

**UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA  
DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**



**ANÁLISIS DE MODULACIÓN DUAL CON ANTENA FRACTAL  
PARA ENLACES PUNTO A PUNTO**

*Trabajo monográfico para optar al título de Ingeniero en Electrónica y  
Telecomunicaciones*

Autor

Br. Carlos Vázquez

Tutor

PhD. Luis Armando Salinas

Managua, Nicaragua  
19 de noviembre de 2020



## **Dedicatoria**

A DIOS, por darme la vida y fortaleza para llegar a la etapa de culminación de mi carrera.

A mi padre y mi madre por estar para mí en cada día de mi vida, en los momentos buenos y malos, por criarme a su manera y enseñarme que en la vida hay que aspirar a más, que no importa si se empieza desde abajo, lo importante es tener compromiso y convicción, para llegar a lo alto.

A mi hermano, Javier, gracias a quien me enamoré de esta profesión, quien siempre ha servido de base para mi constante desarrollo como ingeniero, como persona, y sobre todo, como hombre. A quien debo gran parte de mis logros personales y académicos.

A mi familia, a quienes amo por igual, y que saben que aunque mi amor no es ruidoso, es honesto y sincero, les dedico este trabajo, y espero de corazón que estén orgullosos de mí, esto me haría muy feliz.

## **Agradecimientos**

A la universidad, por ser la única en el país que a día de hoy brinda la titulación de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, compartiendo con nosotros los fundamentos para aplicar esta ciencia en la actualidad.

A mis compañeros quienes me brindaron una mano durante este proceso, y especialmente a Juan Carlos, quien siempre me apoyó e ilustró con sus conocimientos e intelecto, quien además me ayudó de gran manera durante la elaboración de cada segmento de esta investigación.

A mi tutor Ing. Luis Salinas, por aceptar guiarme en este trabajo, por sus consejos y aportes para poder entregar un documento a la altura del objetivo que se busca alcanzar.

## Resumen

En este documento se describe la construcción y teorización de un tipo de antena direccional usando la tecnología de fractalización de figuras geométricas, el uso de las tecnologías de las antenas fractales es útil para la sintonización y recepción de las señales electromagnéticas con un vasto ancho de banda, y una excelente ganancia, además, la implementación de estos diseños nos aporta una mejora para la teorización de la fragmentación dimensional.

En este documento encontrarán los planos, experimentos prácticos y diseños de una antena fractal multidimensional, donde se demuestra que su uso práctico es posible, que su aplicación en situaciones reales y para solucionar problemas como la dispersión y ambientes de trabajo adversos, donde es necesario un rápido cambio de parámetros en función de adaptarse a condiciones climáticas variables, con el fin de seguir transmitiendo y mantener puntos nodales de vital importancia en producción, aplicado en infraestructuras de telecomunicaciones. Se podrá comprobar de primera mano con análisis de propagación electromagnética, que las razones de ganancia de la antena permiten realizar grandes enlaces de punto a punto con distancias muy largas, si se poseen las condiciones de altura, no obstante las simulaciones se realizaron bajos los datos y constantes precisas de materiales con sus respectivas pérdidas, en busca de aportar una simulación lo más objetiva y aterrizada a la realidad de los clientes y sus diferentes necesidades.

El uso de un mapa real con sus diferentes cambios topográficos, los valores reales técnicos de ganancias y pérdidas, nos confirman una aplicación exitosa hasta en las peores condiciones climáticas e incluso en condiciones en las cuales no se tiene una línea de vista perfecta, simplemente utilizando el efecto de las señales por deflexión Fresnel generado por la curvatura aguda de ciertos objetos sobre la superficie terrestre.

## Contenido

I. Introducción.....	1
II. Antecedente .....	2
III. Planteamiento del problema .....	3
3.1. QPSK en climas adversos.....	3
IV. Justificación.....	4
V. Objetivos.....	6
5.1. Objetivo general.....	6
5.2. Objetivos específicos.....	6
VI. Marco teórico.....	7
6.1. Antena.....	7
6.2. Fractal .....	7
6.3. Radioenlace punto a punto.....	8
6.4. Modulación.....	8
6.12. Fundamentación teórica .....	9
VII. Diseño metodológico.....	11
7.1. Según el objeto.....	11
7.2. Según el tipo de datos empleados.....	11
7.3. Fuentes de información .....	12
VIII. Desarrollo .....	13
8.1. Antena fractal de modulación dual.....	13
8.2. Antenas convencionales.....	15
8.3. Antenas fractales .....	18
8.4. Sistemas de comunicación auxiliar punto a punto.....	20
8.5. Reducción de frecuencias en operación.....	25
8.6. Polaridad variable e híbrida.....	27
8.7. Cambios auxiliares de modulación.....	30
8.8. Modulación QPSK.....	34
8.9. Implementación de QPSK.....	35
8.10. Tasa de error de bit.....	36
8.11. QPSK en el dominio temporal .....	36
8.12. OQPSK (QPSK con corrimiento).....	37

8.13. Candidato secundario para la modulación auxiliar .....	38
8.14. Geometría fractal aplicada a antenas .....	38
8.15. Análisis en la banda de 2m VHF.....	44
8.16. Análisis de banda de los 70cm UHF .....	45
8.17. Análisis desde los 800 hasta los 900MHz UHF .....	46
8.18. Análisis de banda ISM (5.250-5.350GHz).....	48
IX. Conclusiones.....	56
X. Recomendaciones.....	57
XI. Bibliografía.....	58
XII. Anexos .....	60

## Índice de figuras

Figura 1 <i>Patrón de radiación</i> .....	16
Figura 2 <i>Radiación de antena Yagi</i> .....	17
Figura 3 <i>Parámetros de radioenlace punto a punto</i> .....	21
Figura 4 <i>Detalle de configuraciones para radioenlace</i> .....	21
Figura 5 <i>Antena e idus de radioenlace XPIC en Masaya</i> .....	23
Figura 6 <i>Índice de absorción de energía</i> .....	26
Figura 7 <i>Polarización de señal</i> .....	28
Figura 8 <i>Constelación de QAM</i> .....	32
Figura 9 <i>Extensión de puntos de constelación</i> .....	32
Figura 10 <i>Esquema de bloques</i> .....	33
Figura 11 <i>Esquema QPSK analógico digital</i> .....	35
Figura 12 <i>Demodulador QPSK</i> .....	35
Figura 13 <i>Análisis de señal en desfase</i> .....	36
Figura 14 <i>OQPSK</i> .....	37
Figura 15 <i>Plano de antena fractal elaborada</i> .....	40
Figura 16 <i>Vista lateral de antena fractal</i> .....	41
Figura 17 <i>Antena fractal diseñada</i> .....	41
Figura 18 <i>Análisis de espectro radioeléctrico</i> .....	42
Figura 19 <i>Banda VHF</i> .....	44
Figura 20 <i>Banda UHF</i> .....	45
Figura 21 <i>TV en UHF</i> .....	46
Figura 22 <i>Análisis en banda de 800 MHz</i> .....	47
Figura 23 <i>Análisis de ISM</i> .....	51
Figura 24 <i>Índice de recepción y eficiencia fractal</i> .....	52
Figura 25 <i>Análisis de señal en 7.940GHz</i> .....	53
Figura 26 <i>Simulación de propagación</i> .....	54
Figura 27 <i>Resultados de simulación</i> .....	54
Figura 28 <i>Perfil de elevación TX</i> .....	55
Figura 29 <i>Cobertura de enlace simulado</i> .....	55

## **Glosario**

**IDU:** Módulo interno que contiene las funciones de banda base y frecuencia intermedia.

**ODU:** Módulo externo que dispone de las funciones de radiofrecuencia y que va acoplado a la antena.

**TX:** Transmisión.

**RX:** Recepción.

**HZ:** Frecuencia con la que ocurre un fenómeno medida por segundo.

**Modulación:** Técnica para transportar información a través de una onda.

**AM:** Amplitud modulada.

**FM:** Frecuencia modulada.

**Difracción:** Sucede cuando una onda colisiona con un obstáculo y penetra a través del mismo, su propagación posterior varía en dependencia del tamaño del elemento con el que choca.

**Atenuación:** Perdida de potencia sufrida por una señal al transitar por un medio.

**Reflexión:** Fenómeno que sucede cuando una onda llega a la superficie de separación de dos medios, rebota y retorna al medio del cual proviene.

**Refracción:** Fenómeno en el que una onda penetra en otro medio y cambia su rapidez y propagación.

**XPIC:** Tecnología de cancelación de interferencia.

**Banda:** Intervalos de frecuencia dentro del espectro electromagnético asignados para sus diferentes usos en telecomunicaciones.

**Canal:** Subdivisión de banda de frecuencia en valores variables dentro del rango de la banda correspondiente.

**QPSK:** Modulación por desplazamiento de fase.

**QAM:** Modulación de amplitud en cuadratura.

**ISM:** Banda de radio industrial, científica y médica.

**dBm:** Unidad de medida aplicada a la potencia en milivatio.

**Circuitos RFID:** Identificación por radiofrecuencia.

## **Lista de anexos**

12.1.	<i>Anexo A. Pruebas de recepción.....</i>	<i>60</i>
12.2.	<i>Anexo B. Conexiones de cable coaxial.....</i>	<i>61</i>
12.3.	<i>Anexo C. Monitoreo de las señales captadas.....</i>	<i>62</i>
12.4.	<i>Anexo D. Maqueta de radioenlace punto a punto.....</i>	<i>63</i>

## I. Introducción

La geometría fractal ha sido objeto de estudio durante décadas, el término ha sido primeramente propuesto por Benoît Mandelbrot, y deriva del latín *fractus*, que significa quebrado o fracturado. Muchas estructuras naturales son de tipo fractal. La propiedad matemática clave de un objeto genuinamente fractal es que su dimensión métrica fractal es un número racional mayor a su dimensión topológica.

Este campo ha tenido un rápido crecimiento, tocando áreas insospechadas, desde que Mandelbrot, padre de dicha geometría, empezó a aglutinar los trabajos aislados de grandes matemáticos, convencido de su utilidad. Según su análisis, un fractal se puede definir como:

“Aquello que tiene una forma, bien sea sumamente irregular, sumamente interrumpida o fragmentada y sigue siendo así a cualquier escala que se produzca el examen”.

Haciendo uso de lo funcional que resulta la geometría fractal, algunas de sus propiedades, se aprovechan en la construcción de antenas que pueden obtener anchos de banda de 10 a 40% de la frecuencia central superiores a las antenas clásicas patrones de radiación estables y gran número de bandas determinado por el número de iteraciones del fractal.

El auge y crecimiento de las telecomunicaciones abren cada vez más las puertas de la exploración de nuevas alternativas en diseño, que cubran las exigencias en ancho de banda, eficiencia, rapidez, economía, del nuevo milenio. En la última década, la nueva y revolucionaria teoría de los fractales, se ha abierto paso, proponiendo modelos para el diseño de antenas permitiendo la implementación de nuevos y mejores servicios en los sistemas móviles, circuitos RFID, dispositivos de microonda y otros.

## **II. Antecedente**

Existen diversos estudios con base en la geometría fractal y su uso en antenas, estos trabajos se basan en modelos de antenas fractales que utilizan generalmente el modelo del Triángulo de Sierpinski o las Islas de Koch (modelos geométricos fractales que son implementados en antenas), cuya finalidad es similar, permite a la antena ser capaz de trabajar en diferentes bandas, reducir su tamaño y mantener un patrón de radiación estable.

Se tomarán como base para esta investigación, algunos estudios realizados con anterioridad, que, aunque no sean dirigidos específicamente a enlaces punto a punto, guardan similitud al tema a realizar y sirven como antecedente para demostrar la importancia y beneficios de la utilización de la tecnología fractal en antenas.

A pesar de que la tecnología fractal ya ha sido aplicada anteriormente a las telecomunicaciones por medio de antenas, su aplicación ha sido técnicamente nula en los radioenlaces punto a punto de alta disponibilidad. Durante esta investigación, no se han encontrado registros relacionados a proyectos actuales para la fabricación de antenas fractales, aplicadas a la comunicación punto a punto, Además, a la fecha de entrega de este trabajo, aún no se mostraron indicios relacionados a este uso específico de los fractales en radioenlaces de alta disponibilidad.

Por consiguiente, esta investigación se basará principalmente en los beneficios que este sistema podría proveer, teniendo en cuenta las infraestructuras actuales y evidencia de sus parámetros comunes.

### **III. Planteamiento del problema**

En la actualidad las comunicaciones punto a punto por microondas representan una tecnología muy usada a nivel nacional e internacional, sin embargo este tipo de sistemas se limitan a un solo tipo de banda, es decir, solo son efectivos en una frecuencia específica según el modelo de construcción, estas soluciones de telecomunicaciones pueden variar en frecuencia pero no pueden abarcar un amplio margen de espectro para sus cambios a bandas de frecuencias más bajas, por ejemplo dispositivos de transmisión y recepción con márgenes de transmisión desde los 8 hasta 8.76GHz.

Si colocamos un enlace de este tipo, a su máxima capacidad y en una zona de clima extremo, o muy poco estable, eventualmente, al haber mucha lluvia o pésimas condiciones atmosféricas que se añadan a la línea de vista el enlace fallaría.

Al tener un sistema de cambio de frecuencia y modulación automático, la IDU (Modulo interno para radioenlaces) detecta la baja efectividad del enlace tomando muestreo de los decibelios de ganancia, e instantáneamente realizaría cambios, por ejemplo pasando de modulación QAM a QPSK y reduciendo la frecuencia a 5GHz, de este modo logrando reducir la refracción de onda y manteniendo el tráfico de datos estable, y principalmente evitando una falla que haga al enlace depender de excelentes condiciones climáticas para el restablecimiento de las comunicaciones punto a punto.

#### **3.1. QPSK en climas adversos**

El problema principal en un enlace cuando se enfrenta a situaciones climatológicas complejas (neblina espesa, lluvia o hasta nieve), es el riesgo de inestabilidad o incluso la pérdida del enlace.

Al hacer uso de la tecnología de antena fractal y lograr que la antena pueda ser eficaz en dos frecuencias diferentes, podemos reducir la frecuencia en momentos de clima extremo y evitar la refracción de onda, de esta manera nuestro enlace sigue siendo efectivo y reducimos al máximo el riesgo de una pérdida del servicio.

#### **IV. Justificación**

En el siglo XXI, las telecomunicaciones representan una tecnología fundamental para el hombre, facilitando vías de comunicación cada vez más rápidas, estables y eficaces a nivel nacional e internacional. Podemos notar la evolución de la tecnología móvil de manera acelerada partiendo de la década de los 80, cuando se empezó a hacer uso de la tecnología de comunicación analógica con la 1G, hasta la actualidad, donde contamos con amplia cobertura a nivel mundial de tecnologías que en su mayoría van desde 3G, 4G o hasta 5G en ciertos países, protocolos y velocidades que hace un par de décadas eran impensables.

Las compañías de comunicaciones móviles, servicios de internet, televisión digital, entre otros múltiples servicios, véase Claro, Movistar, AT&T, Sprint, entre otras, despliegan infraestructuras a grandes escalas, ya sea a nivel metropolitano, rural o nacional, para conseguir abarcar una muy buena cobertura y servicio para sus clientes.

Los radioenlaces punto a punto son un sistema de transmisión de datos con bastante demanda de parte de las empresas, cuyo propósito es brindar servicios de comunicaciones, siendo útiles vías de transporte de datos y servicios como la telefonía, radio, televisión, internet, y un sinnúmero de aplicaciones de acuerdo a las necesidades del usuario.

A pesar de que los sistemas de radio enlaces utilizados en la actualidad son altamente efectivos la mayor parte del tiempo, estos cuentan con algunas limitantes en ciertos momentos debido a factores climatológicos que pueden presentar zonas geográficas puntuales. Esto debido a que las antenas para enlaces punto a punto se fabrican generalmente para transmitir y recibir en rangos de frecuencias cortos, sin dar lugar a hacer muchos cambios, por ejemplo, una antena punto a punto va de los 8 hasta los 8.75GHz, siendo este su margen de TX y RX.

Los límites de los cuales depende este diseño de antenas, podrían conllevar eventualmente a un despliegue de personal, actividades y servicios, debido a fallas típicas que ocurren durante condiciones climatológicas severas.

