

METODOLOGÍA PARA EL PROCESO DE DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y
CARACTERIZACIÓN DE UNA ANTENA.

ANDREA BLANCO BLANCO



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2016

METODOLOGÍA PARA EL PROCESO DE DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y
CARACTERIZACIÓN DE UNA ANTENA.

ANDREA BLANCO BLANCO

Trabajo para optar al título de
INGENIERA ELECTRÓNICA

Director:

PhD. ERNESTO AGUILERA BERMÚDEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

A mi madre.

*Por ella y para ella, por su acompañamiento y confianza en los momentos
difíciles.*

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia por su cariño y buenos deseos.

A Andrea con quien nos hemos acompañado a recorrer nuestros caminos.

A Hernando por creer en mí y hacerme creer.

Al profesor Ernesto por brindarme su conocimiento y asesoría.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. ACERCAMIENTO AL PROCESO DE DISEÑO EN INGENIERÍA	16
1.1 DISEÑO EN INGENIERÍA.....	17
1.1.1 Ingeniería del diseño.....	18
1.1.2 Fuentes de información que sustentan un trabajo de diseño para el ingeniero [4]	18
1.1.3 Tipos de problemas de diseño	22
1.1.4 ¿Quiénes son los actores en el proceso de diseño?	23
1.1.5 ¿Por qué hay tantos modelos del proceso de diseño?.....	24
1.2 EL PROCESO DE DISEÑO EN INGENIERÍA	25
1.3 IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN.....	28
1.4 REALIMENTACIÓN	28
1.5 EVALUACIÓN DE CONCEPTOS	29
1.5.1 Lista de objetivos, restricciones, funciones y medios.....	29
1.5.2 Árbol de objetivos	30
1.5.3 Tabla de comparación por pares.....	31
1.5.4 Establecimiento de métricas para los objetivos.....	31
1.5.5 La casa de la calidad.....	32
1.5.6 Grafico morfológico.....	33
2. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN EN ANTENAS	34
2.1 DECLARACIÓN DEL PROBLEMA	37
2.2 DISEÑO CONCEPTUAL.....	38
2.2.1 Contextualización.....	38
2.2.2 Definición de requerimientos.....	38
2.2.3 Selección y modelado de antena.....	39
2.2.2 Acople de Impedancia y Diseño para EMC.....	45
2.2.3 Construcción y sintonización de prototipo	50
2.2.4 Consideración del ambiente de operación: un caso cotidiano.....	51
2.2.5 Preparación para el Mercado.....	52
2.3 MATERIALIZACIÓN Y DETALLE	53
2.4 CARACTERIZACIÓN.....	54
2.4.1 Rangos de medición	55
2.4.2 Proceso de caracterización	56
2.5 REALIMENTACIÓN	59

2.6	COMUNICACIÓN DEL DISEÑO	60
2.7	REGULACIÓN EN TELECOMUNICACIONES.....	61
2.7.1	Compatibilidad electromagnética e interferencia electromagnética.....	63
2.7.2	Radiación no ionizante.....	65
2.7.3	Tasa de absorción específica (SAR).....	65
2.7.4	Resumen de instituciones que regulan las telecomunicaciones.....	66
3.	CASO DE APLICACIÓN: DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA ANTENA DIPOLO.....	68
3.1	DECLARACIÓN DEL PROBLEMA	68
3.2	DISEÑO CONCEPTUAL	72
3.2.1	Definición de requerimientos.....	72
3.2.2	Selección de antena	75
3.2.3	Modelado de antena.....	75
3.2.4	Construcción y sintonización del prototipo (implementación).....	82
3.2.5	Pasos de la realimentación realizada.....	82
	CONCLUSIONES	87
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
	BIBLIOGRAFÍA	91
	ANEXOS.....	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo general del proceso de diseño de un producto	17
Figura 2. Flujo de información entre diseñador, cliente y usuario.....	23
Figura 3. Modelo del proceso de diseño numerado por etapas.	26
Figura 4. Esquema del proceso de diseño, implementación y caracterización de un producto.....	28
Figura 5. Árbol de objetivos.....	30
Figura 6. Casa de la calidad.....	32
Figura 7. Metodología para el proceso de diseño, implementación y caracterización de una antena.	35
Figura 8 Topologías comunes de filtros en microcinta.....	49
Figura 9. Pirámide del diseño para EMC.....	50
Figura 10. Esquema de organización de componentes para ensamble.	51
Figura 11. Evolución de los componentes que se tienen en cuenta en simulación de una antena.....	52
Figura 12. Detalle de las dimensiones de una antena.....	54
Figura 13 Representación de cámara anecoica.....	55
Figura 14. Patrón de polarización de una onda.....	57
Figura 15. Modelo hoja de datos para una antena.	61
Figura 16. Camales de la banda de 2.4 GHz.....	68
Figura 17 Patrón de radiación en tercera dimensión para una antena monopolo.....	71
Figura 18 Patrón de radiación típico de una antena dipolo de media longitud de onda.....	71
Figura 19. Árbol de objetivos para el caso práctico.	73
Figura 20 Antena parche.....	76
Figura 21 Dipolo de media longitud de onda con su patrón de radiación en 3D.....	77
Figura 22. Esquema de línea coplanar a microcinta para antena balanceada.....	78
Figura 23. Dipolo impreso con balun tipo J.....	78
Figura 24. Dipolo con balun vía hueco.....	79
Figura 25 Patrón de radiación en coordenadas polares del dipolo correspondiente a la figura 25.....	81
Figura 26. Frecuencia de resonancia para dimensiones correspondientes a la figura 27.....	82
Figura 27 Medidas reales después de implementación.....	83
Figura 28. Respuesta del parámetro S11 para modelo correspondiente a la Figura 27. Grosor placa dieléctrica de 1 mm, grosor de placa de cobre de 0.2 mm.	84

Figura 29. Antena dipolo a 2.4 GHz, medidas correspondientes a la modificación del modelo.....	84
Figura 30 Respuesta del parámetro S11 para modelo correspondiente a la Figura 29.	85
Figura 31. Resultados finales después de sintonización artesanal.....	86
Figura 32. Diagrama de radiación.....	100
Figura 33. Elipse de polarización.	105

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Actividades del proceso de diseño en ingeniería.....	25
Tabla 2. Clasificación de características en objetivos, restricciones y funciones.	30
Tabla 3. Matriz de comparación por pares	31
Tabla 4. Métricas para los objetivos de un proyecto.	31
Tabla 5. Grafico morfológico.....	33
Tabla 6. Actividades asociadas a cada etapa de la metodología	36
Tabla 7. Criterios comunes de comparación de antenas.	39
Tabla 8. Aplicaciones y antenas típicas según rango de frecuencia.	40
Tabla 9 Patrones de radiación típicos en antenas.....	40
Tabla 10. Tipos de antena y características típicas.	41
Tabla 11. Comparación de métodos numéricos en antenas.....	44
Tabla 12 Resumen de herramientas computacionales de simulación para electromagnetismo.	45
Tabla 13. Resumen de instituciones que desarrollan documentos que sirven de regulación en el campo Ingeniería Electrónica.	62
Tabla 14 Resumen de instituciones que desarrollan documentos para la reglamentación técnica y/o legal de las telecomunicaciones.	66
Tabla 15 Comparación de rango de cuatro antenas de WiFi.	69
Tabla 16 Comparación de dimensiones entre 4 routers sin antena externa.....	69
Tabla 17. Tabla de características para antena dipolo en banda de 2.4 GHz.	74
Tabla 18 Grafico morfológico para comparación entre antenas monopolo y dipolo. 75	
Tabla 19 Grafico morfológico para comparación de características entre antenas alámbricas y tipo parche.....	75
Tabla 20. Resumen de costos de antena diseñada.....	82

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A - CARTILLA RESUMEN: METODOLOGÍA PARA EL PROCESO DE DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA ANTENA.....	94
ANEXO B – PARÁMETROS DE ANTENA.....	99
ANEXO C – FORMULARIO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ANTENA EN CÁMARA ANECOICA DE LA EMPRESA ETS.LINDGREN ¹	100

¹ Empresa innovadora de sistemas y componentes para la detección, medición y control de energía electromagnética, magnética y acústica.

RESUMEN

TITULO: METODOLOGÍA PARA EL PROCESO DE DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA ANTENA²

AUTOR: ANDREA BLANCO BLANCO³

PALABRAS CLAVE: PROCESO DE DISEÑO EN INGENIERÍA, CARACTERIZACIÓN DE ANTENAS, METODOLOGÍA.

DESCRIPCIÓN:

Existe la tendencia de seguir instructivos paso a paso cuando se requiere un diseño para dar solución a un problema, actitud que se adopta desde la etapa estudiantil y que de no corregirse pasa a hacer parte de la vida profesional. Los modelos del proceso de diseño que se encuentran en la literatura se centran en la obtención de productos de consumo masivo, por esto, es necesario reflexionar acerca de la actividad de diseño como origen de soluciones en ingeniería [1].

Este trabajo de grado es de tipo expositivo, sintetiza conocimientos de diferentes fuentes, para hacer una evolución desde el concepto de diseño en general hasta una metodología aplicable en concreto a la obtención de una antena. No pretende ser un recetario para obtener una antena funcional, sino un conjunto de pasos que el lector pueda seguir según su criterio, sustentado en el entendimiento de los conceptos que dan origen a la metodología definida y que se exponen en el mismo trabajo.

La información contenida en el documento final del trabajo de grado debe ser una guía de consulta que no limite el trabajo del ingeniero. El interés está centrado en mostrar la importancia de seguir un proceso para obtener un producto y la utilidad de algunos tipos de herramientas, pero se deja campo a la libre elección del lector las herramientas que usa para lograr sus objetivos.

² Trabajo de grado

³ Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Phd. Ernesto Aguilera Bermúdez.

ABSTRACT

TITLE: METHODOLOGY FOR THE DESIGN PROCESS, MANUFACTURING AND CHARACTERIZATION OF AN ANTENNA⁴

AUTOR: ANDREA BLANCO BLANCO⁵

KEY WORDS: ANTENNA DESIGN METHODOLOGY, ENGINEERING DESIGN PROCESS, ANTENNA CHARACTERIZATION.

DESCRIPTION:

The usage of cookbooks for different disciplines is common in student life, when this attitude is not corrected it becomes part of professional life. There are models of the design process especially focused on consumer products, therefore it is necessary to give some thoughts to the design activity as the origin for solutions in engineering.

This thesis takes information from different sources and expose them in this book. Going from the "design" concept in everyday life to a methodology to obtain an antenna. This thesis does not pretend to be a cookbook to make a functional antenna, but a set of steps that can be followed by the reader on his own discretion, based on the understanding of the methodology.

The aim of this work is to be a guide that can be taken into account, truly believing that will bring a positive effect on the final results when designing, building and testing an antenna. The reader is free to choose his tools to achieve his goals, getting from this book some guidance.

⁴ Bachelor Thesis.

⁵ Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Phd. Ernesto Aguilera Bermúdez.

INTRODUCCIÓN

La actividad de diseñar es común en el desarrollo de la ingeniería como profesión. A través del tiempo, y de la mano con la evolución de las técnicas en procesos productivos, ha evolucionado el entendimiento y uso del proceso de diseño en ingeniería, así como mecanismos para la revisión de los resultados de las etapas de manufactura. Atrás quedaron los tiempos donde se daban procesos de producción industrial de los cuales no se podía garantizar la calidad de sus resultados.

El estudio de la actividad de diseño y construcción de productos ha aumentado la eficiencia de estos procesos haciendo más confiable la labor del ingeniero. La apropiación de los modelos del proceso de diseño y su mecanización permiten dedicar mayores esfuerzos en el perfeccionamiento del producto que se desea producir. En este sentido, un modelo de un proceso de diseño debe entenderse como una guía donde se deben dedicar esfuerzos en el desarrollo de cada, dejando a un lado la incertidumbre de qué vendrá después, puesto que ya está preestablecido.

Este documento tiene como propósito introducir al lector en la actividad de diseñar y su rol en la ingeniería para sembrar la inquietud sobre la importancia de estructurar el proceso de diseño de antenas en pasos que se hagan de forma repetitiva independiente del objeto específico bajo diseño. De forma que, mediante la repetición, se convierta en hábito el seguimiento de un proceso de diseño y el lector pueda centrar su atención en la búsqueda y dominio de una solución para una necesidad concreta en un servicio de telecomunicaciones.

Los contenidos de este texto se han pensado para generar curiosidad sobre algunos temas relevantes en el campo del diseño de antenas, la labor de apropiarse de ellos para obtener mejores beneficios de la metodología es labor del lector, se le invita a profundizar los conocimientos sobre las herramientas que se exponen brevemente. No es intención de este libro limitar la creatividad, sino encaminarla por medio de unos pasos descritos que pueden desarrollarse según criterio propio y de acuerdo a las expectativas del diseñador, por tanto, este no constituye un recetario, sino que debe entenderse como una propuesta para obtener una antena siguiendo un conjunto de pasos que son útiles, pero no inamovibles, estando la metodología descrita susceptible a modificaciones según la conveniencia de quien la use.

1. ACERCAMIENTO AL PROCESO DE DISEÑO EN INGENIERÍA

Un **diseño** es el fruto de un proceso de pensamiento que se da para obtener un resultado. Podría pensarse que los diseños siempre se hacen de forma consciente y metódica, pero todos, aún sin darse cuenta, han producido diseños alguna vez, el ser humano lo hace de forma inconsciente desde que tiene uso de razón. Algunos ejemplos cotidianos de esto son el diseño de un espacio acogedor, el diseño de una comida y el diseño de un atuendo[1]. Pero no se le llama **diseñador** a toda persona que produce diseños como los tres mencionados, sino a quien realiza la actividad consciente y planeada de diseñar con el fin de obtener un producto [2].

