

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO**



**SISTEMAS DE PROPAGACION Y DISEÑO DE ANTENAS  
ENFOCADO AL ANALISIS DE ENLACES DE COMUNICACION**

**POR  
ING. ANTONIO CAYETANO LOZANO GARCIA  
TESIS**

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE  
LA INGENIERIA CON ESPECIALIDAD EN TELECOMUNICACIONES**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.**

**ABRIL DEL 2002**

SISTEMAS DE PROPAGACION Y DISEÑO DE ANTENAS  
ENFOCADO AL ANALISIS DE ENLACES DE COMUNICACION

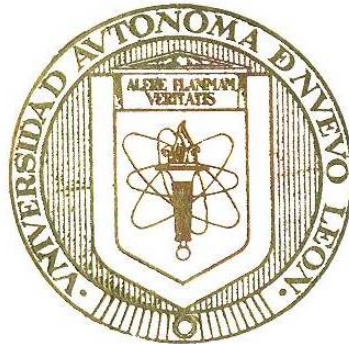
R.C.L.G.

TM  
Z5853  
FIME  
2002  
L69



1020147454

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



SISTEMAS DE PROPAGACION Y DISEÑO DE ANTENAS  
ENFOCADO AL ANALISIS DE ENLACES DE COMUNICACION

**POR**  
ING. ANTONIO CAYETANO LOZANO GARCIA  
**TESIS**

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE  
LA INGENIERIA CON ESPECIALIDAD EN TELECOMUNICACIONES

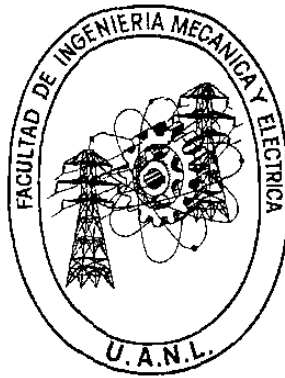
SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

ABRIL DEL 2002

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



SISTEMAS DE PROPAGACIÓN Y DISEÑO DE ANTENAS ENFOCADO AL  
ANÁLISIS DE ENLACES DE COMUNICACIÓN

POR

ING. ANTONIO CAYETANO LOZANO GARCIA

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA CON ESPECIALIDAD EN TELECOMUNICACIONES

SAN NICOLAS DE LOS GARZA N.L., ABRIL DEL 2002

977389

TM  
Z 5853  
.M2  
FINE  
2002  
.h69




FONDO  
TESIS

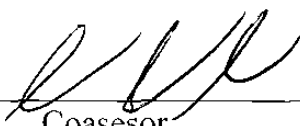
Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
División de Estudios de Post-grado


Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis en “Sistemas de Propagación y Diseño de Antenas enfocado al análisis de enlaces de Comunicación”, realizada por el alumno Ingeniero Antonio Cayetano Lozano García, matrícula 511114 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería con especialidad en Telecomunicaciones.

El Comité de Tesis

  
Asesor  
M.C. Fernando Estrada Salazar.

  
Coasesor  
M.C. Leopoldo R. Villarreal Jiménez

  
Coasesor  
M.C. Ciro Calderón Cárdenas

  
Vo. Bo.  
M.C. Roberto Villarreal Garza  
División de Estudios de Post-grado

Noviembre del 2001

# AGRADECIMIENTOS

Dios:

Por darme la vida, salud y conciencia para superarme día con día.

A mis padres:

Mario y Maria del Carmen por inculcarme los principios y valores familiares basados en la justicia, libertad, amor, así como la mejor herencia recibida que es la educación.

A mi esposa e hija:

Verónica Ivonne y Verónica Gissele, por su apoyo y comprensión en todo este tiempo dedicado a la investigación.

A mis hermanos y familia:

Maria del Carmen y Gonzalo Xavier, por sus consejos y recomendaciones, así como la enseñanza recibida a lo largo de mi vida.

A mis amigos y compañeros:

Por su gran apoyo para que este documento fuera una realidad.