Dado que el enlace se verá afectado en cuanto a su efectividad, y correrá el riesgo de ser inestable o incluso perderse por completo. Esto implica la caída del servicio para el cliente final, necesidad atención de servicio técnico de forma remota (en caso de tener un sistema de gestión), o hasta de efectuar una visita al sitio por parte de personal técnico de manera urgente.

Al utilizar una antena de tecnología fractal (las cuales son capaces de trabajar en diferentes frecuencias y hasta bandas), combinada con una configuración aplicado a la IDU la cual sea programada para modificar los parámetros del radioenlace, y así cambiar su tipo de modulación y frecuencia automáticamente, durante momentos en los cuales el ambiente se vuelve en contra de los niveles de ganancia de las antenas, dará como resultado la recuperación de la efectividad y confiabilidad en un enlace.

Una vez el ambiente o clima en general mejore a favor de la línea de vista, el sistema detectaría que la ganancia y los parámetros del enlace son sumamente buenos, éste retornaría a la configuración previa.

## **V. Objetivos**

### **5.1. Objetivo general**

Aplicar la tecnología de antena fractal como modelo para enlaces punto a punto, con el fin de mejorar su fiabilidad al trabajar en condiciones ambientales desfavorables.

### **5.2. Objetivos específicos**

1. Conocer el método de modulación dual con antena fractal multibanda.
2. Estudiar fundamentos de geometría fractal y cómo ésta es aplicada a la tecnología en la actualidad.
3. Definir mecanismos de transmisión dual en modulación y frecuencia que describen el funcionamiento teórico del sistema de transmisión dual fractal de alta disponibilidad.
4. Caracterizar las diferentes estructuras de la antena fractal propuesta.

## **VI. Marco teórico**

### **6.1. Antena**

Para recibir o emitir señales radioeléctricas a través de un medio aéreo son necesarios unos dispositivos especiales, denominados antenas, de los que hay muchos tipos y variedades, que dependiendo de sus características constructivas tendrán mayor o menor potencia (ganancia) y precisión (directividad), asimismo soportarán unas bandas u otras de frecuencia.

Una antena es un dispositivo diseñado con el objetivo de emitir y/o recibir ondas electromagnéticas hacia/desde el espacio libre. Una antena transmisora transforma corrientes eléctricas en ondas electromagnéticas, y una receptora realiza la función inversa. En el caso de que las antenas estén conectadas por medio de guía ondas, esta función de transformación se realiza en el propio emisor o receptor. Se utilizan en la radio, televisión, teléfonos móviles, routers inalámbricos, mandos remotos, etc., unas veces visibles y otras ocultas en el interior del propio dispositivo.

El elemento radiante (dipolo, bocina, o cualquier otro) es capaz, al mismo tiempo, de captar energía que, tras ser amplificada convenientemente, llega al receptor y puede ser tratada para su utilización.

Así, pues, en el extremo transmisor de un sistema de radiocomunicaciones, una antena convierte la energía eléctrica que viaja por una línea de transmisión en ondas electromagnéticas que se emiten al espacio.

### **6.2. Fractal**

Un fractal es un objeto geométrico cuya estructura básica, fragmentada o aparentemente irregular, se repite a diferentes escalas. El término fue propuesto por el matemático Benoît Mandelbrot en 1975 y deriva del latín *fractus*, que significa quebrado o fracturado. Muchas estructuras naturales son de tipo fractal. La propiedad matemática clave de un objeto genuinamente fractal es que su dimensión métrica fractal es un número racional mayor a su dimensión topológica.

### **6.3. Radioenlace punto a punto**

Se denomina radioenlace a cualquier interconexión entre los terminales de telecomunicaciones efectuados por ondas electromagnéticas. Además, si los terminales son fijos, el servicio se lo denomina como tal y si algún terminal es móvil, se lo denomina dentro de los servicios de esas características.

Se puede definir al radioenlace del servicio fijo, como sistemas de comunicaciones entre puntos fijos situados sobre la superficie terrestre, que proporcionan una capacidad de información, con características de calidad y disponibilidad determinadas. Típicamente estos enlaces se explotan entre los 800MHz y 42GHz.

### **6.4. Modulación**

La modulación engloba el conjunto de técnicas para transportar información sobre una onda portadora, típicamente una onda sinusoidal. Estas técnicas permiten un mejor aprovechamiento del canal de comunicación lo que posibilita transmitir más información en forma simultánea, protegiéndola de posibles interferencias y ruidos. Básicamente, la modulación consiste en hacer que un parámetro de la onda portadora cambie de valor de acuerdo con las variaciones de la señal moduladora, que es la información que queremos transmitir.

### **6.5. IDU**

InDoor Unit, módulo interno que contiene las funciones de banda base y frecuencia intermedia.

### **6.6. ODU**

OutDoor Unit, módulo externo que dispone de las funciones de radiofrecuencia y que va acoplado a la antena.

### **6.7. Difracción de onda**

La difracción es el fenómeno por el cual una onda que atraviesa un obstáculo por un orificio pequeño se distorsiona y se propaga en todas direcciones detrás de dicho orificio. (Fernández, 2017)

### **6.8. Zona de Fresnel**

Una zona de Fresnel es una de una serie de regiones elipsoidales, de diámetro polar extenso, concéntricas, de espacio entre y alrededor de una antena que transmite y un sistema de antena que recibe. (Alarcón, 2020)

### **6.9. dBm**

La cifra de dBm se corresponde con la medida de los decibelios-milivatio. Se trata de una medida logarítmica de potencia en relación a un milivatio, usada en telecomunicaciones para medir la intensidad de la señal que llega al móvil desde una red celular. (Iván Ramírez, 2020)

### **6.10. TX y RX**

TX y RX son las abreviaciones para transmisión y recepción respectivamente.

### **6.11. Polarización**

El concepto de polarización electromagnética, se refiere a la propiedad que permite que las ondas oscilen con diversas orientaciones. La polarización en telecomunicaciones explica la dirección que toma el campo eléctrico.

### **6.12. Fundamentación teórica**

La aplicación de la geometría fractal en el diseño de una antena ha revelado múltiples beneficios, entre los cuales, para nuestro objetivo destacan la miniaturización de las dimensiones y sus múltiples resonancias de operación. Además, acompañado con la ayuda de un programa de simulación, los diseños buscan favorecer principalmente a la tecnología de los sistemas móviles.

## **Hipótesis**

Es posible diseñar y construir una antena fractal como modelo para su uso en enlaces punto a punto, en vistas de mejorar su fiabilidad y efectividad al trabajar en climas extremos teniendo una cobertura desde los 1.78 hasta los 45GHz con pérdidas de paquetes de datos mínimas.

## **VII. Diseño metodológico**

Se pretende alcanzar los objetivos de la investigación mediante búsqueda de nuevas tecnologías de antenas que están entrando en el mercado de las telecomunicaciones a nivel nacional e internacional, en cuanto al diseño de una antena fractal multidimensional, se demostrará que su uso práctico es posible, que su aplicación en situaciones reales y para solucionar problemas como la dispersión y ambientes de trabajo adversos, donde es necesario un rápido cambio de parámetros en función de adaptarse a condiciones climáticas variables, con el fin de seguir transmitiendo y mantener puntos nodales de vital importancia en producción, aplicado en infraestructuras de telecomunicaciones.

Finalmente se detallará conclusiones, recomendaciones, lecciones aprendidas, la presente metodología de investigación parte de los objetivos propuesto en el desarrollo de la tesis.

### **7.1. Según el objeto**

Investigación aplicada, pues la presente investigación aplica la técnica ya existente que nos van a permitir llegar al cumplimiento de los objetivos.

### **7.2. Según el tipo de datos empleados**

Cuantitativa, pues el estudio se basa en procedimientos teóricos y experimentales ya existentes.

La investigación es del tipo experimental, debido a que se forma a través de la manipulación de variables que nos permiten establecer todos los requisitos mínimos que debe cumplir este sistema.

### **7.3. Fuentes de información**

Por lo mencionado anteriormente se desea obtener una visión más clara de este concepto ayudándonos de una revisión bibliográfica, mediante libros, investigaciones anteriores, artículos, donde se deposita toda la información necesaria para el desarrollo de la tesis. Como fuentes principales para el desarrollo de esta tesis están:

- Sitios Web
- Organismos internacionales de estandarización
- Información y hojas de datos de fabricantes
- Libros, tesis y/o otras publicaciones científicas
- Información libre publicada por operadores/empresas

## **VIII. Desarrollo**

### **8.1. Antena fractal de modulación dual**

El desarrollo de una antena fractal fue inspirado en la necesidad de obtener elementos pasivos sobre medios de recepción y transmisión de datos a través un mismo dispositivo, mejorando las capacidades dinámicas de una antena en condiciones físicas desfavorables, y explotando al máximo la directividad en condiciones extremas.

Los fractales son elementos que se consideran el curso natural del desarrollo de las formas de la naturaleza, estos se encuentran en un sinnúmero de elementos que vemos a diario, y sus cualidades en base a diseño han magnificado su uso por el hombre dado a las ventajas que puede presentar para ciertos campos. Estos factores propicios fueron enfocados en el diseño de antenas, por sus increíbles propiedades eléctricas.

La idea de la utilización en sistemas de punto a punto nace desde la experiencia y registros técnicos, recopilados durante mis trabajos en el campo para proyectos de este tipo, en los que pude comprobar que trabajar con frecuencias de microondas es muy beneficioso, esto debido a su increíble ancho de banda para el envío de grandes tramas de datos a nivel terrestre por medio de zonas inaccesibles.

Parte del problema de los sistemas punto a punto utilizados, es su alta susceptibilidad a los cambios bruscos del clima, he sido capaz de experimentar y analizar, que los parámetros del sistema se alteran considerablemente de manera negativa cuando se presenta lluvia, neblina o elementos climatológicos que cambian el estado de la línea de vista, condiciones que en ciudades como Managua, en donde el clima es generalmente estable y sin presencia de estos extremos, no representan un problema mayor, sin embargo, en ciudades o regiones de climas húmedos, un ejemplo es Juigalpa, las desventajas aumentan en gran proporción.

Es aquí donde la teoría de que el uso de segmentos de fractales es indispensable para ayudar a mejorar la recepción, además de aumentar las capacidades de los terminales para transmisión, según los cambios de modulación y frecuencia.

El arte fractal tiene características tales como iteración, dimensión fractal, auto similitud, complejidad y fluidez en la transición del tono. Esto se refiere a la calidad de las iteraciones sobre figuras sólidas, el nivel de iteraciones sobre componentes discretos creó a mayor profundidad figuras suaves e irregulares con curvas.

Esta investigación presenta el concepto de fractal, funciones y especificaciones comunes, analiza los métodos de generación de antenas fractales y finalmente propone la aplicación de su geometría en diseños de estructura de segmentación de antenas. Los esfuerzos recientes de varios investigadores de todo el mundo para combinar la geometría fractal con la teoría electromagnética, han llevado a una gran cantidad de diseños de antenas nuevos e innovadores.

La investigación en ingeniería de antenas fractales se ha centrado principalmente en dos áreas, la primera trata sobre el análisis y el diseño de elementos de antenas fractales, y la segunda se refiere a la aplicación de conceptos fractales al diseño de matrices de antenas. Los fractales no tienen un tamaño característico, y generalmente están compuestos de muchas copias de sí mismos a diferentes escalas. Estas propiedades únicas se han explotado para desarrollar una nueva clase de diseños de elementos de antena multibanda y/o de tamaño compacto.

Por otro lado, las matrices fractales son un subconjunto de matrices diluidas, y se ha demostrado que poseen diversas propiedades altamente deseables, que incluyen el rendimiento multibanda, bajos niveles de lóbulos laterales y la capacidad de desarrollar algoritmos rápidos de formación de haces basados en la naturaleza recursiva de los fractales.

## **8.2. Antenas convencionales**

La antena es aquel dispositivo que permite la recepción y el envío de ondas electromagnéticas hacia un espacio libre. Por ejemplo, una antena transmisora lo que hace es transformar voltajes en ondas electromagnéticas y la receptora realiza un proceso similar, pero al revés.

La antena es aquel dispositivo que permite la recepción y el envío de ondas electromagnéticas hacia un espacio libre. Por ejemplo, una antena transmisora lo que hace es transformar voltajes en ondas electromagnéticas y la receptora realiza un proceso similar, pero al revés. Existen una variada cantidad de antenas que estarán determinadas por el uso que se les dé. Aquellas que deben expandir lo máximo que puedan la potencia radiada, tal es el caso de las centrales de los teléfonos móviles o de una emisora de radio general o aquellas que canalizan la potencia para no interferir otros servicios. (Jaume Anguera, 2008)

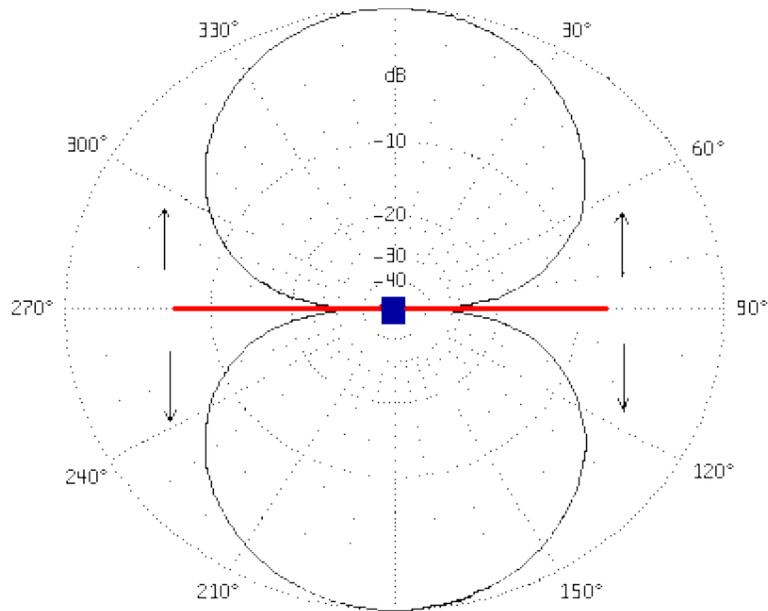
Las antenas se caracterizan eléctricamente por observar algunas condiciones generales como ser el diagrama de radiación, el ancho de banda, la directividad, la ganancia, la polarización y la anchura de haz, entre las más importantes. En tanto, hay tres tipos básicos de antenas, las de hilo, las de apertura y las planas. (Soto, 2009)

Las de hilo son aquellas cuyos elementos radiantes son conductores de hilo que ostentan una parte despreciable respecto a la longitud de onda de trabajo. En el caso de las antenas de apertura, se diferencian de las anteriores porque utilizan superficies o aperturas para dirigir el haz electromagnético, de manera que concentran tanto la emisión como la recepción de su sistema radiante en una sola dirección. Un ejemplo básico de este tipo es la antena parabólica, ampliamente usada en enlaces radio terrestres como en aquellos por satélites. Y finalmente, las planas, cuya particularidad radica en que son de apertura sintética, muy típicas de los radares que ostentan también el tipo de apertura sintética.

Para conseguir tanto una buena transmisión como una buena recepción, será importantísimo el tipo de terreno sobre el cual transitan las ondas electromagnéticas.

Por ejemplo, un terreno en el que prime la tierra húmeda u otro en el que lo que abunda es la tierra seca, los lagos, mares y si se trata de regiones urbanas o rurales, conducirán de diferente manera las ondas electromagnéticas.