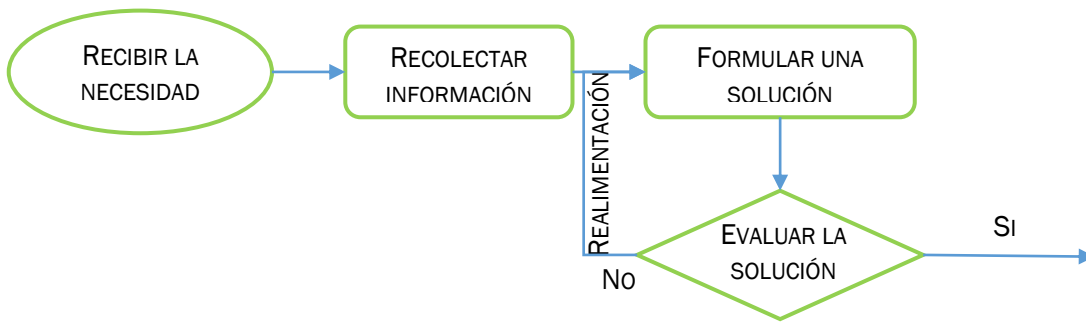
Tomando tres ejemplos comunes de productos diseñados como son un cepillo de dientes, una silla y un jabón de baño se ve que cada uno da respuesta a una necesidad: higiene dental, lugar de descanso e higiene corporal, respectivamente. Estos productos han sido el resultado de un diseño que se vale de preguntas para dar satisfacción al usuario final porque no todos los cepillos, ni todas las sillas, ni todos los jabones son iguales. Un diseñador por medio de cuestionamientos ha llegado a conocer mejor la necesidad y formular alternativas de solución, se ha valido de una técnica para desarrollar el producto y ha evaluado si la solución que entrega satisface del todo la necesidad.

Reflexionando sobre los seis ejemplos mencionados anteriores, se concluye que no es necesario tener formación técnica para obtener una cena deliciosa, una sala acogedora o un atuendo apropiado, aun cuando existen profesiones que se fundamentan en su estudio; pero si lo es para diseñar el cepillo de dientes, la silla y el jabón. Además, la revisión de los pasos generales que se siguen da lugar a la idea de que es posible seguirlos para obtener cualquier producto. Esto da lugar al concepto de **proceso de diseño**, que es el conjunto de pasos que se deben seguir de forma consciente un diseñador para obtener una solución a una necesidad [3].

La idea de que el proceso se debe planear aporta un complemento a la definición de diseñar: *crear un producto de acuerdo a un plan* [4]. En la Figura 1 se muestra un esquema de las etapas comunes para crear cualquier producto. El diseñador **recibe una necesidad** que ha sido identificada, **recolecta información** sobre dicha necesidad y **formula una solución** (incluyendo la manufactura y el control de calidad), que debe ser evaluada de acuerdo a unas expectativas identificadas en la recolección de información. Además, incluye un lazo de realimentación que se hace necesario cuando la solución no es satisfactoria y se debe proceder a evaluar otras alternativas.

El modelo general que se presenta en la Figura 1 es válido para la obtención de productos de diferentes profesiones, por esto, se ha estudiado en múltiples disciplinas y se han propuesto modelos más elaborados y descriptivos, llegando a constituir una guía detallada de cómo seguir los pasos de una forma más

Figura 1. Modelo general del proceso de diseño de un producto



efectiva.

1.1 DISEÑO EN INGENIERÍA

Como profesión, la ingeniería aplica los conocimientos y métodos científicos a la invención, el diseño, el desarrollo, la construcción, el mantenimiento y el perfeccionamiento de tecnologías, estructuras, máquinas, herramientas, sistemas, materiales y procesos para la resolución de problemas prácticos; y, para obtener sus productos hace uso del proceso de diseño [2]. La ingeniería tiene como objetivo general dar soluciones a problemas en diferentes campos de acción, de esto se puede ver que el diseño y la ingeniería se relacionan estrechamente. El diseño le sirve de herramienta para facilitar la creación de nuevos productos, procesos, sistemas y organizaciones, que son los productos con los que la ingeniería contribuye a la sociedad.

En este contexto, un *proceso de diseño* es un seguimiento sistemático de pasos para llegar a una solución a un problema planteado en un campo de la ingeniería. Por supuesto, este proceso no es unificado, no garantiza el éxito, no es aplicable a todos los casos y no se entiende como el mejor conocido, tal vez haya tantos modelos como diseñadores, dado que es un proceso de pensamiento y está sujeto a la percepción de quien lo usa, sin embargo, con el paso del tiempo se han definido y documentado algunas secuencias de pasos que han probado su efectividad, esto no se dio al primer intento y es el resultado de la prueba y error de muchos diseñadores en diversas áreas de la ingeniería [5].

1.1.1 Ingeniería del diseño

La ingeniería del diseño es una disciplina que se distingue de otras porque sintetiza nueva información para realizar productos, establece calidad mediante la definición de funcionalidades e influencia los aspectos tecnológicos, económicos y de mercadeo de la producción [6]. De esto se derivan las metodologías para el **proceso de diseño** en ingeniería que aportan beneficios al ser seguidas, algunos son:

1. Reducir el costo
2. Desarrollar una nueva forma
3. Disminuir el riesgo
4. Reducir la inconveniencia
5. Alcanzar resultados competitivos
6. Desarrollarse en el mercado
7. Adaptarse a los cambios sociales

1.1.2 Fuentes de información que sustentan un trabajo de diseño para el ingeniero [4]

La información pertinente para un proyecto de diseño suele ser de varios tipos y es aplicable en diferentes etapas del proceso de diseño. La información más útil es la que se obtiene de los elementos en la siguiente lista:

- **Usuarios** Aportan opiniones sobre productos similares en el mercado de las que se puede aprender cuales son los puntos fuertes que se deben mantener en el diseño que se va a realizar y los que se deben cambiar. Además, existen estudios de mercado que también aportan información a preguntas concretas formuladas por el grupo de diseño en forma de encuesta.

- **Diseños similares** Cuando se diseña una solución se espera obtener una versión novedosa de la solución a un viejo problema o a un problema nuevo, sin embargo, los problemas de ingeniería suelen ser similares por mucho o poco a otros que ya han sido resueltos. La revisión de dichas soluciones por medio de la ingeniería inversa o de la documentación técnica resulta de gran ayuda a la hora de generar las alternativas de solución. En este punto son muy importantes las publicaciones científicas, que estén avaladas por una institución reconocida.

- **Modelos analíticos** Se encuentran en los reportes técnicos y suelen estar asociados a herramientas computacionales que los utilizan y les dan solución mediante los métodos numéricos. Es necesario tener en cuenta que los métodos analíticos son una aproximación al modelo real, en que se tienen que hacer

muchas suposiciones y puede llevar a no considerar aspectos clave en algún diseño en particular.

- *Materiales*: la información completa de los materiales que se van a usar en el diseño debe estar disponible de antemano, de forma que se pueda analizar si es necesario hacer ajuste en alguno de los objetivos que tengan que ver con este punto.

- *Manufactura*: el diseñador debe tener conocimiento acerca de cómo se dan los procesos de manufactura del tipo de producto que desea diseñar, así como sus componentes. Esto contribuye al modelo del diseño y puede llegar a ser crítico, pues si el diseñador incluye un componente que no es adecuado, por ejemplo, una barra de una longitud que no es posible obtenerla, en el proceso de construcción se obtendrá una barra de la longitud requerida uniendo dos o más, lo que puede llevar al fallo del diseño.

- *Costos* este punto está muy ligado con el de manufactura, pues el diseñador debe conocer los costos de producción y de los materiales, antes de escoger algunas características o definir un cronograma para el proyecto.

- *Estándares técnicos* Dependen del área de conocimiento a la que esté asociado el diseño, las asociaciones de ingeniería en diferentes campos tienen estándares disponibles para los ingenieros que facilitan su trabajo sirviéndoles de guía o dando lineamientos que hacen mejores sus diseños. Para los productos de consumo masivo se utiliza habitualmente estándares de calidad como ISO.

- *Regulaciones gubernamentales* Son normativas en las que la vigilancia de su cumplimiento está a cargo del gobierno. Por lo general se asocian a caracteres técnicos o a protección de los derechos humanos de alguna forma.

- *Ciclos de vida de los productos* Cuando se revisan los productos similares, también se necesita tener en cuenta el ciclo de vida de estos productos, para tener una idea de cómo se dará el ciclo del producto diseñado desde la creación hasta la disposición cuando ya no es útil o no funciona, es decir su disposición. Está asociado a regulaciones para proteger el medio ambiente y la salud.

Además, el diseño como actividad requiere compromiso de cada diseñador para con sus compañeros de equipo, los clientes, los usuarios, los fabricantes y todas las personas que alguna vez estarán relacionadas de alguna forma con el producto. Los ingenieros se ven sujetos a la moral, las obligaciones, la ética y el deber, así como a su interpretación de lo correcto y lo incorrecto (15).

Las sociedades de ingenieros desarrollan códigos de ética disponibles para sus miembros, para nombrar algunas, existen el código de ética de IEEE y el código de ética de la ASME. Estos códigos ayudan al ingeniero a tomar decisiones cuando se presentan situaciones problemáticas en los que su ética pueda verse comprometida. Por regla general los códigos consideran el bienestar común por encima del beneficio potencial o económico que pueda traer un proyecto.

La adherencia del ingeniero a estas prácticas es vigilada, en el caso de la ingeniería electrónica por el Consejo Profesional Nacional de Ingenierías Eléctrica, Mecánica y Profesiones afines, entidad pública que tiene la función de inspeccionar y vigilar el ejercicio de la ingeniería, creado a partir de la ley 51 de 1986; mediante disposiciones legales, cuenta con facultades para penalizar o suspender del ejercicio profesional a quien viole el código de ética. Además de los códigos de ética, el ingeniero también cuenta con las leyes y los estándares de seguridad que se relacionan con su profesión. A continuación, se listan algunos tipos de guías que se deben tener en cuenta en Ingeniería.

- Normas y Estándares Las normas y estándares son documentos de carácter técnico, que pretenden garantizar el intercambio de información o partes entre sistemas que cumplan funciones similares. Crear un producto con componentes estandarizados garantiza que pueda ser replicado en otro proceso de manufactura [7]. Son modos acordados de hacer algo, que se han obtenido del conocimiento de personas competentes en el campo que abarcan, teniendo en cuenta la cadena de distribución desde los fabricantes hasta el usuario final [8].

El uso de normas y estándares es voluntario, lo que no evita que se tomen como base en reglamentaciones legales que se crean para tratar de que los productos que se elaboren en un sector productivo sean más seguros, más aptos, de mejor calidad, a la vez que se garantiza la compatibilidad y seguridad en el uso entre diferentes marcas [9].

En las ingenierías los estándares o normas se desarrollan principalmente con dos fines. Primero el de hacer compatible el trabajo de los ingenieros sin importar el lugar en el que trabajen, haciendo que puedan compartir sus

experiencias y pasen a engrosar el conocimiento sobre la disciplina, dado que al trabajar todos guiados por las mismas normas sus trabajos son comparables. Segundo, garantizar la seguridad de todas las personas que están en contacto con el trabajo del ingeniero, es decir, los ingenieros, personal de operaciones, usuarios, clientes y la comunidad en general.

- **Certificación** La certificación de los productos nace para darle confianza al usuario o al cliente a la hora de adquirir un producto o servicio, con base en unos estándares de calidad. Si el control de calidad lo hace la misma empresa que produce, se trata de certificación por primera parte; si es el cliente quien hace una auditoría sobre el producto, se trata de certificación por segunda parte; finalmente, si es un organismo que no es ni comprador ni vendedor del producto quien lo certifica, se trata de certificación por tercera parte [10].

Las instituciones que certifican los productos y procesos de otras, no están ligadas internamente con las empresas que certifican, pero como todas las demás empresas para poder certificar a otras deben haber ganado credibilidad. Como se trata de un organismo que se dedica a "certificar productos" requiere objetividad, independencia, imparcialidad, entre otros, para entregar una garantía escrita de que un producto o proceso cumple con un estándar [11]. En el caso de Colombia, la institución certificadora nacional es ICONTEC, que está sujeta a ISO.

- **Acreditación** Es el proceso por el cual se certifica un organismo de certificación. A nivel mundial la organización ISO les da a los organismos de certificación la posibilidad de intercambiar y armonizar sus prácticas de certificación. Además, les acredita mediante estándares que conocen bien y que son construidos en conjunto por las entidades que representan cada país miembro.

ISO declara que los organismos acreditados son competentes e imparciales; les permite, a nivel internacional, conseguir la aceptación de sus prácticas y el reconocimiento de sus competencias. Unifica y simplifica los numerosos trámites de reconocimiento de las entidades; establece y promueve la confianza a nivel nacional e internacional de estas entidades.

- **Reglamentación** Son lineamientos de obligatorio cumplimiento que se condensan en un conjunto de leyes o decretos que mandan el cumplimiento de una norma o estándar. Por esto, se habla de entes del Estado que se encargan de definir la legislación para un campo de acción. Sin embargo, no es el Estado

quien crea las normas, las leyes se basan en el trabajo de organismos certificados y acogen las normas que han probado efectividad [4].

En Colombia, ICONTEC adopta normas de instituciones internacionales, y las adapta cuando lo considera necesario. En el campo de aplicación de la Ingeniería Electrónica es común que no se creen estándares en el país, puesto que resulta costoso y no se cuenta con el equipo material ni humano, es por esto que las regulaciones se basan en estándares creados por institutos privados o gubernamentales de países europeos o de Estados Unidos.

1.1.3 Tipos de problemas de diseño

- Selección de un diseño Consiste en seleccionar un producto ya existente para dar solución a un problema. Para resolver un problema de selección de diseño se debe comenzar con una necesidad clara que aporte requerimientos específicos con los que se pueda evaluar las soluciones potenciales [12].
- Diseño de configuración Consiste en organizar o ensamblar los componentes de un producto para obtener un resultado diferente. Ejemplo: la configuración de un servidor, todos los componentes existen, pero es la configuración que se le dé la que determina la función que va a realizar [12].
- Diseño paramétrico Se concentra en encontrar los valores exactos para un grupo de variables que caracterizan un objeto bajo estudio. Ejemplo: optimizar un sistema de riego. Muchos de los análisis de estos problemas se encuentran contenidos en manuales [13].
- Diseño de una rutina consiste en crear un documento con los pasos bien definidos para problemas específicos. Ejemplo: un recetario [13].
- Diseño original Se da cuando el problema requiere el desarrollo de un proceso, componente o ensamble que no existía previamente. Puede ser la solución a un nuevo problema dado el avance de la ciencia y la tecnología, o una solución novedosa a un problema existente y que ha sido solucionado por otros medios. Este tipo de diseño comienza con los requerimientos y el conocimiento del estado del arte [4].