No quiero dejar pasar a todos mis maestros, compañeros y amigos que de alguna manera me ayudaron para llegar hasta aquí, gracias a todos ellos.



# PRÓLOGO

Nos encontramos en una de las eras mas importantes de la humanidad, la modernización constante de tecnología en todas las ramas que involucra ciencia, como por ejemplo, el mas relevante que se dio a conocer hace un par de meses atrás; el descubrimiento del mapa genético del humano el cual nos brinda la oportunidad de manipular enfermedades que tiempo atrás era un sueño poder combatir las.

Debido a esto en la rama de la ingeniería con especialidad en comunicaciones, necesitamos herramientas que nos brinden una oportunidad mas certera en el estudio a un nivel profesional.

Es así como me nace la inquietud de agrupar en este texto, el estudio de una de las ramas con mas relevancia y quizás la mas importante en el área de las comunicaciones, los “Sistemas Radiantes”, (que es el estudio y análisis de las antenas) que son el enlace para comunicar dos puntos en el espacio en forma inalámbrica, a través de la creación de una señal herzeana.

La elaboración de esta obra me ha dado la oportunidad de involucrarme de manera activa en esta área como conocer el material mas reciente y realizar la vinculación con las teorías descritas desde la creación de las antenas, la confrontación continua sobre las teorías expuestas de los diferentes autores de textos consultados, a su vez me proporciona una idea clara para exponer esta tesis.

Me gustaría expresar que la fuente de inspiración mas importante han sido mis propios alumnos, de los cuales he podido percibir una necesidad incalculable por una orientación adecuada en este tema; debido a esta insuficiencia, mi preparación es cada vez mas escrupulosa, no sin dejar de mencionar que el contacto con las fuentes de trabajo de ellos, me ofrece la oportunidad de retroalimentarme y aprender a la par las tendencias actuales que se viven en la empresa moderna.

Hoy a través de esta tesis veo culminado un proyecto de investigación que tiene vivo varios años, el agrupamiento de estos conceptos que en su momento se consideran fundamentales en el desarrollo de un profesionista a nivel licenciatura, y por que no, pensar en la introducción de un curso a nivel post-grado.

Sería relevante definir la directriz para la formación y educación de un ingeniero con la visión de inicio de siglo en el campo de las comunicaciones, y observar como la revolución tecnológica se manifiesta muy claramente e influye en toda la sociedad, como en los Sistemas Satelitales, Redes Locales y el Internet. Recientemente recordamos como entró en operación el Sistema GLOBALCOM, compuesto de 66 Satélites de baja altitud para la transmisión de voz y datos en todo el mundo. La Fibra Óptica se extendió rápidamente, permitiendo la configuración de Redes Digitales de Servicios Integrados que ya son populares en Europa. En el futuro se acentuará el desarrollo de esta área, con énfasis en las Comunicaciones Inalámbricas.

Esta es la razón por lo que en esta investigación aglomero los principios básicos para entender y conceptualizar los elementos que hacen posible una Transmisión Inalámbrica.

Este trabajo de tesis va enfocado a la formación de recursos humanos en el área de Propagación y Análisis de antenas, principalmente para los estudiantes de ingeniería con especialidad en Telecomunicaciones y como material de apoyo para un nivel técnico y los aficionados en este tema, que día a día se van sumando por la importancia de las comunicaciones.

Hago hincapié y reitero el agradecimiento por todos y cada uno de mis alumnos por los cuales me esfuerzo y me dedico cada día por permanecer a la vanguardia en este tema.

Ing. Antonio C. Lozano García.