**Figura 1 Patrón de radiación**

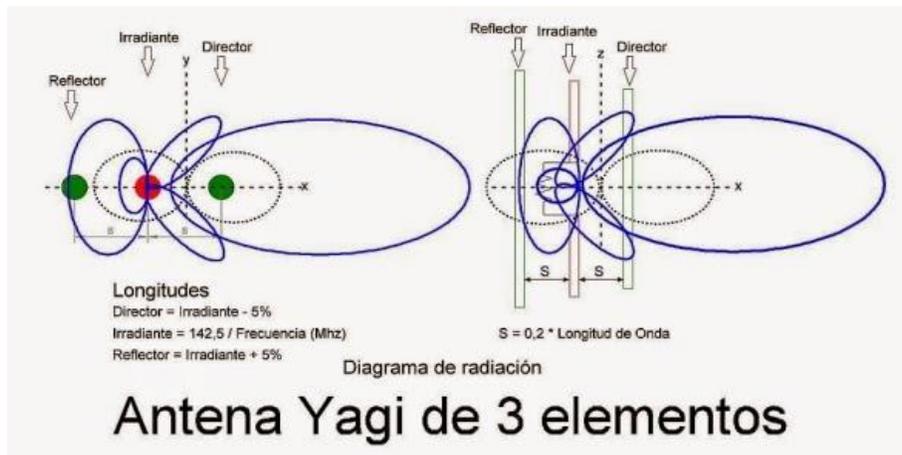


Nota. Se muestra el patrón de radiación de antena dipolo simple, despreciando la presencia de acoplador. (Todo Antenas Ek, 2011)

En un ejemplo muy cercano la utilización de dipolos en un plano horizontal se define como la forma más sencilla de antena, y usando elementos parásitos se concibe la creación de una antena yagi completamente direccional, su modificación en base a su resonancia es muy simple y es posible ajustarla de forma muy rápido sabiendo los cálculos de resonancia de la antena con respecto a su frecuencia de operación de trabajo principal obteniendo así un nivel de ganancia muy bueno con respecto al ruido de fondo llamado SNR, (Signal Noise Ratio, por sus siglas en inglés).

Su homólogo la antena yagi posee un comportamiento muy singular, aportando directividad a las transmisiones, logrando una antena para dirigirse a puntos muy discretos con aperturas amplias o muy reducidas según el número de elementos situados en su formación. (Castillo, Alba Carrascosa, & Cerdu Aroca, 2013)

**Figura 2 Radiación de antena Yagi**



Nota. Patrón de radiación de antena Yagi de tres elementos para la banda de 2 metros, los lóbulos laterales siguen apareciendo, pero con una reducción significativa. (Martin, 2014)

El inconveniente del uso de sistemas tipo Yagi proviene del uso de elementos parásitos, su introducción al circuito resonante causa cierto nivel de pérdidas y fluctuaciones en el nivel de ruido recibido. El uso sería muy ideal ya que es posible hacer antenas muy direccionales, y las dimensiones de los elementos serían del orden de los milímetros, esto se debe a la longitud de onda con las cuales se utilizan en los sistemas de radioenlaces.

Otro serio problema sería su poca relación de ancho de banda lo cual lo hace poco factible para el empleo en este caso, ya que nuestras necesidades eran encontrar una antena que cumplieran con los requisitos eléctricos que abarcaran amplios anchos de bandas en transmisión y recepción, con bajo nivel de ondas reflejadas, esto quiere decir que tiene que ser una antena muy direccional, que rechace algunas bandas de frecuencias no necesarios para su operación y que resuene en varias bandas de operación en el orden de los Gigahercios. (Dominguez, 2010)

Es en este punto donde se decide utilizar antenas fractales, como mencionaba Vicent J, en su libro de la teoría del caos en su intención de hacer ver con mayor relevancia los fractales, el motivo por el cual recaba en dos grandes necesidades básicas, la antena tiene que ser lo suficiente pequeñas y de bajo peso como para ser soportada en un mástil de torre de muy baja resistencia mecánica, sería el suplente de una guía de ondas que va dentro de las antenas punto a punto, esto reduciría su tamaño y aumentaría el factor de recepción sobre diferentes bandas preseleccionadas. (J. Martinez & Paredes, 2017)

### **8.3. Antenas fractales**

La geometría fractal desde hace muchos años ha estado siempre en los escritorios de los matemáticos puros, que en un principio catalogaban estos y muchos otros fenómenos como “monstruos” sin solución. Es ahora después del perfeccionamiento de las computadoras que podemos modelarlos inclusive algunos más complejos y encontrar soluciones útiles, y esto con la capacidad de procesamiento de una computadora normal (casera). Así pues, en los años setenta gracias al matemático polaco Benoît Mandelbrot se retomó el interés por la Geometría Fractal, la capacidad de modelar con ella situaciones complejas de la vida real y sus aplicaciones posteriores. (Valdez Vazquez, 2016)

Una de muchas aplicaciones de la geometría fractal, específicamente en la construcción de Antenas Multibanda que integra algunas de las propiedades básicas de la geometría fractal, siendo las más importantes aquí la: autosimilaridad, y la dimensión Fractal. Estas aplicadas en el diseño “topológico” u arquitectónico logrando así antenas que operan en distintas frecuencias simultáneamente y con patrones de radiación iguales o mejores que los actuales.

Una antena fractal es una antena que utiliza un fractal, diseñado para maximizar la distancia o el perímetro que puede recibir o transmitir, en un volumen o superficie dada. Este perímetro es relacional al nivel de resonancia sobre la frecuencia de emisión o transmisión.

Una antena fractal tiene una respuesta en frecuencia completamente diferente a las antenas tradicionales ya que es capaz de ofrecer excelentes ganancias en diferentes frecuencias de manera simultánea. En la mayoría de las antenas tradicionales existe una frecuencia para la cual ofrecen su máxima ganancia y en el resto de frecuencias la ganancia se ve rápidamente reducida. Por esto las antenas fractales son idóneas para aplicaciones de amplio espectro frecuencia o multibanda. La clave de su aspecto es la repetición de un patrón sobre uno o más espacios.

Por esta razón, las antenas fractales son muy compactas, son multibanda o de espectro expandido y tienen varias utilidades en telefonía móvil y comunicación por microondas, en este caso idóneo para los enlaces punto a puntos que se procedieron a realizar con una antena experimental aquí construida y probada en situaciones reales y ambientes de trabajo más exigentes.

Parte de una reseña de los sistemas que emplean estas tecnologías son los dispositivos inteligentes o internet de las cosas, que necesitan reducir sus dimensiones o mejorar la eficiencia eléctrica en cuanto a consumo.

La mayoría de los celulares y dispositivos portátiles capaces de conectarse a internet o redes móviles de datos poseen estas antenas por un simple motivo, su ancho de banda ultra ancho, los dispositivos inteligentes tiene que recibir en muchas bandas de frecuencias, como radio FM, celular desde los 800 hasta los 2400MHz, redes personales como Bluetooth que operan y comparten frecuencias con tecnologías como WIFI y amplían su ancho de banda agregando nuevos estándares WIFI como 802.11ac en frecuencias de 5GHz. La relevancia de estas antenas es impresionante, y es posible reducir un sistema de antena múltiple y voluminoso en un simple dibujo o trazo fractalizado en algo de unos pocos centímetros o milímetros de longitud.

#### **8.4. Sistemas de comunicación auxiliar punto a punto**

Se denomina radio enlace a cualquier interconexión entre los terminales de telecomunicaciones efectuados por ondas electromagnéticas. Además, si los terminales son fijos, el servicio se lo denomina como tal y si algún terminal es móvil, se lo denomina dentro de los servicios de esas características. Se puede definir al radio enlace del servicio fijo, como sistemas de comunicaciones entre puntos fijos situados sobre la superficie terrestre, que proporcionan una capacidad de información, con características de calidad y disponibilidad determinadas. Típicamente estos enlaces se explotan entre los 800MHz y 42GHz. Los radioenlaces, establecen un concepto de comunicación del tipo dúplex, de donde se deben transmitir dos portadoras moduladas: una para la Transmisión y otra para la recepción. Al par de frecuencia asignada para la transmisión y recepción de las señales, se lo denomina radio canal.

Los enlaces se hacen básicamente entre puntos visibles, es decir, puntos altos sobre la superficie de una zona. Para un correcto funcionamiento es necesario que los recorridos entre enlaces tengan una altura libre adecuada para la propagación en toda época del año, tomando en cuenta las variaciones de las condiciones atmosféricas de la región.

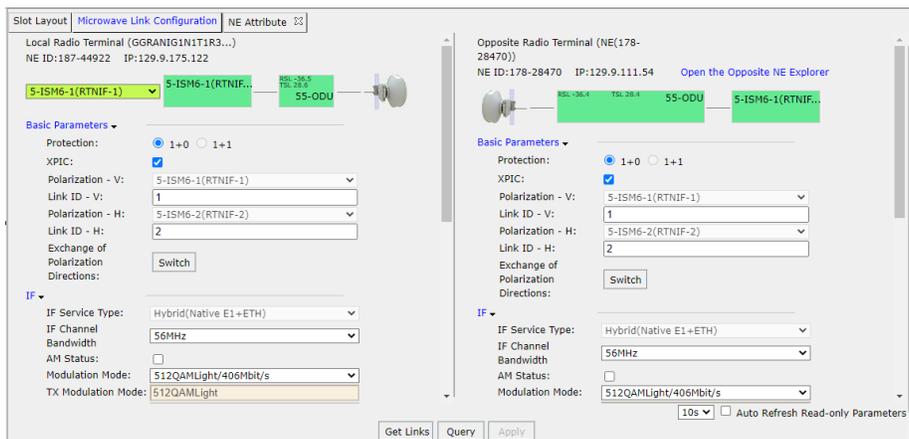
Además de las estaciones repetidoras, existen las estaciones nodales donde se demodula la señal y de la baja a banda base y en ocasiones se extraen o se insertan canales. Al tramo terminal estación nodal se lo denomina sección de conmutación y es una entidad de control, protección y supervisión.

Los enlaces son estructuralmente sistemas en serie, de tal manera que si uno falla se corta todo el enlace. Por ello se le exige una alta disponibilidad y confiabilidad utilizándose la redundancia de equipos frente a las averías y técnicas de diversidad frente a los desvanecimientos. Esto también implica que es necesario sistemas de supervisión y control que realice automáticamente la aplicación de estas técnicas.

Como además las estaciones funcionan en forma no atendida, para la ejecución de la supervisión y conmutación al equipo de reserva, junto con la información útil se transmiten señales auxiliares de telemando y tele supervisión.

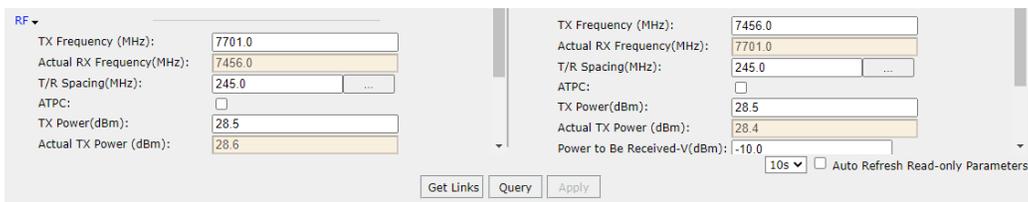
La importancia de mantener el enlace estable es de alta prioridad, por lo tanto, se expone el siguiente caso. En un sistema de punto a punto se toman varios factores, distancian de enlace, frecuencia, modulación y densidad de modulación, expondremos el típico caso de un enlace en 16GHz a una distancia lineal de 27km, en este caso usando QAM512, una modelación muy densa para un tráfico de datos extremadamente grande, con esto hablamos de capacidades de transmisión de 800Mbps.

**Figura 3 Parámetros de radioenlace punto a punto.**



Nota. Foto captura de los parámetros asignados para un radioenlace de la marca Huawei en polarización vertical. Fuente propia.

**Figura 4 Detalle de configuraciones para radioenlace.**



Nota. Foto captura de la frecuencia y potencia asignada para la implementación de un radioenlace para Claro Nicaragua, en la ciudad de Granada. Fuente propia.

Como se puede apreciar en las imágenes se tiene un ejemplo de un radioenlace donde las condiciones climáticas son excepcionales y su transmisión es exitosa, no hay pérdidas considerables y se podría decir que está en su máxima eficiencia. El problema recae cuando no existen las condiciones propicias para mantener estable ese enlace, por ejemplo, en temporadas de lluvia por efecto de la reflexión de las ondas electromagnéticas sobre las gotas de agua, se pierde intensidad ya que la energía es absorbida por la misma o dispersada creando puntos multi-trayectos.

Por ese motivo se tiene que tener muy en cuenta los siguientes aspectos:

El clima y el terreno son los mayores factores a considerar antes de instalar un sistema de microondas ya podría haber otros elementos que incrementen las pérdidas de un radioenlace dadas por:

- Espacio libre
- Difracción
- Reflexión
- Refracción
- Absorción
- Desvanecimientos
- Desajustes de ángulos
- Lluvias
- Gases y vapores
- Difracción por zonas de Fresnel

La antena utilizada generalmente en los enlaces de radio por microondas es del tipo parabólico. El tamaño típico es de un diámetro de unos 3m. La antena es fijada rígidamente, y transmite un haz estrecho que debe estar perfectamente enfocado hacia la antena receptora.

Estas antenas de microondas se deben ubicar a una altura considerable sobre el nivel del suelo, con el fin de conseguir mayores separaciones posibles entre ellas y poder superar posibles obstáculos. Sin obstáculos intermedios la distancia máxima entre antenas es de aproximadamente 150km, con antenas repetidoras, claro está que esta distancia se puede extender, si se aprovecha la característica de curvatura de la tierra, por medio de la cual las microondas se desvían o refractan en la atmósfera terrestre.

Por ejemplo, dos antenas de microondas situadas a una altura de 100m pueden separarse una distancia total de 82km, esto se da bajo ciertas condiciones, como terreno y topografía. Es por ello que esta distancia puede variar de acuerdo a las condiciones que se manejen.

**Figura 5 Antena e idus de radioenlace XPIC en Masaya.**



Nota. Foto tomada durante mis trabajos en campo correspondiente a proyectos de radioenlaces de alta disponibilidad para Claro Nicaragua, la antena se encuentra a 30 metros de altura, y se dirige hacia una torre ubicada en el centro de Granada Nicaragua. Nótese el tamaño del receptor parabólico para concentrar la mayor parte de la emisión de microondas en un punto focal, aumentando así su ganancia. Fuente propia.

La distancia cubierta por enlaces microondas puede ser incrementada por el uso de repetidoras, las cuales amplifican y redireccionan la señal, es importante destacar que los obstáculos de la señal pueden ser salvados a través de reflectores pasivos.

La señal de microondas transmitidas es distorsionada y atenuada mientras viaja desde el transmisor hasta el receptor, estas atenuaciones y distorsiones son causadas por una pérdida de potencia dependiente a la distancia, reflexión y refracción debido a obstáculos y superficies reflectoras, y a pérdidas atmosféricas.

El reflector parabólico de la antena se construye de fibra de vidrio o aluminio. El caso de fibra de vidrio se construye con un laminado reforzado con resina poliéster; la superficie se metaliza con zinc.

La eficiencia en una antena se ve reducida la ganancia por las siguientes causas:

- La potencia incidente es irradiada en todas las direcciones por el borde de la parábola, efecto de bordes con ángulos no eficientes (rendimiento 90%).
- El iluminador tiene un diagrama de emisión que abarca más que la superficie de la antena, la emisión de microondas supera las dimensiones de la antena como tal y se pierde parte de la energía emitida por no ser concentrada en el punto focal necesario para su alta ganancia (rendimiento de 70%).
- El iluminador absorbe parte de la energía reflejada en la parábola porque obstruye el camino, parte de los componentes pasivos como guías de ondas se interponen en el camino y crean ligeras zonas de sombra (rendimiento de 95%).
- La rugosidad del reflector produce una diferencia de fase en las ondas reflejadas (rendimiento de 93%).
- Se genera una diferencia de fase cuando el iluminador no está exactamente en el foco de la parábola (rendimiento de 98%).
- Como el reflector no es un conductor ideal parte de la energía penetra en el material y es absorbida, es necesario usar materiales más densos (rendimiento 99%).

Teniendo en cuenta las posibles problemáticas de usar radioenlaces con antenas predefinidas con un ancho de banda limitados en ciertas ocasiones no se da servicio a comunidades que lo necesitan con urgencia, no obstante, las antenas fractales solucionan este inconveniente.

