

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE ANTENAS FRACTALES PARA TELEVISIÓN
DIGITAL PARA INTERIORES Y EXTERIORES**

Tesis para optar el Título de Ingeniero de las Telecomunicaciones, que
presenta el bachiller:

VÍCTOR HUGO CHAHUILCO GÁLVEZ

ASESOR: ING. MARCIAL LÓPEZ TAFUR

Lima, Mayo del 2012

Resumen

El presente proyecto de tesis consiste en el diseño de antenas fractales que actúen en la banda de Televisión Digital Terrestre de Perú.

El primer capítulo está centrado en dar una visión general sobre la televisión digital a nivel mundial, desde los inicios de la televisión en blanco y negro hasta llegar a los principales estándares de televisión digital, además de mostrarnos las características más resaltantes de cada una.

El segundo capítulo busca sentar las bases sobre la teoría de fractales, indicándonos las características principales de un objeto fractal y sus posibles aplicaciones, haciendo un énfasis en el desarrollo de antenas para telecomunicaciones y la teoría electromagnética detrás de esta.

El tercer capítulo presenta las características principales de ISDB-T en Perú, ya que este fue el estándar adoptado por Perú debido a sus mejores beneficios con respecto a las otras. Además nos brinda los parámetros necesarios para poder diseñar la antena

El cuarto capítulo, por su parte, describe todo el proceso de diseño de las antenas, tanto interior como exterior, desde los algoritmos para hallar las dimensiones de las antenas, hasta las simulaciones de estas y su respectivo análisis para encontrar la más adecuada a los requerimientos.

Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo, además de proponer algunos trabajos futuros que permitan la difusión de esta teoría de fractales poco difundida en nuestro medio y que podría ser de mucha utilidad debido a sus grandes beneficios no solo en la rama de las telecomunicaciones, sino también en las matemáticas, física, medicina, etc.

Dedicatoria

*A mis padres,
A mis hermanos,
A mis tíos y primos,
Y a todos los que confían en mí.*

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres Alcides y Rosalía, por todo el sacrificio que hacen por mí y mis hermanos, que siempre me motivaron a salir adelante.

A mis hermanos, Dustin, Carlos y mis primos Daygoro, Fidel y Karina con los que crecí y maduré.

A mis tíos Elena y Víctor que son como mis segundos padres, gracias por todos sus consejos.

Y a todos los que confían en mí.

Índice

Índice	v
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tablas.....	x
Introducción	11
Capítulo 1 Televisión Digital.....	12
1.1 Historia de la Televisión:.....	12
1.2 Televisión Digital:	13
1.2.1 Características de la Televisión digital:.....	13
1.2.1.1 Niveles de Calidad:	14
1.2.1.2 Compresión de Señales (MPEG-2):.....	14
1.2.1.3 Modulación VSB:	15
1.2.1.4 Modulación COFDM:	16
1.2.2 Estándares de Televisión Digital:.....	17
1.2.2.1 ATSC:.....	17
Como se puede ver en el siguiente gráfico:.....	17
1.2.2.2 DVB-T:.....	19
1.2.2.3 ISDB-T:.....	22
1.2.2.4 DTMB:	24
1.2.2.5 Cuadro comparativo entre los estándares:	25
Capítulo 2 Geometría Fractal.....	27
2.1 Introducción:	27
2.2 Dimensión Fractal:.....	28
2.2.1. Línea de Koch:	29
2.3. Propiedades de los Fractales:.....	31
2.3.1. Autosimilitud:	31
2.3.2. Recursividad:.....	32
2.3.3. Space Filling:	32
2.3.4. Detalle Infinito.....	32
2.4. Antena Fractal:	32
2.4.1. Principio de Escalabilidad:	33
2.5. Teoría Electromagnética:.....	34
2.5.1. Ecuaciones de Maxwell:	34
2.5.2. Método de Momentos:	35
2.6. Generación de Figuras Fractales:	41
2.7. Estudio del Arte:	43
Capítulo 3 ISDB-T en Perú.....	46
3.1. ABNT NBR 15604 Televisión Digital Terrestre- Receptores:	46
3.2. Configuración de Receptor:.....	47
3.2.1. Configuración Básica del IRD:.....	47
3.3. Especificaciones de las unidades de Recepción	48
3.3.1. Antena de recepción:	48
3.3.2. Especificación de unidad receptora:.....	49
3.3.2.1. Entrada de Antena:	49
3.3.3. Recepción de canales:.....	49
3.3.3.1. Dispositivos Fijos o móviles de Recepción (Full-seg):	49
3.3.3.2. Dispositivos Portátiles de Recepción Parcial (one-seg):	49
3.3.4. Ancho de Banda del Canal:	50
3.3.5. Frecuencia de Portadora Central de Canales:.....	50

3.3.6. Sensibilidad:	52
3.4. TDT en Perú:	52
<i>Capítulo 4 Diseño de Antenas Fractales para Televisión Digital</i>	57
4.1. Herramientas de Diseño y Simulación:	57
4.1.1. MATLAB:	57
4.1.1.1. Línea de Koch:	58
4.1.1.2. Copo de Nieve de Koch:	59
4.1.1.3. Cuadrado de Koch :	61
4.1.2. 4NEC2:	64
4.2. Especificaciones de Diseño:	65
4.3. Diseño:	66
4.4. Análisis de resultados:	72
4.5. Implementación:	75
<i>Conclusiones y Recomendaciones</i>	83
5.1. Conclusiones:	83
5.2. Recomendaciones:	84
<i>Bibliografía</i>	86
<i>Anexos</i>	89

Lista de Figuras

FIGURA 1-1: ARQUITECTURA DE UN TELEVISOR ANALÓGICO	13
FIGURA 1-2: TRANSMISIÓN 8-VSB	15
FIGURA 1-3: TRANSMISIÓN DE COFDM.....	17
FIGURA 1-4: SISTEMA ATSC	18
FIGURA 1-5: DIAGRAMA DEL SISTEMA DE CODIFICACIÓN DE CANAL	19
FIGURA 1-6: SISTEMA DVB-T	20
FIGURA 1-7: SISTEMA DE CODIFICACIÓN DE CANAL DE DVB-T	21
FIGURA 1-8: ELEMENTOS DEL SISTEMA DVB-H (EN ROJO) DENTRO DE DVB-T.....	22
FIGURA 1-9: DIAGRAMA GENERAL DE ISDB-T.....	22
FIGURA 1-10: SISTEMA DE CODIFICACIÓN DE CANAL Y JERARQUIZACIÓN.....	23
FIGURA 1-11: SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE DTMB	25
FIGURA 2-1: DIMENSIÓN HAUSDORFF	28
FIGURA 2-2: FRACTALES EN LA NATURALEZA.....	29
FIGURA 2-3: INICIADOR	29
FIGURA 2-4: LÍNEA DE KOCH - ITERACIÓN 1	29
FIGURA 2-5: LÍNEA DE KOCH - ITERACIÓN 2	30
FIGURA 2-6: LÍNEA DE KOCH - ITERACIÓN 3	30
FIGURA 2-7: LÍNEA DE KOCH - ITERACIÓN 4	30
FIGURA 2-8: COPO DE NIEVE DE KOCH	31
FIGURA 2-9: ALAMBRE RECTO	36
FIGURA 2-10: ALAMBRE SEGMENTADO	37
FIGURA 2-11: TRASLACIÓN MEDIANTE DEL VECTOR (α, β)	42
FIGURA 2-12: GIRO DE UN ÁNGULO φ Y CENTRO EN EL ORIGEN	42
FIGURA 2-13: SIMETRÍA CON RESPECTO AL EJE DE ABSCISAS	42
FIGURA 2-14: HOMOTECIA CENTRADA EN EL ORIGEN DE RAZÓN K .	42
FIGURA 2-15: GENERACIÓN DE LA CURVA DE KOCH MEDIANTE FS DE LA PRIMERA ITERACIÓN	43
FIGURA 2-16: ANTENA FRACTUS PARA TV DIGITAL	44
FIGURA 2-17: MAPA DE TECNOLOGÍAS/ SOLUCIONES FRACTUS PARA ANTENAS DE TELEFONÍA MÓVIL	44

FIGURA 3-1: CONFIGURACIÓN BÁSICA DEL RECEPTOR	47
FIGURA 3-2: CONFIGURACIÓN BÁSICA DE IRD DE TIPO STB.....	47
FIGURA 3-3: CONFIGURACIÓN BÁSICA DE IRD DE TIPO INTEGRADO	48
FIGURA 3-4: PLAN DE ATRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS.....	52
FIGURA 3-5: ASIGNACIÓN DE CANALES UHF	54
FIGURA 3-6: PLAN DE CANALIZACIÓN Y ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS.....	55
FIGURA 3-7: SITUACIÓN ACTUAL DE LA ASIGNACIÓN DE CANALES EN UHF	56
FIGURA 4-1: VONTRIANGULAR.M.....	58
FIGURA 4-2: LÍNEA DE KOCH F=500MHZ ITERACIÓN=2.....	58
FIGURA 4-3: LÍNEA DE KOCH F=500MHZ ITERACIÓN=3.....	59
FIGURA 4-4: LÍNEA DE KOCH F=500MHZ ITERACIÓN=4.....	59
FIGURA 4-5: VONCOPOKOCH.M	59
FIGURA 4-6: COPO DE KOCH F=500MHZ ITERACIÓN=2	60
FIGURA 4-7: COPO DE KOCH F=500MHZ ITERACIÓN=3	60
FIGURA 4-8: COPO DE KOCH F=500MHZ ITERACIÓN=4	61
FIGURA 4-9: VON.M.....	61
FIGURA 4-10: CUADRADO DE KOCH F=500MHZ ITERACIÓN=4	62
FIGURA 4-11: PEQUEÑO.M.....	62
FIGURA 4-12: PEQUEÑO F=500MHZ ITERACIÓN=2	63
FIGURA 4-13: PEQUEÑO =500MHZ ITERACIÓN=3	63
FIGURA 4-14: PEQUEÑO =500MHZ ITERACIÓN=4	63
FIGURA 4-15: ANTENA TRIANGULO700IT2.NEC.....	66
FIGURA 4-16: FRECUENCIA DE OPERACIÓN DE TRIANGULO700IT2.NEC.....	67
FIGURA 4-17: PATRÓN DE RADIACIÓN DE TRIANGULO700IT2.NEC ...	67
FIGURA 4-18: CAMPO LEJANO Y CAMPO CERCANO DE TRIANGULO700IT2.NEC.....	67
FIGURA 4-19: GANANCIA DE LA ANTENA TRIANGULO700IT2.NEC.....	68
FIGURA 4-20: IMPEDANCIA DE ENTRADA DE TRIANGULO700IT2.NEC	68
FIGURA 4-21: ANTENA TRIANGULO700IT3.NEC.....	69
FIGURA 4-22: FRECUENCIA DE OPERACIÓN DE TRIANGULO700IT3.NEC.....	69

FIGURA 4-23: ANTENA TRIPLEDIP900IT2.NEC	70
FIGURA 4-24: FRECUENCIA DE OPERACIÓN DE TRIPLEDIP900IT2.NEC	70
FIGURA 4-25: PATRÓN DE RADIACIÓN DE TRIPLEDIP900IT2.NEC	71
FIGURA 4-26: CAMPO LEJANO Y CAMPO CERCAÑO DE TRIPLEDIP900IT2.NEC	71
FIGURA 4-27: GANANCIA DE LA ANTENA TRIPLEDIP900IT2.NEC	71
FIGURA 4-28: IMPEDANCIA DE ENTRADA DE TRIPLEDIP900IT2.NEC	72
FIGURA 4-29: BALUN COAXIAL DE $\lambda/4$ DE 1:1.....	76
FIGURA 4-30: VISTA ANTERIOR DE LA ANTENA	77
FIGURA 4-31: VISTA POSTERIOR DE LA ANTENA	77
FIGURA 4-32: ANTENA CONECTADA AL VNA.....	78
FIGURA 4-33: ANCHO DE BANDA DE LA ANTENA.....	78
FIGURA 4-34: DIAGRAMA GENERAL DE UN SISTEMA BEAMFORMING	79
FIGURA 4-35: ANTENA INTERIOR	80
FIGURA 4-36: CAMPO LEJANO ANTENA INTERIOR	80
FIGURA 4-37: CONEXIONES DE LA ANTENA INTERIOR	81

Lista de Tablas

TABLA 1-1: CUADRO COMPARATIVO DE ESTÁNDARES DE TV DIGITAL	25
TABLA 3-1: FRECUENCIAS DE LOS CANALES VHF ALTOS.....	51
TABLA 3-2: FRECUENCIA DE LOS CANALES DE BANDA UHF	51
TABLA 4-1: VARIACIÓN DE LONGITUD TOTAL CON MINIATURIZACIÓN F=500MHZ	64
TABLA 4-2: VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE ANTENA SEGÚN TRIANGULOFITY.NEC	72
TABLA 4-3: VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE ANTENA SEGÚN TRIPLEDIPFITY.NEC.....	73
TABLA 4-4: RESUMEN DE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE ANTENA FRECUENCIA CONSTANTE	74
TABLA 4-5: RESUMEN DE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE ANTENA ITERACIÓN CONSTANTE.....	74

Introducción

El inicio de este nuevo siglo trajo consigo un boom de las tecnologías digitales, se hicieron populares todas las ventajas que éstas traían con respecto al tradicional sistema analógico, al cual ya estábamos acostumbrados. Una de las principales ramas que optó rápidamente por este cambio son las telecomunicaciones; y esto lo podemos ver en la telefonía celular, redes IP, etc. Casi todos los dispositivos podían converger a una única red llamada Internet, pero había un dispositivo que todavía no podía integrarse a esta red, el cual es la televisión.

Pero con la aparición y el desarrollo de la televisión digital este problema fue resuelto, todos los dispositivos de comunicaciones ya podían integrarse a la red IP o Internet. Pero no todo es tan fácil como parece, con la aparición de esta tecnología aparecieron nuevos problemas, entre ellos, el cambio de televisores analógicos por digitales, la convergencia de servicios que se logra con la televisión digital, los cuales trabajan a diferentes bandas, haría que se necesite más de una antena para poder lograr una correcta recepción. Esto hace que se necesite el desarrollo de nuevas tecnologías que sean capaces de integrar este ancho de banda necesario para poder usar todos estos nuevos servicios. Esta tecnología es la Geometría fractal, más específicamente el desarrollo de antenas fractales las cuales se basan en estas tecnologías.

La geometría fractal nos provee de un modelo matemático para explicar las formas complicadas de la naturaleza, como por ejemplo nubes, árboles, hojas, vegetales, etc. esta geometría está siendo aplicada para diferentes ramas de la ciencia como física, medicina, procesamiento digital de señales y para la creación de nuevas antenas, que a pesar de parecer un simple juego geométrico tiene una explicación teórica basada en las ecuaciones de Maxwell.

Capítulo 1

TELEVISIÓN DIGITAL

1.1 Historia de la Televisión:

La televisión nació en la década de los 30s cuando la BBC de Londres hace la primera transmisión de audio y video en simultáneo, pero las imágenes que transmitía eran solo en blanco y negro; como era de esperarse, este invento era muy deficiente debido a la tecnología precaria en la que estaba basada, poseía altos problemas de ruido y desenganches en el video, pero esto no detuvo el desarrollo y crecimiento de la televisión. Es así como nace en la década de los 50s la televisión a color y con ello los estándares de fabricación de aparatos de TV a color tales como:

1. NTSC (National Television System Comitee) en EEUU con 5025 líneas.
2. SECAM (SEquentiel Couleur A Memorie) en Francia con 625 líneas.
3. PAL (Phase Alternation Line) en Alemania con 625 líneas.

Como se sabe estos 3 tipos de televisión son llamados Televisión Analógica, el cual es un sistema de modulación de ondas hertzianas, que ocupa un gran ancho de banda por lo que no es del todo eficiente, ya que usa mucho espectro, y éste es muy escaso, además esta tecnología análoga es muy susceptible a problemas de interferencia lo cual genera imágenes poco claras y posee variación de fase de color. En figura 1.1 podemos ver como era la arquitectura usada para transmisiones analógicas [DTV2009]

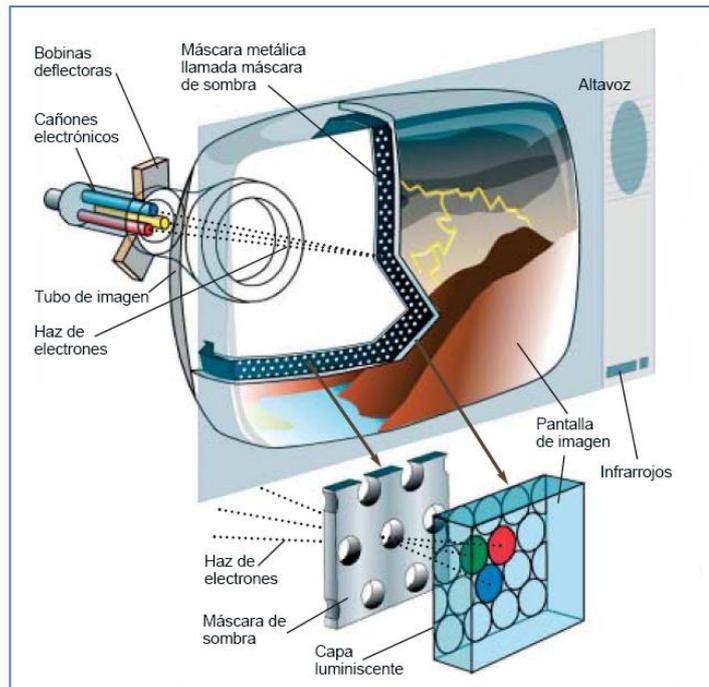


FIGURA 1-1: ARQUITECTURA DE UN TELEVISOR ANALÓGICO

Fuente: "DTV" [DTV2009]

Es así como nace la Televisión digital (DTV) como solución a estos problemas.

1.2 Televisión Digital:

Es un sistema de transmisión de imágenes y audio a través de señales digitales, es decir codifica las señales de manera binaria. Digitalización significa trasladar la información de imagen y sonido del dominio temporal (analógico) a un campo binario (digital). Digitalizar es modificar el manejo, almacenamiento y transporte de las señales. [ART2007]

1.2.1 Características de la Televisión digital:

Dentro de las características que nos da este tipo de transmisión se encuentra [ART2007]:

- Eliminación de ruido
- Eliminación de fantasmas
- Mejoras en el color
- Mejor definición: Alta Definición
- Mejor Sonido
- Servicios Convergentes: Movilidad, Portabilidad, Interactividad.
- Amplio marco de control y Medición.
- Nuevas herramientas como compresión

- **Multitransmisión:** Las estaciones de TV pueden proveer varios canales de programación de televisión al mismo tiempo.

1.2.1.1 Niveles de Calidad:

Dentro de la televisión digital se encuentra niveles de calidad [DTV2009b]:

1. **Televisión de definición estándar (Standard Definition TV, SDTV):** La SDTV es el nivel básico de calidad de visualización y resolución, tanto para formato analógico como digital. La transmisión de la SDTV puede realizarse tanto en el formato tradicional (4:3) o de pantalla ancha (16:9).
2. **Televisión de definición mejorada (Enhanced Definition TV, EDTV):** La EDTV está un nivel más arriba que la televisión analógica. La EDTV viene en formato de pantalla ancha (16:9) o tradicional (4:3) de 480p y proporciona una mejor calidad de imagen que la SDTV, pero no tan buena como la HDTV.
3. **Televisión de alta definición (High Definition TV, HDTV):** La HDTV en formato de pantalla ancha (16:9) proporciona la calidad de resolución e imagen más alta de todos los formatos de transmisión digital. Combinada con tecnología de sonido mejorada digitalmente, la HDTV establece nuevos estándares en calidad de sonido e imagen en televisión. (Nota: La HDTV y la televisión digital no son lo mismo: La HDTV es un formato de televisión).

1.2.1.2 Compresión de Señales (MPEG-2):

El audio y video se pueden comprimir digitalmente, lo cual permite una mayor cantidad de señales por un mismo canal. El estándar de compresión más usado es MPEG-2, el cual es un esquema híbrido de codificación inter-trama e intra-trama, combina la codificación predictiva con la codificación de transformada discreta de coseno DCT. La DCT es un algoritmo matemático (conversión del dominio del tiempo hacia el dominio de la frecuencia), que es aplicado a un bloque de 8x8 elementos de imagen, dentro de un cuadro. La DCT elimina redundancia en la imagen a través de la compresión de la información contenida en 64 píxeles. Posee un cuantizador que otorga los bits para los coeficientes DCT más importantes, los cuales son transmitidos. Con el MPEG-2 se genera velocidades de pixel de 5 a 10 Mbits/s.

También se está empezando a usar el MPEG-4 el cual es un algoritmo de compresión de videos y graficas, basado en la tecnología MPEG-1, MPEG-2 y Apple Quick Time. Sus usos principales son como flujos de medios audiovisuales, el vídeo en cd, las videoconferencias, las videollamadas y la emisión de televisión. Los archivos MPEG-4 pueden transmitir video e imágenes con menos ancho de banda que JPEG, pueden mezclar video con texto, graficas, y capas de animación 2D y 3D. Con el uso de MPEG-4 se puede duplicar la eficiencia del MPEG-2, por lo que uno de los usos del MPEG-4 es en la televisión digital HD (High Definition). En general, una señal estándar (270Mbps) sin compresión necesitaría 80 MHz para ser transmitida: equivalente a más de 13 Canales de 6 MHz. En cambio, una señal de Alta Definición (1,500 Mbps) sin compresión necesitaría 420 MHz para ser transmitida: equivalente a 70 Canales de 6 MHz. [HER1997]

1.2.1.3 Modulación VSB:

También llamada Modulación de Banda lateral residual, En este tipo de modulación se transmite casi completamente una de las bandas laterales, mientras que la otra solo se transmite una parte muy pequeña (la banda residual). Se basa en la modulación de pulsos por amplitud y se monta en una única portadora. [FER2002] Esta modulación es usada en el estándar de TV digital ATSC, en el cual se desarrolló el 8-VSB; es decir, la portadora se modula en 8 niveles sin información de fase, posee un C/N de 15db y una velocidad de 19Mbps y un BW de 6 MHz.

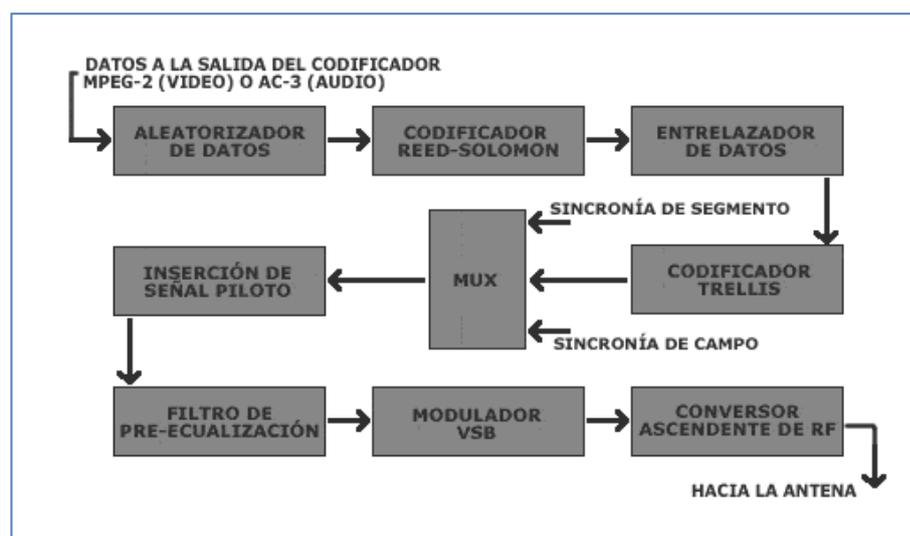


FIGURA 1-2: TRANSMISIÓN 8-VSB

Fuente: "ATSC o DVB?" [CIN2008]

1.2.1.4 Modulación COFDM:

El COFDM (Multiplexación por división de frecuencia ortogonal codificada), usado en los estándares DVB-T y ISDB-T, modula la información en múltiples frecuencias portadoras ortogonales donde cada una está modulada en QPSK (modulación con desplazamiento de fase cuaternaria) o QAM (modulación de amplitud en cuadratura).

Debido al efecto de propagación multi-trayectoria, la información almacenada en cada sub-portadora puede ser atenuada por sí misma en caso de que llegue antes o después al receptor, debido al multicamino, Pero debido a que la información fue dividida en pequeños pedazos la pérdida de alguna de ellas no afectará la recuperación de la información original. [CIN2008]

El COFDM presenta codificación contra errores, entrelazamiento de las portadoras de datos en frecuencia o en tiempo y frecuencia e información de estado del canal (Channel State Information) combinado con la decodificación con decisión Flexible (Soft-Decision Decoding).

El estándar COFDM define diferentes posibles modos de transmisión según el número de portadoras utilizadas, 2K (2.048 portadoras), 4K (4.096 portadoras), 8K (8.192 portadoras). En cada segmento de tiempo las subportadoras son moduladas en QPSK ó 16-QAM.

