

UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

FACULTAD DE INGENIERIAS

Tesis de Grado previa a
La Obtención del Título
de Ingeniero Electrónico

“MEDICIÓN Y SIMULACIÓN DE RNI PARA LAS BANDAS MF, HF, VHF, Y
UHF DE BROADCAST EN LA CIUDAD DE CUENCA”

AUTORES:

Diego Manuel Barros Sarmiento

Cristian Fernando Jimbo Pinos

DIRECTOR:

Ing. Juan Pablo Bermeo

Cuenca, 2011

Certifico que el presente trabajo de Tesis desarrollado por los Señores Diego Manuel Barros Sarmiento y Cristian Fernando Jimbo Pinos, fue dirigido y revisado por mi persona, por lo que autorizo su presentación.

Cuenca, Enero del 2011-01-19

Ing. Juan Pablo Bermeo

DIRECTOR DE TESIS

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a los profesores de la Universidad Politécnica Salesiana por los conocimientos impartidos durante estos años de educación, en especial al Ingeniero Juan Pablo Bermeo por haber dirigido y revisado el presente proyecto.

Un especial agradecimiento a la Super Intendencia de Telecomunicaciones regional Sur, que nos apoyaron de manera logística, infraestructura y con su personal, gracias al Ing. Fabián Brito Intendente Regional, y al Tecnólogo Jhon Arcentales por su apoyo en conocimientos y experiencia nos ayudo con su asistencia y aliento moral al largo del desarrollo de la presente tesis.

DIEGO

CRISTIAN

DEDICATORIA

La presente tesis va dedicada en primer lugar a Dios como guía espiritual en mi vida, a mis papás por ser mi apoyo durante mi vida y estar a mi lado siempre en los momentos más difíciles, a mis hermanas y cuñados, en especial a mis compañeros de aula que han sido como mis hermanos con los cuales hemos compartido tardes, noches y madrugadas largas y eternas pero con la satisfacción del deber cumplido, a mis primos y familiares gracias por estar pendientes de mi gracias a todos.

DIEGO

DEDICATORIA

Esta presente trabajo es dedicado principalmente a Dios por ser la fuerza espiritual en mi vida, a mis padres que han sido un apoyo incondicional en todo momento, a mis hermanas que con su aliento han sabido darme fuerza para salir adelante en los momentos difíciles, a mis cuñados que han sido un ejemplo de superación, a mi esposa y a mi hijo por acompañarme en todo momento, a mis compañeros que supieron compartir y superar todas las dificultades que se presentaron.

CRISTIAN

INTRODUCCIÓN

Partiendo desde los fundamentos de transmisión, en nuestro país se ha llegado a normalizar, regularizar y estandarizar las estaciones de radio y televisión para de una manera organizada administrarla y regularizar cuidando el recurso del espectro radioeléctrico que es un bien del estado.

Las telecomunicaciones componen un área muy grande con diferentes medios, equipos y tecnologías de transmisión, la tecnología informática se ha desarrollado de la misma manera, es así como con el desarrollo de software con infinidad de aplicaciones y simulaciones ayudan mucho en los estudios que se realizan ahorrando tiempo y dinero para optimizar recursos.

En la ciudad de Cuenca como explicaremos en la presente tesis se dividió las estaciones dependiendo en el valor de frecuencia que estas transmitan en radio para AM y FM y en televisión por la frecuencia de VHF y UHF, la saturación existente y la comparación entre los campos medidos y simulados.

Las limitantes y dificultades que se tienen, así como las posibles causas y efectos que estas pueden causar, haciendo una demostración estadística de la situación en diferentes puntos de la ciudad, su cobertura y efectividad de simulación a realidad.

PRÓLOGO

La difusión y transmisión de comunicaciones utilizando el espectro radioeléctrico es uno de las primeras utilidades que se le dio luego del descubrimiento de este medio como elemento transmisor, lo que constituyó un ahorro en equipos e infraestructura, algo que sin duda evolucionó fue el broadcast primero con la radio, posteriormente con la transmisión de imágenes, sonido y el color.

Con el avance de la tecnología y su desarrollo las organizaciones internacionales, fabricantes, naciones y otros organismos vieron la necesidad de regularizar y normar el desarrollo y la utilización del espectro radioeléctrico, en muchos de los casos considerándolo un bien estatal y limitado, es por ello que se trata de sacar el máximo provecho posible de este recurso.

La teoría de las transmisiones tiene una base fundamental basada en electromagnetismo, de allí se parte para los diferentes tipos, características, radiaciones en los diferentes elementos que la componen, es por ello que se analiza el campo eléctrico y magnético en un principio, para poder saber y analizar la cantidad de propagación y el área de cobertura que este tendrá.

INDICE

CAPITULO 1	2
“CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS”	2
1.1 INTRODUCCION A LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS	2
1.1.1 Campos Eléctricos.....	2
1.1.1.1 Ecuaciones y Resolución.....	2
1.1.2 Campos Magnéticos.....	3
1.1.2.1 Ecuaciones y Resolución.....	3
1.1.3 Campos Electromagnéticos.....	4
1.1.3.1 Campos Estáticos y Campos variables en el tiempo.....	4
1.1.3.2 Campo Electromagnético Cercano y Lejano.....	4
1.1.4 Métodos de Análisis y Solución.....	6
1.1.4.1 Radiación Electromagnética.....	6
1.1.4.2 Densidad de Potencia e Intensidad de Campo.....	6
1.1.4.3 Unidades y Medición de los Campos Electromagnéticos.....	6
1.1.5 Técnicas de Mitigación.....	8
1.1.5.1 Campos Electromagnéticos de Frecuencias bajas y altas.....	8
1.1.5.2 Frecuencias Bajas.....	10
1.1.5.3 Frecuencias altas.....	11
1.1.6 Campos Electromagnéticos ionizantes y no ionizantes.....	11
1.1.6.1 Radiaciones Ionizantes.....	12
1.1.6.2 Radiaciones no Ionizantes.....	13
1.2 ANTENAS Y RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICAS	14
1.2.1 Tipos de Antena y Radiación.....	15
1.2.1.1 Antena Isotrópica.....	15
1.2.1.2 Antenas Omnidireccional.....	15
1.2.1.3 Antena Monopolo.....	16
1.2.1.4 Antena Dipolo.....	17
1.2.1.5 Dipolo de Media Onda.....	18

1.2.2	Antenas Utilizadas en el Medio.....	18
1.2.2.1	Antenas Direccionales.....	18
1.2.2.2	Antena Yagi.....	19
1.2.2.3	Antena panel.....	20
1.2.2.4	Antena de Loop.....	20
1.2.2.5	Antena Helicoidal.....	21
1.2.2.6	Microondas Terrestres.....	22
1.2.2.7	Antena Parabólica.....	22
CAPITULO 2	26
“NORVATIVAS INTERNACIONALES Y NACIONALES”	26
2.1	ESPECTRO RADIOELÉCTRICO.....	26
2.1.1	Definición y análisis de broadcast.....	26
2.1.2	Utilización de las bandas MF, HF, VHF y UHF.....	27
2.2	AGENTES INTERNACIONALES.....	33
2.2.1	Normativas para la medición de campos Electromagnéticos.....	34
2.2.2	Niveles de exposición a CEM.....	34
2.2.2.1	Niveles poblacionales.....	34
2.2.3	Posibles efectos en la Salud a la exposición de campos Electromagnéticos.....	36
2.3	AGENTES NACIONALES.....	37
2.3.1	Reglamento Nacional para RNI vigente.....	40
2.3.2	Medidas de protección y regulación.....	40
CAPITULO 3	44
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	44
3.1	Introducción.....	44
3.1.1	Orígenes del Método de los elementos Finitos.....	44
3.1.2	Conceptos Generales.....	45
3.1.3	Definición básica del Método.....	47
3.1.4	Funciones de Forma.....	48

3.1.4.1	Propiedades de las funciones de forma.....	48
3.1.4.2	Tipos de Funciones de forma.....	48
3.1.5	Análisis Vectorial y Matricial.....	49
3.2	METODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	50
3.2.1	Análisis de Sumas Ponderadas y otros Métodos.....	50
3.2.1.1	Sumas Ponderadas.....	51
3.2.1.2	Principio de los Trabajos virtuales.....	53
3.2.1.3	Problema discreto.....	53
3.2.1.4	La ecuación de equilibrio discretizada.....	54
3.3	Aproximación del campo de desplazamientos.....	55
3.3.1	Elementos Isoparamétricos.....	56
3.4	MODELO MATEMÁTICO DE SISTEMAS ELECTROMAGNÉTICOS APLICANDO EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	58
3.4.1	Ecuaciones de partida.....	58
3.4.2	Métodos de resolución por el MEF.....	60
3.4.3	Solución empleando el Potencial Escalar Magnético.....	61
3.4.3.1	Estrategia RSP.....	62
3.4.3.2	Estrategia DSP.....	62
3.4.3.3	Estrategia GSP.....	62
3.4.4	Ejemplos de Ejercicios resueltos Analíticamente y por MEF.....	63
3.4.4.1	Ejemplos.....	63
3.5	SIMULACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO.....	67
3.6	VENTAJAS Y DESVENTAJAS EN EL EMPLEO DEL MÉTODO DE ELEMENTOS.....	70
3.6.1	Ventajas.....	70
3.6.2	Desventajas.....	70
	CAPITULO 4.....	73
	“MEDICIONES Y SIMULACIONES”.....	73
4.1	MEDICIONES.....	73
4.1.1	Características del Equipo de Medición.....	73

4.1.2	Técnica aplicada para la medición.....	75
4.1.3	Fotos de las Mediciones.....	76
4.2	SIMULACIONES.....	78
4.2.1	Introducción al Software.....	78
4.2.2	Datos y Simulación.....	78
	CAPITULO 5.....	91
	“ANÁLISIS DE RESULTADOS”.....	91
5.1	CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO MEDIDO.....	91
5.1.1	Gráficas de datos Medidos.....	97
5.2	CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO SIMULADO.....	102
5.2.1	Antenas a utilizar con sus características.....	106
5.2.2	Gráficas de los datos simulados.....	108
5.3	COMPARACIÓN DE DATOS MEDIDOS Vs. SIMULADOS.....	115
5.3.1	COMPARACIÓN DE RESULTADOS MEDIDOS Vs. SIMULADOS.....	116
5.4	CÁLCULO DEL ERROR.....	122
5.5	CÁLCULO DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR CON DISTRIBUCIÓN “T”	122
5.6	DIAGRAMAS DE CAJON.....	126
	CONCLUSIONES.....	134
	BIBLIOGRAFIA.....	140

CAPITULO 1

“CAMPOS ELECTROMAGNETICOS”

CAPITULO 1

“CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS”

1.1 INTRODUCCION A LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

Los campos electromagnéticos CEM¹ son una combinación de campos de fuerza eléctrica y magnética que está presente en la vida cotidiana de las personas, ya que estos por sus numerosas ventajas han multiplicado sus fuentes de generación.

Como podemos darnos cuenta en la actualidad todos estamos expuestos a campos electromagnéticos tanto en el hogar como en el trabajo, ya que estos se encuentran en medios como los de generación y transmisión de electricidad, los electrodomésticos o también los producidos por las telecomunicaciones y la difusión de radio y televisión.

1.1.1 Campos Eléctricos:

Los campos eléctricos se producen por cargas eléctricas que crean un voltaje o tensión, cuando conectamos un objeto este se carga eléctricamente determinando fuerzas y movimientos en las cargas que se encuentran a su alcance. Por lo que, los campos eléctricos se originan cuando existe una diferencia de voltaje, no siendo necesario una circulación de una corriente, de manera que el campo eléctrico aumenta en tanto la tensión aumente.

La intensidad del campo eléctrico depende de la tensión o diferencia de voltaje, de manera que su magnitud crece cuando el voltaje aumenta. Se denota por la letra E. Las unidades del campo eléctrico son voltios por metro.

1.1.1.1 Ecuaciones y Resolución

Densidad de Energía (W/m^2)

¹ CME siglas de Campo Electromagnético

$$WD_r = \frac{(W_T \cdot G_T)}{4\pi \cdot r^2} \quad \text{Ecu 1.1}$$

Donde:

- WDr: densidad de energía en el punto de estudio (W/m^2)
- WT: potencia de emisión de la antena emisora (W)
- GT: ganancia de la antena emisora
- r: distancia (m)

Intensidad del Campo Eléctrico (V/m)

$$E^2 = WD_r \cdot Z_0 \quad \text{Ecu 1.2}$$

Donde:

- E: campo eléctrico en el punto de estudio (V/m)
- Z0: impedancia del aire ($120\pi \Omega$)

1.1.2 Campos Magnéticos

Los campos magnéticos se originan por el movimiento de cargas eléctricas, que se generan únicamente cuando circula una corriente eléctrica.

La intensidad del campo magnético está en función de la intensidad de la corriente eléctrica y la distancia, siendo esta es mayor en las proximidades de la fuente, mientras disminuye a medida que aumenta la distancia.

1.1.2.1 Ecuaciones y Resolución

Ley de Biot-Savart:

$$B = \int \frac{\mu \cdot I}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{dr \times u}{r^2} \quad \text{Ecu 1.3}$$

Donde:

- B: campo magnético (vector) ($\text{T}=\text{Wb/m}^2$)

- I : Intensidad de corriente que genera al campo (A)
- μ : permeabilidad magnética del medio
- dr : diferencial de la integral (vector definido por la dirección de la corriente eléctrica)
- r : distancia entre el diferencial de corriente y el punto de análisis
- u : vector unitario de dirección de la distancia r

1.1.3 Campos Electromagnéticos

1.1.3.1 Campos Estáticos y campos variables en el tiempo

Los campos estáticos se producen cuando la corriente eléctrica es continua, o sea, que fluye en el mismo sentido. Una corriente eléctrica alterna AC² es un tipo de corrientes la que la dirección del flujo de electrones va y viene a intervalos regulares o en ciclos.

Esta corriente produce dos tipos de campos: Un campo eléctrico AC y un campo magnético AC, ambos forman lo que se llama un campo electromagnético. Los campos eléctricos de la corriente alterna resultan de la intensidad de la carga y los campos magnéticos resultan del movimiento de las cargas.

El campo eléctrico representa la fuerza que las cargas eléctricas ejercen sobre otras cargas, y esta fuerza puede repeler o atraer. El campo magnético se forma alrededor de la corriente y se irradia en ángulo recto respecto a la dirección de la corriente.

Es muy interesante tener en cuenta que mientras una corriente eléctrica alterna crea un campo magnético, también un campo magnético crea una corriente eléctrica en un conductor cercano. Este es el principio de la inducción y por este se puede detectar y medir la presencia de campos electromagnéticos.

1.1.3.2 Campo Electromagnético Cercano y Lejano

² AC Corriente Electrica Alterna

Dado que los seres humanos son sensibles a los niveles altos de campos electromagnéticos, es recomendable, en situaciones particulares, conocer individualmente ambos niveles ya que uno o ambos pueden resultar elevados y por ende nocivos para la salud.

Para medir los campos es necesario primero determinar si nos encontramos dentro de la zona de campo electromagnético cercano o lejano de la antena ya que el comportamiento de la onda varía en cada caso.

Para determinar el tipo de zona de campo electromagnético, se necesita conocer el tipo de antena y la frecuencia de trabajo. El campo cercano se refiere al patrón de campo que está cerca de la antena, mientras que el campo lejano se refiere al patrón de campo que está a gran distancia de la antena.

Sea D la longitud total de la antena y r la distancia desde el punto de radiación hasta un punto de medición arbitrario, se consideran las siguientes regiones de campo:

Campo cercano reactivo:

$$r < 0.62r < 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad \text{Ecu 1.4}$$

Campo cercano radiado (Zona de Fresnel):

$$0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq r < \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{Ecu 1.5}$$

Campo Lejano (Zona de Fraunhofer):

$$r \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{Ecu 1.6}$$

Durante la primera mitad del ciclo, la potencia se irradia desde la antena, en donde parte de la potencia se guarda temporalmente en el campo cercano. En la segunda mitad del ciclo, la potencia que está en el campo cercano regresa a la antena. Esta acción es similar a la forma en que un inductor guarda y suelta energía. Por lo tanto,

el campo cercano se llama a veces campo de inducción. La potencia que alcanza el campo lejano continúa irradiando lejos y no regresa a la antena, por lo que se le denomina campo de radiación. Debido a que el patrón de radiación se basa en el campo lejano, los patrones de radiación de la antena también se dan en ese campo. El campo cercano se considera como el área dentro de la distancia $\frac{D}{\lambda}$ de la antena, donde λ es la longitud de onda y D el diámetro de la antena.

1.1.4 Métodos de Análisis y Solución

1.1.4.1 Radiación Electromagnética

La radiación electromagnética es la que consiste en la emisión y propagación de energía en forma de ondas, constituida por un campo eléctrico y otro magnético, perpendiculares entre sí.

La luz, ondas de radio, radiaciones infrarroja, ultravioleta, los rayos X y gamma forman parte de la radiación electromagnética y se distinguen unos de otros por su respectiva longitud de onda. En general, las ondas electromagnéticas pueden clasificarse según tres variables; energía, frecuencia y longitud de onda. La energía es proporcional a la frecuencia para una potencia específica.

1.1.4.2 Densidad de Potencia e Intensidad de Campo

Las ondas electromagnéticas representan el flujo de energía en dirección de propagación de la onda. La proporción de la energía que cruza por una superficie, en el espacio libre, se llama densidad de potencia.

La intensidad de campo se refiere o bien al campo eléctrico ó al campo magnético de una onda electromagnética propagándose en el espacio libre

1.1.4.3 Unidades y Medición de los Campos Electromagnéticos

Un Gauss es una unidad común de medida de la intensidad de los campos electromagnéticos de la corriente alterna (AC). Un medidor Gauss es un instrumento que mide esa intensidad, basado en la ley de Faraday de inducción de voltaje en una bobina conductora. Dentro de un medidor Gauss, existe una bobina de fino alambre enrollado en espiral con cientos de vueltas. El voltaje inducido se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$V = 2(fnAB) \quad \text{Ecu 1.7}$$

Donde f es la frecuencia, n es el número de vueltas en la bobina, A es el área de la bobina, y B es la magnitud de la densidad del flujo magnético perpendicular al plano de la bobina. Mientras el campo magnético alcanza la bobina, induce corriente, la cual es amplificada por medio de una serie de circuitos.

Si un medidor Gauss tuviera una bobina con aproximadamente 40,000 vueltas, un campo electromagnético con una intensidad de 1 milligauss podría inducir suficiente corriente para ser leída directamente por el voltímetro que está incluido. Sin embargo, es mucho más práctico construir un medidor Gauss con pocas vueltas y a través de un circuito de amplificación, incrementar el voltaje o corriente y entonces calibrar el medidor para poder leer en milligauss (Mg).

En ocasiones se pueden encontrar diferentes medidas de campos electromagnéticos, tales como Tesla, micro-Tesla (m T), nano-Tesla (nT) y miliamperios por metro. Estas unidades se relacionan como sigue:

1 Tesla = 10,000 Gauss (Un Tesla es 10,000 veces más grande que un Gauss)

1 Gauss = 1,000 milliGauss (mG) (Un Gauss es 1,000 veces más grande que un milliGauss)

1 milliGauss (mG) = 0.0000001 Tesla = .0001 millTesla (mT) = 0.1 microTesla (uT)
= 100 nanoTesla (m T)

1 milligauss (mG) = 80 milliamps/metro

Para usar un medidor Gauss, es necesario tomar tres lecturas, una en cada eje. Para evitar confusión, es mejor tomar siempre las medidas en el mismo orden. Por ejemplo,

tomar la primera lectura con el indicador de lecturas orientado al techo y la parte frontal del medidor dirigida hacia adelante y llamar eje-X a esta lectura. Para la segunda lectura, rotar el medidor 90 grados hacia el examinador, de tal manera que se vea directamente el indicador de lecturas con su parte frontal apuntando al techo. Llamar a esta lectura en el eje-Y. Para la tercera lectura, rotar el medidor 90 grados a la izquierda o derecha alrededor del nuevo eje vertical, hay que continuar sosteniendo la parte frontal del medidor hacia el techo.

1.1.5 Técnicas de Mitigación

1.1.5.1 Campos Electromagnéticos de Frecuencias bajas y altas

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro. A diferencia de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación electromagnética se puede propagar en el vacío.

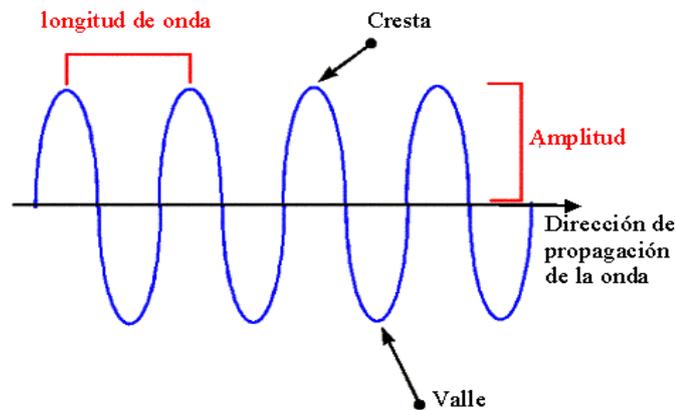


Figura 1.1: Onda Electromagnética

Como cualquier fenómeno relacionado con ondas la energía electromagnética está caracterizada por una longitud de onda y una frecuencia. La longitud de onda (λ) es la distancia cubierta por un ciclo completo de onda electromagnética. La frecuencia es el número de ondas electromagnéticas pasando a través de un punto dado en un segundo.

Las ondas electromagnéticas viajan a través del espacio a la velocidad de la luz, y la longitud de onda y frecuencia de una onda electromagnética están relacionados por una ecuación matemática simple: frecuencia por longitud de onda es igual a la velocidad de la luz. ($f \times \lambda = C$).

Dado que la velocidad de la luz no cambia en ningún medio o vacío, las ondas electromagnéticas de alta frecuencia tienen longitudes de onda cortas y las ondas de frecuencia bajas tienen una larga longitud de onda.

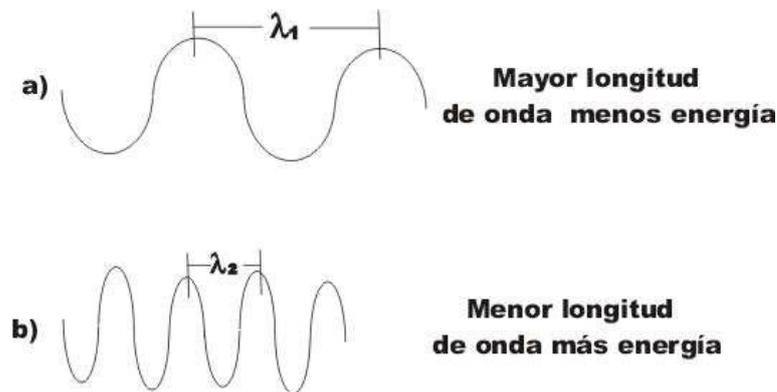


Figura 1.2: Longitud de Onda

Atendiendo a su longitud de onda, la radiación electromagnética recibe diferentes nombres, y varía desde los energéticos rayos gamma (con una longitud de onda del orden de picómetros) hasta las ondas de radio (longitudes de onda del orden de kilómetros), pasando por el espectro visible (cuya longitud de onda está en el rango de las décimas de micrómetro). El rango completo de longitudes de onda es lo que se denomina el espectro electromagnético.

El espectro visible es un minúsculo intervalo que va desde la longitud de onda correspondiente al color violeta (aproximadamente 400 nanómetros) hasta la longitud de onda correspondiente al color rojo (aproximadamente 700 nm).

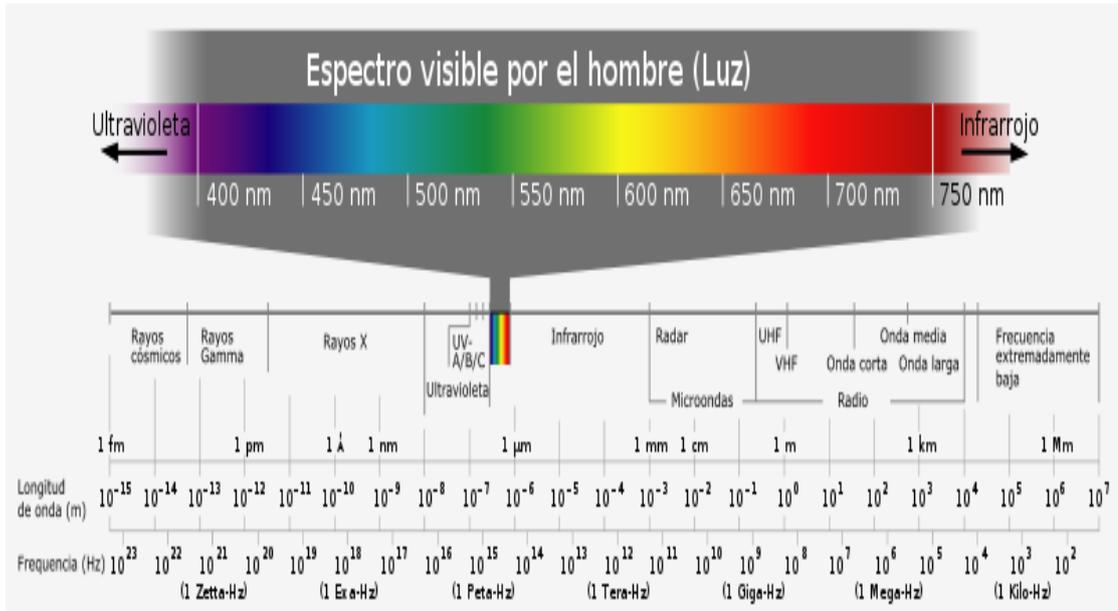


Figura 1.3: Espectro Radioeléctrico

La mayoría de los campos electromagnéticos generados por el hombre cambian de sentido a una determinada frecuencia que va desde las altas radiofrecuencias (RF) como las que utilizan los teléfonos móviles, pasando por las frecuencias intermedias (IF) como las que generan las pantallas de ordenador, hasta las frecuencias extremadamente bajas (ELF) como las que generan las líneas eléctricas.

El término estático se refiere a los campos que no varían con el tiempo. Por ejemplo los campos magnéticos estáticos se utilizan en el diagnóstico por imagen, son generados por aparatos que utilizan corriente continua.

1.1.5.2 Frecuencias bajas

Estos campos con muy baja frecuencia son de una naturaleza tal que el campo eléctrico y el campo magnético pueden existir por separado, no están acoplados, pudiendo en cierta zona del espacio existir solo campo magnético o solo el campo eléctrico.

Los campos de muy baja frecuencia propagan energía electromagnética en las zonas próximas a donde circula la corriente eléctrica y se atenúa muy rápidamente con la distancia.

1.1.5.3 Frecuencias altas

Los teléfonos móviles, la televisión y los transmisores de radio y radares producen campos de alta frecuencia. Estos campos se utilizan para transmitir información a distancias largas y son la base de las telecomunicaciones, así como de la difusión de radio y televisión en todo el mundo. Las microondas son campos de RF³ de frecuencias altas.

En las frecuencias de radio, los campos eléctricos y magnéticos están estrechamente relacionados y sus niveles se miden normalmente por la densidad de potencia, en vatios por metro cuadrado (W/m²).

En telecomunicaciones se clasifican las ondas mediante un convenio internacional de frecuencias en función del empleo al que están destinadas:

Sigla	Rango	Denominación	Empleo
VLF	10 kHz a 30 kHz	Muy baja frecuencia	Radio gran alcance
LF	30 kHz a 300 kHz	Baja frecuencia	Radio, navegación
MF	300 kHz a 3 MHz	Frecuencia media	Radio de onda media
HF	3 MHz a 30 MHz	Alta frecuencia	Radio de onda corta
VHF	30 MHz a 300 MHz	Muy alta frecuencia	TV, radio
UHF	300 MHz a 3 GHz	Ultra alta frecuencia	TV, radar, telefonía móvil
SHF	3 GHz a 30 GHz	Súper alta frecuencia	Radar
EHF	30 GHz a 300 GHz	Extra alta frecuencia	Radar

Tabla 1.1: Clasificación de ondas

1.1.6 Campos Electromagnéticos ionizantes y no ionizantes

La longitud de onda y la frecuencia determinan una característica importante de los campos electromagnéticos. Las ondas electromagnéticas son transportadas por

³ RF Radio Frecuencia

partículas llamadas cuantos de luz. Los cuantos de luz de ondas con frecuencias más altas (longitudes de onda más cortas) transportan más energía que los de las ondas de menor frecuencia (longitudes de onda más largas). Algunas ondas electromagnéticas transportan tanta energía por cuanto de luz que son capaces de romper los enlaces entre las moléculas y son clasificadas como radiaciones ionizantes.

1.6.1.1 Radiaciones Ionizantes

Se trata de ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia, que tienen la suficiente energía como para producir ionización (creación de partes eléctricamente cargadas, una positiva y una negativa), rompiendo los enlaces atómicos que mantienen a las moléculas unidas en las células.

Las radiaciones ionizantes más importantes son las alfa, beta, gamma, y los rayos x. Además hay que considerar a los rayos cósmicos como fuente natural de energía radiante, aunque de baja densidad en la biosfera.

- Las radiaciones alfa son radiaciones corpusculares compuestas por núcleos de Helio emitidos por sustancias radiactivas. Poseen una alta energía, aunque su poder de penetración es escaso, por lo que suelen ser más peligrosos si son ingeridas que por vía externa.
- Las radiaciones beta son también radiaciones corpusculares compuestas por electrones emitidos por sustancias radiactivas. A diferencia de las radiaciones alfa, tienen un mayor poder de penetración y menor capacidad ionizante.
- La radiación gamma es de naturaleza electromagnética y posee un alto poder de penetración, pudiendo atravesar el cuerpo humano e incluso el acero. Las planchas de plomo de grosor adecuado pueden detener este tipo de radiación. No obstante, son radiaciones de baja capacidad de ionización en comparación con las anteriores.

- Los rayos X son también radiaciones de tipo electromagnético y tienen un gran poder de penetración y una baja capacidad ionizante, por lo que son empleadas para diagnóstico clínico. Pese a su bajo potencial de ionización, los rayos X son una de las formas más frecuentes de contaminación por energía radiante, dada su profusa utilización en medicina y a que diversos aparatos emiten esta radiación, por ejemplo, los tubos catódicos de los televisores.

Los seres vivos están expuestos a niveles bajos de radiación ionizante procedente del sol, las rocas, el suelo, fuentes naturales del propio organismo. De las radiaciones que componen el espectro electromagnético, los rayos gamma que emiten los materiales radioactivos, los rayos cósmicos y los rayos X tienen esta capacidad.

1.6.1.2 Radiaciones no Ionizantes

Se conoce como radiaciones no ionizantes a aquellas que no tienen energía suficiente para provocar la ionización o pérdida de electrones en los átomos. A este tipo de radiaciones pertenece la mayoría de las radiaciones electromagnéticas que se emplean en las telecomunicaciones. Dentro de las fuentes emisoras de este tipo de radiaciones se encuentran los sistemas de telefonía móvil, los sistemas de radiodifusión, la televisión, microondas, etc.

Aunque se trata de un tema controvertido y que en la actualidad continúa siendo objeto de estudio, no parece existir por el momento suficiente evidencia científica para afirmar que las radiaciones electromagnéticas producidas por los aparatos de telecomunicación sean nocivas para la salud cuando su nivel se encuentra dentro de los límites que marca la legislación.

El efecto fundamental que parece ejercer las radiaciones electromagnéticas no ionizantes sobre el organismo es producir su calentamiento. No obstante, los mecanismos de regulación térmica que posee el cuerpo humano son capaces de contrarrestar este efecto dentro de unos límites determinados.

A diferencia de las radiaciones ionizantes producidas por materiales radioactivos, encontrados en la parte más alta del espectro electromagnético, los CEM son muy débiles para romper enlaces que unen las moléculas para formar células, por lo tanto no producen ionización. Es por esto que los CEM son llamados radiaciones no ionizantes (RNI).

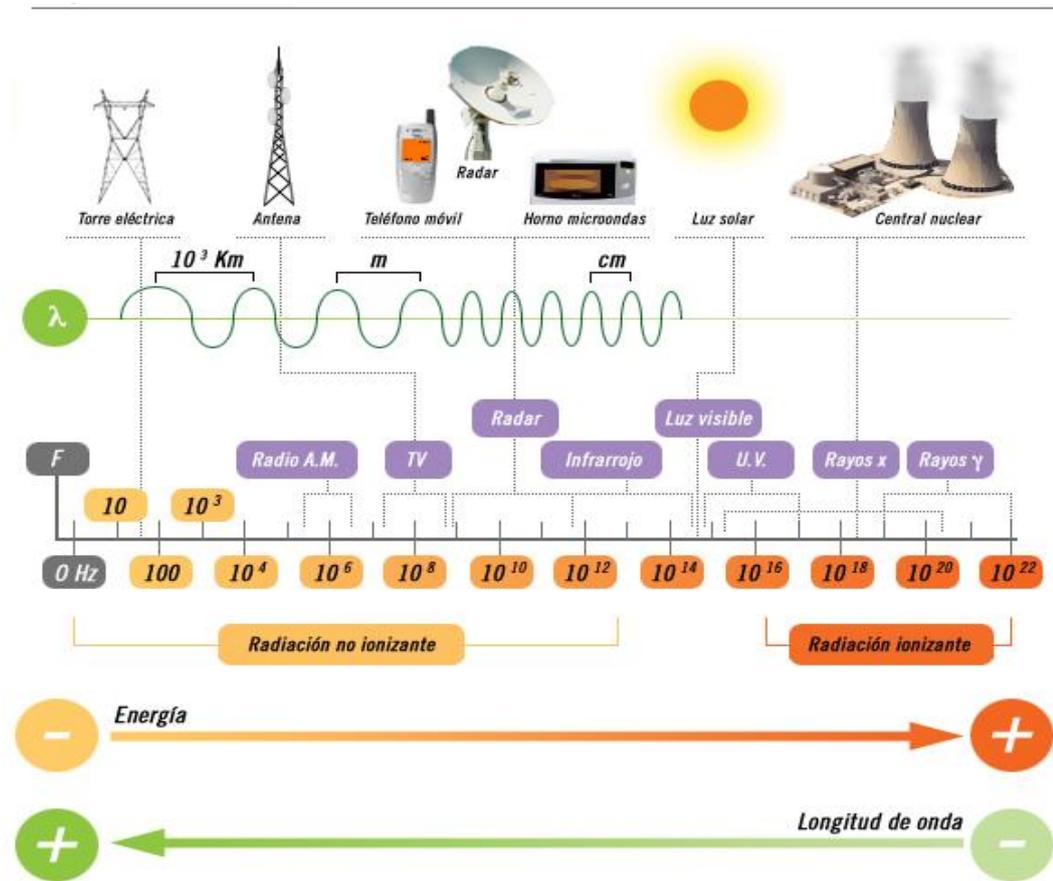


Figura 1.4: Espectro de Frecuencias

1.2 ANTENAS Y RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICAS

Una antena es un convertidor entre dos medios que convierte la energía electromagnética de un cable en potencia electromagnética radiada en el espacio libre. Las diversas características de la antena determinarán la eficacia de la conversión.

Los sistemas de Comunicaciones utilizan antenas para realizar enlaces punto a punto, difundir señales de televisión o radio, o bien transmitir o recibir señales en equipos portátiles.

El campo de radiación que se encuentra cerca de una antena no es igual que el campo de radiación que se encuentra a gran distancia, el campo cercano es conocido como campo de inducción, y al campo lejano se le llama campo de radiación. Según la aplicación que se le quiera dar a la antena, el tamaño de ésta estará relacionado con la banda de frecuencias que queramos captar o transmitir.

1.2.1 Tipos de Antena y Radiación

1.2.1.1 Antena Isotrópica

Es la que irradia en todas las direcciones con la misma intensidad. Aunque esto en la práctica es físicamente irrealizable, el concepto de antena isotrópica se utiliza como modelo de comparación con las antenas reales. Como irradia con igual eficacia en todas direcciones, su diagrama o patrón de radiación es una esfera.

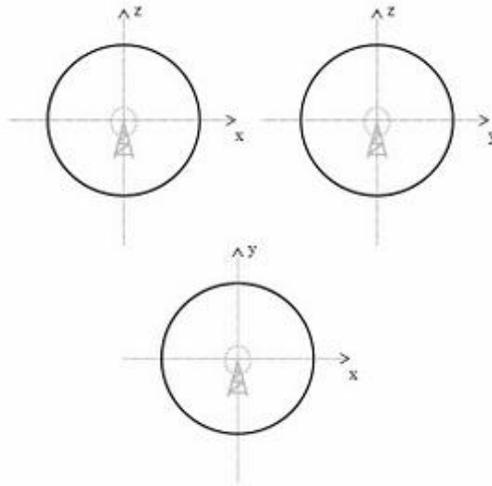


Figura 1.5: Patrón de Radiación de una Antena Isotrópica

1.2.1.2 Antena Omnidireccional

Antenas que tienen un patrón de radiación no direccional en un plano y uno direccional en un plano ortogonal

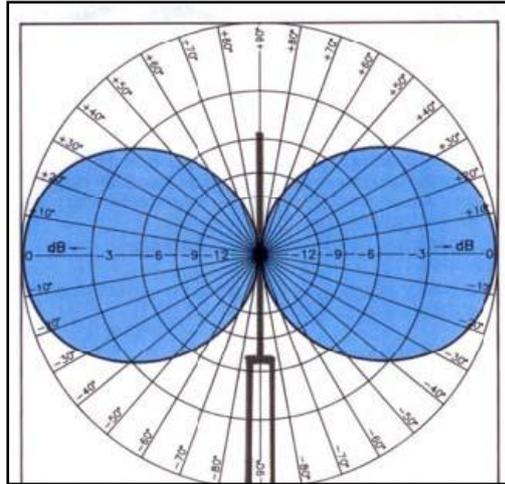


Figura 1.6: Diagrama de radiación de una antena omnidireccional

1.2.1.3 Antena Monopolo

Es una antena constituida de un solo brazo rectilíneo irradiante en posición vertical u horizontal. El uso es frecuentemente en VHF. Un plano conductor infinito refleja la distribución de cargas eléctricas que están por encima de él.