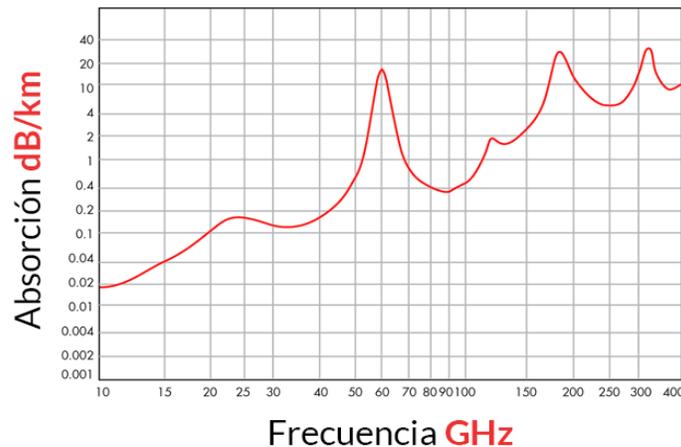
En el caso hipotético de poseer condiciones desfavorables es posible llevar a cabo un enlace de microondas donde el enlace se adapte a las condiciones climáticas, esto se logra disminuyendo las frecuencias de transmisión que pueden ser combinadas con otro tipo de modulación.

### **8.5. Reducción de frecuencias en operación**

La reducción de frecuencia de trabajo nos permitirá mejorar la penetración en situaciones climáticas extremas, en caso de una lluvia extrema es preferible bajar las frecuencias hasta una que no entre en resonancia con las moléculas de agua, el efecto resonante del agua se debe a que las ondas oscilantes de microondas producen un efecto de vibración en las moléculas de agua, transformando así la energía resultante se transforma en energía de calor por vibración de las mismas moléculas, eso significa en atenuación de hasta -1.3dB en enlaces de 6GHz, una atenuación aceptable, pero para frecuencias más elevadas como 14 hasta 48GHz la atenuación podría ser tan extrema que se pierda el enlace o se perciban atenuaciones de -30dB, un resultado no favorable para un enlace de alta prioridad.

Como aspecto curioso, la absorción no depende de la distancia a la que nos encontramos de la antena emisora, sino que se mantiene más o menos estable si el medio es homogéneo. Si este cambia en una determinada zona, por motivo de niebla o lluvia, la absorción también lo hará, pero sólo en esa zona. Se puede apreciar la cantidad de absorción por frecuencia en la siguiente gráfica:

**Figura 6 Índice de absorción de energía.**



Nota. Podemos apreciar el índice de absorción de energía electromagnética, nótese una fuerte absorción en frecuencias superiores a 10GHz, frecuencias donde operan enlaces con altas cantidades de densidad de tráfico. (GSP 216, 2019)

Es despreciable en frecuencias inferiores a 10GHz, frecuencias idóneas para restablecer comunicaciones con densidades de tráfico menores, pero sin suspender comunicaciones, importante para las condiciones internas de Nicaragua, de altas lluvias y nubosidad.

- Tiene un pico importante en los 60GHz con casi 20dB/km, una absorción excesiva a costo de transportar grandes flujos de datos.
- Tiene sendos picos importantes en los 185GHz y 325GHz con casi 30dB/km.

Como se puede apreciar, las frecuencias donde la absorción comienza a ser importante corresponden a ondas milimétricas, en la banda EHF 30-300GHz, por tanto, no afecta a las frecuencias de los radioenlaces que trabajan con microondas en las bandas UHF y VHF. Estas frecuencias son importantes ya que con ellas prepararemos el modelo de recuperación de un enlace donde no podría operar con frecuencias elevadas.

El cambio de las frecuencias es posible gracias a los controles computarizados que están implícitas dentro de las Unidades Internas (IDUs), estas tienen la capacidad

de operar en un amplio rango de frecuencias, y ciertas modulaciones con sus respectivas densidades de transmisión según sea el caso. Para poder soportar estos cambios se requiere una antena multi frecuencia de tamaño reducido, aquí la fractalización de los segmentos de las antenas nos brindan la mejor propuesta ya que físicamente las propiedades de los fractales se aprovechan en la construcción de antenas que pueden obtener anchos de banda de 10 a 40% de la frecuencia central superiores a las antenas clásicas, que van de 10% a 20%, patrones de radiación estables y gran número de bandas determinado por el número de iteraciones del fractal.

Una antena fractal tiene una respuesta en frecuencia completamente diferente a las antenas tradicionales ya que es capaz de ofrecer excelentes ganancias en diferentes frecuencias de manera simultánea. En la mayoría de las antenas tradicionales existe una frecuencia para la cual ofrecen su máxima ganancia y en el resto de frecuencias la ganancia se ve rápidamente reducida. Por esto las antenas fractales son idóneas para aplicaciones de amplio espectro de frecuencias y sus respectivos anchos de bandas.

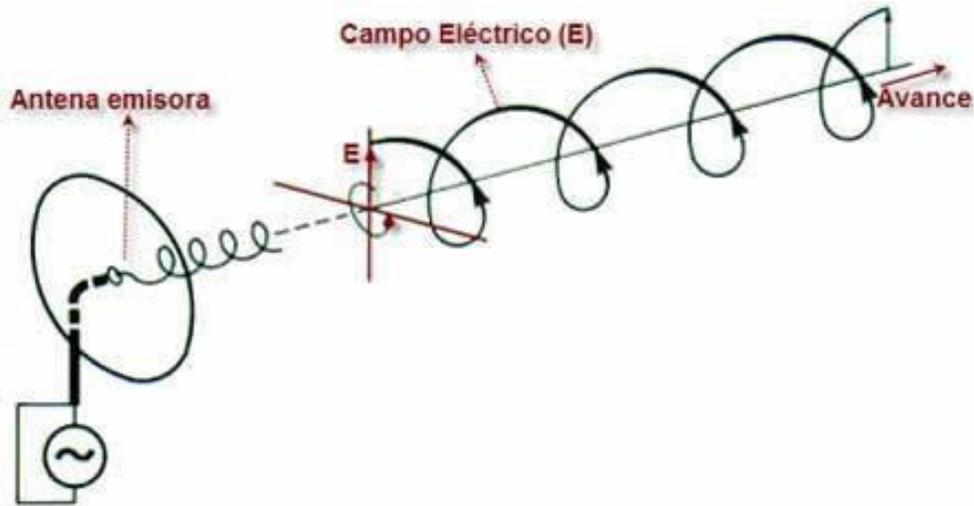
#### **8.6. Polaridad variable e híbrida**

El cambio de las frecuencias juega un papel relevante para mantener operativo un enlace, pero es prioridad tener mayor control sobre los métodos de emisión, una de esto es el cambio de polaridad, donde se juega con la posición del campo electromagnético emitido de un punto hacia otro.

En sí, la polarización electromagnética es una propiedad de las ondas que pueden oscilar con más de una orientación. Esto se refiere normalmente a las llamadas ondas transversales, en particular se suele hablar de las ondas electromagnéticas, aunque también se puede dar en ondas mecánicas transversales.

Por otra parte, las ondas de sonido en un gas o líquido son ondas exclusivamente longitudinales en la que la oscilación va siempre en la dirección de la onda; por lo que no se habla de polarización en este tipo de ondas.

**Figura 7 Polarización de señal**



Nota. Polarización de una señal emitida por un enlace teórico de microondas, la modulación o frecuencia es despreciable en términos de polarización. (Docplayer, 2018)

Una onda electromagnética como la luz consiste en un campo eléctrico oscilante acoplado y un campo magnético siempre perpendicular, por convención, la polarización de las ondas electromagnéticas se refiere a la dirección del campo eléctrico. En la polarización lineal, los campos oscilan en una sola dirección. En la polarización circular o elíptica, los campos giran a una velocidad constante en un plano a medida que la onda viaja.

La rotación puede tener dos direcciones posibles; si los campos giran en un sentido de la mano derecha con respecto a la dirección del desplazamiento de la onda, se denomina polarización circular derecha, mientras que, si los campos giran en un sentido de la mano izquierda, se denomina polarización circular izquierda, la polarización circular es solo para efectos de comunicación satelital, así que no se enfocó en ella durante la realización de esta investigación.

Es muy importante recalcar que la polarización de las señales influye mucho en como un radioenlace atenúa su señal dependiendo de ciertos materiales o climas que las absorben, algunos materiales absorben selectivamente una de las componentes transversales del campo eléctrico de una onda.

Todas las antenas transmisoras y receptoras de radiofrecuencia usan la polarización electromagnética, especialmente en las comunicaciones punto a punto aquí enfocado. La mayoría de las antenas irradian ondas polarizadas, ya sea con polarización horizontal, vertical o circular.

La polarización vertical es usada más frecuentemente cuando se desea irradiar una señal de radio en todas las direcciones como en las bases de telefonía móvil o las ondas de radio AM. Sin embargo, no siempre se utiliza la polarización vertical. La televisión normalmente usa la polarización horizontal. La alternancia entre polarización vertical y horizontal se utiliza en la comunicación por satélite (incluyendo satélites de televisión) para reducir la interferencia entre señales que tienen un mismo rango de frecuencias, teniendo la separación reducida angular en cuenta entre los satélites.

Los cambios de polarización son teóricamente imprácticos con la implementación de las antenas diseñadas comercialmente, ya que durante el armado de las mismas antenas se tiene que configurar mecánicamente en tierra la polaridad de transmisión de las mismas antes de su instalación en la altura especificada por el enlace, durante el cambio de las polarizaciones de las transmisiones sería una pérdida de eficiencia intentar cambiar la polaridad, y sobre todo, que se necesitaría un equipo que esté disponible en todo momento para acceder a los sitios de transmisión de datos para hacer los cambios correspondientes.

Por lo tanto se diseñó el sistema modular de cambio dinámico, esto significa que explotando las capacidades de la fractalización dentro de las componentes de una antena, es posible hacer cambios de polaridad, tanto como en recepción como en transmisión de datos en tiempo real, o sea, para las peores condiciones climáticas se tornaría a polaridad vertical y en condiciones excepcionales a polaridades horizontales, los segmentos de menor dimensión recibirían las longitudes de ondas más cortas (las bandas milimétricas) y los segmentos más largos tomarían las longitudes de ondas más largas, recibirían frecuencias más bajas por el orden de los centímetros.

## **8.7. Cambios auxiliares de modulación**

Las modulaciones son muy importantes durante la transmisión de datos, ya que estas se encargan de mantener intacta la información transmitida durante el proceso de emisión de una señal portadora. Parte relevante de esto es que ciertas modulaciones permiten un mayor flujo de datos según la densidad de sus componentes espectrales expresadas como puntos de diagramas compuestos.

Un ejemplo de esto es la modulación QAM, la cual resulta ser excelente para el transporte de grandes flujos de datos sobre unidad de tiempo, este modelo permite altas densidades de transmisión desde los 54Mbps hasta 2Gbps, combinado con su ancho de banda extenso, permite a enlaces de kilómetros de separación tener niveles ideales de precisión para servicios como telefonía, internet o televisión.

El modelo QAM se basa en una técnica de modulación digital avanzada que hace lectura de datos midiendo la amplitud y fase de la onda, para finalmente convertirla en valores binarios.

Los sistemas de comunicación diseñados para alcanzar niveles muy altos de eficiencia espectral generalmente emplean constelaciones QAM muy densas. Por ejemplo, los dispositivos Ethernet de línea eléctrica Homeplug AV2 500Mbit/s actuales usan 1024-QAM y 4096-QAM, así como dispositivos futuros que usan el estándar ITU-T G.hn para la conexión en red a través del cableado doméstico existente (cable coaxial, teléfono líneas y líneas eléctricas); 4096-QAM proporciona 12 bits/símbolo. Otro ejemplo es la tecnología ADSL para pares trenzados de cobre, cuyo tamaño de constelación sube a 32768-QAM (en la terminología de ADSL esto se conoce como carga de bits, o bit por tono, 32768-QAM es equivalente a 15 bits por tono).

Los sistemas de retorno de microondas de ultra alta capacidad también utilizan 1024-QAM. Con 1024-QAM, codificación y modulación adaptativa (ACM) y XPIC, los proveedores pueden obtener capacidad de gigabits en un solo canal de 56 MHz.

La señal modulada en QAM está compuesta por la suma lineal de dos señales previamente moduladas en DBL-PS (Doble Banda Lateral - con Portadora Suprimida).

Se asocian a esta tecnología aplicaciones tales como:

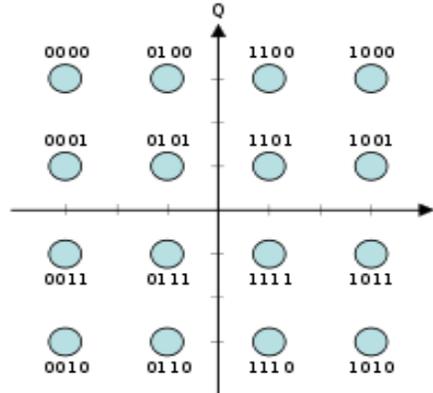
- Módems para velocidades superiores a los 2400bps por ejemplo V.22bis y V.32.
- Sistemas de transmisión de televisión, microondas, satélite (datos a alta velocidad por canales con ancho de banda restringido).
- Es la base de la modulación TCM (Trellis Coded Modulation), que consigue velocidades de transmisión muy elevadas combinando la modulación con la codificación de canal.
- ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), logra obtener velocidades de hasta 9Mbps, modulando en QAM diferentes portadoras.

En QAM, los puntos de constelación generalmente están dispuestos en una cuadrícula con el mismo espaciado vertical y horizontal, aunque son posibles otras configuraciones (por ejemplo, Cross-QAM).

Al pasar a una constelación de orden superior, es posible transmitir más bits por símbolo. Sin embargo, si la energía media de la constelación es la misma (haciendo una comparación equitativa), los puntos deben estar más juntos y, por lo tanto, ser más susceptibles al ruido y a la corrupción; esto da como resultado una tasa de error de bit más alta y, por lo tanto, QAM de orden superior puede entregar más datos de manera menos confiable que su modelo de orden inferior, para una energía de constelación media constante.

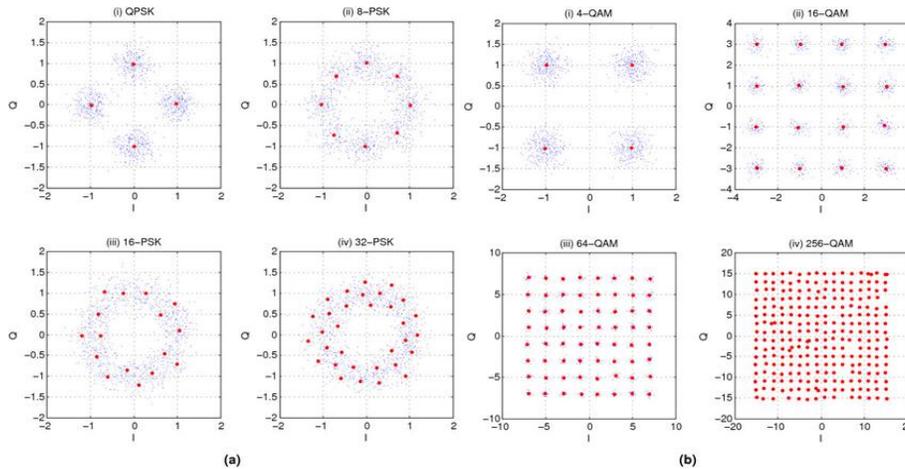
Si se requieren velocidades de datos más allá de las ofrecidas por QPSK, generalmente se opta por cambiar a QAM, ya que logra una mayor distancia entre los puntos adyacentes en el plano I-Q al distribuir los puntos de manera más uniforme.

**Figura 8 Constelación de QAM**



Nota. Al pasar por una constelación QAM de orden superior (velocidad y tráfico de datos más alto) en entornos hostiles de aplicaciones para RF/microondas, como en radio fusión o telecomunicaciones, la interferencia multitrayecto generalmente aumenta. (Electronic-notes, 2018)

**Figura 9 Extensión de puntos de constelación**



Nota. Hay una extensión de los puntos en la constelación, lo que disminuye la separación entre estados adyacentes, esto dificulta que el receptor decodifique la señal adecuadamente. En otras palabras, hay una inmunidad al ruido reducida. (Gaussian Waves, 2012)

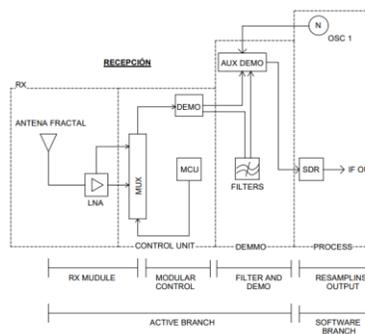
Existen varias mediciones de parámetros de prueba que ayudan a determinar un modo QAM óptimo para un entorno operativo específico, los siguientes tres son los más significativos:

- Relación portadora/interferencia
- Relación portadora/ruido
- Relación umbral/ruido

Como se puede notar las ventajas de QAM sobre las transmisiones son fascinantes, pero por su alta densidad de tráfico es posible que haya problemas muy serios en la dispersión de las constelaciones de puntos, obviamente si se necesitaran altas densidades de transmisión se buscarían aumentar el nivel de constelación sobre la modulación existente, podría resultar en un problema por lluvia, así que se deberá compensar la relación señal con su capacidad.