- **Rediseño** Comienza con un producto existente que se va a estudiar para ser modificado para cumplir nuevos requerimientos. Se requiere por la aparición de nuevos procesos, nuevos materiales, nuevas tecnologías, etc. Su objetivo es producir una mejora substancial de la situación actual, mediante la modificación de sus especificaciones. Su principal beneficio es la reducción de los costos con relación a un diseño original. Ejemplo: cambio de gasolina a gas vehicular en los taxis [4].

1.1.4 ¿Quiénes son los actores en el proceso de diseño?

El proceso de diseño gira en torno a una necesidad a la que es necesario darle solución. Siguiendo la necesidad desde que se identifica hasta que se resuelve se puede ver quienes se involucran en el proceso. Quien tiene la necesidad será el usuario, quien la resuelve es el diseñador (ingeniero) y quien la expone al diseñador y requiere la solución es el cliente.

Ejemplo: en una aerolínea de vuelos privados se requiere un nuevo avión para una cantidad reducida de pasajeros VIP.

Un representante de la aerolínea buscará ayuda en un diseñador para que le presente una propuesta que dé respuesta a su necesidad, A este representante se le llama cliente. El cliente a pesar de ser quien busca la solución, no será quien la use habitualmente, los pasajeros del avión serán los usuarios, con esto, ya se ha hablado de los tres actores que se involucran en el proceso de diseño.



Figura 2. Flujo de información entre diseñador, cliente y usuario.

En la Figura 2 se muestra que el flujo de información entre usuario, cliente y diseñador, se da entre cada uno de los actores y los otros dos. La información en

la que se debe basar la propuesta viene del usuario; la propuesta, del diseñador; y el aval de la propuesta, del cliente.

La producción de una solución está orientada a la satisfacción del usuario final, las preferencias de los usuarios toman un lugar muy importante en la información pertinente cuando se trata de productos de consumo, pues la producción se hace con fines de posicionar un producto en el mercado. Se hacen estudios de mercadeo, revisiones de productos similares en el mercado y entrevistas con un grupo de usuarios potenciales; estas herramientas aumentan la probabilidad de éxito del producto en el mercado.

La ingeniería da soluciones a problemas concretos que no siempre son reproducibles en masa; como ejemplo de esto se tienen las edificaciones, las soluciones de distribución de energía eléctrica, la explotación de un pozo petrolero. Para estos casos no se suele acudir la opinión de un usuario final, que serían los posibles residentes de las edificaciones, los residentes de una zona, los conductores que utilizarán gasolina en sus vehículos. En casos como estos, a pesar de que la solución debe ser igualmente satisfactoria para el usuario final, no se recurre a estudios de mercadeo ni grupos de prueba. Además, el proceso de diseño de la solución solo tendrá dos actores entre los que se dará el flujo de información: cliente y diseñador (individuo o grupo de diseño).

1.1.5 ¿Por qué hay tantos modelos del proceso de diseño?

Un modelo es una topología o metodología que describe los pasos que se deben seguir para obtener un resultado. Se han hecho muchos cambios a través del tiempo desde los primeros modelos de los procesos productivos, en la literatura se mencionan algunos acercamientos al proceso de diseño desde el siglo XX, pero fue en los años 50 cuando se hizo más fuerte la necesidad de seguir un proceso para la producción de armamento y otros enseres para la guerra. De esta forma se comenzaron a planear algunas acciones y a hacer controles de calidad al producto final [14].

La necesidad de reducir las pérdidas durante el proceso productivo y revisar los productos finales es intuitivo y no solo fue identificada por una empresa, sin embargo, en esa época no había el nivel de comunicación que se tiene en la actualidad y esta información se mantenía en privado. Se puede decir que en ese punto hubo un modelo del proceso de diseño para cada empresa, pero este hecho no es algo que haya quedado en el pasado, en la actualidad los modelos son diversos [15].

El desarrollo de profesiones dedicadas a la producción como lo son el diseño industrial y la Ingeniería Industrial, independiente del nombre que se les haya dado cuando se crearon, es evidencia de la importancia que se le dio al proceso de producción. En la medida que aumento la comunicación entre empresas, se comenzó a identificar la similitud entre los modelos que se utilizaban en todo el mundo, en diferentes lugares, para diferentes productos; y se fueron proponiendo modelos más completos que reunían las consideraciones de unos y otros [15].

La formulación de modelos está sujeta a la percepción que se tenga de ellos, esto ha hecho que las etapas que definen los diferentes modelos sean similares, pero que tengan diferentes enfoques. El flujo de información y los resultados parciales y totales se miden de acuerdo a diferentes criterios, lo que hace que la topología del modelo varíe, así como su nombre y su descripción. Cuando se trata de seguir un modelo, se puede escoger incluso uno propio, el diseñador es libre de escoger como llevar a cabo su trabajo y los indicadores de éxito del mismo [4].

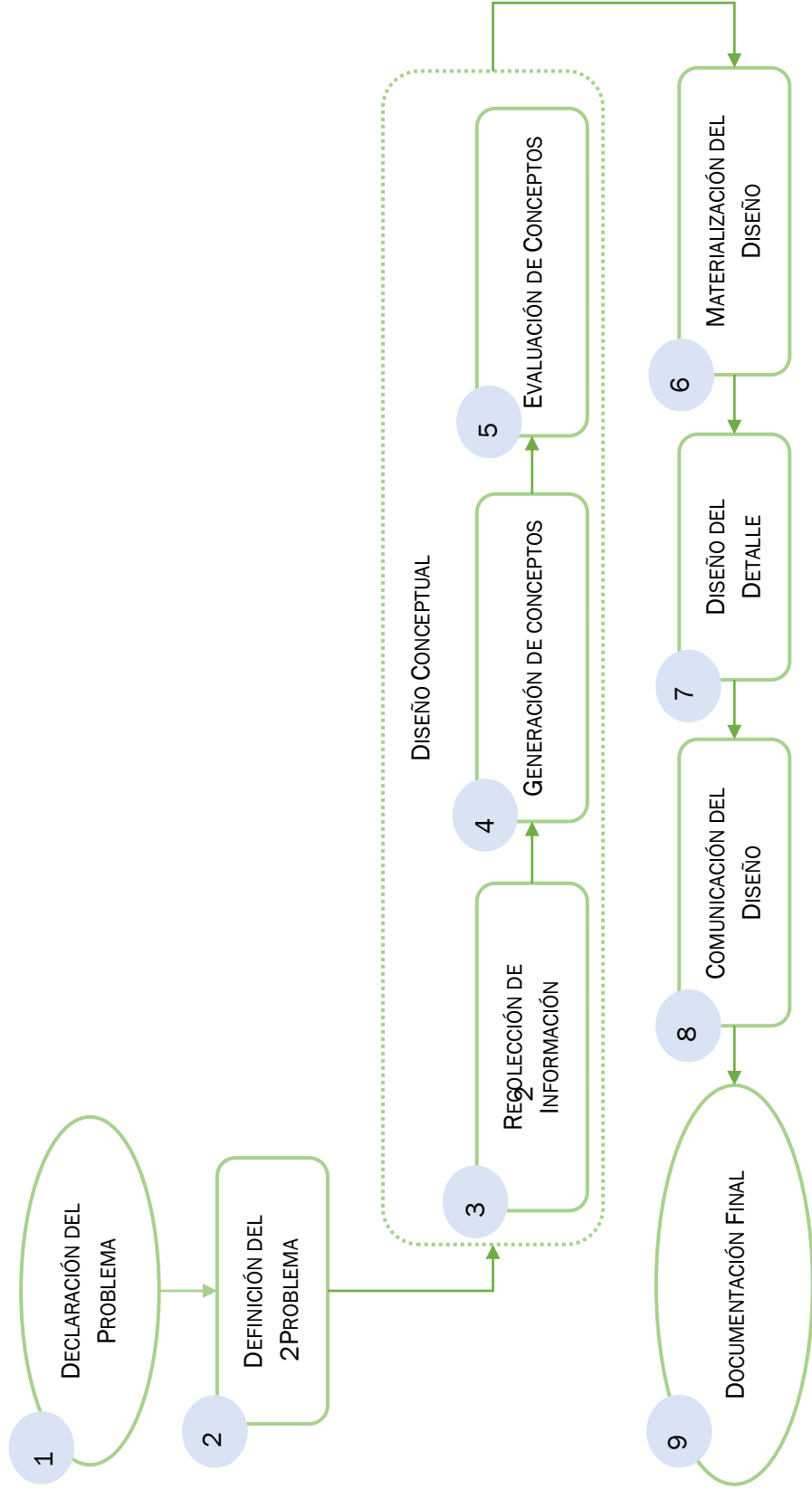
1.2 EL PROCESO DE DISEÑO EN INGENIERÍA

En esta sección se expone de forma breve un modelo del proceso de diseño en ingeniería que ha sido adaptado de la literatura con base en las actividades similares que constituyen una etapa. El modelo del proceso de diseño en ingeniería que se presenta que este capítulo puede ser usado en general para la creación de cualquier producto de ingeniería. En la Figura 3 se muestra un esquema del proceso de para un producto tangible en general. Las etapas 1 y 9 son la entrada y salida, respectivamente, del proceso de diseño. Las etapas 3, 4 y 5 hacen parte del diseño conceptual, donde se produce la solución. A continuación, se describe cómo se da el desarrollo de cada etapa.

En la Tabla 1 se presentan las actividades representativas de cada etapa, que resumen como se puede aplicar el proceso de diseño presentado en la Figura 3.

Tabla 1. Actividades del proceso de diseño en ingeniería.

Figura 3. Modelo del proceso de diseño numerado por etapas.



Etapa	Actividades Asociadas
1	Descripción de la necesidad en un párrafo corto (A cargo del Cliente)
2	Revisión de la declaración para identificar 1. Soluciones implícitas, 2. Errores y 3. Ambigüedades. Clarificación del problema, en revisión conjunta con el cliente, por medio de preguntas sobre el problema. Identificación de 1. Objetivos, 2. Restricciones, 3. Funciones y 4. Medios, para el diseño, a partir de la información del cliente.
3	Recopilación de información de diferentes fuentes. 1. Usuarios, 2. Diseños similares, 3. Métodos analíticos, 4. Materiales, 5. Manufactura, 6. Costos, 7. Estándares técnicos, 8. Regulaciones gubernamentales, 9. Ciclo de vida de los productos y demás pertinentes. Organización de la información según orden de uso en el proceso de diseño.
4	Lluvia de ideas Búsqueda de medios para lograr los objetivos y las funciones acogidos a las restricciones. Evaluación de alternativas.
5	Formulación teórica de la solución. Modelado mediante métodos numéricos (opcional) Simulación (opcional) Análisis de resultados teóricos. Revisión de concordancia de los resultados con lo esperado.
6	Revisión de aspectos estéticos y de usabilidad del diseño. Definición de componentes, partes y materiales del diseño. Revisión de cumplimiento de reglamentaciones asociadas al diseño.
7	Revisión de las características del producto orientada a refinarlo. Creación de plano CAD del producto. Creación de un Manual de Usuario. Creación de listado de competentes existentes en el mercado, con referencia. Creación de instrucciones especiales para su manufactura.
8	Comunicación al cliente: revisión y aceptación del diseño. Comunicación al departamento de manufactura: entrega de plano CAD, listado de componentes e instrucciones especiales. Comunicación al usuario: se hace por medio del Manual de usuario.

1.3 IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN

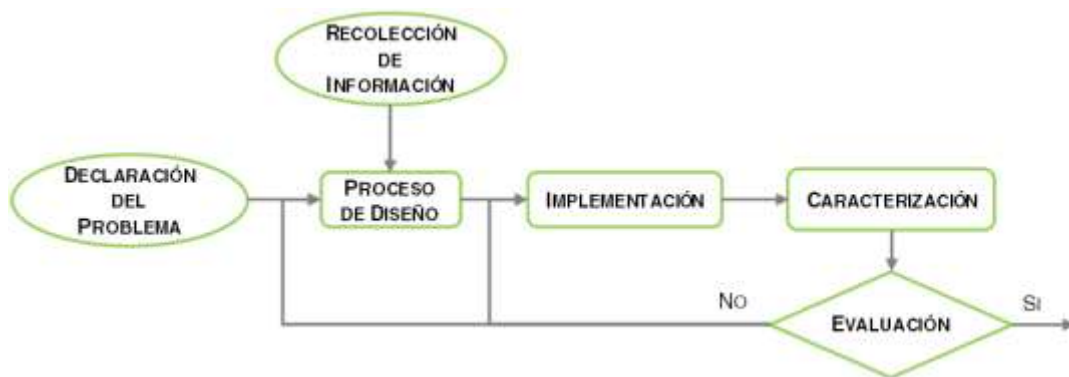
En la Figura 4 se muestra un esquema donde se incluye las etapas de implementación y caracterización con una etapa de evaluación final donde se revisa el resultado de la construcción del diseño y se decide si cumple con las expectativas.

La *implementación* corresponde a la etapa donde se produce el producto o las copias de un producto que serán puestas en el mercado o en funcionamiento. En el caso de ser un producto único, puede existir también un prototipo antes de su construcción final, en el caso de un producto de consumo, se habla de un prototipo que da lugar a una producción en serie.

La etapa de *caracterización* tiene diferentes nombres según el área de aplicación, se ha designado así por ser la actividad en la que se miden los valores reales de los parámetros de desempeño de un dispositivo electrónico. En otros procesos de diseño se puede considerar a la caracterización como un control de calidad para medir la conformidad del resultado final con las expectativas de diseño.

Cada una de estas actividades, la producción y la evaluación final, reciben especial atención en disciplinas independientes, para los efectos de este libro, se considera que el éxito radica principalmente en el proceso de diseño y que la implementación es sólo la realización de la solución proporcionada, cuyos resultados se reflejarán en la caracterización.

Figura 4. Esquema del proceso de diseño, implementación y caracterización de un producto.



1.4 REALIMENTACIÓN

Como parte de todo el proceso, al final de cada etapa o según se considere conveniente o necesario, se puede llevar a cabo una etapa de realimentación

donde se da la actividad de revisión de los resultados a la salida de dicha etapa y los procedimientos que llevaron a los resultados obtenidos. Se puede hacer realimentación entre la salida de cualquier etapa y la entrada de alguna de las anteriores. Una realimentación se hace necesaria cuando la salida de una etapa no es la que se esperaba, es decir, no cumple con alguno de los requerimientos de diseño [16].