Esto se aprovecha para reducir a la mitad las dimensiones físicas de un dipolo de media onda, aspecto muy importante en radiodifusión AM.



Figura 1.7: Antena Monopolo

1.2.1.4 Antena Dipolo

La antena dipolo tiene un patrón de radiación generalizado. Primero el patrón de elevación muestra que una antena de dipolo es mejor utilizada para transmitir y recibir desde el lado amplio de la antena. Es sensible a cualquier movimiento fuera de la posición perfectamente vertical, sin embargo se puede mover alrededor de 45 grados de la verticalidad antes que el desempeño de la antena se degrade más de la mitad. Otras antenas dipolo pueden tener diferentes cantidades de variación vertical antes que sea notable la degradación.

Este elemento de corriente o dipolo elemental tiene importancia por sí mismo, ya que un gran número de antenas en baja frecuencia poseen estas características y además, por superposición de elementos de corriente, pueden ser analizadas distribuciones de mayor longitud y no uniformes.



Figura 1.8: Antena Dipolo de Emisora de Radio FM

1.2.1.5 Dipolo de Media Onda

Esta antena es utilizada en radiodifusión, la cual está formada por dos trozos de material conductor, cada uno de un cuarto de longitud de onda. Si se conecta a la línea de alimentación por el centro, la distribución de corriente y de voltaje es simétrica y ofrece una impedancia de 72 ohmios. Este tipo de antena forma la base de muchas otras.



Figura 1.9: Antena Dipolo Ubicada en Cuenca

1.2.2 Antenas Utilizadas en el Medio

1.2.2.1 Antenas Direccionales

Las antenas direccionales son el resultado de la unión de un dipolo más elementos conocidos como reflectores que influyen sobre el patrón de radiación del dipolo para poder ser direccionales es decir son antenas que radian o reciben señales mejor en unas direcciones que en otras.

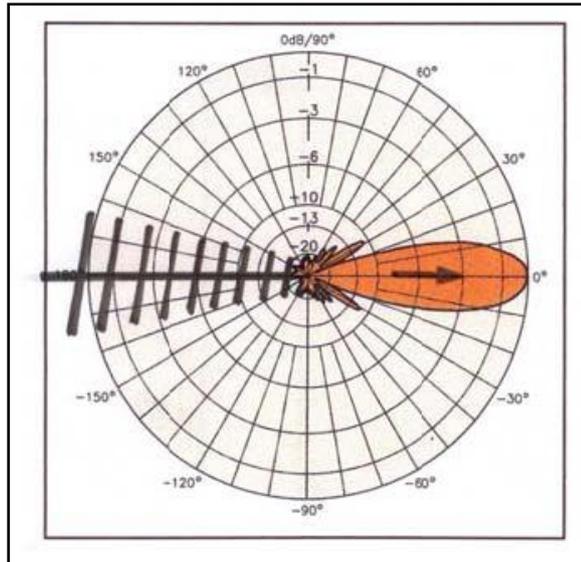


Figura 1.10: Diagrama de radiación de una antena direccional

1.2.2.2 Antena Yagi

Estas se componen de un arreglo de elementos independientes de antena, donde solo uno de ellos transmite las ondas de radio. El número de elementos determina la ganancia y la directividad.

La antena Yagi puede concebirse como una evolución del dipolo, donde los reflectores reducen la emisión hacia atrás, y donde los directores concentran la emisión hacia adelante. Las antenas Yagi no son tan direccionales como las antenas parabólicas, pero son más directivas que las antenas panel.



Figura 1.11: Antena Yagi ubicada en Icto Cruz

1.2.2.3 Antena Panel:

Es una antena direccional, diseñada para radiar y recibir señales de radio en una orientación general, incrementando la efectividad de esta en esa dirección. Dependiendo del diseño de la antena, la "direccionabilidad" de la antena será más o menos estrecha. Las antenas panel, son más útiles cuando se desea tener un área operacional en una dirección particular, de modo opuesto a una área operacional omnidireccional. El haz de radiación es relativamente ancho (comparado con una parabólica), de modo que la alineación no es de precisión.



Figura 1.12: Antena Panel

1.2.2.4 Antena de Loop

Una antena de cuadro o Loop básicamente está constituida por una o más espiras conductoras formando un cuadrado, hexágono, octógono o círculo, con dimensiones físicas que pueden variar desde las pequeñas las cuales son utilizadas en HF y su tamaño varia es de 30 o 40 cm de diámetro, hasta las más grandes de varios metros, según la frecuencia y el rendimiento esperado.

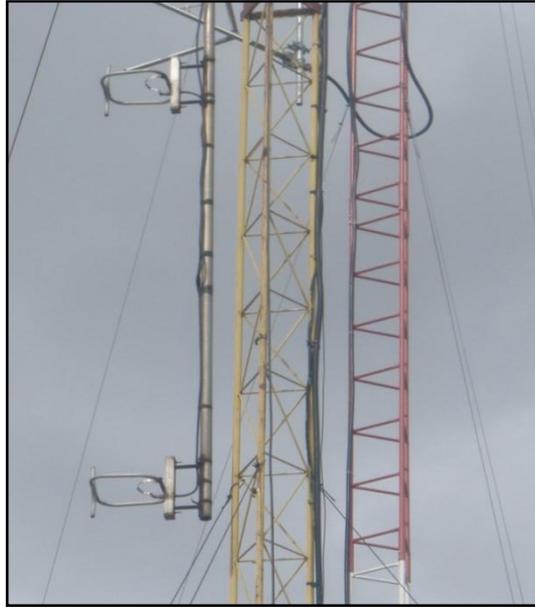


Figura 1.13: Antena Loop ubicada en el centro de Cuenca

1.2.2.5 Antena Helicoidal

Esta es una antena de VHF o UHF, que es perfecta para aplicaciones de una radiación circular. La antena helicoidal es una evolución del Monopolo el cual ha sido modificado para tomar la forma de un solenoide.

Este tipo de antena puede utilizarse como un solo elemento o apilada horizontal o verticalmente en un arreglo para modificar el patrón de radiación e incrementar la ganancia.



Figura 1.14: Antena helicoidal usada en televisión por cable

1.2.2.6 Microondas terrestres

Estas antenas son altamente directivas, que se utilizan en UHF y en transmisiones de microonda, tienen una alta ganancia

El uso principal de los sistemas de microondas terrestres son los servicios de telecomunicación de larga distancia, como alternativa al cable coaxial o a las fibras ópticas. Para una distancia dada, las microondas requieren menor número de repetidores o amplificadores que el cable coaxial, pero necesita que las antenas estén perfectamente alineadas. El uso de las microondas es frecuente en la transmisión de televisión.



Figura 1.15: Antena Microonda Terrestre

1.2.2.7 Antena Parabólica

Las antenas parabólicas usan características físicas así como antenas de elementos múltiples para alcanzar muy alta ganancia y direccionalidad. Estas antenas usan un plato reflector con la forma de una parábola para enfocar las ondas de radio recibidas por la antena a un punto focal.

Este tipo de antena es capaz de proveer muy alta ganancia. Normalmente estas antenas en redes de microondas operan en forma full dúplex, es decir, transmiten y reciben simultáneamente y suelen ser utilizadas a frecuencias altas.



Figura 1.16: Antena Parabólica situada en el cerro Alto Cruz

Tipo de antena	Rango de Ganancia	Aplicaciones
Antenas Omnidireccional		
Monopolo	3 dBi hasta 17 dBi	El uso en VHF es principalmente para las aplicaciones de radio móvil en vehículos.
Dipolo	2.2 dBi	Puede utilizarse para polarización horizontal o vertical.
Antenas Direccionales		
Yagi	8 dBi hasta 15 dBi	Utilizada ampliamente en la recepción de señales televisivas

Panel	5 dBi hasta 20 dBi	diseñada para radiar y recibir señales de radio en una orientación general
Loop	-2 dB hasta 3 dB	útil en las frecuencias más bajas de HF
Helicoidal	6 dBi hasta 18 dBi	Esta es una antena de VHF o UHF, que es perfecta para aplicaciones de una radiación circular
Microondas Terrestres		Constituyen una alternativa al cable coaxial y a la fibra óptica para comunicaciones a larga distancia. Otras aplicaciones: Transmisión de televisión y voz
Parabólica	12 dBi hasta 25 dBi	Se utiliza especialmente para la transmisión y recepción vía satélite

Tabla 1.2: Aplicaciones de las Antenas

CAPITULO 2

“NORVATIVAS INTERNACIONALES Y NACIONALES”

CAPITULO 2

“NORMATIVAS INTERNACIONALES Y NACIONALES”

Debido a la gran cantidad de técnicas diferentes sobre las mediciones realizadas; los organismos tanto internacionales como nacionales, se han visto en el imperioso trabajo de realizar análisis para establecer los respectivos reglamentos, límites y normas de los lugares de radiación de las ondas electromagnéticas, de tal manera que éstas no afecten a los seres vivos.

2.1. ESPECTRO RADIOELÉCTRICO

El espectro electromagnético se concibe como la dispersión de radiaciones diferenciadas entre sí por la frecuencia. El espectro radioeléctrico es un subconjunto del anterior y abarca todas las frecuencias capaces de ser emitidas por osciladores discretos.

Según UIT el espectro radioeléctrico es el conjunto de ondas electromagnéticas, cuya frecuencia se fija convencionalmente por debajo de 3000 GHz, que se pueden propagar por el espacio sin guía artificial.

Es de propiedad exclusiva del estado y como tal constituye un bien de dominio público, inenajenable e imprescriptible, cuya gestión, administración y control corresponden al Ministerio de Comunicaciones de conformidad con la legislación vigente.

Por espectro radioeléctrico, la Unión Internacional de Radiocomunicaciones (U.I.T.) define las frecuencias del espectro electromagnético usadas para los servicios de difusión, servicios móviles, de policía, bomberos, radioastronomía, meteorología y fijos. No es un concepto estático, pues a medida que avanza la tecnología se aumentan o disminuyen rangos de frecuencia utilizados en comunicaciones, dependiendo del estado de avance tecnológico.

2.1.1. Definición y análisis de broadcast

Su traducción del inglés literalmente es difusión amplia, este término se utiliza desde la aparición de la radio y televisión para indicar que sus emisiones las puede recibir cualquiera que sintonice una emisora, esta comunicación en la que una sola transmisión es recibida por múltiples receptores, como ser la televisión o la radio y en la actualidad por Internet, entre otros.

2.1.2. Utilización de las bandas MF, HF, VHF y UHF.

La banda MF (Media Frecuencia), son las ondas con frecuencias comprendidas entre los 300 y 3000 Khz., se las llama también ondas hectométricas, se encuentra operando las frecuencias de AM (Amplitud modulada), cuyo rango de frecuencias asignadas para la operación va desde 525 Khz hasta los 1705 Khz. La canalización es cada 20 KHz con un ancho de banda de 10 KHz. Las frecuencias primeras (parte de debajo de la banda) sufren menos atenuación por el tipo de terreno que las señales superiores de la banda.

Las señales de radio de AM se transmiten por medio de grandes baterías de antenas, que pueden tener alturas de decenas de metros, situadas en lugares inaccesibles para la población. Los niveles de exposición en lugares muy cercanos a las antenas y cables de alimentación pueden ser altos, pero afectan al personal de mantenimiento y no a la población general.

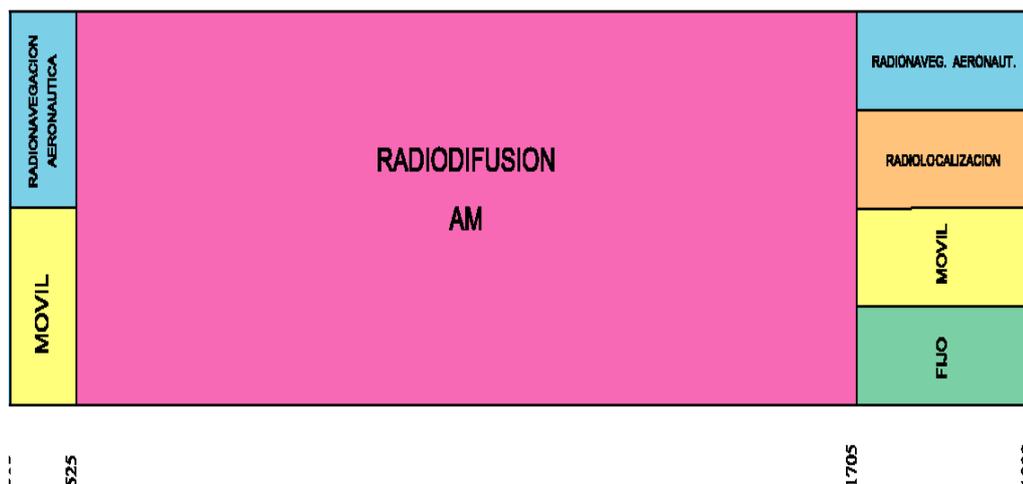


Figura 1: Espectro Radioeléctrico del Ecuador banda AM

FRECUENCIA (Khz)	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	DIRECCION DEL TRANSMISOR
900	RELOJ	MARANCAY ALTO KM 1 PANA.S
940	AUSTRAL DEL ECUADOR R.A.E.	SECTOR EL CARMEN SININCAJ
960	SONO ONDA INTERNACIONAL	SECTOR LA MERCED
1010	VISION AM	SECTOR MISICATA BAÑOS
1040	SPLENDIT	CAMBIO A RACAR
1070	LA VOZ DE TOMBAMBA	VERDILLO SECTOR LAZARETO
1140	ALFA MUSICAL	SININCAJ
1180	CUENCA LA VOZ DE LOS 4 RIOS	CERRO HUACALOMA
1200	EL MERCURIO	KM.9.5 VIA PANAMERICA SUR
1230	POPULAR INDEPENDIENTE	SITIO LOS LAURELES
1260	CONTACTO XG	SECTOR MISICATA
1290	LA VOZ DEL RIO TARQUI	LOS LAURELES (NERO)
1330	VISION CRISTIANA INTERNACIONAL	CERRO NERO
1390	TROPICANA	VERDILLO KM.8 EL CARMEN

Tabla 1: Emisoras de AM que operan en el cantón Cuenca

La banda HF (High Frequency), va desde los 3Mhz hasta los 30 Mhz, en esta se encuentra operando las frecuencias de radiodifusión OD (Ondas decamétricas), son varios rangos de canales en los cuales operan este tipo de ondas, pero estas no son utilizadas en medios de difusión para broadcast, y las cuales no entran en el análisis a realizar.

La banda VHF (Very High Frequency), este rango va desde los 30 Mhz hasta los 300 Mhz, sus modos de propagación pueden ser por onda espacial

troposférica, antenas elevadas directivas y de dispersión troposférica, el tiempo de disponibilidad es a todas horas, en esta banda operan las Frecuencias Moduladas (FM), que van desde los 88Mhz hasta los 108 Mhz, con una canalización de cada 400 KHz dentro de una misma zona geográfica y con un ancho de banda de 180 KHz para estaciones monoaurales y de 200 KHz para las estereofónicas. y algunas bandas para televisión como son las bandas de 54Mhz hasta 72 Mhz, donde operan los canales UNIVERSIDAD CATOLICA DE CUENCA (2) y TELEVISION ECUATORIANA TELERAMA S.A. (4), otra banda de operación constituye la que va de 76Mhz. a 88Mhz., que es donde opera el canal CORPORACION ECUATORIANA DE TELEVISION (5), en la banda de los 174Mhz a los 216 Mhz, difunden su señal los canales: CADENA ECUAT.DE T.V. (7), TELEVISION DEL PACIFICO S.A. TELEDOS (9), CENTRO DE RADIO Y TELEVISION CRATEL C.A (11) y TELECUATRO GUAYAQUIL C.A.(13).

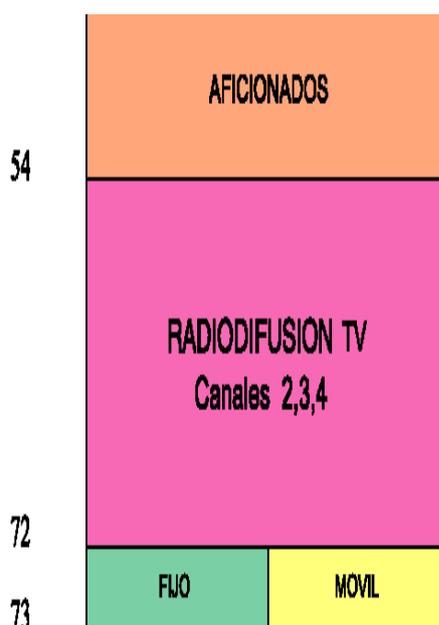


Figura 2: Espectro Radioeléctrico del Ecuador para televisión, frecuencia en Mhz

NUMERO DE SINTONIA	NOMBRE DEL CANAL	DIRECCION DEL TRANSMISOR
2	TELECUEENCA	CERRO AMOPUNGO
4	TELERAMA	CERRO CRUZ

Tabla 2: Canales ubicados en esta banda en el cantón Cuenca

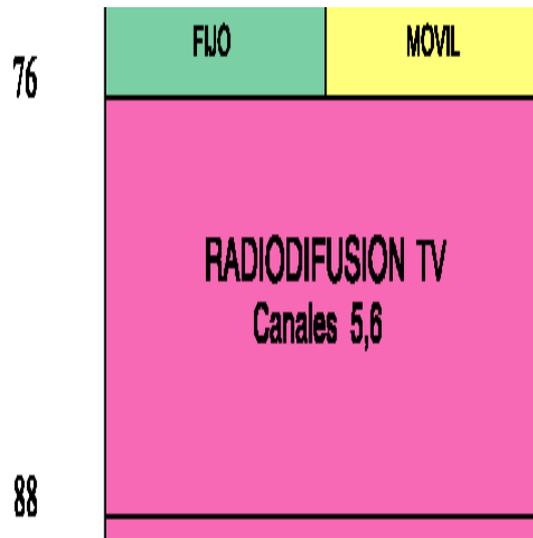


Figura 3: Espectro Radioeléctrico del Ecuador para estos canales, frecuencia en Mhz

NUMERO DE SINTONIA	NOMBRE DEL CANAL	DIRECCION DEL Tx
5	CORPORACION ECUATORIANA DE TV	CERRO ICTO CRUZ

Tabla 3: Canales ubicados en esta banda de frecuencia

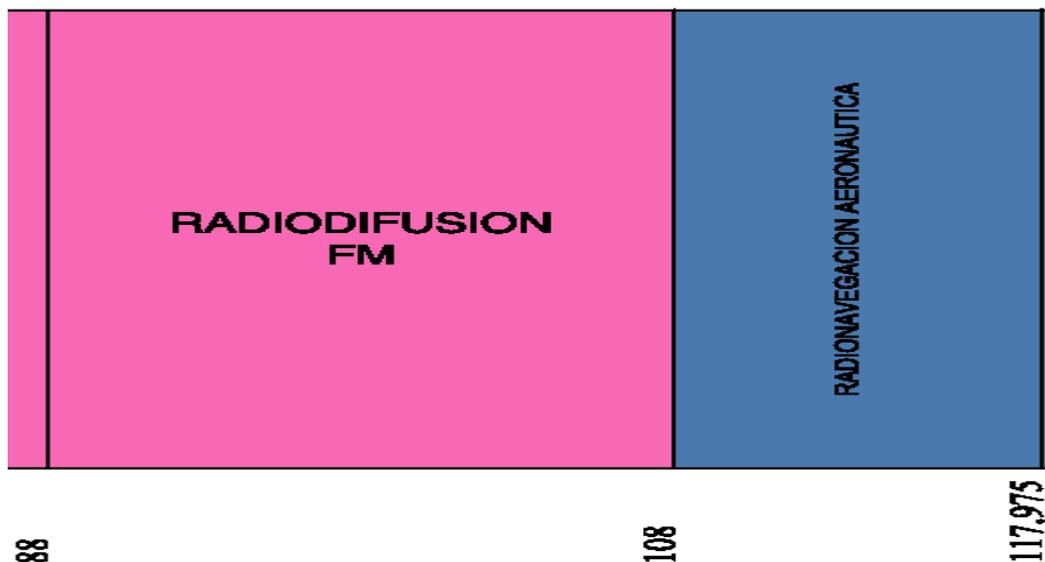


Figura 4: Espectro Radioeléctrico para la Banda de FM, frecuencia en Mhz.

FRECUENCIA (Mhz)	NOMBRE DE LA ESTACION	DIRECCION DEL Tx
------------------	-----------------------	------------------

88,5	ACTIVA FM 88	CERRO CRUZ
88,9	NACIONAL DEL ECUADOR-R.PUBLICA	CERRO CRUZ
89,7	TROPICALIDA STEREO	CERRO ICTO CRUZ
90,1	W FM	CERRO CRUZ
90,5	ANTENA UNO FM	CERRO CRUZ
91,3	J.C. RADIO	CERRO CRUZ
92,1	GCG MAGGICA FM	CERRO CRUZ
92,5	K-1	CERRO CRUZ
93,3	GENESIS FM	CERRO ICTO CRUZ
93,7	LA ROJA 93.7 FM	CERRO CRUZ
94,1	QUITUMBE FM	CERRO ICTO CRUZ
94,9	SUPER 94.9 FM	CERRO ICTO CRUZ
95,7	WQ-DOS	CERRO CRUZ
96,1	LA VOZ DEL PAIS	CERRO CRUZ
96,5	MAS CANDELA	CERRO ICTO CRUZ
96,9	FAMILIA FM	CERRO ICTO CRUZ
97,3	COSMOS FM STEREO	CERRO ICTO CRUZ
97,7	NEXO FM	CERRO CRUZ
98,1	CATOLICA NACIONAL FM	CERRO CRUZ
98,5	EMISORA GRUPO RADIAL DELGADO	CERRO ICTO CRUZ
98,9	COLON FM	CERRO CRUZ
99,3	LA VOZ DEL PUEBLO	CERRO ICTO CRUZ
99,7	COMPLICE FM	CERRO CRUZ
100,1	EXCELENCIA RADIO	HITO CRUZ
100,5	JOYA STEREO	CERRO ICTO CRUZ
100,9	DISNEY	CERRO ICTO CRUZ
101,3	RADIO MARIA	CERRO AMOPUNGO
102,1	LA VOZ DE TOMBAMBAMBA	CERRO ICTO CRUZ
102,5	MATOVELLE FM	CERRO ICTO CRUZ
102,9	GALAXIA STEREO	CERRO ICTO CRUZ
103,3	MEGA 103.3 FM	CERRO ICTO CRUZ
104,1	C.R.E.SATELITAL	CERRO CRUZ
104,5	ALFA STEREO	CERRO ICTO CRUZ
104,9	FRANCIA-ECUADOR	CERRO ICTO CRUZ
105,3	CAYAMA	CERRO AMOPUNGO
105,7	SONORAMA STEREO	CERRO CRUZ
106,1	VISION FM	CERRO CRUZ
106,5	METRO STEREO	CERRO ICTO CRUZ
107,3	PLANETA 107.3	ICTO CRUZ
107,7	PLATINUM	CERRO CRUZ

Tabla 5: Emisoras autorizadas en la Banda FM



Figura 6: Banda de frecuencias para TV, frecuencia en Mhz

NUMERO DE SINTONIA	NOMBRE DEL CANAL	DIRECCION DEL Tx
7	CADENA ECUAT.DE T.V.	CERRO CRUZ
9	TELEVISION DEL PACIFICO	CERRO CRUZ
11	TELEAMAZONAS	CERRO "TURI"
13	RED TELESISTEMA (R.T.S)	CERRO ICTO CRUZ

Tabla 6: Canales que operan en el rango de frecuencia

La banda UHF (Ultra High Frequency), va desde los 300 Mhz hasta los 3000 Mhz o 3Ghz , sus modos de propagación pueden ser por onda espacial troposférica, por línea de vista directa, o por reflexión tienen un alcance en visión directa de hasta 40Km, esta banda es utilizada para Servicio fijo (radioenlaces), servicios móviles, radiodifusión para televisión, radio localización, etc. En el caso de nuestro estudio vamos a analizar el rango de frecuencia de 512 Mhz. a 608 Mhz., donde operan los canales: Canal Uno (21), Americavisión (23), Unsión TV.(25), Capital TV (27), Teleatahualpa (RTU)(29), TV Austral (31), Tropical TV(33), Teleduc TV (35) y Ecuador TV (48).

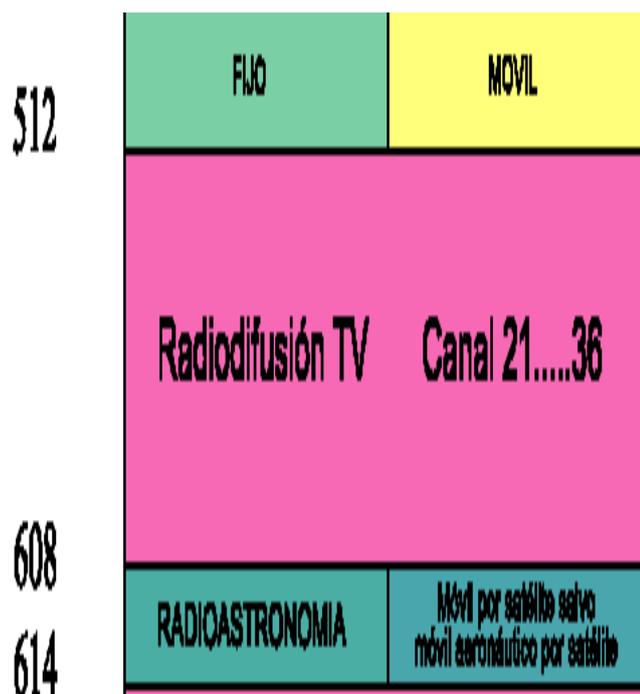


Figura 7: Banda de frecuencia para Televisión, frecuencia en Mhz

NUMERO DE SINTONIA	NOMBRE DEL CANAL	DIRECCION DEL Tx
21	CANAL UNO	CERRO CRUZ
23	AMERICAVISION	CERRO "CRUZ"
25	UNSION TV	CERRO CRUZ
27	CAPITAL TV	CERRO ICTO CRUZ
29	TELEATAHUALPA (RTU)	CERRO ICTO CRUZ
31	TV AUSTRAL	CERRO HITO CRUZ
33	TROPICAL TV	CERRO ICTO CRUZ
35	TELEDUC TV	CERRO ICTO CRUZ
48	ECUADOR TV (A.TEMPORAL)	CERRO ICTO CRUZ

Tabla 7: Canales que operan en estas frecuencias en el cantón Cuenca

2.2. AGENTES INTERNACIONALES

En la actualidad hay una serie de agentes y organizaciones que regulan el uso del espectro radioeléctrico, así como de la misma manera instituciones que se encargan de controlar los niveles de las radiaciones electromagnéticas que estas producen dependiendo del uso y empleo que estas tengan tanto en áreas poblacionales como ocupacionales. Entre las principales agencias internacionales se destacan la ICNIRP, OMS, IEEE.

Es así que la ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection e.V.), Comisión Internacional para Prevención de Radiación No Ionizante trabaja muy ligada y conjuntamente con la OMS (Organización Mundial de la Salud), con el objetivo de investigar los posibles peligros y daños que pueden causar las radiaciones no ionizantes a la salud, y de las cuales se pueden tener múltiples publicaciones basadas en años de profunda investigación.

2.2.1. Normativas para la medición de campos Electromagnéticos

En 1998 la ICNIRP publicó “Guidelines for Limiting Exposure to TimeVarying Electric, Magnetic and Electromagnetic Field (up to 300 Ghz)”, Pautas para limitar la exposición Variante en el Tiempo al campo eléctrico, magnético y electromagnético (Hasta los 300 Ghz.) en esta publicación se hace una división entre 2 tipos de exposiciones, la ocupacional y la poblacional, la primera abarca aquellos adultos entrenados para trabajar en contacto con fuentes emisoras de CEM y que tienen consciencia del potencial riesgo, y que utilizan algunos medios e implementos de protección para reducir al mínimo los posibles daños, mientras que el segundo grupo lo constituye todos los individuos comunes que viven o circulan por las cercanías a las fuentes emisoras sin ningún tipo de precaución.

2.2.2. Niveles de exposición a CEM

Con las pruebas expuestas y las consecuencias que describiremos posteriormente para la salud se consideran la exposición de campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo, utilizando parámetros como la densidad de corriente (J), la tasa de absorción específica de energía (SAR), y la densidad de potencia (S) para valorar el nivel de exposición de la CEM.

2.2.2.1 Niveles poblacionales

Características de exposición	Rango de frecuencia	Densidad de corriente para	SAR promedio en todo el cuerpo	SAR localizada cabeza y tronco	SAR localizada (extremidades) (Wkg^{-1})

		cabeza y tronco (mA m ⁻²)(rms)	(Wkg ⁻¹)	(Wkg ⁻¹)	
Niveles Poblacionales	100 Khz - 10 MHz	F/500	0.08	2	4
	10 Mhz – 10 Ghz		0.08	2	4

TABLA 8: Restricciones básicas para exposiciones a campos eléctricos y magnéticos para las frecuencias analizadas: fuente UIT (Unión Internacional de telecomunicaciones) tablas K 52

Rango de Frecuencias	Intensidad de Campo Eléctrico (Vm ⁻¹)	Intensidad de Campo Magnético (Am ⁻¹)	Densidad de Flujo Magnético (μT)	Densidad de Potencia (Wm ⁻²)
150Khz-1Mhz	87	0,73/f	0,92/f	-
1Mhz - 10 Mhz	87/f ^{0,5}	0,73/f	0,92/f	-
10Mhz-400Mhz	28	0,073	0,092	2
400Mhz – 2Ghz	1,375 f ^{0,75}	0,0037 ^{0,5}	0,0046f ^{0,5}	f/200

TABLA 2: Niveles de referencia para exposición poblacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados) : fuente UIT (Unión Internacional de telecomunicaciones) tablas K 52

2.2.2.2. Niveles Ocupacionales

Característica de exposición	Rango de frecuencia	Densidad de corriente para cabeza y tronco (mA m ⁻²)(rms)	SAR promedio en todo el cuerpo (Wkg ⁻¹)	SAR localizada cabeza y tronco (Wkg ⁻¹)	SAR localizada (extremidades) (Wkg ⁻¹)
Niveles Ocupacionales	100 Khz - 10 MHz	F/100	0.4	10	20
	10 Mhz –		0.4	10	20

	10 Ghz				
--	--------	--	--	--	--

TABLA 3: Restricciones básicas para exposiciones a campos eléctricos y magnéticos para las frecuencias analizadas: fuente UIT (Unión Internacional de telecomunicaciones) tablas K 52

Rango de Frecuencias	Intensidad de Campo Eléctrico (Vm^{-1})	Intensidad de Campo Magnético (Am^{-1})	Densidad de Flujo Magnético (μT)	Densidad de Potencia (Wm^{-2})
65Khz -1Mhz	610	1,6/f	2/f	-
1Mhz - 10 Mhz	610/f	1,6/f	2/f	-
10Mhz-400Mhz	61	0,16	0,2	10
400Mhz – 2Ghz	$3 f^{0,5}$	$0,008f^{0,5}$	$0,01f^{0,5}$	f/40

TABLA 4: Niveles de referencia para exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados) : fuente UIT (Unión Internacional de telecomunicaciones) tablas K 52

2.2.3. Posibles efectos en la Salud a la exposición de campos

Electromagnéticos

Para la publicación de resultados, estos se basaron en la experimentación y posterior análisis de resultados de laboratorios y epidemiológicos, con criterios de tiempo de exposición y niveles de referencia de CEM variables en el tiempo, estos experimentos dieron como resultado que la exposición prolongada a estos niveles puede producir efectos cardiovasculares, afección al sistema nervioso central, choques eléctricos, sobrecalentamiento de los tejidos nerviosos, pérdidas auditivas, cargas eléctricas superficiales, y estimulación celular nerviosa y muscular, pero lo más importante es que los campos electromagnéticos no presentan evidencia científica que sean indicadores del cáncer.

Existen efectos biológicos que se producen en la exposición a ondas electromagnéticas que provocan algún cambio notorio en el sistema

biológico, pero superable o regulable por el mismo organismo, mientras que pueden existir efectos de mayor proporción biológica que superan a la capacidad de recuperación autónoma en el proceso patológico.

Las corrientes naturales o normales de circulación en un organismo están entre 1 y 10 mA/m², siendo el segundo valor un umbral máximo antes de un daño en el sistema cardiovascular o en el sistema nervioso central, ya que valores comprendidos entre 10 a 100 mA producen alteraciones en los humanos, pero no necesariamente nocivas.

Por los estudios que se disponen, se establece que para los campos eléctricos con niveles inferiores a 20kV/m, no existe efecto sobre la reproducción o desarrollo animales, de la misma manera para los campos magnéticos en las frecuencias en la que se realiza el presente trabajo no existe evidencia que demuestre que estos afecten a la salud de las personas, tanto fisiológicamente como psicológicamente en los lugares regulares que habitan. El nivel de experimentación habitual para este campo es de 5 mT durante algunas horas, con posterior mediciones en ámbitos como la hematología, electrocardiografía, ritmo cardíaco, presión arterial o temperatura corporal.

2.3 AGENTES NACIONALES

Los organismos del gobierno y las autoridades locales tienen la responsabilidad de inspeccionar los campos electromagnéticos en el entorno de las líneas de conducción eléctrica, estaciones base de telefonía móvil o cualesquiera otras fuentes electromagnéticas de acceso público y de asegurarse de que se cumplen las directrices.

La Constitución Política de la República del Ecuador en el artículo 222 establece que: "Las superintendencias serán organismos técnicos con autonomía administrativa, económica y financiera y personería jurídica de derecho público, encargados de controlar instituciones públicas y privadas, a fin de que las actividades económicas y los servicios que presten, se sujeten a la Ley y atiendan el interés general.

La Ley determinará las áreas de actividad que requieran de control y vigilancia, y el ámbito de acción de cada Superintendencia.”

La ley de telecomunicaciones publicada en el Registro Oficial N° 996 de 10 de agosto de 1992 creó la Superintendencia de Telecomunicaciones. Tres años más hubo una reforma a la ley especial de telecomunicaciones que se publicó en el Registro Oficial N° 770 de 30 de agosto de 1995.

Dicha reforma contempla que la Superintendencia es el único ente autónomo encargado del control de las telecomunicaciones del país, en defensa de los intereses del Estado y del pueblo, usuario de los servicios de telecomunicaciones. Tiene personería jurídica, régimen de contrataciones, administración financiera y contable y administración de recursos humanos autónomos.

Las funciones de la Superintendencia son:

1. Controlar y monitorear el uso del espectro radioeléctrico.
2. Controlar las actividades técnicas de los operadores de los servicios de telecomunicaciones.
3. Controlar la correcta aplicación de los pliegos tarifarios aprobados por el CONATEL (Consejo Nacional de Telecomunicaciones).
4. Supervisar el cumplimiento de las concesiones y permisos otorgados para la explotación del servicio de telecomunicaciones.
5. Supervisar el cumplimiento de las normas de homologación y normalización aprobadas por el CONATEL.
6. Cumplir y hacer cumplir las resoluciones del CONATEL.
7. Aplicar las normas de protección del mercado y estimular la libre competencia.

SEGÚN LA LEY REFORMATORIA A LA LEY DE RADIODIFUSIÓN Y TELEVISIÓN A LA SUPERTEL SE LE ADICIONAN

1. Administrar y controlar las bandas del espectro radioeléctrico destinadas por el Estado para radiodifusión y televisión.

2. Someter a consideración del CONARTEL (Consejo Nacional de Radiodifusión y Televisión) los proyectos de reglamentos, del plan nacional de distribución de frecuencias para radiodifusión y televisión, del presupuesto del Consejo, de tarifas, de convenios o de resoluciones en general con sujeción a esta Ley.
3. Tramitar todos los asuntos relativos a las funciones del CONARTEL y someterlos a su consideración con el respectivo informe.
4. Realizar el control técnico y administrativo de las estaciones de radiodifusión y televisión.
5. Mantener con los organismos nacionales o internacionales de radiodifusión y televisión públicos o privados, las relaciones que corresponda al país como miembro de ellos, de acuerdo con las políticas que fije el CONARTEL.
6. Imponer las sanciones que le faculte esta ley y los reglamentos.
7. Ejecutar las resoluciones del CONARTEL.
8. Suscribir contratos de concesión de frecuencia para estación de radiodifusión o televisión o de transferencia de la concesión, previa aprobación del CONARTEL.

Se establece como misión de la Superintendencia de Telecomunicaciones:

“Vigilar, auditar, intervenir y controlar técnicamente la prestación de los servicios de telecomunicaciones, radiodifusión, televisión y el uso del espectro radioeléctrico, para que se proporcionen con eficiencia, responsabilidad, continuidad, calidad, transparencia y equidad; fomentando los derechos de los usuarios a través de la participación ciudadana, de conformidad al ordenamiento jurídico e interés general.”

Se establece como visión de la Superintendencia de Telecomunicaciones:

“Ser el Organismo Técnico de Control referente del Ecuador, que actúe con transparencia, solvencia, excelencia y compromiso social, impulse la innovación tecnológica del sector, fomente el acceso universal, la calidad y continuidad de los servicios de telecomunicaciones para beneficio de los ciudadanos y desarrollo del país.”

2.3.1 Reglamento nacional para RNI vigente

Como ya se expuso anteriormente los niveles máximos para las áreas tanto ocupacionales como poblacionales, así los organismos de control y regulación han establecido sanciones para los diferentes medios que sobrepasen los niveles señalados.