Para compensar una posible pérdida de señal, se debe de tener una modulación auxiliar de menor densidad, la propuesta para la modulación auxiliar sería QPSK, como parte del desarrollo de usar doble modulación se propone el siguiente esquema de bloques:

**Figura 10 Esquema de bloques**



Nota. Nótese que el esquema presenta 4 módulos diferenciales, nombrados como RX Module (recepción), Modular Control (control de módulos), filtros y procesamiento de salida, la salida se debe a la abstracción del proceso de software que realizan las IDUs (unidades de transmisión). Fuente propia.

El control central de MCU tiene que decidir velozmente los cambios que se realizarán en frecuencia, modulación y/o polarización si es posible, estos cambios se verán reflejados en un espectrograma y serán transmitidos vía coaxial hacia la antena fractal, la cual deberá presentar la menor cantidad de energía reflejada hacia el transmisor.

El nivel de energía reflejada será puntual y ciertas bandas no serán admitidas, por lo tanto las antenas fractales se tendrán que diseñar según el patrón de radiación y las bandas necesarias para cubrir la frecuencia de operaciones estándar y la frecuencia de operación auxiliar.

### **8.8. Modulación QPSK**

Este esquema de modulación es conocido también como Quaternary PSK (PSK Cuaternaria), Quadriphase PSK (PSK Cuadrafásica) o 4-QAM, pese a las diferencias existentes entre QAM y QPSK. Esta modulación digital es representada en el diagrama de constelación por cuatro puntos equidistantes del origen de coordenadas. Con cuatro fases, QPSK puede codificar dos bits por cada símbolo. La asignación de bits a cada símbolo suele hacerse mediante el código Gray, que consiste en que, entre dos símbolos adyacentes, los símbolos solo se diferencian en 1 bit, con lo que se logra minimizar la tasa de bits erróneos. (Pascual, 2015)

El análisis matemático muestra que un sistema QPSK puede usarse tanto para duplicar la tasa de datos, en comparación con otro BPSK mientras se mantiene el ancho de banda de la señal, o para mantener la tasas de datos de BPSK sin dividir a la mitad el ancho de banda. En este último caso, la tasa de errores de bit (BER) es exactamente igual para ambas modulaciones, lo que puede originar confusiones al describirlas y considerarlas.

Como ocurre con BPSK, hay problemas de ambigüedad de fase en el extremo receptor, y a menudo se utiliza QPSK codificado en forma diferencial en la práctica.

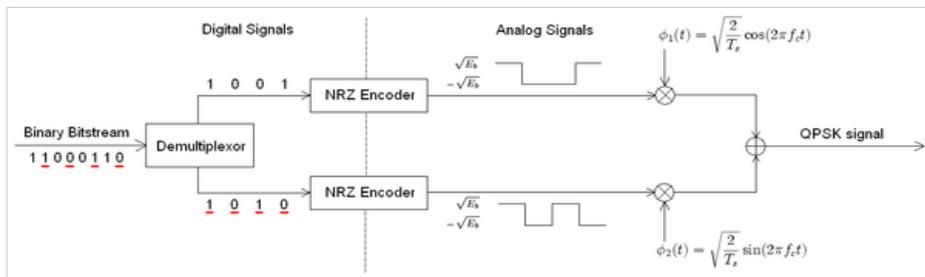
## 8.9. Implementación de QPSK

La implementación de QPSK es más general que la de BPSK y también indica la aplicación de modulación PSK de orden superior.

Comparando las funciones de base obtenidas con las de BPSK, se muestra claramente que QPSK se puede ver como dos señales BPSK independientes. Hay que tener en cuenta que para los puntos de espacio de señal para BPSK no es necesario dividir el símbolo (bit) de energía a través de los dos portadores en el esquema mostrado en el diagrama de constelación BPSK.

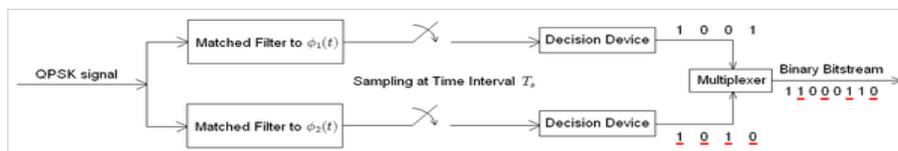
Los sistemas QPSK se pueden implementar en diversas formas. Las siguientes gráficas muestran los principales componentes del transmisor y del receptor:

**Figura 11 Esquema QPSK analógico digital**



Nota. En la figura se muestran dos codificadores (NRZ Encoder) que se pueden colocar antes de la entrada del flujo de datos binario, aunque han sido colocados después para ilustrar la diferencia conceptual entre señales digitales y analógicas involucradas en la modulación digital. La implementación es semejante al modulador de QAM digital. (Liu Xueden, 2006)

**Figura 12 Demodulador QPSK**



Nota. Cada dispositivo de detección usa un valor umbral de referencia para determinar si se ha detectado un bit. (Liu Xueden, 2006)

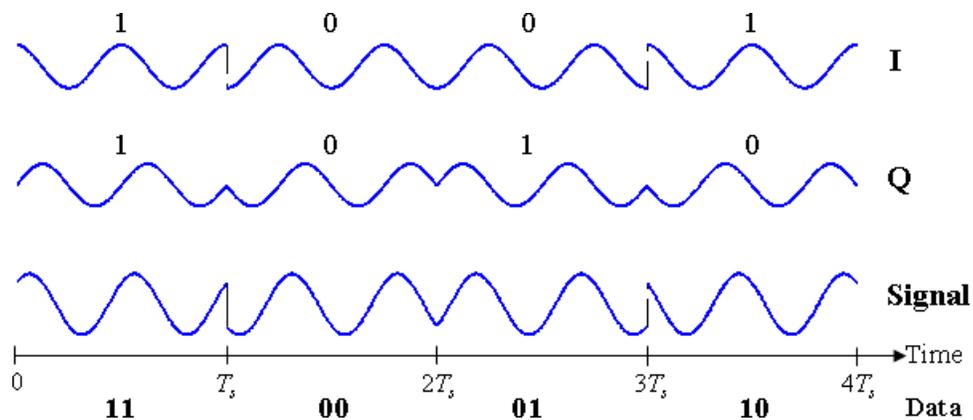
### 8.10. Tasa de error de bit

Aunque QPSK puede ser vista como una modulación cuaternaria, es más fácil verla como dos portadoras en cuadratura moduladas de forma independiente. Con esta interpretación, los bits pares o impares se utilizan para modular la componente en fase de la portadora, mientras que los demás bits se utilizan para modular la componente en cuadratura de fase de la portadora. BPSK se utiliza en ambas portadoras y pueden ser independientemente demoduladas.

### 8.11. QPSK en el dominio temporal

Para comprender el funcionamiento de QPSK en el dominio temporal, es necesario analizar lo que ocurre cuando las portadoras en cuadratura son moduladas con un flujo de datos que contiene todas las señales posibles. En el siguiente diagrama, se pueden observar las señales I y Q que se obtienen a la salida de cada modulador y la señal total a la salida del sumador lineal.

**Figura 13** *Análisis de señal en desfase*

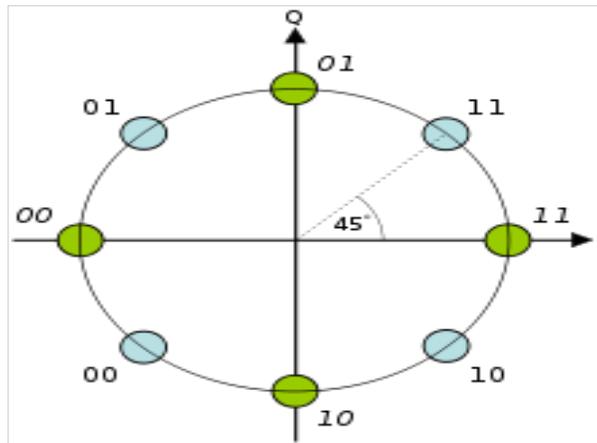


(Liu Xueden, 2006)

## 8.12. OQPSK (QPSK con corrimiento)

Es una variante de QPSK, llamada QPSK con corrimiento, QPSK compensada, QPSK desplazada y, a veces, SQPSK (sigla de Staggered quadrature phase-shift keying, Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura escalonada) en la cual las formas de onda I y Q se desplazan entre sí en la mitad de un tiempo de bit. (Llacer, 2004)

Figura 14 OQPSK



Nota. Diagrama de doble constelación para  $\pi/4$ -QPSK que muestra las dos constelaciones con codificación Gray girada en  $45^\circ$  una con respecto a la otra. (Esacademic, 2020)

Esta variante de QPSK utiliza dos constelaciones idénticas que son giradas en  $45^\circ$  o  $\pi/4$  (de ahí su nombre) una con respecto a la otra. Por lo general, cualquiera de los símbolos pares o impares se utilizan para seleccionar los puntos de una de las constelaciones y los otros símbolos seleccionan puntos de la otra. Esto también reduce los desfases hasta un máximo de  $135^\circ$ .

Una propiedad que este esquema de modulación posee, es que si la señal modulada se representa en el plano complejo, esta no pasa por el origen. Esto reduce el rango dinámico de las fluctuaciones en la señal, lo que es deseable cuando se producen las señales de comunicaciones. Por otra parte, este tipo de modulación se presta a una demodulación fácil y ha sido adoptado para su uso en, por ejemplo, la técnica TDMA de redes de telefonía celular.

Abajo se muestra el diagrama temporal para este esquema de modulación. La construcción de la señal es la misma que en la QPSK tradicional. Los símbolos sucesivos son tomados de las dos constelaciones que forman este esquema. Así, el primer símbolo (marcado como 1,1) es tomado de la constelación coloreada de azul y el segundo símbolo (0,0) proviene de la constelación en verde. Puede notarse que las magnitudes de las ondas I y Q cambian mientras se hacen cambios de símbolos entre constelaciones, pero la magnitud de la señal total permanece constante.

### **8.13. Candidato secundario para la modulación auxiliar**

Un candidato a segunda modulación sería una pequeña evolución sobre QPSK, y se le conoce como PSK de orden superior, donde la codificación de la información se incrementa según el orden establecido por la modulación.

Cualquier número de fases puede ser utilizado para construir una constelación de modulación PSK, pero 8-PSK, es por lo general la constelación de orden más alto PSK implementada. Con más de 8 fases, la tasa de error es demasiado alta y existen mejores modulaciones disponibles, aunque más complejas, tales como la modulación de amplitud en cuadratura (QAM). Aunque cualquier número de fases puede ser utilizado, el hecho de que la constelación normalmente deba tratar con datos binarios significa que el número de símbolos es normalmente una potencia de 2, lo cual permite un número igual de bits por símbolo.

### **8.14. Geometría fractal aplicada a antenas**

Una de muchas aplicaciones de la geometría fractal, específicamente en la construcción de antenas multibanda, es que integra algunas de las propiedades básicas de su concepto, siendo las más importantes aquí la autosimilitud, y la dimensión Fractal. Estas aplicadas en el diseño topológico u arquitectónico logrando así antenas que operan en distintas frecuencias simultáneamente y con patrones de radiación iguales, o mejores que los actuales. (Garrido, 2015)

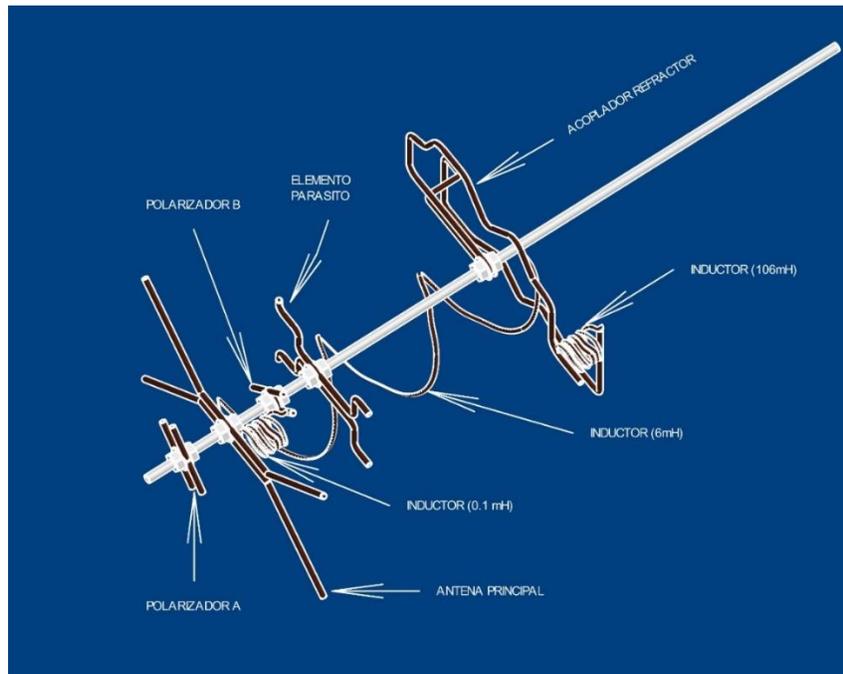
Una antena fractal es una antena basada en la geometría descrita por Benoît Mandelbrot, diseñada para maximizar la distancia o el perímetro que puede recibir o transmitir, en un volumen o superficie dada. Este perímetro es relacional al nivel de resonancia sobre la frecuencia de emisión o transmisión.

Por esta razón, las antenas fractales son muy compactas, son multibanda o de espectro expandido y tienen varias utilidades en telefonía móvil y comunicación por microondas, en este caso idóneo para los enlaces punto a puntos que se procedieron a realizar con una antena experimental aquí construida y probada en situaciones reales y ambientes de trabajo más exigentes.

Parte de una reseña de los sistemas que emplean estas tecnologías son los dispositivos inteligentes o internet de las cosas, que necesitan reducir sus dimensiones o mejorar la eficiencia eléctrica en cuanto a consumo.

La mayoría de los celulares y dispositivos portátiles capaces de conectarse a internet o redes móviles de datos poseen estas antenas por un simple motivo, su ancho de banda ultra ancho, los dispositivos inteligentes tiene que recibir en muchas bandas de frecuencias, como radio FM, celular desde los 800 hasta los 2400MHz, redes personales como Bluetooth que operan y comparten frecuencias con tecnologías como WIFI y amplían su ancho de banda agregando nuevos estándares WIFI como 802.11ac en frecuencias de 5GHz. La relevancia de estas antenas es impresionante, y es posible reducir un sistema de antena múltiple y voluminoso en un simple dibujo o trazo fractalizado en algo de unos pocos centímetros o milímetros de longitud. (Minguez, 2020)

**Figura 15 Plano de antena fractal elaborada**

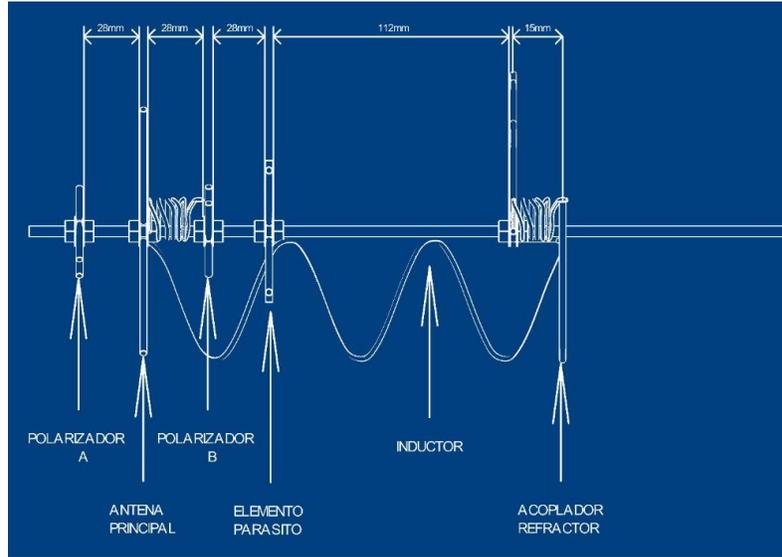


Nota. Podemos apreciar el plano de construcción de la antena fractal multidimensional direccional donde se denotan, los elementos directivos y de resonancia parasita entre los segmentos de polarización. Fuente propia.