Dentro de sus ventajas encontramos la modulación jerárquica la cual permite integrar la modulación QPSK dentro de la constelación de QAM de 16 o más niveles permitiendo transmitir dos servicios al mismo tiempo y hace que la transmisión QPSK sea menos susceptible a las interferencias que en el caso de QAM de 16 o de más niveles no jerárquicos. Bajo este criterio se puede transmitir en un flujo de datos de baja prioridad el servicio de HDTV y en el flujo de alta prioridad el servicio de SDTV. [CIN2008]

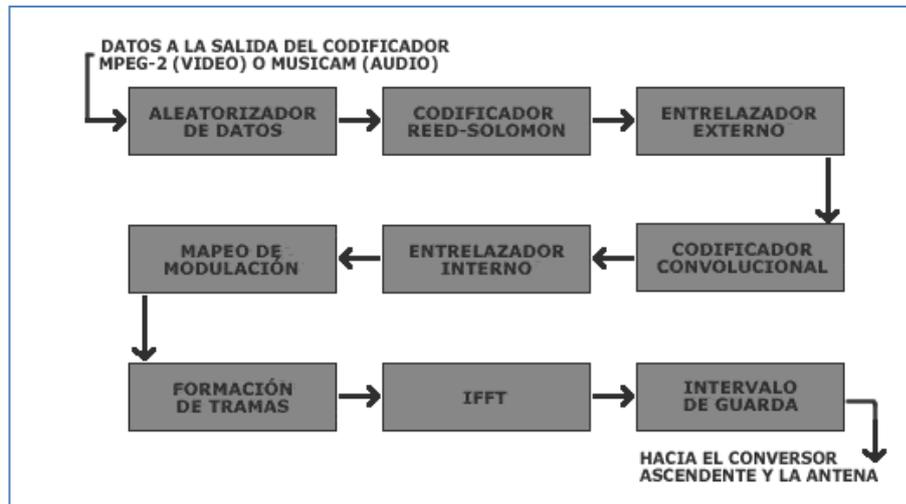


FIGURA 1-3: TRANSMISIÓN DE COFDM

Fuente: "ATSC o DVB?" [CIN2008]

1.2.2 Estándares de Televisión Digital:

Se tomará en cuenta los 4 estándares más importantes:

1.2.2.1 ATSC:

El estándar ATSC (Advanced Television Systems Committee) fue desarrollado por el consorcio de empresas llamada Grand Alliance. Fue el estándar desarrollado y adoptado por Estados Unidos.

Dentro de las características más importantes se encuentra [SUB2006], [CAB2008]:

- Describe un sistema para transmisión de video, audio y datos cuya velocidad de transmisión neta es 19.4 Mbps con un ancho de banda convencional de 6 MHz.
- Puede transmitir una señal única de HDTV o programas diferentes con definición estándar SDTV, además puede transmitir canales de audio o servicios especiales.
- Básicamente el diagrama de bloques de ATSC presenta 3 subsistemas:
 1. Codificación y Compresión de fuentes (video, audio y datos)
 2. Multiplexación y transporte de servicios.
 3. Transmisión en RF

Como se puede ver en el siguiente gráfico:

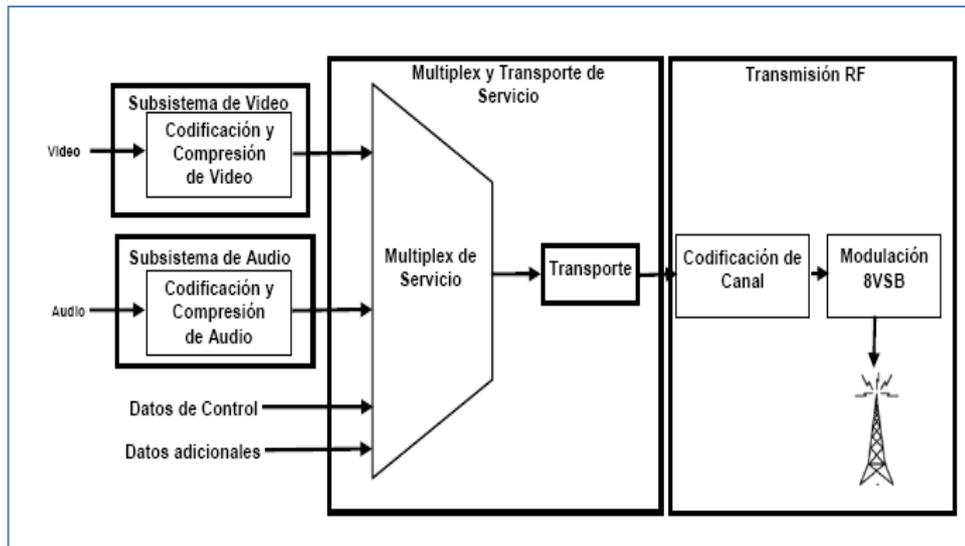


FIGURA 1-4: SISTEMA ATSC

Fuente: "Análisis de los Estándares de Transmisión de Televisión Digital Terrestre y su aplicabilidad al medio Nacional." [SUB2006]

- El subsistema de Codificación y Compresión de Fuente comprime los flujos de audio y video para minimizar la cantidad de bits de información. Para esta compresión y codificación de flujo de video se usa el MPEG-2, mientras que para la compresión de audio digital se usa la norma de compresión Dolby AC-3.
- El subsistema de Multiplexación y Transporte de Servicios divide el flujo continuo de información, inserta marcas de identificación únicas en cada paquete. Multiplexa los flujos de video, voz y datos anexos para componer un único flujo de control. El ATSC posee un sistema de multiplex y transporte definido por el estándar MPEG-2.
- El subsistema de Transmisión RF agrega codificación de canal y modulación del flujo de transporte para su transmisión inalámbrica. El sistema de modulación usado es 8VSB para transmisiones terrestres y de 16VSB para Tv por cable.
- Dentro del sistema de codificación de canal se hace una aleatorización de datos y luego se procesan con un bloque de corrección de errores llamado Red Solomon (RS), seguido por un entrelazador el cual da protección a la señal cuando hay errores de ráfaga y un codificador de Trellis (TCM) el cual da una segunda capa protección contra errores.

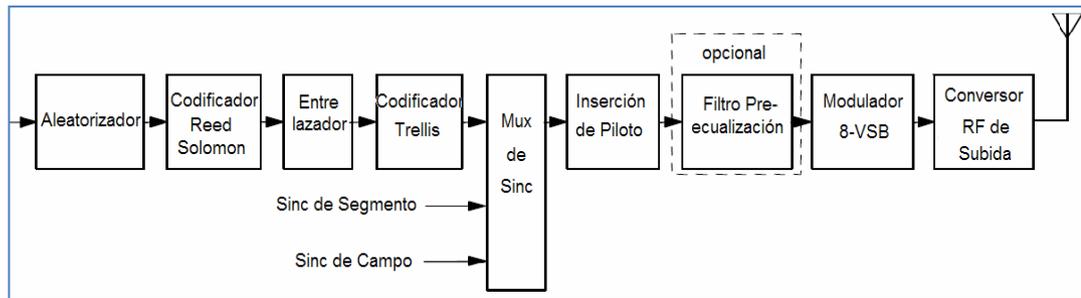


FIGURA 1-5: DIAGRAMA DEL SISTEMA DE CODIFICACIÓN DE CANAL

Fuente: “Análisis de los Estándares de Transmisión de Televisión Digital Terrestre y su aplicabilidad al medio Nacional.” [SUB2006]

Actualmente este estándar es usado en EEUU, Canadá, México, Corea del Sur.

1.2.2.2 DVB-T:

Es el estándar de televisión digital europeo (Digital Video Broadcasting), fue establecido por la ETSI (European Telecommunications Standards Institute).

Dentro de las principales características se encuentra [SUB2006], [CAB2008]:

- Provisión de servicios interactivos mediante canales de retorno de diversos medios (PSTN, GSM, satelital, etc.) y protocolos (IP).
- Transmisión de DVB-T mediante red de frecuencia única.
- Acceso condicional a contenido pagados y protegidos de copia.
- DVB fue diseñado para transmitir información de audio y video codificado según el estándar MPEG-2, esto asegura que sea compatible con otros medios de almacenamiento de contenido tales como DVD, DVC, D-VHS.
- Posee una tasa de transmisión de 3.73-23.75 Mbps.
- Usa modulación COFDM 2K (1512 subportadoras), 4K (3024 subportadoras) u 8K (6048 subportadoras).
- El sistema es muy parecido al de ATSC

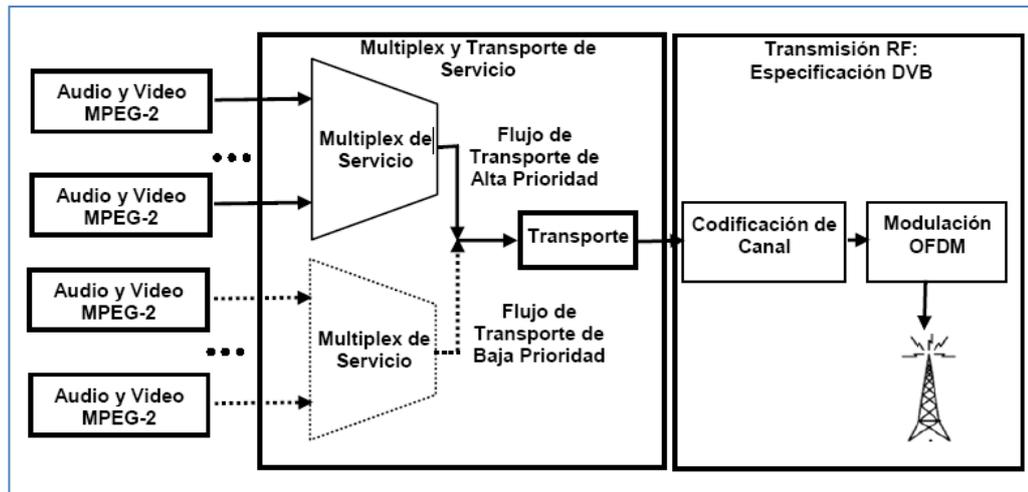


FIGURA 1-6: SISTEMA DVB-T

Fuente: "Análisis de los Estándares de Transmisión de Televisión Digital Terrestre y su aplicabilidad al medio Nacional." [SUB2006]

- El sistema DVB-T permite combinar jerárquicamente hasta 2 flujos de transporte en una sola transmisión digital, uno con alta prioridad (AP) y otro de baja prioridad (BP). El flujo AP requiere menor SNR para ser decodificado que el BP. Cada flujo posee diferente tipo de modulación COFDM. El flujo AP podría usarse para señales con una codificación de alta redundancia (baja tasa de Transmisión) y su decodificación podría hacerse para largas distancias, generalmente usado para enviar SDTV. En cambio el BP es usado para señales de alta tasa de transmisión y por lo tanto su decodificación será a corta distancia, usado en HDTV. El receptor es capaz de escoger libremente alguno de los 2 flujos, y cada flujo puede contener programación totalmente distinta.
- En el caso del audio, el sistema puede transportar hasta seis señales de audio, es decir, sonido envolvente, con una tasa de 384 Kbps.
- El sistema DVB-T fue diseñado para manejar la Interferencia Dentro del Canal (IDC) e Interferencia de Canal Adyacente (ICA). Posee alto grado de protección a través del uso de código Reed-Solomon y Convolutacional.

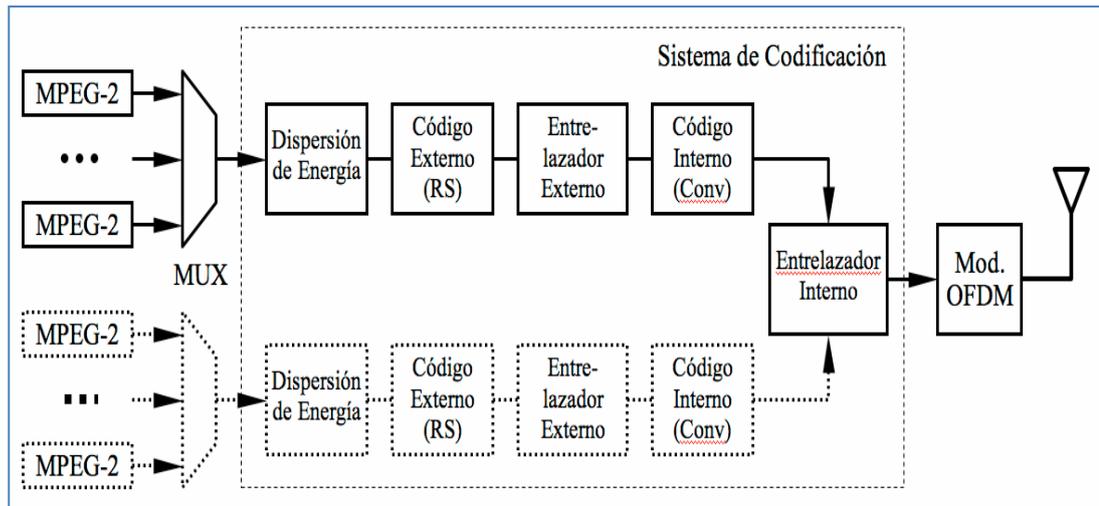


FIGURA 1-7: SISTEMA DE CODIFICACIÓN DE CANAL DE DVB-T

Fuente: “Análisis de los Estándares de Transmisión de Televisión Digital Terrestre y su aplicabilidad al medio Nacional.” [SUB2006]

Sin embargo el DVB-T no especificaba el formato de los contenidos, lo cual era dejado en manos de los operadores y de sus planes de negocio. Además el DVB-T no contemplaba el servicio de TV digital para dispositivos portátiles tales como celulares o PDAs por lo que se creó el estándar DVB-H. [CAB2008]

DVB-H:

Es una extensión de la norma DVB-T incorporada en 2004 para definir formato de distribución de Tv digital en dispositivos portátiles. Realiza convergencia de Redes de Radio móviles y redes de radiodifusión. Dentro de los nuevos elementos incorporados en el DVB-H encontramos [SUB2006], [CAB2008]:

- Fuente IP: Las señales DVB-H son datagramas IP, ya no MPEG-2.
- Codificación de Canal Adicional: Para soportar mayor degradación presente en redes móviles.
- Transmisión por Ráfagas: Para operar con mayor eficiencia energética.
- Modulación COFDM 4K: Ofrece mayor flexibilidad a los operadores para configurar y planificar la red. Forma redes isofrecuencia favorables para red móvil, le da mayor movilidad (mejor que 2K) y mayor área de cobertura (mejor que 8K).

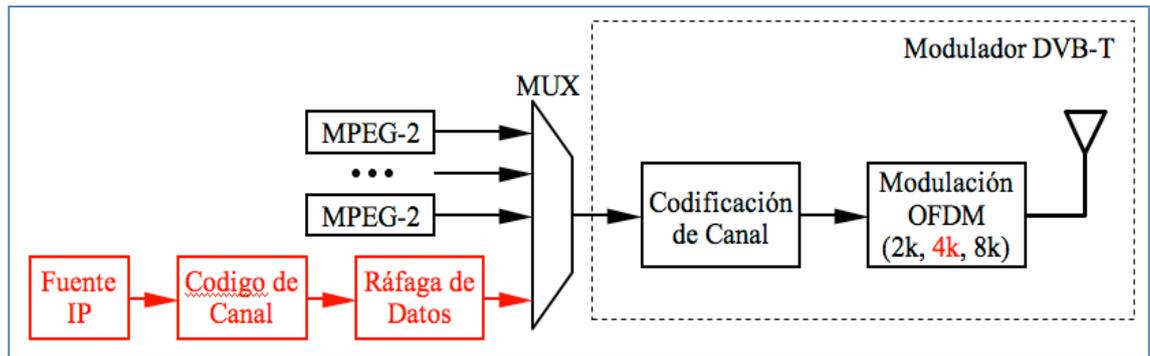


FIGURA 1-8: ELEMENTOS DEL SISTEMA DVB-H (EN ROJO) DENTRO DE DVB-T

Fuente: “Análisis de los Estándares de Transmisión de Televisión Digital Terrestre y su aplicabilidad al medio Nacional.” [SUB2006]

Actualmente este estándar se usa en Europa, Taiwán, Singapur, Colombia.

1.2.2.3 ISDB-T:

El sistema ISDB (Integrated Services Digital BroadCasting) es el estándar de Tv digital japonés, fue establecido por el ARIB (Association of radio Industries and Businesses) de Japón.

Dentro de las principales características tenemos [SUB2006], [CAB2008]:

- Provisión de servicios interactivos sobre diversos canales de retorno (móviles, líneas telefónicas fijas, redes cableadas e inalámbricas.
- Transmisión de señales mediante red de frecuencia única.
- Codificación basada en MPEG-2 tanto para audio como video.
- Soporta transmisión en otros formatos de datos como MPEG-4.
- Usa códigos de canal Reed-Solomon y Convolucionales y aleatorizador.
- Posee una tasa de transmisión de 3.65 – 23.23 Mbps
- Usa modulación COFDM en modo 2K, 4K, 8K y modulación QAM para las subportadoras.

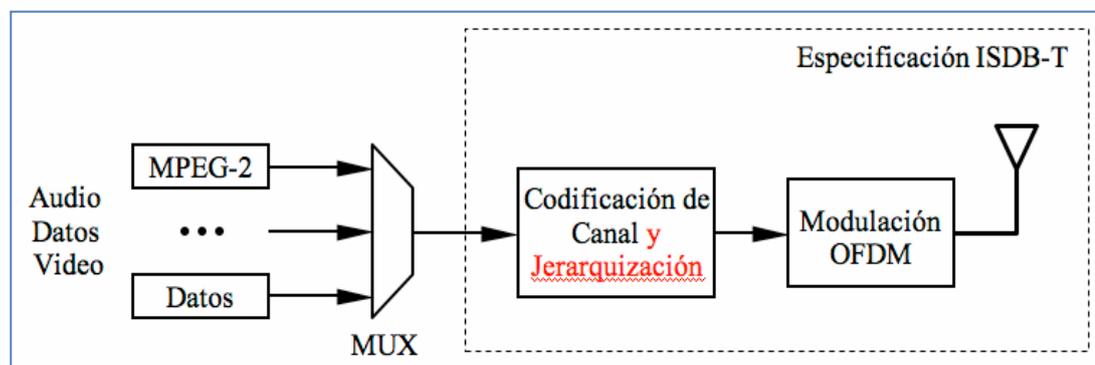


FIGURA 1-9: DIAGRAMA GENERAL DE ISDB-T

Fuente: “Análisis de los Estándares de Transmisión de Televisión Digital Terrestre y su aplicabilidad al medio Nacional.” [SUB2006]

- Posee una gran diferencia con DVB-T, usa un esquema conocido como BST-OFDM (Band Segmented Transmission – OFDM), en el cual se divide la banda de transmisión en segmentos para asignarle diferentes servicios.
- La banda de transmisión (6MHz) es dividida en 13 segmentos, cada uno es de 430KHz de ancho, los 13 segmentos forman grupos, como máximo 3 grupos.

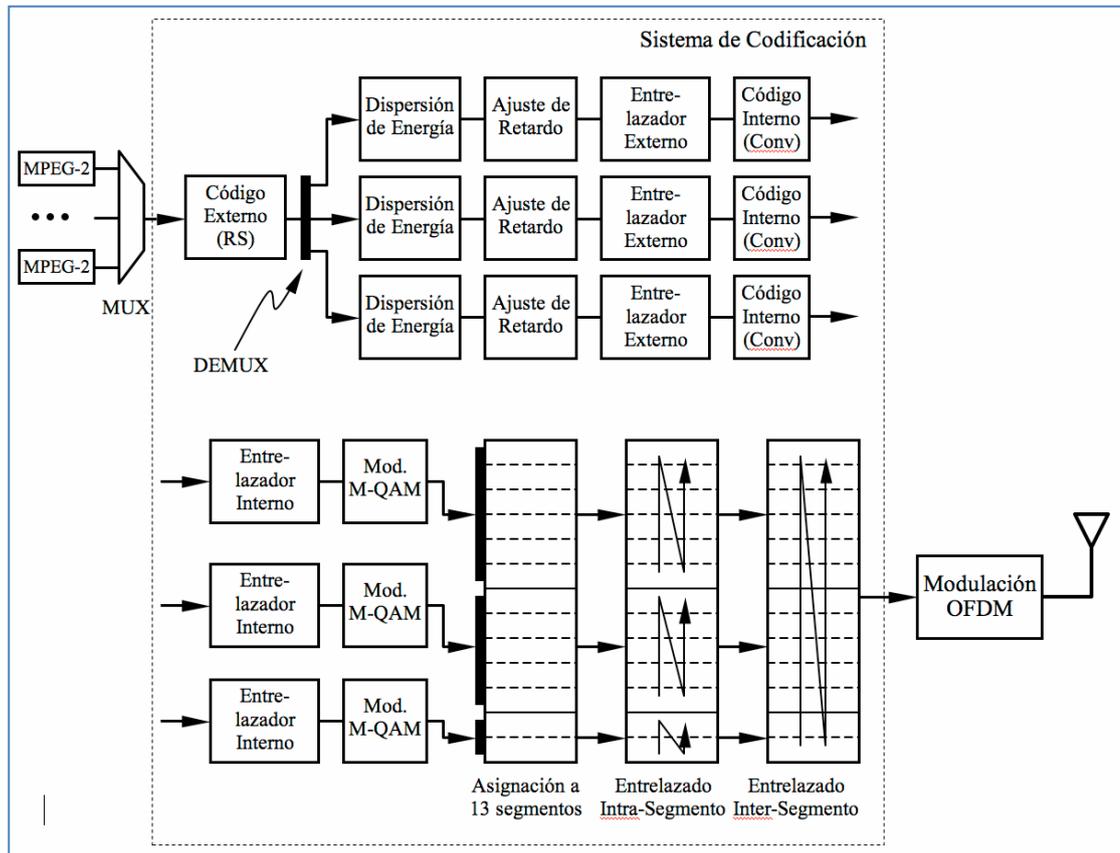


FIGURA 1-10: SISTEMA DE CODIFICACIÓN DE CANAL Y JERARQUIZACIÓN

Fuente: “Análisis de los Estándares de Transmisión de Televisión Digital Terrestre y su aplicabilidad al medio Nacional.” [SUB2006]

- Para el caso de transmisión a terminales portátiles, se consideró el concepto de recepción parcial en el cual se usó solo uno de los segmentos (1seg), con lo cual se hace más sencillo (barato) un receptor, posee un eficiente consumo de energía, ya que no necesita decodificar los otros 12 segmentos.
- El sistema 1-seg usa codificación H.264 la cual está incluida en el estándar MPEG-4 y para audio usa AAC encapsulado en MPEG-2. Además posee una resolución máxima de 320x240 pixeles, y una tasa de 128Kbps.

- 1-seg no implementa funciones de acceso condicional ni protección por lo que el servicio es gratis.

Actualmente este estándar es usado en Japón, Brasil, Chile, Perú, Argentina, Ecuador.

1.2.2.4 DTMB:

El sistema DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcast) Es el estándar de televisión para terminales fijo y móviles china. Este DTMB surge de la fusión de los estándares ADTB-T (desarrollado por la universidad de Shanghai), DMB-T (Desarrollado por la universidad de Beijing) y el TiMi (Terrestrial Interactive Multiservice Infrastructure) propuesto por la Academia de Ciencias de Radiodifusión. [DTM2010]

Dentro de las principales características del estándar tenemos:

- Tasa de transmisión de bits: de 4.813Mbps a 32.486Mbps.
- La transmisión de datos es implementada mediante el estándar TDS-OFDM ("Time Domain Synchronuous Orthogonal Frequency Division Multiplexing"), el cual, de acuerdo con el co-desarrollador de DMB-T con la Universidad Tsing Hua, es capaz de transmitir calidades "aceptables" de señal para receptores HDTV moviéndose (por ejemplo, en coche o tren) a velocidades de hasta 200 Km/h.
- DTMB no define códecs de compresión (como MPEG-4 y MPEG-2), dejando esa decisión a discreción del transmisor. Eso significa que los receptores tendrán que ser capaces de descifrar múltiples formatos, lo que los hará más caros, pero a su vez los distribuidores de señal podrán prestar otro tipo de servicio que permita a los canales de televisión emitir con las características que ellos deseen, dando servicio a la alta definición e incluso a la interactividad con el usuario.
- Difusión de SD, HD, y servicios multimedia.
- Para los Codecs de Audio la norma establece Dolby Digital, también conocido como AC-3 (Audio Codec 3) y SR-D (Spectral Recording-Digital).
- Flexibilidad de servicios
- Procesamiento de datos en dominio temporal y frecuencial
- Difusión de entre 6 y 15 canales en SD y 1 o 2 en HD

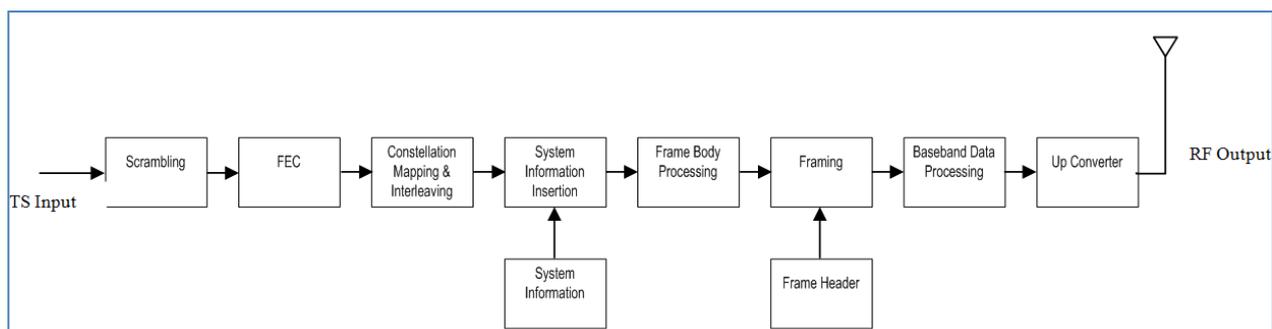


FIGURA 1-11: SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE DTMB

Fuente: “Estándar DTMB.” [DTM2010]

Actualmente los países que han adoptado este estándar son: China. Macao y Hong Kong.