El Art. 4 de la Ley Reformativa de la Ley de Radiodifusión y Televisión, Registro Oficial No. 691 / 9 de mayo de 1995, establece que las infracciones en que pueden incurrir los concesionarios y/o las estaciones de radiodifusión y televisión, se clasifican en delitos y faltas técnicas o administrativas. Las mismas que están determinadas en el Reglamento; y el Art. 32, establecen que la Superintendencia de Telecomunicaciones podrá imponer a las estaciones, por infracciones de carácter técnico o administrativo previstas en esta Ley o en el Reglamento, las siguientes sanciones:

1. Amonestación escrita.
2. Multa de hasta diez salarios mínimos vitales.
3. Suspensión del funcionamiento, por reincidencia de una misma falta de carácter técnico o administrativo, o por mora en el pago de las tarifas o derechos de la concesión, mientras subsista el problema.

2.3.2 Medidas de protección y regulación

Las medidas de protección, están tipificadas dentro de las infracciones, estas al no cumplir con la regulación será sometida a las sanciones pertinentes por el ente regulador.

Como existen dos tipos de infracciones para las estaciones de radiodifusión y televisión, como son las de carácter técnico y administrativo, vamos a considerar solo en el aspecto técnico que abarca nuestra área de estudio. Hay diferentes clases de infracciones, y dependiendo de ello se procederá a la sanción así:

Infracciones Clase I

- Instalar la estación sin los dispositivos de seguridad humana, señalización para navegación aérea y rotulo de identificación.
- Instalar los transmisores sin los instrumentos de medida.

Infracciones Clase II

- Impedir el ingreso de personal de la SUPTEL para inspecciones y no presentar la documentación requerida.
- Realizar emisiones de prueba sin autorización de la SUPTEL.
- Instalar los estudios fuera del área de servicio autorizada.
- Utilizar la subportadora residual sin autorización de la SUPTEL.
- Indicar características diferentes a las autorizadas o falsear en cuanto a su origen.
- Incumplir la obligación de solucionar causas de interferencias.
- Operar con características diferentes a las autorizadas.
- Realizar cambios técnicos no autorizados por la SUPTEL o el CONARTEL.

Infracciones Clase III

- Cambiar de ubicación los transmisores o repetidoras sin autorización de la SUPTEL.
- Instalar un transmisor adicional en lugar distinto al autorizado.
- Instalar un estudio adicional al principal en una zona distinta del área de cobertura autorizada.
- No resolver problemas de interferencia perjudicial o mejorar el servicio de radiodifusión y televisión, en lo referente a cambios en las características de las estaciones y su ubicación.

Infracciones Clase V

- Suspender emisiones por más de 180 días consecutivos, sin autorización de la SUPTEL.
- Cambiar de lugar de operación la estación de servicio público comunal sin la correspondiente autorización del CONARTEL.

- Transmitir en forma permanente la señal de una estación extranjera, con el fin de justificar su funcionamiento.

Infracción:	Sanción:
Clase I	Amonestación por escrito.
Clase II	Sanción económica de hasta 50% del máximo de la multa (10 salarios mínimos vitales).
Clase III	Sanción económica del 100 % del máximo de la multa. (10 salarios mínimos vitales).
Clase IV	Suspensión de emisiones hasta 90 días.
Clase V	Cancelación de la concesión

Tabla 10: Sanciones según el tipo de infracción cometida

Otros Aspectos de Procedimientos de las Infracciones y Sanciones

Los siguientes artículos del Reglamento General a la Ley de Radiodifusión y Televisión, establece lo siguiente:

Art. 83.- La Superintendencia de Telecomunicaciones, podrá disponer la clausura de la estación, que no obstante haber sido sancionada con suspensión de emisiones por interferir a otras estaciones o sistemas de telecomunicaciones, no hayan acatado esa disposición, para lo cual oficiará al Intendente o autoridad competente de Policía de la respectiva jurisdicción donde funcione la estación y de ser necesario colaborará con el asesoramiento de técnico.

CAPITULO 3

“METODO DE ELEMENTOS FINITOS”

CAPITULO 3

“MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS”

En este capítulo se analiza el del método de los elementos finitos y la aplicación en la ingeniería lo cual permitirá hacer la simulación del software de aplicación para la medición de los campos electromagnéticos.

Este método trata de la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo, que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

3.1. Introducción

El método de los elementos finitos es un método de cálculo utilizado en diversos problemas de ingeniería, que se basa en considerar al cuerpo estructura dividida en elementos discretos. Este método numérico avanzado permite obtener una aproximación de la solución de un problema de contorno, asociado a una ecuación diferencial, ordinaria o en derivadas parciales, bajo ciertas condiciones de frontera.

El MEF permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo. Sin embargo no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método. Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero en menor importancia, ya que el MEF puede acercarse bastante más al diseño óptimo.

3.1.1 Orígenes del Método de los elementos Finitos

Con anterioridad a la aparición de las primeras herramientas de simulación por el Método de los Elementos Finitos (MEF en castellano o FEM en inglés), en

torno al año 1950, la definición de estructuras metálicas complejas se realizaba a partir de la resolución analítica de ecuaciones diferenciales, lo cual se convirtió rápidamente en un problema al presentarse casos complejos y difíciles de resolver.

A comienzos del siglo XX investigadores como Castigliano, Rayleigh y Ritz desarrollaron una metodología para predecir el desplazamiento de una estructura basándose en ecuaciones de funciones de forma de sistemas sencillos de carga, siendo estos resueltos por una minimización de la energía. El trabajo desarrollado por el matemático Richard Courant a mediados de 1950 permitió sentar las bases de la resolución de sistemas estructurales mediante la implementación de la notación matricial y su resolución algebraica.

A partir de este momento, con el desarrollo que han experimentado las computadoras en el aumento de su capacidad de cálculo, gestión de memoria, capacidad de almacenamiento en disco, unido al uso y desarrollo del Método de los Elementos Finitos aplicado al cálculo estructural lineal, no lineal, dinámico, térmico, ha hecho que esta metodología se vaya extendiendo desde las universidades, pasando por las multinacionales y llegando a las pequeñas y medianas empresas.

3.1.2 Conceptos Generales

La base del método de los elementos finitos es la representación de un cuerpo por un ensamble de subdivisiones llamadas elementos. Estos elementos se interconectan a través de puntos llamados nodos.

Una manera de discretizar un cuerpo o estructura es dividirla en un sistema equivalente de cuerpos pequeños, tal que su ensamble representa el cuerpo original. La solución que se obtiene para cada unidad se combina para obtener la solución total. La solución del problema consiste en encontrar los desplazamientos de estos puntos y a partir de ellos, las deformaciones y las tensiones del sistema analizado. Las propiedades de los elementos que unen a los nodos, están dadas por el material asignado al elemento, que definen la

rigidez del mismo, y la geometría de la estructura a modelizar a partir de las Leyes de la Elástica.

Las deformaciones y las fuerzas externas se relacionan entre sí mediante la rigidez y las relaciones constitutivas del elemento, descrito por la siguiente ecuación:

$$[K]\{\delta\} = \{F\} \quad \text{Ecu 3.1}$$

En donde:

- $[K]$ Es la matriz rigidez del sistema
- $\{\delta\}$ Es el vector de desplazamientos
- $\{F\}$ Es el vector de esfuerzos

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir entre:

- Dominio. Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.
- Condiciones de contorno. Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, focos de calor, etc.
- Incógnitas. Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema: desplazamientos, tensiones, temperaturas, etc.

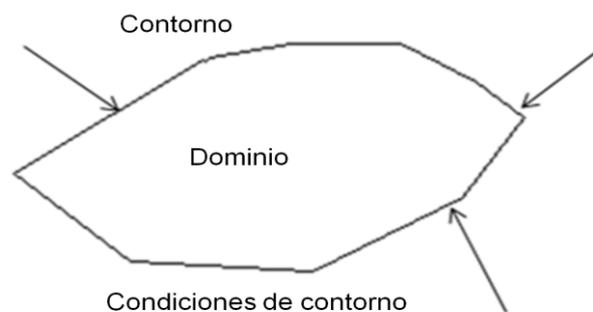


Figura 3.1: Variables de un Sistema

El dominio se divide mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (en el caso bidimensional) o superficies (en el tridimensional) imaginarias, de forma que el dominio total en estudio se aproxime mediante el conjunto de elementos en que se subdivide.

Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre si los elementos. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema.

En el caso de elementos estructurales estas incógnitas son los desplazamientos nodales, ya que a partir de éstos podemos calcular el resto de incógnitas que nos interesen. A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que nos determinan el estado y posición del nodo.

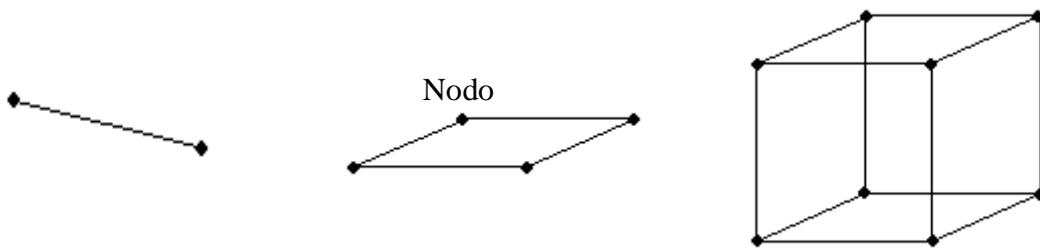


Figura 3.2: Tipos de Dominio

3.1.3 Definición Básica del Método

El MEF se basa en transformar un sistema de modelo continuo en un modelo de sistema discreto aproximado, a la cual se denomina discretización del modelo. Esta aproximación es una función de valores que se obtiene a partir de un número determinado y finito de puntos, de tal forma que:

- El sistema continuo se divide en un número finito de elementos, cuyo comportamiento se determina mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos denominados nodos.

- La solución de este sistema es la de los problemas discretos. El sistema completo se forma por unión de los elementos.
- Las incógnitas que plantea el problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma.

3.1.4 Funciones de Forma

En el MEF una parte muy importante es la interpolación pues mediante las funciones de forma, se consigue reducir el problema a la determinación de los corrimientos de los nodos. Estas funciones son valores aproximados del corrimiento de cualquier punto del elemento, en función del corrimiento de los nodos.

3.1.4.1 Propiedades de las funciones de forma

- Derivabilidad
- Integrabilidad
- Semejanza con las leyes de distribución de corrimientos
- Condición de polinomio completo

3.1.4.2 Tipos de funciones de forma

En cada elemento se pueden distinguir tres tipos de nodos, primarios, secundarios e intermedios.

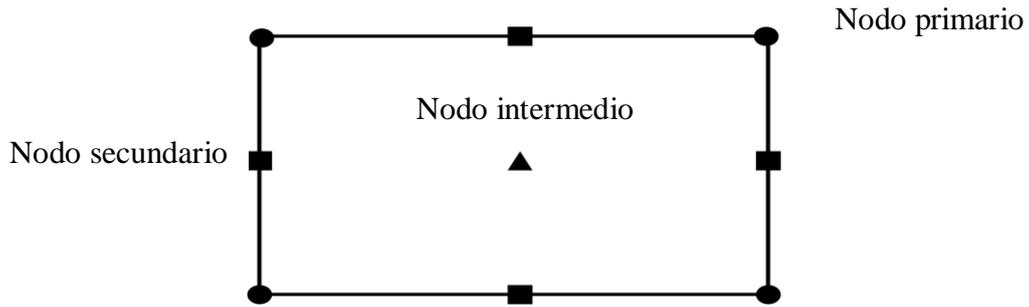


Figura 3.3: Tipos de nodos de un elemento

3.1.5 Análisis Vectorial y Matricial

Debido a que gran parte del análisis asociado con el método del elemento finito, es independiente de la ecuación diferencial parcial que se está resolviendo, es conveniente introducir el método en su forma más simple, como son los campos asociados con el flujo continuo de calor o corriente eléctrica.

El análisis de estos problemas tiene su origen en tres ecuaciones básicas:

1. La ecuación que define el gradiente de potencial o temperatura es

$$e = \nabla u \quad \text{Ecu 3.2}$$

En donde:

u Es la Temperatura o potencial eléctrico

2. La ecuación que define las propiedades del material es

$$q = -De \quad \text{Ecu 3.3}$$

En donde:

q Es la Densidad de flujo de calor o de corriente

D Es Una propiedad del material

3. La ecuación que define las propiedades del material es

$$\nabla q = w \quad \text{Ecu 3.4}$$

En donde:

w Es una Distribución de fuentes de calor o de corriente eléctrica

Si se combinan estas tres ecuaciones se obtiene la ecuación de Poisson.

$$\nabla^2 D = -w \quad \text{Ecu 3.5}$$

3.2 METODO DE ELEMENTOS FINITOS

Cuando se plantea un problema se pretende definir los distintos enfoques estructurales de dicho problema ya que un análisis riguroso precisa de la integración de las ecuaciones diferenciales que expresan el equilibrio de un elemento diferencial genérico de la estructura. El planteamiento matemático y analítico de dichas ecuaciones da lugar a la formulación continua del problema.

3.2.1 Análisis de Sumas Ponderadas y otros Métodos

La mayor parte de las estructuras en ingeniería son de naturaleza continua. Aunque su respuesta es inherentemente tridimensional, se puede en algunos casos y simplificar su análisis considerando un comportamiento estructural de elasticidad bidimensional de tensión o deformación plana de donde:

- La tensión plana se caracteriza porque $\sigma_z = 0$
- La deformación plana se caracteriza porque $\varepsilon_z = 0$

Lo que se plantea conocer en cualquier punto del dominio es:

1. El campo de desplazamientos $u(x, y)$
2. El campo de deformaciones $\varepsilon(x, y)$
3. El campo de tensiones $\sigma(x, y)$

El objetivo del MEF también es conocer los campos anteriores en cualquier punto del dominio a partir de los valores hallados en ciertos puntos. Para ello es necesario dividir el dominio en subdominios formando una malla. El planteamiento de las ecuaciones que se obtienen y su resolución dan lugar a la formulación discreta del problema.

3.2.1.1 Sumas Ponderadas

Se define como estado de tensión o deformación plana en elasticidad, aquel cuyas secciones perpendiculares al eje prismático de la estructura se deforman en su plano y de manera idéntica.

Por consiguiente basta conocer la respuesta de una sección transversal de la estructura y trabajar, por tanto, en dos dimensiones para caracterizar el comportamiento estructural.

El campo de desplazamientos es de naturaleza vectorial y queda perfectamente establecido si en cada punto se conocen los desplazamientos según las direcciones de los ejes coordenados. El vector desplazamiento en un punto cualquiera se define como:

$$d(x, y) = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix} \quad \text{Ecu 3.6}$$

El campo de deformaciones se deduce a partir de las primeras derivadas del campo de desplazamientos al aceptar la teoría de pequeñas deformaciones. A partir de la teoría general de la elasticidad se obtiene:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{Ecu 3.7}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{Ecu 3.8}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad \text{Ecu 3.9}$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx} = 0 \quad \text{Ecu 3.10}$$

La relación entre las tensiones y las deformaciones se deduce de la elasticidad tridimensional con las hipótesis simplificadas para tensión y deformación plana. Las hipótesis de elasticidad lineal definen un comportamiento proporcional entre tensiones y deformaciones según la relación siguiente.

$$\sigma = D\varepsilon \quad \text{Ecu 3.11}$$

De donde:

D Es la matriz de constantes Elásticas

La matriz constitutiva en el caso de elasticidad bidimensional con hipótesis de tensión plana es:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} \quad \text{Ecu 3.12}$$

$$d_{11} = d_{22} = \frac{E}{1-\nu^2} \quad \text{Ecu 3.13}$$

$$d_{12} = d_{21} = \nu d_{11} \quad \text{Ecu 3.14}$$

$$d_{33} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{Ecu 3.15}$$

En donde:

E es el módulo de elasticidad

ν es el coeficiente de Poisson

La matriz constitutiva en el caso de elasticidad bidimensional con hipótesis de deformación plana es:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} \quad \text{Ecu 3.16}$$

$$d_{11} = d_{22} = \frac{E(1-V)}{(1+V)(1-2V)} \quad \text{Ecu 3.17}$$

$$d_{12} = d_{21} = \frac{V}{1-V} d_{11} \quad \text{Ecu 3.18}$$

$$d_{33} = \frac{E}{2(1+V)} \quad \text{Ecu 3.19}$$

3.2.1.2 Principio de los trabajos virtuales

El principio de los trabajos virtuales postula que ante la aplicación de un desplazamiento virtual (pequeño, posible y arbitrario), el trabajo virtual de las fuerzas externas debe ser igual al trabajo virtual de las fuerzas internas. De las relaciones entre desplazamientos, tensiones y deformaciones, el problema matemático se formula como un equilibrio entre el trabajo efectuado por las fuerzas internas que se generan por la deformación elástica del cuerpo y las fuerzas externas que lo solicitan.

$$\iint \delta \varepsilon \sigma dA = \iint \delta u b dA + \int \delta u t ds + \sum_i \delta u_i q_i \quad \text{Ecu 3.20}$$

Como la resolución analítica de esta ecuación es imposible en la mayor parte de los casos, se realiza una aproximación discreta del problema. Y los elementos finitos permiten reducir esta expresión a una más fácil de resolver.

3.2.1.3 Problema discreto

El planteamiento del problema continuo conduce a unas ecuaciones que no tienen solución analítica en la mayor parte de los casos. En general es imposible encontrar para los campos incógnita una expresión del tipo

Así, se considera la posibilidad de resolver el problema, de forma correcta, únicamente en ciertos puntos y obtener una solución discreta del problema.

Es decir, se calcula la solución en desplazamientos, deformaciones y tensiones en ciertos puntos y se extrapolan estos valores a cualquier otro punto. De esta manera es posible conocer el valor aproximado de los campos incógnita. En particular, el campo de desplazamientos es el que interesa más porque todos los demás derivan de él.

El planteamiento discreto se define en:

- Dividir el dominio en una malla de elementos finitos. Dividimos el dominio en elementos hasta cubrir la totalidad de su superficie.
- Aplicar el PTV (Principio de los Trabajos Virtuales) sobre la estructura y aprovechar las propiedades matemáticas que conllevan los elementos finitos para obtener finalmente un sistema de ecuaciones, formalmente análogo al visto en el cálculo matricial de sistemas discretos
- Resolver el sistema y obtener el resultado de los campos incógnita

3.2.1.4 La ecuación de equilibrio discretizada

De los términos del PTV se desea calcular el correspondiente a la matriz de rigidez que contiene la respuesta interna del sistema ante la sollicitación externa de las acciones.

$$\iint \delta \varepsilon \sigma dA \quad \text{Ecu 3.21}$$

Este término vendrá definido por la contribución de todos y cada uno de los elementos finitos que forman la malla. Por tanto cada elemento se verá obligado a cumplir las ecuaciones de equilibrio del problema. Para ello se debe dotar a cada elemento finito de la malla del bagaje matemático que incorpora el MEF.

Se plantea en cada elemento:

- Discretización del campo de desplazamientos
- Discretización del campo de deformaciones
- Discretización del campo de tensiones

Con los campos discretizados arriba descritos ahora es posible hallar el término de la ecuación de equilibrio que da lugar a la matriz de rigidez del sistema.

3.3 Aproximación del campo de desplazamientos

Los elementos finitos permiten calcular el desplazamiento en cualquier punto interior del mismo interpolando su valor a partir de los hallados en los nodos. Para ello definimos la matriz de funciones de interpolación N (también llamadas funciones de forma) y expresamos los desplazamientos cartesianos u de un punto cualquiera del interior del elemento en función de los desplazamientos de sus nodos a^e

$$u(x, y) = N(x, y)a^e \quad \text{Ecu 3.22}$$

En elasticidad bidimensional el vector desplazamiento de un punto cualquiera está definido por dos componentes cartesianas:

$$u = [u, v]^T \quad \text{Ecu 3.23}$$

Asimismo el vector de desplazamientos en todos los nodos de la malla está compuesto por dos componentes en cada uno de esos nodos, genéricamente en el nodo i del elemento (e):

$$a_i^e = [u_i \ v_i]^T \quad \text{Ecu 3.24}$$

De esta manera la matriz de funciones de forma toma el siguiente aspecto:

$$N_i = \begin{bmatrix} N_i(x, y) & 0 \\ 0 & N_i(x, y) \end{bmatrix} \quad N = [N_1 \dots \dots N_i \dots \dots N_n] \quad \text{Ecu 3.25}$$

Con las propiedades siguientes de las funciones de forma:

$$N_i(x_j, y_j) = 1 \quad \text{si } i = j \quad \text{Ecu 3.26}$$

$$N_i(x_j, y_j) = 0 \quad \text{si } i \neq j \quad \text{Ecu 3.27}$$

$$\sum N_i(x, y) = 1 \quad \text{Ecu 3.28}$$

3.3.1 Elementos Isoparamétricos

Un concepto muy importante de los MEF es la formulación de elementos Isoparamétricos. Sin ellos el MEF no hubiera llegado al nivel actual de potencia.

El término isoperimétrico surge al utilizar las mismas funciones de forma para interpolar la geometría y el campo de desplazamientos. Por consiguiente se expresa la geometría de un elemento finito Isoparamétricos bidimensional a partir de las coordenadas reales cartesianas x_i e y_i de sus nodos como:

$$x = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) \cdot x_i \quad \text{Ecu 3.29}$$

$$y = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) \cdot y_i \quad \text{Ecu 3.30}$$

De donde:

$N_i(\xi, \eta)$ Es la función de forma de cada nodo del elemento

Estas ecuaciones relacionan las coordenadas cartesianas de un punto y las naturales. Es decir, se realiza un mapeo entre el espacio real y un espacio ideal unitario donde todo está normalizado.

Dicha relación debe ser biunívoca, para lo cual debe cumplirse que el determinante del Jacobiano de la transformación de coordenadas sea de signo constante en todo el elemento

Todo elemento isoparamétrico requiere una transformación entre las coordenadas cartesianas y las naturales. La matriz Jacobiano relaciona las derivadas cartesianas y naturales de una función. Aplicada a las funciones de forma y se obtiene:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad \text{Ecu 3.31}$$

Invirtiendo esta expresión se obtienen los valores de las derivadas parciales cartesianas en función de las derivadas naturales. Para calcular los términos del Jacobiano se utiliza la transformación isoparamétrica. Así,

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \cdot x_i \quad ; \quad \frac{\partial x}{\partial \eta} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \cdot x_i \quad \text{Ecu 3.32}$$

Por lo que tenemos:

$$J^e = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \cdot x_i & \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \cdot y_i \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \cdot x_i & \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \cdot y_i \end{bmatrix} \quad \text{Ecu 3.33}$$

El determinante del Jacobiano permite expresar el diferencial de área en coordenadas naturales como:

$$dx \cdot dy = |J^e| d\xi \cdot d\eta \quad \text{Ecu 3.34}$$

Donde el determinante del Jacobiano es:

$$|J^e| \quad \text{Ecu 3.35}$$

3.4 MODELO MATEMÁTICO DE SISTEMAS ELECTROMAGNETICOS APLICANDO EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS

3.4.1 Ecuaciones de Partida

Las ecuaciones que rigen el comportamiento de los campos electromagnéticos son las cuatro ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\delta \vec{D}}{\delta t} = \vec{J}_s + \vec{J}_e + \vec{J}_v + \frac{\delta \vec{D}}{\delta t} \quad \text{Ecu 3.36}$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\delta \vec{B}}{\delta t} \quad \text{Ecu 3.37}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Ecu 3.38}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{Ecu 3.39}$$

$\nabla \times$: Operador rotacional.

∇ : Operador divergencia.

\vec{H} : Vector intensidad de campo magnético.

\vec{J} : Vector densidad e corriente.

\vec{J}_s : Vector densidad de corriente fuente.

\vec{J}_e : Vector densidad de corriente de pérdidas inducidas.

\vec{J}_v : Vector densidad de corriente de velocidad.

\vec{D} : Vector desplazamiento o densidad de flujo eléctrico.

t: Tiempo.

\vec{E} : Vector intensidad de campo eléctrico.

\vec{B} : Vector densidad de flujo magnético.

ρ : Densidad de carga eléctrica.

La ecuación de continuidad $\nabla \cdot \left[\vec{J} + \frac{\delta \vec{D}}{\delta t} \right] = 0$, se deriva de la (1) y debe cumplirla cualquier conjunto de ecuaciones de Maxwell.

La relación entre los vectores de densidad e intensidad de campo magnético viene dada por:

$$\vec{B} = [\mu] \cdot \vec{H} \quad \text{u 3.40}$$

Donde $[\mu]$ es la matriz de permeabilidad magnética que es, generalmente, función de \vec{H} y/o de la temperatura. Si es función únicamente de la temperatura, viene dada en la forma:

$$[\mu] = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{rz} \end{bmatrix} \quad \text{Ecu 3.41}$$

μ_0 : Permeabilidad del vacío.

μ_{rx} : Permeabilidad relativa en la dirección X.

Si es función únicamente del campo, la expresión es:

$$[\mu] = \mu_h \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecu 3.42}$$

μ_h : Permeabilidad obtenida de la curva B-H

Cuando se incluye en el análisis imanes permanentes, la relación (5) se convierte en la (8).

$$B = [\mu] \cdot \vec{H} + \mu_0 \vec{M}_0 \quad \text{Ecu 3.43}$$

\vec{M}_0 : Vector magnetización remanente.

El vector intensidad de campo se puede obtener despejando de la ecuación anterior.

$$\vec{H} = [v] \cdot \vec{B} - \frac{1}{v_0} [v] \cdot \vec{M}_0 \quad \text{Ecu 3.44}$$

$[v]$: Matriz de reluctividad $[\mu]^{-1}$

v_0 : Reluctividad del vacío $1/\mu_0$

Las relaciones equivalentes para el campo eléctrico son las que se muestran a continuación:

$$\vec{J} = [\sigma] \cdot \vec{E} + \vec{v} * \vec{B} \quad \text{Ecu 3.45}$$

\vec{v} : Vector velocidad.

$$[\sigma] = \mu_0 \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{Ecu 3.46}$$

Matriz de conductividad eléctrica

σ_{xx} : Conductividad en la dirección X.

$$\vec{D} = [\varepsilon] \cdot \vec{E} \quad \text{Ecu 3.47}$$

$$[\varepsilon] = \mu_0 \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{Ecu 3.48}$$

Matriz de permitividades.

ε_{xx} : Permitividad en la dirección X

3.4.2 Métodos de resolución por el MEF

Los métodos de resolución de problemas de campos electromagnéticos emplean funciones de potencial. Existen dos tipos:

- Funciones potencial vector.
- Funciones potencial escalar.

Las regiones donde se aplican los métodos de resolución son los mostrados en la figura siguiente:

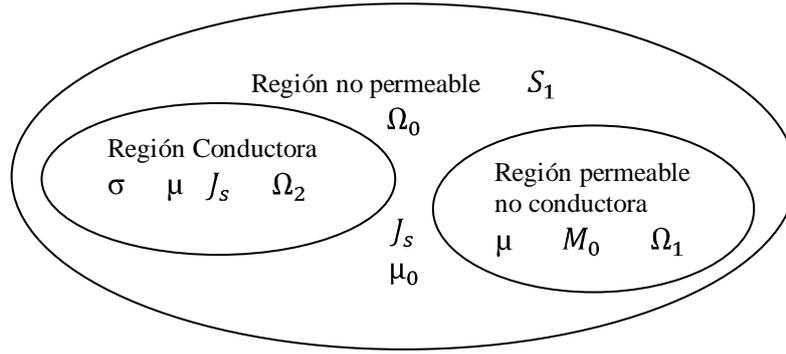


Figura 3.4: Dominios de aplicación del MEF

3.4.3 Solución empleando el Potencial Escalar Magnético.

Se emplea en magnetostática (dominios Ω_0 y Ω_1), es decir, cuando se ignoran los efectos del tiempo sobre las magnitudes electromagnéticas. Esto reduce las ecuaciones de Maxwell a las siguientes:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s \quad \text{Ecu 3.49}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Ecu 3.50}$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad \text{Ecu 3.51}$$

Solo se tienen en cuenta las regiones Ω_0 y Ω_2 . La solución buscada tiene la forma siguiente:

$$\vec{H} = \vec{H}_g - \nabla \phi_g \quad \text{Ecu 3.52}$$

$$\nabla \cdot [\mu] \nabla \phi_g - \nabla \cdot [\mu] \vec{H}_g - \nabla \cdot \mu_0 \vec{M}_0 = 0 \quad \text{Ecu 3.53}$$

\vec{H}_g : Campo magnético de prueba.

ϕ_g : Potencial generalizado.

El campo de prueba debe satisfacer la ley de Ampère (12) y el potencial generalizado da el resto del campo hasta llegar al campo buscado. El valor absoluto de \vec{H}_g debe ser mayor que $\nabla \phi_g$.

Existen tres estrategias diferentes de solución de las ecuaciones empleando el potencial escalar, y en todas ellas es esencial la correcta selección del campo de prueba \vec{H}_g . La elección de este campo de prueba va siempre asociado a la Ley de Biot-Savart y al campo obtenido de ella \vec{H}_s :

$$\vec{H}_s = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J}_s * \vec{r}}{|\vec{r}|^3} dV \quad \text{Ecu 3.54}$$

\vec{r} : Vector posición de la fuente de corriente al nodo.

dV : Diferencial de Volumen ocupado por la fuente d corriente \vec{J}_s .

La ecuación (16) se puede reducir a una integral de superficie:

$$\vec{H}_s = \frac{1}{4\pi} \int_A \frac{\vec{J}_s}{\vec{r}} dA \quad \text{Ecu 3.55}$$

A: Superficie de la fuente de corriente.

3.4.3.1 Estrategia RSP (Potencial Escalar Reducido).

Aplicable cuando la permeabilidad relativa vale la unidad, es decir, cuando $[\mu] = \mu_0 [I]$, o cuando no existen fuentes de corriente $\vec{J}_s=0$. Permite tener en cuenta materiales no lineales e imanes permanentes. Se aplica a las regiones Ω_1 y Ω_0 (región no permeable y región permeable conductora).

3.4.3.2 Estrategia DSP (Diferencia de Potencial Escalar).

Se emplea cuando existen fuentes de corriente $\vec{J}_s \neq 0$ y regiones de permeabilidad distinta a la del vacío que no encierran corriente alguna. Es decir, que la integral circular de campo en esta región debe tender a cero cuando la permeabilidad tiende a infinito.

3.4.3.3 Estrategia GSP (Potencial Escalar General).

Se aplica cuando existen en fuentes de corriente, y cuando existen regiones de permeabilidad distinta a la del vacío con fuentes de corriente en su interior.

3.4.4 Ejemplos de Ejercicios resueltos Analíticamente y por MEF.

3.4.4.1 Ejemplos

Ejemplo 1

Tenemos un condensador de placas circulares de radio R separadas una distancia d con una diferencia de potencial entre las placas ΔV y un medio de permitividad ϵ_0 tal y como se nos muestra en la siguiente figura. Vamos a calcular el Campo Eléctrico, la capacidad del condensador y la energía almacenada.

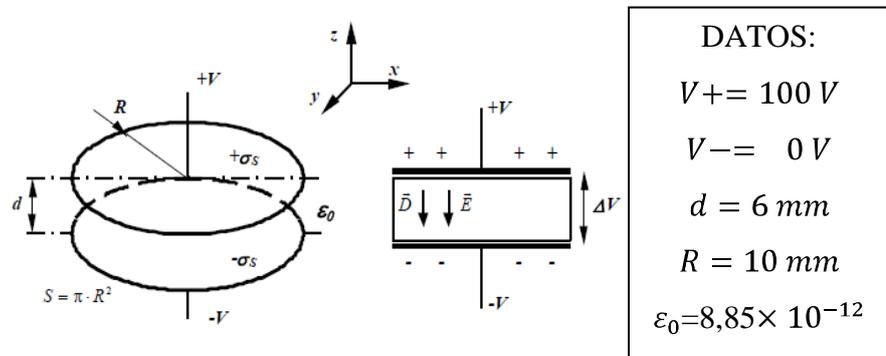


Figura 3.5: Datos del ejercicio

La solución analítica viene dada por las siguientes expresiones:

$$|\vec{E}| = \frac{V_B - V_A}{d} = 16,66 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$$

$$|\vec{D}| = \epsilon_0 \cdot |\vec{E}| = 16,166 \times 8,85 \times 10^{-12} = 1,475 \cdot 10^{-7} \frac{\text{C}}{\text{m}}$$

Siendo la capacidad y la energía del condensador obtenido de la siguiente manera:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{d} = 0,463 \text{ pF}$$

$$\text{Energía} = \frac{1}{2} C \cdot \Delta V^2 = 2,315 \cdot 10^{-9} \text{ J}$$

Para realizar la resolución por el MEF tenemos la relación entre el potencial magnético, la intensidad de campo eléctrico, la densidad de campo magnético y el potencial eléctrico escalar, quedando de la siguiente manera:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla V$$

Además del Potencial eléctrico para los campos electrostáticos se comienza de:

$$\nabla \times \vec{E} = 0$$

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

En donde la relación de campo eléctrico y de la densidad de campo eléctrico es:

$$\vec{D} = [\varepsilon] \cdot \vec{E}$$

Se debe tomar en cuenta las condiciones de frontera para campos electrostáticos, las cuales vienen dados por las siguientes ecuaciones.

$$\vec{E}_{1t} = \vec{E}_{2t}$$

$$\vec{D}_{1n} - \vec{D}_{2n} = \rho_s$$

En donde la ecuación de la divergencia del vector desplazamiento queda de la siguiente manera:

$$-\nabla \cdot [\varepsilon] \nabla V = \rho$$

Los resultados obtenidos mediante el MEF permiten validar las expresiones anteriores.

MAGNITUD	TEORICO	MEF
$ E $	$16,66 \frac{kV}{m}$	$16,666 \frac{kV}{m}$
C	$0,463 pF$	$0,463 pF$
Energía	$2,315 \cdot 10^{-9} J$	$2,3169 \cdot 10^{-9} J$

Tabla 3.1: Comparación de Datos

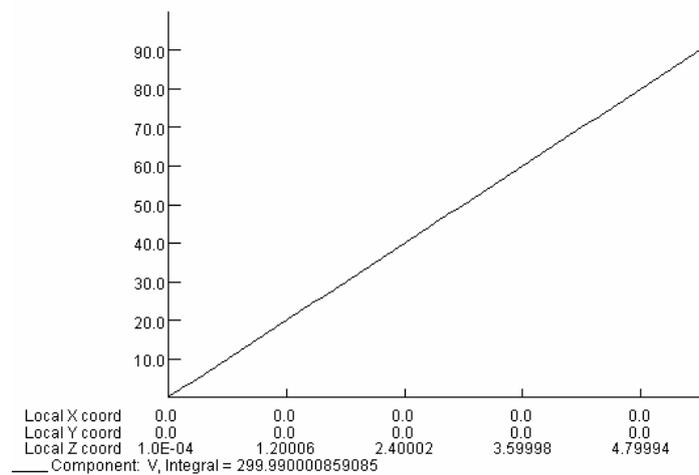


Figura 3.6 Potencial Eléctrico en el condensador mediante MEF

Ejemplo 2

En este ejercicio tenemos un sólido de permitividad ϵ_0 cuyo espesor es despreciable respecto a las otras dos dimensiones y que se encuentra con una carga positiva distribuida uniformemente en su volumen. Se va a calcular el campo electrostático, para esto conocido el vector intensidad de campo eléctrico E y aplicando la definición de la diferencia de potencial ΔV podemos calcular el potencial en cualquier punto del espacio.

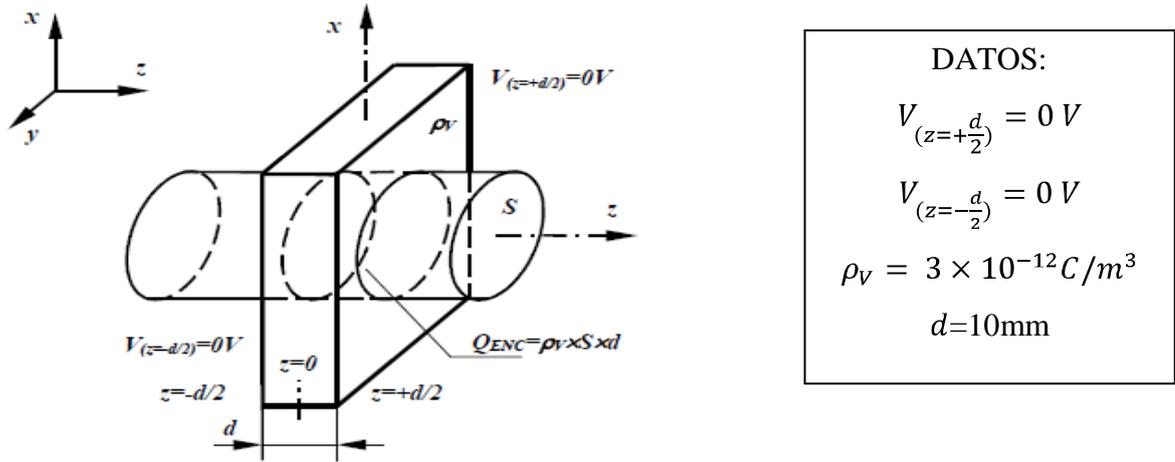


Figura 3.7: Datos del ejercicio

La solución analítica es de la siguiente manera:

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$E_z = \frac{\rho_V}{\epsilon_0} \cdot z \quad \text{para } z \leq \frac{d}{2}$$

$$V(z) = \frac{W_{\frac{d}{2} \rightarrow z}}{q} = \int_{\frac{d}{2}}^z E \cdot dl$$

$$V(z) = \frac{\rho_V}{2 \cdot \epsilon_0} \cdot \left(\frac{d^2}{4} - z^2 \right) \quad \text{para } z \leq \frac{d}{2}$$

Para la comprobación numérica de los resultados se introducen en el programa de elementos finitos los parámetros obteniendo los mismos resultados

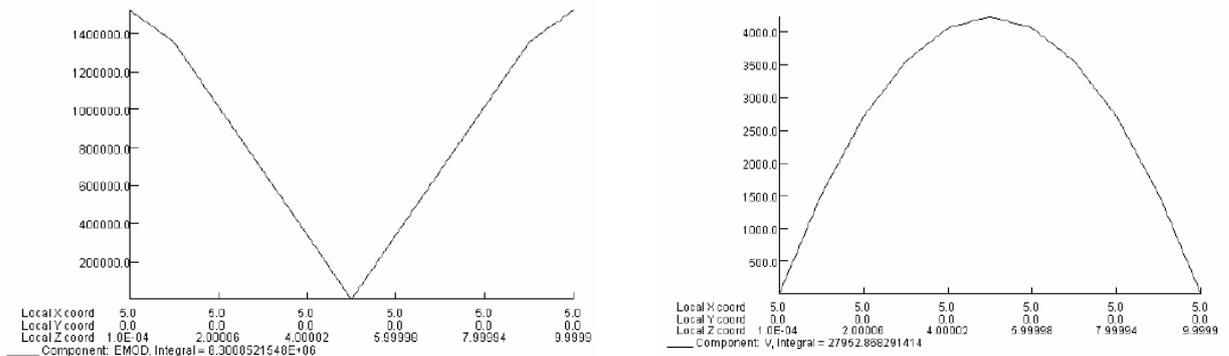


Figura 3.8: Variación del módulo del campo eléctrico y el potencial eléctrico mediante MEF

3.5 SIMULACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO

En el siguiente ejemplo se ilustra los conceptos básicos tales como líneas equipotenciales, campos eléctricos, efecto de borde, densidades de carga y energía. La representación espacial de las líneas de campo y superficies equipotenciales realizadas por el MEF. El ejemplo es el de un condensador cilíndrico. En este tipo de condensador las líneas de campo eléctrico describen trayectorias perpendiculares a las placas conductoras.