Algunos ejemplos de realimentación son 1. Cuando se llega a la exposición del diseño y el cliente indica que no está satisfecho con el nivel de cumplimiento de alguno de los requerimientos. 2. Cuando se ha construido el producto y se le hace revisión de calidad y se detecta que alguna de las funciones no se da como se había planeado. Estos son sólo ejemplos, pero en general, se hace realimentación para considerar un factor que no se había tenido en cuenta.

1.5 EVALUACIÓN DE CONCEPTOS

En esta sección se presentan algunas herramientas de evaluación de conceptos que son muy útiles en la etapa de diseño para evaluar posibles soluciones.

1.5.1 Lista de objetivos, restricciones, funciones y medios

Todas las características que describen el diseño y el proyecto se deben listar en una tabla donde se escogerá si es objetivo, restricción, función o medio, según las siguientes definiciones.

Objetivo: es una característica o comportamiento que el diseño debe tener. Se expresan como adjetivos que capturan la esencia de cómo debe ser el diseño. Deben ser medibles, de forma que los resultados puedan expresarse en término de ellos.

Restricción: es una limitación en las libertades que tiene el diseñador para crear el diseño. Estos suelen medirse de forma absoluta, o se cumplen o no se cumplen. Y las soluciones que no se acogen a las restricciones no son consideradas.

Funciones: es una acción específica que se espera que el diseño ejecute. Los aspectos funcionales de un producto incluyen la interacción con el usuario, además del cumplimiento del fin para el que fue creado. Ejemplo: una licuadora, deberá licuar los productos según objetivos predefinidos, pero se debe considerar también, las funciones que se le asignan a los botones o perillas con las que la comandará el usuario.

Medios: es el camino o herramienta que se utiliza para que el producto realice una función. Esto suele especificarse, debido a que los clientes en su declaración del problema tienden a manifestar como desean que se resuelva el problema. Ejemplo: para poder comandar una licuadora, se puede especificar que el medio sean perillas y no botones.

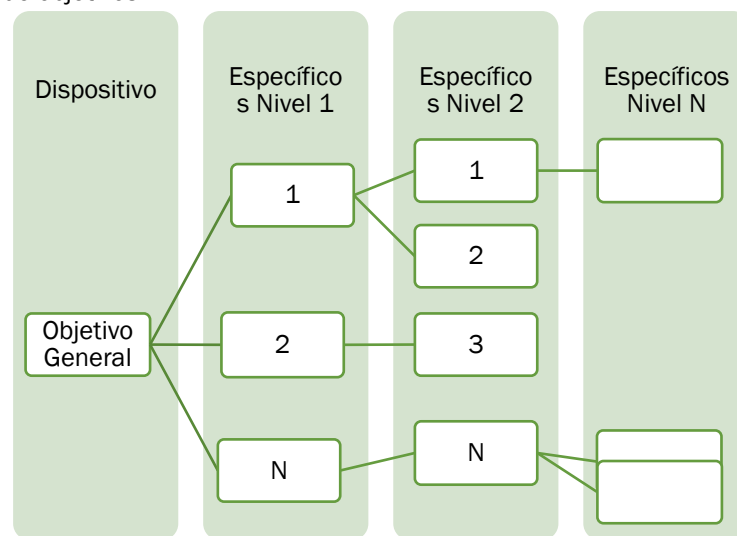
Tabla 2. Clasificación de características en objetivos, restricciones y funciones.

Características	O	R	F	M
c1	✓			
c2	✓	✓		
c3				✓
c4	✓		✓	
.				
.				
.				
cN		✓		

1.5.2 Árbol de objetivos

Cuando se describen los objetivos que se deben lograr, muchas veces se describen objetivos que pueden ser contenidos dentro de otros más generales; o que, al contrario, dependen del cumplimiento de objetivos más específicos. Ejemplo: un auto resistente, implicará bolsas de aire, chasis resistente, bloqueo de ruedas, entre otras cosas. Para poder medir el cumplimiento de los objetivos, se deben organizar de tal forma que los que están en el nivel 2 del esquema no dependan unos de otros.

Figura 5. Árbol de objetivos



1.5.3 Tabla de comparación por pares

La comparación por pares contribuye a entender los compromisos que se deben hacer en un diseño. Muchas veces no todos los objetivos se pueden cumplir al 100%, pero algunos de ellos pueden cumplirse en un porcentaje más reducido sin que afecte de forma significativa el producto final.

Cada objetivo se compara con los demás para escoger entre cada par cual es más importante. La prioridad es del concepto ubicado en las filas, se le asigna un 1 cuando es más importante que el concepto en la columna, y un 0 en caso contrario. Al finalizar, las comparaciones se suman los valores de cada columna para cada concepto en las filas. Finalmente, se ordenan según el puntaje de mayor a menor [3]. Este orden evidencia el impacto de cada objetivo sobre el producto final.

Tabla 3. Matriz de comparación por pares

Objetivos	O1	O2	O3	...	...	...	ON	Puntaje
O1	***	1	1	0	0	0	1	Suma1
O2	1	***						Suma2
O3	0	1	***	0	1	0	1	Suma3
.	0	1	0	***	0	1	1	Suma
.	1	1	1	0	***	0	0	Suma
.	1	0	0	1	1	***	1	Suma
ON	1	1	1	1	1		***	SumaN

Fuente: [3]. Modificado por el autor.

1.5.4 Establecimiento de métricas para los objetivos

La tabla que se presenta a continuación es un modelo de cómo se podía calificar el cumplimiento de cada objetivo, entendiendo que los primeros calificativos tienen alto grado de insatisfacción y que se buscará que ningún objetivo quede con esta calificación [3].

Tabla 4. Métricas para los objetivos de un proyecto.

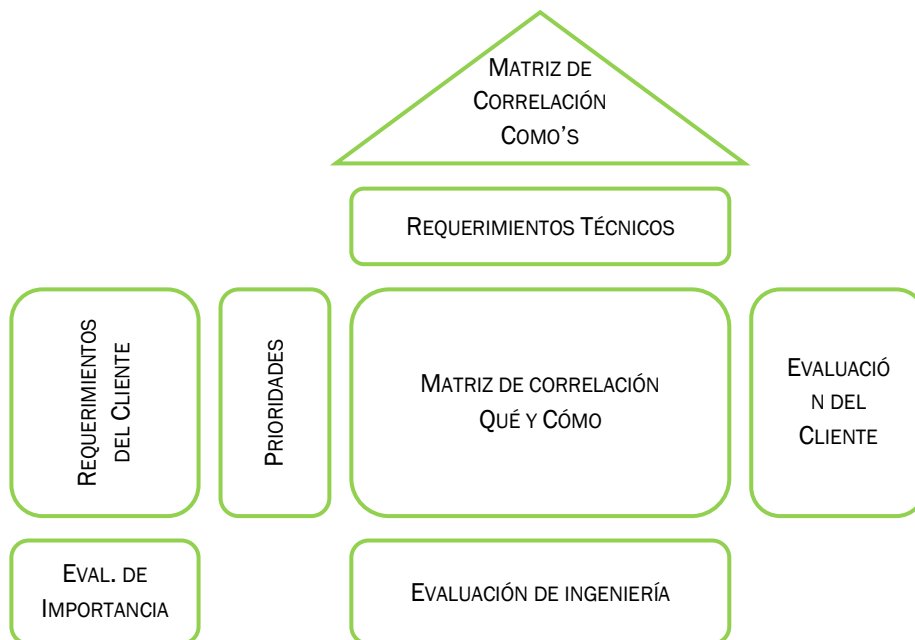
Valor de la Solución	Puntos	Valor Percibido	Puntos
Inútil	0	Insatisfecho	0
Inadecuado	1		
Débil	2	Apenas tolerable	1
Tolerable	3		
Adecuado	4	Adecuado	2
Satisfactorio	5		
Bueno con algunos cambios	6	Bueno	3

Bueno	7		
Muy bueno	8		
Excede los requerimientos	9	Muy bueno	4
Excelente	10		

Fuente: [3]. Modificado por el autor.

1.5.5 La casa de la calidad

Figura 6. Casa de la calidad.



Es una representación gráfica para el diseño para la calidad que busca identificar como se acoge un producto a las necesidades de los clientes. La **Casa de la Calidad** permite la documentación formal del proceso lógico a través de la superposición de matrices donde se traducen las necesidades de los clientes en características específicas de productos o servicios. Esta herramienta permite entender mejor las prioridades de los clientes al escoger un producto y buscar cómo responder de forma innovadora a dichas necesidades [17].

Cada uno de los bloques que componen la casa de la calidad se convierten en las matrices de comparación de los dos factores que se indican, el análisis se hace con el método de comparación par a par y se define si existe una relación fuerte, mediana o débil entre dos conceptos, ideas, objetivos, soluciones, funciones, restricciones, etc.

1.5.6 Grafico morfológico

Tabla 5. Grafico morfológico.

Funciones	Medios				
F1	S11	S21	S31	...	Sn1
F2	S12	S22	S32	...	Sn2
F3	S13	S23	S33	...	Sn3
.
.
.
Fm	...	...	...	...	Snm

Fuente [4] Modificado por el autor.

Esta matriz se usa para agrupar las soluciones particulares, que han surgido para cada uno de las funciones del producto, que sean compatibles entre ellas y constituyan en suma una solución general [3]. Para cada función F se ubica en frente todos los medios posibles para ejecutarla, después cada uno de los medios de cada función se agrupa con cada medio de las demás funciones y se observa cuales combinaciones son factibles.

Entendido esto se puede ver que es un método útil pero que puede llegar a ser tedioso por la gran cantidad de alternativas que pueden surgir, estando expresada la cantidad como sigue:

$$Alternativas = \#Medios^{\#Funciones}$$

2. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN EN ANTENAS

En este capítulo se presenta una metodología por etapas que abarca desde la identificación de la necesidad de una antena para un servicio hasta la presentación y entrega al usuario. Se acompaña este esquema con un cuadro resumen de actividades asociadas a cada etapa e información sobre algunos temas y herramientas que son de conocimiento necesario para el desarrollo de la metodología.

Algunos libros consideran que el proceso de diseño contiene también las etapas de producción y de posicionamiento en el mercado, así como la disposición del producto después de haber terminado su vida útil, estas etapas no se consideran aquí pues pueden ser consultadas en diversos textos que no sean específicos para el tema de antenas.

La metodología descrita no pretende ser camisa de fuerza, sino una guía que acompañe todo el proceso informando sobre los pasos que se pueden seguir y las herramientas que se pueden usar para desarrollarla. De acuerdo a los intereses del diseñador puede seguir todas las etapas o truncar la metodología en algún punto. La intención de este capítulo es orientar al lector en la información y herramientas que le pueden ser útiles durante el proceso, sin llegar a describir de forma extendida cada herramienta. Se invita al lector a ampliar el conocimiento sobre los temas que se referencian y a hacer uso de las herramientas que se introducen en el capítulo anterior cuando se aplique esta metodología.

En el capítulo anterior se describe el papel de los actores del proceso de diseño, en esta metodología solo se considera la participación directa de cliente y diseñador y la interacción correspondiente entre ellos; la consideración del cliente se limita a la comunicación orientada a que el producto desarrollado sea escogido en el caso de que se produzca en serie y se llegue a poner en el mercado. En la Figura 7 se muestra el esquema de la metodología que se ha definido, cada etapa está acompañada de una breve descripción que se amplía en la Tabla 6 donde se asocian actividades a cada etapa.

Figura 7. Metodología para el proceso de diseño, implementación y caracterización de una antena.