1.2.2.5 Cuadro comparativo entre los estándares:

Después de haber visto las características principales de cada estándar, veremos un cuadro comparativo. [CAB2008]

TABLA 1-1: CUADRO COMPARATIVO DE ESTÁNDARES DE TV DIGITAL

	ATSC	DVB	ISDB-T	DTMB
Aplicativo	HD/ SD/ Datacasting	HD/ SD/ Datacasting	HD/ SD/ Datacasting	HD/ SD/ Datacasting
Móvil	No	Si (con DVB-H)	Si	Si
Portátil	No	No	Si	Si
Middleware	DASE	MHP	ARIB	
Compresión de Audio	Dolby AC-3	MPEG-2	MPEG-2 ACC	Dolby AC-3
Compresión de Video	MPEG-2	MPEG-2	MPEG-2	MPEG-2, MPEG-4
Transporte	MPEG-2	MPEG-2	MPEG-2	MPEG-2
Modulación	8-VSB	COFDM	COFDM	TDS-OFDM
Tasa de Transmisión	19.33 Mbps	3,73-23,75 Mbps	3.65-23,23 Mbps	4,81–32,48Mbps

Se sabe que a partir del año del 2007 se creó la Comisión Multisectorial la cual estaba conformada por un representante del MTC, dos representantes de la Presidencia del Consejo de Ministros a propuesta del Instituto de Radio y Televisión del Perú, un representante del Ministerio de la Producción, un representante del Ministerio de Relaciones Exteriores, un representante de la sociedad civil a propuesta del Consejo Consultivo de Radio y Televisión, dicha Comisión era la encargada de elegir, entre estos estándares, el estándar para TDT en Perú. Esta comisión decidió en abril del 2009 adoptar el estándar ISDB-T con las mejoras que hubiere en ese momento, es decir, con las innovaciones brasileñas. Las características más resaltantes para diseñar las antenas fractales, según este estándar, serán vistas en capítulos posteriores, antes de ello desarrollaremos toda la teoría necesaria para el desarrollo y diseño de las antenas fractales.

Capítulo 2

GEOMETRÍA FRACTAL

En el presente capítulo hablaremos sobre toda la teoría de la Geometría Fractal, desde la definición de fractal, dimensión fractal, propiedades, las aplicaciones de ésta en el desarrollo de antenas multibanda y toda la teoría electromagnética desarrollada en función de esta geometría.

2.1 Introducción:

La geometría Euclidiana, aprendida tanto en la escuela como en el colegio, nos enseñaba a estudiar y comprender la línea, el plano y las figuras en 3D, y nos indicaba que todo elemento de la naturaleza poseía una característica llamada Dimensión. Esta Dimensión es el número de coordenadas necesarias para ubicar un punto en una figura.

Tenemos el caso de una línea la cual solo posee una dimensión, ya que es solo necesario una coordenada para encontrar un punto en dicha línea.

Luego tenemos el plano el cual posee 2 dimensiones y luego tenemos figuras en 3D tales como un cubo, un cilindro o una esfera las cuales poseen 3 dimensiones.

Todas las figuras eran explicadas por esta geometría euclidiana hasta que aparecieron teorías como la de la relatividad que no encajaban dentro de esta geometría, además existían elementos de la naturaleza, tales como las nubes, las hojas, montañas, las cuales no poseían una dimensión exacta, ya que la geometría euclidiana solo permitía figuras con una dimensión entera. [MOC2002][ARA2007]

Es por ello que se creó otro tipo de geometría llamada Fractal para explicar estas excepciones, en el cual fractal implica características importantes:

- Auto similitud
- Recursividad
- Space-Filling
- Detalle Infinito

2.2 Dimensión Fractal:

Empezaremos citando una frase de Benoit Mandelbrot (matemático conocido por sus trabajos con fractales): “Las nubes no son esferas, las montañas no son conos, los litorales no son círculos, la corteza no es uniforme, ni un rayo de luz viaja en línea recta”. [VAN2010], [BOU1991], [MOC2002]

Hasta ahora hemos usado el término dimensión en 2 sentidos:

- Las 3 dimensiones del espacio euclidiano
- El número de variables en un sistema dinámico.

Pero en los fractales, los cuales son objetos geométricos irregulares, se requiere de un tercer significado: Dimensión Hausdorff.

Según este nuevo enfoque, si se toma un objeto que reside en la dimensión euclidiana D y se reduce su tamaño lineal de $1/r$ en cada dirección espacial, su medida (longitud, área o volumen) aumentaría a $N = r^D$ veces el original.

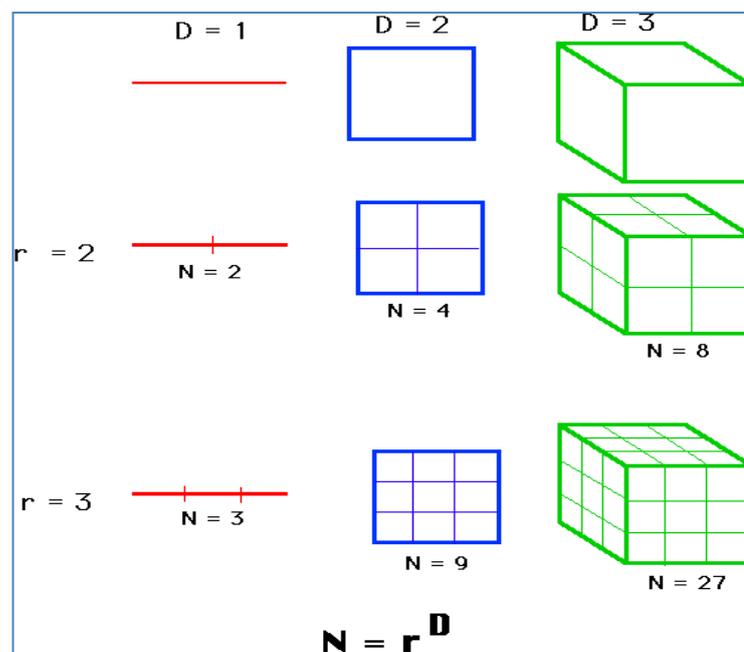


FIGURA 2-1: DIMENSIÓN HAUSDORFF

Fuente: “Fractal and the Fractal dimensión” [VAN2010]

Se obtiene $N=r^D$. Luego despejando D obtenemos:

$$D = \frac{\log N}{\log r}$$

De esta manera, se puede notar que D no necesariamente puede ser un entero, como sí lo es en la geometría euclidiana. D podría ser una fracción, como lo es en la geometría fractal. Este nuevo modelo ha demostrado ser útil para describir objetos de la naturaleza y trayectorias de sistemas dinámicos.[VAN2010], [BOU1991], [MOC2002]



FIGURA 2-2: FRACTALES EN LA NATURALEZA

Fuente: “Diseño y Construcción de una Antena Fractal Multibanda para Telefonía Móvil Celular” [OLT2009]

Los fractales más importantes son:

2.2.1. Línea de Koch:

Se empieza con una línea recta de longitud 1 (iniciador), a continuación se retira el tercio medio de la línea y se sustituye por dos líneas de longitud $1/3$. Y así empezamos a iterar un número infinito de veces. Con lo que se obtiene:



FIGURA 2-3: INICIADOR

Fuente: “Fractal and the Fractal dimensión” [VAN2010]

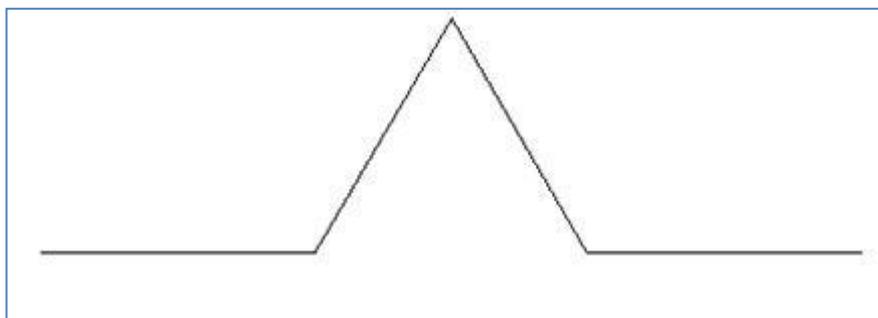


FIGURA 2-4: LÍNEA DE KOCH - ITERACIÓN 1

Fuente: “Fractal and the Fractal dimensión” [VAN2010]

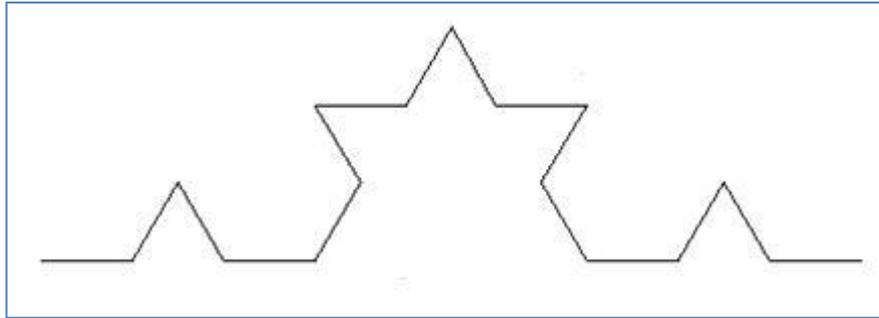


FIGURA 2-5: LÍNEA DE KOCH - ITERACIÓN 2

Fuente: "Fractal and the Fractal dimensión" [VAN2010]

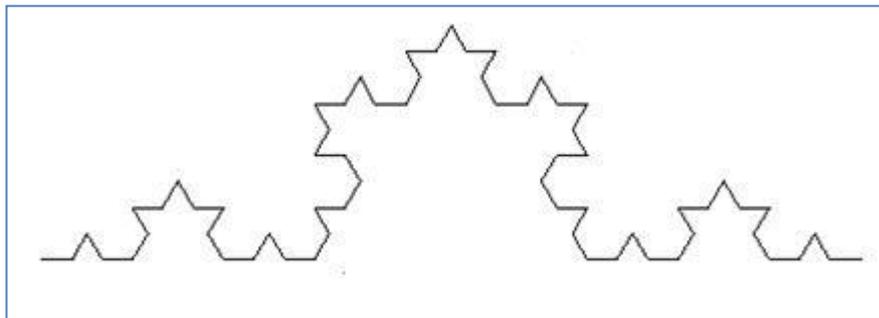


FIGURA 2-6: LÍNEA DE KOCH - ITERACIÓN 3

Fuente: "Fractal and the Fractal dimensión" [VAN2010]

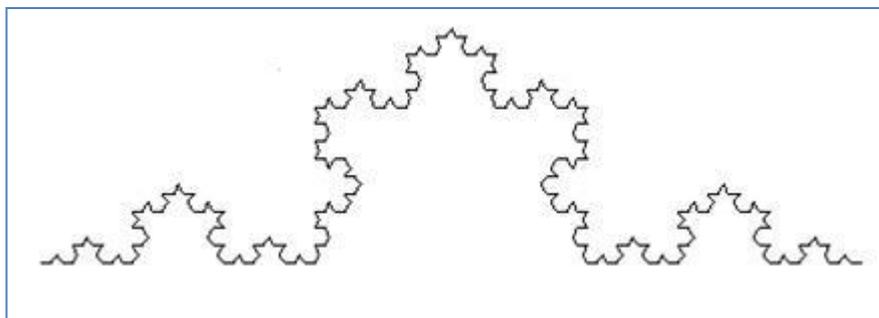


FIGURA 2-7: LÍNEA DE KOCH - ITERACIÓN 4

Fuente: "Fractal and the Fractal dimensión" [VAN2010]

Se nota que en cada iteración la longitud de la línea es $\frac{4}{3}$ la longitud anterior. Lo cual hace que la longitud tienda al infinito.

Luego usando la ecuación de Dimensión de Hausdorff tenemos que:

$$D = \frac{\log 4}{\log 3} = 1.26$$

Otro fractal conocido es el copo de nieve de Koch, el cual se genera usando 3 iniciador, los cuales formarán un triángulo equilátero.[VAN2010]

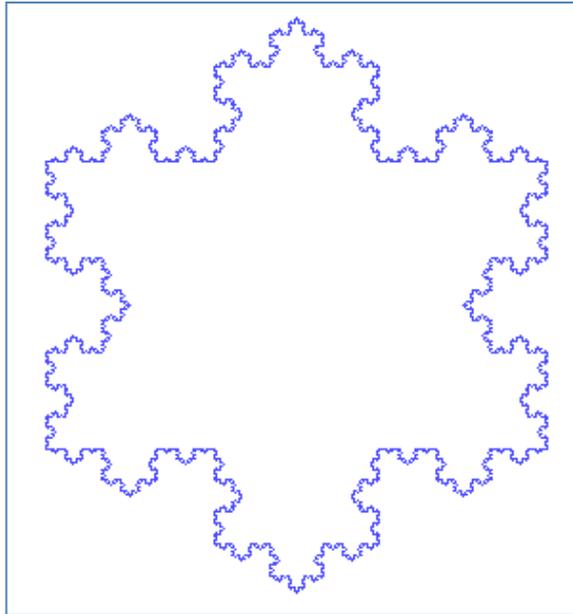


FIGURA 2-8: COPO DE NIEVE DE KOCH

Fuente: "Fractal and the Fractal dimensión" [VAN2010]

2.3. Propiedades de los Fractales:

Se procederá a enumerar las características de los fractales, pero se debe resaltar que no todos los fractales poseen todas las propiedades, algunos poseen varias de estas propiedades mas algunos poseen pocas de estas. También cabe resaltar que el cumplir con una de estas propiedades es razón suficiente para asegurar que se trata de un fractal. [OLT2009]

2.3.1. Autosimilitud:

Es la característica más importante y común en un fractal. En un fractal cada porción o sección del mismo es exactamente o muy parecido a una escala reducida de la forma total del fractal. [OLT2009]

Dentro de ésta propiedad se puede subdividir en:

- Autosimilitud Exacta: El fractal debe ser idéntico a diferentes escalas.
- Cuasi-similitud: El fractal debe ser aproximadamente idéntico a diferentes escalas. En este tipo, los fractales poseen copias menores y distorsionadas de él mismo
- Autosimilitud Estadística: Es el tipo más débil de autosimilitud, se exige que el fractal tenga medidas numéricas o estadísticas que se preserven con el cambio de escala.

2.3.2. Recursividad:

Hace referencia a la capacidad de crecimiento de este tipo de geometrías. Los fractales “crecen” mediante algoritmos recursivos o también llamados ITERACIONES. Las iteraciones nos indican el número de veces que se aplicó el algoritmo recursivo. [OLT2009]

2.3.3. Space Filling:

Es la capacidad que tienen los fractales para aproximarse a dimensiones de orden 2, incluso hasta 3, a partir de una dimensión de orden 1, mediante sucesivas iteraciones, es por ello que se dice que los fractales poseen dimensión fractal o fraccionaria. [OLT2009]

2.3.4. Detalle Infinito

Los detalles que posee el fractal se pueden visualizar a cualquier escala, a medida que aumentamos el número de iteración, más detalle revelará este, sin que tenga un límite en que se pierda la estructura básica. Es decir, la estructura se repite hasta el infinito tanto a nivel macroscópico como en lo microscópico. [OLT2009]

2.4. Antena Fractal:

La Geometría fractal revolucionó varias áreas de la ciencia, tales como física, procesamiento digital de señales, compresión de imágenes y teoría de antenas.

Dentro de la teoría de antenas, se sabe que para un tamaño fijo de antena se tienen parámetros como impedancia de entrada, patrón de radiación, ganancia que varían significativamente con la frecuencia, varían todas las propiedades eléctricas.[ARA2007]

El tamaño de la antena va relacionado con la longitud de onda de la banda de trabajo de la antena, es por ello que se las antenas solo trabajan en una sola banda.

Los Fractales permiten diseñar antenas multibanda, ya que con la geometría fractal se obtienen antenas que contienen en un solo objeto, copias de él mismo en diferentes tamaños, y esto permite el mismo comportamiento a diferentes frecuencias.

Una de las propiedades básicas de un objeto fractal es la autosimilitud. Un cuerpo fractal está formado por copias de él mismo reducidas en un cierto factor de escala. Las antenas multibanda recurren al principio de escalabilidad.

Con autosimilitud y la dimensión fractal se logra la miniaturización, multifrecuencia y mayor directividad.

El problema de las antenas fractales es que no se pueden implementar físicamente debido a que posee iteraciones infinitas, son abstractos.

En el caso del monopolo de Koch se genera capacitancia e inductancias adicionales, por lo que es innecesario agregarles elementos externos como sintonizadores para aumentar el ancho de banda.

Se demuestra que a mayor miniaturización la resistencia de entrada disminuye debido a la gran cantidad de ramas conductoras. [ARA2007]

V.H. Rumsey estableció, lo que se conoce hoy como la noción actual de las antenas de banda ancha. El principio dice que: “Los parámetros de una antena serán independientes de la frecuencia si la geometría puede ser descrita únicamente en función de ángulos, puesto que esta no variará al realizar un escalado”.

Este principio iba de acuerdo con la noción de una súper antena de banda ancha, la cual buscaba la máxima miniaturización y que a su vez cubra muchas bandas de frecuencia.

Las antenas fractales aparecieron como una opción para la creación de súper-antenas debido a sus propiedades de autosimilitud que implicaba un mismo comportamiento para diversas longitudes de onda y por su capacidad de space-filling. [OLT2009]

Si bien las antenas fractales poseen ambas características, las experiencias prácticas nos muestran que los fractales tiene rendimientos en sus parámetros que se repiten con precisión arbitraria dependiendo del grado de iteración y que por tanto no son independientes de la frecuencia, aunque sí logran cubrir diversas bandas cercanas y las bandas correspondientes a cada frecuencia resonante son generalmente estrecha. [OLT2009]

2.4.1. Principio de Escalabilidad:

Si tenemos una antena que funciona a una cierta frecuencia f , y multiplicamos sus dimensiones por un factor k , la antena resultante se comportará igual que la original pero a una frecuencia f/k . Si se tiene una antena formada por copias de ella misma pero en diferentes escalas, se obtiene un elemento con el mismo comportamiento electromagnético en tantas bandas de frecuencia como factores de escala contenga la estructura, y esto es un comportamiento multibanda

2.5. Teoría Electromagnética:

Los elementos más importantes son los campos eléctricos y magnéticos los cuales dependen de la distribución de corriente, además los campos dependen de la geometría de la antena.

2.5.1. Ecuaciones de Maxwell:

Todos los fenómenos electromagnéticos están gobernados por las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \dots\dots\dots 2.1$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots\dots\dots 2.2$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \dots\dots\dots 2.3$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \dots\dots\dots 2.4$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

Del cual se derivan 2 postulados importantes:

- Ley de Coulomb y Lorentz (ecuación 2.5)
- Ley de Conservación de Energía (ecuación 2.6)

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \dots\dots\dots 2.5$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots 2.6$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

2.5.2. Método de Momentos:

La mejor forma para conocer el comportamiento como radiador y conocer los parámetros principales como ganancia, patrón de radiación, impedancia de una antena es obtener la distribución de corriente en la antena.

Uno de los métodos para obtener esta distribución de corriente es el Método de Momentos, el cual es un método de aproximación que ayuda a resolver ecuaciones integrales donde el integrando es la incógnita. Como parte de la solución se elige una familia de ecuaciones independientes, llamada función base, cuya suma ponderada corresponde a la solución. Los factores de ponderación serán ahora las incógnitas. Adicionalmente, se elige un conjunto de funciones linealmente independientes, llamadas funciones de pesado y un producto interno entre las funciones base y las de pesado. [BAL2005]

En la electrostática, el problema de encontrar el voltaje que es debido a una carga de distribución se considera a menudo. Sin embargo, rara vez es posible especificar una distribución de carga. Considerando que se puede conectar un cuerpo conductor a una fuente de voltaje, y por lo tanto precisar el potencial a través del cuerpo, la distribución de carga es evidente sólo para unas pocas geometrías de simetría de rotación. Se tendrá en cuenta un enfoque integral de ecuación para resolver la distribución de carga eléctrica una vez que el potencial eléctrico es especificado.

De la estática conocemos que una distribución de carga eléctrica lineal $\rho(r')$ crea un potencial eléctrico $V(r)$. [BAL2005]

$$V(r) = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \int_{\text{source (charge)}} \frac{\rho(r')}{R} dl' \dots\dots\dots 2.7$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

Donde $r(x', y', z')$ denota el origen de coordenadas, $r(x, y, z)$ denota la coordenada de observación, dl' es la trayectoria de integración, y R es la distancia desde cualquier punto del origen hasta el punto de observación, que es generalmente representado por:

$$R(r, r') = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2} \dots\dots\dots 2.8$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

Se nota que se puede utilizar para calcular el voltaje que es debido a cualquier densidad de carga lineal conocida. Pero, la distribución de carga en la mayoría de configuraciones de interés práctico, como geometrías complejas, no es usualmente conocido, incluso cuando el voltaje en el origen es dado. Es el problema significativo de determinar la distribución de carga, para un voltaje específico, será resuelto usando un enfoque de solución integral ecuación-numérico. [BAL2005]

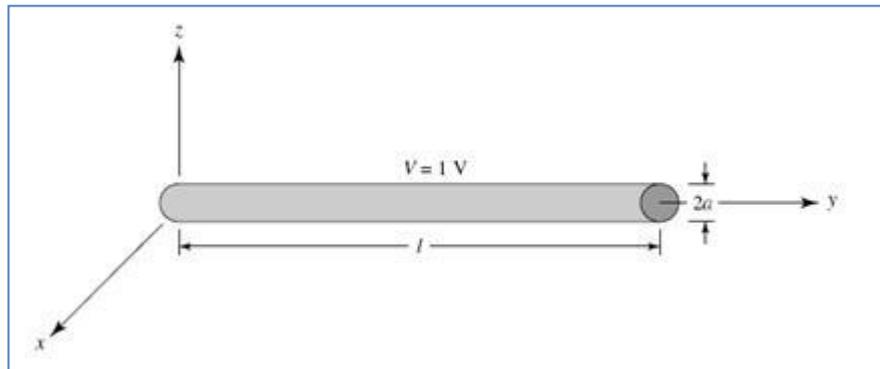


FIGURA 2-9: ALAMBRE RECTO

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

Considere un alambre recto de longitud l y radio a , colocados a lo largo del eje y , como se muestra en Figura 2.9. Al alambre se le da un potencial eléctrico constante normalizada de 1 V . Tenga en cuenta que (2.7) es válida en todas partes, incluso en el propio cable ($V_{\text{cable}} = 1 \text{ V}$). Por lo tanto, la elección de la observación a lo largo del eje de alambre ($x = z = 0$) y que representa la densidad de carga en la superficie del alambre, (2.7) se puede expresar como:

$$1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^l \frac{\rho(y')}{R(y, y')} dy', \quad 0 \leq y \leq l \dots\dots\dots 2.9$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

Donde:

$$R(y, y') = R(r, r')|_{x=z=0} = \sqrt{(y - y')^2 + [(x')^2 + (z')^2]} \dots\dots\dots 2.10$$

$$= \sqrt{(y - y')^2 + a^2}$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

El punto de observación se elige a lo largo del eje del alambre y la densidad de carga está representada a lo largo de la superficie del alambre para evitar que $R(y, y') = 0$, lo que introduciría una singularidad en el integrando de (2-9).

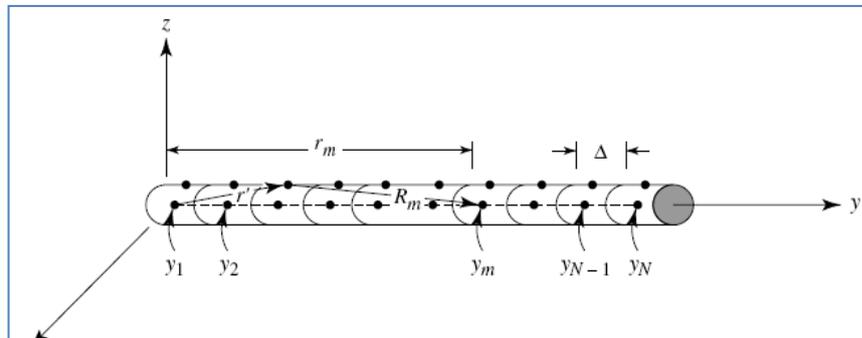


FIGURA 2-10: ALAMBRE SEGMENTADO

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

Es necesario resolver (2-9) para el desconocido $\rho(y')$. La ecuación (2-9) es una ecuación integral que puede ser usado para encontrar la densidad de carga $\rho(y')$ basado en el potencial 1-V. La solución puede ser alcanzada numéricamente reduciendo (2-9) a una serie de ecuaciones algebraicas que pueden ser resueltas por técnicas de matriz de ecuaciones convencionales. Para facilitar esto, vamos aproximar la distribución de carga desconocida $\rho(y')$ por medio de una expansión de N términos con constante conocida, pero con coeficiente desconocido, es decir: [BAL2005]

$$\rho(y') = \sum_{n=1}^N a_n g_n(y') \dots\dots\dots 2.11$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

Así (2-9) puede ser escrito, usando (2-11), como:

$$4\pi\epsilon_0 = \int_0^l \frac{1}{R(y, y')} \left[\sum_{n=1}^N a_n g_n(y') \right] dy' \dots\dots\dots 2.12$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

Ya que (2-12) es una ecuación no singular, la integración y la sumatoria puede ser intercambiada, y ser escrita como:

$$4\pi\epsilon_0 = \sum_{n=1}^N a_n \int_0^l \frac{g_n(y')}{\sqrt{(y-y')^2 + a^2}} dy' \dots\dots 2.13$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

El alambre es dividido en N segmentos iguales, cada uno de longitud $\Delta=l/N$, como se muestra en la figura (2-10). Las funciones $g_n(y')$ de la expansión (2-11) son escogidos por su habilidad por su capacidad para modelar con precisión la cantidad desconocida y reduciendo el cálculo.