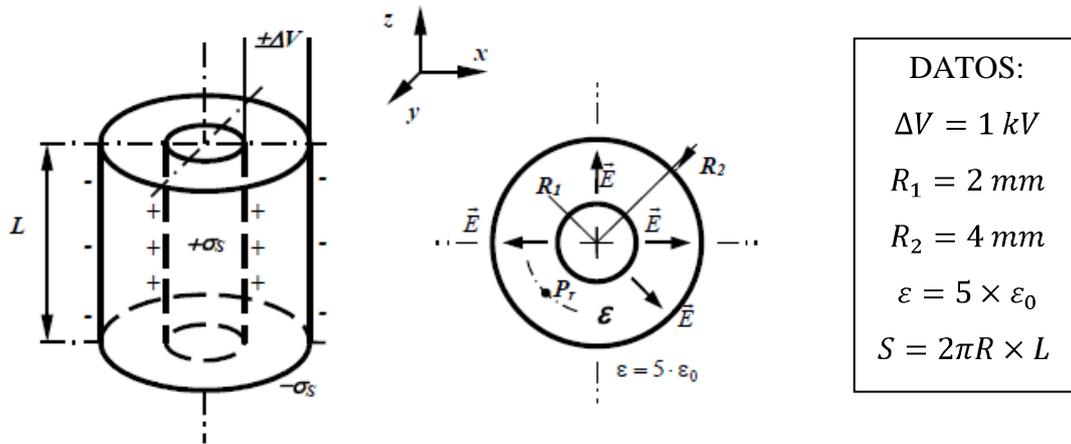


Figura 3.9: Datos el Ejemplo de análisis

Partimos de dos conductores cilíndricos de radios R_1 y R_2 con una diferencia de potencial entre las placas ΔV y un medio lineal, homogéneo e isótropo de permitividad $5 \times \epsilon_0$, tal y como se nos muestra en la figura anterior. De esta manera la resolución analítica será,

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon} \Rightarrow E = \frac{Q}{10\pi\epsilon_0 \cdot L} \cdot \frac{1}{r}; \Delta V$$

$$- \int_{R_2}^{R_1} \vec{E} \cdot d\vec{l} \Rightarrow \Delta V = \frac{Q}{10\pi\epsilon_0 \cdot L} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

$$|\vec{E}| = \frac{\Delta V}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \cdot \frac{1}{r} = \frac{1442,7}{r} \cdot \frac{V}{m}$$

$$|\vec{D}| = \epsilon \cdot |\vec{E}| = \frac{6,3839 \cdot 10^{-8}}{r} \cdot \frac{C}{m^2}$$

Siendo la carga Q y la capacidad C por unidad de longitud en el condensador cilíndrico:

$$Q = 10\pi\epsilon_0 L \cdot \frac{\Delta V}{\ln \frac{R_2}{R_1}} = 4,011 \cdot 10^{-7} \frac{C}{m}$$

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = 0,4 \frac{pF}{m}$$

La resolución por MEF debe satisfacer la siguiente ecuación:

$$\epsilon \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = -\rho$$

La formulación del elemento finito puede proceder a partir de la minimización de la energía de campo almacenada:

$$\iint \epsilon \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy - \int \rho \phi dA = 0$$

Para cada elemento finito e , el potencial en su interior será $\phi^e(x, y, z)$; entonces el potencial total será:

$$\phi(x, y, z) = \sum \phi^e(x, y, z)$$

De aquí se obtiene el sistema matricial equivalente a la solución variacional:

$$[K][\phi] = [b]$$

Donde:

- $[\phi]$: Vector potencial con los valores desconocidos.
- $[b]$: Vector conocido que depende de las condiciones de contornos
- $[K]$: Matriz de esfuerzo.

Una vez aplicado el MEF, se obtiene los siguientes resultados gráficos el cual solo ah sido tomado una parte para su mejor visualización. La simulación se ah realizado en Matlab.

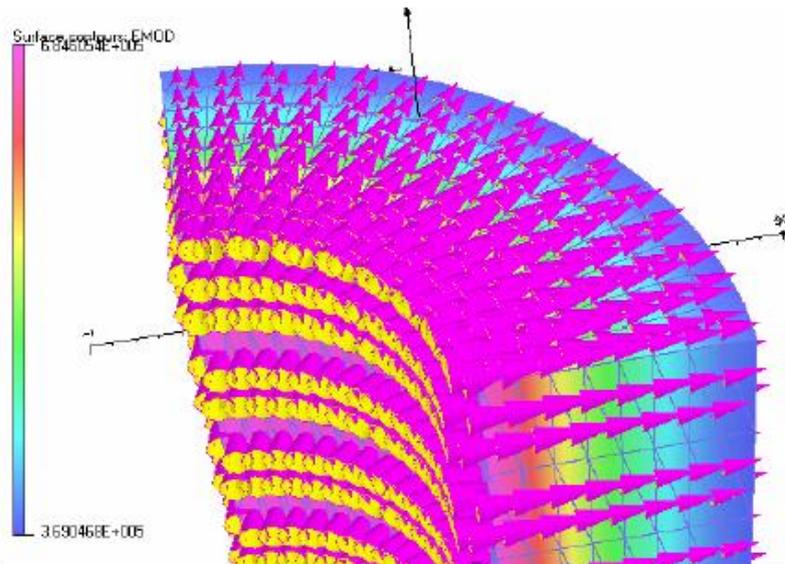


Figura 3.10: Líneas del campo eléctrico en el interior de un condensador cilíndrico.

A continuación se efectúa una comprobación numérica de los resultados obtenidos mediante el método analítico y los mostrados en el MEF. Para ello calcularemos las variables en un punto situado sobre el radio, $R=3\text{mm}$.

Igualmente se compara la carga acumulada Q , la capacidad asociada C y la energía por unidad de longitud.

MAGNITUD	UNIDAD	TEORICO	MEF
$ E _{R=3\text{mm}}$	kV/m	480,9	482,36
$ D _{R=3\text{mm}}$	C/m^2	$2,12 \times 10^{-5}$	$2,135 \times 10^{-5}$
$V_{R=3\text{mm}}$	V	415,03	415,196
Q	C/m	$4,011 \times 10^{-7}$	$4,013 \times 10^{-7}$
C	pF/m	401,113	401,293
Energía	J/m	$200,557 \times 10^{-6}$	$200,646 \times 10^{-6}$

Tabla 3.2: Comparación de Datos

3.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS EN EL EMPLEO DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

3.6.1 Ventajas

- Una de las principales ventajas del método de los elementos finitos es que permite realizar cálculos en geometrías asimétricas y en espacios dimensionales superiores para las cuales sería muy complicado hacer cálculos manuales.
- Permite evaluar alternativas de diseño, nuevas funciones o sensibilidades de parámetros e interrelaciones entre los mismos, que de otra manera serían inabordables.
- La resolución puede ser automatizada con ayuda de un programa por computador, permitiendo que la visualización de distribuciones de campo se efectúa de forma cómoda.
- El MEF permite reducir el número de prototipos y el número de ensayos experimentales requeridos, debido a que se diseñan prototipos optimizados.
- El MEF permite mejorar en la calidad y robustez de los diseños.
- El MEF permite reducir los riesgos de fallo en nuevos diseños y en los existentes erradicarlos.
- El MEF y las técnicas de simulación en general permite ser más ágiles y anticiparse en el lanzamiento de nuevos productos al mercado.

3.6.2 Desventajas

- La principal limitación de este método radica en que la precisión de los resultados depende de la densidad de elementos utilizados.

- Hay que realizar un enmallado suficientemente fino para obtener resultados confiables.
- Se pueden producir grandes errores en el modelamiento debido al uso de opciones inadecuadas del programa, o las condiciones de que uno este aplicando.
- Como los programas actuales de Elementos Finitos resuelven amplia gama de problemas, existe la tendencia de resolver problemas mecánicamente sin tomarse el trabajo de entender la física y matemática subyacentes en el problema.

CAPITULO 4

“MEDICIONES Y SIMULACIONES”

CAPITULO 4

“MEDICIONES Y SIMULACIONES”

Una vez analizados la parte teórica, ahora se procede a la parte practica del proyecto, en primer lugar se describen las características del equipo, parámetros de modificación e implementos que se utilizaron para las mediciones de campo, posteriormente se analizan los aspectos considerados para las simulaciones y parámetros del software, para los casos de análisis y estudio.

4.1 MEDICIONES:

Para las mediciones se ha escogido puntos estratégicos de la ciudad, de tal manera que estos puedan cubrir la mayor área de densidad poblacional de la ciudad de Cuenca.

4.1.1 Características del equipo de medición

El equipo utilizado durante las mediciones fue el SRM-3000 de la marca Narda, que puede realizar mediciones en el rango de frecuencia de 100 kHz a 3 GHz, dependiendo de los implementos externos que se adapten, en este caso se hace referencia a la antenas utilizadas, ya que estas determinan el rango a medir, la antena utilizada mide desde los 75Mhz hasta los 3Ghz.

Entre las características más destacables de este equipo podemos anotar, las medidas selectivas de la intensidad de campo, permitiendo realizar evaluaciones de seguridad rápidas y fiables, es de manejo sencillo pues al conectar cables o antenas para los diferentes rangos de medición estos son detectados y entran en operación inmediatamente. Una de las cualidades a destacar y que es importante para la seguridad de el operario o persona que maneja el equipo es la elevada inmunidad frente a la radiación, lo que permite su empleo in situaciones extremas.

Al ser este un equipo de última tecnología con alta eficiencia y gran calidad de prestaciones es comprensible que los tiempos de barrido cortos y con

medidas rápidas, eficientes y precisas, además este instrumento de medición incluye medidas en banda ancha, integración en la banda de frecuencia, análisis espectral en onda larga a UHF y medidas selectivas de códigos como la demodulación de los canales pilotos.

Modos de funcionamiento

- Análisis espectral

Integración en la banda de frecuencia con las medidas obtenidas en banda ancha, con características como zoom en zonas donde se coloque las marcas y donde se necesite un mayor detalle de las señales obtenidas, un análisis de evaluación en los picos y fijación de umbrales introducidos por el usuario, así como la retención y grabado de imágenes con valores máximos.

- Evaluación de seguridad

En el mismo equipo se puede tabular los resultados del análisis espectral, la posibilidad de introducir tablas mediante software para análisis específicos de frecuencia, además se puede establecer cuadros comparativos con niveles de exposición de cada servicio

- Análisis temporal

Con este equipo se obtendrán medidas precisas de las señales, con antenas monoaxiales con un ancho de banda de resolución (RBW) comprendido entre 6.4 kHz y 6 MHz, los tiempos de análisis pueden variar desde 1 segundo hasta 30 minutos dependiendo del tipo de medición que se vaya a realizar para poder analizar posteriormente con el rango preestablecido con todo el tiempo necesario, con las graficas con función del tiempo podemos destacar los valores picos y los valores RMS con su respectivas gráficas, que se pueden ser grabadas y guardadas en la memoria interna del equipo para su posterior descarga en un computador para un análisis mas exhaustivo.

4.1.2 Técnica aplicada para la medición

La técnica de medición empleada fue la de campo, bajo el soporte técnico del Tecnólogo Jhon Arcentales y con apoyo logístico de la SUPERTEL.

Una vez que descrito el equipo y con el apoyo logístico necesario, se realizó un plan de trabajo para determinas los lugares en los cuales se iba a realizar las mediciones de tal manera que se cubriera la ciudad de Cuenca, así como sus lugares más densamente poblados, y de los cuales este dirigida la mayor radiación de las estaciones de radio y televisión.

Los puntos escogidos para las mediciones fueron:

Dirección	Referencia	Latitud	Longitud
Luis Cordero y Heroes de Verdeloma	Edificio de la Supertel	2 ⁰ 53'21.29'' S	79 ⁰ 00'08,03'' O
	Parque Industrial	2 ⁰ 52'40.20'' S	78 ⁰ 58'58,96'' O
Av. 24 de mayo	Hospital del Seguro	2 ⁰ 53'51.57'' S	78 ⁰ 58'10,92'' O
	Cerro Icto Cruz	2 ⁰ 55'48.73'' S	78 ⁰ 59'47,98'' O
Panamericana Sur	Control Sur	2 ⁰ 55'27.55'' S	79 ⁰ 02'16,52'' O
Av. de las Americas	Sector Feria Libre	2 ⁰ 53'56.12'' S	79 ⁰ 01'30,80'' O
Av. Solano (Frente al colegio Benigno Malo)	Puente del Centenario	2 ⁰ 54'12.82'' S	79 ⁰ 00'24,31'' O

Tabla 4.1: Puntos de mediciones

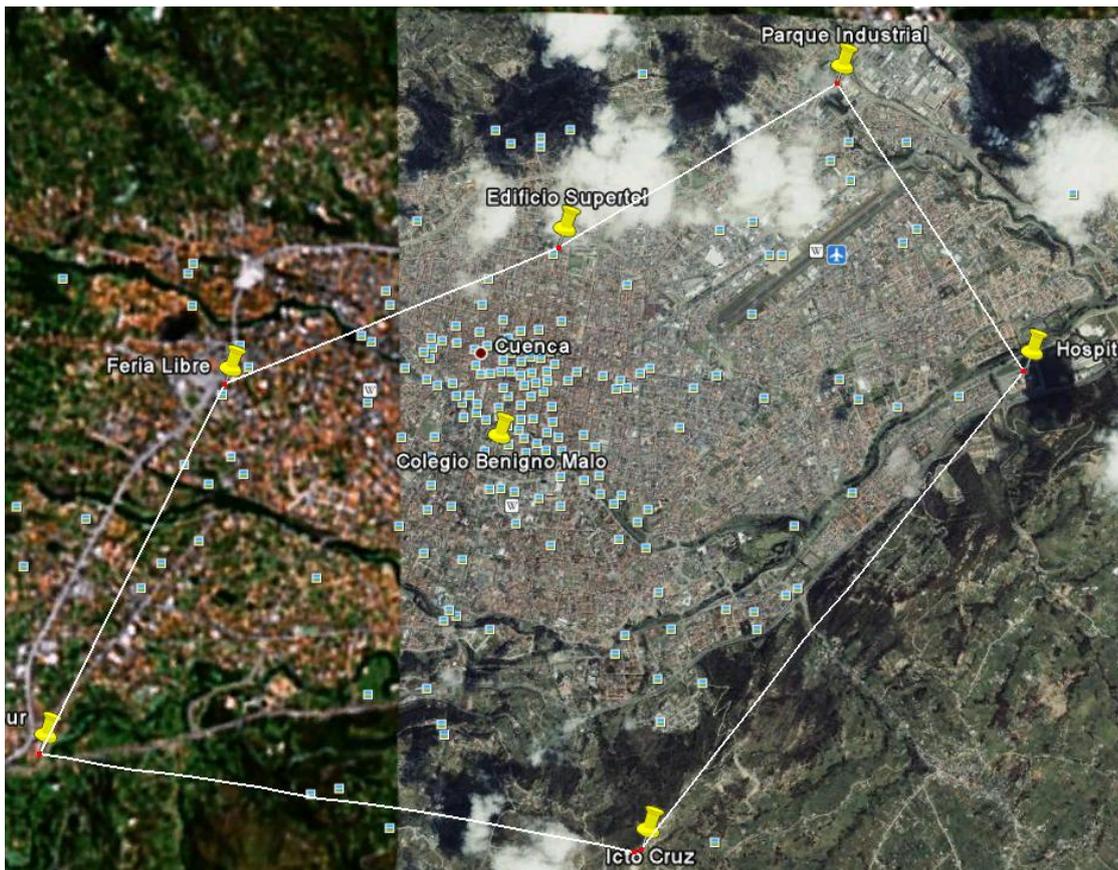


Figura 4.1: Puntos localizados desde Google Earth

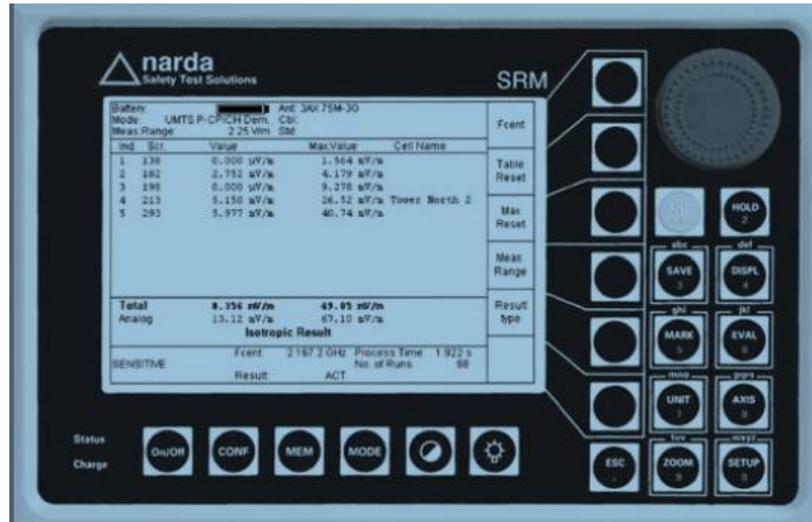
4.1.3 Fotos de las mediciones



Fotografía 4.1: Equipo Narda SRM 3000



Fotografía 4.2: Datos tomados con el GPS



Pantalla del equipo

The image shows a close-up of the screen displaying a table of power density measurements:

Service	Value
88.5	18.38 mW/m^2
88.9	11.37 mW/m^2
89.3	1.860 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
89.7	1000.0 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
90.1	2.008 mW/m^2
90.5	623.4 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
90.9	1.695 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
91.3	855.7 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
91.7	1.651 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
92.1	7.706 mW/m^2
92.5	493.1 $\mu\text{W}/\text{m}^2$

Additional text on the screen includes: Battery, Mode, Safety Evaluation, Meas. Range: 16 mW/m^2 , Std., and Ant: 3AX75M-3B.

Fotografía 4.4: Datos en el equipo NARDA para densidad de Potencia en frecuencias FM.

The image shows a close-up of the screen displaying electric field strength measurements:

Value
64.17 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$
90.64 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$
72.18 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$
88.77 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$
88.90 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$
80.17 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$
78.09 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$
75.56 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$
71.51 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$
73.50 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$
67.58 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$

Additional text on the screen includes: Result, 100.38 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$, 88.300 MHz, and buttons: OFF, CONF, MEM, MODE.

Fotografía 4.5: Medidas de Campo Eléctrico

4.2 SIMULACIONES

Para realizar las simulaciones planteadas se realizó un análisis de software que se podrían utilizar para dicho fin, y con características necesarias, con licencia gratuita y no tener inconvenientes posteriores.

4.2.1 Introducción al Software

Es así, que se decidió trabajar con el software llamado Radio Mobile, que es un programa de simulación de radiopropagación gratuito desarrollado por Roger Coudé, para predecir y realizar una aproximación lo más cercana posible a la realidad del comportamiento de sistemas radio, simular radioenlaces y representar el área de cobertura de una red de radiocomunicaciones, entre otras funciones.

La página oficial del software es <http://www.cplus.org/rmw/download.html>., donde puede descargar el software y el instructivo para su instalación.

El software trabaja en el rango de frecuencias entre 20 MHz y 20 GHz y está basado en el modelo de propagación ITM (Irregular Terrain Model) o modelo Longley-Rice.

Radio Mobile utiliza datos de elevación del terreno que se descargan gratuitamente de Internet para crear mapas virtuales del área de interés, vistas estereoscópicas, vistas en 3-D y animaciones de vuelo.

Los datos de elevación se pueden obtener de diversas fuentes, entre ellas del proyecto de la NASA *Shuttle Terrain Radar Mapping Misión* (SRTM) que provee datos de altitud con una precisión de 3 segundos de arco (100m).

4.2.2 Datos y Simulación

Por software se carga los datos de frecuencia donde se va a tomar los datos en radio y televisión. Para las simulaciones el software nos pide diferentes campos y parámetros que vamos a ir desarrollando y explicando a medida estos sean necesarios, y de donde los obtenemos para que las simulaciones sean lo más reales posibles a la realidad.

Una vez instalado el software se procede a la inicialización del mismo, en primer lugar aparece una pantalla con los datos del programa, de la versión y los datos del autor, vale destacar que Radio mobile esta disponible en diferentes idiomas como Español, inglés, francés, alemán, entre otros.

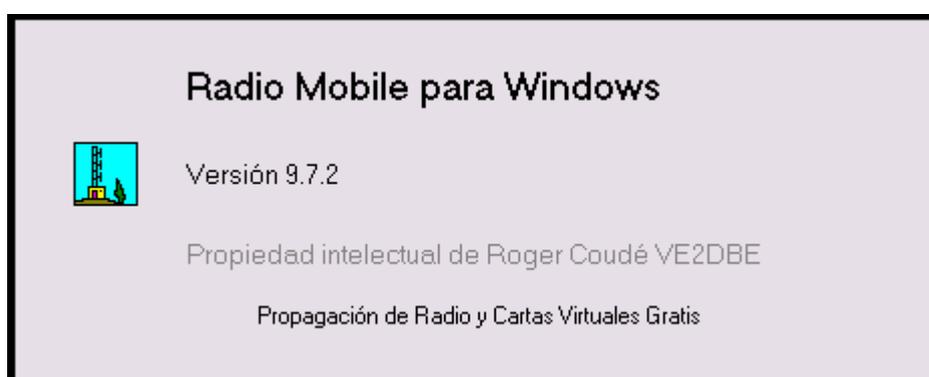


Figura 4.2: Ventana de presentación del Radio Mobile

Una vez con los mapas necesarios del área a trabajar es necesario ubicarse específicamente en la zona de trabajo, para ello se introduce las dimensiones del mapa: resolución en la pantalla en número de píxeles y longitud de la zona en Km, entre otros datos.

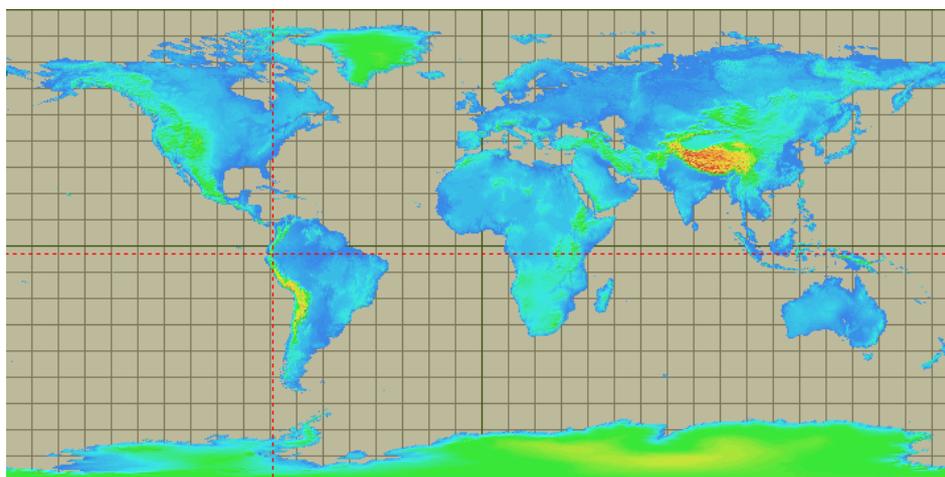


Figura 4.3: Vista del punto de trabajo en el Mapa Mundial

En la figura 4.3 se observa en un mapa mundial, el cruce existente de las coordenadas introducidas, que es la zona donde se va a realizar las simulaciones, en este caso es la ciudad de Cuenca.

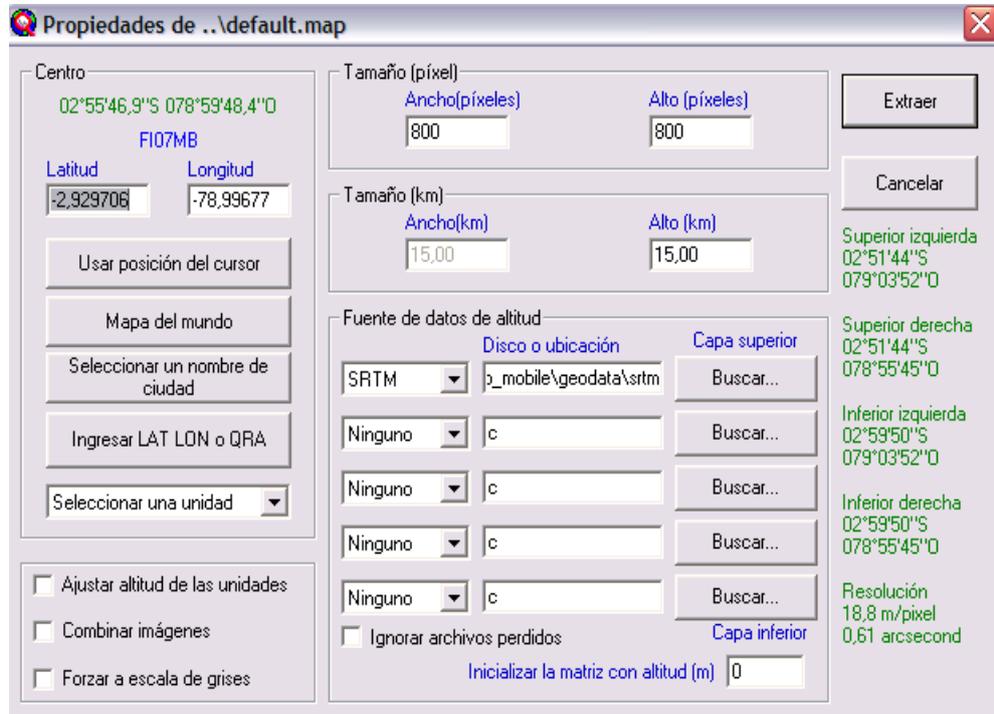


Figura 4.4: Datos para ubicar en el mapa el área de trabajo

En esta ventana se especifica las coordenadas tanto en longitud y latitud del centro del área de trabajo, a partir de ello proporcionamos tanto el ancho y alto de mapa así como el número de píxeles a observar. Así en la parte izquierda se observa los datos de ubicación de la carta.

Por las coordenadas tomadas con GPS ubicamos los puntos en la cartografía y etiquetamos los nombres.

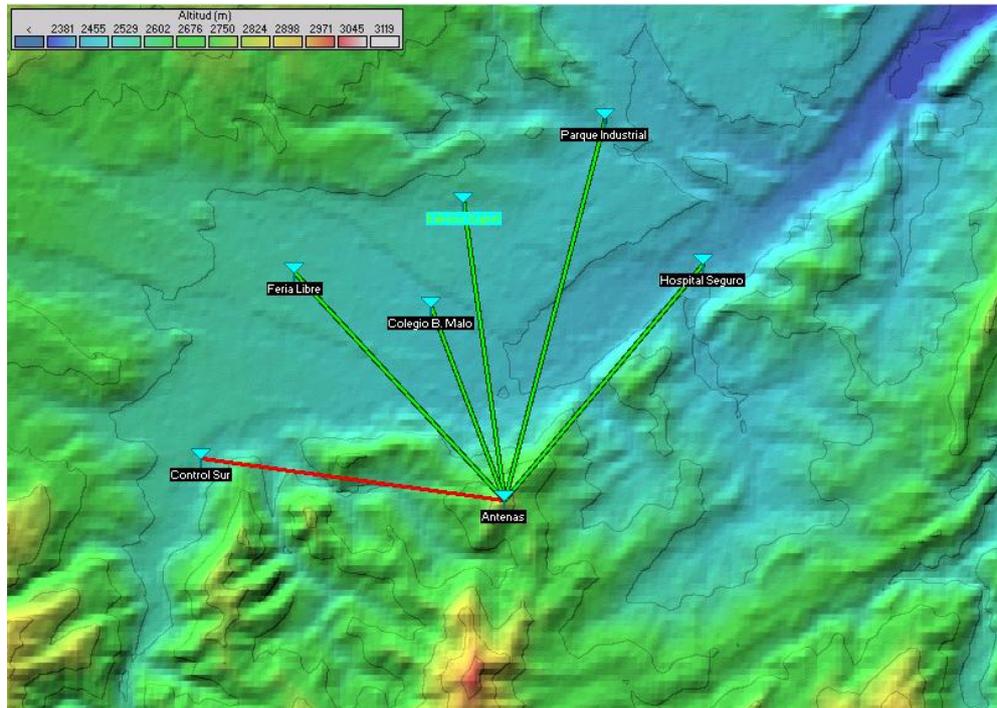


Figura 4.5: Ubicación de los puntos donde vamos a tomar las medidas

A continuación se procede al armado de la red, donde el software nos pide diferentes parámetros como características del equipo, tipo de terreno, difusión, etc. Para ello recurrimos a la siguiente ventana “Propiedades de las redes”.

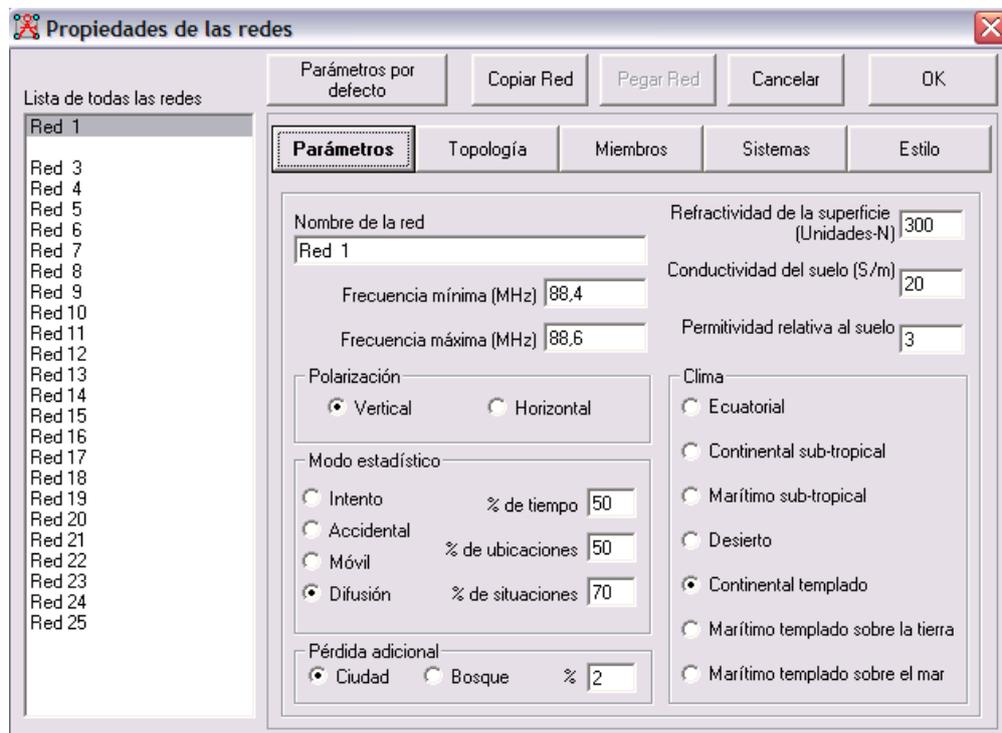


Figura4.6: Ventana de Propiedades de las redes (Parámetros)

En el gráfico 4.6, se edita cada uno de los parámetros de la red a estudiar, como es la frecuencia como ejemplo se utiliza la frecuencia de radio “Activa FM 88” que es la primera estación que tenemos en el dial de FM, el permiso de operación indica una frecuencia de 88,5 Mhz, y el Radio Mobile pide el ingreso de una frecuencia mínima y máxima, asumiendo una distribución equitativa se ingresa 88,4Mhz como frecuencia baja y 88,6 como la alta, luego la polarización de la antena, es un dato que se ha proporcionado de acuerdo a los permisos de funcionamiento, las opciones está entre vertical y horizontal, para el caso de polarización circular, es coherente aplicar uno de las 2 opciones que nos garantice mejor resultado. En la ventana de modo estadístico, al simular broadcast la opción correcta será la difusión. En perdidas adicionales la opción seleccionada es ciudad, porque es donde el estudio se realizara, seleccionando un valor porcentual de perdida.

En la opción ”Refractividad de la superficie (unidades/N)” es la refractividad de la superficie terrestre en función de la refractividad a nivel del mar y de la altitud media del terreno. El valor por defecto (300) se considera adecuado en casi todos los casos.

En “Conductividad del suelo” y “Permitividad relativa al suelo” depende de conductividad y permitividad del terreno, expresada en Siemens por metro en el primer caso. Estos depende del tipo de terreno y de la frecuencia de trabajo, y los valores se toman de la tabla de las recomendaciones de la UIT-R P.527-3.

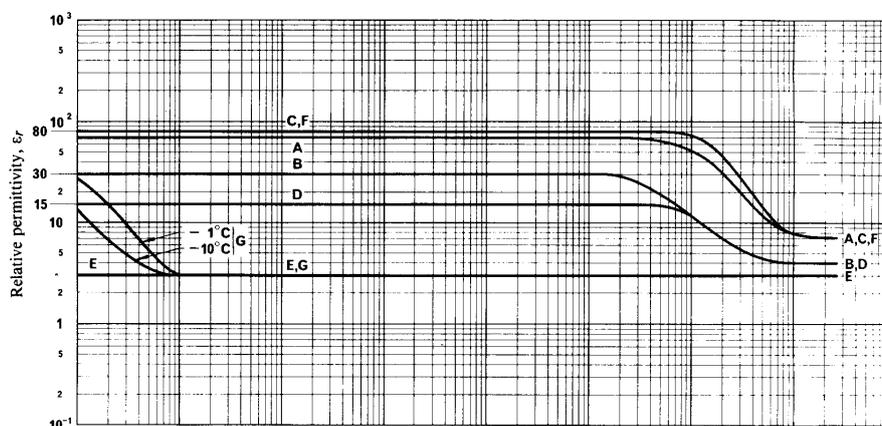


Tabla 4.2: Valores de permitividad relativa

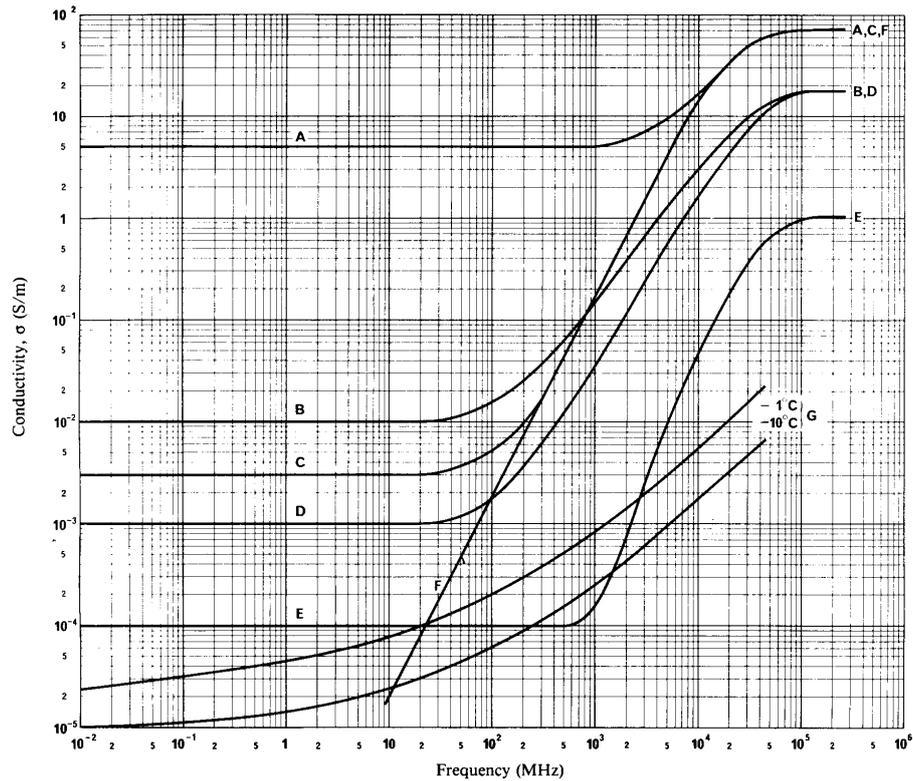


Tabla 4.3: Valores de Conductividad

Siendo las curvas:

- A: Agua salina (salinidad media) 20°C
- B: Suelo húmedo
- C: Agua Dulce 20°C
- D: Suelo moderadamente seco
- E: Suelo muy seco
- F: Agua Pura 20°C
- G: Hielo (Agua dulce)

En clima, para el caso de nuestra ciudad elegiremos el clima “Continental templado” como el más adecuado, tras un análisis de las situaciones del area en estudio.