# INDICE

<b>Síntesis</b>		1
<b>Capítulo 1</b>	<b>Introducción</b>	
1.1	Descripción del problema a resolver	3
1.2	Objetivo de la tesis	4
1.3	Hipótesis	4
1.4	Limites del estudio	5
1.5	Justificación del trabajo	5
1.6	Metodología	5
1.7	Revisión Bibliográfica	6
<b>Capítulo 2</b>	<b>Consideraciones Generales y Propagación de las Ondas Electromagnéticas</b>	
2.1	Introducción	7
2.2	El teorema de reciprocidad	7
2.3	Mecanismo de radiación	8
2.4	Vector de Poyting	10
2.5	Características generales de la propagación electromagnética	11
2.6	Polarización de una onda electromagnética	12
2.7	Fenómenos que sufre la onda electromagnética al viajar por el espacio libre	12
	2.7.1 Refracción	12
	2.7.2 Atenuación	13
	2.7.3 Reflexión	13

2.7.4	Difracción	14
2.7.5	Absorción	14
2.8	Análisis de la propagación en el espacio libre	14
2.8.1	Ecuación de onda para el campo magnético en el espacio libre	15
2.8.2	Ecuación de onda para el campo eléctrico en el espacio libre	16
2.8.3	Ecuación de onda para el campo magnético en todos medios	17
2.8.4	Ecuación de onda del campo eléctrico para cualquier medio	18
2.9	Constante de propagación	20
2.9.1	Obtención de la constante de atenuación	21
2.9.2	Obtención de la constante de fase	21
2.10	La ionosfera	22
2.11	Caminos de Propagación	24
2.11.1	La onda directa	25
2.11.2	La onda terrestre	25
2.11.3	La onda ionosférica	25

### **Capítulo 3                    El Espectro de Radio-Frecuencia**

3.1	Introducción	27
3.2	Clasificación	27
3.3	División de bandas según su onda de propagación	28
3.4	Frecuencias muy bajas (10 a 30 Khz.) (VLF)	28
3.5	Frecuencias bajas (30 a 300 Khz.) (LF)	29
3.6	Frecuencias medias (300 a 3,000 Khz.) (MF)	29
3.7	Frecuencias elevadas (3 a 30 Mhz) (HF)	31
3.8	Frecuencias muy elevadas (30 a 300 Mhz) (VHF)	32
3.9	Frecuencias ultra elevadas (300 a 3,000 Mhz) (UHF)	36
3.9.1	Radiodifusión de modulación de frecuencia	37
3.9.2	Televisión	37
3.10	frecuencias súper elevadas (3,000 a 30,000 Mhz) (SHF)	38

3.11	Frecuencias extremadamente elevadas (30,000 a 300,000 Mhz) (EHF)	38
------	--	----

## **Capítulo 4                    Parámetros de las Antenas**

4.1	Introducción	40
4.2	Antenas isotropicas	40
4.3	Densidad de potencia	41
4.4	Ganancia y directividad	41
4.4.1	Ganancia directiva	42
4.4.2	Directividad	42
4.5	Ganancia de Potencia	44
4.6	Resistencia de la antena	45
4.6.1	Resistencia de radiación	45
4.6.2	Resistencia de perdidas	45
4.6.3	Resistencia total activa	46
4.7	Eficiencia	47
4.8	Impedancia de entrada de una antena	47
4.9	Ancho de banda, ancho de haz, y polarización	48
4.9.1	Ancho de banda	48
4.9.2	Ancho de haz	48
4.9.3	Polarización	49
4.10	Intensidad de radiación	50
4.10.1	Radian y esteradian	50
4.10.2	Angulo Sólido	51
4.10.3	Intensidad de Radiación	51
4.11	Patrón de radiación	52
4.11.1	Tipos de patrones de radiación	53
4.11.2	Lóbulos	55
4.11.3	Método para la obtención del patrón de radiación	55

4.11.4	Ejemplo para la obtención del patrón de radiación	57
4.12	Potencia radiada efectiva, aparente e isotropica	60
4.12.1	Potencia radiada efectiva	60
4.12.2	Potencia radiada aparente	60
4.12.3	PIRE	61
4.13	Perfil topográfico	61
4.13.1	Interpretación y uso de cartas topográficas	62
4.13.2	Ejemplo de trazo	69
4.14	Ejemplos de patrón de radiación	75
4.15	Sección de problemas propuestos	79