Se refieren a menudo como funciones base o de expansión. Para evitar una complejidad en la solución se usará las funciones de subdominio de trozos constantes (pulsos). [BAL2005]

$$g_n(y') = \begin{cases} 0 & y' < (n-1)\Delta \\ 1 & (n-1)\Delta \leq y' \leq n\Delta \\ 0 & n\Delta < y' \end{cases} \dots\dots\dots 2.14$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

Reemplazando y en (2-12) por un punto fijo tal como y_m , resulta en un integrando que es únicamente una función de y' , entonces el integral será evaluado. Obviamente (2-12) conduce a una ecuación con N incógnitas a_n escritas como:

$$4\pi\epsilon_0 = a_1 \int_0^\Delta \frac{g_1(y')}{R(y_m, y')} dy' + a_2 \int_\Delta^{2\Delta} \frac{g_2(y')}{R(y_m, y')} dy' + \dots \\ + a_n \int_{(n-1)\Delta}^{n\Delta} \frac{g_n(y')}{R(y_m, y')} dy' + \dots + a_N \int_{(N-1)\Delta}^l \frac{g_N(y')}{R(y_m, y')} dy' \dots\dots\dots 2.15$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

Con el fin de obtener una solución para estas N amplitudes constantes, son necesarias N ecuaciones linealmente independientes. Estas ecuaciones deben ser producidas escogiendo N puntos de observación y_m cada uno en el centro de cada elemento de longitud Δ como se muestra en la figura (2-10). [BAL2005]

Esto da lugar a una ecuación de la forma de (2-15) correspondiente a cada punto de observación. Para dichos N puntos, se puede reducir (2-15) a:

$$\begin{aligned} 4\pi\epsilon_0 &= a_1 \int_0^\Delta \frac{g_1(y')}{R(y_1, y')} dy' + \dots + a_N \int_{(N-1)\Delta}^l \frac{g_N(y')}{R(y_1, y')} dy' \\ &\vdots \\ 4\pi\epsilon_0 &= a_1 \int_0^\Delta \frac{g_1(y')}{R(y_N, y')} dy' + \dots + a_N \int_{(N-1)\Delta}^l \frac{g_N(y')}{R(y_N, y')} dy' \end{aligned} \quad \dots 2.16$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

Podríamos escribir (2-16) más concisamente usando notación de matrices como:

$$[V_m] = [Z_{mn}][I_n] \quad \dots \dots \dots 2.17$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

Donde cada término Z_{mn} es igual a:

$$\begin{aligned} Z_{mn} &= \int_0^l \frac{g_n(y')}{\sqrt{(y_m - y')^2 + a^2}} dy' \\ &= \int_{(n-1)\Delta}^{n\Delta} \frac{1}{\sqrt{(y_m - y')^2 + a^2}} dy' \end{aligned} \quad \dots \dots \dots 2.18$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

Y

$$\begin{aligned} [I_n] &= [a_n] \\ [V_m] &= [4\pi\epsilon_0] \end{aligned} \quad \dots \dots \dots 2.19$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

La matriz columna V_m tiene todos los términos iguales a $4\pi\epsilon_0$, y los valores $I_n = a_n$ son coeficientes de distribución de carga desconocidos. Resolviendo (2-17) para $[I_n]$ dado:

$$[I_n] = [a_n] = [Z_{mn}]^{-1} [V_m] \quad \dots \dots \dots 2.20$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

Ambos, (2-17) y (2-20) pueden ser rápidamente resueltos en una computadora usando alguno de las series de inversión de matrices o una rutina de solución de ecuaciones. Considerando que la integral involucrada se puede evaluar en forma cerrada, haciendo aproximaciones apropiadas, esto no es usualmente posible con problemas más complicados. Las subrutinas computacionales de integrales numéricas eficientes están comúnmente disponibles en formas fáciles de usar. [BAL2005]

Una evaluación de forma cerrada de (2-18) es reducir la integral y representándolo por:

$$Z_{mn} = \begin{cases} 2 \ln \left(\frac{\frac{\Delta}{2} + \sqrt{a^2 + \left(\frac{\Delta}{2}\right)^2}}{a} \right) & m = n \\ \ln \left\{ \frac{d_{mn}^+ + [(d_{mn}^+)^2 + a^2]^{1/2}}{d_{mn}^- + [(d_{mn}^-)^2 + a^2]^{1/2}} \right\} & m \neq n \text{ but } |m - n| \leq 2 \\ \ln \left(\frac{d_{mn}^+}{d_{mn}^-} \right) & |m - n| > 2 \end{cases} \dots 2.21$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

Donde:

$$\begin{aligned} d_{mn}^+ &= l_m + \frac{\Delta}{2} \\ d_{mn}^- &= l_m - \frac{\Delta}{2} \end{aligned} \dots 2.12$$

Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

l_m es la distancia entre el m-ésimo punto y el centro del n-ésimo punto del origen. En resumen, la solución de (2-9) para la distribución de carga en un cable ha sido lograda mediante la aproximación de la incógnita con algunas funciones bases, dividiendo el alambre en segmentos, y luego hacer cumplir de forma secuencial (2-9) en el centro de cada segmento para formar un conjunto de ecuaciones lineales. Incluso en el caso de la geometría del alambre recto relativamente simple que hemos analizado, la forma exacta de la distribución de carga no es intuitivamente evidente. [BAL2005]

2.6. Generación de Figuras Fractales:

Uno de los métodos para generar una gran variedad de estructuras fractales son las IFS "Iterated Function Systems". Esta herramienta matemática se basa en la aplicación de una serie de transformaciones afines definidas por W , que se expresa como:

$$w \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix}$$

O en forma equivalente:

$$w(x, y) = (ax + by + e, cx + dy + f)$$

Donde a, b, c, d, e y f son números reales. Por lo tanto, la transformación afín w está representada por seis parámetros.

$$\begin{pmatrix} a & b & : & e \\ c & d & : & f \end{pmatrix}$$

a, b, c y d controlan la rotación y el escalado, mientras que $e, y f$ controlan la traslación de las líneas.

Considerando a $w_1, w_2, w_3, \dots, w_N$, como un conjunto de transformaciones lineales afines, y se define A como la geometría inicial. Se genera una nueva geometría, producida por la aplicación del conjunto de transformaciones a la geometría inicial. Entonces la nueva geometría, A , y los resultados de $w_1(A), w_2(A), w_3(A), \dots, w_N(A)$, pueden representarse por:

$$W(A) = \bigcup_{n=1}^N w_n(A)$$

Donde W se conoce como el operador de Hutchinson. Una geometría fractal puede obtenerse de la aplicación reiterada de W a la geometría anterior. Es decir, si A_0 representa la geometría inicial, entonces se tiene:

$$A_1 = W(A_0), A_2 = W(A_1), \dots, A_{k+1} = W(A_k)$$

Un IFS genera una secuencia que converge en una imagen final A_∞ de manera que:

$$A_\infty = W(A_\infty)$$

A esta imagen final se le denomina "atractor" del IFS y representa un punto determinado de W .

Existen ciertos tipos de transformaciones conocidas:

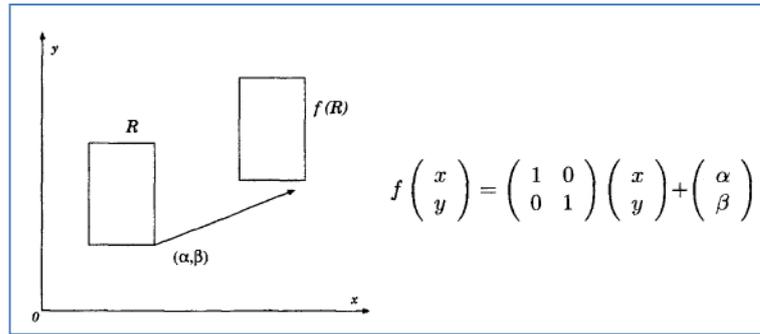


FIGURA 2-11: TRASLACIÓN MEDIANTE DEL VECTOR (α, β)
 Fuente: "Sistema de Funciones Iteradas y los fractales" [ADA2005]

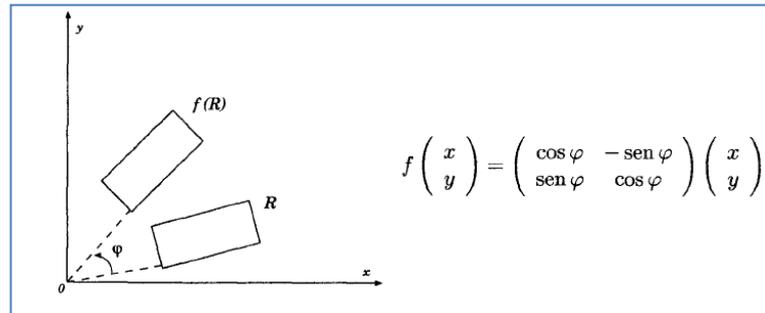


FIGURA 2-12: GIRO DE UN ÁNGULO φ Y CENTRO EN EL ORIGEN
 Fuente: "Sistema de Funciones Iteradas y los fractales" [ADA2005]

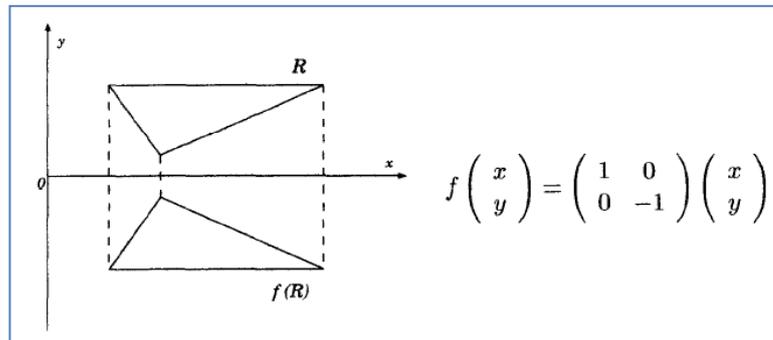


FIGURA 2-13: SIMETRÍA CON RESPECTO AL EJE DE ABCISAS
 Fuente: "Sistema de Funciones Iteradas y los fractales" [ADA2005]

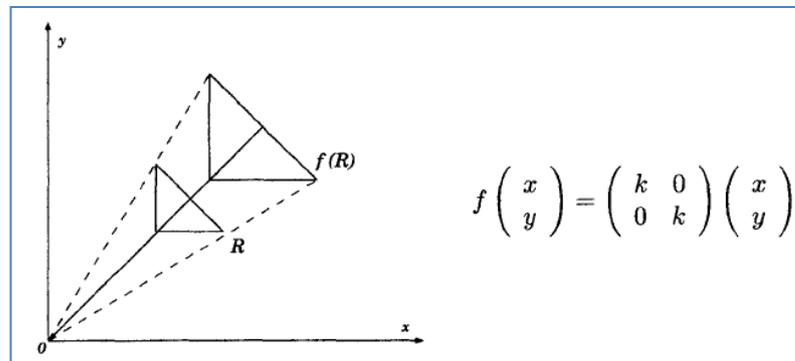


FIGURA 2-14: HOMOTECIA CENTRADA EN EL ORIGEN DE RAZÓN K
 Fuente: "Sistema de Funciones Iteradas y los fractales" [ADA2005]

Para nuestro caso usaremos la curva de koch como ejemplo de IFS. En este caso el conjunto inicial A es un intervalo de la recta real, de una unidad de longitud.

$$A_0 = \{x : x \in [0,1]\}$$

A es sometido a cuatro transformaciones afines y al final dichos resultados son combinados para obtener la primera iteración de la curva de koch, denotada como A_1 , para la segunda iteración es necesario aplicar las mismas transformaciones a A_1 y sigue sucesivamente según el número de iteraciones de la curva.

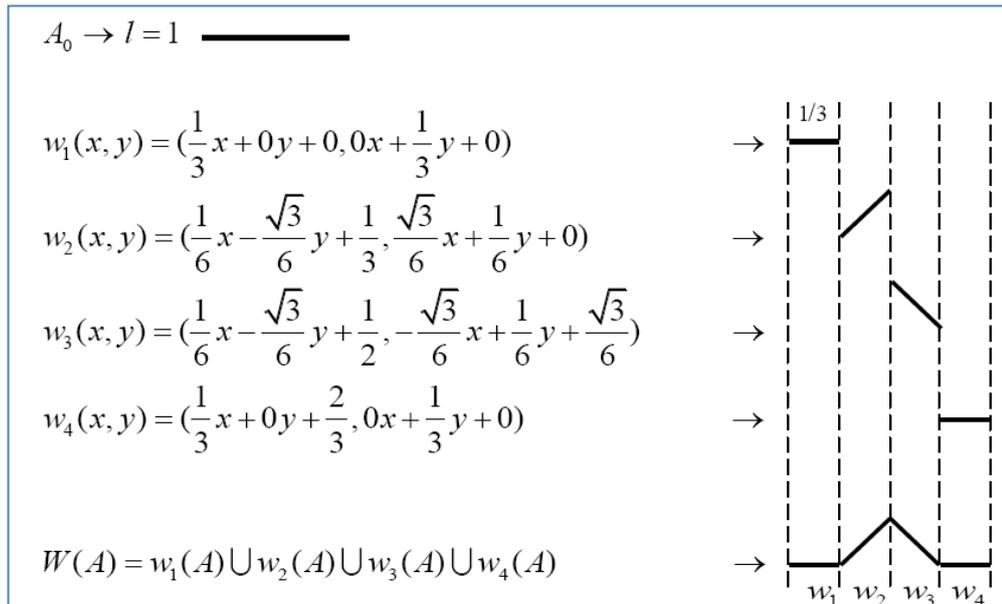


FIGURA 2-15: GENERACIÓN DE LA CURVA DE KOCH MEDIANTE FS DE LA PRIMERA ITERACIÓN

Fuente: “Diseño y Construcción de una Antena Fractal Multibanda para Telefonía Móvil Celular” [OLT2009]

2.7. Estudio del Arte:

Dentro del mercado de las telecomunicaciones, los fractales han venido tomando más interés dentro de la comunidad científica y empresarial. Entre las principales empresas podemos encontrar a dos más resaltantes.

Por un lado tenemos a *FRACTUS*, empresa española, la cual es la principal desarrolladora de antenas fractales para móviles, redes inalámbricas de corto alcance, como BlueTooth y ZigBee, y estaciones base.

Dentro de sus principales avances encontramos la miniaturización de antenas hasta alcanzar dimensiones de 7 x 3 x 1 mm como es el caso de la antena de banda ISM de 2.4GHz, esto ofrece a los mayores ventajas para los diseñadores de dispositivos al darnos mayor espacio para la inclusión de diferentes tipos de aplicaciones multimedia o seguir disminuyendo el tamaño del dispositivo.[FRA2010]

Además de esta banda, FRACTUS ha podido diseñar antenas para aplicaciones BlueTooth, WLAN 801.11b/g, Zigbee, ISM 5GHZ, GPS 1575MHz, la banda ISM de 868-915 MHz, antenas de banda ancha en la banda de 3.1 – 5GHz, hasta antena para TV digital, en este para DVB cuya banda es 470-698MHz y que incluso coexisten con GSM (1670-1675 MHz) y cuyas dimensiones son de 40 x 4.8 x 5 mm



FIGURA 2-16: ANTENA FRACTUS PARA TV DIGITAL
Fuente: “www.fractus.com” [FRA2010]

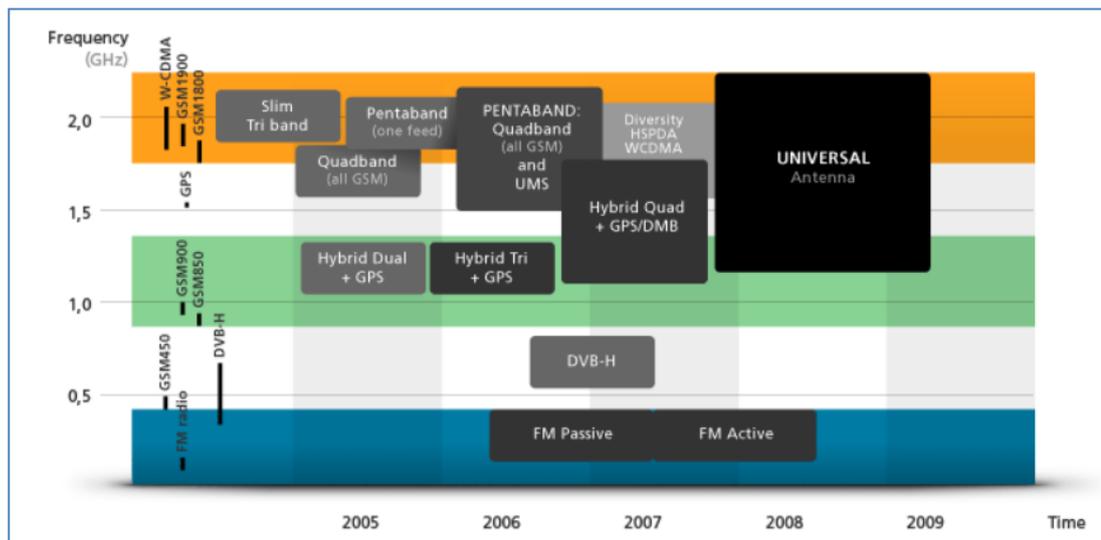


FIGURA 2-17: MAPA DE TECNOLOGÍAS/ SOLUCIONES FRACTUS PARA ANTENAS DE TELEFONÍA MÓVIL
Fuente: “www.fractus.com” [FRA2010]

Dentro de las novedades de FRACTUS vemos que acaba de firmar un importante acuerdo con MOTOROLA (abril del 2010), El acuerdo incluye una licencia bajo todas las patentes de Fractus relacionado con una antena interna y abarca la venta de todos los productos Motorola. Además acaba de ser reconocido con el Premio Nacional de Comunicaciones otorgado por el Gobierno de Cataluña por el trabajo realizado en el año 2010. [FRA2010]

Por otro lado tenemos a FRACTAL ANTENA SYSTEM Inc., empresa norteamericana que diseña y fabrica antenas más compactas y poderosas.

Utilizado en aplicaciones comerciales, militares y gubernamentales. Uno de los proyectos más importantes de esta empresa abarca un nuevo campo de aplicación de la óptica y que permite generar invisibilidad a objetos como cortinas o mantos.

El éxito de este proyecto radica en el uso de metamateriales, los cuales se basan en un conjunto de redes de “resonadores” que ofrecen la capacidad de desviar la luz u otras ondas electromagnéticas, además de otras propiedades extrañas debido a su índice de reflexión negativo, de modo que no absorben ni reflejan la luz.

Como se sabía, esta propiedad de los metamateriales solo funcionaba en banda estrecha o una única gama de colores. Con el nuevo enfoque de fractales, los metamateriales podrían trabajar sobre una amplia gama de colores y bandas. Se tiene muy poca información de esta aplicación debido a la envergadura del proyecto.

Además, Fractal Antenna Systems, Inc. ha anunciado en mayo del presente año la producción de las primeras antenas omnidireccionales de banda ancha del mundo en un perfil reducido. Sustituye a un conjunto de antenas con un solo tubo, delgado, corto, perfecto para la colocación de sistema inalámbricos. Todas las necesidades existentes y futuras de UHF + inalámbrico se cumplen con una sola antena y en una fracción del costo de otras soluciones. Estas necesidades incluyen: WiMax, la seguridad pública, el DAS, Wifi, 3G/4G, femtocell pico /, y muchos otros. [FRC2010]

Capítulo 3

ISDB-T EN PERÚ

Como se sabe la tecnología de televisión digital implantada en el Perú es ISDB-T la cual fue desarrollada por Japón pero mejorada por Brasil, esta elección se debió a las mejores ventajas que poseía esta con respecto al DVB o ATSC como es la TDT móvil y portátil debido al uso del sistema 1-Seg. En el presente capítulo veremos toda la normativa para la implementación de ISDB-T, haciendo un énfasis en la normativa de receptores. Además veremos la normativa peruana sobre TV Digital.

3.1. ABNT NBR 15604 Televisión Digital Terrestre- Receptores:

La Asociación Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) es el Fórum Nacional de Normalización. Las Normas Brasileñas, cuyo contenido es responsabilidad de los Comités Brasileños (ABNT/CB), de los Organismos de Normalización Sectorial (ABNT/ONS) y de las Comisiones de Estudios Especiales (ABNT/CEE), son elaboradas por Comisiones de Estudio (CE), formadas por representantes de sus sectores implicados de los que forman parte: productores, consumidores y neutrales (universidades, laboratorios y otros).

La ABNT NBR 15604 fue elaborada por la Comisión de Estudio Especial de Televisión Digital (ABNT/CEE-00:001.85). El Proyecto circuló en Consulta Nacional según Edicto nº 11, de 06.11.2007 a 23.11.2007, con el número de Proyecto 00:001.85-004.

Esta Norma está basada en los trabajos del Fórum del Sistema Brasileiro de Televisión Digital Terrestre, según establece el Decreto Presidencial nº 5.820, de 29/06/2006. [ABN2007]

3.2. Configuración de Receptor:

La configuración básica del receptor está compuesta por lo siguiente:

- Antena de Recepción Terrestre
- IRD
- Cable de Conexión entre la antena y el receptor.