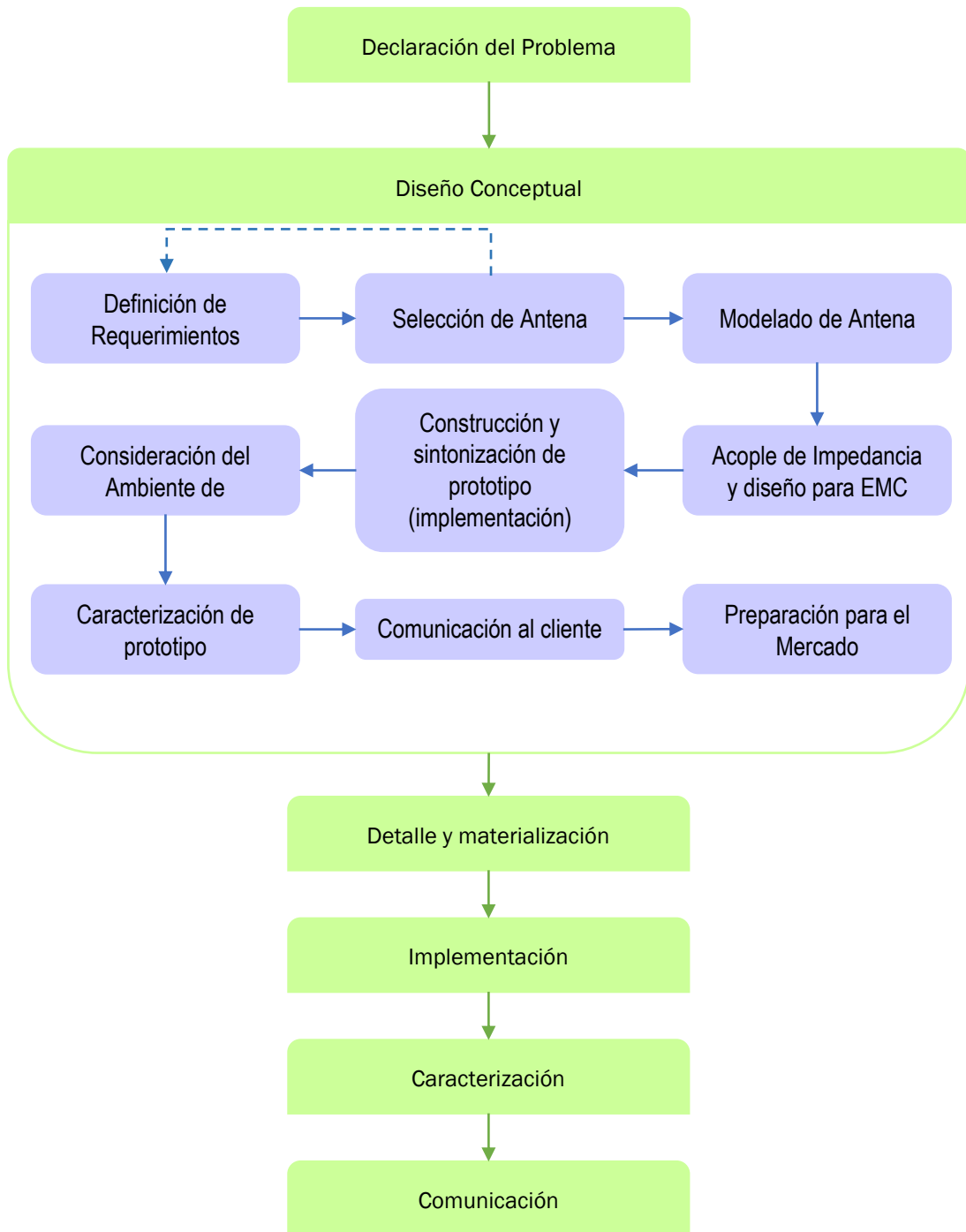


Tabla 6. Actividades asociadas a cada etapa de la metodología

ETAPA	ACTIVIDADES	
Declaración del Problema	<p>Descripción completa de la aplicación para la que se requiere la antena, condiciones de operación y el comportamiento esperado de los parámetros de antena.</p> <p>Revisión conjunta entre cliente y diseñador para determinar posibles compromisos que se deban tomar en cuando a los parámetros.</p> <p>Visita al sitio de instalación para revisar las condiciones de operación.</p>	
Diseño Conceptual	Contextualización	<p>Fundamentación teórica sobre la aplicación y el efecto que tiene la selección y modificación de la antena en su funcionamiento.</p> <p>Revisión de diseños similares, notas de aplicación y manuales de referencia.</p>
	Definición de Requerimientos	<p>Revisión del equipo de transmisión o recepción de la señal para obtener requerimientos de potencia, corriente e impedancia.</p> <p>Definición del comportamiento que se necesita de los parámetros de antena, con posible valor numérico.</p> <p>Definición de objetivos, funciones, restricciones y medios del diseño.</p> <p>Definición de índices de desempeño de la antena.</p>
	Selección y modelado de antena	<p>Selección de antena por comparación de características.</p> <p>Modelado teórico/matemático de la antena seleccionada.</p> <p>Simulación o modelado mediante métodos numéricos.</p> <p>Obtención de parámetros en simulación.</p> <p>Consideración del efecto de los elementos de conexión de la antena.</p>
	Acople de impedancia y diseño para EMC	<p>Diseño de red de acople de impedancia.</p> <p>Diseño de filtro para requerimiento de compatibilidad electromagnética.</p>
	Construcción de prototipo	<p>Ensamble de antena, red de acople y filtro para EMC.</p> <p>Sintonización y reensamble de forma iterativa hasta que la simulación coincida aceptablemente con la realidad y se cumplan los requerimientos de diseño.</p> <p>Simulación de elementos cercanos a la antena de forma permanente o temporal (placas metálicas, cuerpo humano, carcazas, etc)</p>

	Consideración del medio de operación	<p>Simulación de elementos ajenos a la antena que afectan el patrón de radiación de forma temporal o permanente (lugar de montaje, edificaciones, cuerpo humano, etc.)</p> <p>Corrección del efecto de elementos supresores del campo radiado.</p>
	Prueba y certificación	<p>Selección de la certificación que se desea obtener para la antena diseñada.</p> <p>Revisión del estándar en que está basada la certificación.</p> <p>Revisión de normas legales del país donde se pone en funcionamiento la antena.</p> <p>Medición de parámetros según estándar de certificación.</p> <p>Certificación de los resultados por parte de un ente certificador.</p> <p>Caracterización de prototipo (ver etapa de Caracterización)</p>
Detalle y materialización		<p>Construcción de plano CAD para manufactura.</p> <p>Esquemáticos y plano CAD de PCB del filtro para EMC y de la red de acople.</p> <p>Especificación por escrito de materiales, componentes e indicaciones especiales para manufactura.</p>
Implementación		<p>Construcción por parte del departamento de manufactura de una cantidad especificada de antenas y demás elementos diseñados.</p> <p>Revisión de calidad por parte del departamento de manufactura.</p>
Caracterización		<p>Muestreo aleatorio para comprobación de especificaciones.</p> <p>Disposición del rango de medición.</p> <p>Configuración de la instrumentación de medida.</p> <p>Medición de parámetros de antena del prototipo de acuerdo a los procedimientos estándar para la medición de antenas de IEEE.</p> <p>Validación experimental del diseño.</p>

2.1 DECLARACIÓN DEL PROBLEMA

Esta metodología está pensada para dar solución a una necesidad identificada y entregada al diseñador por un cliente, ante quien se deben mostrar los resultados del proceso. Se debe obtener del cliente la siguiente información:

1. Servicio y/o aplicación.
2. Tamaño del lugar de instalación.
3. Elementos fijos o temporales que se encuentren cerca al lugar de instalación.

4. Comportamiento esperado de los parámetros de antena (no es necesario que sea una respuesta técnica, es labor del ingeniero traducir las indicaciones para que sean útiles)
5. Presupuesto y plazo para el proyecto.
6. Costo final que desea que tenga su antena.
7. Opciones del mercado que ha considerado y por qué las descarta.

Para definir completamente el problema es necesario entender los parámetros de antena y el efecto que tiene modificarlos sobre el comportamiento de la antena, después llevar esto al caso particular. En el Anexo B se presenta un resumen de los parámetros de antena de acuerdo al Estándar para medición de Antenas de IEEE, con aclaraciones sobre la influencia de la modificación de dichos parámetros en el comportamiento de una antena.

2.2 DISEÑO CONCEPTUAL

Esta etapa se da todo el desarrollo de la solución hasta ser aceptada por el cliente, como producto de esta etapa se obtiene un prototipo funcional y caracterizado.

2.2.1 Contextualización

Una contextualización completa debe contemplar la revisión de los tipos de fuentes de información resumidas en la Sección 1.1.2. Con base en el conocimiento de la aplicación para la que es requerida la antena se procede a formular objetivos, funciones, restricciones y medios para lograr una solución satisfactoria. No es necesario que las características se obtengan en valores medibles, pero es recomendable hacer compromisos mediante las herramientas de evaluación de conceptos de la Sección 1.5 para determinar la prioridad de cumplimiento de las características.

2.2.2 Definición de requerimientos

Teniendo definida la prioridad de los objetivos en términos de parámetros y funciones, se procede a asignar valores cualitativos y cuantitativos a los parámetros de antena. Como parte de la contextualización se consultan soluciones para la aplicación en particular o aplicaciones similares, de esta forma se adquiere conocimiento sobre el rango de valores que pueden adquirir los parámetros y hacer un listado de factores de desempeño medibles. Se deben establecer entre otras cosas:

- Valores de parámetros estimados (ganancia, potencia de entrada, eficiencia, forma del patrón de radiación, ancho de lóbulo principal, etc.)
- Características físicas (tamaño, material)
- Costo final de la antena

2.2.3 Selección y modelado de antena

Las comunicaciones inalámbricas han tomado protagonismo en las últimas décadas, los servicios asociados a esta rama incrementan y el diseño de antenas se ha hecho más exigente. A través de los años los modelos convencionales de antenas han probado su efectividad, por esto son objeto de rediseño para lograr cumplir nuevos requerimientos, pero también hay cabida para los nuevos diseños.

Cuando se escoge o desarrolla un modelo de antena se debe tener en cuenta los modelos existentes que han sido probados, no tiene ningún sentido invertir esfuerzos en crear una antena novedosa cuando esta no logra superar el desempeño de las que se encuentran en el mercado. Por esto, en la generación de alternativas de solución se han de revisar especificaciones de antenas ya existentes, determinar cuáles parámetros cumplen los requerimientos de diseño del proyecto y cuáles deben ser mejorados.

- Criterios de comparación de antenas

La selección de un modelo de antena puede hacerse con base en diferentes criterios, algunos de estos han surgido como resultado de la norma de uso de diferentes tipos de antenas a través de los años. En esta sección se presentan tablas de resumen de estas normas de uso con base en aplicación y comportamientos de los parámetros.

En la Tabla 7 se presentan criterios comunes de selección, se usa el análisis de la aplicación para identificar las características asociadas a cada parámetro que debe tener la solución. A partir de la definición del comportamiento que se requiere se puede proceder a estudiar los tipos de antenas que pueden proporcionarlo.

Tabla 7. Criterios comunes de comparación de antenas.

Frecuencia	VLH, LF, HF, VHF, UHF, Microonda
Ganancia - Directividad	Baja, media o alta dependiendo del común y medida en comparación con el radiador isotrópico
Polarización	Lineal, Circular, Elíptica
Radiación	Isotrópica, Omnidireccional, Direccional, Hemisférica
Ancho de Banda	En Hz. Banda estrecha, banda ancha. Número de bandas.

La distribución del espectro radioeléctrico⁶ se hace de forma autónoma en cada país, sin embargo, por el conocimiento que se tiene de las tecnologías de comunicaciones inalámbricas y de la experiencia de uso, se han establecido algunas aplicaciones típicas para cada banda como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Aplicaciones y antenas típicas según rango de frecuencia.

Banda de Frecuencia	Designación	Servicios Típicos	Ejemplos de Uso
3-30 KHz	VLF	Navegación, SONAR	Radiador vertical, monopolo cargado, T y L invertida
30-300 KHz	LF	Investigación, Navegación	Monopolo, dipolo, antenas direccionales
300-3000 kHz	MF	Radiodifusión AM, Radio marítimo, Comunicaciones costeras	
3-30 MHz	HF	Telefono, Radioafición	Log-periodica, cónica, rómbica, dipolo abanico
30-300 MHz	VHF	Televisión, Radiosifusión FM, control de tráfico aereo, navegación	Yagi-Uda, Log-periodica, Helicoidal, Panel, Parabólica, Disconica
300-3000 MHz	UHF	Televisión, Comunicaciones satelitales, RADAR, navegación	
3-30 GHz	SHF	RADAR, Comunicaciones Satelitales, Enlaces de microonda	Parabólica, Bocina piramida, disconica, monopolo, dipolo, microcinta, fractal
30-300 GHz	EHF	RADAR, Experimental	

El patrón de radiación de una antena, junto con su potencia radiada, determinan el alcance y la cobertura de la antena

Tabla 9 Patrones de radiación típicos en antenas.

Tipo	Patrón	Explicación	Antenas
------	--------	-------------	---------

⁶ Medio por el cual se transmiten las frecuencias de ondas de radio electromagnéticas que permiten las telecomunicaciones. La distribución del espectro radioeléctrico en Colombia le corresponde a la Agencia Nacional del Espectro (ANE)

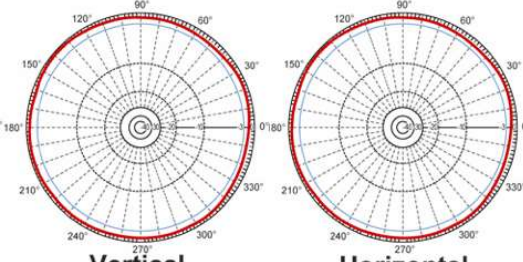
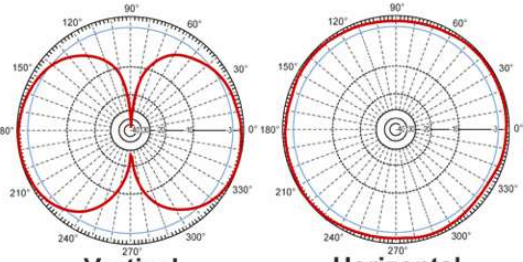
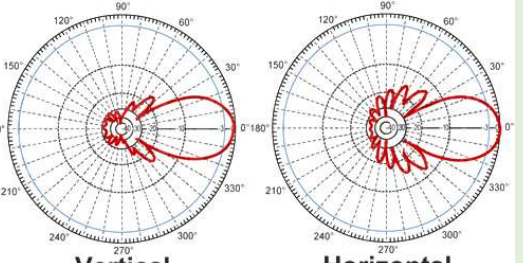
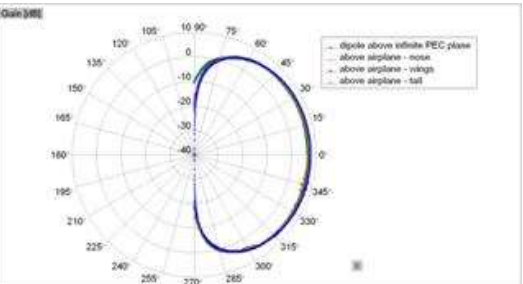
Isotrópico		Caso ficticio. Radia igual potencia en todas las direcciones, sin pérdidas. Se usa como referencia para otras antenas, expresando ganancia y directividad en dBi.	Radiador Isotrópico
Omnidireccional		Radian con igual potencia en todas las direcciones con respecto al azimut	Biconica, coaxial, dipolo, monopolo, helicoidal, Whip
Directivo		Dirigen su energía en una dirección particular. Tiene altas ganancia y directividad para cubrir largas distancias de enlace.	Bocina, parabólica, fractal, microcinta, plasma, quad, rombica, slot, yagi-uda, helicoidal
Hemisférico		Radian sólo en un hemisferio, o superior o inferior, donde el patrón puede tomar diversas formas dependiendo de la antena y el diseño.	Antenas con aplicación en aviación, donde el fuselaje cumple la función de plano de reflexión. Ej: monopolo con plano de tierra grande.

Tabla 10. Tipos de antena y características típicas.