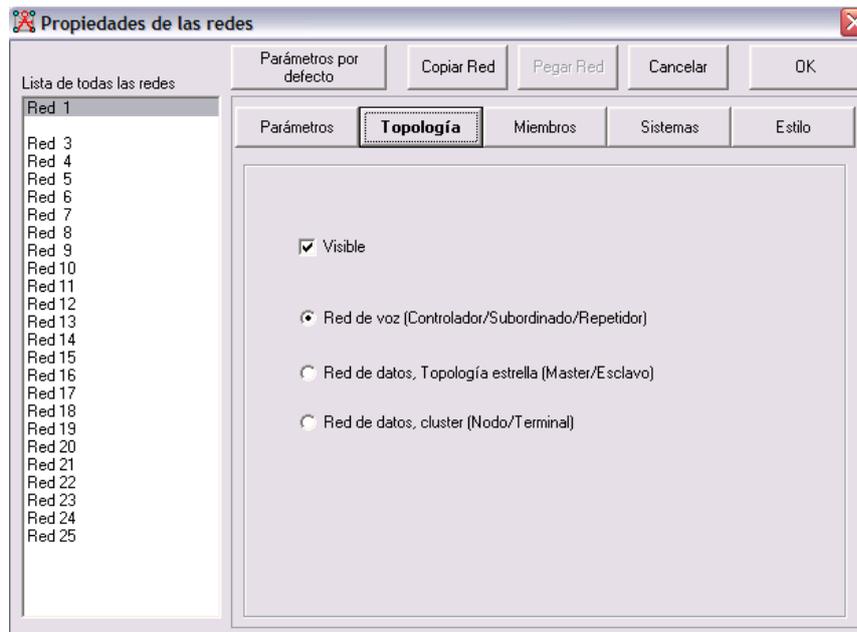


Figura 4.7: Ventana de Propiedades de las redes (Topología)

En la ventana de topología (Figura 4.7), la red de Voz, es la que se utiliza en broadcast ya que existen elementos como el controlador que en el caso es las estaciones con sus bases y equipos de transmisión, subordinado que son los receptores como equipos y televisores, y en algunos casos repetidores, dependiendo de la distancia que se cubra con dicha señal.

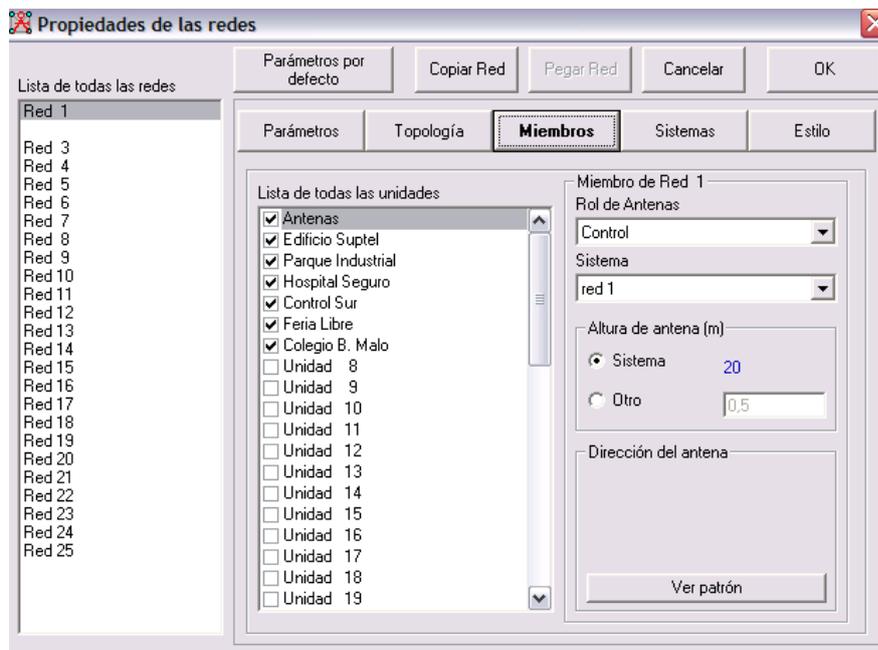


Figura4.8: Ventana de Propiedades de las redes (Miembros)

En la figura 4.8 (Miembros), se especifican los lugares de análisis, y el rol de las antenas que para el caso es de control, ya que es el lugar desde donde se enviarán las señales hacia los diferentes puntos de la ciudad y con sus nombres por áreas determinadas. Al escoger una antena igual el software solicita información sobre el azimut de la antena y el ángulo de elevación de la misma.

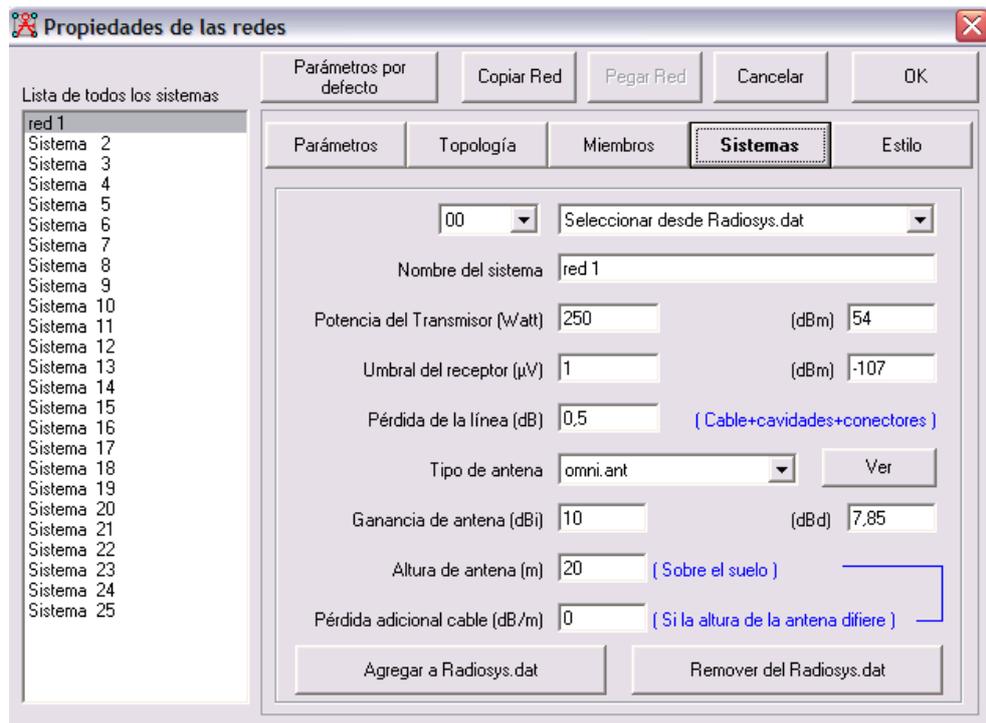


Figura 4.9: Ventana de Propiedades de las redes (sistemas)

En la opción de sistemas, se trabaja en diferentes ámbitos de los equipos de transmisión y recepción, y datos como la potencia del transmisor, umbral de recepción (esto para datos de gráficas), las pérdidas de la línea en dB, Ganancia de la antena, altura de la torre, (en promedio para los diferentes casos trabajaremos con 20 metros), perdidas del cable, que igual será considerado en cero, para efectos de este cálculo general.

En tipo de antenas, existen algunos patrones para elegir de acuerdo a la simulación que se proyecte, y apreciar los diferentes patrones, así como los cambios que estos tienen al variar su azimut, ganancia o elevación, por ello el software cuenta con estos tipos de antenas:

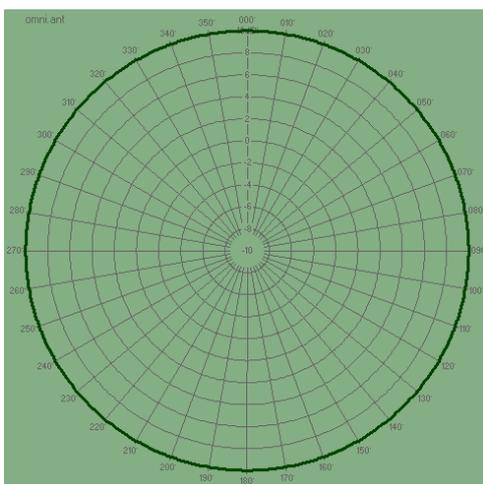


Figura 4.10: Radiación antena Omni

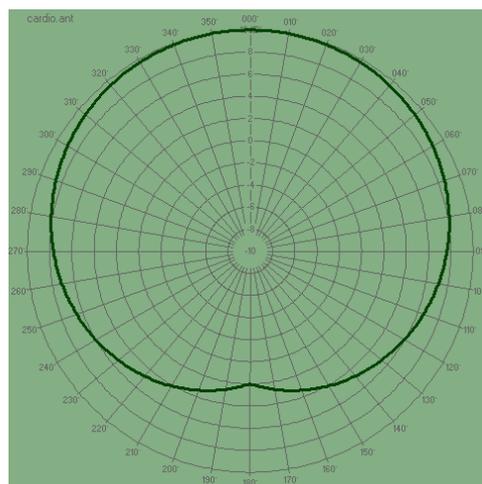


Figura 4.11: Radiación antena Cardio

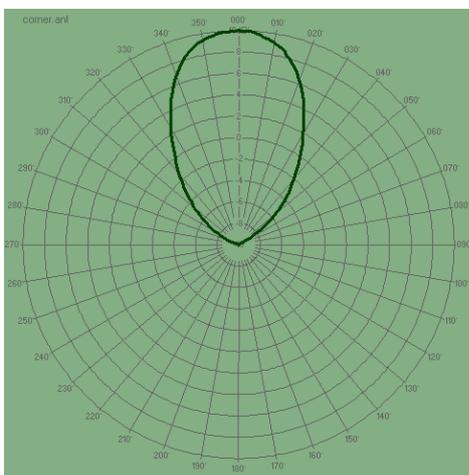


Figura 4.12: Radiación antena Corner

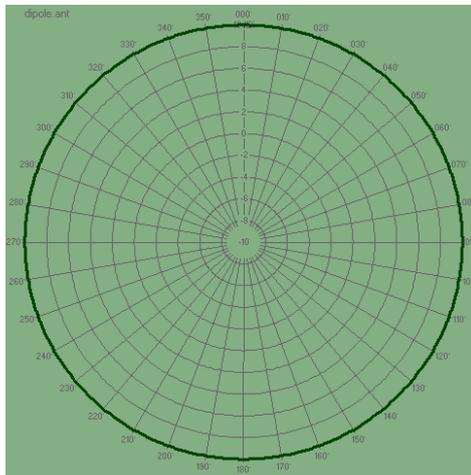


Figura 4.13: Radiación antena Dipolo

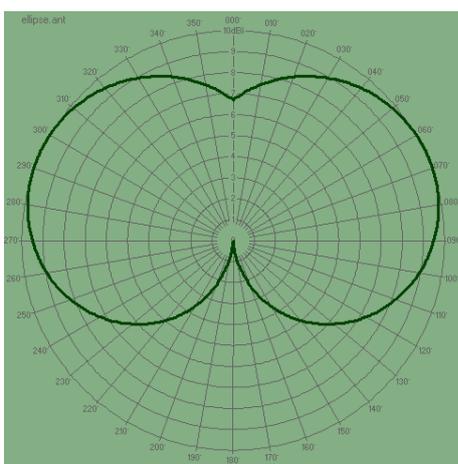


Figura 4.14: Radiación antena Elipse

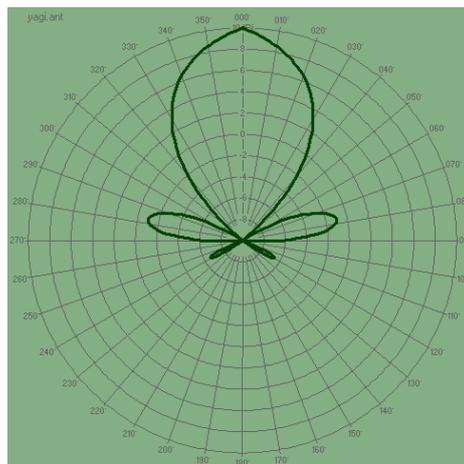


Figura 4.15: Radiación antena Yagi

El cambiar la ganancia de las antenas el tamaño de sus óvulos tanto primarios como secundarios tendrá un cambio de forma de radiación, alcance, etc. Vale destacar que por recomendaciones técnicas y al observar las antenas, en su gran mayoría en la ciudad de Cuenca, estas no están apuntando hacia el norte, pues por la ubicación del cerro y por la distribución geográfica poblacional, estas tiene un direccionamiento que va desde los 340° a 0°.

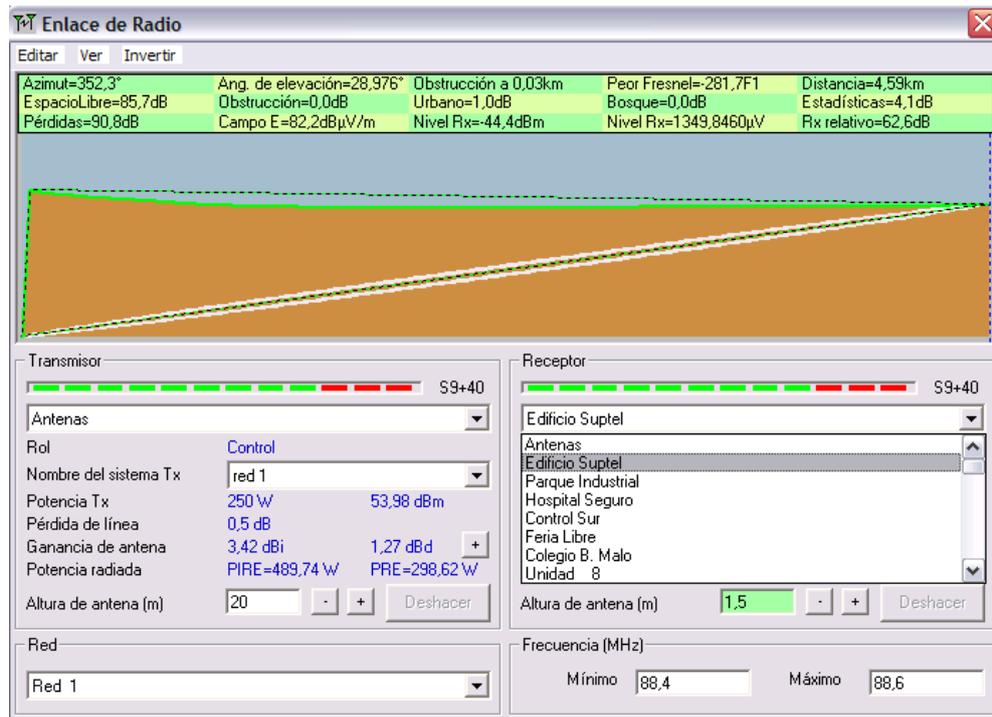


Figura 4.16: Ventana de Enlace de Radio

En la opción de enlace de radio se coloca el punto del transmisor, en este caso en particular “Antenas”, y para el Receptor seleccionar el punto medición, a parte el software muestra datos muy interesantes como el azimet, entre los puntos, ángulo de elevación Campo eléctrico, distancia del enlace, perdidas, el peor radio de Fresnel, entre otros datos muy interesantes a considerar.

Como datos necesarios para las simulaciones existe el tipo de arreglo que utiliza cada una de las estaciones de radio y televisión, para una aproximación más cercana a la realidad.

NOMBRE	FREC.	ANTENAS
ACTIVA FM 88	88,5	ARREGLO 4 RADIADORES
NACIONAL DEL ECUADOR-R.PUBLICA	88,9	
TROPICALIDA STEREO	89,7	ARREGLO 4 RADIADORES
W FM	90,1	ARREGLO 4 ELEMENTOS
ANTENA UNO FM	90,5	ARREGLO 4 RADIADORES
J.C. RADIO	91,3	ARREGLO 4 RADIADORES
GCG MAGGICA FM	92,1	ARREGLO 4 RADIADORES
K-1	92,5	ARREGLO 3 ELEMENTOS
GENESIS FM	93,3	4 ANTENAS YAGI 3 ELE
LA ROJA 93.7 FM	93,7	ARREGLO 4 DIPOLOS
QUITUMBE FM	94,1	ARREGLO 4 RADIADORES
SUPER 94.9 FM	94,9	ARREGLO 3 ANILLOS
WQ-DOS	95,7	ARREGLO 4 RADIADORES
LA VOZ DEL PAIS	96,1	ARREGLO 4 RADIADORES
MAS CANDELA	96,5	ARREGLO 4 RADIADORES
FAMILIA FM	96,9	ARREGLO 4 RADIADORES
COSMOS FM STEREO	97,3	ARREGLO 4 RADIADORES
NEXO FM	97,7	ARREGLO 4 RADIADORES
CATOLICA NACIONAL FM	98,1	ARREGLO RADIANTE
EMISORA GRUPO RADIAL DELGADO	98,5	ARREGLO 4 ANTENAS
COLON FM	98,9	ARREGLO 4 RADIADORES
LA VOZ DEL PUEBLO	99,3	SISTEMA RADIANTE DIR
COMPLICE FM	99,7	ARREGLO 5 RADIADORES
EXCELENCIA RADIO	100,1	ARREGLO 4 RADIADORES
JOYA STEREO	100,5	ARREGLO LINEAL 4 RAD
DISNEY	100,9	ARREGLO 4 RADIADORES
RADIO MARIA	101,3	ARREGLO 6 DIPOLOS
LA VOZ DE TOMBAMBA	102,1	ARREGLO 6 DIPOLOS
MATOVILLE FM	102,5	ARREGLO 4 RADIADORES
GALAXIA STEREO	102,9	ARREGLO 4 ANTENAS
MEGA 103.3 FM	103,3	ARREGLO 4 RADIADORES
C.R.E.SATELITAL	104,1	ARREGLO 4 RADIADORES
ALFA STEREO	104,5	ARREGLO LINEAL 4 RAD
FRANCIA-ECUADOR	104,9	ARREGLO 4 RADIADORES
CAYAMA	105,3	ARREGLO 4 RADIADORES
SONORAMA STEREO	105,7	ARREGLO 4 RADIADORES
VISION FM	106,1	ARREGLO 4 RADIADORES
METRO STEREO	106,5	ARREGLO 4 RADIADORES
PLANETA 107.3	107,3	ARREGLO 4 RADIADORE
PLATINUM	107,7	ARREGLO 4 RADIADORES

Tabla 4.4: Tipo de arreglo de antenas para radio en Cuenca

	NOMBRE	CANAL	ANTENAS
TELEVISIÓN	TELECUENCA	2	ARREGLO 8 DIEDROS
TELEVISIÓN	TELERAMA	4	1 DIEDRO
TELEVISIÓN	CORPORACION ECUATORIANA DE TV	5	6 PANELES VHF
TELEVISIÓN	CADENA ECUAT.DE T.V.	7	ARREGLO 4 DIEDROS
TELEVISIÓN	TELEVISION DEL PACIFICO	9	ARREGLO 4 DIEDROS
TELEVISIÓN	TELEAMAZONAS	11	2 DIEDROS
TELEVISIÓN	RED TELESISTEMA (R.T.S)	13	ARREGLO 4 DIEDROS
TELEVISIÓN	CANAL UNO	21	ARREGLO 4 PANELES
TELEVISIÓN	AMERICAVISION	23	ARREGLO 4 PANELES
TELEVISIÓN	UNSION TV	25	DIRECTIVO 9 PANELES
TELEVISIÓN	CAPITAL TV	27	ARREGLO 4 PANELES
TELEVISIÓN	TELEATAHUALPA (RTU)	29	ARREGLO 4 PANELES
TELEVISIÓN	TV AUSTRAL	31	SISTEMA 4 PANELES
TELEVISIÓN	TROPICAL TV	33	2 ARREGLOS 2 PANELES
TELEVISIÓN	TELEDUC TV	35	ARREGLO 4 PANELES
TELEVISIÓN	ECUADOR TV (A.TEMPORAL)	48	ARREGLO 8 PANELES

Tabla 4.5: Tipo de arreglo de antenas para televisión en Cuenca

CAPITULO 5

“ANÁLISIS DE RESULTADOS”

CAPITULO 5

“ANÁLISIS DE RESULTADOS”

En este capítulo, haremos referencia a las medidas tomadas en los diferentes lugares que ya hemos anotado en capítulos anteriores y de los resultados obtenidos en las simulaciones en el “Radio mobile”, para posteriormente hacer una comparación de los resultados entre ellos, y con los valores máximos permitidos ya anotados en el capítulo 2, para poder determinar la precisión de los mismo, y poder determinar la efectividad y certeza que se pueden acreditar a los mismo.

5.1 CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO MEDIDO

Las mediciones se realizaron con el Equipo SRM-3000 de la marca Narda, en los siete lugares ya mostrados en graficas. Con dicho equipo se procedió a tomar mediciones en unidades como dB μ V/m para el campo eléctrico y W/m² para la densidad de potencia, las mismas que presentamos en las siguientes tablas:

FRECUENCIA	Edificio	Supertel	Parque	Industrial	Hospital	Seguro
(Mhz)	dB μ V/m	W/m ²	dB μ V/m	W/m ²	dB μ V/m	W/m ²
88,5	89,48	22,168 μ	89,87	2,249 μ	82,82	540,1 n
88,9	105	77,69 μ	96,43	958 n	89,86	3,54 μ
89,7	100,83	32,18 μ	89,20	1,97 μ	87,36	1,084 μ
90,1	99,65	22,79 μ	91,63	3,7 μ	86,74	206,4 n
90,5	97,33	14,81 μ	77,09	150,8 n	78,91	86,97 n
91,3	94,95	8,282 μ	77,30	118,4 n	74,98	49,47 n
92,1	95,10	7,779 μ	89,56	2,3 μ	72,79	50,46 n
92,5	98,83	17,75 μ	91,91	4,14 μ	86,30	1,071 μ
93,3	100,46	28,92 μ	85,12	485 n	82,77	569,2 n
93,7	99,04	19,03 μ	91,67	3,80 μ	84,24	658,6 n
94,1	103,24	54,34 μ	92,67	4,20 μ	83,81	547,8 n
94,9	98,98	20,97 μ	87,99	1,88 μ	81,91	526,5 n

95,7	101,20	31,91 μ	86,64	1,284 μ	83,48	505,2 n
96,1	99,31	19,51 μ	91,28	3,428 μ	80,50	206,2 n
96,5	99,67	25,68 μ	83,13	607,8 n	79,07	229,9 n
96,9	94,65	7,652 μ	87,48	1,716 μ	76,20	111,8 n
97,3	96,33	10,27 μ	88,63	1,923 μ	83,38	540,1 n
97,7	97,85	14,55 μ	87,10	1,242 μ	79,27	247,8 n
98,1	98,88	19,97 μ	89,92	2,740 μ	83,57	667,8 n
98,5	88,62	1,965 μ	87,36	1,357 μ	79,24	210,9 n
98,9	91,71	4,054 μ	82,30	430,2 n	74,25	68,50 n
99,3	99,41	22,46 μ	85,05	771,2 n	79,62	251,1 n
99,7	98,37	18,50 μ	90,39	2,782 μ	82,78	482,4 n
100,1	101,11	34,30 μ	85,61	987,5 n	86,70	1,324 μ
100,5	96,21	11,05 μ	91,18	3,633 μ	86,97	1,356 μ
100,9	81,96	429,26 n	73,19	56,19 n	70,95	33,54 n
101,3	90,87	3,316 μ	84,02	719,2 n	74,63	79,40 n
102,1	96,92	13,10 μ	88,1	1,684 μ	78,89	183,8 n
102,5	86,74	1,320 μ	84,65	704,9 n	74,35	69,91 n
102,9	97,89	16,59 μ	89,60	803,8 n	83,03	501,2 n
103,3	96,30	11,18 μ	83,31	531,5 n	78,90	207 n
104,1	97,82	16,44 μ	87,47	1,413 μ	76,13	104,3 n
104,5	100,63	3,30 μ	89,40	2,235 μ	80,40	282,9 n
104,9	94,32	7,177 μ	87,05	1,375 μ	78,64	195,5 n
105,3	77,64	150,1 n	77,79	162,9 n	73,23	59,30 n
105,7	95,84	10,25 μ	80,15	277,8 n	75,30	89,50 n
106,1	100,54	30,15 μ	89,66	2,510 μ	87,91	1,704 μ
106,5	100,16	27,72 μ	90,38	2,925 μ	84,60	766,5 n
107,3	93,79	6,332 μ	81,27	360,3 n	80,58	305,4 n
107,7	100,69	31,11 μ	83,75	633,5 n	73,03	53,30 n

Tabla 5.1: Medidas en el Edificio de la Supertel, Parque Industrial y Hospital del Seguro de FM.

Canal	FRECUENCIA (Mhz)	Edificio Supertel		Parque Industrial		Hospital Seguro	
		dB μ V/m	W/m ²	dB μ V/m	W/m ²	dB μ V/m	W/m ²
2	55,25	70,5		6,7		-2,5	
4	67,25	80,5		104,5		80,2	
5	77,25	86,07	1,276 μ	85,04	840 n	84,61	766 n
7	175,25	94,52	6,651 μ	91,27	4,450 μ	91,89	4,096 μ
9	187,25	82,57	499,2 n	81,32	397,2 n	81,83	399,9 n
11	199,25	95,60	14,32 μ	93,43	7,545 μ	95,07	7,372 μ
13	211,25	92,92	7,171 μ	85,07	1,135 μ	85,01	849,3 n

21	513,25	95,21	9,748 μ	90,32	3,165 μ	78,44	182,0 n
23	525,25	96,99	17,71 μ	99,80	18,49 μ	87,92	1,690 μ
25	537,25	100,13	22,03 μ	99,60	19,99 μ	88,26	1,700 μ
27	549,25	74,72	78,55 n	74,73	79,3 n	74,73	78,99 n
29	561,25	101,82	44,02 μ	99,84	27,16 μ	81,66	392,2 n
31	573,25	96,63	12,45 μ	86,10	1,065 μ	81,95	436,4 n
33	585,25	91,64	4,34 μ	86,47	1,144 μ	83,41	567,6 n
35	597,25	99,49	20,89 μ	99,55	23,75 μ	89,88	2,741 μ
40	627,25	70,07	67,61 n	74,08	68,45 n	74,07	67,65 n
48	675,25	105,60	62,22 μ	104,94	82,34 μ	99,3	21,64 μ

Tabla 5.2: Medidas en el Edificio de la Supertel, Parque Industrial y Hospital del Seguro para televisión.

FRECUENCIA (Mhz)	Cerro	Ictocruz	Control	Sur	Feria	Libre
	$\text{dB}\mu\text{V/m}$	W/m^2	$\text{dB}\mu\text{V/m}$	W/m^2	$\text{dB}\mu\text{V/m}$	W/m^2
88,5	125,97	13,30 m	78,55	191,1 n	110,24	279,8 μ
88,9	124,68	9,08 m	80,4	238,5 n	109,79	247,7 μ
89,7	111,05	526,5 μ	81,21	339,6 n	109,84	256,8 μ
90,1	118,78	2,142 m	79,42	253,3 n	110,15	276 μ
90,5	111,57	467,1 μ	75,48	99,18 n	109,64	244 μ
91,3	112,38	557,2 μ	74,72	81,53 n	109,19	216,2 μ
92,1	120,91	4,232 m	76,76	116,9 n	108,92	206,3 μ
92,5	108,37	257,3 μ	81,79	440,5 n	109,36	230,8 μ
93,3	121,02	4,442 m	74,48	76,92 n	109,89	255,6 μ
93,7	108,3	268,2 μ	80,72	321,5 n	109,33	226,8 μ
94,1	100,21	36,12 μ	78,18	204 n	110	264,3 μ
94,9	99,15	35,61 μ	75,07	82,29 n	109,33	228,6 μ
95,7	122,61	5,61 m	80,65	308,5 n	109	210,4 μ
96,1	99,72	27,03 μ	73,01	57,35 n	109,35	197,3 μ
96,5	122,64	4,971 m	72,83	50,74 n	108,68	211,2 μ
96,9	119,68	2,881 m	76,10	113,6 n	109,06	194,1 μ
97,3	111,21	425,5 μ	75,74	108,3 n	108,68	237,1 μ
97,7	90	3,322 μ	73,51	61,48 n	109,57	215,1 μ
98,1	119,15	2,34 m	77,02	140,5 n	109,04	242,4 μ
98,5	108,29	244,1 μ	73,73	65,14 n	109,64	225,9 μ
98,9	107,57	231,3 μ	71,5	38,05 n	109,29	234,8 μ
99,3	110,21	303,2 μ	74,61	76,17 n	109,48	208,4 μ
99,7	126,86	4,002m	76,09	103,5 n	108,95	223,5 μ
100,1	120,84	3,692 m	78,01	161,4 n	109,21	211,7 μ
100,5	114,14	745,4 μ	79,02	183,7 n	109	180,8 μ
100,9	113,41	677,24 μ	70,32	28,79 n	108,37	200 μ

101,3	117,55	1,672 m	73,2	54,12 n	108,79	223,7 μ
102,1	103,69	86,79 μ	75,20	88,70 n	109,24	202,8 μ
102,5	74,32	118,2 n	70,92	33,11 n	108,82	228,1 μ
102,9	114,38	808,7 μ	76,61	120,2 n	109,33	203,8 μ
103,3	107,06	153,9 μ	72,15	36,21 n	108,91	210,1 μ
104,1	115,58	1,34 m	73,51	61,60 n	108,99	219,5 μ
104,5	117,77	1,688 m	75,31	91,79 n	109,23	190,2 μ
104,9	112,71	501,2 μ	77,31	149,8 n	108,58	204,5 μ
105,3	82,44	97,38 n	81,23	336,8 n	108,85	178,3 μ
105,7	123,92	6,507 m	71,03	33,27 n	108,24	193,8 μ
106,1	111,5	934,1 μ	76,73	124,3 n	108,67	205,6 μ
106,5	117,11	1,442 m	75,36	90,82 n	108,94	207,21 μ
107,3	129,61	24,24 m	74,94	82,88 n	109,10	217 μ
107,7	111,88	426,3 μ	73,15	54,84 n	108,76	199,1 μ

Tabla 5.3: Medidas en el Cerro Itocruz, Control Sur y Feria libre para de FM.

CANAL	Cerro	Itocruz	Control	Sur	Feria	Libre
	dB μ V/m	W/m ²	dB μ V/m	W/m ²	dB μ V/m	W/m ²
2	69,02		78		64,5	
4	109,2		62		76,6	
5	122,39	4,605 m	122,4	4,625 m	122,50	4,58 m
7	119,70	2,46 m	118,01	1,679 m	118	1,68 m
9	117,77	1,616 m	117,55	1,511 m	117,61	1,52 m
11	117,17	1,386 m	117,12	1,370 m	117,28	1,40 m
13	116,89	1,266 m	116,59	1,210 m	116,67	1,25 m
21	119,17	2,172 m	113,3	545 μ	113,60	570,6 μ
23	115,96	1,019 m	112,97	524 μ	113	531,9 μ
25	116,39	1,930 m	112,75	495,5 μ	112,70	497,1 μ
27	112,60	482,3 μ	112,65	434,5 μ	112,63	466,8 μ
29	112,45	465,3 μ	112,41	462,2 μ	112,45	464,2
31	112,10	430,2 μ	112,10	427,6 μ	112,11	429,2 μ
33	112,27	454,9 μ	112,02	420,9 μ	112,04	426,1 μ
35	117,45	1,726 m	111,88	409,3 μ	111,97	418,4 μ
40	111,85	406 n	111,81	401,6 μ	111,84	405,5 μ
48	129	10,05 m	111,92	412,5 μ	111,97	418 μ

Tabla 5.4: Medidas en el Cerro Itocruz, Control Sur y Feria libre para de Televisión

FRECUENCIA (Mhz)	Puente	Centenario
	dB μ V/m	W/m ²
88,5	94,38	7,778 μ
88,9	101,23	33,11 μ
89,7	101,32	3,788 μ
90,1	96,59	12,85 μ
90,5	85,76	1,085 μ
91,3	89,34	2,571 μ
92,1	91,2	3,532 μ
92,5	97,43	14,17 μ
93,3	97,76	16,6 μ
93,7	97,06	13,67 μ
94,1	103,04	53,32 μ
94,9	96,16	11,48 μ
95,7	91,87	4,083 μ
96,1	96,56	11,86 μ
96,5	96,84	13,27 μ
96,9	89,04	2,07 μ
97,3	74,07	6,814 μ
97,7	96,52	11,85 μ
98,1	91,16	3,45 μ
98,5	93,21	5,39 μ
98,9	89,64	2,45 μ
99,3	95,91	10,32 μ
99,7	99,4	22,77 μ
100,1	100,44	28,7 μ
100,5	98,68	19,02 μ
100,9	78,89	202,8n
101,3	81,21	357,6n
102,1	95,41	9,24 μ
102,5	89,77	2,423 μ
102,9	97,73	15,63 μ
103,3	93,35	5,6 μ
104,1	92,2	4,396 μ
104,5	92,5	4,638 μ
104,9	93,24	5,56 μ
105,3	73,01	52,57n
105,7	96,98	13,12 μ
106,1	99,31	22,73 μ
106,5	94,51	7,538 μ

107,3	97,81	15,9 μ
107,7	98,67	19,54 μ

Tabla 5.5: Medidas en el Puente Centenario para de FM

Número de canal	$\text{dB}\mu\text{V/m}$	W/m^2
2	72,1	
4	110,2	
5	122,45	4,667 m
7	118,05	1,674 m
9	117,63	1,533 m
11	117,27	1,415 m
13	116,64	1,222 m
21	113,17	553,9 μ
23	113,01	530,5 μ
25	112,74	500,4 μ
27	112,59	481,5 μ
29	111,53	478,7 μ
31	112,16	435,9 μ
33	112,01	421,4 μ
35	111,93	416,5 μ
40	111,80	402 μ
48	112	436,8 μ