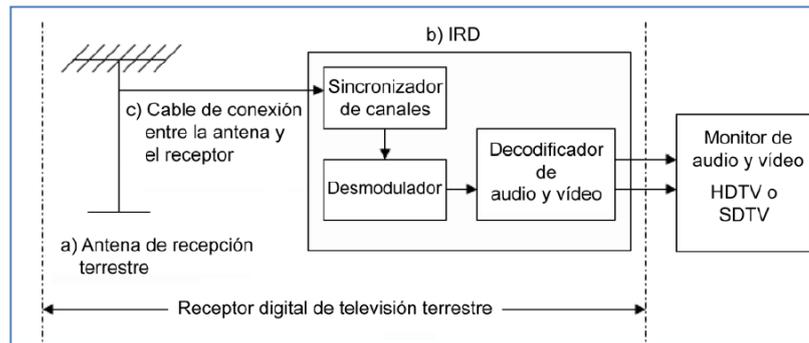


FIGURA 3-1: CONFIGURACIÓN BÁSICA DEL RECEPTOR

Fuente: "Televisión digital Terrestre- Receptores" [ABN2007]

3.2.1. Configuración Básica del IRD:

En la recepción fija, existen por lo menos dos posibles modelos de IRD (Integrated Receiver Decoder) dependiendo a la forma de salida de audio y video, así como el divisor de antena. Es por ello que la configuración básica de un IRD se divide en convertidor digital (STB) y receptor integrado. [ABN2007]

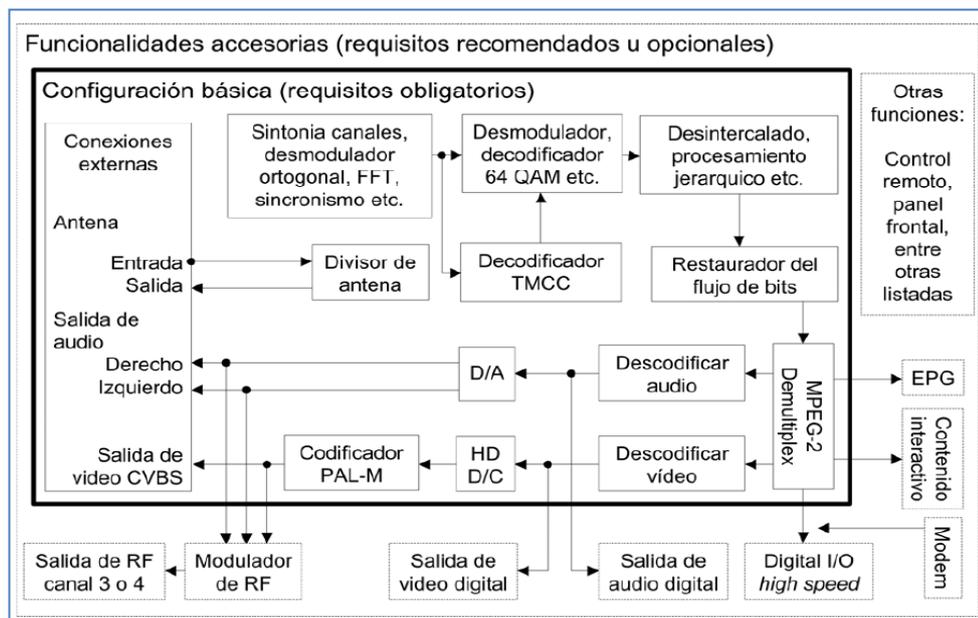


FIGURA 3-2: CONFIGURACIÓN BÁSICA DE IRD DE TIPO STB

Fuente: "Televisión digital Terrestre- Receptores" [ABN2007]

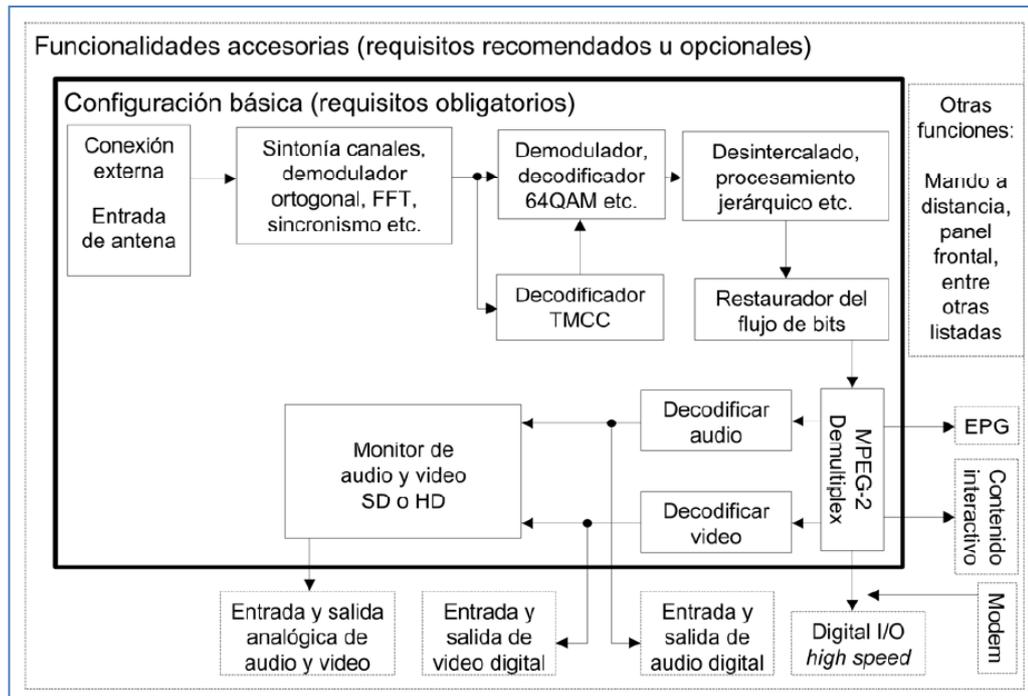


FIGURA 3-3: CONFIGURACIÓN BÁSICA DE IRD DE TIPO INTEGRADO

Fuente: "Televisión digital Terrestre- Receptores" [ABN2007]

3.3. Especificaciones de las unidades de Recepción

3.3.1. Antena de recepción:

La antena de recepción de señales debe tener las siguientes especificaciones [ABN2007]:

- La antena debe permitir la recepción de señales de televisión que estén comprendidas en los canales de VHF de 07 a 13 y los canales de UHF de 14 a 69, para los receptores de tipo fijo y móvil (full-seg) y por lo menos los canales comprendidos en la banda de UHF entre los canales de 14 a 69 para los receptores de tipo portátil (1-seg).
- Opcionalmente, la antena puede permitir la recepción de las señales de televisión analógica que estén comprendidas entre los canales en la banda de VHF de 02 a 13 y UHF de 14 a 62.
- La polarización de la antena puede ser tanto vertical como horizontal.
- La ganancia de la antena no se especifica, por depender fuertemente de las condiciones de recepción, sin embargo se recomienda que cuando haya una antena externa instalada, la ganancia sea por lo menos equivalente a lo especificado por el tipo yagi de 14 elementos (7 dB – UHF canal 14).

- La directividad de la antena no se especifica por depender fuertemente de las condiciones de recepción, sin embargo se recomienda que cuando haya una antena externa permanentemente instalada, la instalación atienda por lo menos a las especificaciones de directividad de la ITU Recommendation BT.419-3.

3.3.2. Especificación de unidad receptora:

3.3.2.1. Entrada de Antena:

Se subdivide en receptor de tipo integrado, convertidor digital (de tipo Set-Top Box) y de receptor portátil. [ABN2007]

- **Receptor del tipo Integrado:** La unidad receptora del tipo integrado con monitor debe colocar a disposición por lo menos un terminal para entrada de antena con impedancia de entrada 75Ω , tipo F, desequilibrado.
- **Convertidor Digital:** Convertidor digital debe colocar a disposición por lo menos un terminal para entrada y otro para salida de antena (pass through), ambos con impedancia de 75Ω , tipo F, desequilibrado.
- **Receptor Portátil:** Para los receptores portátiles *one-seg* (teléfonos celulares, *dongle*, PDA, entre otros), las recomendaciones descritas en el receptor de tipo integrado y de convertidor digital son opcionales, pudiendo o no ser aplicadas, a criterio del fabricante del dispositivo de recepción.

3.3.3. Recepción de canales:

3.3.3.1. Dispositivos Fijos o móviles de Recepción (Full-seg):

La unidad receptora debe ser capaz de sintonizar los canales de televisión limitados por la banda de VHF alta, comprendidos entre los canales 07 a 13, y los canales limitados por la banda de UHF, comprendidos entre los canales 14 a 69. [ABN2007]

3.3.3.2. Dispositivos Portátiles de Recepción Parcial (one-seg):

La unidad de recepción parcial debe ser capaz de por lo menos sintonizar los canales de televisión limitados por la banda de UHF, comprendidos entre los canales 14 a 69.

La recepción de canales de la banda VHF alta es facultativa en los receptores portátiles *one-seg*. [ABN2007]

3.3.4. Ancho de Banda del Canal:

Para la radiodifusión de televisión digital terrestre, se debe usar obligatoriamente el ancho de banda de frecuencia de 5.7MHz. La frecuencia nominal de la portadora debe ser obligatoriamente la frecuencia central del ancho de banda. [ABN2007]

El ancho de banda de frecuencia debe ser obligatoriamente de 5.7MHz cuando el ancho de banda de la portadora OFDM es 5.572 MHz, con 4KHz de separación entre las frecuencias portadoras en el modo 1. Ese ancho de banda se debe aplicar obligatoriamente independientemente del modo elegido, y se adopta para asegurar que el ancho de banda de 5.61 MHz tenga algún margen para determinar que cada portadora del límite inferior y límite superior de la banda de 5.572MHz incluya el 995 de energía. [ABN2007]

La frecuencia central debe ser obligatoriamente la frecuencia de la portadora localizada en el centro de la banda de la señal OFDM, considerando un número impar de portadoras OFDM.

En resumen:

- Dispositivos fijos o móviles de recepción (*full-seg*): 5,7 MHz
- Dispositivos portátiles (*one-seg*): 0,43 MHz

3.3.5. Frecuencia de Portadora Central de Canales:

Las frecuencias de las portadoras centrales presentadas en la Tabla 3.1 (banda VHF alta) y Tabla 3.2 (banda UHF) deben ser aplicables obligatoriamente a todos los tipos de receptores (*full-seg*). [ABN2007]

Para los receptores *one-seg*, sólo la Tabla 3.2 debe ser obligatoriamente atendida, siendo facultado a los fabricantes de este tipo de receptores la implementación de la Tabla 3.1.

Las frecuencias de las portadoras centrales de la banda de VHF alta son aquellas definidas en la Tabla 3.1 y las frecuencias de las portadoras centrales de la banda de UHF son las definidas en la Tabla 3.2. [ABN2007]

TABLA 3-1: FRECUENCIAS DE LOS CANALES VHF ALTOS

Número de Canal	Frecuencia de la Portadora Central MHz
7	177 + 1/7
8	183 + 1/7
9	189 + 1/7
10	195 + 1/7
11	201 + 1/7
12	207 + 1/7
13	213 + 1/7

TABLA 3-2: FRECUENCIA DE LOS CANALES DE BANDA UHF

Número de Canal	Frecuencia de la Portadora Central MHz	Número de Canal	Frecuencia de la Portadora Central MHz
14	473 + 1/7	42	641 + 1/7
15	479 + 1/7	43	647 + 1/7
16	485 + 1/7	44	653 + 1/7
17	491 + 1/7	45	659 + 1/7
18	497 + 1/7	46	665 + 1/7
19	503 + 1/7	47	671 + 1/7
20	509 + 1/7	48	677 + 1/7
21	515 + 1/7	49	683 + 1/7
22	521 + 1/7	50	689 + 1/7
23	527 + 1/7	51	695 + 1/7
24	533 + 1/7	52	701 + 1/7
25	539 + 1/7	53	707 + 1/7
26	545 + 1/7	54	713 + 1/7
27	551 + 1/7	55	719 + 1/7
28	557 + 1/7	56	725 + 1/7
29	563 + 1/7	57	731 + 1/7
30	569 + 1/7	58	737 + 1/7
31	575 + 1/7	59	743 + 1/7
32	581 + 1/7	60	749 + 1/7
33	587 + 1/7	61	755 + 1/7
34	593 + 1/7	62	761 + 1/7
35	599 + 1/7	63	767 + 1/7
36	605 + 1/7	64	773 + 1/7
37	611 + 1/7	65	779 + 1/7
38	617 + 1/7	66	785 + 1/7
39	623 + 1/7	67	791 + 1/7
40	629 + 1/7	68	797 + 1/7
41	635 + 1/7	69	803 + 1/7

3.3.6. Sensibilidad:

Se recomienda que la unidad de sintonía de los receptores de 13 segmentos, así como la de un segmento, localizado en la parte central de los 13 segmentos, satisfaga las siguientes especificaciones [ABN2007]:

- Nivel mínimo de entrada de la señal de antena de - 77 dBm o inferior.
- Nivel de señal igual o superior a - 20 dBm.
- Nivel reducido por el factor equivalente al del ancho de banda (-11dB), cuando el nivel de entrada en el receptor one-seg se mide en términos de potencia eléctrica por segmento.

3.4. TDT en Perú:

Todo empieza con la resolución ministerial N° 317-2009-MTC/03 en el cual se modifica el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias (PNAF) logrando que de esta manera la banda de televisión de UHF sea reservada para la televisión Digital Terrestre (TDT). En dicha resolución se acuerda que la banda de 476-608 MHz y 614-698 MHz son reservadas para TV digital.

A continuación se muestra la el Plan Nacional de Asignación de Frecuencias para dicha parte del espectro.

470 - 512 RADIODIFUSION Fijo Móvil	470- 512 RADIODIFUSION	P11, P11A Radiodifusión por Televisión
512 - 608 RADIODIFUSION	512 – 608 RADIODIFUSION	P11, P11A Radiodifusión por Televisión
608 - 614 RADIOASTRONOMIA Móvil por satélite salvo móvil aeronáutico por satélite (Tierra-espacio)	608 - 614 RADIOASTRONOMIA Móvil por satélite salvo móvil aeronáutico por satélite (Tierra-espacio)	
614 - 806 RADIODIFUSION Fijo Móvil	614 - 746 RADIODIFUSION 746 – 806 FIJO MOVIL	P11 Radiodifusión por Televisión P51

FIGURA 3-4: PLAN DE ATRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS

Fuente: "Plan Nacional de Atribución de Frecuencias" [MIN2008]

Donde:

- P11: El Estado se reserva dos (2) frecuencias o canales en cada una de las bandas atribuidas al servicio de radiodifusión sonora y por televisión, por localidad. En aquellas localidades en las que se hubieran canalizado quince (15) o menos frecuencias o canales, el Estado se reserva sólo una (1). En el caso del servicio de radiodifusión sonora en onda corta tropical (OCT), el Estado se reserva una (1) frecuencia en cada segmento de banda atribuido a dicho servicio.
- P11A: La banda de 470 - 584MHz se reserva para el servicio de radiodifusión por televisión digital terrestre a nivel nacional y mientras dure tal situación, el Ministerio no realizará nuevas asignaciones en dicha banda. No se aplica la reserva antes referida para el caso de las frecuencias previamente asignadas y para los canales 29, 30, 31 y 32 los cuales servirán exclusivamente para la realización de pruebas y demostraciones inherentes a la televisión digital por un periodo improrrogable que no excederá de seis meses. El Ministerio establecerá la fecha en que entrará en vigencia la reserva de las frecuencias asignadas y de los canales 29, 30, 31 y 32. [MIN2008]

Sin embargo, dicha banda no se encuentra libre ya que hay empresas radiodifusoras transmitiendo a esas frecuencias de manera analógica. Si analizamos la banda de 698 a 806 MHz, destinada al dividendo digital, en teoría se tendría que tener “libre” para así poder desplegar alguna tecnología de telefonía móvil como Long Term Evolution (LTE), pero la situación es otra ya que existen cuatro canales analógicos transmitiendo en algunos canales de ella. Estos canales son Andina de Televisión, Asociación Vida TV, Jesús Broadcast y Enlace. [RPM2010]

Nº	Canal	Razon Social	Indicativo	Estado
1	15	ALLIANCE S.A.C.	OBV-4K	AUTORIZADO
2	16	INSTITUTO NACIONAL DE RADIO Y TELEVISION DEL PERU - IRTP	1852	AUTORIZADO
3	17	MISION PAX TV	OAS-4G	AUTORIZADO
4	18	ANDINA DE RADIODIFUSION S.A.C.	1867	AUTORIZADO
5	19	ASOCIACION LAS MANOS DE DIOS	OAS-4E	AUTORIZADO
6	20	COMPANIA LATINOAMERICANA DE RADIODIFUSION S.A.	1866	AUTORIZADO
7	21	RESERVA DIGITAL		RESERVA DIGITAL
8	23	TELEVISION NACIONAL PERUANA S.A.C.	OAS-4M	AUTORIZADO
9	24	COMPANIA PERUANA DE RADIODIFUSION S.A.	1851	AUTORIZADO
10	25	ASOCIACION CULTURAL BETHEL	OBV-4M	AUTORIZADO
11	26	RESERVA DIGITAL		RESERVA DIGITAL
12	27	UNIVERSAL DE TELEVISION S.A.C.	OAY-4G	AUTORIZADO
13	28	RESERVA DIGITAL		RESERVA DIGITAL
14	29	RESERVA DIGITAL		RESERVA DIGITAL
15	30	RESERVA DIGITAL		RESERVA DIGITAL
16	31	RESERVA DIGITAL		RESERVA DIGITAL
17	33	EMPRESA INTERAMERICANA DE RADIODIFUSION S.A.	OAV-4Z	AUTORIZADO
18	36	RESERVA DIGITAL		RESERVA DIGITAL
19	39	CARRETERO RAZA OSCAR GROVER	OAL-4S	AUTORIZADO
20	41	ASOCIACION CULTURAL ONDAS DEL PERU S.A.C.	OCV-4R	AUTORIZADO
21	43	CABALLERO ENRIQUEZ MARITZA	OBL-4J	AUTORIZADO
22	45	ASO. CENTRO DE COM. POPULAR Y PROMOC DESARR. -CECOPRODE-VESLVADOR - CECOPRODE-VES	OAY-4F	AUTORIZADO
23	49	MINISTERIO LA LUZ	OBL-4A	AUTORIZADO
24	51	EMPRESA TELED DE RADIODIFUSION S.A. CANAL 51UHF	OBV-4I	AUTORIZADO
25	53	ANDINA DE RADIODIFUSION S.A.C.	OAL-4R	AUTORIZADO
26	55	ASOCIACION VIDA TELEVISION (A.V.T.)	OCV-4E	AUTORIZADO
27	57	ASOCIACION CULTURAL ENTIDADES LATINOAMERICANAS COMUNICANDO EL EVANGELIO - ENLACE	OAL-4Z	AUTORIZADO
28	59	JESUS BROADCASTING NETWORK S.A.C.	OAL-4V	AUTORIZADO

FIGURA 3-5: ASIGNACIÓN DE CANALES UHF

Fuente: "Televisión Móvil sobre 3G" [RPM2010]

En Marzo del 2010 el Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC) lanzó el plan de canalización y asignación de frecuencias que da inicio al orden que se debe tener para la colocación de los canales digitales en dicha banda. Por lo tanto algunos canales de esta se encontrarán disponibles para transmisiones televisivas mediante el estándar digital que se ha adoptado. En el Perú ya se ha aprobado la utilización de la televisión digital terrestre ISDB-T para el despliegue de las transmisiones digitales por las radiodifusoras. [RPM2010]

Como se vio en las otras exposiciones anteriores dicho estándar cuenta con un ancho de banda de 6 MHz que se divide en 13 segmentos, uno de ellos destinado para la televisión móvil y los restantes 12 pueden ser administrados para tener varios canales con un Standard Definition o tener también canales en High Definition. En dicho plan de canalización también se menciona la compartición de canales digitales antes mencionada, esto permitirá que compañías de televisión pequeñas que no tengan mucho dinero para comprar transmisores digitales de Alta definición puedan compartir espectro con otros iguales y así tener una señal mejor que la actual analógica. Este será pieza importante a la hora de hallar la solución en la asignación de espectro para señales digitales como se verá más adelante. El

plan de canalización y asignación de frecuencias es mostrado en la siguiente gráfica.

Plan de Canalización y Asignación de Frecuencias					
Canal	Rango (MHz)	Norma	Frec.(MHz)	Máxima e.s.p. (KW)	Condiciones Técnicas
15	476-482	NTSC-M	Fv: 477.25 Fa: 481.75	1000	Ubicación de la Planta Transmisora en el Cerro Marcavilca
16	482-488	ISDB-T	Fc: 485+1/7	240	Ubicación de la Planta Transmisora en el Cerro Marcavilca y cumplimiento de las especificaciones de la Mascara Crítica
17	488-494	NTSC-M	Fv: 489.25 Fa: 493.75	1000	Ubicación de la Planta Transmisora en el Cerro Marcavilca
18	494-500	ISDB-T	Fc: 497+1/7	240	Ubicación de la Planta Transmisora en el Cerro Marcavilca y cumplimiento de las especificaciones de la Mascara Crítica
19	500-506	NTSC-M	Fv: 501.25 Fa: 506.75	1000	Ubicación de la Planta Transmisora en el Cerro Marcavilca
20	506-512	ISDB-T	Fc: 509+1/7	240	Ubicación de la Planta Transmisora en el Cerro Marcavilca y cumplimiento de las especificaciones de la Mascara Crítica
21	512-518	ISDB-T	Fc: 515+1/7	240	Ubicación de la Planta Transmisora en el Cerro Marcavilca y cumplimiento de las especificaciones de la Mascara Crítica
23	524-530	NTSC-M	Fv: 525.25 Fa: 529.75	1000	Ubicación de la Planta Transmisora en el Cerro Marcavilca
24	530-536	ISDB-T	Fc: 533+1/7	240	Ubicación de la Planta Transmisora en el Cerro Marcavilca y cumplimiento de las especificaciones de la Mascara Crítica
25	536-542	NTSC-M	Fv: 537.25 Fa: 541.75	1000	Ubicación de la Planta Transmisora en el Cerro Marcavilca
26	542-548	ISDB-T	Fc: 545+1/7	240	Ubicación de la Planta Transmisora en el Cerro Marcavilca y cumplimiento de las especificaciones de la Mascara Crítica
27	548-554	NTSC-M	Fv: 549.25 Fa: 553.75	1000	Ubicación de la Planta Transmisora en el Cerro Marcavilca
28	554-560	ISDB-T	Fc: 557+1/7	240	Ubicación de la Planta Transmisora en el Cerro Marcavilca y cumplimiento de las especificaciones de la Mascara Crítica

FIGURA 3-6: PLAN DE CANALIZACIÓN Y ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS

Fuente: "Televisión Móvil sobre 3G" [RPM2010]

Por lo tanto nuestro análisis necesita de tener un panorama más claro de la asignación de canales en dicha parte de la banda de 476 a 608 y de 614 a 698 MHz. En dicha parte se encuentran empresas en su mayoría cristianas que transmiten en los canales analógicos, por lo tanto se dejarán en dichos espacios. Además existen algunos canales digitales ya reservados y actualmente transmitiendo como es el caso de ATV, en total se tiene ya asignado por parte del ministerio los canales: TV Perú, ATV, América TV y Frecuencia Latina. Existen otros canales reservados para lo que será la asignación digital, además se encuentran canales en Evaluación Técnica por parte del Ministerio. El espectro de frecuencias en esas bandas se muestra a continuación mostrando que canales están ya transmitiendo en digital o analógico y también en Evaluación, cabe resaltar que existen canales plomos que no son mencionados en las regulaciones por lo tanto no tendremos acción alguna sobre ellos. [RPM2010]

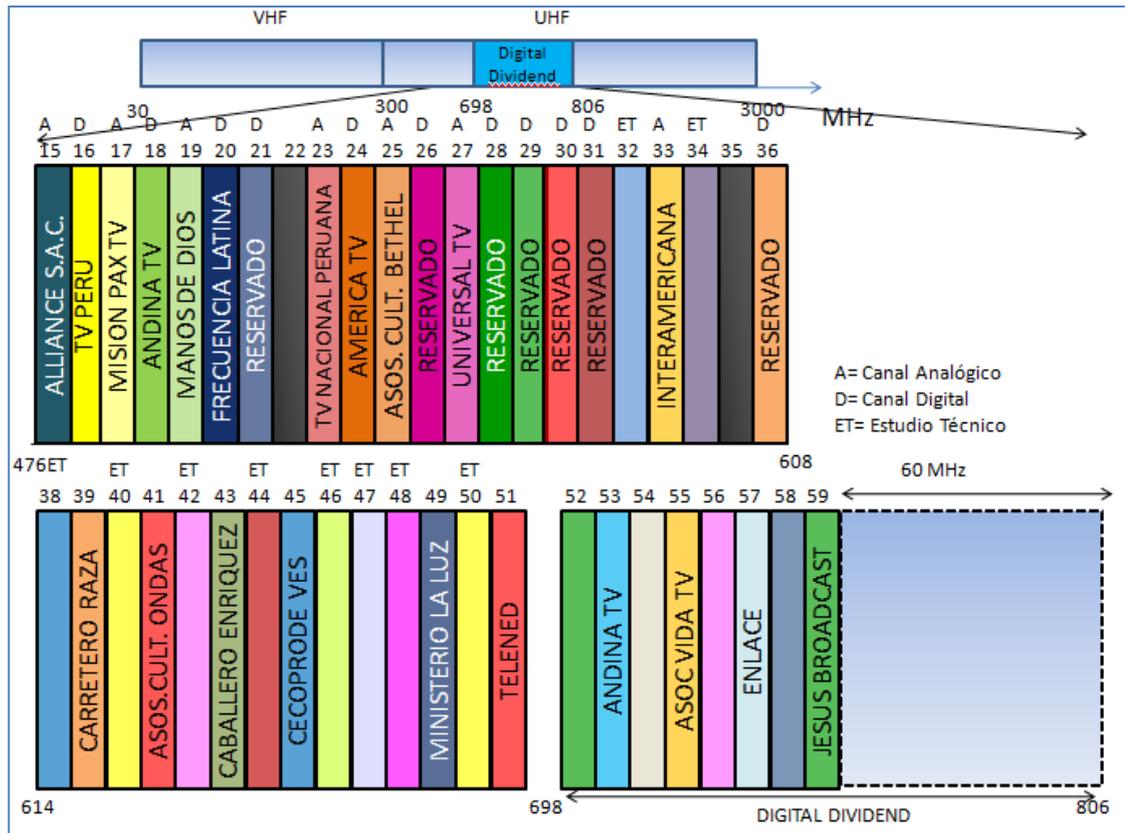


FIGURA 3-7: SITUACIÓN ACTUAL DE LA ASIGNACIÓN DE CANALES EN UHF

Fuente: "Televisión Móvil sobre 3G" [RPM2010]

Capítulo 4

DISEÑO DE ANTENAS FRACTALES PARA TELEVISIÓN DIGITAL

En este capítulo definiremos el software a usar y también buscaremos el mejor diseño de antena tanto para interiores como exteriores que cumplan con toda la normativa desarrollada en el tercer capítulo, se verá la variación con respecto a la frecuencia de los parámetros más importantes para definir la antena como por ejemplo el patrón de radiación, el SWR, parámetros S, ganancia y coeficiente de reflexión.

4.1. Herramientas de Diseño y Simulación:

Para nuestro objetivo de diseño, simulación y análisis de la antena para TV digital se han usado 2 tipos de recursos informáticos, como son:

4.1.1. MATLAB:

Es un entorno matemático de computación y desarrollo de aplicaciones integrados y orientados para proyectos en donde se implique elevados cálculos matemáticos y su respectiva visualización gráfica.