## **Capítulo 5            Transmisión Entre Dos Antenas en el Espacio Libre**

5.1	Introducción	80
5.2	Área efectiva	80
5.3	Transmisión entre dos antenas en el espacio libre	81
5.4	El ruido en el sistema de antenas	84
5.5	Ruido térmico	84
5.6	Razón de señal a ruido y factor de ruido	85
5.7	Temperatura efectiva de ruido	86
5.8	Alcance máximo entre dos antenas	87
5.9	Potencia de ruido en la antena	88
5.10	Sección de problemas resueltos	89

## **Capítulo 6            El Decibel**

6.1	Introducción	94
6.2	Decibeles en comunicaciones eléctricas	94
6.3	Aplicaciones en Telecomunicaciones	99
6.3.1	Ejemplo ilustrativo en telecomunicaciones	101

6.3.2	Nivel de silenciamiento	103
6.3.3	Comunicación vía satélite	105
6.3.4	Recepción de señales de televisión	105
6.3.5	Sistemas de recepción de televisión vía satélite	108
6.3.6	Ejemplos ilustrativos de recepción de señales de satélite	110
6.4	Sección de problemas resueltos	121
6.5	Sección de problemas propuestos	124

## **Capítulo 7            Análisis Matemático de las Antenas**

7.1	La antena elemental (el elemento de corriente)	125
7.2	La antena dipolo corta	134
7.3	La antena monopolo corta	135

## **Capítulo 8            La Antena Dipolo de Media Onda**

8.1	Distribución de corriente	137
8.2	Análisis matemático del dipolo de media onda	138
8.3	La antena monopolo cuarto de onda	142
8.4	Longitud efectiva ( $l_{ef}$ )	142

## **Capítulo 9            Arreglos de Antenas**

9.1	El concepto de arreglo	144
9.2	Arreglos parásitos	145
9.3	Arreglos colineal	147
9.4	Arreglo broad-side	149
9.5	Arreglo end-fire	151

## **Capítulo 10            Antenas Para Propósitos Especiales**

10.1	Antena logarítmica periódica	152
10.2	La antena de malla (o de lazo)	159

## **Capítulo 11            Antenas para Frecuencias Medias** **Antenas de Radiodifusión**

11.1	La banda de A.M.	161
11.2	Tipo de torre	161
11.3	Carga en el extremo	161
11.4	Longitud eléctrica óptima de una torre	163
11.5	Métodos de alimentaciones	163
11.6	Aislamiento	164
11.7	Sistemas de tierra	164
11.8	Torres radiantes sobre edificios	165
11.9	Conjunto direccional para radiodifusión	165

## **Capítulo 12            Antenas Transmisoras para F.M y T.V.**

12.1	Consideraciones generales	167
12.2	Antenas transmisoras de F.M.	168
12.3	Antenas transmisoras de T.V.	171

## **Capítulo 13            Antenas Receptoras para T.V.**

13.1	Características generales de las antenas para T.V.	176
13.2	El dipolo plegado para T.V.	179
13.3	Empleo de elementos parásitos	180



13.4	Orientación de la antena	184
13.5	Ondas reflejadas. Fantasmas en la imagen	185
13.6	Posición de la antena según las reflexiones	186
13.7	Recepción en zonas de sombra	188
13.8	Antenas para zonas distantes	190
13.9	Antenas para canales altos y bajos	194

## **Capítulo 14                    Conclusiones y Recomendaciones**

14.1	Conclusiones	199
14.2	Recomendaciones	199

<b>Bibliografía</b>	201
---------------------	-----

<b>Listado de Tablas</b>	203
--------------------------	-----

<b>Listado de Figuras</b>	204
---------------------------	-----

<b>Apéndice “A”</b>	Obtención del Decibel	209
---------------------	-----------------------	-----

<b>Apéndice “B”</b>	Divergencia, Gradiente, Rotacional y Laplaciano	222
---------------------	---	-----

<b>Apéndice “C”</b>	Frecuencias y Ganancias	225
---------------------	-------------------------	-----

<b>Glosario</b>	226
-----------------	-----

<b>Autobiografía</b>	227
----------------------	-----

# SINTEISIS

La presente tesis es una investigación sobre los sistemas de propagación, análisis de enlaces y el diseño de antenas enfocada al alumnado a nivel licenciatura para la carrera de Ingenieros en Electrónica y Comunicaciones.