Tabla 5.6: Mediciones para televisión en el Puente del Centenario

5.1.1 Gráficas de los datos medidos

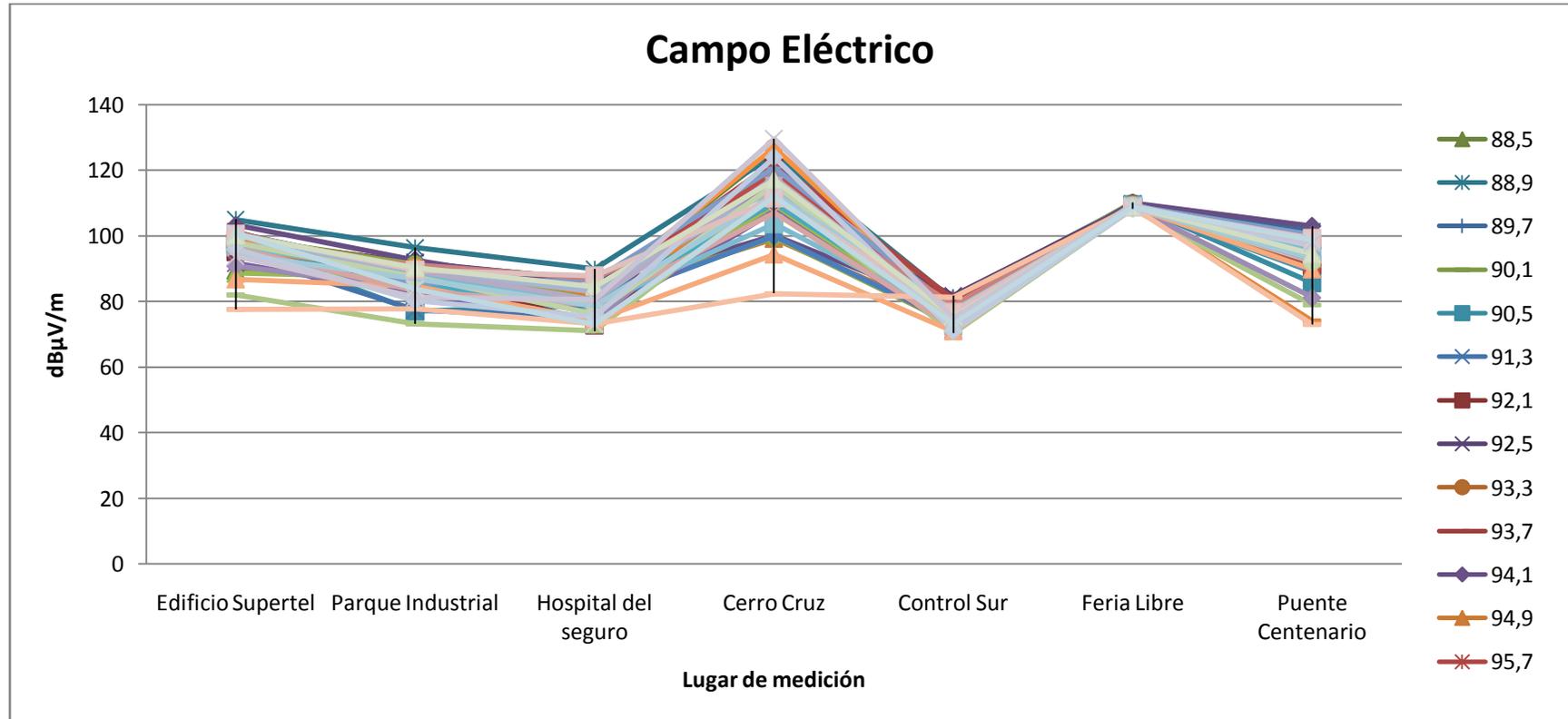


Gráfico: 5.1

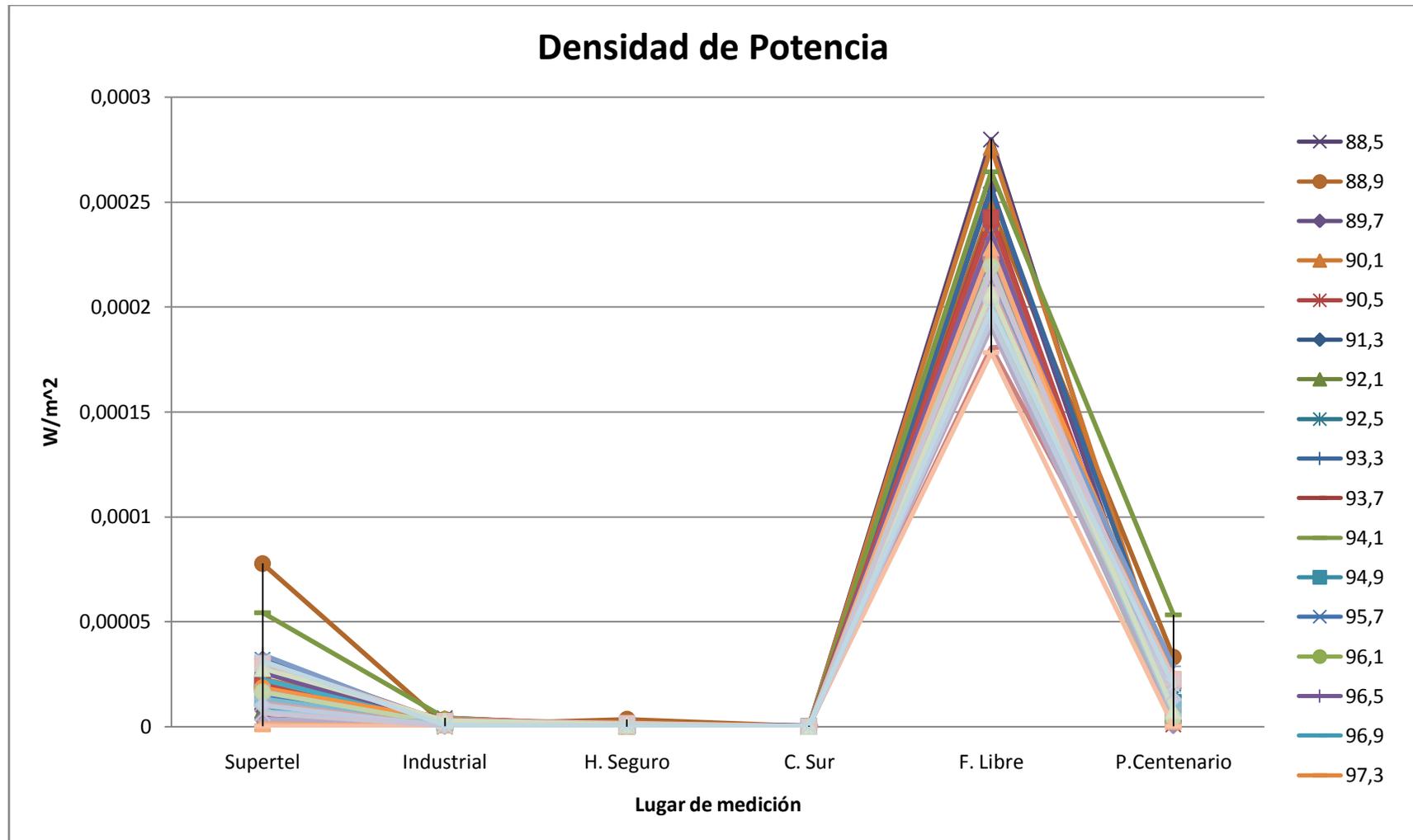


Gráfico: 5.2

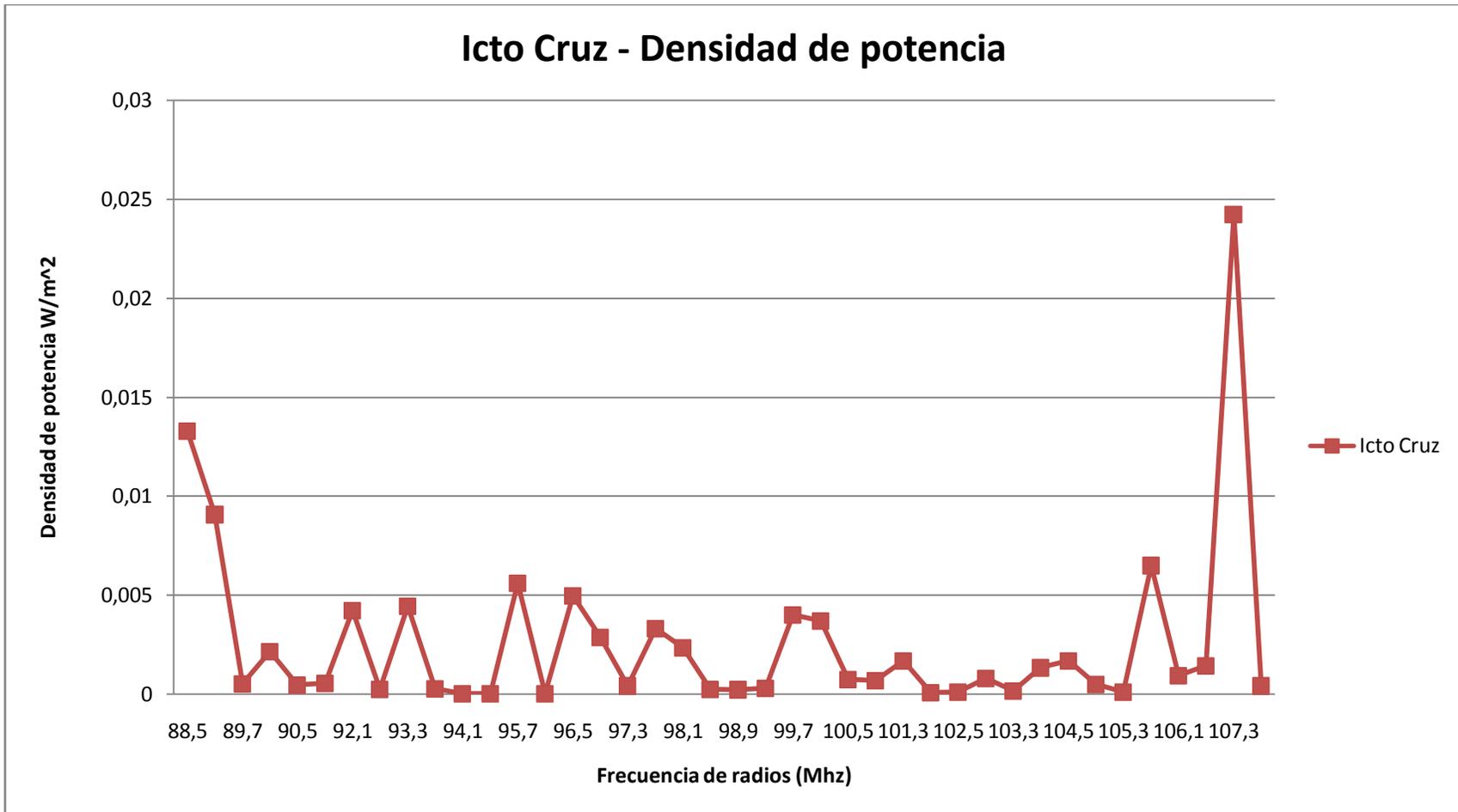


Gráfico 5.3

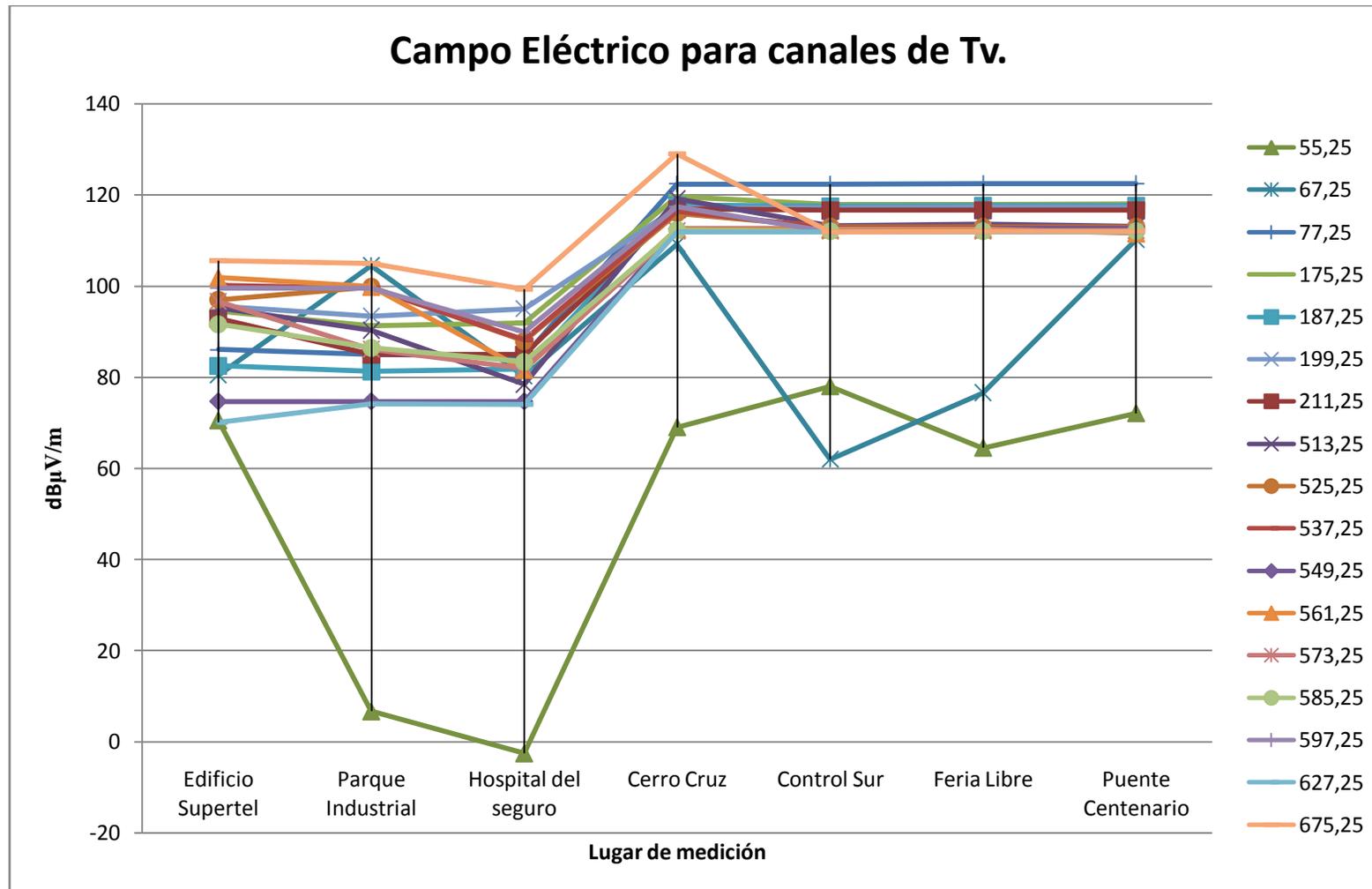


Gráfico 5.4

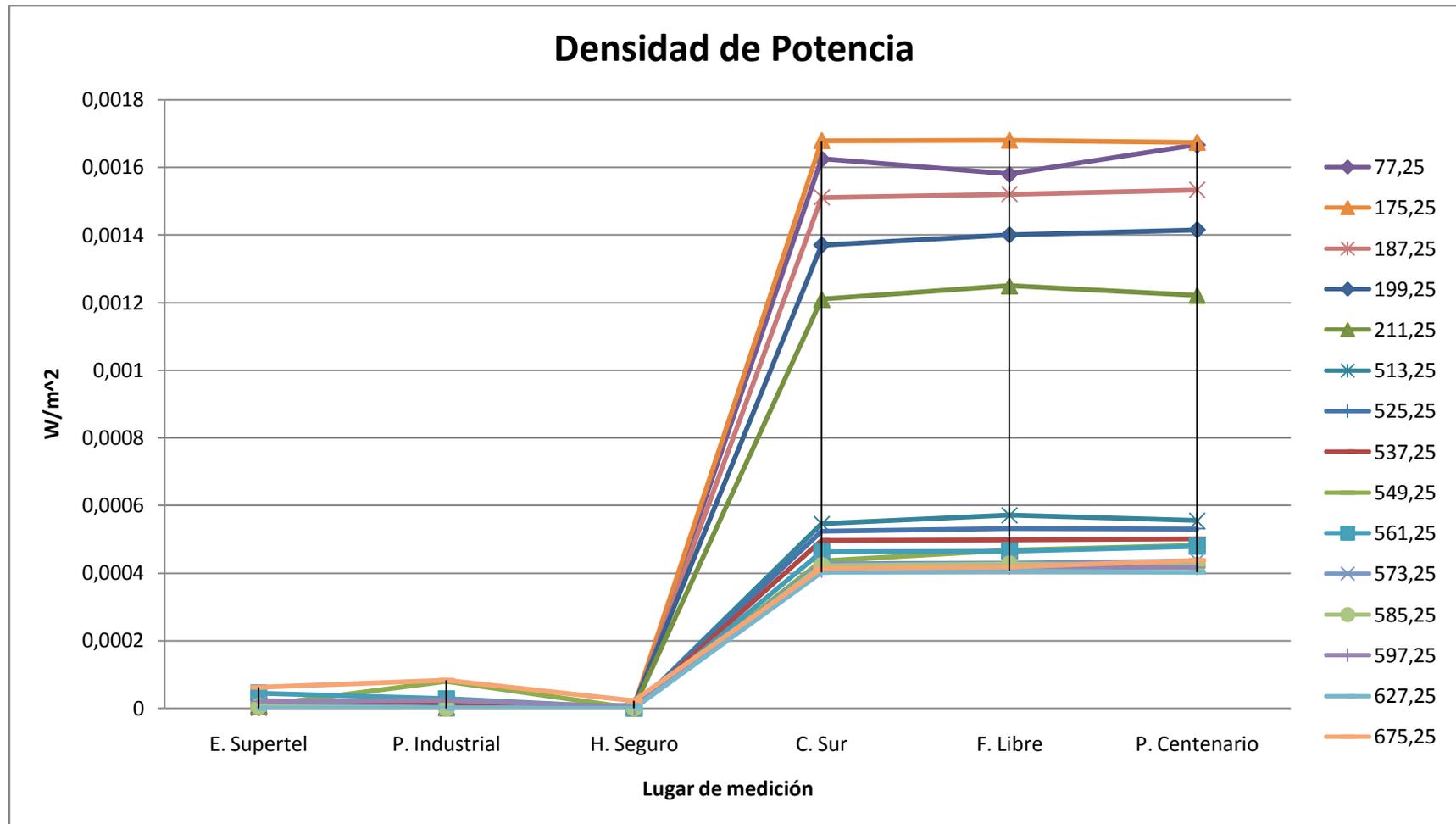


Gráfico: 5.5

5.2 CAMPO ELECTRICO Y MAGNETICO SIMULADOS

Con los datos variables del Radio Mobile explicado en el Capitulo anterior, se procede a simular algunas de las estaciones de radio y televisión con algunos cambios en los datos para ir comparando con los datos medidos.

Vamos a realizar una elección al azar de las estaciones de radio y televisión para las simulaciones, en el caso de las emisoras de FM tenemos un total de 40 estaciones legalmente registradas para operar en la Ciudad de Cuenca y sus alrededores, es así que tomaremos desde la primera a salto de 5 estaciones para simular en los 6 diferentes sitios, nuestra tabla quedaría constituida de la siguiente manera:

NOMBRE COMERCIAL	FRECUENCIA DE OPERACIÓN	MASTER O REPETIDOR	FRECUENCIA MINIMA	FRECUENCIA MAXIMA
ACTIVA FM 88	88,5	M	88,4 Mhz	88,6 Mhz
J.C. RADIO	91,3	R	91,2 Mhz	91,4 Mhz
QUITUMBE FM	94,1	M	94,0 Mhz	94,2 Mhz
FAMILIA FM	96,9	M	96,8 Mhz	97,0 Mhz
COLON FM	98,9	R	98,8 Mhz	99,0 Mhz
DISNEY	100,9	M	100,8 Mhz	101,0 Mhz
MEGA 103.3 FM	103,3	M	103,2 Mhz	103,4 Mhz
SONORAMA STEREO	105,7	R	105,6 Mhz	105,8 Mhz

Tabla: 5.7

En el caso de las estaciones de televisión, tenemos 16 canales autorizados para operar en la ciudad, de ellas tomaremos cada 4 saltos para las simulaciones y comparación de datos.

NOMBRE COMERCIAL	CANAL	MASTER O REPETIDOR	FREC. CENTRAL DE VIDEO	FREC. MIN.	FREC. MAX.
CADENA ECUAT.DE T.V.	7	R	175,25 Mhz	173Mhz	180Mhz
CANAL UNO	21	R	513,25 Mhz	511 Mhz	518 Mhz
TELEATAHUALPA (RTU)	29	R	561,25 Mhz	559 Mhz	566 Mhz
ECUADOR TV	48	R	675,25 Mhz	673 Mhz	680 Mhz

Tabla 5.8

Ahora vamos a explicar los parámetros que quedarán como constantes durante las simulaciones y que parámetros son los que vamos a ir variando, para ir comprobando las modificaciones que tenemos en los resultados.

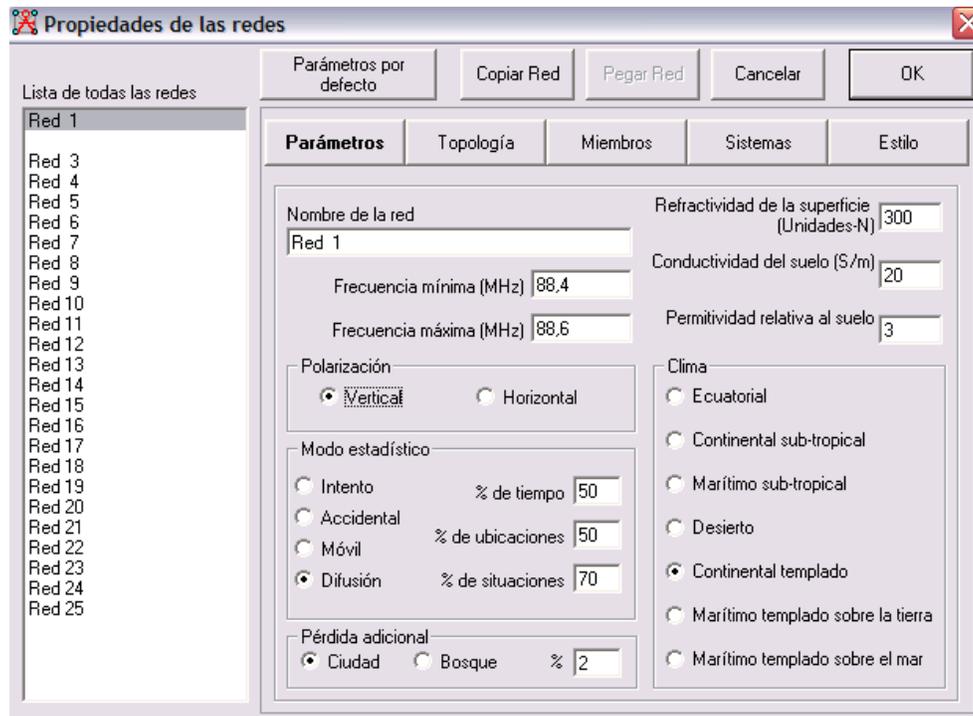


Figura 5.6

En la ventana de “Propiedades de las redes”, en la opción de parámetros vamos a ir variando la frecuencia mínima (Mhz) y la frecuencia máxima (Mhz), de acuerdo a las tablas 5.7 y 5.8. La polarización de la antena dependerá de la estación de radio y televisión de acuerdo al arreglo de antenas y la frecuencia de operación, en el modo estadístico permanecerá como difusión por ser broadcast, los valores porcentuales de tiempo, de ubicación y de situación los vamos a modificar y los iremos indicando, en el caso de Pérdidas adicionales, Refractividad de la superficie, conductividad del suelo, permitividad relativa al suelo y el clima continental ecuatorial permanecerán constantes para todos los casos.

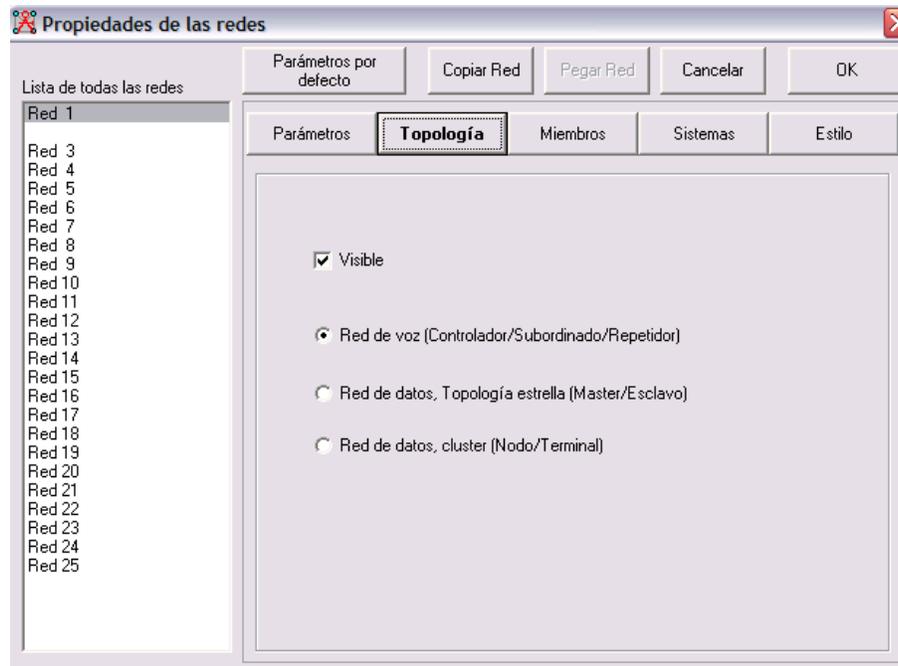


Figura 5.7

En la topología esta será constante como red de voz y no tendrá variación en ninguno de los estados.

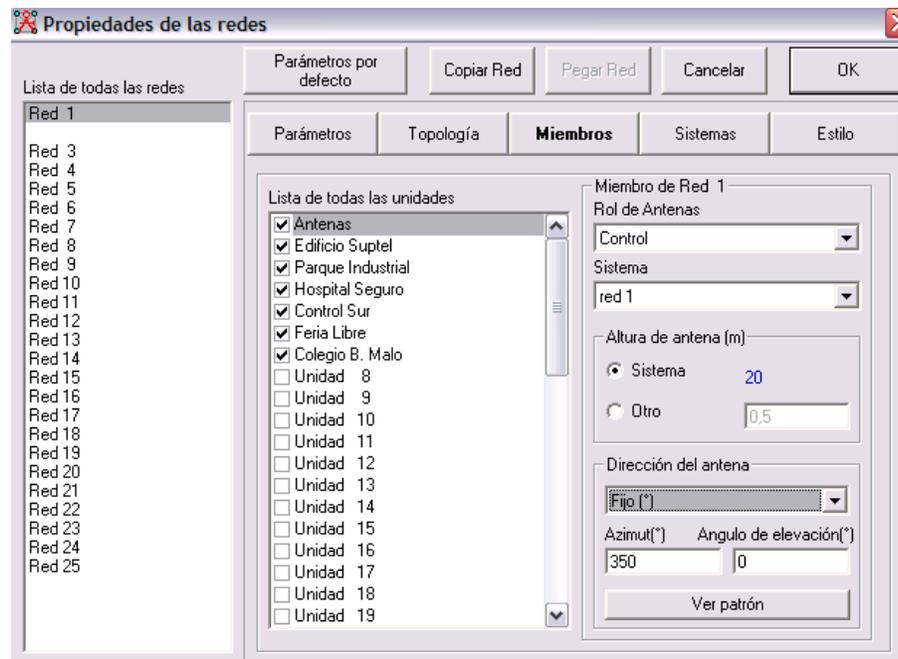


Figura 5.8

En la pestaña de miembros, constara los puntos donde vamos a ir analizando las variaciones en las medidas que se consideren, el rol de antenas será constante para todos los casos como de control, mientras que las antenas vamos a variar el azimut, y la ganancia de las mismas, y la escala en dB, así como el tipo de antena, para ir analizando las variantes obtenidas, y compararla con las mediciones.

Para ellos vamos a utilizar los siguientes tipos de antenas con escala en dB y azimut constantes, y los indicaremos en las simulaciones.

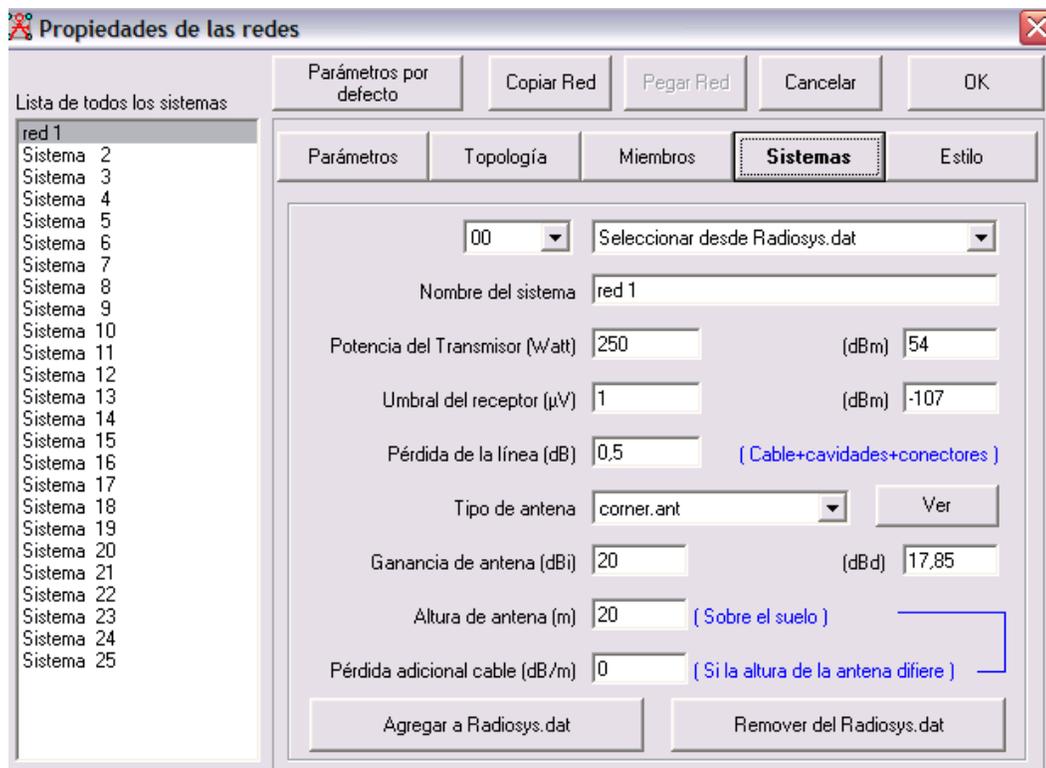


Figura 5.9

En la ventana de sistemas, vamos a ir variando la potencia del transmisor, el tipo de antena con sus características específicas que detallaremos posteriormente, mientras que el resto de datos permanecerán constantes.

5.2.1 Antenas a utilizar con sus características

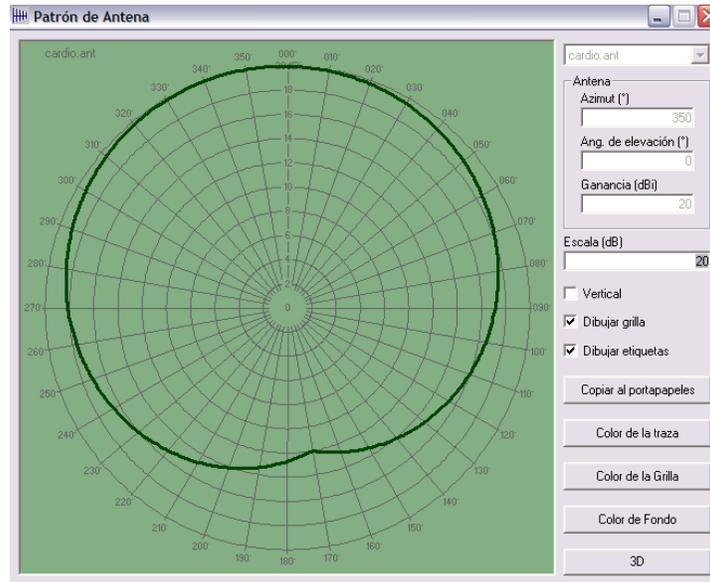


Figura 5.10

Nombre de la Antena	Escala (db)	Azimut	Ganancia
Cardio	20	350°	20

Tabla 5.9

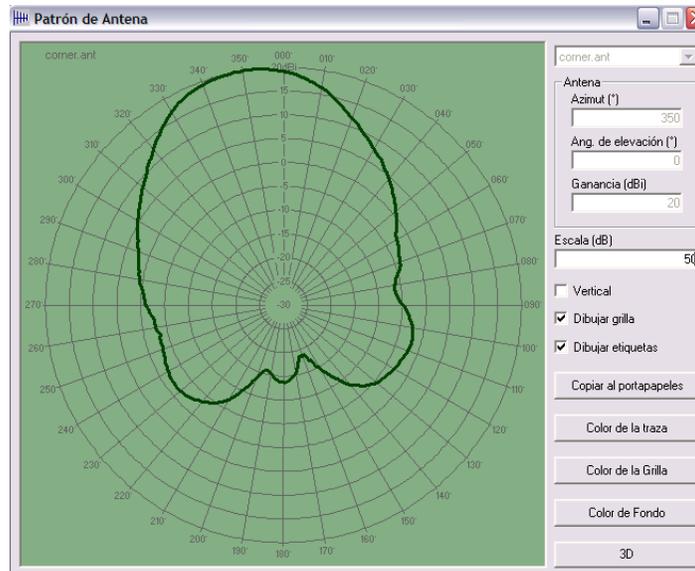


Figura 5.11

Nombre de la Antena	Escala (db)	Azimut	Ganancia
Corner	50	350°	20

Tabla 5.10

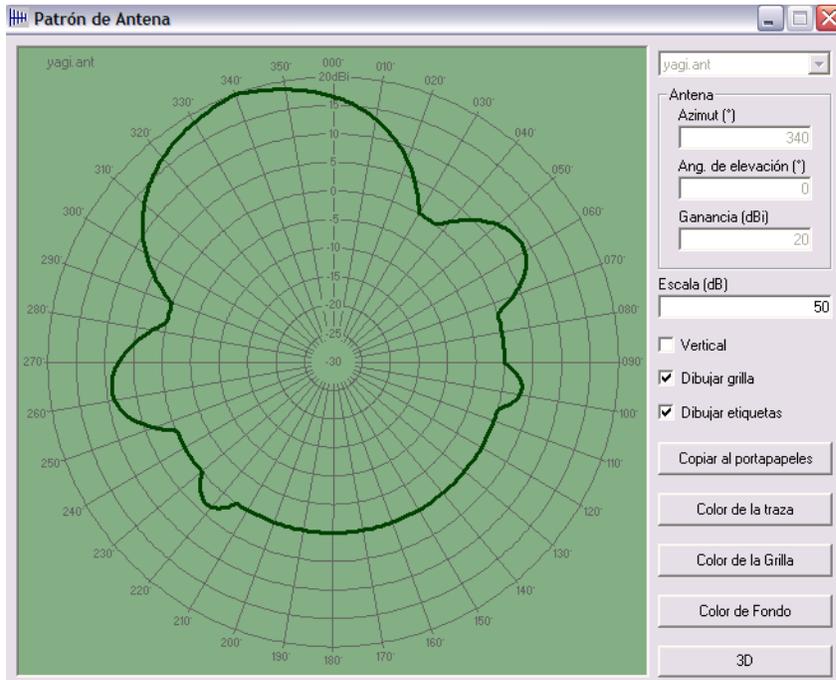


Figura 5.12

Nombre de la Antena	Escala (db)	Azimut	Ganancia
Yagi	50	340°	20

Tabla 5.11

5.2.2 Gráficas de los datos simulados

En la tabla 5.9 presentamos los datos obtenidos en las simulaciones con los diferentes cambios y tipos de antenas utilizados

Frecuencia	Edificio Supertel	Parque Industrial	Hospital del seguro	Control Sur	Feria Libre	Puente Centenario	Pot. Tx	Tipo de antena
88,5	94,3	94	94,1	93,2	94,3	92,8	250 W	Cardio
91,3	91,8	88,3	81,5	78,5	86,4	89,5	250 W	Corner
94,1	91,8	85,8	79,8	80,4	90,2	90,8	300 W	Yagi
96,9	95,1	94,8	94,9	94	95,1	93,6	300 W	Cardio
98,9	92,6	89,1	82,3	79,3	87,2	90,3	300 W	Corner
100,9	92,6	87,3	81,9	82,5	91,3	90,8	350 W	Yagi
103,3	95,7	95,5	95,6	94,7	95,8	94,2	350 W	Cardio
105,7	93,2	89,8	83	79,9	87,8	91	350 W	Corner
175,25	99,2	95	91,5	97,4	99,4	98,6	500 W	Yagi
513,25	97,3	97,1	97,2	96,2	97,4	94,9	500 W	Cardio
561,25	93,9	95,1	90,6	93,6	96,4	96,6	500 W	Corner
675,25	98,2	98,6	96	104,1	104	105	500 W	Yagi

Tabla 5.12

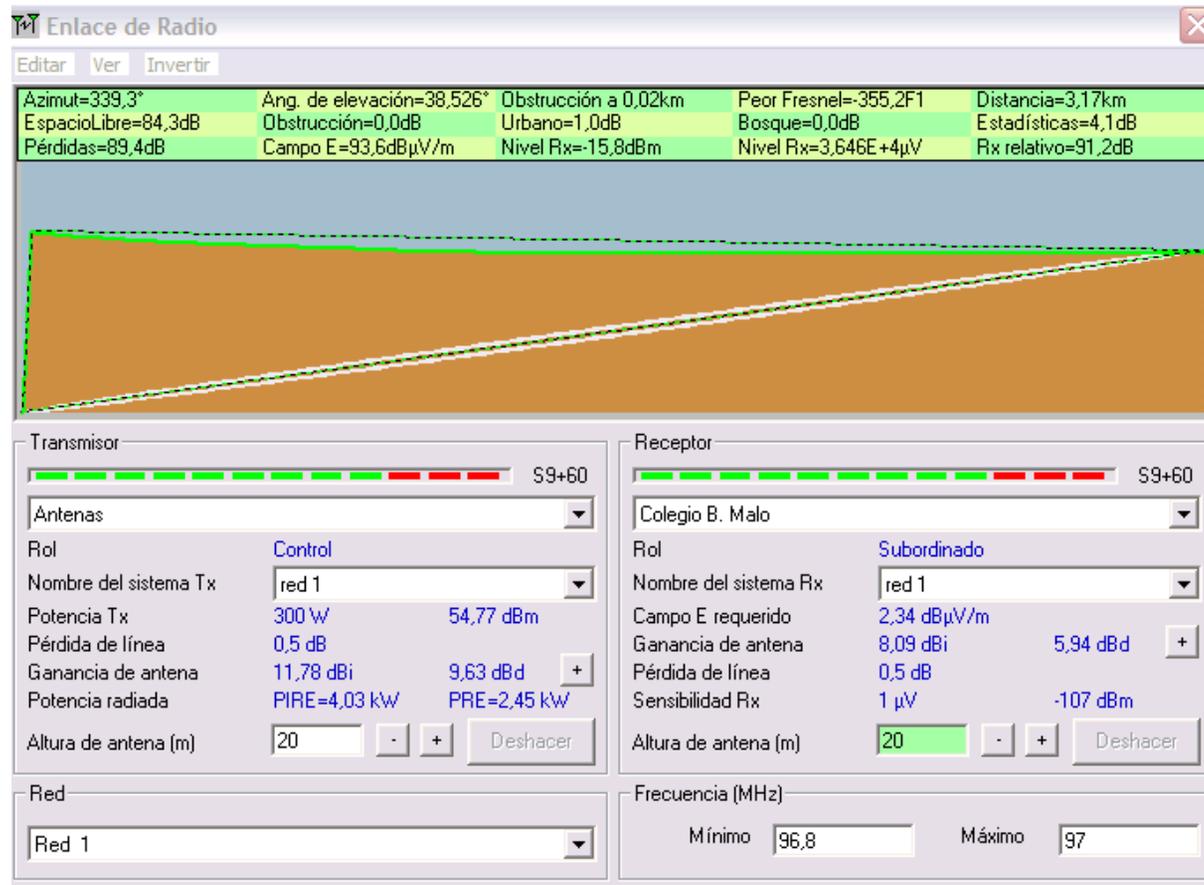


Figura 5.13 Simulación en la frecuencia de 96,8 Mhz a 97 Mhz, en la parte del colegio benigno Malo
Con una medida de campo eléctrico de 93,6 dB μ v/m