Esta herramienta integra análisis numérico, cálculo matricial, procesado de señal y visualización gráfica en un entorno completo donde los problemas y sus soluciones son expresados del mismo modo en que se escribirían tradicionalmente, sin necesidad de hacer uso de la programación tradicional.[OLT2009]

Para nuestro caso fue usado para hallar las dimensiones de cada segmento de la antena. Entre los scripts usados tenemos:

4.1.1.1. Línea de Koch:

Para elaborar la línea de Koch vista en el apartado 2.2.1 hemos desarrollado el script *vontriangular.m* el cual está formado por una función cuyos parámetros de entrada son:

- n: Número de Iteraciones
- f: Frecuencia de Operación de la antena.

```
function[L]=von(n,f)
h=75/f;
L=[0 h];
for k=1:n
    I1=(1/3)*L;
    I2=(1/3)*L*exp(j*(pi/2))+h/3;
    I3=(1/3)*L+h*(1/3+j/3);
    I4=(1/3)*L*exp(-j*(pi/2))+h*(2/3+j/3);
    I5=(1/3)*L+h*2/3;
    L=[I1 I2 I3 I4 I5];
end
plot(L);
```

FIGURA 4-1: VONTRIANGULAR.M

Fuente: Elaboración Propia

De la que extraemos las siguientes figuras:

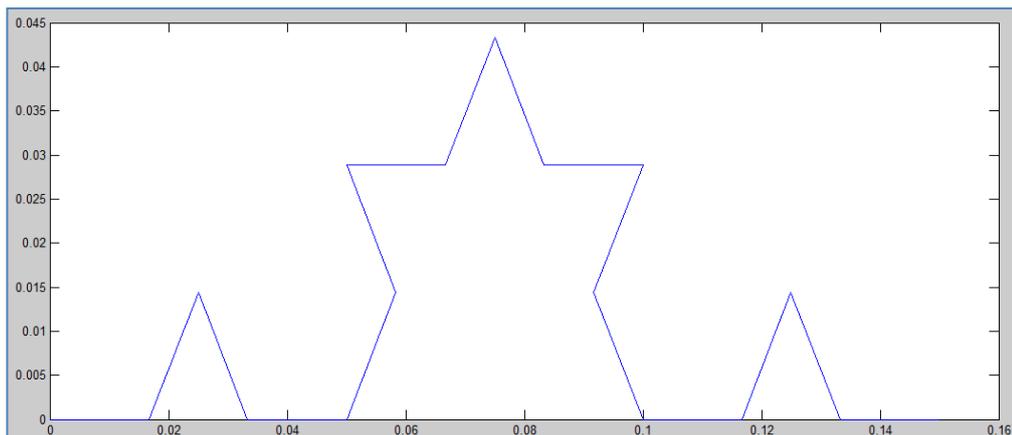


FIGURA 4-2: LÍNEA DE KOCH F=500MHZ ITERACIÓN=2

Fuente: Elaboración Propia

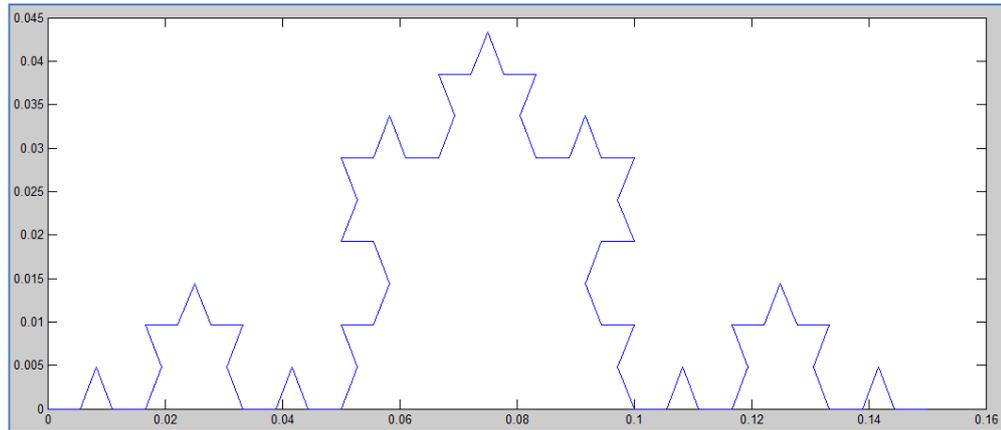


FIGURA 4-3: LÍNEA DE KOCH F=500MHZ ITERACIÓN=3

Fuente: Elaboración Propia

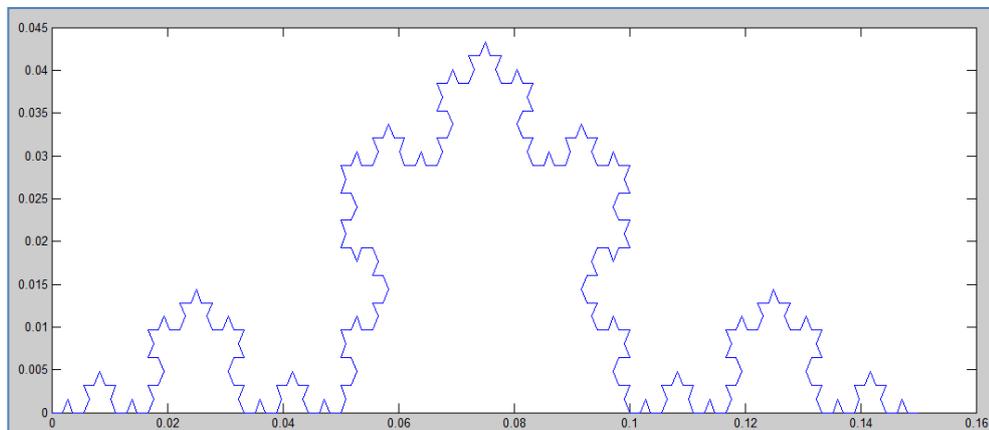


FIGURA 4-4: LÍNEA DE KOCH F=500MHZ ITERACIÓN=4

Fuente: Elaboración Propia

4.1.1.2. Copo de Nieve de Koch:

Para elaborar el copo de nieve de koch vista en el apartado 2.2.1 hemos desarrollado el script *voncopokoch.m*.

```
function[L]=voncopokoch(n,f)
h=75/f;
L1=[0 h];
for k=1:n
    I1=(1/3)*L1;
    I2=(1/3)*L1*exp(j*(pi/3))+h/3;
    I3=(1/3)*L1*exp(-j*(pi/3))+h*(0.5+j*sqrt(3)/6);
    I4=(1/3)*L1+h*2/3;
    L1=[I1 I2 I3 I4];
    L2=L1*exp(j*(2*pi/3))+h*(0.5-j*sqrt(3)/2);
    L3=L1*exp(-j*(2*pi/3))+h;
    L=[L2 L1 L3];
end
plot(L);
```

FIGURA 4-5: VONCOPOKOCHE.M

Fuente: Elaboración Propia

De la que extraemos las siguientes figuras:

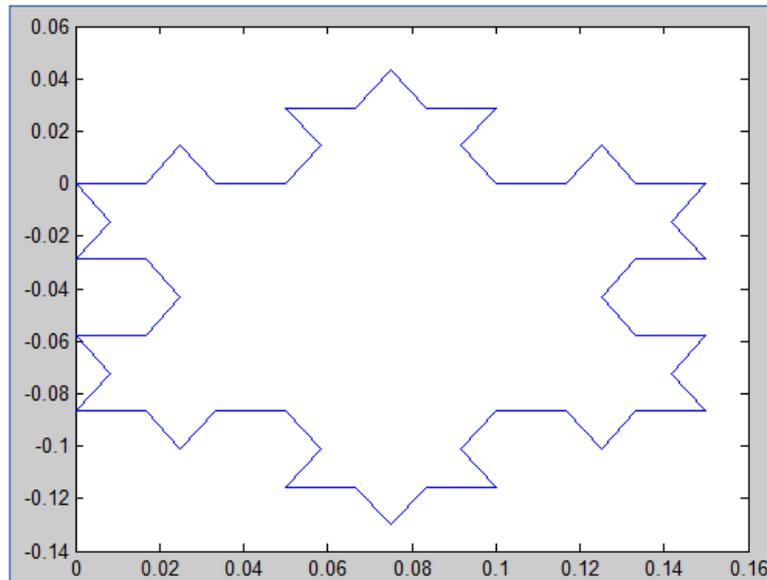


FIGURA 4-6: COPO DE KOCH F=500MHZ ITERACIÓN=2

Fuente: Elaboración Propia

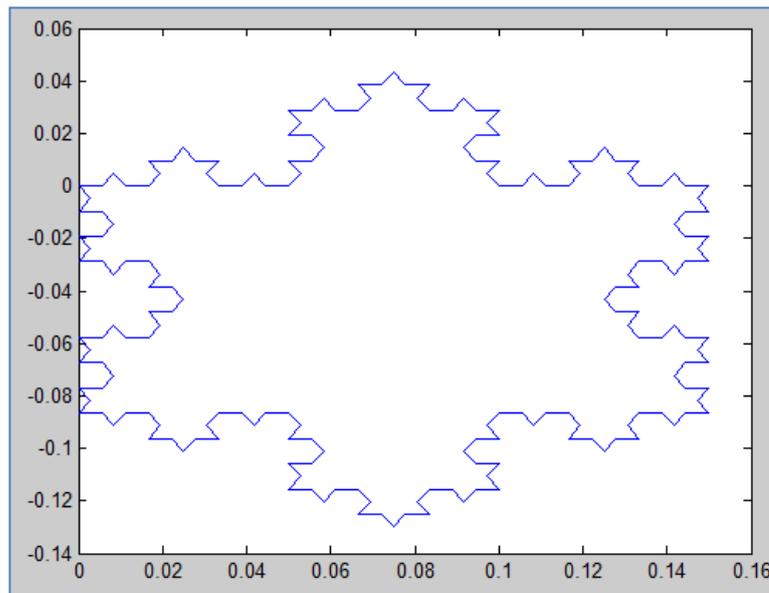


FIGURA 4-7: COPO DE KOCH F=500MHZ ITERACIÓN=3

Fuente: Elaboración Propia

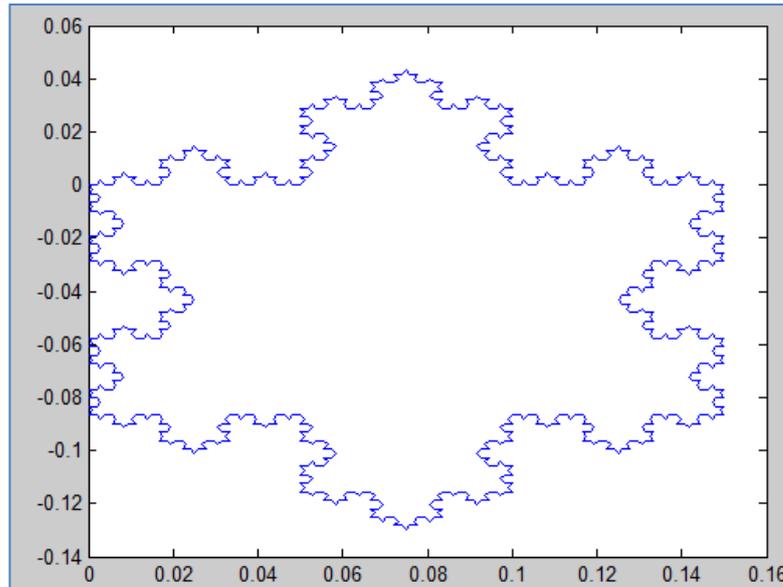


FIGURA 4-8: COPO DE KOCH F=500MHZ ITERACIÓN=4

Fuente: Elaboración Propia

4.1.1.3. Cuadrado de Koch :

También tendremos una variación de la línea de koch llamada cuadrado de Koch, cuyo script es *von.m*

```
function[L]=von(n,f)
h=75/f;
L=[0 h];
for k=1:n
    I1=(1/3)*L;
    I2=(1/3)*L*exp(j*(pi/2))+h/3;
    I3=(1/3)*L+h*(1/3+j/3);
    I4=(1/3)*L*exp(-j*(pi/2))+h*(2/3+j/3);
    I5=(1/3)*L+h*2/3;
    L=[I1 I2 I3 I4 I5];
end
plot(L);
```

FIGURA 4-9: VON.M

Fuente: Elaboración Propia

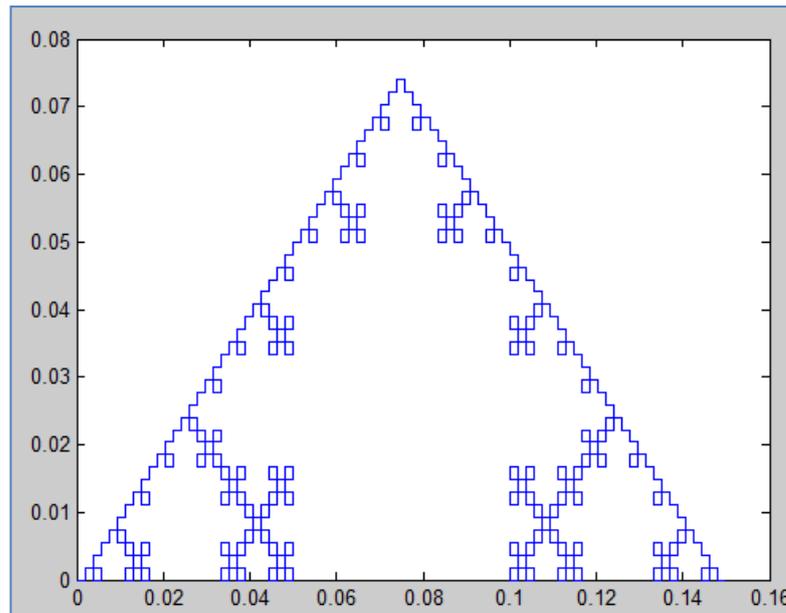


FIGURA 4-10: CUADRADO DE KOCH F=500MHZ ITERACIÓN=4

Fuente: Elaboración Propia

Se puede notar, por las dimensiones totales de las líneas aproximadamente 16 cm para un $\lambda/4$, al formar un dipolo usaremos 2 de estas líneas en serie lo que harían aproximadamente 32 cm de largo de la antena, la cual es algo aceptable para antenas exteriores, pero para antenas interiores estas dimensiones son muy grandes, por lo que usaremos una variante de la línea de koch para miniaturizar las antenas, el script que usaremos será llamado *pequeno.m*.

```
function[L]=pequeno(n)
h=75/200;
L=[0 h];
for k=1:n
    I1=(1/4)*L;
    I2=(1/4)*L*exp(j*(pi/3))+power(3/4,k-1)*(h/4);
    I3=(1/4)*L*exp(-j*(pi/3))+(3*h/8)*power(3/4,k-1)+(h/8)*j*sqrt(3)*(power(3/4,k-1));
    I4=(1/4)*L+2*power(3/4,k-1)*(h/4);
    L=[I1 I2 I3 I4];
end
plot(L);
```

FIGURA 4-11: PEQUEÑO.M

Fuente: Elaboración Propia

En donde podemos ver la miniaturización conforme aumenta el número de iteraciones

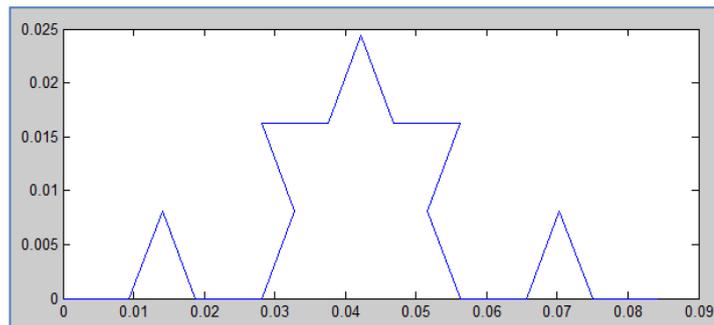


FIGURA 4-12: PEQUEÑO F=500MHZ ITERACIÓN=2

Fuente: Elaboración Propia

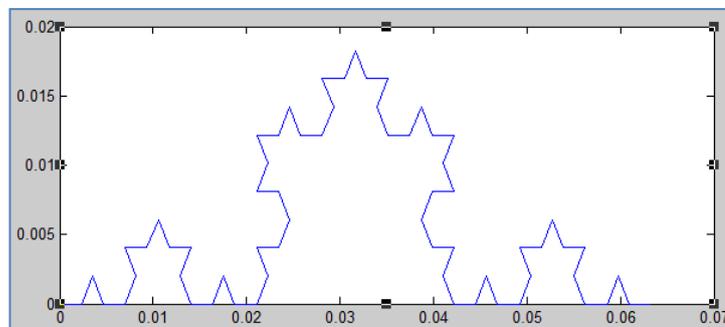


FIGURA 4-13: PEQUEÑO =500MHZ ITERACIÓN=3

Fuente: Elaboración Propia

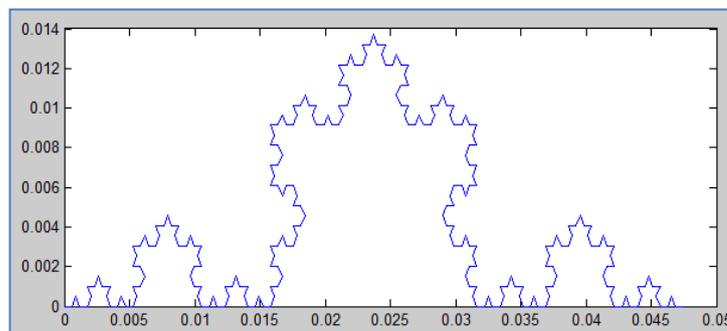


FIGURA 4-14: PEQUEÑO =500MHZ ITERACIÓN=4

Fuente: Elaboración Propia

Para resumir como varía la longitud total de la antena en modo me miniaturización tenemos la siguiente tabla:

TABLA 4-1: VARIACIÓN DE LONGITUD TOTAL CON MINIATURIZACIÓN F=500MHZ

Iteración	Longitud ($\lambda/4$) (cm)	Longitud ($\lambda/2$) (cm)
2	8.44	16.88
3	6.33	12.66
4	4.75	9.5

4.1.2. 4NEC2:

Ante la dificultad que trae el diseño, análisis, ajuste y construcción de una antena, se han desarrollado potentes herramientas o software que facilitan en gran medida todas las etapas del proceso de dimensionado de una antena. Se trata de simuladores electromagnéticos que aprovechan la capacidad de cálculo de los ordenadores para determinar los flujos electromagnéticos de las estructuras que se quiera analizar.

El NEC2 (Numerical Electromagnetics Code) es un programa orientado al usuario, desarrollado en el Lawrence Livermore National Laboratory con soporte del Naval Ocean Systems Center y el Air Force Weapons Laboratory. Es un código basado en el método de momentos para analizar la interacción de las ondas electromagnéticas con estructuras arbitrarias consistentes de alambres conductores y superficies. Combina una ecuación integral para superficies lisas con uno de los cables para proporcionar modelos convenientes y precisos para una amplia gama de aplicaciones. [BAL2005] [OLT2009]

Puede simular líneas de transmisión, conductores perfectos o no, carga de elementos concentrados, planos de tierra de conducción perfecta o no. Además, este utiliza la ecuación de campo eléctrico integral (EFIE) para hilos finos y la ecuación de campo magnético integral (MFIE) para las superficies. El programa calcula las corrientes inducidas y las cargas, los campos cercanos y lejanos, el campo magnético, impedancias, admitancias, ganancia, la directividad y el acoplamiento antena-antena. [BAL2005]

La aplicación 4NEC2 desarrollada por Arie Voors, actúa como “Graphic User Interface” (GUI, Interfaz Gráfico de Usuario) en un entorno Windows, permitiendo la entrada de datos, edición de la estructura y visualización de los resultados de una forma gráfica y cómoda. Utiliza dicho lenguaje y añade varias aplicaciones de diseño, optimización y presentación de resultados sumamente interesantes y prácticas. [OLT2009]

Tanto el programa NEC2 como el 4NEC2 son aplicaciones de código libre.

Existen varias maneras de implementar la antena en el programa, se puede hacer gráficamente, esto es, dibujando la antena en el editor geométrico, o se puede describir la antena en un fichero, escribiendo cada una de las coordenadas de sus segmentos.

Además, el programa permite parametrizar y optimizar la estructura mediante la inclusión de variables. [OLT2009]

El entorno descriptivo de 4NEC2 permite implementar la antena mediante la especificación de las características geométricas de cada elemento que conforma la curva.

Las antenas se definen mediante hilos (wire) que son divididas en segmentos para calcular las intensidades que pasan por este. El programa 4NEC2 impone una serie de reglas geométricas para la longitud y el diámetro de las estructuras wire y el número de segmentos en que deben dividirse.

En las simulaciones efectuadas se ha omitido el modelado de las pérdidas óhmicas de la antena puesto que la simulación matemática se desvirtúa en gran medida dando lugar a errores no fundamentados.

También se ha obviado la inclusión de un plano de masa, de modo que todas las simulaciones se han efectuado en un entorno "free space" (el vacío).

La fuente de alimentación utilizada en todas las simulaciones es $1 + 0j$ V. El punto de alimentación se ubica en el segmento central, por el que cruza el eje de simetría vertical de la curva. [OLT2009]

4.2. Especificaciones de Diseño:

Siguiendo con las características de las hojas de especificaciones de las antenas comerciales desarrollada por FRACTUS (ver anexo 3) para aplicaciones similares a la nuestra, se han definido unas especificaciones de diseño a cumplir o en su defecto, lograr una aproximación satisfactoria.

- **Diagrama de Radiación:** Puesto que se trata de una antena dipolo de recepción el diagrama de radiación tendrá dos lóbulos principales.
- **Frecuencia de Diseño:** Dado que se pretende crear una aplicación para TDT y según lo visto en el capítulo 3, la antena debe ser compatible con la banda de televisión digital, es decir, la frecuencia de trabajo será de 500-600 MHz, obviamente debido a sus propiedades de multibanda también tendrán otras frecuencias de operación las cuales variarán según las dimensiones y el número de iteraciones de la antena.
- **Ganancia:** La ganancia típica para este tipo de aplicaciones está alrededor de 2 Dbi.

- **Pérdida de Retorno:** La pérdida de retorno debe ser como máximo -10dB.
- **Standing Wave Ratio:** El SWR debe ser inferior a 1.8.

4.3. Diseño:

Como se sabe, si se fabrica un dipolo de frecuencia f , esta debe tener una longitud de $\lambda/2$, pero debido a que este dipolo no está formado por dos hilos rectos, esta condición variará dependiendo del número de iteraciones de la antena, es decir la frecuencia de operación de la antena será diferente a la frecuencia a la cual fue diseñada. Es por ello que haremos un análisis de la variación de la frecuencia de operación según la variación de la frecuencia de diseño y también según el número de iteraciones.

Para esta parte del diseño haremos uso del 4NEC2 para ver las características que tendrá la antena.

Los scripts de 4NEC2 a usar serán *trianguloFitY.nec* donde F indica la frecuencia de diseño e Y indica el número de iteración.

