP)	40	36	10	7
	6LB	224	40 (ACCP)	40	36	0	-4
9	6HA	252	40 (ACAP)	43	39	10	7
	6HB	252	40 (ACCP)	43	39	0	-4
10	7A	280	40 (ACAP)	46	42	13	9
	7B	280	40 (ACCP)	46	42	0	-4
11	8A	308	40 (ACAP)	50	46	17	13
	8B	308	40 (ACCP)	50	46	0	-4

Tabla D-4.: Valores de C/I para Co-canal y primer canal adyacente en la banda de 13 GHz, 15 GHz y 18 GHz

Spectral efficiency		Minimum RIC rate (Mbit/s) (see note)	Channel separation (MHz) (see note)	C/I for BER ≤ 10^{-6} RSL degradation of 1 dB or 3 dB			
				Co-channel interference		adjacent channel interference	
Reference index	Class			1 dB	3 dB	1 dB	3 dB
2	2	2; 4; 8; 16; 32; 64	1,75; 3,5; 7; 14; 28; 56	23	19	0	-4
		16; 32; 64; 128	13,75; 27,5; 55; 110	23	19	1	-3
3	3	3; 6; 12; 24; 48	1,75; 3,5; 7; 14; 28; 56	27	24,5	-1	-5
		24; 48; 96; 191	13,75; 27,5; 55; 110	27	24,5	-0	-4
4	4L	4; 8; 16; 32; 64	1,75; 3,5; 7; 14; 28	30	26,5	-1	-5
		32; 64	13,75; 27,5	30	26,5	0	-4
		128; 256	55/56; 110	29	25	-5	-9
5	4H	sSTM-14	3,5	30	26	-4	-8
		24; 49; 98; 196	7; 14; 28; 56	30	26,5	-6	-9,5
		49; 98; 196; 392	13,75; 27,5; 55; 110	30	26,5	-2	-5,5
6	5L	29; 58	7; 13,75/14	34	30	-3	-7
	5LB	117; 235; 470	27,5/28; 55/56; 110 (ACCP)	34	30	-3	-7
	5LA	117; 235; 470	27,5/28; 55/56; 110 (ACAP)	34	30	4	1

Tabla D-5.: Valores de C/I para Co-canal y primer canal adyacente en la banda de 13 GHz, 18 GHz y 18 GHz (Cont.)

Spectral efficiency		Minimum RIC rate (Mbit/s) (see note)	Channel separation (MHz) (see note)	C/I for BER ≤ 10^{-6} RSL degradation of 1 dB or 3 dB			
				Co-channel interference		adjacent channel interference	
Reference index	Class			1 dB	3 dB	1 dB	3 dB
7	5H	sSTM-22	3,5	37	33	0	-4
		34; 68	7; 13,75/14	37	33	-3,5	-7,5
	5HB	137	28	35	32	-5	-8
			27,5	37	33	-3	-7
		274	55/56	37	33	-3,5	-7,5
		548	110	37	33	-3,5	-7,5
	5HA	137; 274; 548	27,5/28; 55/56; 110 (ACAP)	37	33	3	-1
8	6L	39; 78	7; 13,75/14	40	36	0	-4
	6LB	156; 313; 627	27,5/28; 55/56; 110 (ACCP)	40	36	0	-4
	6LA	156; 313; 627	27,5/28; 55/56; 110 (ACAP)	40	36	10	7
9	6H	88	13,75/14	43	39	0	-4
	6HB	176; 352; 705	27,5/28; 55/56; 110 (ACCP)				
	6HA	176; 352; 705	27,5/28; 55/56; 110 (ACAP)	43	39	10	6
10	7	98	13,75/14	46	42	0	-4
	7B	196; 392; 784	27,5/28; 55/56; 110 (ACCP)	46	42	0	-4
	7A	196; 392; 784	27,5/28; 55/56; 110 (ACAP)	46	42	13	9
11	8	107	13,75/14	50	46	0	-4
	8B	215; 431; 862	27,5/28; 55/56; 110 (ACCP)				
	8A	215; 431; 862	27,5/28; 55/56; 110 (ACAP)	50	46	17	13
NOTE: Minimum RIC and Channel separation series of values in each row are intended one to one coupled in their orders.							