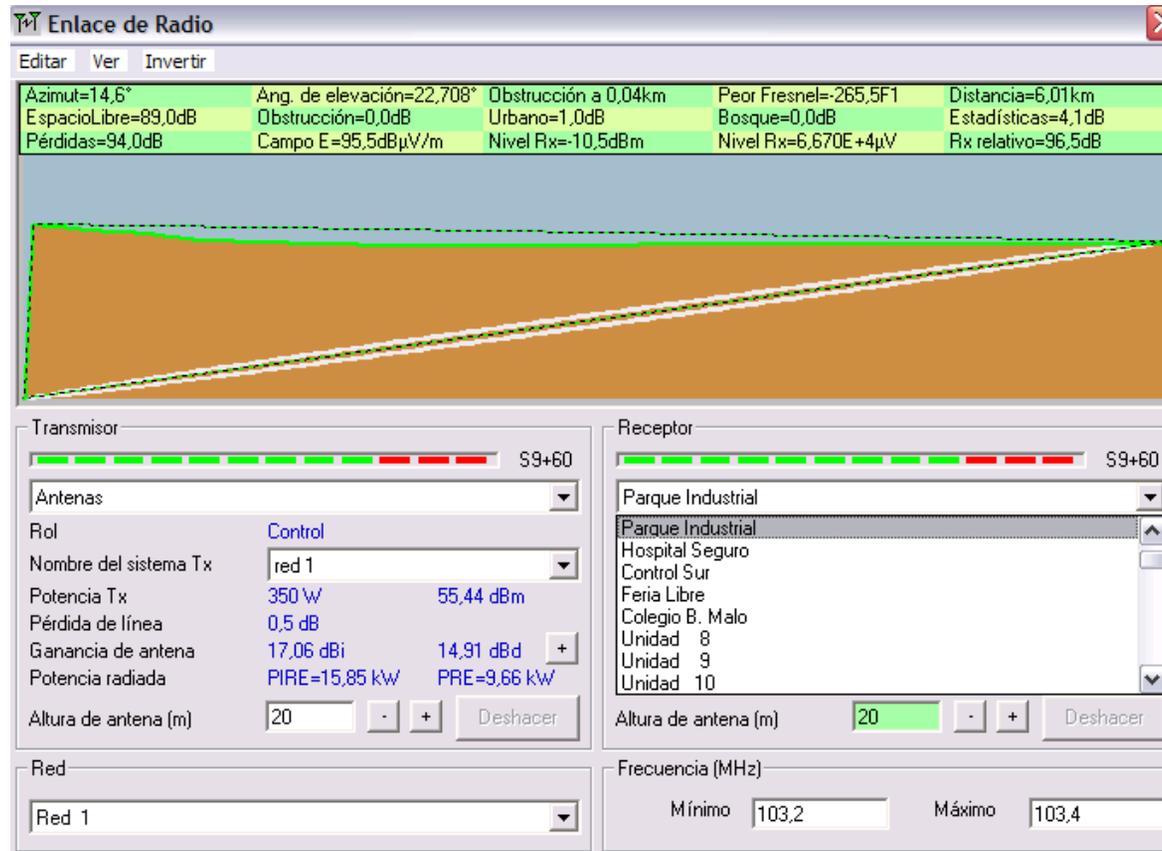


Figura 5.14 Simulación en la frecuencia de 103,2 Mhz a 103,4 Mhz, en la parte del Parque Industrial
Con una medida de campo eléctrico de 95,5 dBμv/m

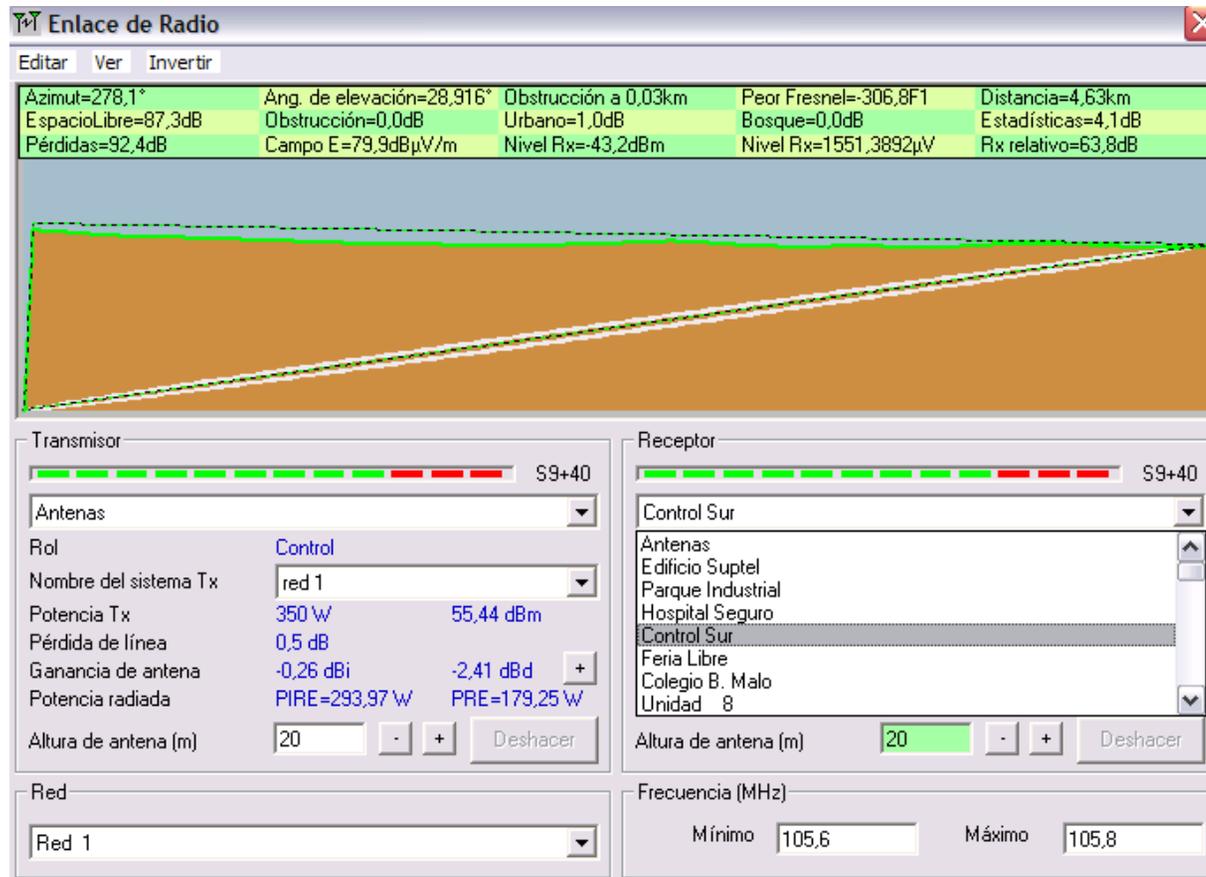


Figura 5.15 Simulación en la frecuencia de 105,6 Mhz a 105,8 Mhz, en la parte del control Sur
Con una medida de campo eléctrico de 79,9 dBμv/m

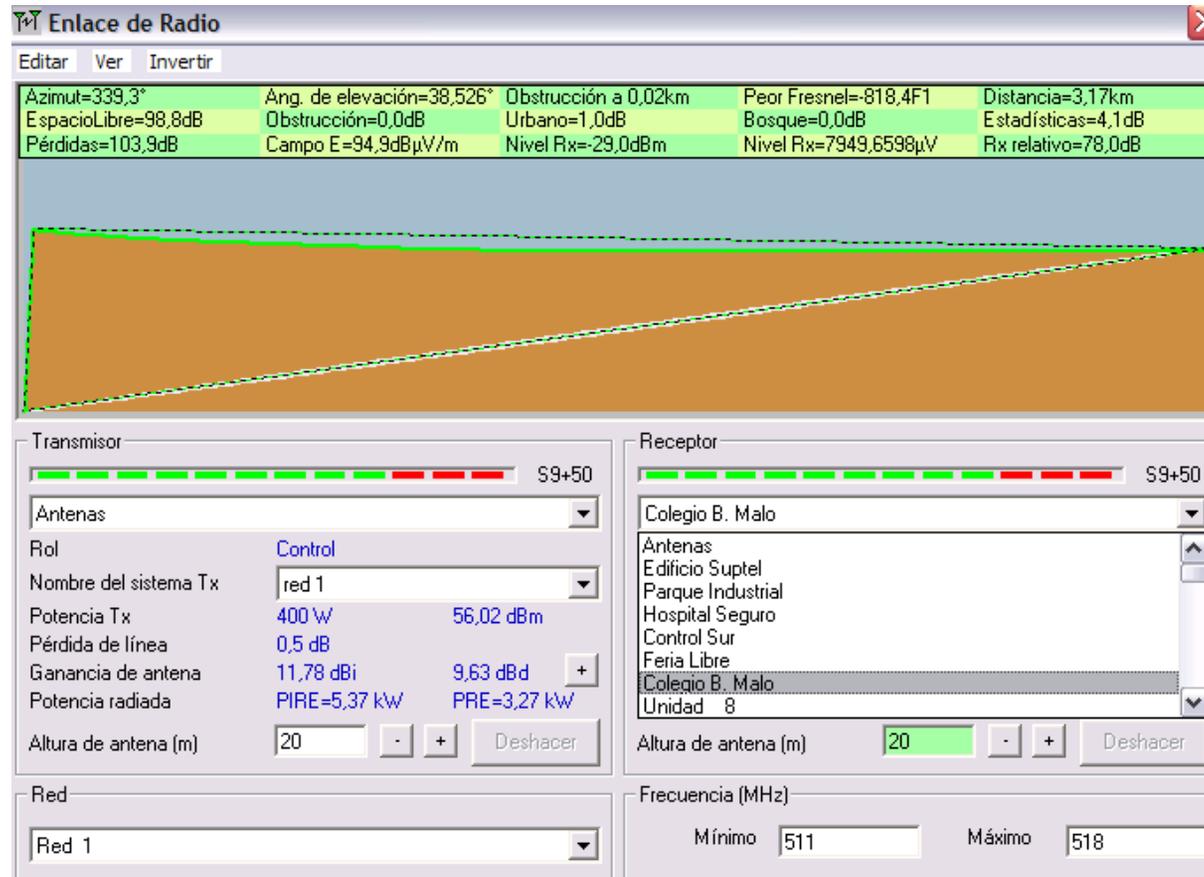


Figura 5.16 Simulación en la frecuencia de 511 Mhz a 518 Mhz, en la parte del Puente del Centenario
Con una medida de campo eléctrico de 94,9 dBμv/m

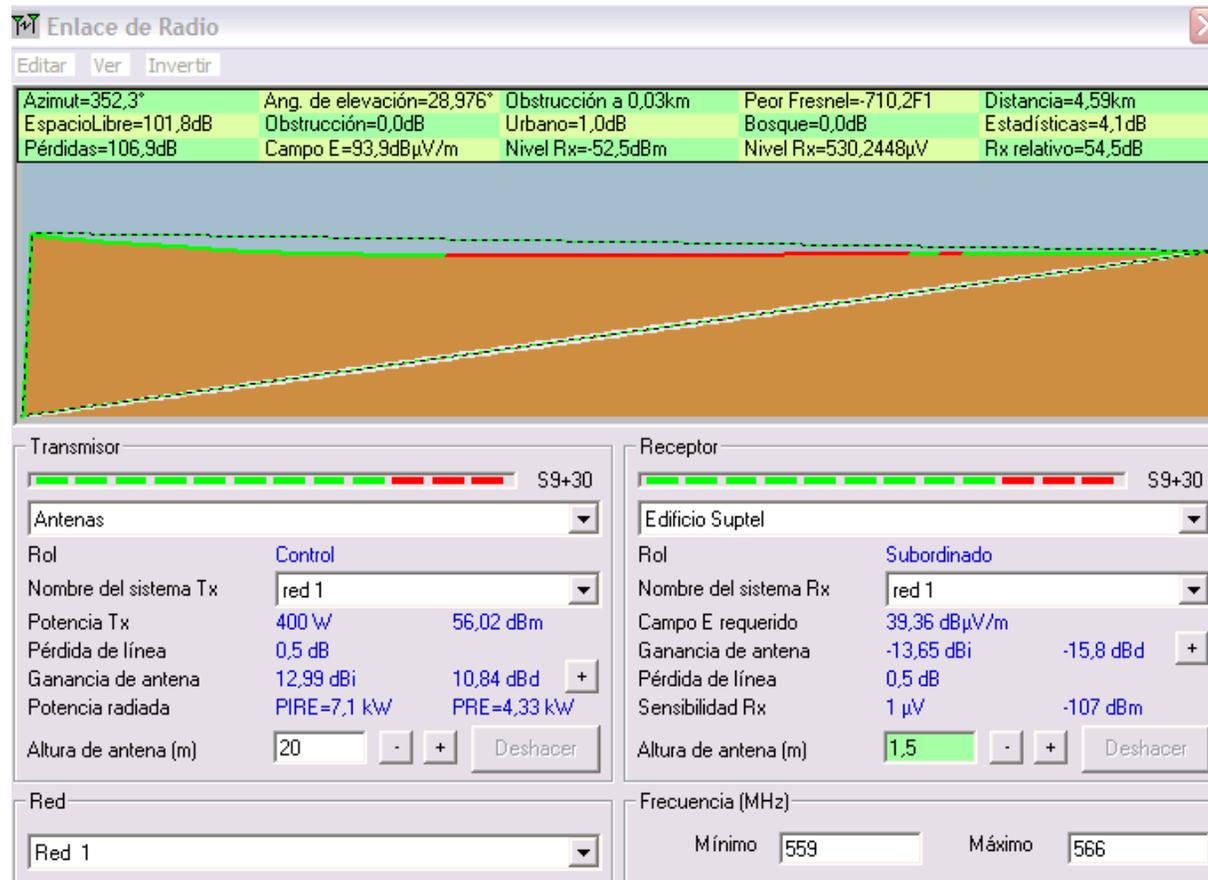


Figura 5.17 Simulación en la frecuencia de 559 Mhz a 566 Mhz, en la parte del Edificio de la Supertel
Con una medida de campo eléctrico de 93,9 dBμv/m

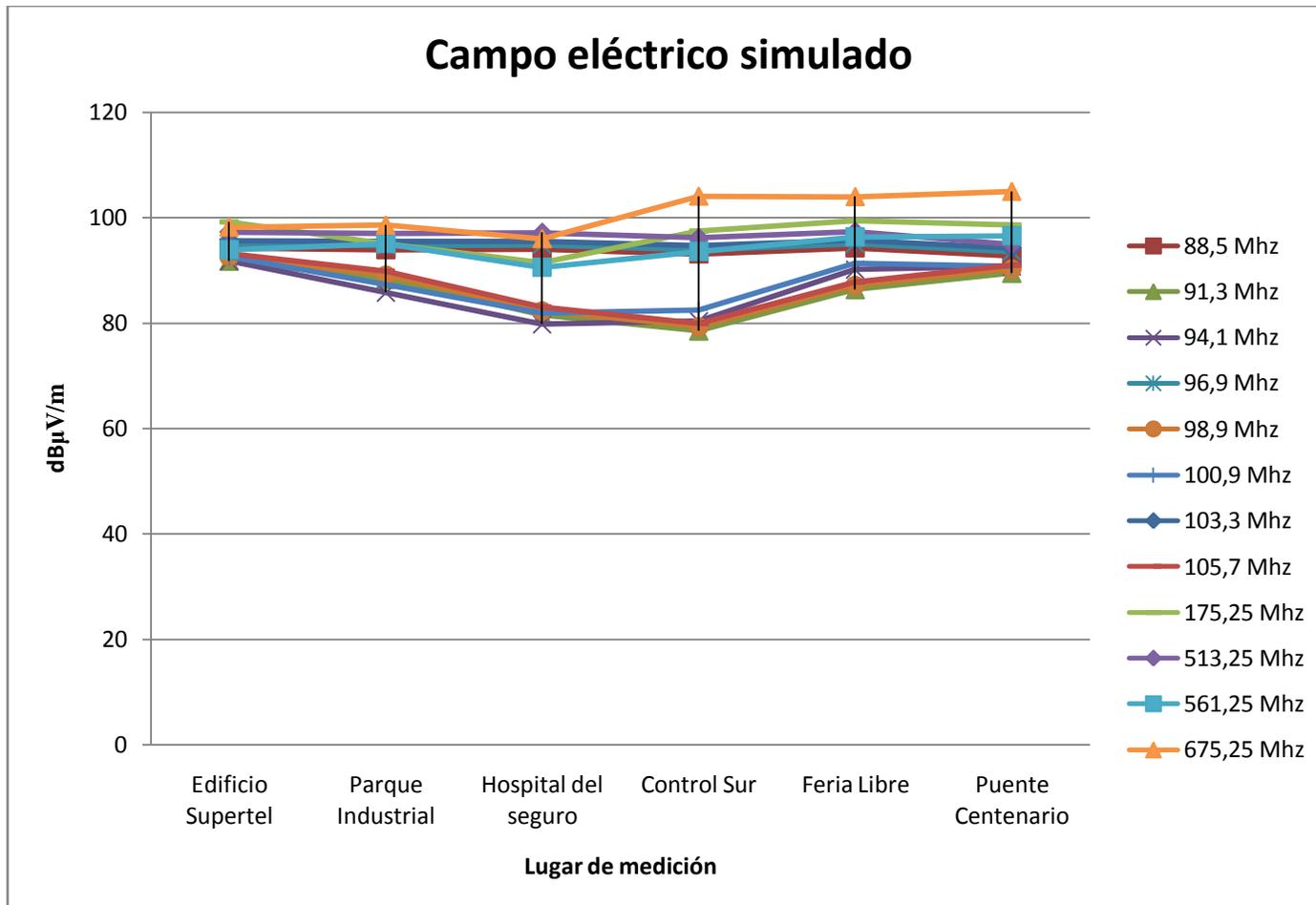


Figura 5.18

5.3 COMPARACION DE DATOS MEDIDOS Vs. SIMULADOS

Gráficas de los datos medidos del campo eléctrico y de la densidad de campo magnético que se obtuvieron con el equipo de medición para radio y televisión en sus aspectos más destacados. Realizaremos las simulaciones en las estaciones ya especificadas con sus características particulares, para finalmente hacer una comparación entre las dos, ver su efectividad y margen de error y también analizar las mediciones reales con los límites ocupacionales y poblacionales recomendados.

5.3.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS MEDIDOS Vs. SIMULADOS

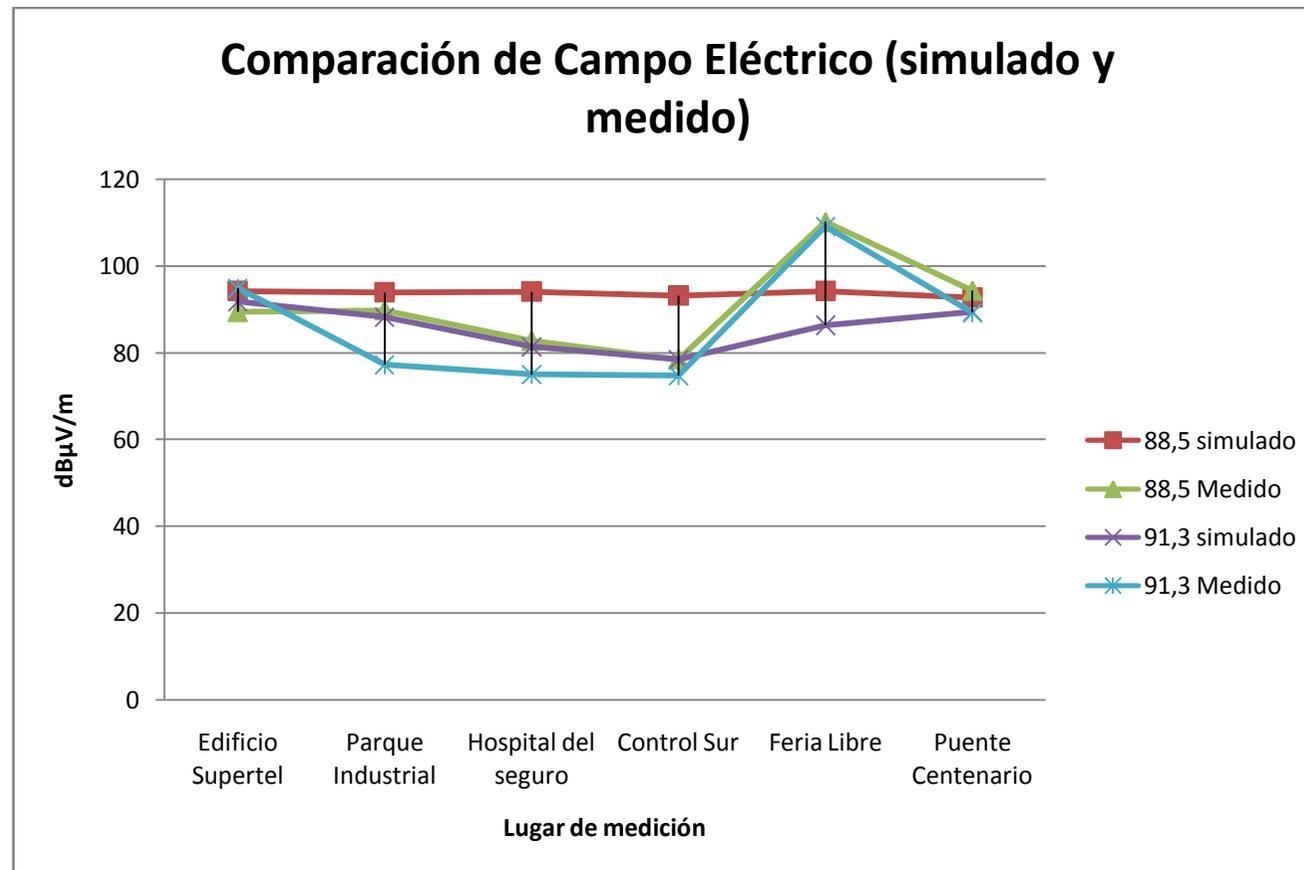


Gráfico: 5.19

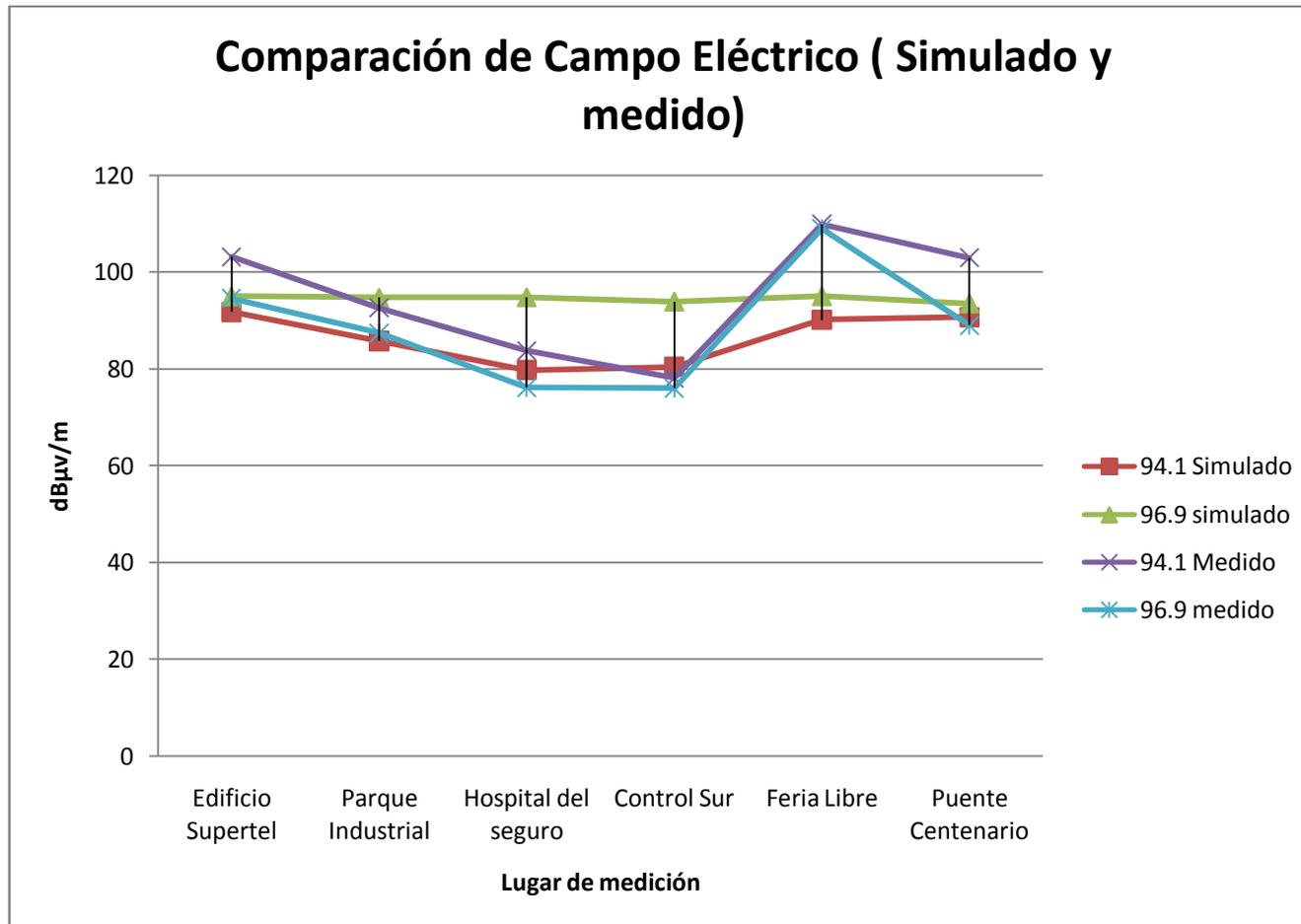


Grafico 5.20

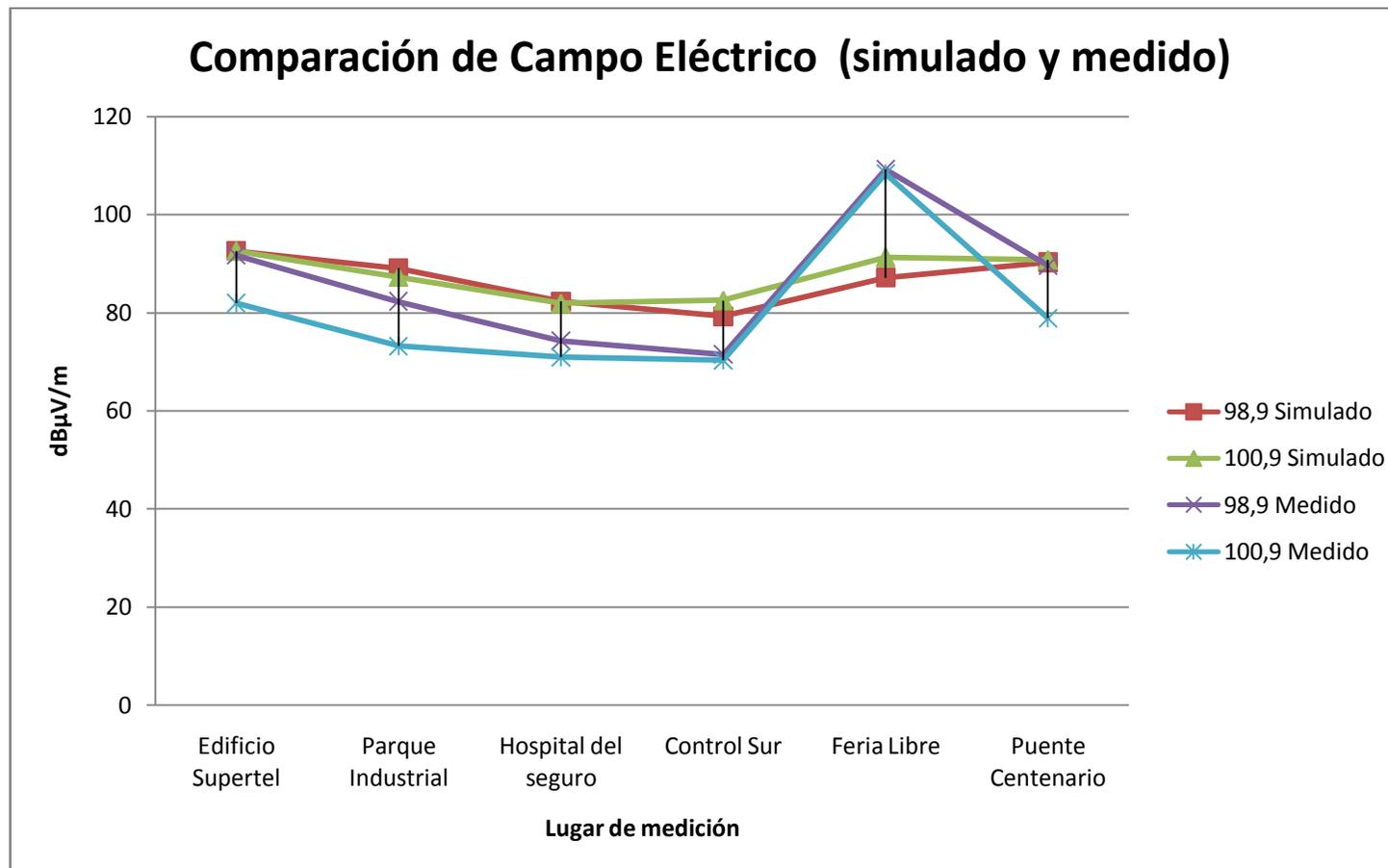


Gráfico 5.21

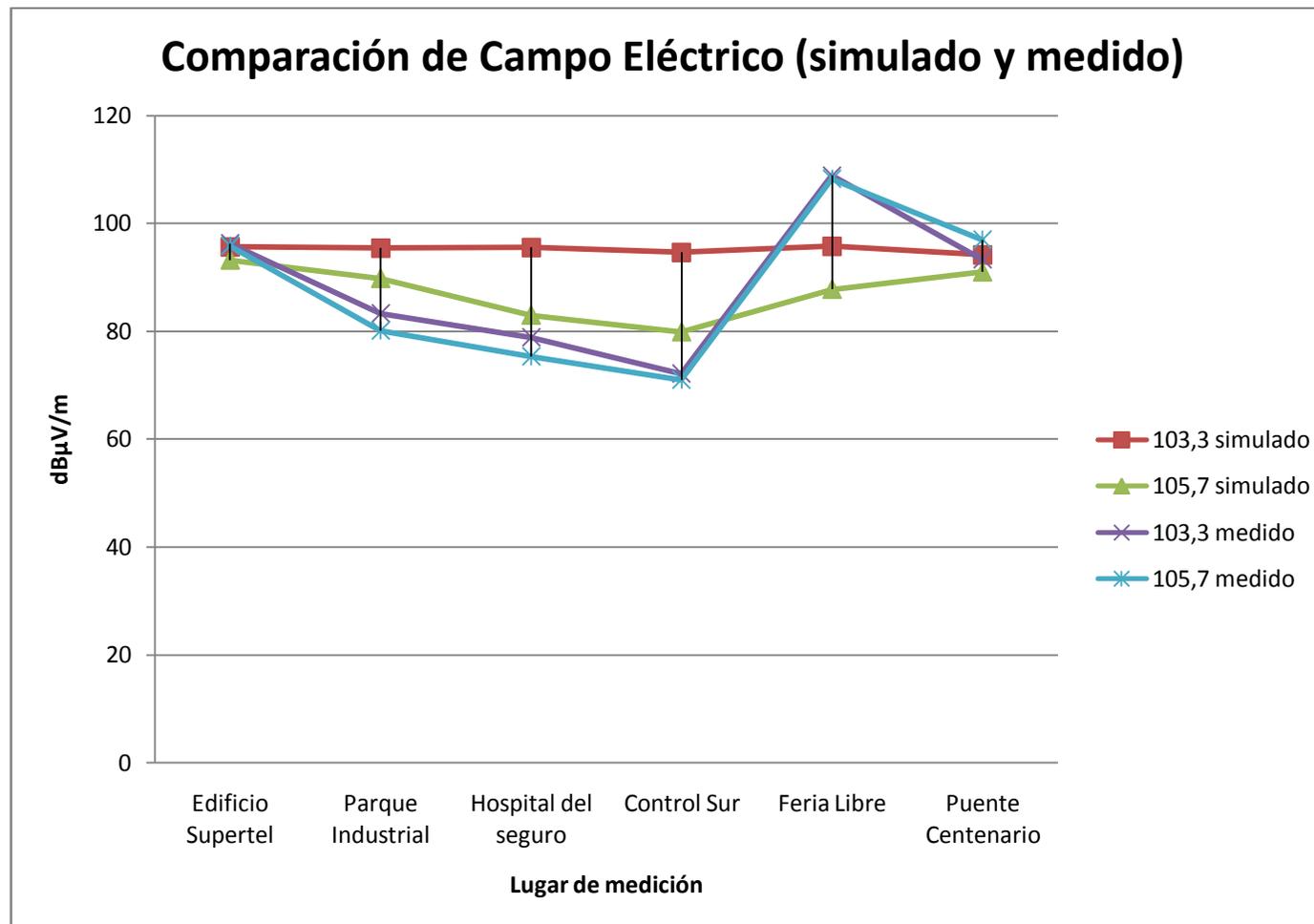


Gráfico 5.22

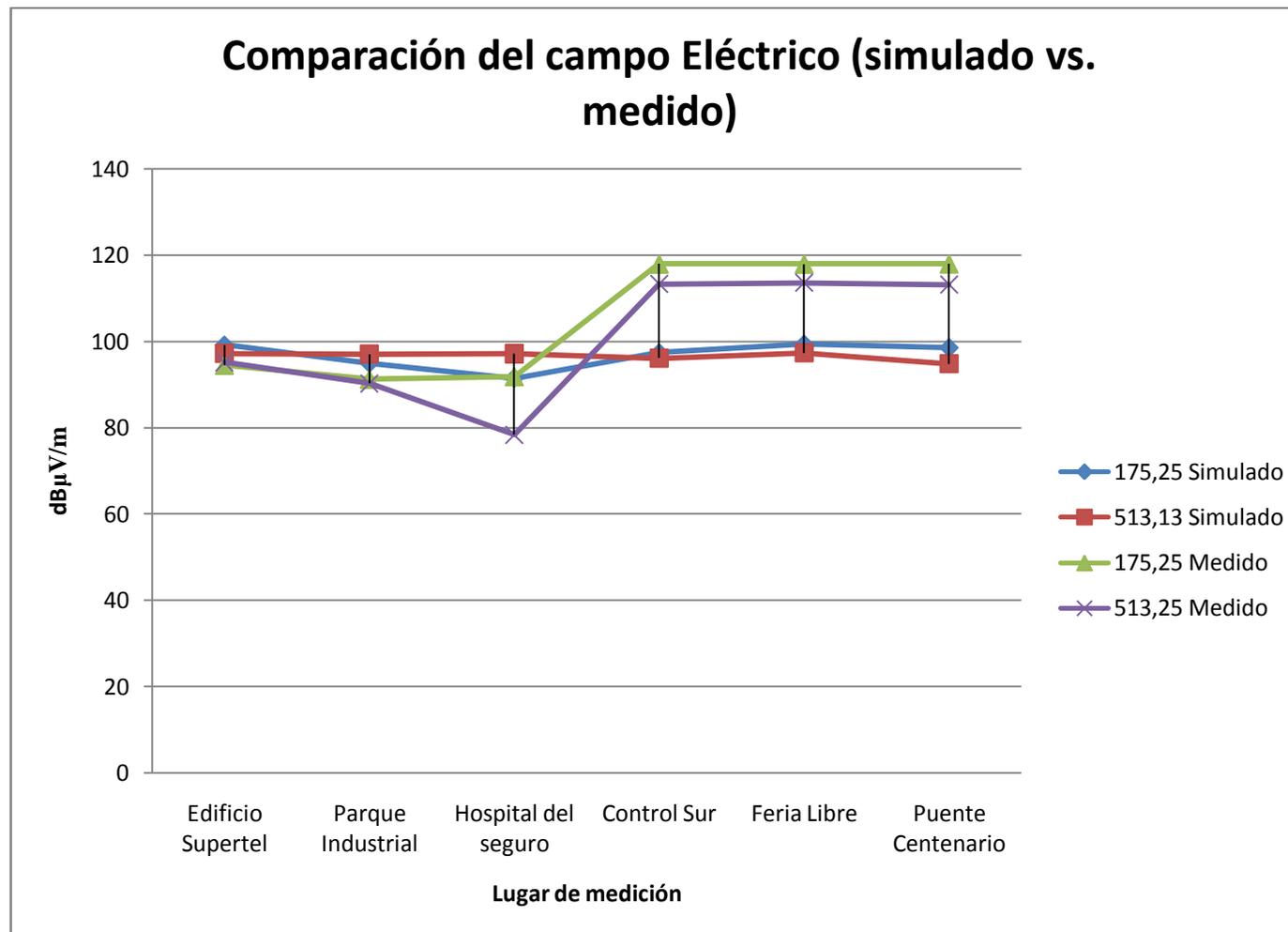


Gráfico 5.23

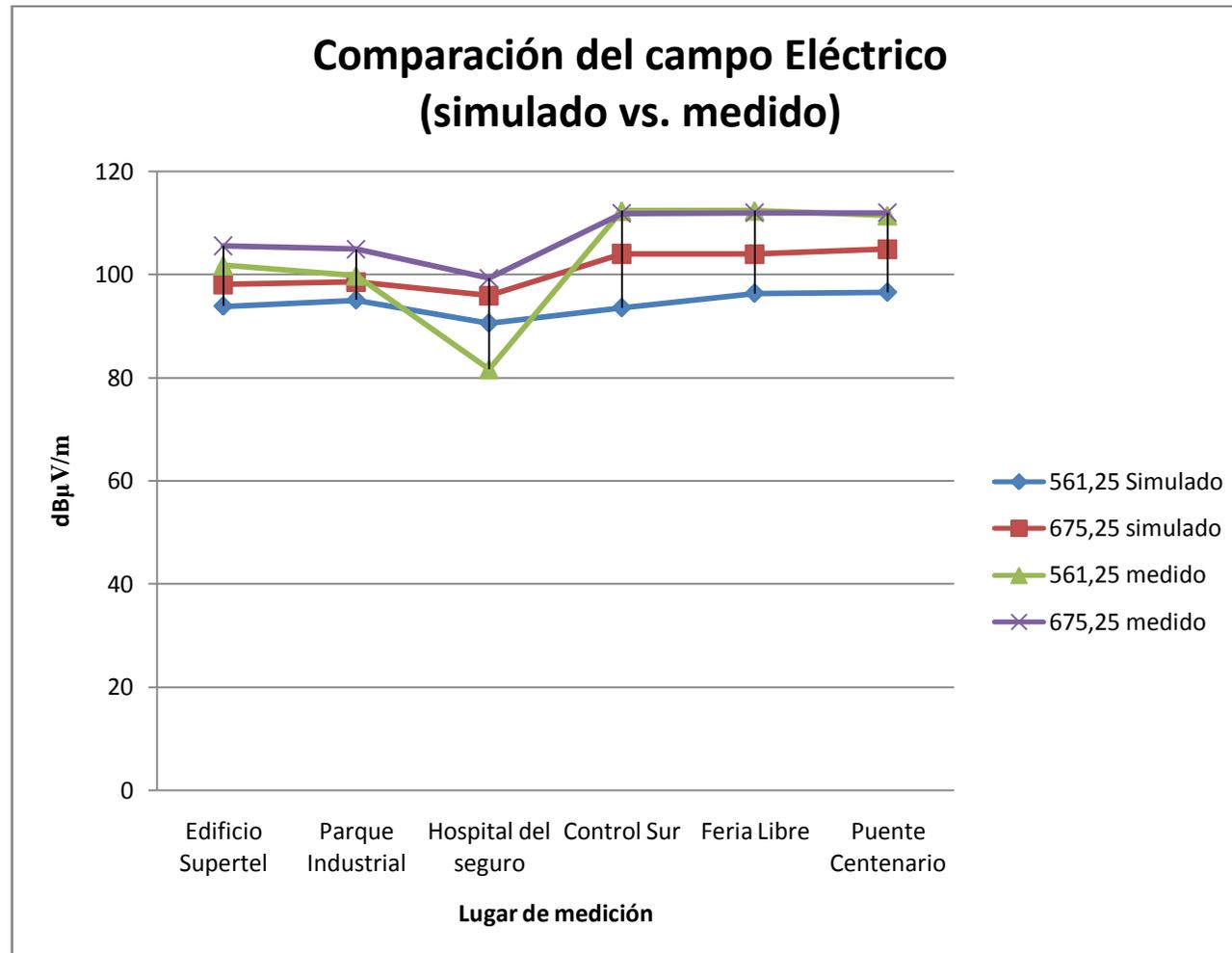


Gráfico 5.24

5.4 CÁLCULO DEL ERROR

Frecuencia	Valor Medio Medidos	Valores Medio Calculados	Error	Error Porcentual (%)
88,5	90,89	93,78	-2,89	3,082
91,3	86,75	86,00	0,75	-0,872
94,1	95,16	86,47	8,69	-10,050
96,9	88,76	94,58	-5,82	6,154
98,9	86,45	86,80	-0,35	0,403
100,9	80,61	87,73	-7,12	8,116
103,3	88,82	95,25	-6,43	6,751
105,7	87,92	87,45	0,47	-0,537
175,25	105,29	96,85	8,44	-8,715
513,25	100,67	96,83	3,84	-3,966
561,25	103,29	94,70	8,59	-9,071
675,25	107,62	100,98	6,64	-6,576

Tabla 5.13

Al realizar un promedio general de error de cálculo obtenemos un -1,273 %, que está dentro del 5 % admitido como error máximo para este tipo de simulación.