El primer capítulo introduce a los conceptos básicos de radiación y propagación partiendo de las ecuaciones de Maxwell para cuando los campos (Eléctrico y Magnético) varían en el tiempo. Se explica a detalle la forma en que la Onda Electromagnética se genera, sus características y la forma en que se desplaza en el espacio. Se dan a conocer los fenómenos en los que se ve involucrada la Onda Electromagnética al viajar en el medio, también se muestra el desarrollo de la Onda para el Campo Eléctrico y para el Campo Magnético; y para terminar con la serie de conceptos, se mencionan a detalle los caminos de propagación de la señal según la frecuencia de operación.

Un punto que no se podía dejar de mencionar es la división de las bandas según la frecuencia de transmisión o como se le llama técnicamente, el Espectro de Radio Frecuencia, este espectro obedece a las normas dictadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Aquí también se nombran las características de propagación así como la aplicación de cada una de las bandas.

Los parámetros de antena son fundamentales para conocer a fondo todas y cada una de las características de los sistemas radiadores, ya sea que trabajen para Transmisión o Recepción de señal. Estudiar los parámetros nos define la operación real de un elemento radiador de Onda Electromagnética, en este capítulo también se amplía el concepto del trazo de un perfil topográfico (esencial para conocer el terreno del enlace entre dos puntos), para una señal de Ondas de Radio en línea de vista o como técnicamente se llama Perfil "K = 4/3"; se explica detenidamente como operar y leer los mapas topográficos, esto con el fin de encontrar la tabulación y graficar el tipo de suelo de un enlace de comunicación entre dos puntos a enlazar.

Para fortalecer los conceptos teóricos y el desarrollo de algunas fórmulas que se definieron en el capítulo de Parámetros de Antenas, se desarrolla un tema que estudia la forma de enlazar dos puntos a través de una antena transmisora y receptora en el espacio; aquí se analiza la potencia de la señal desde que la alimenta el transmisor y llega al receptor, pasando por el espacio libre (Medio de Transmisión de la Onda Electromagnética). Se amplían conceptos como ruido en el sistema de antenas, ruido térmico, temperatura efectiva de ruido, figura de ruido y por supuesto alcance máximo entre dos antenas.

Se le dedica un capítulo a la explicación del decibel utilizado para aplicaciones en sistemas de telecomunicaciones, se muestra la configuración y acomodo en grados de los satélites geoestacionarios en el cinturón de Clark y se visualizan algunos ejemplos ilustrativos de recepción de señales satelitales.

El desarrollo matemático de las antenas se lleva a cabo partiendo del análisis básico de la antena elemental (herramienta de diseño), teniendo este desarrollo, se toma como base para la solución de antenas prácticas, por ejemplo, la más simple y también la más comúnmente usada Dipolo de Media Onda (antena real).

Una vez entendido el desarrollo matemático de una antena se tiene que conocer que es un arreglo de antena, la forma en que se diseña y la operación de esta debe ser tolerante con esta rama de las comunicaciones ya que es a veces experimental, por lo tanto se define el papel que desempeñan cada uno de los elementos que forman el arreglo; este tema se enriquece con la incrustación de algunos arreglos que ya son conocidos y empleados en la industria.

Es importante que esta tesis concluya dando a conocer el diseño, operación y aplicaciones de algunas antenas para usos específicos, como por ejemplo, antenas para frecuencias medias o radiodifusión, antenas transmisoras de televisión y F.M. comercial, y naturalmente con las que cualquier persona tiene mayor contacto como las antenas receptoras de televisión; se muestra en este tema sus aspectos básicos, algunas ilustraciones que manifiestan el diseño de la antena y los cuidados que debe tenerse para operarlas correctamente.

Esta tesis se acompaña también de algunos apéndices que pueden ser de gran utilidad como apoyo para los temas que se trataron.