Empezaremos el análisis con *triangulo700it2.nec*:

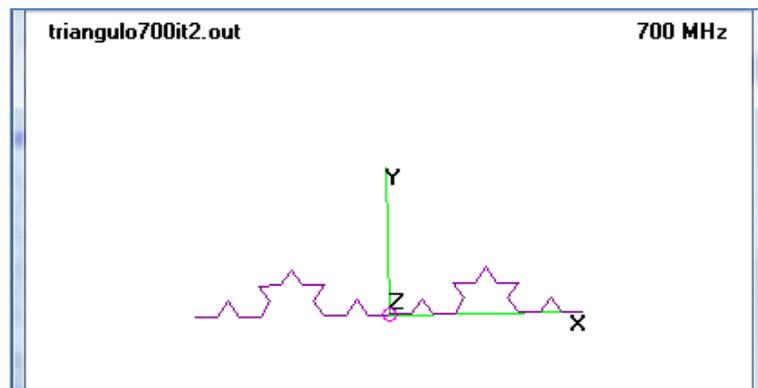


FIGURA 4-15: ANTENA TRIANGULO700IT2.NEC
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

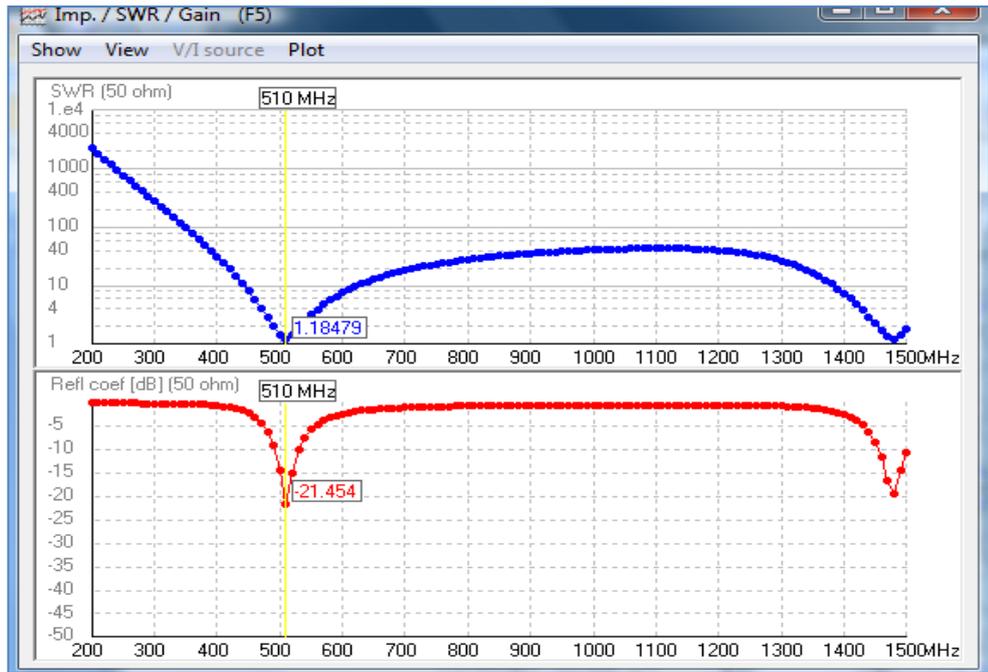


FIGURA 4-16: FRECUENCIA DE OPERACIÓN DE TRIANGULO700IT2.NEC

Fuente: Elaboración Propia

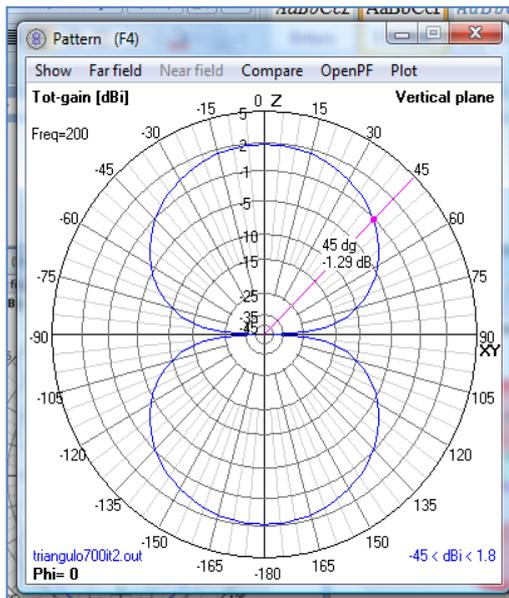


FIGURA 4-17: PATRÓN DE RADIACIÓN DE TRIANGULO700IT2.NEC

Fuente: Elaboración Propia

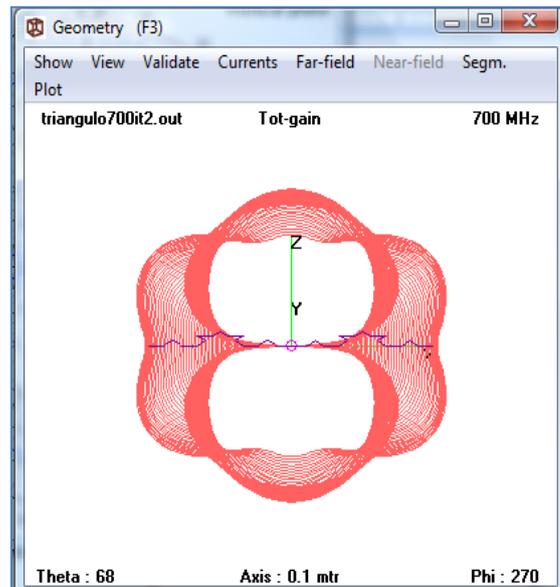


FIGURA 4-18: CAMPO LEJANO Y CAMPO CERCANO DE TRIANGULO700IT2.NEC

Fuente: Elaboración Propia

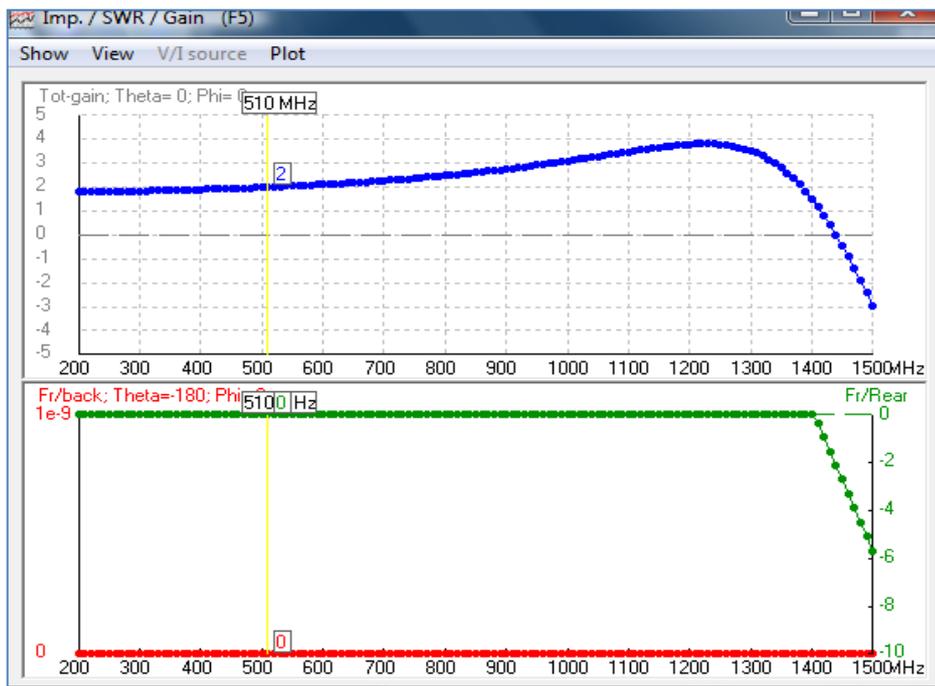


FIGURA 4-19: GANANCIA DE LA ANTENA TRIANGULO700IT2.NEC

Fuente: Elaboración Propia

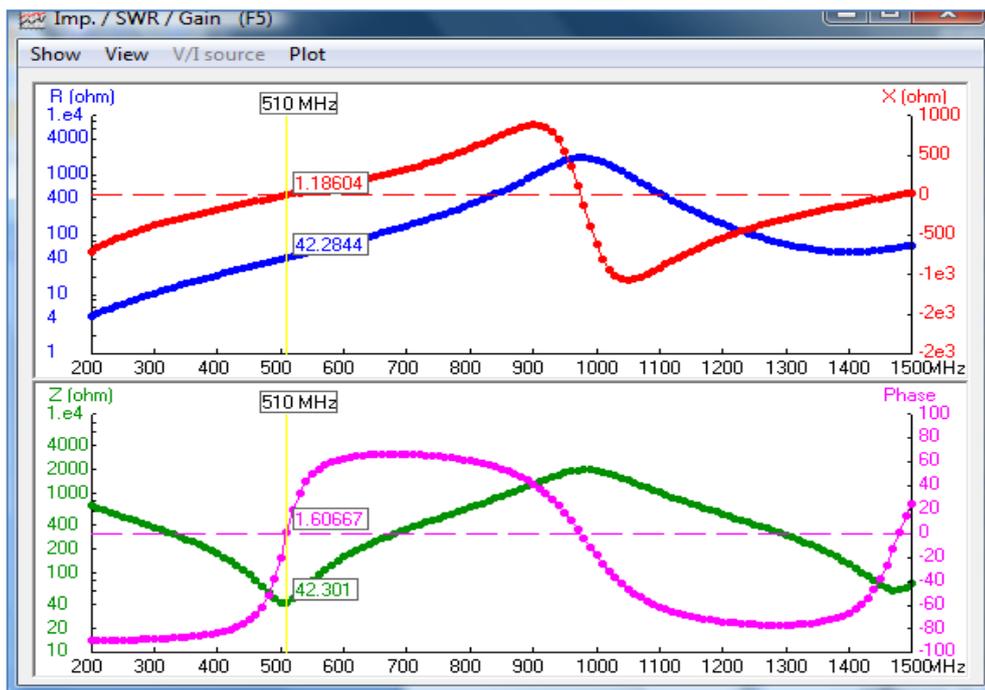


FIGURA 4-20: IMPEDANCIA DE ENTRADA DE TRIANGULO700IT2.NEC

Fuente: Elaboración Propia

Como podemos ver la frecuencia de operación es 510MHz el cual pertenece a nuestro rango de operación, además según los datos de la figura 4-16 el rango de operación es de 470 y 550. Además tiene una ganancia de 2, un SWR de 1.18 y un tamaño total de 21.5 x 3.1 cm.

Ahora veremos qué pasa si aumentamos la iteración, por lo que tomaremos el script *triangulo700it3.nec*

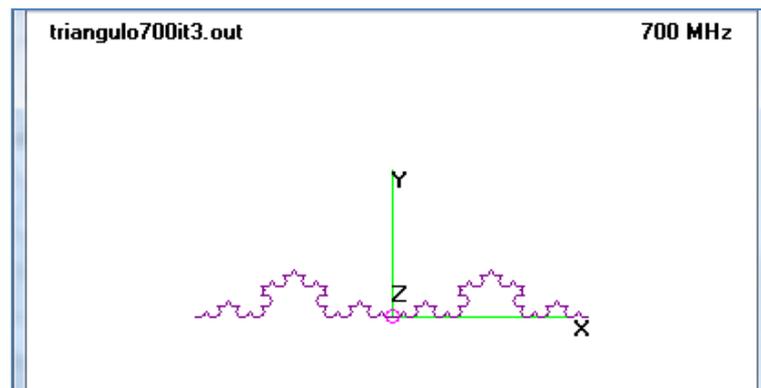


FIGURA 4-21: ANTENA TRIANGULO700IT3.NEC

Fuente: Elaboración Propia

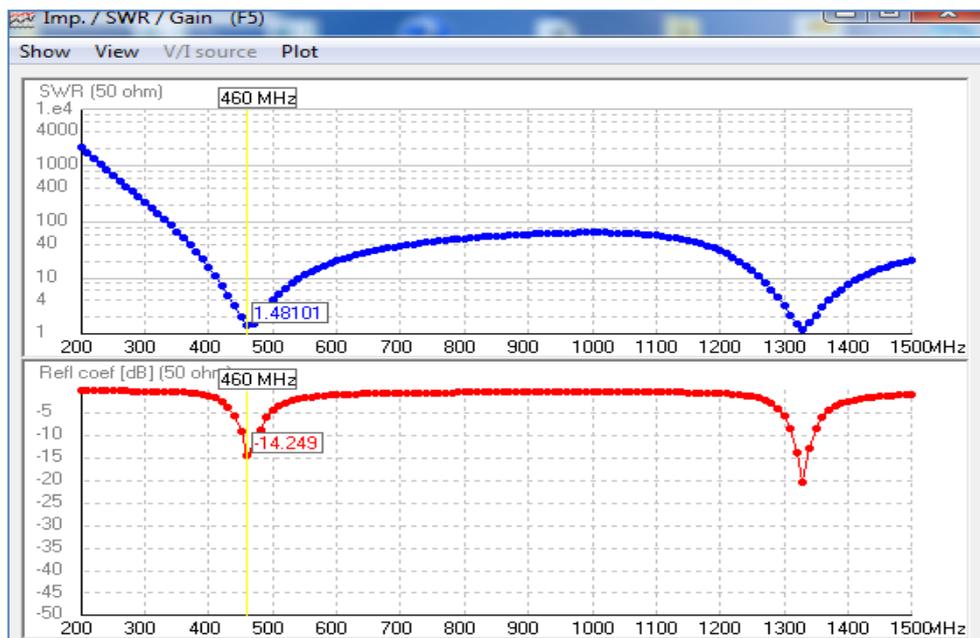


FIGURA 4-22: FRECUENCIA DE OPERACIÓN DE TRIANGULO700IT3.NEC

Fuente: Elaboración Propia

Aquí se nota que al aumentar la iteración, habrá una mayor cantidad de segmentos, por lo que la longitud total del cable aumentará, haciendo que la frecuencia de operación disminuya.

También se usará el modelo *tripleDipFitY.nec* para ver el comportamiento que tendrá la antena. Para este caso usaremos el script *tripleDip900it2.nec*. Es decir la antena tendrá una frecuencia de diseño de 900 MHz y la iteración será de dos.

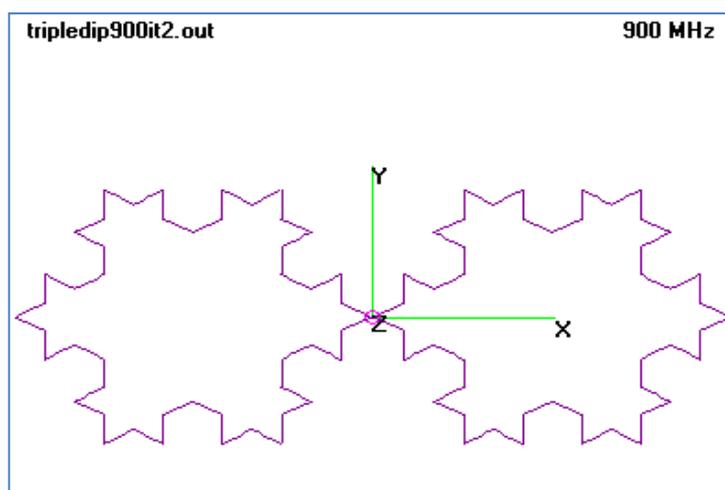


FIGURA 4-23: ANTENA TRIPLEDIP900IT2.NEC

Fuente: Elaboración Propia

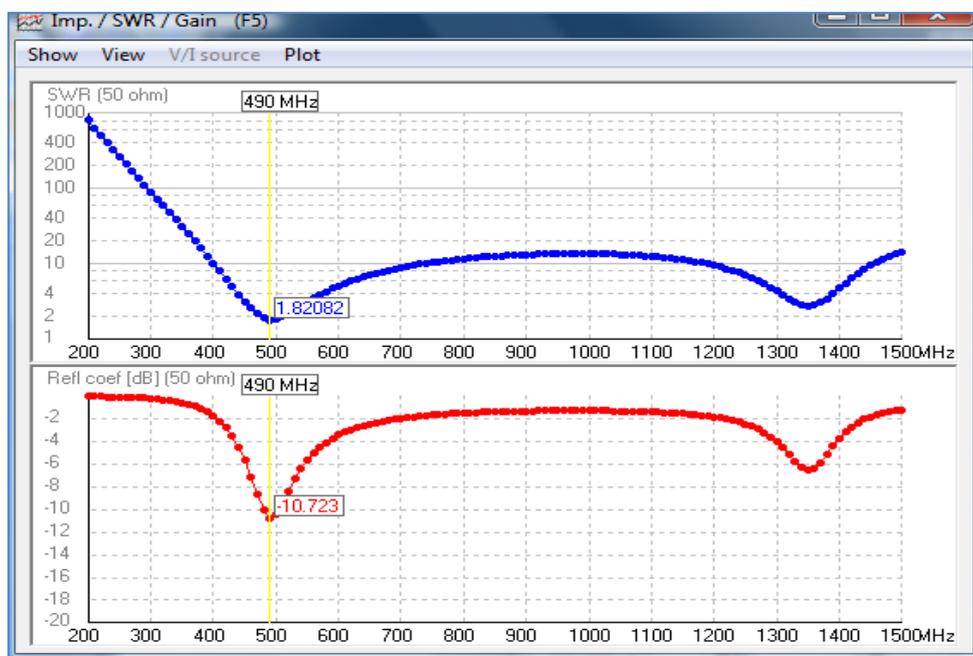


FIGURA 4-24: FRECUENCIA DE OPERACIÓN DE TRIPLEDIP900IT2.NEC

Fuente: Elaboración Propia

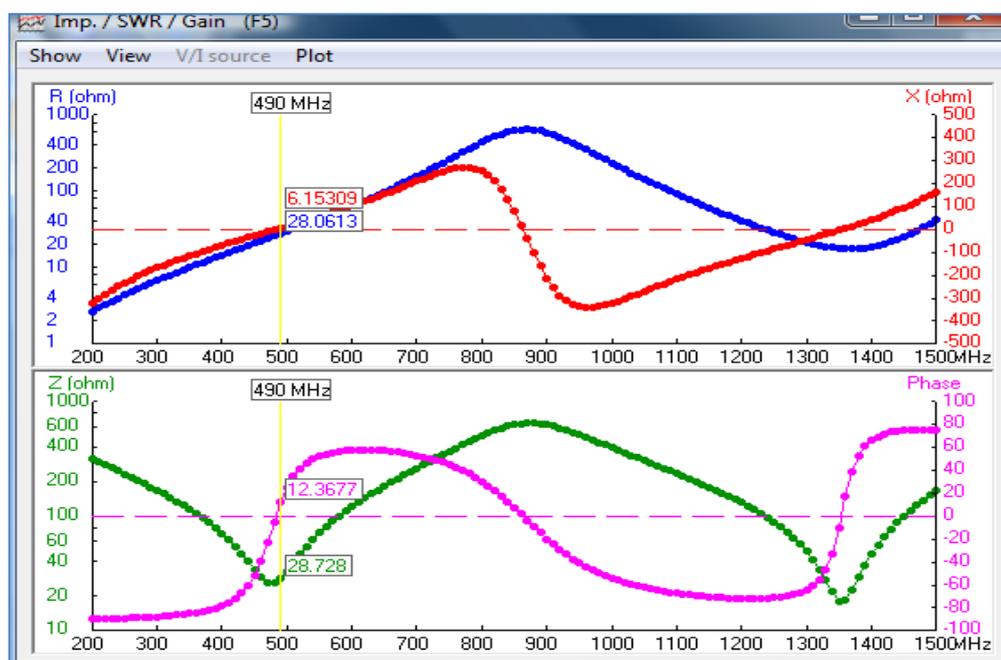


FIGURA 4-28: IMPEDANCIA DE ENTRADA DE TRIPLEDIP900IT2.NEC

Fuente: Elaboración Propia

Como podemos ver la frecuencia de operación es 490MHz el cual pertenece a nuestro rango de operación, además según los datos de la figura 4-24 el rango de operación es de 460 y 550. Además tiene una ganancia de 2.43 dBi, un SWR de 1.82 y un tamaño total de 17 x 20 cm.

4.4. Análisis de resultados:

A continuación presentamos una tabla sobre la variación de las características de la antena usando el script *trianguloFitY.nec* la cual trataremos de analizar:

TABLA 4-2: VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE ANTENA SEGÚN TRIANGULOFITY.NEC

Frecuencia	Iteración	Longitud Segmento (cm)	Longitud Total (cm)	Frecuencia de Operación (MHz)	SWR	Banda de Operación (MHz)	Ancho de Banda (MHz)
600	2	1.39	25 x 3.6	440	1.26	410-470	60
600	3	0.46	25 x 3.6	400	1.45	380-420	40
700	2	1.19	21.5 x 3.1	510	1.18	470-550	80
700	3	0.4	21.5 x 3.1	465	1.4	440-490	50
800	2	1.04	18.8 x 2.7	590	1.14	550-640	90
800	3	0.35	18.8 x 2.7	570	1.19	530-620	90
800	4	0.12	18.8 x 2.7	470	1.8	450-490	40

A continuación presentamos una tabla sobre la variación de las características de la antena usando el script *tripleDipFitY.nec*, el cual forma la antena dipolo de copos de Koch en cada lado:

TABLA 4-3: VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE ANTENA SEGÚN TRIPLEDIPFIT.Y.NEC

Frecuencia	Iteración	Longitud Segmento (cm)	Longitud Total (cm)	Frecuencia de Operación (MHz)	SWR	Banda de Operación (MHz)	Ancho de Banda (MHz)
600	2	1.39	25 x 29	340	2.7	310-370	60
600	3	0.46	25 x 29	330	2.4	310-350	40
700	2	1.19	21.5 x 25	400	2.56	370-430	60
700	3	0.4	21.5 x 25	360	2.9	340-380	40
800	2	1.04	18.8 x 22	460	2.57	430-500	70
800	3	0.35	18.8 x 22	590	2.95	550-630	80
900	2	0.93	17 x 20	510	2.57	480-560	80
900	3	0.31	17 x 20	660	2.95	620-700	80
1000	2	0.83	15 x 18	570	2.56	530-620	90

Hay 2 formas de analizar esta tabla:

- Frecuencia constante, Iteración Variable:** Notamos que a mayor iteración la frecuencia de operación disminuye debido a que la longitud total del hilo conductor aumenta, pero además vemos que el SWR va aumentando, es decir que la impedancia también varía, haciendo que aparezca mayor cantidad ondas reflejadas disminuyendo así el rendimiento de la antena, además vemos que este cambio de impedancia es más brusco haciendo que el rango de operación disminuya, pero aumenta las bandas de operación. Es decir, para frecuencia constante:

TABLA 4-4: RESUMEN DE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE ANTENA FRECUENCIA CONSTANTE

Iteración	Longitud Segmento (cm)	Longitud Total (cm)	Frecuencia de Operación (MHz)	SWR	Número Banda de Operación (MHz)	Ancho de Banda (MHz)
Aumenta	Disminuye	Constante	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Disminuye
Disminuye	Aumenta	Constante	Aumenta	Disminuye	Disminuye	Aumenta

- **Frecuencia Variable, Iteración Constante:** Se nota que a mayor frecuencia, la frecuencia de operación aumenta, y que el SWR disminuye, acercándose a 1, lo cual aumentaría el rendimiento de la antena ya que no habría pérdidas por acoplamiento, y además el ancho de banda aumenta, pero el número de bandas de operación disminuye debido a que las frecuencias de resonancia están más alejadas. Es decir a iteración constante:

TABLA 4-5: RESUMEN DE VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE ANTENA ITERACIÓN CONSTANTE

Frecuencia	Longitud Segmento (cm)	Longitud Total (cm)	Frecuencia de Operación (MHz)	SWR	Número Banda de Operación (MHz)	Ancho de Banda (MHz)
Aumenta	Disminuye	Disminuye	Aumenta	Disminuye	Disminuye	Aumenta
Disminuye	Aumenta	Aumenta	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Disminuye

Como se ha visto a lo largo del diseño, el SWR, dentro de la banda de operación, varía en un rango de 1 a 2.5; si bien este valor del parámetro no es del todo óptimo, se puede decir a favor, que las empresas FRACTUS Y FRACTENNA usan este rango de valores para el desarrollo de sus antenas (ver hojas de datos en los anexos) ya que a pesar de que la tecnología fractal nos brinda varios beneficios en la miniaturización, esta miniaturización hace que se pierda eficiencia y rendimiento, es por ello que estas empresas ponen como característica principal en la hoja de datos, que las antenas poseen una ganancia mayor a la que pide su respectivo estándar, y no toman en cuenta los valores de SWR.

4.5. Implementación:

Si bien las simulaciones en 4NEC2 nos indican los parámetros de diseño tales como frecuencia e iteración además de las dimensiones que debe tener cada segmento que debe tener la antena dipolo para que funcione correctamente, estas variarán ya que la implementación será hecha en circuito impreso, donde el dieléctrico a usar será la baquelita y no el aire libre como fueron tomadas en las simulaciones.

Para esto solo se hará una breve corrección en las dimensiones de la antena para que funcione correctamente, dicha corrección consiste en agregarle el factor de velocidad que depende de la inversa de la raíz cuadrada de la permitividad relativa del dieléctrico (ϵ_r (baquelita) = 2.3)

Es decir que si una antena de longitud L que funciona en el aire libre a una frecuencia F , para que dicha antena funcione a la misma frecuencia pero sobre un circuito impreso cuyo dieléctrico es la baquelita la longitud $L_{\text{dielectrico}} = L * 1/(\sqrt{\epsilon_r})$. Según lo hallado en la tabla 4-2 la longitud de cada segmento que conforma la antena en el vacío o aire es 1.19 cm pero impreso sobre baquelita será $1.19 * 1/(\sqrt{2.3}) = 0.79$ cm. [BAL2005]

Además existe otro factor a tomar en cuenta en la implementación, como se sabe una antena dipolo es un sistema balanceado y el tipo de conector a usar en nuestro caso un cable coaxial es un sistema desbalanceado, por lo que será necesario usar un balun coaxial de $\lambda/4$ de 1:1 el cual nos ayude a transformar un sistema balanceado a uno desbalanceado sin necesidad de que haya pérdidas por acoplamiento ni cambios en la impedancia de entrada y salida. [BAL2005]

Si se conecta el dipolo a la línea coaxial sin intercalar el balun, se produce una diferencia de corrientes en los brazos del dipolo que provoca la circulación de una corriente a tierra por la malla del coaxial. El desequilibrio de corrientes en los brazos del dipolo introduce anomalías en el diagrama de radiación y en la impedancia de entrada.

Una de las soluciones al problema de la simetría consiste en conseguir dos puntos de alimentación al mismo potencial respecto a tierra desfasados entre sí 180° . [OLT2009]

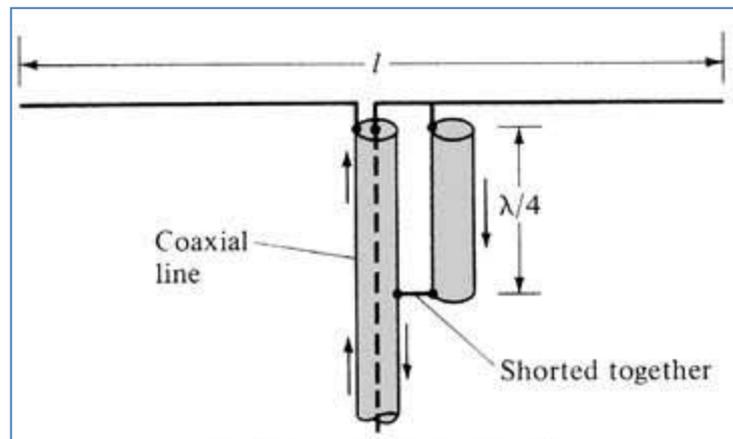


FIGURA 4-29: BALUN COAXIAL DE $\lambda/4$ DE 1:1
 Fuente: "Antenna Theory: Analysis and Design" [BAL2005]

Según lo visto en la figura 4-29 es necesario agregarle un cable coaxial de $\lambda/4$ de longitud, si bien esto es correcto es necesario agregarle multiplicarlo por el factor de velocidad del coaxial (f_c) y el factor de velocidad de la baquelita (f_b)

$$L = \frac{c}{f} * 0.25 * f_c * f_b$$

Donde:

c: Velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8$ m/s)

f: Frecuencia de operación (520 MHz)

f_c : 0.68

f_b : $1/(\sqrt{2.3}) = 0.66$

Resolviendo la ecuación $L = 6.4$ cm, es decir la longitud del balun será de 6.4 cm

Es por ello que para la construcción se usaron los siguientes materiales:

- 1 Placa de baquelita con una cara cubierta de cobre 20cm x 8cm
- Conectores N Hembra
- 1 Conector N Macho
- Cable coaxial RG58

Además a nuestro diseño inicial se le tuvo que agregar un pequeño circuito el cual sirve para unir los elementos activos y las mallas de los conectores N hembra para poder formar nuestro balun y que funcione correctamente. Todos los segmentos de cobre tienen un ancho de 2 mm

Luego de imprimir el circuito y soldar los conectores a la placa se tiene:

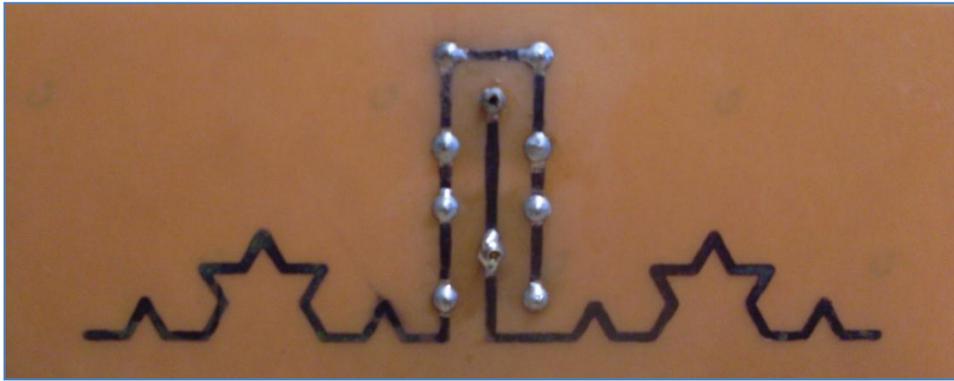


FIGURA 4-30: VISTA ANTERIOR DE LA ANTENA
Fuente: Elaboración Propia

Se puede notar en la figura 4-30, los lados del dipolo formados por un fractal de iteración 2, y en la zona media un pequeño circuito que nos ayuda a unir los elementos activos del balun y el cable alimentador así como sus respectivas mallas.