Antena	Descripción	Ganancia	Directividad	Polarización
--------	-------------	----------	--------------	--------------

Dipolo	Es empleada para transmitir o recibir ondas de radiofrecuencia. Son las más simples desde el punto de vista geométrico, con su alimentación central. Pertenece al grupo de las antenas de hilos. Su ganancia común es 3dBi.	Baja	Baja	Lineal
Yagi	Muy utilizadas para recepción de señales de televisión en la banda de UHF. Su ganancia aumenta con la incorporación de elementos pasivos, de un buen diseño depende el ancho de banda de la antena para que pueda recibir más canales.	Media-Alta	Media-Alta	Lineal
Antenas de Apertura	Estas antenas son de gran ancho de banda, con formas variadas entre cónicas y piramidales. Se usa por lo general para frecuencias microondas. Puede usarse como antena individual, o en agrupaciones. El ancho de su patrón de radiación depende de su apertura, es decir de qué tan "abierta" o "cerrada" es la bocina.	Media-Alta	Alta	Lineal-Circular
Antenas planas	Están formadas por un agrupamiento plano de radiadores y un circuito que distribuye la señal entre ellos. Su diseño se adecua de forma que la estructura disipe la potencia en forma de radiación.	Media	Media-Alta	Lineal-Circular
Parabólicas	El plato de estas antenas se usa para enfocar las ondas recibidas al punto central o para capturar la energía que radia la antena y enfocarla en un haz estrecho.	Alta	Alta	Lineal-Circular

Las tablas de selección y comparación que se encuentran en esta sección son ilustrativas, si bien, sirven al objetivo de poder guiar en una selección, cuando la aplicación es poco conocida y/o involucra muchos factores de diseño se debe hacer tantas comparaciones como sean necesarias teniendo siempre en mente que habrá modelos de antena que a pesar de ser rediseñadas nunca podrían llegar a tener determinado comportamiento.

- Arreglos de Antenas

Los tipos típicos de antenas a veces son insuficientes para lograr el comportamiento requerido de un parámetro, por esto se acude a los arreglos de

antenas están compuestas por dos o más antenas, es común que estén compuestas del mismo tipo de antena con diferentes parámetros de diseño, sin embargo, también los hay compuestas por diferentes tipos de antenas. Con el manejo de las fases de cada elemento se logra que el arreglo funcione como una única antena. El arreglo más conocido es la antena Yagi-Uda⁷ que permite hacer ajuste al patrón de radiación por medio de sintonización.

Algunos beneficios del uso de un arreglo de antenas son:

1. Aumentar el manejo de potencia.
2. Proveer diversidad de recepción.
3. Cancelar la interferencia de una dirección o direcciones.
4. Puede ser ajustado para que el arreglo sea más sensible en una dirección particular.
5. Permite determinar la dirección de señales recibidas.
6. Incrementa la relación Señal a Ruido más interferencia (SINR)

Algunas aplicaciones que se benefician ampliamente del desarrollo de los arreglos de antena, especialmente los que manejan la fase son:

1. Radio-difusión.
2. Formación de haces.
3. Navegación.
4. Identificación por radiofrecuencia.
5. Investigación del clima.
6. Guía de misiles.
7. Aviación.

- Métodos numéricos

Los métodos computacionales en electromagnetismo han tenido un gran impacto en el diseño de antenas, siempre se requieren resultados numéricos además de los resultados medidos. Los métodos numéricos en electromagnetismo se usan con el fin de encontrar la solución a las ecuaciones de Maxwell para un caso particular. No es común recurrir al desarrollo de un método numérico en escenarios que no sean académicos.

La solución analítica del problema se puede hacer solo para las geometrías canónicas, donde las condiciones de contorno se aplican a superficies con alguna coordenada constante y donde la ecuación es separable, pero estos

⁷ Antena direccional inventada por el Dr. Shintaro Uda. Por medio de una estructura de dipolo simple, reflectores y directores constituye una antena de alto rendimiento.

casos no son comunes en las antenas, por tanto, se recurre a los métodos numéricos. En la actualidad algunos métodos numéricos permiten considerar las características no ideales de la antena, como lo son la geometría, los materiales, el soporte para montaje, etc.

Los métodos numéricos pretenden encontrar los valores a partir de la consideración de un comportamiento ideal de la antena, sin embargo, es necesario hacer algunas aproximaciones o suposiciones para formularlos. Es de esperar que el resultado práctico difiera razonablemente de los valores encontrados, debido además a la geometría no ideal, la discretización y la imposición de las condiciones de contorno. Entre los métodos más utilizados se encuentra:

- Métodos Diferenciales
- Métodos integrales
- Métodos variaciones
- Métodos de alta frecuencia

En la Tabla 11 se presenta una comparación resumida de las ventajas y desventajas de algunos métodos numéricos. Es una adaptación de [18], donde se pueden consultar las formulaciones matemáticas de cada método.

Tabla 11. Comparación de métodos numéricos en antenas.

	Dominio de la Frecuencia		Dominio del tiempo	
	MoM	FEM	FDTD	TLM
Ventajas	* Rápido a frecuencia sencilla		* Resultados de Banda ancha en una sola simulación	
	* Se combina fácil con otros métodos para tratar problemas más grandes		* Funciona bien con problemas de alimentación por pulsos	
Desventajas	* No funciona bien para problemas de alimentación por pulsos		* No funciona para problemas que involucren una longitud eléctrica muy grande	

- Herramientas de simulación
Las herramientas computarizadas permiten crear modelos y analizarlos sin tener que llegar a construirlos. Además, de permitir desarrollar los métodos numéricos, son utilizadas para crear software de modelado y simulación. Los paquetes de simulación que se han desarrollado para aplicaciones de electromagnetismo son variados y se aproximan a la solución con base en diferentes métodos numéricos, algunos permiten abordar problemas de mayor complejidad que otros.

Un simulador siempre será una herramienta valiosa para ser usada en etapas previas a la construcción de un prototipo y para el ajuste del mismo, de esta forma se reducen los costos de diseño por no hacerse necesario reproducir un modelo físico cada vez que se quiere analizar el efecto de la variación de un parámetro. En la Tabla 12 se hace una comparación entre algunos simuladores populares para electromagnetismo.

Tabla 12 Resumen de herramientas computacionales de simulación para electromagnetismo.

Nombre	Basado en	Domini o del tiempo	Domini o de la frecuencia	Líneas de transmisión	Ecuaciones integrales	Simulador de EMC	Versión Estudiantil
CST Studio	FIT	X	X	X	X	X	X
FEKO	MOM	X	X	X	X	X	X
HFSS	FEM	X	X	X	X	X	-

2.2.2 Acople de Impedancia y Diseño para EMC

Para garantizar el funcionamiento adecuado de la antena, es necesario limitar la pérdida de potencia y hacer un diseño para compatibilidad electromagnética que reduzca las emisiones en bandas de frecuencias diferentes a la de operación y evitar que la antena cause interferencia en otras transmisiones.

- Acople de impedancia

La red de acople de impedancia es importante pues es una de las condiciones de operación que se pueden conocer con alto grado de certeza, diferente de otras difíciles de implementar y medir como lo son el corto circuito y el circuito abierto. Acoplar la impedancia de la carga a la del equipo al que se conecta la antena en transmisión o en recepción aumenta la potencia que recibe la antena, mejorando el alcance. En transmisión, cuando hay un acople de impedancia muy bajo, el coeficiente de reflexión incrementa lo que indica que la potencia no pasa a la antena, sino que se refleja de vuelta al equipo lo que representa un daño potencial.

Existen diferentes métodos para acoplar impedancia, todos basados en el conocimiento de líneas de transmisión, porque al final, la antena se puede

representar como una impedancia compleja que hace las veces de carga. Algunos métodos son:

- Acople inductivo.
- Acople capacitivo.
- Acople con Stub en paralelo o en serie, en circuito abierto o corto circuito.
- Acople con transformador.
- Acople con balun.

Cada tipo de acople tiene una representación en la Carta de Smith⁸, pero se debe tener en cuenta que algunas redes de acople pueden modificar la respuesta en frecuencia del circuito, pues tienen topología y funcionamiento de filtro.

Cuando no se hace un buen acople de impedancia entre la antena y la línea de transmisión usada para alimentarla, la eficiencia del sistema se reduce debido a la potencia que se refleja en el punto de conexión. Una porción del voltaje de entrada se refleja ρV [19].

$$\vec{\Gamma} = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (1)$$

En la Ecuación 1, Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión y Z_A es la impedancia de entrada de la antena, conocerlas permite calcular el coeficiente de reflexión.

Cuando la onda que viaja hacia la antena y la que se refleja se superponen se crea una onda resultante, las tensiones extremas de esta onda se deben obtener para poder calcular el ROE (VSWR- voltage standing-wave ratio, de sus siglas en inglés) que es una medida de la potencia reflejada en la línea de transmisión. Es de aceptación general que un buen acople corresponde a una $ROE \leq 1.5$

$$ROE = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2)$$

$$(1) \quad V_{max} = (1 + |\Gamma|)V_i \quad (3)$$

⁸ Método desarrollado por Smith para la representación de impedancias en líneas de transmisión.

$$(2) \quad V_{min} = (1 - |\Gamma|)V_i \quad (4)$$

La pérdida por reflexión se expresa comúnmente en decibeles y se obtiene como sigue:

$$\text{Pérdidas por reflexión} = -20\log |\Gamma| \quad (5)$$

- **Diseño para compatibilidad electromagnética**

Algunos años atrás era común que un taxi pasara por el frente de una casa usando su radio y esto causara distorsión del funcionamiento del televisor, y como este, muchos otros casos. A medida que entran nuevos dispositivos y tecnologías en el mercado, se encuentran muchos operando a niveles de potencia bajos y altas frecuencias lo que los hace susceptibles a las EMI, a la vez que constituyen fuentes de interferencia electromagnética (EMI) para otros dispositivos. Para solucionar estos problemas que se presentaban no solo en aparatos domésticos, se hizo necesario crear estándares de EMC. para ayudar a los fabricantes a cumplir con los niveles permitidos.

Hay muchas formas de EMI que pueden afectar los circuitos y hacer que o funcionen de la forma que deberían. Estas interferencias se producen de múltiples maneras y están presentes en todo lugar puesto que solo no existen bajo condiciones ideales. Dado su nombre, interferencias, se infiere que son efectos no deseados y los métodos generales buscan reducir sus niveles.

Las interferencias electromagnéticas suelen clasificarse por la fuente que las produce entre producidas por el hombre o fenómenos naturales, siendo las primeras producto de otros circuitos electrónicos o corrientes cercanas, y las segundas, ruido cósmico, luz o cualquier tipo de ruido atmosférico. Por otro lado, se pueden clasificar de acuerdo a si son continuas o de impulso, donde cada tipo puede provenir de cualquiera de las dos fuentes anteriormente mencionadas. Además, estos cuatro tipos de interferencia, se pueden clasificar según se presenten en una banda estrecha o en una banda ancha.

Dicho lo anterior, es posible decir que todos los circuitos electrónicos pueden causar interferencia y ser susceptibles a fuentes externas de ondas electromagnéticas que afecten su operatividad. Por esto, es necesario integrar

un elemento capaz de suprimir emisiones o evitar la recepción de frecuencias en una banda diferente a la de operación, estos elementos suelen ser filtros.

La selección de una topología de filtro depende de:

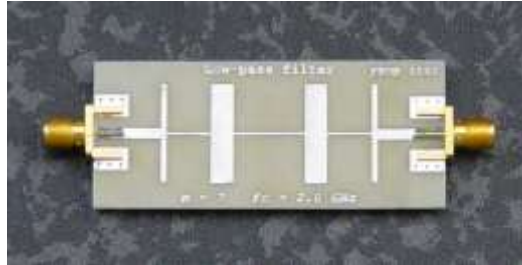
1. Características (pasa bajas, pasa altas, pasa banda, supresor de banda)
2. Ancho de banda
3. Grado
4. Tamaño
5. Capacidad de potencia

Para los filtros de microcinta también es importante escoger un sustrato adecuado, por esto, antes de comenzar a diseñar una antena de microcinta se debe indagar sobre los materiales disponibles para diseñar con el mejor de ellos o con todos ellos y escoger el mejor resultado:

1. Tamaño
2. Modos de orden superior.
3. Efectos de ondas superficiales
4. Espaciado y acople entre líneas
5. Perdida dieléctrica
6. Estabilidad de temperatura
7. Capacidad de potencia

Básicamente, hay dos acercamientos al diseño de filtros para EMC, por un lado, se parte de una topología conocida y se modifica para mejorar su desempeño; por el otro, se parte del acople de impedancia y teniendo en cuenta la impedancia de acople se incorpora a una red de filtrado con una topología común de elementos distribuidos y se encuentra una representación en microcinta de elementos distribuidos pasivos (resistencias, capacitores e inductores). En la Figura 8 se muestran cuatro topologías típicas de filtros en microcinta.

Figura 8 Topologías comunes de filtros en microcinta



(a) Filtro escalonado pasabandas



Fuente [31] Modificado por el autor.

Un procedimiento tentativo para el diseño de un filtro para EMC es como sigue:

1. Definir características, ancho de banda, tamaño, grado y capacidad de potencia.
2. Escoger una topología de filtro con elementos distribuidos con base en 1.
3. Modelar o simular la respuesta del filtro.
4. Encontrar la representación adecuada de los elementos distribuidos y la topología en microcinta. (Si aplica, de acuerdo a la frecuencia de operación)

Es claro que incluir un filtro para limitar las emisiones en frecuencias diferentes a la de operación puede ayudar al correcto funcionamiento de un sistema de radio frecuencia, pero estas no son las únicas medidas que se toman en el diseño de un dispositivo electrónico. Sin embargo, en este libro se limita a este punto. El diseño para EMC y/o EMI es una disciplina ampliamente estudiada, que requiere especial atención. En la Figura 9 se presenta una pirámide que ilustra los niveles del diseño para EMC, siendo el diseño del filtro solo la punta.

Figura 9. Pirámide del diseño para EMC.



Fuente[21] Adaptado por el autor.

2.2.3 Construcción y sintonización de prototipo

Cuando se llega a esta etapa ya se han sintonizado de forma individual la red de acople de impedancia y el filtro para EMC. Corresponde la sintonización de la estructura de la antena que dependiendo del caso puede requerir conexión:

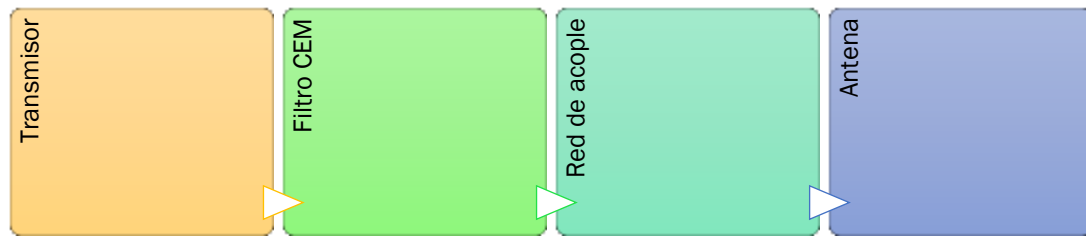
- a. De forma directa con conector SMA al equipo de medición.
- b. Por medio de una red de acople de impedancia con conector SMA.