Tabla D-6.: Valores de C/I para Co-canal y primer canal adyacente en la banda de 23 GHz a 55 GHz

Spectral efficiency		Frequency band (GHz)	Minimum RIC rate (Mbit/s) (see note)	Channel separation (MHz) (see note)	C/I for BER ≤ 10^{-6} RSL degradation of 1 dB or 3 dB			
					Co-channel interference		Adjacent channel interference	
Reference index	Class				1 dB	3 dB	1 dB	3 dB
1	1	50, 52, 55	2	3,5	23	19	0	-4
		52, 55	4; 8; 16; 32	7; 14; 28; 56				
2	2	All except 42	4	3,5	23	19	0	-4
		All	8; 16; 32	7; 14; 28				
		All except 50	64	56				
		23 to 42	128	112				
3	3	All except 42	6	3,5	23	19	-1	-5
		All	12; 24; 48	7; 14; 28				
		All except 50	96	56				
		23 to 42	191	112				
4	4L	All except 42	8	3,5	30	26	-1	-5
		All	16; 32; 64	7; 14; 28				
		All except 50	128	56				
		23 to 42	256	112				
5	4H	23 to 42	24; 49; 98; 196; 392	7; 14; 28; 56; 112	30	26	-6	-9,5
6	5L	23 to 42	29; 58	7; 14	34	30	-3	-7
	5LB	23 to 42	117; 235; 470	28; 56; 112 (ACCP)	34	30	-3	-7
	5LA	23 to 42	117; 235; 470	28; 56; 112 (ACAP)	34	30	4	1
7	5H	23 to 42	34; 68	7; 14	37	33	-3	-7
	5HB	23 to 42	137	28 (ACCP)				
			274; 548	56; 112 (ACCP)	37	33	-3,5	-7,5
	5HA	23 to 42	137; 274; 548	28; 56; 112 (ACAP)	37	33	+3	-1
8	6L	23 to 42	39; 78	7; 14	40	36	0	-4
	6LB	23 to 42	156; 313; 627	28; 56; 112 (ACCP)				
	6LA	23 to 42	156; 313; 627	28; 56; 112 (ACAP)	40	36	10	7
9	6H	23 to 42	88	14	43	39	0	-4
	6HB	23 to 42	176; 352; 705	28; 56; 112 (ACCP)				
	6HA	23 to 42	176; 352; 705	28; 56; 112 (ACAP)	43	39	10	6
10	7	23 to 42	98	14	46	42	0	-4
	7B	23 to 42	196; 392; 784	28; 56; 112 (ACCP)				
	7A	23 to 42	196; 392; 784	28; 56; 112 (ACAP)	46	42	13	9
11	8	23 to 42	107	14	50	46	0	-4
	8B	23 to 42	215; 431; 862	28; 56; 112 (ACCP)				
	8A	23 to 42	215; 431; 862	28; 56; 112 (ACAP)	50	46	17	13
NOTE: Minimum RIC and Channel separation series of values in each row are intended one to one coupled in their orders.								

Bibliografía

[1] TIA TSB 10-F. *Interference Protection Criteria*. 1994.

[2] ITU-R P.530 16. *Datos de propagación y métodos de predicción*. 2015.

[3] ETSI EN 302 217-2. *Fixed Radio Systems; Characteristics and equirements for point-to-point equipment and antennas; Part 2: Digital systems operating in frequency bands from 1 GHz to 86 GHz; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU*. 2017.

[4] ETSI EN 302 217-2-2. *Fixed Radio Systems; Characteristics and requirements for point-to-point equipment and antennas; Part 2-2: Digital systems operating in frequency bands where frequency co-ordination is applied; Harmonized EN covering the essential requirements of Article 3.2 of the R&TTE Directive*. 2008.

[5] ETSI EN 301 854. *Fixed Radio Systems; Point-to-point equipment; Derivation of receiver interference parameters useful for planning fixed service point-to-point systems operating different equipment classes and/or capacities*. 2005.

[6] ATDI. *Implementation of TSB 10-F in Sectrum E*. 2014.

[7] ICS TELECOM ATDI. *Microwave Links Manual*. 2006.

[8] Roger L. Freeman. *Fundamentals of Telecommunications*. Wiley, 2 edition, 2005.

[9] Roger L. Freeman. *Radio System Design for Telecommunications*. Wiley, 2007.

[10] Juan J. Murillo Fuentes. *Fórmulas de radio propagación en decibelios*. 2007.

[11] George Kizer. *Digital Microwave Communication: Engineering Point-to-Point Microwave Systems*. Wiley-IEEE Press, 2013.

[12] Trevor Manning. *Microwave Radio Transmission Design Guide*. Artech House, 2 edition, 2009.

[13] Eduardo J. Menso. *El decibel: Características y Aplicaciones*.

[14] NTIA-05-432. *Interference Protection Criteria*. October 2005.

[15] ITU-R P.837-1. *Características de la precipitación para establecer modelos de propagación.* 1994.

[16] ITU-R P.838-3. *Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción.* 2005.

[17] David M. Pozar. *Microwave Engineering.* Wiley, 4 edition, 2012.

[18] José M. Rábanos. *Sistemas de Telecomunicaciones.* Madrid, 1998.

[19] LS TELECOM. *Principios del Análisis de Compatibilidad Electromagnética.* 2015.

[20] UIT-R. *Información sobre propagación de las ondas radioeléctricas para el diseño de enlaces terrenales punto a punto.* Oficina de Radiocomunicaciones, Ginebra, 2008.

[21] ITU-R V.745-5. *Use of the decibel and the neper in telecommunications.* 2015.