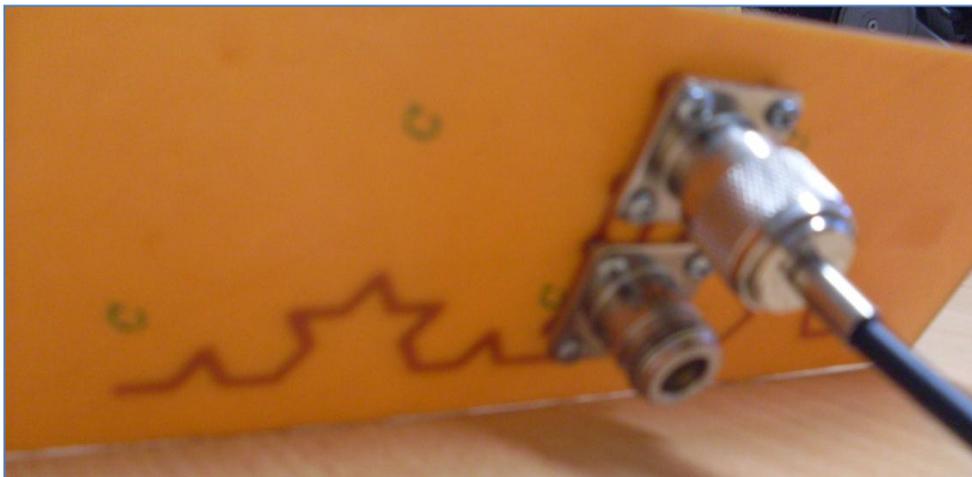


FIGURA 4-31: VISTA POSTERIOR DE LA ANTENA
Fuente: Elaboración Propia

Mientras que en la cara posterior se ve los 2 conectores N, una unida al balun, mientras que la que está libre ira unida al coaxial principal que estará conectado al equipo de medición.

Para las mediciones haremos uso del VNA

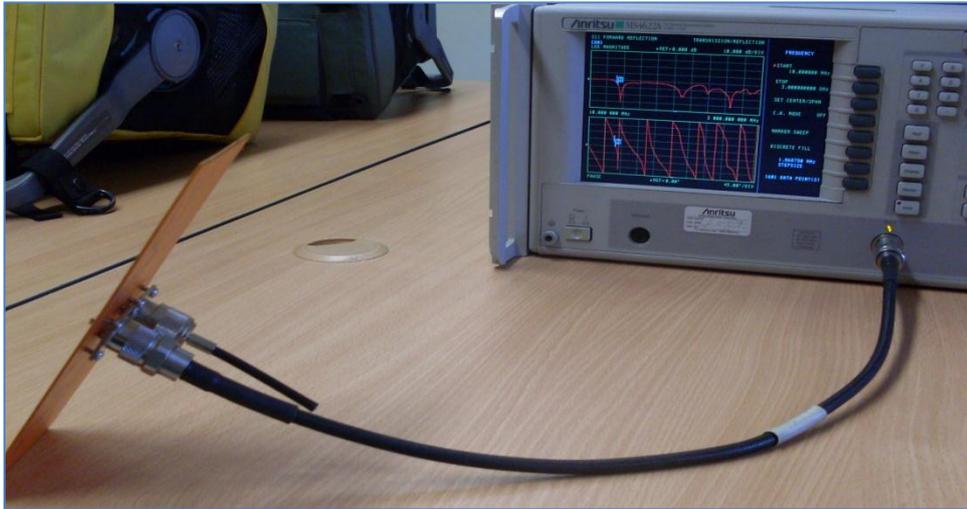


FIGURA 4-32: ANTENA CONECTADA AL VNA
Fuente: Elaboración Propia

Haciendo las mediciones:

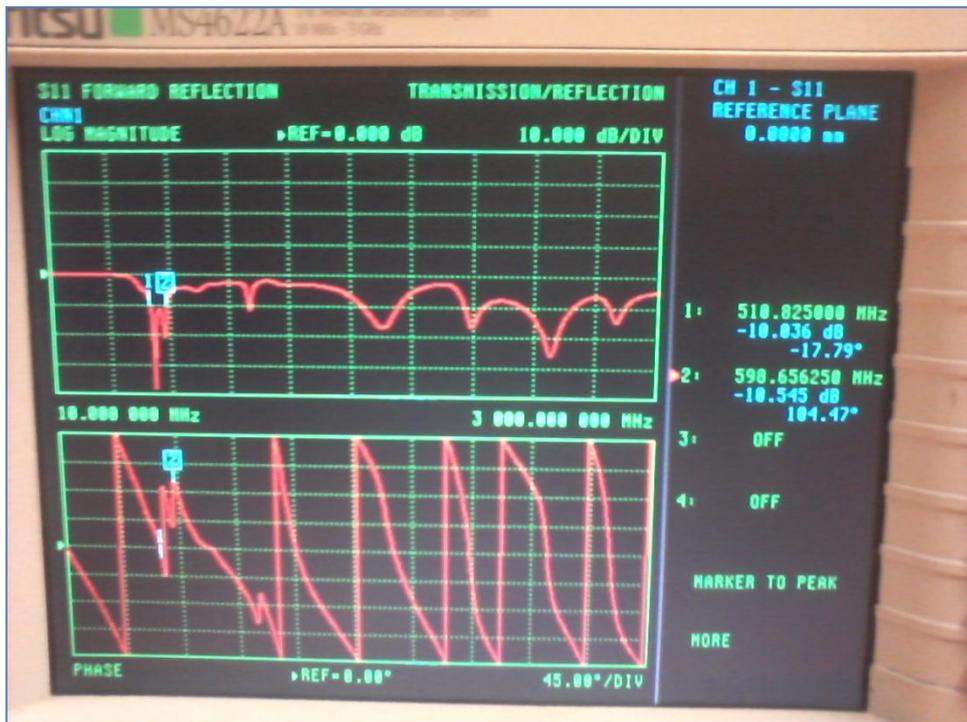


FIGURA 4-33: ANCHO DE BANDA DE LA ANTENA
Fuente: Elaboración Propia

Como se puede notar la antena trabaja aproximadamente en la banda de 500-600 MHz ya que la pérdida de retorno es menor a -10dB, lo cual concuerda con las especificaciones de diseño.

4.5.1. Implementación de Antena Exterior:

La implementación de una antena exterior es más sencilla que una interior, ya que en el exterior existen menos fenómenos asociados a la propagación tales la pérdida por trayectoria, reflexión, difracción, multitrayecto o dispersión, cuyos efectos sí son más marcados en interiores.

Es por ello que la antena vista en la figura 4.30 sería óptima para trabajar como antena exterior.

4.5.2. Implementación de Antena Interior:

Este caso será más complicado ya que en este escenario si es necesario incluir los efectos de reflexión, multitrayecto, etc.

Por lo que para asegurar una mejor recepción se hará uso de algunos conceptos de Antenas Inteligentes.

- **Switched Beam Antenna (SBA):**

Uno de los tipos de sistema de antena inteligente es el Switched Beam Antenna (SBA) o sistema de conmutación de haz en el cual el sistema de antenas posee un controlador que detecta la intensidad de señal de cada antena y escogen una de los varios haces predeterminados y conmutan hacia el haz de mayor intensidad, mejorando el sistema de comunicación. El objetivo general del sistema de conmutación de haz es aumentar la ganancia de acuerdo con la ubicación del usuario.

Dentro de las ventajas del SBA tenemos su fácil y barata implementación, mejorar la cobertura de sistema, reducir interferencias e incrementar la capacidad del sistema. [NTC2011] [BAL2005]

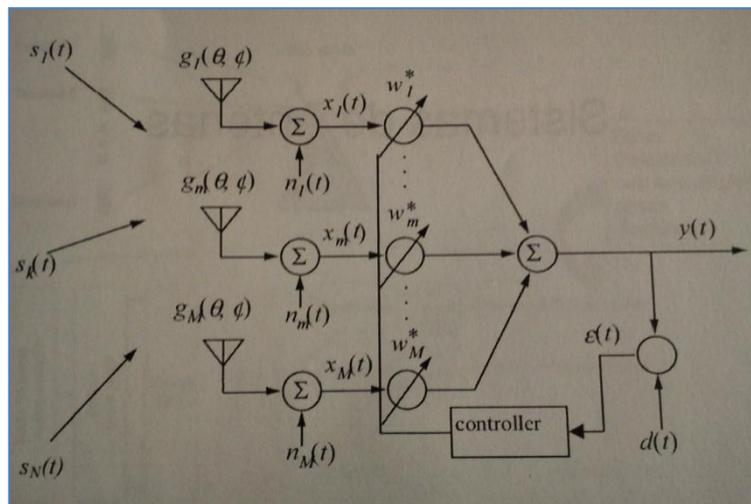


FIGURA 4-34: DIAGRAMA GENERAL DE UN SISTEMA BEAMFORMING
Fuente: "Nuevas tecnologías en Comunicaciones Móviles Celulares" [INI2011]

Para esta tesis el arreglo estará formado por 4 dipolos dentro de un circuito impreso (estos dipolos son los mismos que usamos en la antena exterior, tienen las mismas dimensiones, por lo que tendrá la misma banda de operación) que formarán un cuadrado (ver figura 4-35), donde cada dipolo será el lado de dicho cuadrado, cada lado medirá $\lambda/2$ es decir que el cuadrado tendrá una dimensión de 25cm x 25cm.



FIGURA 4-35: ANTENA INTERIOR
Fuente: Elaboración Propia

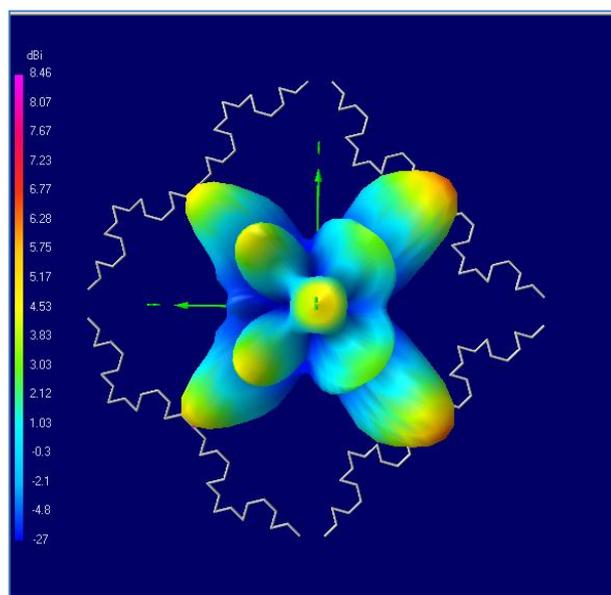


FIGURA 4-36: CAMPO LEJANO ANTENA INTERIOR
Fuente: Elaboración Propia

Esta distancia de $\lambda/2$ facilita la diversidad espacial de la antena, haciendo que disminuyan los efectos de multitrayecto, reflexión, etc. generando una mejor recepción necesaria en interiores.

Pero además con este arreglo mejoramos la diversidad de polaridad horizontal y vertical.

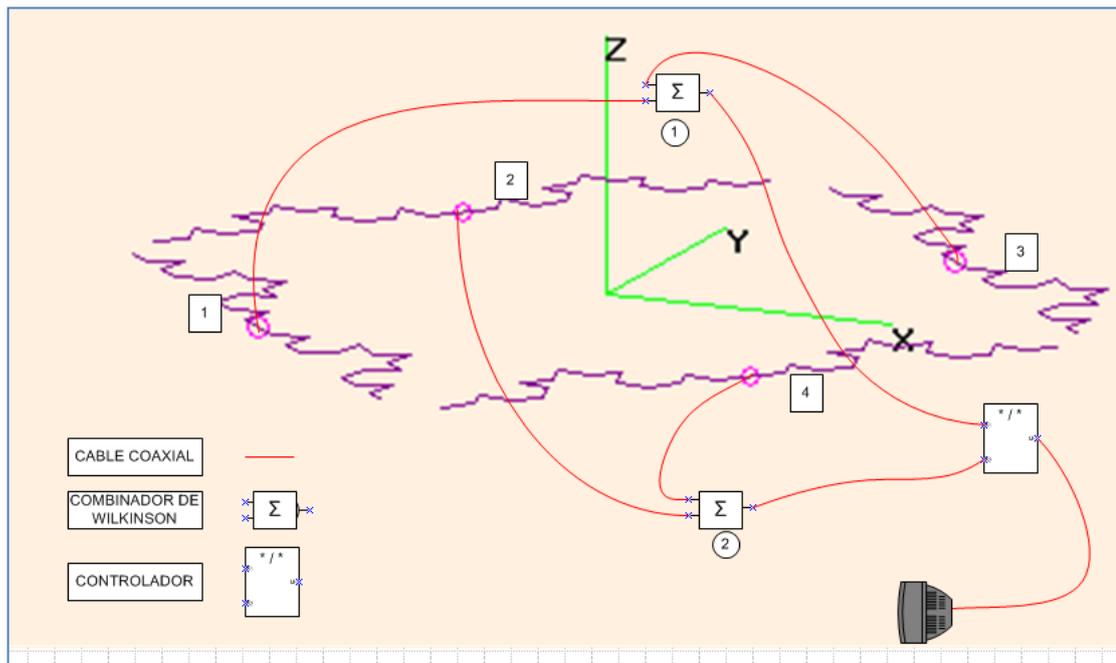


FIGURA 4-37: CONEXIONES DE LA ANTENA INTERIOR

Fuente: Elaboración Propia

Se puede ver en la figura 4-37 la forma en que los dipolos se conectarán para formar un único sistema, en este caso las antenas 1 y 3, las cuales están distanciadas $\lambda/2$, estarán unidas a través de un combinador de Wilkinson o splitter, el cual actúa como sumador de las potencias de señales, asegurando así la diversidad espacial para un mejor rendimiento del sistema. Se hace el mismo procedimiento con las antenas 2 y 4. Como se puede notar las señales de salida del combinador 1 y 2 poseen diferente polaridad, es decir que si uno posee polaridad vertical la otra tendrá polaridad horizontal, con lo cual también se tendría diversidad de polaridad; obteniendo, el sistema, un mejor rendimiento.

Pero para poder combinar dichas señales es necesario hacer uso de algún tipo de controlador usado en los Switched Beam Antennas, el cual funcionará como conmutador de señales, este equipo medirá las potencias de cada señal entrante, las comparará y detectará la de mayor intensidad, haciendo que el sistema conmute a esta señal para que puede ser llevada al receptor de TV teniendo así un mejor performance del sistema.

Es decir se tiene como resultado final:

- Para Antena Exterior: Un dipolo dentro de un circuito impreso de baquelita de 20cm x 8cm, dicho dipolo está formado por un fractal de iteración 2 con una longitud de cada segmento de 0.79 cm, cuya banda de operación es de 500 – 600 MHz.
- Para Antena Interior: Un arreglo de cuatro dipolos (cada dipolo por separado posee las mismas características que el dipolo para exteriores) formando un cuadrado de $\lambda/2$ de lado, todo el arreglo estará dentro de un circuito impreso de baquelita de 25cm x 25cm. Además usará 2 combinadores o splitter, uno para cada polaridad y por último un controlador el cual dejará pasar la señal con mayor intensidad para que puede ser enviada al receptor de TV.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones:

De acuerdo a lo visto luego del análisis del diseño de los distintos tipos de antenas fractales concluimos:

- La geometría fractal tiene una gran aplicación en el diseño de antenas ya que permite crear estructuras que si bien ocupan una similar área en el plano, estas pueden trabajar en diferentes frecuencias, terminando así con la dependencia de la longitud de la antena con la frecuencia de operación. Es por ello que la geometría fractal hace posible la miniaturización de la antena.
- Las características de la antena están fuertemente ligadas al número de iteraciones que posee la estructura, como se ve en los resultados, a medida que aumenta el número de iteración disminuye la frecuencia de operación de la antena y además se generan más armónicos, es decir se crean más bandas de trabajo. Si generalizamos, notaríamos que si el número de iteraciones tiende al infinito la antena trabajaría en toda la banda de frecuencias a un nivel óptimo, creando así una súper-antena. Obviamente lograr una iteración de infinito es algo abstracto e irrealizable.

- Como se puede notar, las aplicaciones son bastante amplias debido a la gran versatilidad que le da la geometría fractal. Hoy en día podemos ver a empresas como FRACTUS desarrollando antenas fractales para BTS, telefonía móvil, o aplicaciones inalámbricas como BlueTooth o ZigBee.
- Existen 2 formas de crear antenas fractales, la primera es haciendo uso de alambre al cual se le da la forma del fractal, y la segunda es a través de circuito impreso, siendo la primera muy inexacta, ya que debido a las dimensiones, el doblaje del alambre es muy complicado y posee demasiado error, creando una antena de bajo rendimiento, mientras que en circuito impreso las dimensiones son más exactas y posee una fácil elaboración, siendo el procedimiento de soldadura el que agregue algo de error.
- La elaboración de una antena para exterior es más sencilla porque en esta no es necesario tomar en cuenta los diferentes tipos de fenómenos de propagación al estar en un ambiente más libre. Mientras que para la antena interior sí es necesario incrementar el rendimiento del sistema de comunicación ya que en este escenario las señales son más propensas a sufrir efectos de reflexión, multitrayecto, etc. por lo que es necesario hacer uso de otros elementos como controladores y/o combinadores para un mejor funcionamiento.

5.2. Recomendaciones:

- Se recomienda seguir investigando sobre las propiedades de la geometría fractal, ya que esta posee diversas aplicaciones, una es el nuevo mercado de los metamateriales y de las aplicaciones que podrían tener estos en telecomunicaciones.
- Si bien empresas como FRACTUS o FRACTENNA han desarrollado un alto grado de miniaturización, se recomienda ver esta opción como un nuevo mercado, ya que la implementación de estas antenas no son costosas ni difíciles y depende en gran medida de la capacidad del diseñador para crear antenas que trabajen con diferentes aplicaciones al mismo tiempo.

- Se recomienda elaborar un estudio sobre el diseño e implementación de controladores, capaces de conmutar señales dependiendo de la mediación de potencia de posean dichas señales.

Bibliografía

- [ABN2007] ABNT NBR 15604:2007
2007 *Televisión Digital Terrestre*. Río de Janeiro: Asociación Brasileira de Normas Técnicas.
- [ADA2005] ADAME SARMIENTO, Edwin
2005 *Sistema de Funciones Iteradas y Fractales*. Bogotá: Fundación Universitaria Konrad Lorenz, Consulta: 19 octubre del 2010. URL:
<http://www.fukl.edu.co/images/stories/suma_digital_matematicas/SFI%20y%20los%20Fractales.pdf>
- [ARA2007] ARANA CADILLO, Betsy
2007 *Diseño e Implementación de Antenas Fractales*, Tesis para optar el título de de Ingeniero de las Telecomunicaciones, Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Consulta: 15 de agosto del 2010.
- [ART2007] ASOCIACIÓN DE RADIO Y TELEVISIÓN DEL PERÚ
2007 *Televisión Digital* [diapositivas], Lima, Consulta: 30 de mayo del 2010.
URL: < www.mtc.gob.pe/portal/tdt/docs/pres_artv.ppt>
- [BAL2005] BALANIS, Constantine
2005 *Antenna Theory: Analysis and Design*. Tercera Edición. New Jersey: J. Wiley
- [BOU1991] BOURKE, Paul
1991 *An Introduction to Fractal*. Noongard: The University of Western of Australia, Consulta: 05 septiembre del 2010, URL:
<<http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/fractals/fracintro/>>
- [CAB2008] CABRERA MERINO, Mirtha Emilia
2008 *Estudio sobre la Migración de la Televisión Analógica hacia la televisión Digital Terrestre en el Perú*, Tesis para optar el Título de Ingeniero de las Telecomunicaciones, Lima: Pontificia

Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
Consulta: 7 de junio del 2010.

- [CIN2008] SIENRA, Luis Gabriel
2002 “ATSC o DVB?” México D.F. Consulta: 30 de mayo del 2010. URL: < <http://www.cinit.org.mx/articulo.php?idArticulo=23>>
- [DTM2010] Estandar DTMB. Consulta: 15 de Diciembre del 2010. URL:<
http://tusitio.com.ve/portafolio/dtmb.info.ve/index.php?option=com_content&view=frontpage&Itemid=1 >
- [DTV2009a] DTV Answers URL: <http://www.dtvanswers.com/esp_what.html>
- [DTV2009b] DTV Answers URL:
<<http://www.dtv.gov/spanish/needtoknow.html>>
- [DTV2009c] DTV Answers URL: <<http://www.dtv.gov/spanish/whatisdtv.html>>
- [FRA2010] FRACTUS Optimised Antennas for Wireless Devices URL:
< <http://www.fractus.com/main/fractus/> >
- [FRC2010] FRACTUS ANTENNA SYSTEMS Inc. URL:
< <http://www.fractenna.com/index.html> >
- [FER2002] FERNANDEZ, Marcos Martin
2002 *Modulación en Amplitud*. Valladolid: Universidad de Valladolid, Consulta: 30 de mayo del 2010.
<<http://lmi.bwh.harvard.edu/papers/pdfs/2002/martin-fernandezCOURSE02.pdf>>
- [HER1997] HERNANDEZ, Oliver
1997 “*Descripción del Estándar MPEG-2*”. Revista Electrónica de la Escuela de Ingeniería Electrónica. Caracas, número 1, Consulta: 30 de Mayo del 2010, URL:
<<http://neutron.ing.ucv.ve/revista-e/No1/Mpeg2.htm>>
- [INI2011] INICTEL
2011 “*Nuevas tecnologías en Comunicaciones Móviles Celulares*”. Documento de Trabajo. Lima

- [MOC2002] MOCENCAGUA, Daniel TENORIO,Jaime
2002 “*Antenas Fractales*”. Puebla: Universidad Autónoma de Puebla. Consulta:05 de Septiembre del 2010, URL:
<http://www.acredit.ece.buap.mx/_DOCUMENT%20COMPROBAT%20DE%20AUTOEVALUAC/17_IA%2045%20C.8.1.2/Memorias%20FCE/fmcelect/P-FMC-002.pdf>
- [OLT2009] OLTRA GONZÁLEZ, Antonio
2009 *Diseño y construcción de una Antena Fractal Multibanda para Telefonía Móvil Celular*. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña. Consulta: 20 de octubre del 2010.
- [MIN2008] MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES
2008 *Plan Nacional de atribución de Frecuencias*. Lima.\
- [RPM2010] RAZURI, Marco, Antonio PALACIOS y José MENDOZA
2010 *Televisión Móvil sobre 3G*. Comunicaciones Móviles 2.Lima
- [SUB2006] PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
2006 *Análisis de los Estándares de Transmisión de Televisión Digital Terrestre y su aplicabilidad al medio Nacional*. Santiago.
URL:
<http://www.subtel.cl/prontus_tvd/site/artic/20070315/asocfile/20070315173311/estudio_uc.pdf>
- [VAR2010] VANDERBILT UNIVERSITY
2010 *Fractal and the Fractal Dimension*
URL:
<<http://www.vanderbilt.edu/AnS/psychology/cogsci/chaos/workshop/Fractals.html>>

Anexos

Anexo1: Funciones Matlab

Se presenta en este anexo los scripts en MATLAB usados para el diseño de las antenas

Anexo2: Simulaciones 4NEC2

Se presenta en este anexo los scripts en 4NEC2 usados para las simulaciones de las antenas.

Anexo3: Hojas de Datos

Se presenta en este anexo las hojas de datos de las antenas desarrolladas por FRACTUS, para comparar las características de éstas con las halladas en la presente tesis.