Después de definir como se debe conectar, se hacen dos procedimientos de medición:

1. Hacer barrido en frecuencia para verificar la respuesta en frecuencia.
2. Medir parámetros S y verificar que los coeficientes de reflexión y transmisión.

Se hace la aclaración de que no es necesario conectar el filtro para EMC durante la sintonización de la antena. Con los tres elementos sintonizados de forma independiente, funcionando de acuerdo a las expectativas de diseño se deben ensamblar en el orden que se muestra en la Figura 10 y comprobar el funcionamiento como conjunto. En caso de que la respuesta en frecuencia no sea la esperada se deben realimentar los resultados y tomar medidas correctivas en diseño e implementación.

Figura 10. Esquema de organización de componentes para ensamble.



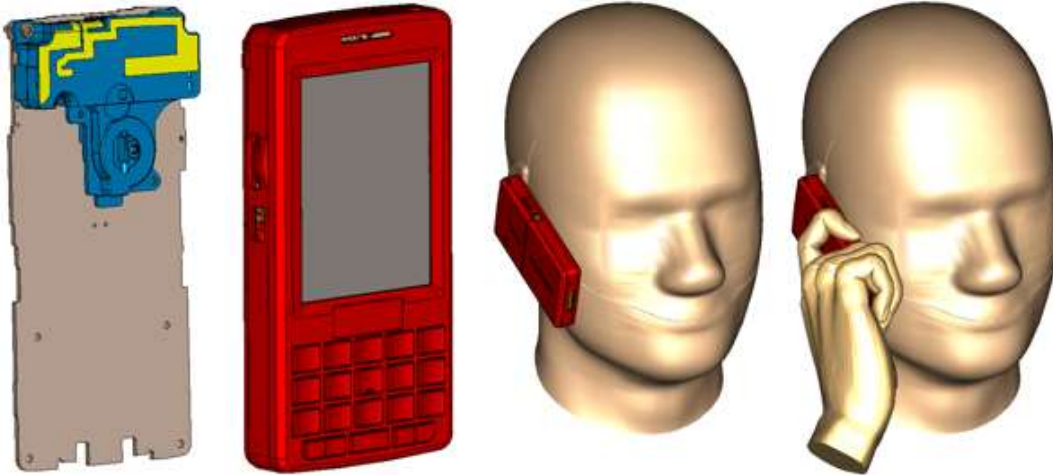
Fuente: recopilación de múltiples fuentes, creado por el autor.

2.2.4 Consideración del ambiente de operación: un caso cotidiano

El incremento en el uso de los teléfonos celulares ha puesto mayor exigencia en requerimientos de compatibilidad electromagnética, y radiación no ionizante. En un espacio común se puede encontrar tantos teléfonos móviles como personas, por esto en el diseño de las antenas se debe hacer un compromiso entre la potencia necesaria para que exista servicio aún cuando hay gran cantidad de obstáculos, mientras se mantiene el valor de potencia dentro de los rangos permitidos por las normas para proteger la salud.

El diseño de antenas para teléfonos móviles evoluciona desde el análisis de la antena desnuda incorporando paso a paso los elementos que la acompañan, como las otras antenas que se encuentran en los dispositivos (WiFi, GPS, Bluetooth), la carcasa, los cuerpos humanos, todo esto cuando se encuentra comunicando y cuando está actuando pasivamente. En la Figura 11 se muestran algunos estados de diseño, donde se consideran diferentes objetos cercanos a la antena desnuda.

Figura 11. Evolución de los componentes que se tienen en cuenta en simulación de una antena.



Fuente [30].

El diseño debe garantizar que el desempeño del telefono sea optimo en cualquier condición, mientras la señal que le llega sea buena. Esto, en el caso de una llamada, se traduce en que la comunicación sea clara. Además, por ser un elemento que siempre está cercano al cuerpo humano, se debe diseñar dentro de limites estrictos de compatibilidad electromagnética y SAR⁹.

2.2.5 Preparación para el Mercado

Las antenas que se encuentran en el mercado han tenido que pasar por un proceso de certificación que garantice que cumplen con estándares cuya intención es proteger al usuario. En esta sección se presentan tres temas que son de interés en la regulación de antenas y algunas instituciones nacionales e internacionales a quienes les compete la creación de normas en estas áreas. Por otro lado, las instituciones que se listan evidencian que la regulación se hace desde lo humano para salvaguardar el bienestar de las personas, por medio de acciones legales y sustentadas en conocimientos técnicos. En la sección 2.6 se amplía la información con respecto a la regulación en telecomunicaciones.

En varios campos de ingeniería las exigencias del mercado nacional suelen ser menores con respecto a las de estados unidos o países pertenecientes a la unión europea. En el caso de los dispositivos electrónicos, la regulación nacional se basa, como se ha explicado en una sección anterior en normas extranjeras y las impone como mínimo referente y máxima exigencia, sin llegar a modificarla, debido a que en el país no se cuenta con laboratorios especializados para crear

⁹ Specific absorption rate (SAR) – Medida de la tasa de energía que es absorbida por el cuerpo humano cuando se expone a un campo electromagnético de RF. (Ver Sección 2.7)

normas propias. El procedimiento que se muestra a continuación es válido a la fecha.

1. Medición de parámetros de antena en rango de medición.
2. Certificación de conformidad a la norma UIT-T K.52.
3. Pago por concepto de homologación ante la CRC.
4. Comprobante de pago a FONTIC.
5. Entrega de documentación de certificación y hoja de especificaciones mediante SiVirtual.
6. Registro de marca ante la superintendencia de Industria y comercio.
7. Registro de la antena bajo la marca propia.
8. Adquisición del código de barras.

El punto 2 de este procedimiento lo lleva a cabo un ente certificador, a la fecha, en Colombia no hay ninguno, por esto es necesario hacer las mediciones en otro país. Cuando se hace la solicitud a un ente certificador, de vuelta se recibe un formulario como se muestra en el Anexo C, que garantiza que la caracterización y medición pueda realizarse en sus instalaciones y en la configuración de operación para la que fue diseñada la antena.

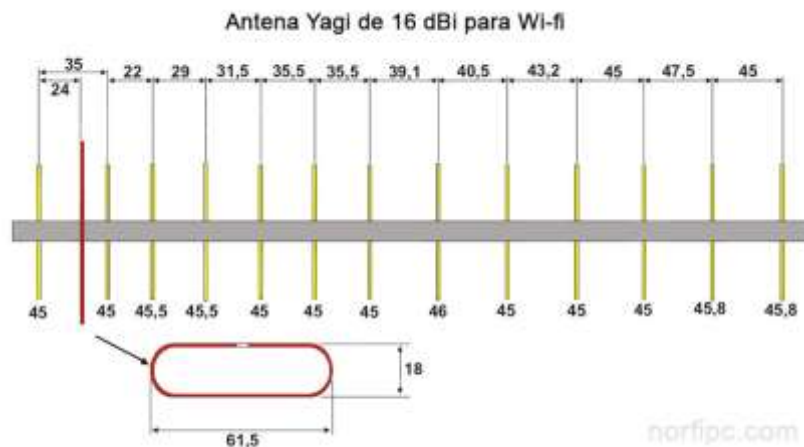
2.3 MATERIALIZACIÓN Y DETALLE

En el caso de una antena, cuando se ha llegado a una alternativa de diseño, se tiene definido el material y sus dimensiones. Estos se listan y especifican. Este caso es diferente de un producto de consumo porque su forma está ligada a su comportamiento y queda definida en la etapa de *diseño conceptual*. Además del objeto general o principal, es necesario pensar en los elementos que se necesitan para ponerla en funcionamiento:

- Conector a equipo de transmisión o recepción.
- Red de acople.
- Red de filtrado para CEM.
- Carcasa.

Como se explicó en el capítulo anterior, si la construcción de la antena la hace un departamento independiente o en caso de ser un grupo pequeño, una persona diferente a quién la diseñó, se debe dejar por escrito todos los detalles. Para cualquier tipo de antena, el plano debe contener todas las medidas, con todos los componentes, con las referencias exactas.

Figura 12. Detalle de las dimensiones de una antena.



Fuente [29]

En la Figura 12 se muestra un ejemplo de un plano de antena. En este plano deben contener:

- Medidas de cada alambre y/o superficie, incluyendo grosor y/o diámetro.
- Distancia entre elementos, tantas marcas como sean necesarias para definir la antena.
- Dibujo de cada elemento adicional: conector, tuercas, abrazaderas.
- Los elementos que no deban construirse sino ser adquiridos e incorporados a la antena, deben estar numerados con referencia. Ejemplo: conector SMA hembra sin rosca.
- Material de cada parte.

El detalle en esta etapa determina el éxito de la producción en serie. El prototipo sirve de referencia para comparar los resultados de la etapa de manufactura, se debe pensar en que, así como el prototipo presenta características no ideales en cuanto a superficies que no son completamente planas o líneas que no están rectas, los productos obtenidos de la producción en serie también presentarán no idealidades y establecer un margen de tolerancia para el desempeño de la antena.

2.4 CARACTERIZACIÓN

La medición de los parámetros de antena se hace de acuerdo a un estándar, en dos fases, la primera para medir el éxito del diseño mediante la caracterización del prototipo y la segunda para verificar los resultados de la etapa de

manufactura. para orientar el diseño a ser certificado. En esta sección se presenta una extracción de los pasos que debe ser seguidos, entendiendo que se pueden adaptar según los recursos tecnológicos con que se cuente para la medición, obtenida de documento “Procedimientos estándar para la medición de antenas” de IEEE.

2.4.1 Rangos de medición

Los rangos de medición son espacios diseñados para lograr un frente de onda que se puede asumir plano sobre la antena bajo prueba. Existen rangos en espacio abierto y bajo techo, donde se garantiza que la antena bajo prueba esté en el campo lejano de la antena estándar calibrada, este criterio se puede obtener a partir de la relación entre el campo eléctrico inducido y el campo eléctrico radiado, una de las expresiones que se puede obtener se expresa en término de la máxima dimensión física de la antena D.

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (6)$$

En la Figura 13 se un esquema de una cámara anecoica, que es el rango de medición usado para antenas de alta frecuencia, donde las longitudes de onda son pequeñas y permiten que una antena pueda ser caracterizada bajo techo.

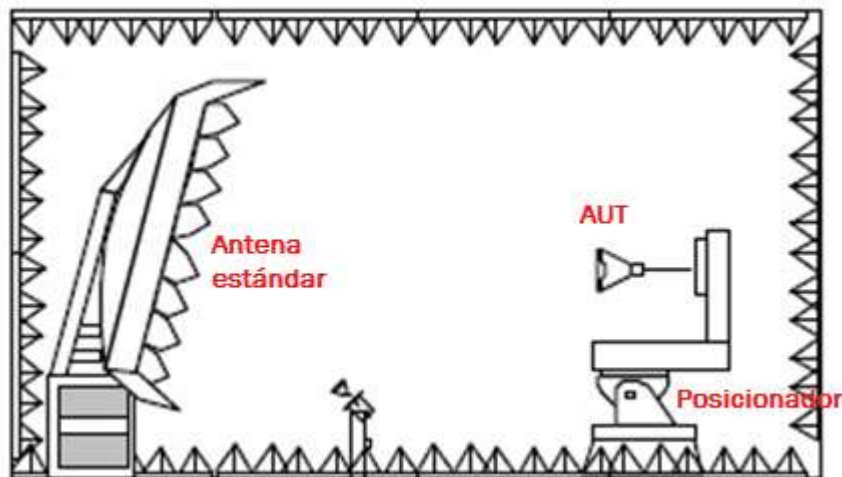


Figura 13 Representación de cámara anecoica.

2.4.2 Proceso de caracterización

Se dice que la medición se hace de forma pasiva cuando no se requiere movimiento de ninguna de las dos antenas, y activa cuando se mueve una de las dos. En el primer caso se mide impedancia, ROE y ancho de banda; en el segundo, patrón de radiación, ganancia, directividad y polarización. En los pasos que siguen se hace referencia a la antena bajo prueba como AUT (Antenna Under Test).

- Patrón de radiación

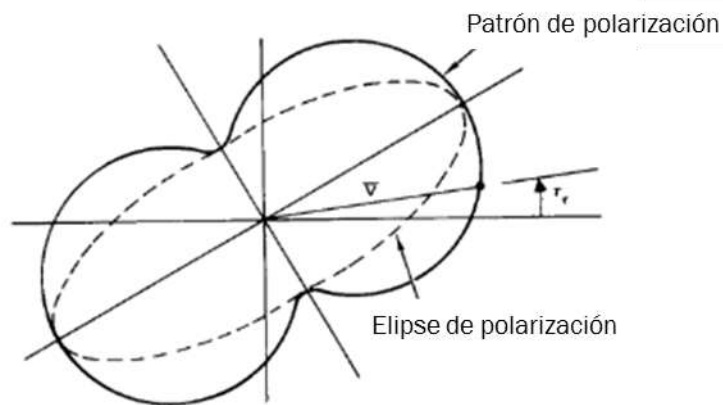
1. Conectar la instrumentación de medición, analizador de espectro, a la AUT.
2. Conectar el generador de onda a antena estándar.
3. Fijar el punto inicial de medición enfrentando las dos antenas en la dirección de máxima radiación (dirección del máximo pico de tensión en el analizador de espectro).
4. Escoger paso angular de rotación.
5. Medir plano horizontal: rotar AUT en pasos iguales hasta completar 360 en dirección de Θ . Registrar cada medición.
6. Medir plano H: rotar AUT en pasos iguales hasta completar 360° en dirección de φ . Registrar cada medición.
7. Graficar cada plano con los valores registrados.

- Polarización

El patrón de radiación de una antena diseñada para una polarización específica es descrito usualmente en términos de los componentes del campo para esa polarización. Las técnicas de medición de la polarización se pueden clasificar según ofrezcan información parcial acerca de las propiedades de la antena, los que deban ser comparados con un estándar de polarización y aquellos que son suficientes por sí mismo y no requieren comparación. El uso de uno u otro depende del tipo de antena que se esté probando, la precisión que se requiere, la cantidad de datos requeridos, el tiempo disponible para las mediciones y el presupuesto. Los métodos usuales son : patrón de polarización, fuente rotatoria, componentes de amplitud múltiple y fase-amplitud [20].