Los cinco elementos representan un fractal que se expresa en un tercer plano dimensional, los primeros 3 segmentos los nombre como los planos de polarización, donde el elemento 1 y 2 controlan las polarizaciones horizontales y verticales.

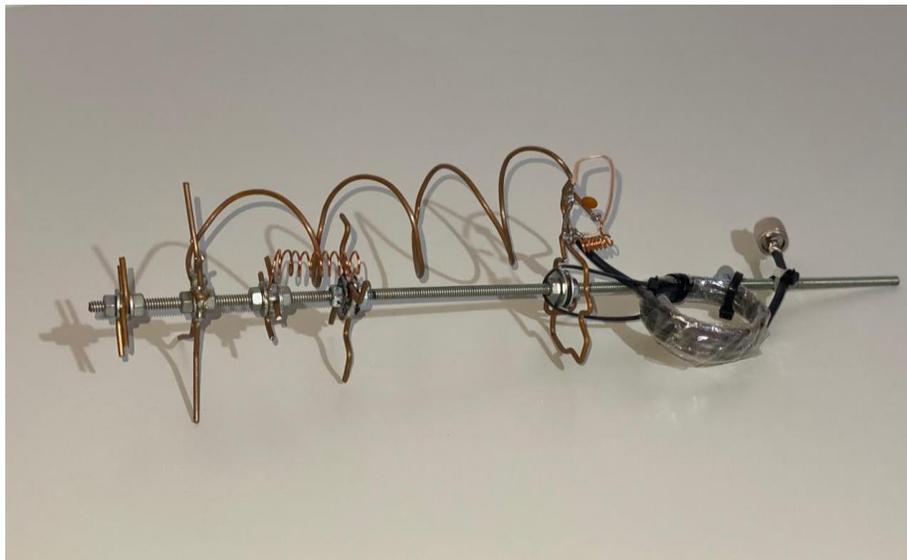
Su longitud permite la recepción entera de las bandas de 70cm hasta los 90cm, es posible recepcionar las bandas de VHF de radiodifusión en FM, se recomienda utilizar discriminadores de bandas, no obstante, se realizó una prueba de la direccionalidad enfocando hacia el crucero y obtenemos una recepción increíble, esto nos sirve como una base de muestra para ver emisiones en VHF, y tener un dato de control general.

**Figura 16 Vista lateral de antena fractal**



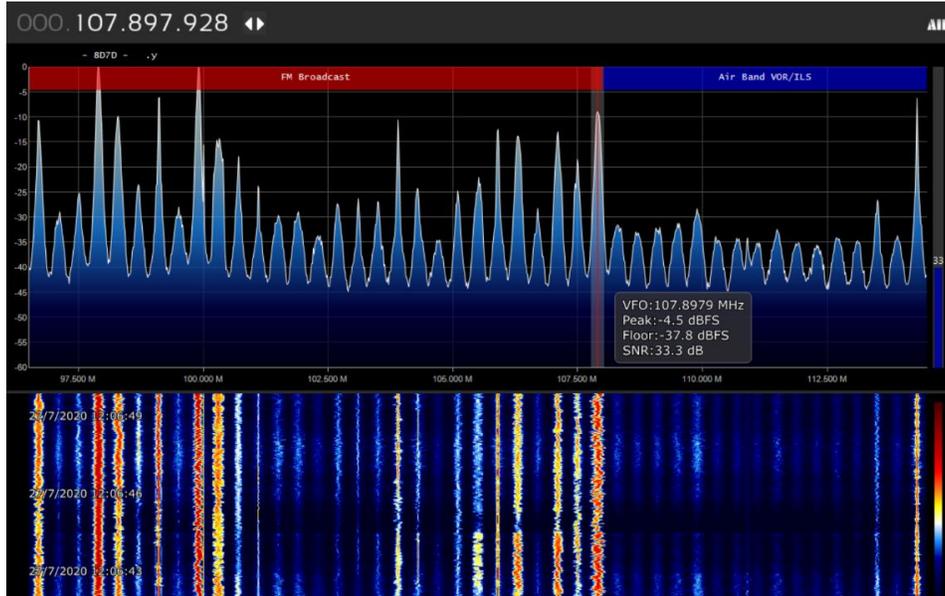
Nota. Se denotan las componentes y sus distintas separaciones entre los segmentos de polarización de señal y la polarización de impedancia final, las bobinas están representadas con su número de espiras correspondiente. Fuente propia.

**Figura 17 Antena fractal diseñada**



Nota. Resultado final y construcción del prototipo de antena fractal con sus elementos directivos y de adaptación de impedancia final, su conector es un PL259 para un cable coaxial RG-58 de 50Ohm. Fuente propia.

**Figura 18** *Análisis de espectro radioeléctrico*



Nota. Análisis del espectro radioeléctrico, se logra apreciar una excelente recepción de todas las estaciones de FM con una muy buena señal en RX sin previa pre amplificación. Fuente propia.

Los análisis se realizaron sobre un programa llamado SDRSharp, el cual puede recibir señales según la SDR que sea conectado a él, en estos análisis espectrales que son pruebas definitivas puestas en práctica de la antena se puede apreciar los bulbos o emisiones radiales en sus respectivas frecuencias de emisión, las señales son recibidas por la antena y demoduladas por la SDR, en este caso se usó una HackRF con capacidad de recepción desde 10MHz hasta los 6GHz.

HackRF One de Great Scott Gadgets es un periférico de radio definido por software capaz de transmitir o recibir señales de radio de 1MHz hasta 45GHz. Diseñado para permitir la prueba y el desarrollo de tecnologías de radio modernas y de próxima generación, HackRF One es una plataforma de hardware de código abierto que puede usarse como un periférico USB o programarse para un funcionamiento independiente.

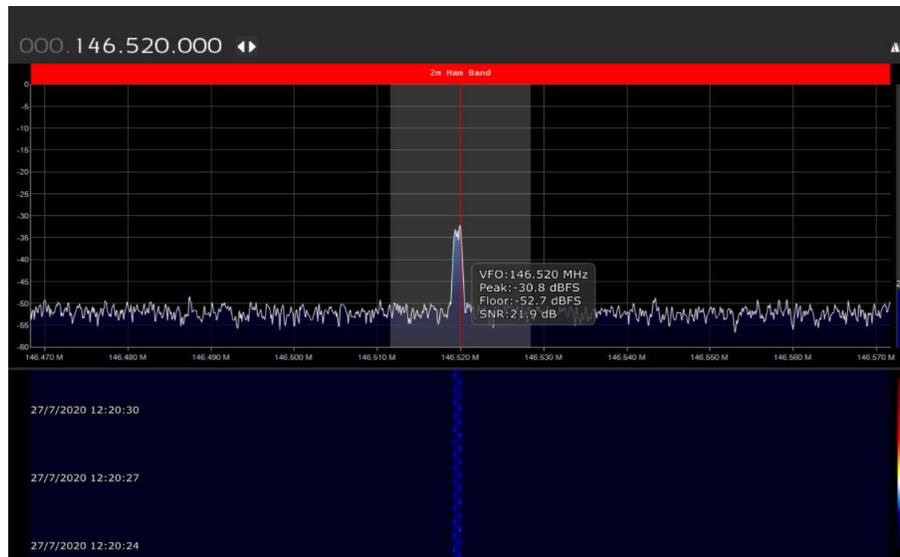
Sus características técnicas son:

- Frecuencia de funcionamiento de 1MHz hasta 45GHz aproximadamente
- Transceptor semidúplex
- Hasta 20 millones de muestras por segundo
- Muestras de cuadratura de 8 bits (I de 8 bits y Q de 8 bits)
- Compatible con GNU Radio, SDR # y más
- Filtro de banda base y ganancia RX y TX configurable por software
- Alimentación del puerto de antena controlada por software (50mA a 3,3V)
- Conector de antena SMA hembra
- Entrada y salida de reloj SMA hembra para sincronización
- Encabezados de pines internos para expansión
- USB 2.0 de alta velocidad
- Alimentación vía USB
- Hardware de código abierto

Los análisis fueron realizados bajo un muestreo de 20 millones de muestras por segundo, baja apertura de del analizador, y una sensibilidad de -20dBm, además de una recepción LNA de -10dBm. Los posibles máximos de sensibilidad se podrían elevar hasta 50dBm, sin embargo recibiría mucho ruido de fondo, y es necesario identificar las señales en un ambiente real.

## 8.15. Análisis en la banda de 2m VHF

Figura 19 *Banda VHF*



Nota. Banda VHF, local por excelencia, es muy utilizada por los radioaficionados locales para mantenerse en contacto con sus pares en un radio de 160km. Esta banda se utiliza también para la radiolocalización u orientación por radio. Fuente propia.

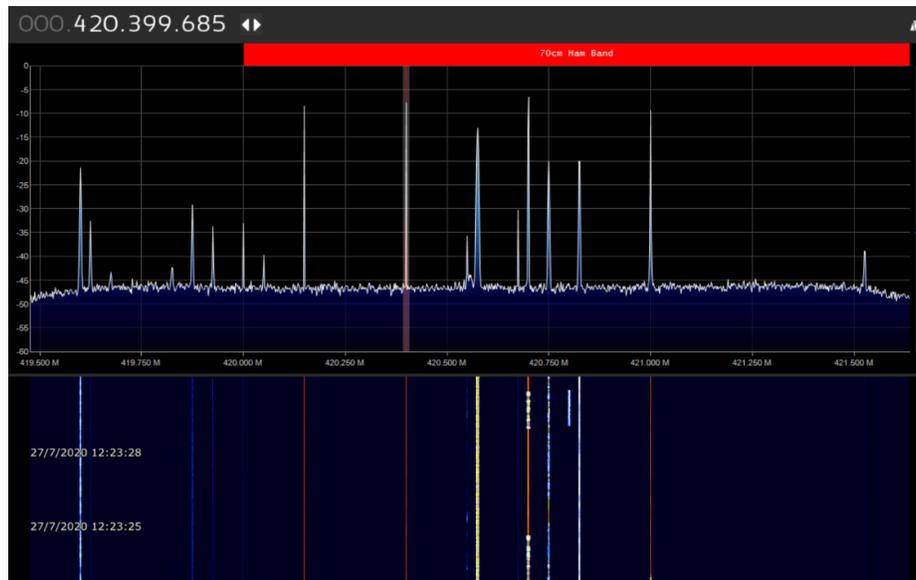
La frecuencia de 144.800MHz en la región 1 es la frecuencia del modo APRS, un modo digital que permite la geolocalización de radioaficionados utilizando un simple receptor GPS para obtener las coordenadas geográficas acoplado vía una interfaz a un transmisor de la banda de 2m.

También esta banda se usa para practicar el reflejo de emisiones en la luna ("moonbounce", en inglés), para lo cual se utiliza telegrafía lenta por su alta relación señal-ruido, transmisores potentes, y apilamientos de antenas Yagi.

Nótese el alto nivel de rechazo que posee la antena sobre la banda de 2 metros en VHF, la emisión capturada fue una radio con 50W de potencia usando una antena isotrópica a una distancia de 24km de distancia, la señal posee -30.8dBFS de pico detectado, la señal solo fue detectada apuntando precisamente hacia la fuente de emisión y aun así su señal fue detectada, verificando la alta directividad de la antena fractal con sus distintas componentes.

## 8.16. Análisis de banda de los 70cm UHF

Figura 20 Banda UHF



Nota. La banda UHF, tiene 10MHz de ancho de banda, compartidos o exclusivos, en los cuales los radioaficionados deben compartir algunas frecuencias con repetidores domésticos de TV o bien controles remotos de garajes. Fuente propia.

Pese a eso, es una banda en la cual se puede hacer DX. Pueden alcanzar varios cientos de kilómetros en condiciones favorables, a condición de tener equipos potentes y redes de antenas para aumentar la ganancia.

Las antenas son portables y de tamaño sumamente razonable; una antena vertical del tipo cuarto de onda para un vehículo mide apenas diecisiete centímetros de alto. Las antenas verticales bibanda para la Banda de 2m y la banda de 70cm son sumamente comunes, tanto J-Poles como antenas cuarto de onda.

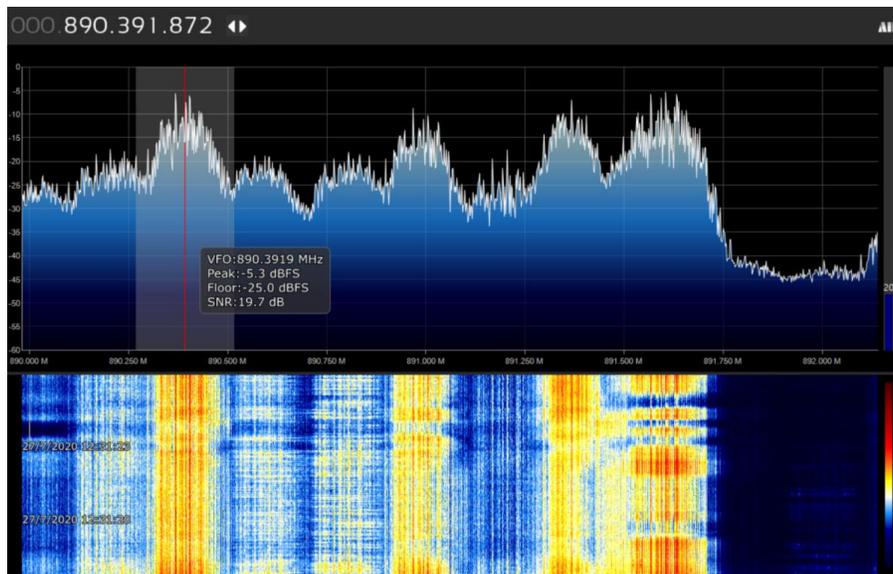
Nótese que en la banda de UHF se encuentra una increíble recepción de las señales de UHF, los inductores que unen los segmentos de polarización permiten una excelente recepción lineal, atenuando cualquier otra polarización que no sea paralela al punto de enfoque de la antena fractal con respecto a su plano de vista. El promedio de las señales recibidas es de un -31.5dBFS con respecto al ruido de fondo proyectado de -50dBFS.

## 8.17. Análisis desde los 800 hasta los 900MHz UHF

Banda de iniciación a las técnicas de microondas para los radioaficionados.

Pertenece a la UHF (Ultra High Frequency), tiene un gran interés por sus especiales características.

**Figura 21 TV en UHF**



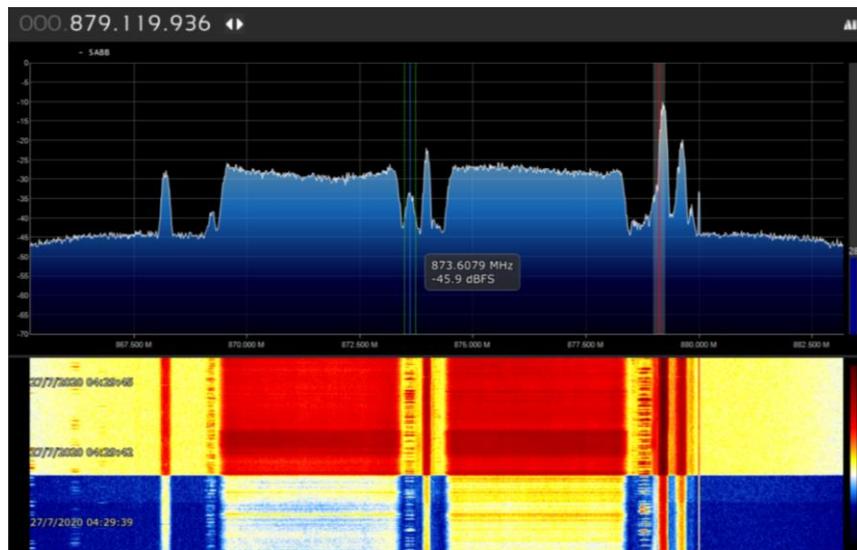
Nota. Como principal ventaja se considera su gran ancho de banda, permitiendo realizar emisiones de TV. También es empleada para enlaces con satélites de aficionado y modos de propagación muy especializados, como el rebote lunar. Fuente propia.