5.5 CÁLCULO DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR CON DISTRIBUCIÓN “T”

Frecuencia	E. Supertel	P. Industrial	H. Seguro	C. Sur	F. Libre	P. Centenario
88,5	89,48	89,87	82,82	78,55	110,24	94,38
91,3	94,95	77,3	74,98	74,72	109,19	89,34
94,1	103,24	92,67	83,81	78,18	110	103,04
96,9	94,65	87,48	76,2	76,1	109,06	89,04
98,9	91,71	82,3	74,25	71,5	109,29	89,64
100,9	81,96	73,19	70,95	70,32	108,37	78,89
103,3	96,3	83,31	78,9	72,15	108,91	93,35
105,7	95,84	80,15	75,3	71,03	108,24	96,98
175,25	94,52	91,27	91,89	118,01	118	118,05
513,25	95,21	90,32	78,44	113,3	113,6	113,17
561,25	101,82	99,84	81,66	112,41	112,45	111,53
675,25	105,6	104,94	99,3	111,92	111,97	112

Tabla 5.14: Valores medidos

Frecuencia	E. Supertel	P. Industrial	H. Seguro	C. Sur	F. Libre	P. Centenario
88,5	94,3	94	94,1	93,2	94,3	92,8
91,3	91,8	88,3	81,5	78,5	86,4	89,5
94,1	91,8	85,8	79,8	80,4	90,2	90,8
96,9	95,1	94,8	94,9	94	95,1	93,6
98,9	92,6	89,1	82,3	79,3	87,2	90,3
100,9	92,6	87,3	81,9	82,5	91,3	90,8
103,3	95,7	95,5	95,6	94,7	95,8	94,2
105,7	93,2	89,8	83	79,9	87,8	91
175,25	99,2	95	91,5	97,4	99,4	98,6
513,25	97,3	97,1	97,2	96,2	97,4	94,9
561,25	93,9	95,1	90,6	93,6	96,4	96,6
675,25	98,2	98,6	96	104,1	104	105

Tabla 5.15: Valores simulados

Con las tablas anteriores realizamos los cálculos descriptivos básicos para el cálculo de la desviación estándar con distribución “t”.

En todos los casos el n_1 es igual a 6 que es el número de muestras para los datos tomados, es así que la media y la desviación típica se calcula aplicando:

$$\bar{x}_1 = \frac{\sum x_{li}}{n_1} \quad \text{Ecu. 5.1}$$

Para los datos de las tablas las medias serán:

Frecuencia	V. Medidos
88,5	90,89
91,3	86,75
94,1	95,16
96,9	88,76
98,9	86,45
100,9	80,61
103,3	88,82
105,7	87,92
175,25	105,29
513,25	100,67
561,25	103,29
675,25	107,62

Tabla 5.16

La desviación se calcula aplicando:

$$S1 = \sqrt{\frac{1}{n_1-1} \sum (x_{1i} - \bar{x}_1)^2} \quad \text{Ecu.5.2}$$

Frecuencia	V. Medidos
88,5	14,26
91,3	13,93
94,1	14,59
96,9	14,09
98,9	13,90
100,9	13,43
103,3	14,09
105,7	14,02
175,25	15,34
513,25	15,00
561,25	15,20
675,25	15,51

Tabla 5.17

Ahora para realizar el cálculo de intervalo de confianza (IC), primero hay que calcular el Error estándar (EE) se aplica:

$$EE(\bar{x}_1) = \sqrt{s^2 \frac{1}{n_1}} \quad \text{Ecu 5.3}$$

Aplicando la ecuación 5.3 se obtiene el Error Estándar

Frecuencia	Error Estándar
88,5	5,8216
91,3	5,6869
94,1	5,9563
96,9	5,7522
98,9	5,6747
100,9	5,4828
103,3	5,7522
105,7	5,7236
175,25	6,2625
513,25	6,1237
561,25	6,2054
675,25	6,3319

Tabla 5.18

Para el cálculo de intervalo de confiabilidad, se necesita el valor de la “t” para un $\alpha = 0,05$, es decir una confianza del 95 % y con grados de libertad que se calculan:

$$gl = (n1 - 1) \text{ Ecu 5.4}$$

$$gl = 6 - 1 = 5$$

Que resulta ser $t_{1-\alpha/2,gl}$, y $\alpha=0,05$

$$t = \frac{\bar{x}_1}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1}}} \text{ Ecu 5.5}$$

Obtenemos:

Frecuencia (Mhz)	T
88,5	15,612
91,3	15,254
94,1	15,976
96,9	15,430
98,9	15,234
100,9	14,703
103,3	15,441
105,7	15,361
175,25	16,813
513,25	16,440
561,25	16,644
675,25	16,997

Tabla 5.19

Frecuencia (Mhz)	T _{1-α/2;gl}
88,5	7,781
91,3	7,602
94,1	7,963
96,9	7,690
98,9	7,592
100,9	7,327
103,3	7,695
105,7	7,656
175,25	8,381
513,25	8,195
561,25	8,297
675,25	8,473

Tabla 5.20

Obtenemos:

$$IC\ 95\%(\bar{x}_1) = [(\bar{x}_1) \pm t_{1-\alpha/2;gl}EE(\bar{x}_1)] \text{ Ecu 5.6}$$

Aplicando la ecuación obtenemos:

Frecuencia (Mhz)	Valor maximo	Valor Medio Medido	Valor minimo
88,5	105,136	93,78	76,644
91,3	100,663	86,00	72,831
94,1	109,732	86,47	80,581
96,9	102,831	94,58	74,679
98,9	100,334	86,80	72,562
100,9	94,030	87,73	67,197
103,3	102,896	95,25	74,744
105,7	101,929	87,45	73,918
175,25	120,614	96,85	89,966
513,25	115,658	96,68	85,689
561,25	118,470	94,37	88,100
675,25	123,116	100,98	92,127

Tabla 5.21

Que cumple tanto para valores máximos y mínimos

5.6 DIAGRAMAS DE CAJON

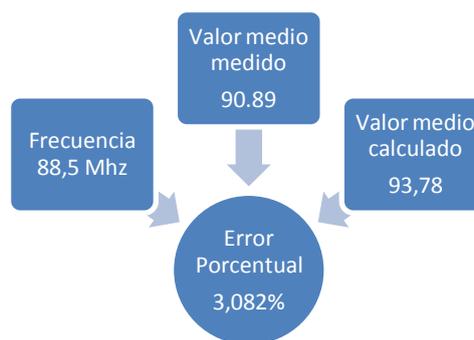


Diagrama 5.1

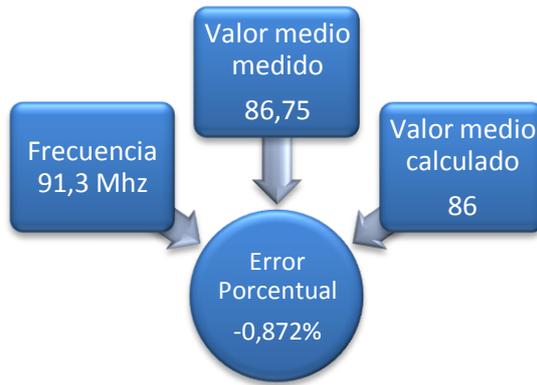


Diagrama 5.2

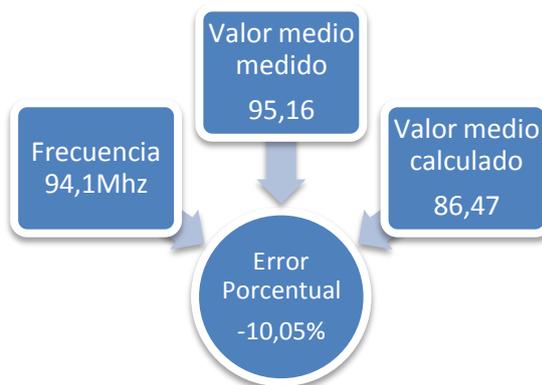


Diagrama 5.3

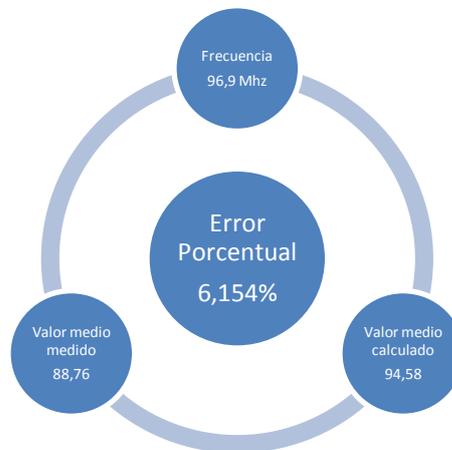


Diagrama 5.4

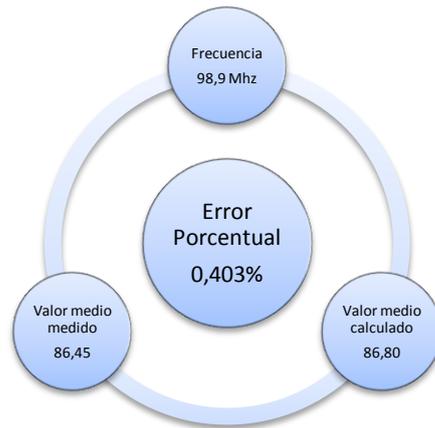


Diagrama 5.5

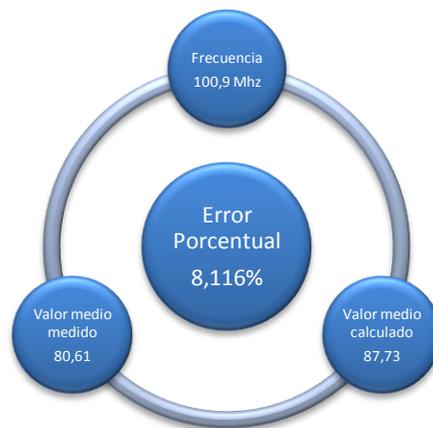


Diagrama 5.6

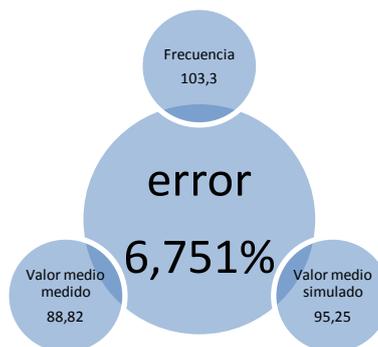


Diagrama 5.7

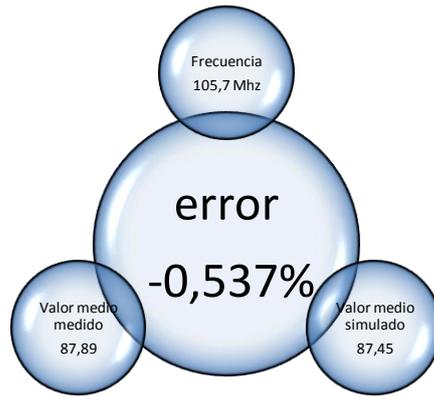


Diagrama 5.8

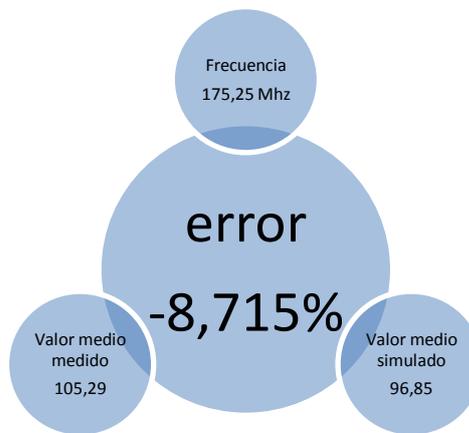


Diagrama 5.9

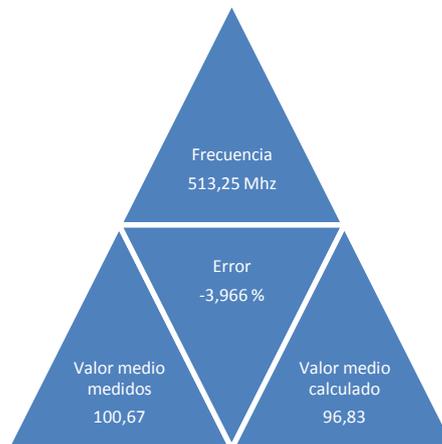


Diagrama 5.10

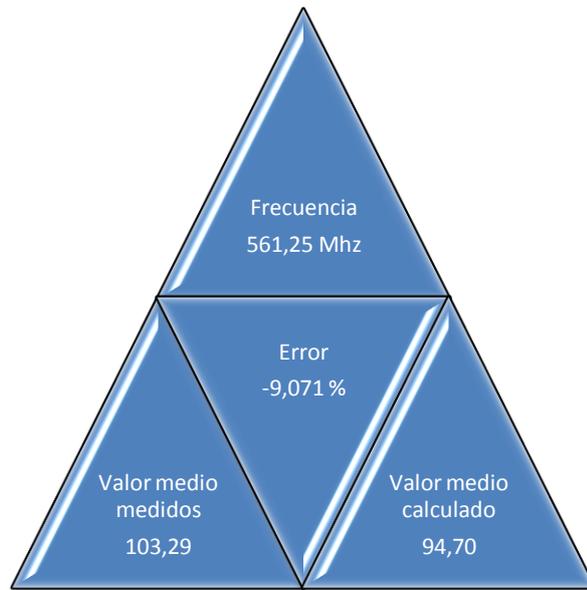


Diagrama 5.11

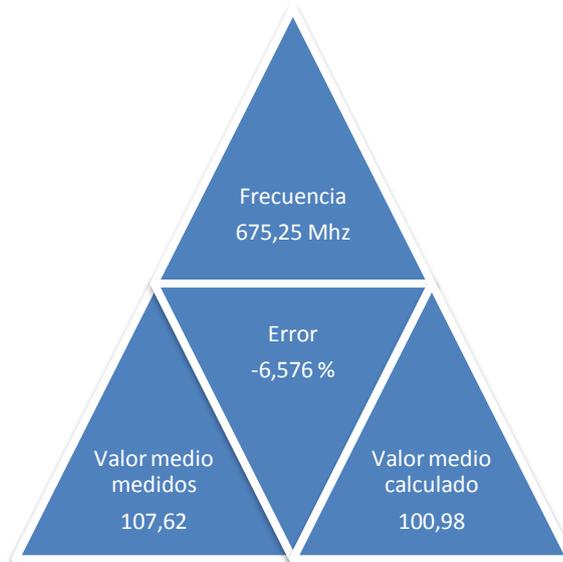


Diagrama 5.12

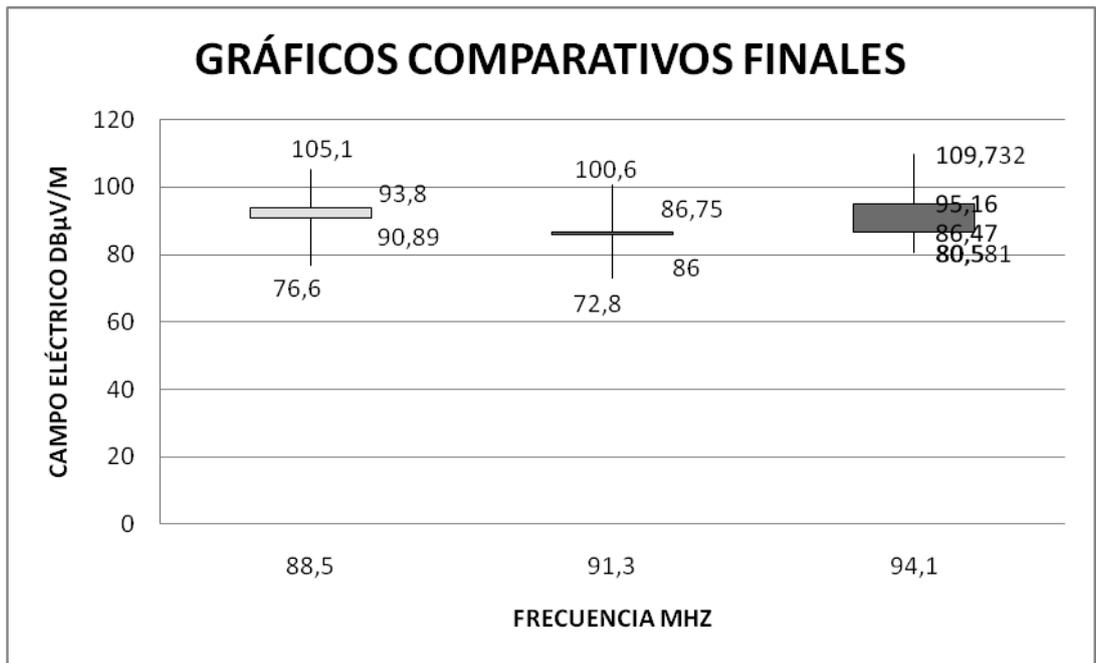


Gráfico 5.25

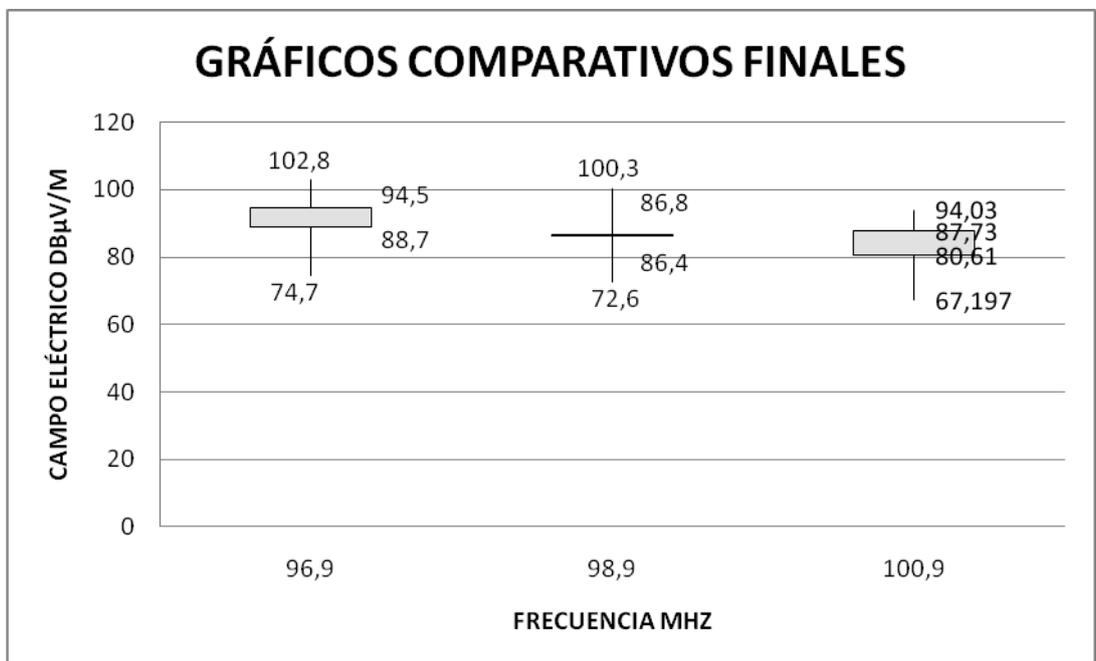


Gráfico 5.26

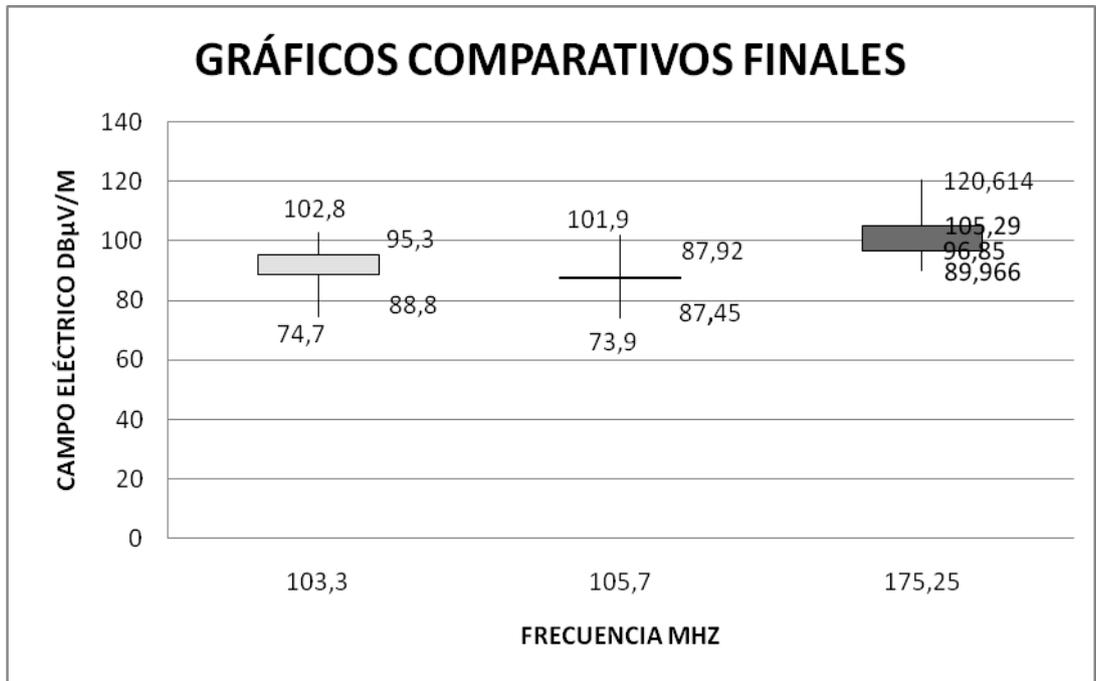


Gráfico 5.27

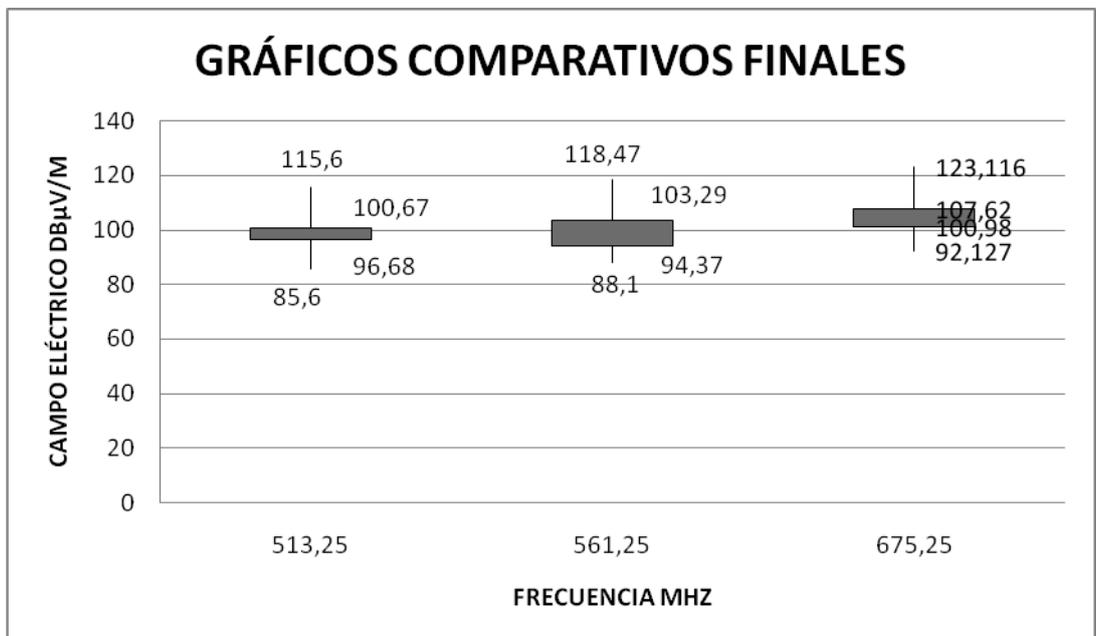


Gráfico 5.28

Como se puede observar hay gran similitud y aproximación entre los datos simulados o medidos, y estos pueden llegar a tener mayor exactitud, con datos técnicos y específicos antenas, equipos, emplazamientos, etc.

Este software puede ser de gran utilidad para muchas personas dedicadas a esta materia, que con una herramienta tan útil, podrían predecir los posibles comportamientos de diversos equipos y configuraciones que se dispone para equipos de comunicaciones tanto analógicos como electrónicos.

A través de las simulaciones y con el análisis de resultados se puede afirmar que tanto en las estaciones de radio en FM y de televisión estas están muy por debajo de los niveles máximos de radiación ocupacional y poblacional.

Con respecto a los estaciones de AM se puede decir, que sus transmisores están ubicados en partes lejanas a la ciudad y dispersas, que si bien es cierto, afectan a equipos eléctricos y de comunicación como los teléfonos, no se puede afirmar que estos causen daño a la población ya que la Supertel no tiene aparatos de medida para frecuencias bajas, lo que dificulta su simulación, al no tener un patrón de comparación con el mismo se hace complicado poder emitir un criterio más exacto.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente proyecto fue desarrollado gracias a la colaboración de la SUPERTEL, ente donde su principal función es la de regular y hacer cumplir las normas de difusión tanto para radio y televisión en las zonas autorizadas y bajo los parámetros regulados, institución que brindó su apoyo técnico, logístico y profesional para la toma y recopilación de las mediciones de los campos eléctricos y magnéticos, y forman parte de una base de datos que se utilizaron en las simulaciones con MEF, además servirán para hacer análisis y estudios en el futuro, vale recalcar que éste tipo de estudio realiza la recolección de los primeros datos de esta magnitud en la Ciudad de Cuenca.

La SUPERTEL al ser una institución gubernamental encargada del control de las frecuencias y del manejo organizado del espectro radioeléctrico, debe contar con todas las herramientas y equipos necesarios para poder cumplir con su trabajo, para el desarrollo de la tesis, se tomaron las medidas tanto en FM y en televisión, no así en AM, pues la frecuencia de operación es mucho menor que las anteriores y no se cuenta con equipos ni infraestructura para realizar las mediciones respectivas.

En AM, se tiene un mayor alcance en cobertura por las características de la longitud de onda, su propagación y la potencia más elevada que necesitan sus transmisores, este espacio del espectro no presenta mayor demanda por la calidad de difusión, no así como ocurre en FM que se tiene prácticamente saturado en emisoras en la ciudad de Cuenca.

Como se ha expuesto los transmisores de FM y de televisión se encuentran ubicados en su gran mayoría en el cerro de Icto Cruz, caso que no

sucede con las estaciones de AM que se encuentran ubicadas en diferentes cerros que limitan a la ciudad, y por sus características y potencias, se conoce que hacen interferencia con algunos aparatos tanto eléctricos y electrónicos, pero sin llegar a afectar a los seres humanos que viven en los alrededores.

El equipo utilizado para las mediciones mide desde los 100 Khz hasta los 3 Ghz, pero este equipo viene con una antena que mide desde los 75 Mhz hasta los 3 Ghz, para mediciones de longitudes de onda inferiores es necesario adquirir otras antenas complementarias y con características diferentes y que en la actualidad la SUPERTEL Regional Sur no dispone, y tampoco cuenta con ningún otro equipo capaz de medir los parámetros en AM, es por ello que no se realizan las simulaciones porque no hay parámetros con los cuales se pueda comparar ni tomar como punto de partida, el software utilizado tampoco fue desarrollado para este tipo de longitud de onda, ya que éste simula desde los 20 Mhz.

Una de las tareas fundamentales que se presentó en éste trabajo es el de análisis y cálculo matemático de los campos electromagnéticos mediante el Método de elementos Finitos, con el objetivo de poder comprender el software que permite hacer las simulaciones de los campos magnéticos y desarrollar una mejor comprensión de las ondas electromagnéticas. Se conoce que el MEF permite realizar cálculos en problemas de gran dificultad, y permite entender cómo se realizan la simulación de campos electromagnéticos computacionales, y como éstos aplicados en las distintas ramas de ingeniería, además de ayudar a resolver problemas que realizados manualmente resultarían muy complejos y en muchos casos imposibles de resolver.

El MEF es un método numérico de resolución de ecuaciones diferenciales. La solución obtenida por MEF proporcionó valores cercanos a los

medidos. En esencia se trata de una técnica que sustituye el problema diferencial por otro algebraico, aproximadamente equivalente, para el cual se conocen técnicas generales de resolución.

El MEF permite reducir el número de ensayos experimentales requeridos debido a que los software son prototipos optimizados que permiten reducir los riesgos de fallas en cálculos y mediciones, en definitiva permiten obtener resultados con gran calidad y precisión.

El mejor método de los MEF para la simulación de Campos Electromagnéticos es cuando se utilizan funciones de potencial, que emplea elementos de forma de frontera, elemento el cual es utilizado por los programas para realizar las simulaciones.

Dentro de las aplicaciones que se pueden dar de MEF en las Simulaciones de ondas electromagnéticas son:

- Problemas estacionarios.- Estos tipos de problemas se caracterizan porque no varían con el tiempo
- Problemas de autovalores.- que consiste en un desarrollo más profundo de los problemas de equilibrio, en donde se requiere determinar algunos valores críticos de ciertos parámetros del sistema.
- Problemas de propagación.- Estos tipos de problemas se caracterizan por ser variantes con el tiempo.

Los resultados son básicamente los campos eléctrico y magnético, las distribuciones de potencial, las corrientes, los fluidos magnéticos, etc.

La gran capacidad de los ordenadores y su evolución, permiten cada vez resolver problemas muy complejos y llenos de variables, sin embargo quedan a su alcance gracias a una acertada interpretación matemática del problema, que aprovecha la gran potencia computacional para pasar un sistema de ecuaciones diferenciales a un sistema de ecuaciones algebraicas, miles de ellas, pero que son de rápida y fácil solución para las máquinas de hoy día.

Las simulaciones son bastante aproximadas a los valores reales medidos, que es en realidad lo que se busca, pero se podría lograr mayor exactitud con datos específicos de cada estación, dirección de azimut, potencias de equipos, características de radiación de las antenas e incluso datos más reales del suelo y características que el software aplicado nos pide como datos para la simulación.

La utilización de software para la simulación de equipos, enlaces, áreas de cobertura, etc., son muy importantes en la actualidad, ya que estos dan una primera visión de los alcances y problemas que podemos tener dentro de un proyecto antes de hacer cualquier tipo de implementación y así evitar gastos innecesarios, es por esto que un buen estudio de telecomunicaciones puede tener un costo elevado, pero efectivo al momento de llevarlo del software a la realidad, obteniendo relaciones costo-beneficio que justifiquen su rentabilidad.

El modelo que utiliza el radio Mobile es el ITM (o modelo de terreno irregular) se aplica a sistemas punto a punto, con un rango de frecuencias entre las bandas VHF y EHF, desde los 40 MHz hasta los 100 GHz.

La pérdida media de propagación se obtiene de la geometría en torno al enlace y de las características refractivas de la atmósfera. La potencia de la

señal dentro del horizonte (LOS) se determina mediante el modelo de reflexión terrestre de 2 rayos. Las pérdidas por difracción por obstáculos aislados son calculados por el modelo “filo de cuchillo” de Fresnel-Kirchoff. Además para largas distancias, el modelo considera la dispersión en la tropósfera. Para las pérdidas de difracción en el campo lejano a distancias del doble del horizonte son predichas.

El modelo ITM trabaja en dos modos: Uno de predicción punto a punto y otro de predicción de área dependiendo del perfil del terreno que se esté utilizando. El modelo de predicción punto a punto es más eficiente pero implica que los datos topográficos sean lo más exactos posibles.

Con la nueva era de la digitalización y con las nuevas tecnologías que se van implementando a nivel mundial y en el Ecuador, proyectos como la televisión digital, implican un manejo más óptimo de muchos recursos limitados. El crecimiento poblacional y salud humana deben analizarse con una visión actual y planeada a un futuro saludable.

En ninguno de los casos donde se tomo las muestras tanto en radio como en televisión se registra, que exceda los niveles máximos recomendados a la exposición ni poblacional ni ocupacional, se muestra una gráfica independiente de los valores en el cerro de Icto Cruz, que es donde se tiene los valores máximos de campos electromagnéticos, y en las emisoras televisivas que registran un mayor nivel de energía que las de radiodifusión en toda el área de medición, por su mayor alcance regional.

El monitoreo de estas señales de broadcast debe ser constante, y probablemente se debería llegar a un sistema de automatización para tener datos permanentes en lugares de control en la ciudad y región, con una base e historial

de monitoreos, ya que la toma de estos datos manualmente es larga y puede ser tedioso su procesamiento, con patrones mensuales se podría establecer patrones anuales de variantes de comportamiento.

En la Ciudad de Cuenca se ha establecido que la banda de FM se encuentra saturada por emisoras, dando lugar a una pugna por las concesiones de frecuencia, mientras que para la televisión existe mayor capacidad y disponibilidad para nuevos canales en frecuencia, pero la principal diferencia estaría en los costos entre montar un canal y una emisora pues la tecnología, área física y costos en el área técnica y de personal es muy superior en el primer caso.

BIBLIOGRAFIA

- [1] CHENG, David, **“Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería”**, Pearson Educación. Mexico 1997.
- [2] HAYT, William H, **“Teoría electromagnética”**, quinta edición, Mc Graw Hill. México, 1991.
- [3] HERNANDO RABANOS, José María, **“Transmision por Radio”**, Editorial Centro de Estudios Ramón Areces S.A. Madrid 1993.
- [4] ICNIRP. 1997 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic, and electromagnetic field.
- [5] Manual de capacitación en el manejo del equipo de medición de radiación de radiaciones no ionizantes NARDA SRM 3000.
- [6] Intitute of Electrical and Electronic Engineer Standard 644-1994 “IEEE Standard Procedure for Measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines”
- [7] Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente / Organización Mundial de la Salud “Electromagnetic field (300Hz to 300Ghz)”.
- [8] Ministerio del Ambiente. “Normativa Técnica Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental para los sectores de infraestructura: Eléctrico, Telecomunicaciones y Transporte (Puertos y Aeropuertos)”. Registro oficial No. 41
- [9] CANTERA F. José Manuel **“Tecnologias de comunicaciones Inalambricas”**, Universidad de Valladolid, España, Marzo 2010.
- [10] Rec. UIT-R 370-7, **“VHF and UHF Propagation Curves for the frequency range from 30 Mhz to 1000Mhz for broadcasting services”**, 1951 1995.

- [11] EMF Project. Organización Mundial de la Salud (OMS), auspiciado por la ONU. Disponible en www.who.int/peh-emf.
- [12] www.cplus.org/rmw/download.html
- [13] www.supertel.gob.ec/
- [14] www.conatel.gob.ec/site_conatel