La banda de 23cm es una banda sumamente exigente con el material y la realización. En efecto, a estas frecuencias la realización es regida por reglas para limitar las capacidades e inductancias parásitas, atenuaciones, interacciones, entre otros factores negativos. Esta banda es capaz de presentar diversas fallas si el diseño de la antena no es minucioso.

Los radioaficionados explotan las posibilidades de estas frecuencias con señales límite, es común su uso para comunicaciones espaciales, pero también terrestres a muy largas distancias (para estas frecuencias) aprovechando la refracción troposférica. (Alcances de más de 1000km). (Corona, 2018)

Las emisiones aquí recepcionadas sobre los 890MHz reflejan las señales con sus distintivas marcas espectrales de transmisión de los transmisores de telefonía celular, la recepción es excelente, sin ninguna o aparente desvanecimiento de la señal, a distancias de hasta 47km, el uno factor que parece que influencia en la atenuación de la señal todo medio que contenga mucha agua (bosques, nubes, neblinas) es una real fuente de atenuación de la señal. Se utilizan gran cantidad de modelos y tamaños, según la modalidad a trabajar; pudiendo ir desde grandes parábolas (radioaficionados con 10m de reflector parabólico), hasta pequeñas antenas portátiles y de tamaño sumamente razonable; una antena vertical del tipo cuarto de onda para un automóvil mide apenas unos pocos centímetros de alto.

**Figura 22 *Análisis en banda de 800MHz***



Nota. Análisis del espectro electromagnético sobre la banda de los 800MHz, donde se ve una excelente recepción sobre las señales celulares de ultra banda ancha. Fuente propia.

Es relativamente fácil para un profesional cuidadoso poder construir antenas de esta frecuencia, las antenas fractales son excelente por su alta densidad de patrones internos, la antena direccional en este punto, es increíble ya que los segmentos de polarización cumplen con las medidas de resonancia junto con el segmento final de polarización de señales.

### **8.18. Análisis de banda ISM (5.250-5.350GHz)**

Las bandas de radio industriales, científicas y médicas (ISM) son bandas de radio (partes del espectro de radio) reservadas internacionalmente para el uso de energía de radiofrecuencia (RF) para fines industriales, científicos y médicos distintos de las telecomunicaciones. Los ejemplos de aplicaciones en estas bandas incluyen el proceso de calentamiento por radiofrecuencia, hornos de microondas y máquinas de diatermia médica. Las potentes emisiones de estos dispositivos pueden crear interferencias electromagnéticas e interrumpir las comunicaciones de radio utilizando la misma frecuencia, por lo que estos dispositivos se limitaron a ciertas bandas de frecuencias. En general, los equipos de comunicaciones que operan en estas bandas deben tolerar cualquier interferencia generada por las aplicaciones ISM.

Las aplicaciones industriales, científicas y médicas (ISM) (de energía de radiofrecuencia) (cortas: aplicaciones ISM) son, de acuerdo con el artículo 1.15 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), definidas como operación de equipos o dispositivos diseñados para generar y utilizar energía de radiofrecuencia local para fines industriales, científicos, médicos, domésticos o similares, excluidas las aplicaciones en el campo de las telecomunicaciones.

Las especificaciones originales de ISM preveían que las bandas se utilizarían principalmente para fines de no comunicación, como el calentamiento. Para muchas personas, el dispositivo ISM que se encuentra con más frecuencia es el horno de microondas doméstico que funciona a 2.45GHz y utiliza microondas para cocinar los alimentos. La calefacción industrial es otra gran área de aplicación; tales como calentamiento por inducción, tratamiento térmico con microondas, ablandamiento de plástico y procesos de soldadura de plástico. En entornos médicos, las máquinas de diatermia de onda corta y de microondas utilizan ondas de radio en las bandas ISM para aplicar calor profundo al cuerpo para la relajación y la curación. Más recientemente, la terapia de hipertermia utiliza microondas para calentar el tejido y matar las células cancerígenas.

Sin embargo, como se detalla a continuación, la creciente congestión del espectro de radio, la mistificación cada vez mayor de la microelectrónica y la atracción por el uso sin licencia, en las últimas décadas han provocado una explosión de usos de estas bandas para sistemas de comunicación de corto alcance para dispositivos inalámbricos, que son ahora, por mucho, los usos más grandes de estas bandas. Estos a veces se denominan "usos no ISM", ya que no se incluyen en las áreas de aplicación industrial, científica y médica previstas originalmente. Cabe destacar que una de las aplicaciones más grandes ha sido la red inalámbrica (WiFi). (Hacker Friendly LLC, 2008)

Los protocolos de red inalámbrica IEEE 802.11, estándares en los que se basan casi todos los sistemas inalámbricos, utilizan las bandas ISM. Prácticamente todas las computadoras portátiles, tabletas, impresoras y teléfonos celulares ahora tienen módems inalámbricos 802.11 que utilizan las bandas ISM de 2.4 y 5.7GHz. Bluetooth es otra tecnología de red que usa la banda de 2.4GHz, lo que puede ser problemático dada la probabilidad de interferencia.

Los dispositivos de comunicación de campo cercano, como las tarjetas de proximidad y las tarjetas inteligentes sin contacto, utilizan las bandas de baja frecuencia de 13 y 27MHz ISM. Otros dispositivos de corto alcance que utilizan las bandas ISM son: micrófonos inalámbricos, monitores para bebés, abridores de puertas de garaje, timbres inalámbricos, sistemas de entrada sin llave para vehículos, canales de control de radio para UAV (drones), sistemas de vigilancia inalámbricos, sistemas RFID para mercancías y animales salvajes sistemas de seguimiento. Las especificaciones originales de ISM preveían que las bandas se utilizarían principalmente para fines de no comunicación, como el calentamiento. Las bandas siguen siendo ampliamente utilizadas para estos fines. Para muchas personas, el dispositivo ISM que se encuentra con más frecuencia es el horno de microondas doméstico que funciona a 2.45GHz y utiliza microondas para cocinar los alimentos.

La calefacción industrial es otra gran área de aplicación; tales como calentamiento por inducción, tratamiento térmico con microondas, ablandamiento de plástico y procesos de soldadura de plástico. En entornos médicos, las máquinas de diatermia de onda corta y de microondas utilizan ondas de radio en las bandas ISM para aplicar calor profundo al cuerpo para la relajación y la curación.

Más recientemente, la terapia de hipertermia utiliza microondas para calentar el tejido y matar las células cancerosas. Algunos diseños de lámparas sin electrodos son dispositivos ISM, que utilizan emisiones de RF para excitar los tubos fluorescentes. Las lámparas de azufre son lámparas de plasma disponibles en el mercado, que utilizan un magnetrón de 2.45GHz para calentar el azufre en un plasma de brillo brillante.

Un radioenlace está constituido por equipos terminales y repetidores intermedios. La función de los repetidores es salvar la falta de visibilidad impuesta por la curvatura terrestre y conseguir así enlaces superiores al horizonte óptico. La distancia entre repetidores se llama salto.

Los repetidores pueden ser:

- Activos
- Pasivos

Los generadores de microondas son generadores críticos en cuanto a la tensión y la corriente de funcionamiento.

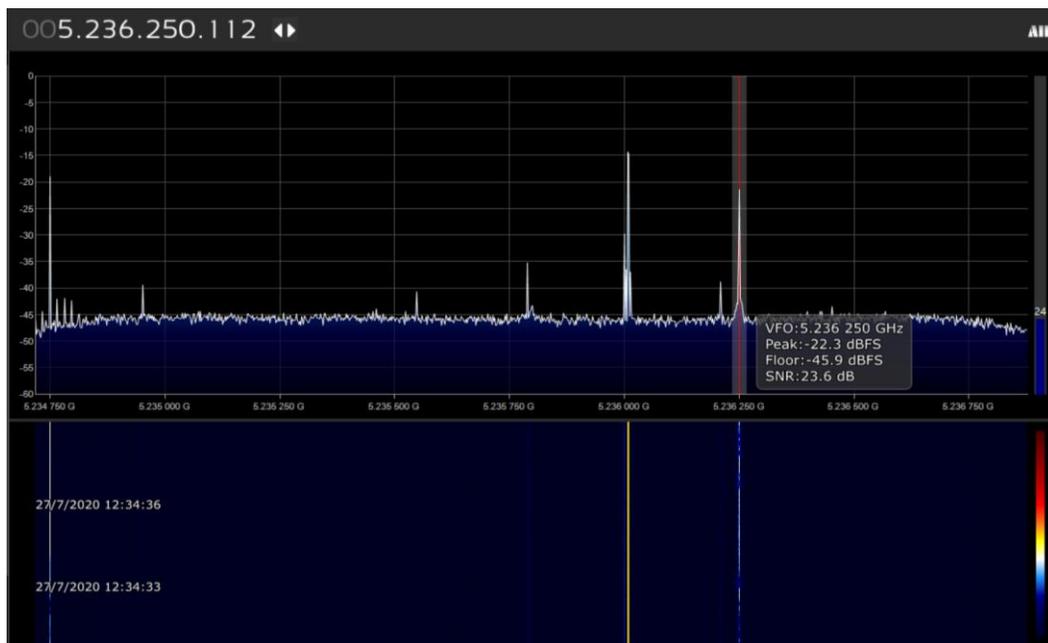
Uno de los medios es no actuar sobre el generador o amplificador, pero si utilizar un dispositivo diodo pin en la guía de salida, modulada directamente la amplitud de la onda. Otro medio es utilizar un desfasador de ferrita y modular la onda en fase. En este caso es fácil obtener modulación en frecuencia a través del siguiente proceso:

En una primera etapa, se modula en FM una portadora de baja frecuencia, por ejemplo 70MHz. En una segunda etapa, esta portadora modulada es mezclada con la portadora principal en frecuencia en GHz, por ejemplo 10GHz.

Un filtro de frecuencias deja pasar la frecuencia suma, 10070MHz con sus bandas laterales de 3MHz y por lo tanto la banda pasante será de 10067 a 10073MHz, la cual es la señal final de microondas.

En el receptor se hace la mezcla de esta señal con el oscilador local de 10GHz, seguido de un filtro que aprovecha la frecuencia de diferencia 70MHz la cual es amplificada y después detectada por las técnicas usuales en FM.

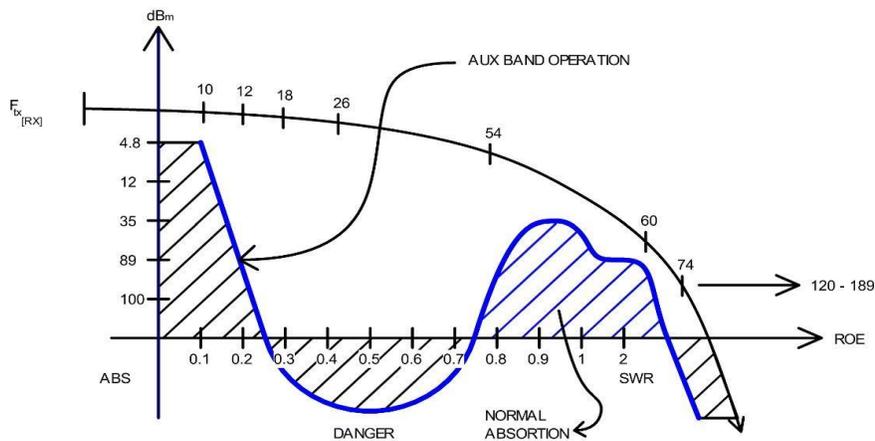
**Figura 23 Análisis de ISM**



Nota. El análisis espectral sobre la banda ISM en una frecuencia centrada de 5.236GHz muestra una emisión con un ancho de banda de 50KHz con un pico detectado máximo de -22.3dBFS, un enlace lineal de 46km muestra una excelente relación señal ruido. Fuente propia.

Los segmentos internos, logran acoplar y sintonizar en la frecuencia de resonancia la emisión de 5.236GHz sin mayor problema. La antena logra evitar el ruido de fondo y solo recibe las emisiones de esa banda, la capacidad de eficiencia de recepción espectral es de aproximadamente 50MHz, y esto solo según lo que se pudo apreciar con un muestreo de 20 muestras por segundo, si se agrandase el muestreo con otros analizadores es posible ver una curva más ancha en recepción de señales.

**Figura 24 Índice de recepción y eficiencia fractal**

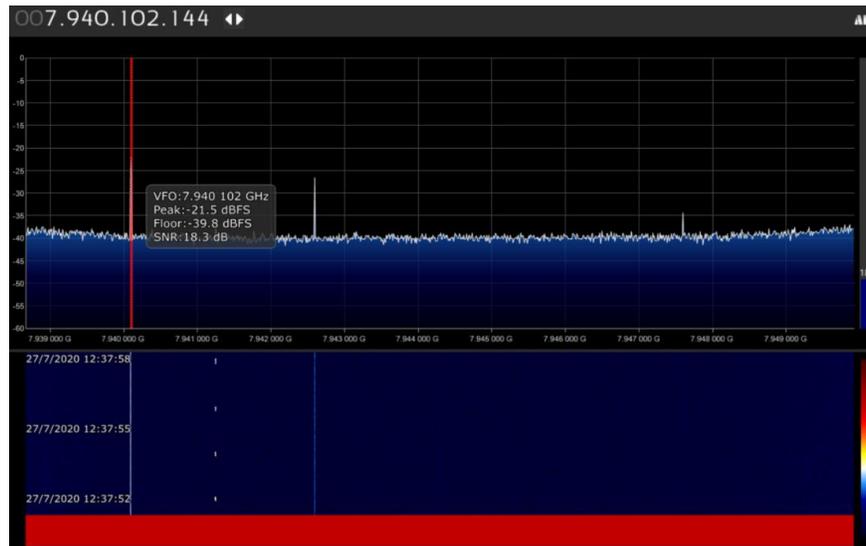


Nota. Fuente propia.

Según la tabla de recepción de antena, la prioridad sobre las emisiones en 5GHz es muy importantes, la banda ISM posee ciertas frecuencias que son de uso libre, no hay que pagar licencias al respecto, y su espectro a pesar de estar muy utilizado es idóneos para enlaces de emergencia.

Se busca la eficiencia en la antena para evitar tener muchas estacionarias y ondas reflejadas sobre la etapa de potencia y así enviar la máxima potencia hacia el aire. Mejor eficiencia, mayor potencia emitida.

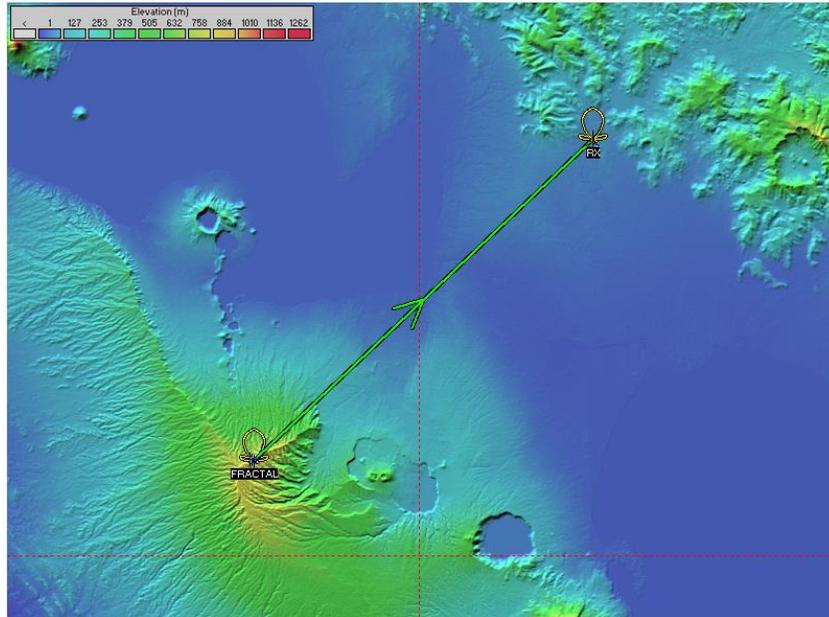
**Figura 25 Análisis de señal en 7.940GHz**



Nota. Análisis espectral de emisión de banda angosta de una emisión en 7.940GHz, se nota reducido por la alta cantidad de muestras sobre el análisis, para notar detalles de emisión sobre el ancho de banda. Fuente propia.

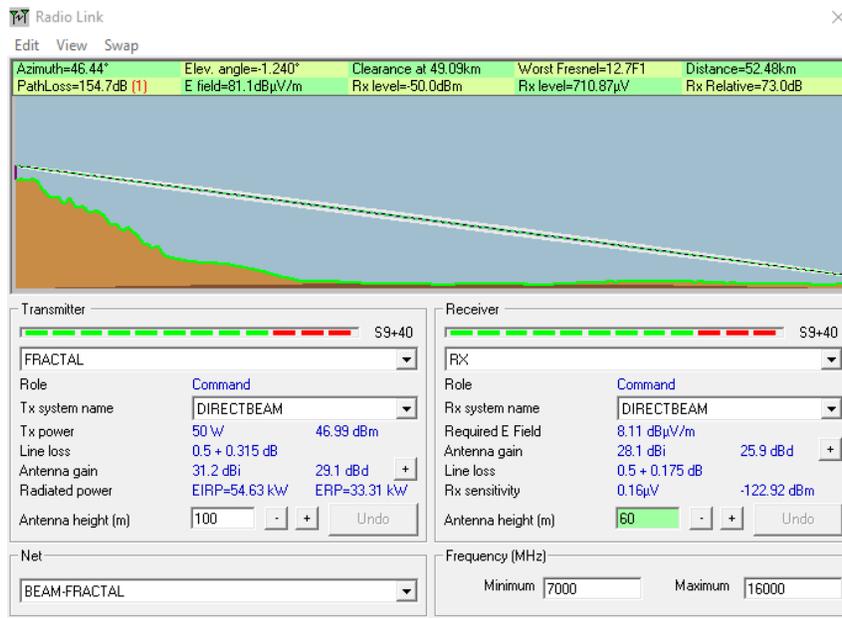
El mismo análisis se identificó apuntando sobre una emisión en las frecuencias comprendidas entre los 7 hasta 8GHz, las emisiones en esta banda fueron un poco más complicado de centrar por la distancia y altura de las antenas emisoras, pero fue posible detectarlas a 25km de distancia usando parte de sus componentes y reduciendo el nivel de muestreo, no fue necesario aumentar el nivel de amplificación del LNA interno del SDR, el aumento de la amplificación sólo incrementaría la relación señal ruido recibido y se procedería a tener niveles de BER que serían de alta consideración para la operación del enlace. Se hubiera podido conseguir más niveles de señal con una mejor alineación, no constante el análisis espectral nos da una excelente señal a pesar de ajustar la polarización y de apuntar correctamente, ya que se hizo de forma manual y sin mucha precisión, esto demuestra la sensibilidad de la antena, su directividad y su alta sensibilidad en todos los rangos de frecuencias desde los 4.67GHz.

**Figura 26 Simulación de propagación**



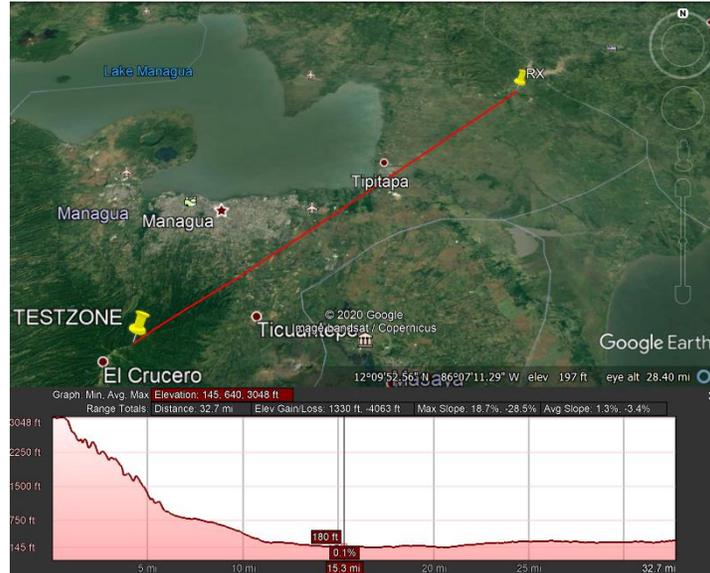
Nota. Simulación de análisis de propagación en línea de visión con antena fractal como sitio de TX se eligió el cruceo Managua para poseer una línea de visión. Fuente propia.

**Figura 27 Resultados de simulación**



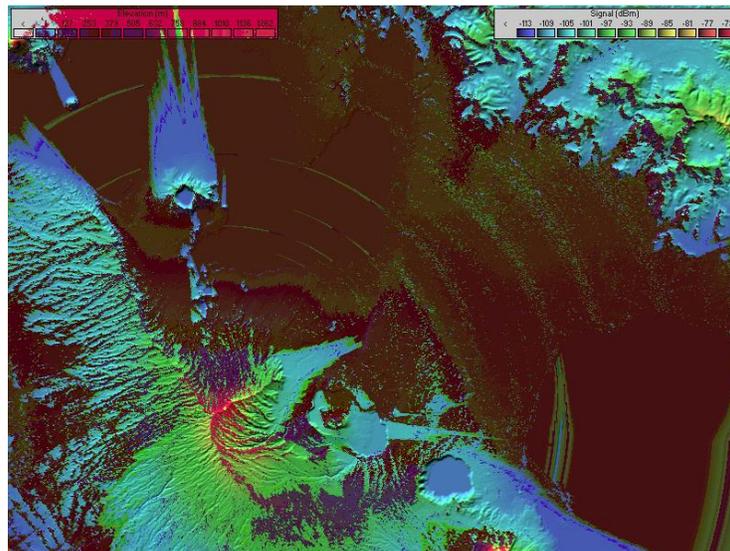
Nota. Análisis de recepción técnica y zona Fresnel, en este caso con línea de vista perfecta y alturas de torres según la realidad de los estándares actuales. Fuente propia.

**Figura 28 Perfil de elevación TX**



Nota. Análisis del perfil de elevación sobre los puntos de TX (El Crucero) y RX (Las Banderas), se puede notar cero obstrucciones geográficas dando una excelente recepción entre los 7GHz y 16GHz. Fuente propia.

**Figura 29 Cobertura de enlace simulado**



Nota. Análisis de la cobertura de la estación transmisora en la cima de El Crucero, poniendo como análisis puntual una estación receptora de 2m de altura sobre el nivel del suelo relativo al mapa. Aquí la altura ayuda a la propagación en SHF. Fuente propia.

## **IX. Conclusiones**

Se ha comprobado, con base en los datos obtenidos desde infraestructuras de sitios reales de telecomunicaciones a nivel regional, pruebas simuladas, estudios reales, y cálculos físicos, que la aplicación de tecnología fractal a las antenas para enlaces de punto a punto ubicados en zonas de clima variante, mejoran su estabilidad, desempeño, autosustentabilidad productiva, ahorran a largo plazo fondos de inversión por visitas técnicas, y lo más importante, brindan un servicio de calidad el cual consigue la satisfacción del cliente final.

Se ha definido la idea de la implementación de la modulación dual para tráfico de paquetes de datos a través del espacio, y como convierte en obsoleta la idea de limitarse a un solo protocolo, en situaciones que la industria, la ingeniería y hasta la sociedad necesitan mayor fiabilidad de parte de este sistema tan fundamental, como lo son las comunicaciones vía ondas electromagnéticas.

Hemos estudiado los fundamentos y conceptos de la geometría fractal, y como sus características pueden ser usadas favorablemente en tecnologías de última punta, procesamiento de datos, telecomunicaciones, e incluso en desarrollo de notas musicales.

La antena prototípica elaborada con elementos básicos a menor escala, consigue un increíble ancho de banda de recepción dando cobertura fiable a partir de un rango aproximado que oscila entre los 1.78GHz hasta los 45GHz con pérdidas mínimas, y a pesar de que contiene zonas de la curva de eficiencia las cuales se ven afectadas un número de rango de frecuencias, en efectos prácticos la antena debe ser fabricada con énfasis en las diferentes frecuencias que se utilizarían al llevar a cabo la idea aquí propuesta. Como efecto de prototipo se construyó una antena experimental, donde se dan coberturas a las frecuencias más esenciales o más comunes utilizadas en radioenlaces.

## **X. Recomendaciones**

- Después de analizar los estándares y lineamientos generales a nivel regional internacional, que administran el espectro electromagnético; es menester de la institución o ente que desee implementar la tecnología de microondas a través de antenas fractales, consultar el estatus de disponibilidad del espectro electromagnético en la zona por la cual se pretende esparcir, Avocándose con el organismo a cargo, previo a cualquier procedimiento o hasta manufactura.
- Se debe considerar como factor fundamental, la selección minuciosa de los elementos destinados a la construcción de una antena fractal, especialmente, cuando los datos transmitidos y recibidos pertenecen a nodos establecidos en infraestructuras de telecomunicación de alta disponibilidad.
- Es necesario medir los parámetros principales de la antena con los equipos adecuados, y así evitar inconvenientes durante la puesta en producción de la misma.
- En caso de construir una antena fractal para su implementación en servicios de telefonía por microondas, se deben hacer los cálculos correspondientes utilizando la fórmula de longitud de onda; de esta manera se podrá definir la longitud de las iteraciones asociadas a la antena, para funcionar en canales y bandas específicas.

## XI. Bibliografía

- Aznar, A. C. (2002). *Antenas*. Barcelona: Ediciones UPC.
- Castillo, J. C., Alba Carrascosa, J. M., & Cerdu Aroca, J. (2013). *Antenas. Recepción de Señales de Radio y TV (ICTVE)*. EDITORIAL EDITEX.
- Corona, P. C. (2018). *Radioaficionados, Satelites y Naves Espaciales*. S.A. MARCOMBO.
- Docplayer. (enero de 2018). *Docplayer*. Obtenido de Docplayer: <https://docplayer.es/86175190-Escuela-superior-politecnica-de-chimborazo.html>
- Dominguez, A. G. (2010). *Antenas de Ultima Generacion para tecnologia digital y metodos de medicion*. S.A. MARCOMBO.
- Electronic-notes. (diciembre de 2018). *Electronic-notes*. Obtenido de Electronic-notes: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/modulation/quadrature-amplitude-modulation-types-8qam-16qam-32qam-64qam-128qam-256qam.php>
- Eliezer, B. (2003). *Caos, Fractales y Cosas Raras*. Mexico: S. L. Fondo de Cultura Economica de España.
- Esacademic. (enero de 2020). *Esacademic*. Obtenido de Esacademic: <https://esacademic.com/dic.nsf/eswiki/17765>
- Fuentes, J. J. (2012). *Fundamentos de Radiacion y Radiocomunicacion*. Sevilla, Espania: © 2012 Juan José Murillo Fuentes.
- Garrido, H. (2015). *Fractales: Anatomia Intima de la Marisma*. RUEDA.
- Gaussian Waves*. (octubre de 2012). Obtenido de Gaussian Waves: <https://www.gaussianwaves.com/2012/10/qam-modulation-simulation-matlab-python/>
- GSP 216. (febrero de 2019). *gsp.humboldt*. Obtenido de gsp.humboldt: [http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP\\_216\\_Online/lesson2-1/atmosphere.html](http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online/lesson2-1/atmosphere.html)
- Gutierrez, F. H. (2019). Modulación y demodulación de AM. En F. H. Gutierrez, *Modulación y demodulación de AM* (pág. 23). Lima, Perú.
- Hacker Friendly LLC, h. (2008). *Redes Inalámbricas en los Países en Desarrollo*. © 2008 - Hacker Friendly LLC.
- Huidobro, J. M. (2013). Antenas de telecomunicaciones. *Revista Digital de ACTA*, 1.
- J. Martinez, V., & Paredes, J. (2017). *Fractales y Caos: La Aventura de la Complejidad*. Cordoba: GUADALMAZAN.

- Jaume Anguera, A. P. (2008). *Teoría de Antenas*. Ingeniería La Salle (Estudios Semipresenciales).
- Lince, A. M. (s.f.). Antenas Fractales: Un Paso En La Evolucion De Las Telecomunicaciones . En A. M. Lince, *Antenas Fractales: Un Paso En La Evolucion De Las Telecomunicaciones* (pág. 4). Medellín, Colombia.
- Liu Xueden, L. Y. (diciembre de 2006). *China-cic.org*. Obtenido de China-cic.org: <https://web.archive.org/web/20071108223006/http://www.china-cic.org.cn/english/digital%20library/200612/12.pdf>
- Llacer, L. J. (2004). *Problemas Resueltos de Modulaciones Analogicas y Digitales*. Mauricia: DIEGO MARIN.
- Martin. (abril de 2014). *10sd156.blogspot*. Obtenido de 10sd156: <http://10sd156.blogspot.com/p/diagramas-de-antenas.html>
- Minguez, T. D. (2020). *Desarrollo de aplicaciones IOT en la nube para Arduino y ESP8266*. S.A. MARCOMBO.
- Pascual, F. R. (2015). *Radiocomunicaciones*. S.A. MARCOMBO.
- Reveles, G. V. (2006). *Geometrias Fractales en Antenas y Dispositivos Optoelectronicos*. San Luis Potosi S. L. P.: Instituto de Investigacion en comunicacion optica.
- Sandoval, F. A. (2008). Diseño e Implementacion de Antenas Fractales para UHF. En F. A. Sandoval, *Diseño e Implementacion de Antenas Fractales para UHF* (pág. 24). Loja, Ecuador.
- Soto, C. G. (2009). *Oceanografía y Satelites*. Madrid: TEBAR.
- Talanquer, V. (2003). *Fractus, Fracta, Fractal: Fractales, de Laberintos y Espejos*. Mexico: S.L. FONDO DE CULTURA ECONOMICA DE ESPAÑA.
- Tobin, P. (2007). *Pspice For Digital Communications Engineering (synthesis Lectures On Digital Circuits And Systems)*. Mitchell Thornton, Series Editor.
- Todo Antenas Ek. (abril de 2011). *Todoantenasek.wordpress*. Obtenido de Todo Antenas El: <https://todoantenasek.wordpress.com/2011/04/>
- Valdez Vazquez, P. A. (2016). *Introduccion a la Geometria Fractal*. Chillan: Facultad de Enseñanza y Humanidades.

## XII. Anexos

### 12.1. Anexo A. Pruebas de recepción.



Durante esta investigación, se diseñó un modelo de antena fractal capaz de funcionar dentro de un rango de frecuencias muy amplio, en una visita a un sitio con una excelente línea de vista hacia el centro de Managua, se realizaron muestreos de los parámetros conseguidos con la antena desde los 144.800MHz hasta los 7.940GHz, documentando los valores mediante el dispositivo HackRF que a su vez decodifica y muestra los datos a través de un software compatible con el dispositivo.

## 12.2. Anexo A. Conexiones de cable coaxial



Haciendo uso de cable coaxial como principal elemento en este diseño de antena, también se acoplaron sus respectivos conectores con el fin de sustraer y monitorear los datos recibidos por la antena. Por ende, y a como se puede apreciar en la imagen, se ha hecho uso de conectores RG-58 macho y hembra, asimismo conectores machos SMA y su cable RG-174.

### 12.3. Anexo B. Monitoreo de las señales captadas



Haciendo uso del software SDR Sharp (SDR#), se inició una etapa de monitoreo de señales recibidas por un prototipo de antena fractal multibanda, se registraron muy buenos resultados en diferentes frecuencias, y estos fueron recopilados y almacenados, siendo parte fundamental del desarrollo y justificación de la tesis.

## 12.4. Anexo C. Maqueta de radioenlace punto a punto



Maqueta de radioenlace punto a punto con IDUs Huawei y NEC, alimentadas por un rectificador de 110V AC a -48V DC, de esta manera se pudo analizar y validar el tipo de capacidad de estos equipos utilizados por ambas operadoras en sitios reales de telefonía en Nicaragua, además del acceso que facilita mi trabajo para la instalación, configuración y puesta en marcha de estos dispositivos.