El patrón de polarización de una onda para estar completamente descrito debe contener el ángulo de inclinación, el radio axial de la elipse de polarización y el sentido de rotación del vector de campo eléctrico. En la Figura 14 se muestran estos tres parámetros.

Figura 14. Patrón de polarización de una onda.



Fuente: [20] Modificado por el autor.

Aquí se describe el método de medición del patrón de polarización que permite determinar el ángulo de inclinación y el radio axial de la elipse, pero no la dirección de rotación, esto es aceptable cuando se cuenta con recursos limitados.

8. Conectar la instrumentación de medida a la AUT.
9. Conectar generador de señal a la antena estándar con polarización lineal.
10. Identificar la dirección del vector de Poynting.
11. Ubicar la AUT en un plano normal a la dirección del vector de Poynting.
12. Rotar con respecto a la dirección radial, manteniendo θ y ϑ , registrar cuando el valor medido de tensión sea $V=1V$.
13. Graficar.

- Ganancia en potencia y Directividad
Algunas antenas se usan para medir los parámetros de otras, por tanto, deben ser muy precisas, la ganancia de la antena debe conocerse con precisión, debe tener alto grado de estabilidad dimensional y la polarización debe ser lineal o en algunos casos circular con el uso de dos antenas.

Cualquier antena que cumpla con estos criterios puede ser usada, pero por lo general se usan el dipolo y la antena bocina piramidal. Aun cuando la antena dipolo presenta polarización lineal, es bastante difícil decir cuál es la polarización de la onda a cierta distancia porque suele afectarse fácilmente por el ambiente en el que se propaga.

La calibración del rango de medición para ganancia se hace con base en la fórmula de transmisión de Friis, asumiendo que las antenas están acopladas en polarización y que las condiciones de campo lejano se cumplen. Se ubican las dos antenas y se conocerá la potencia que se le aplica a la antena de referencia, la ganancia de esta antena y se medirá la potencia en los terminales de la antena bajo prueba [20].

$$G_{AUT} = \frac{P_{AUT}}{P_{SG}} G_{SG} * L \quad (7)$$

Se requiere el conocimiento de las pérdidas del medio, que suelen expresarse como:

$$L = \left[\frac{\lambda}{4\pi l} \right]^2 \quad (8)$$

- **Directividad**

La directividad depende únicamente del patrón de radiación de la antena, por lo que este se debe hallar antes, dependiendo de la precisión del diagrama será la precisión de la medida de directividad. La antena radia según sus dos polarizaciones ortogonales, por tanto, el diagrama se debe medir en estas dos polarizaciones [20]. Se halla de la definición con respecto a la densidad de potencia, que incluye una integrar y no es fácil de obtener. Por esto se puede aproximar a partir de los ángulos de -3dB:

$$D \approx \frac{4\pi}{\theta_{HP} \phi_{HP}} \quad (9)$$

- **Eficiencia de radiación**

La eficiencia de radiación es la razón de la potencia total radiada por la antena y la potencia neta aceptada por ella en sus terminales durante la radiación [21]. La diferencia entre estos dos parámetros es la potencia que se disipa.

$$\eta_e = \frac{G}{D} \quad (10)$$

- **Impedancia de entrada**

La mejor forma de obtener la impedancia en la entrada de una antena es teniendo en cuenta que está conectada a una línea de transmisión para poder ser alimentada, pero esta línea puede no ser la misma con la que será

alimentada en el lugar de montaje. Es necesario poder separar estas dos mediciones para entregar solo la de la antena, esto se puede lograr por el método de des-embeber la impedancia [20].

La antena es removida de la línea de transmisión dejando esta última sola. Se le miden sus parámetros S en circuito abierto y se identifica el parámetro S_{11} que corresponde al coeficiente de reflexión. Con la antena conectada a la línea de transmisión se realiza de nuevo la medición de los parámetros S donde se puede identificar el parámetro S_{11} que es el coeficiente de reflexión del conjunto [18].

$$S_{Total} = S_{TL}S_{Ant} \quad (11)$$

$$S_{Ant} = S_{Total}S_{TL}^{-1} \quad (12)$$

Se encuentra des-embobiendo el valor del coeficiente de reflexión que existiría si estuviera solo la antena. De este parámetro se obtiene la impedancia de la antena como sigue

$$Z_a = Z_0 \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0} \quad (13)$$

Este procedimiento es válido también cuando se utiliza un balun o adaptador entre la línea de transmisión y la antena, pues de forma matricial, los parámetros S del conjunto son el resultado de la multiplicación de las matrices de parámetros s de cada uno de los componentes.

2.5 REALIMENTACIÓN

En el Capítulo 2 se hace mención a la realimentación como una etapa o procedimiento que permite tomar medidas correctivas sobre una etapa con base en los resultados a la salida de esta. A continuación, se listan casos típicos de realimentación, en orden, de acuerdo a la metodología presentada, se invita al lector a formular tantos escenarios como le sean necesarios:

1. Definición de requerimientos: no es posible encontrar una solución real que satisfaga todos los requerimientos. Se debe hacer una revisión de los compromisos de diseño y encaminar el diseño al cumplimiento de los requerimientos que más impacten el desempeño del sistema.
2. Implementación de filtro para EMC, red de acople y antena: la respuesta en frecuencia no coincide con las expectativas de diseño. Revisión de la

implementación y si está correcta, se procede a la sintonización hasta que la realidad coincida con la simulación.

3. Caracterización: alguno de los parámetros de antena difiere de forma considerable de la simulación. Se debe hacer revisión de la implementación, revisión de la simulación, revisión de la instrumentación de medida y finalmente tener en cuenta imperfecciones o elementos de conexión o cuerpos cercanos a la antena que afecten su comportamiento.

Cuando se hace necesaria una realimentación por discrepancia entre las expectativas y las mediciones, es aconsejable hacer la revisión de los factores de diseño que afectan los resultados actuales, desde el último paso que se ha desarrollado hasta el primero. Además, es beneficioso evaluar al final de cada etapa los resultados para evitar que se acumulen errores que más adelante sean de difícil diagnóstico.

2.6 COMUNICACIÓN DEL DISEÑO

Antes de comunicar el diseño de una antena es necesario hacer un proceso de caracterización cuyos resultados son la carta de presentación de la antena. al cliente y el usuario, es necesario realizar un proceso de caracterización. Los resultados que se comunican a cada interesado en el producto final son diferentes, a continuación, se resume esto.

Departamento de manufactura: resultados de la etapa *Diseño del detalle*. Con estos resultados debe ser posible construir la antena sin acudir al diseñador.

Cliente y usuario: se hace entrega de la hoja de datos con la caracterización de los parámetros de antena. Además, el plano entregado al departamento de manufactura se simplifica con las medidas máximas para que se entienda cuanto espacio requiere para su instalación.

Cliente: es importante que el cliente observe en los resultados como se cumplieron los requerimientos. Además, de la mejora o diferencia que representa la solución que se le entrega en comparación con otras disponibles en el mercado, esto, en términos de funcionamiento y costo-beneficio.

- Construcción de la hoja de datos

La hoja de datos es la carta de presentación de la antena diseñada con el cliente que la adquiere en el mercado. En la Figura 15 se presenta un modelo sencillo

de hoja de datos donde se requieren los valores de los parámetros más importantes cuando se comparan antenas para comprarlas.

Figura 15. Modelo hoja de datos para una antena.

NOMBRE ANTENA		Frecuencia		Gráfico esquemático o CAD
Referencia				
Rango de frecuencia	(En transmisión)	(En recepción)		Foto
Relación Adelante-Atrás				
ROE				
Potencia Mas de Entrada				
Impedancia				
Conector				
Cantidad de Elementos				
Polarización				
Alto				
Ancho				
Material				
Patrón de radiación				
Plano E	Plano H			

2.7 REGULACIÓN EN TELECOMUNICACIONES

Las telecomunicaciones como rama de la Ingeniería Electrónica se deben ocupar del conocimiento de los estándares generales para la protección de las personas en contacto directo o indirecto con los productos que entrega como disciplina. Además, del conocimiento y aplicación de estándares técnicos que le conciernen y son desarrollados para guiar esta disciplina.

En la Tabla 13 se presentan algunas instituciones que crean normas para de uso en el campo de acción del ingeniero electrónico, con la intención de proteger la integridad de las personas que tienen contacto con un dispositivo electrónico en general y promover el entendimiento del trabajo que es realizado en esta área de forma individual. Para cada institución se explica brevemente su trabajo y el carácter de los documentos que desarrollan.

Tabla 13. Resumen de instituciones que desarrollan documentos que sirven de regulación en el campo Ingeniería Electrónica.

	Descripción	Temáticas
Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE)	Es una asociación mundial de ingenieros que se dedica al desarrollo de técnicas y estándares. IEEE es una de las organizaciones líderes en la creación de estándares en el mundo. Tiene un departamento llamado "Asociación de estándares IEEE" que se encarga de controlar la creación, derogación y actualización de sus estándares.	Telecomunicaciones, tecnologías de la información, generación de energía eléctrica, biomedicina, transporte, nanotecnología y otros campos asociados.
	https://standards.ieee.org	
Organización Internacional para la Estandarización (ISO)	Es una organización independiente y de carácter no gubernamental compuesta por representantes de organizaciones nacionales de estandarización. Tiene 164 países miembros, voluntarios, entre los que promueve el intercambio de estándares, que se han desarrollado para cubrir productos y procesos en diversas áreas.	Procesos, productos y servicios de diferentes áreas. En electrónica abarca dispositivos electrónicos, producción de energía, automatización, control, telecomunicaciones, calidad, entre otros.
	http://www.iso.org	
Organización mundial de la salud (OMS)	Es el organismo de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) especializado en gestionar políticas de prevención, promoción e intervención en salud a nivel mundial. Los estándares que desarrolla no son de carácter técnico, por tanto, no incluyen información sobre la creación, control y medición de agentes de riesgo para la salud humana; se puede encontrar en ellos la fundamentación científica que sustenta el potencial de riesgo para la salud.	Protección en la práctica de la profesión, protección de los usuarios finales, de la comunidad en general y del medio ambiente. En servicios de telecomunicaciones cuenta con el Marco para el desarrollo de estándares de CEM basados en la salud.
	http://www.who.int/es/	
Comisión Internacional de Protección Frente a Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP)	Es una entidad independiente, con equipos de expertos científicos, creada para estudiar y elaborar recomendaciones sobre el efecto de las radiaciones no ionizantes. Fuera del campo de acción de la ICNIRP se encuentra el estudio de las radiaciones ionizantes, esta labor la realiza la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP).	Protección frente a las radiaciones electromagnéticas, desde los campos eléctricos y magnéticos estáticos hasta la radiación ultravioleta, pasando por las ondas microondas y las de radiofrecuencia.
	http://www.icnirp.org	

Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI)	<p>Es una organización sin fines de lucro que supervisa el desarrollo de estándares en Estados Unidos. Realiza en se país, la labor que en Colombia lleva a cabo ICONTEC. La diferencia radica en que ANSI cuenta con capacidad de investigación y desarrollo de estándares propios, que en muchas ocasiones son usados por IEEE para la creación de sus estándares. Es por esto que se incluye a pesar de no usarse directamente en Colombia las normativas de esta organización.</p>	<p>Procesos, productos y servicios de diferenes áreas.</p>
https://www.ansi.org		

Las instituciones listadas se ocupan de estandarizar procedimientos en diferentes campos de acción de la ingeniería electrónica, pero los documentos que éstas desarrollan pasan a ser más que recomendaciones únicamente cuando un ente del Estado indica obligatoriedad de uso por medio de decretos o leyes. No se listan las instituciones del gobierno involucradas con el trabajo del ingeniero electrónico porque dependen del área de aplicación. A pesar de ser muy amplio el campo de aplicación de la ingeniería electrónica, a todo ingeniero que desarrolle dispositivos electrónicos le debe interesar cumplir con los niveles permitidos de radiación no ionizante y de compatibilidad electromagnética. A continuación, se introducen estos temas.

2.7.1 Compatibilidad electromagnética e interferencia electromagnética

Debido al uso creciente de los dispositivos electrónicos para diferentes propósitos, se hace necesario que unos operen cerca de otros, además de verse aumentada la frecuencia de trabajo. Los circuitos por estar sujetos a frecuencias de trabajo, frecuentemente se ven afectados de forma negativa por los demás. Este contexto da lugar al estudio de la compatibilidad electromagnética, que es la habilidad de un sistema electrónico para funcionar adecuadamente en un ambiente y no causar contaminación, interferencia, electromagnética en ese ambiente.

El ruido es una señal eléctrica indeseada presente en un circuito; los dispositivos electrónicos pueden constituir fuentes de ruido que se pueden agrupar en intrínsecas, fabricadas y naturales. Independiente de la fuente del ruido, si este causa el funcionamiento no adecuado de un dispositivo, se le llama interferencia. En términos prácticos, el ruido y la interferencia se diferencian en que el primero puede ser reducido, pero no eliminado mientras la segunda puede llegar a eliminarse del todo. La energía electromagnética se envía y se recibe, por esto se

hace referencia a la emisión en el primer caso y a la susceptibilidad en el segundo [22].

De lo anterior nace el estudio de la interferencia electromagnética y la compatibilidad electromagnética para atacar los problemas de ruido que producen los dispositivos electrónicos. La diferencia esencial entre EMI y EMC es que la primera está relacionada con las ondas electromagnéticas radiadas que pueden causar problemas con sistemas de radiofrecuencia cercanos; mientras que la segunda, se relaciona con el ruido eléctrico que causa cualquier dispositivo electrónico que puede propagarse a través de cableado y circuitos produciendo picos o rizados en las señales.

Para medir el desempeño de un dispositivo en términos de EMI y EMC se toman tres conceptos: emisión, susceptibilidad e inmunidad. La *emisión* se relaciona con el potencial de un dispositivo de causar interferencia, siendo necesario controlar las emisiones para limitar la contaminación electromagnética del ambiente donde deben operar otros dispositivos. Por otro lado, la *susceptibilidad* es una medida de la respuesta del dispositivo a energía electromagnética que recibe bajo condiciones para las que no fue diseñado, siendo ideal que no se produzca respuesta en condiciones diferentes a las de operación. La contraparte de este concepto es la *inmunidad*, qué tan inmune es un dispositivo a la influencia de otras señales de forma que pueda operar sin alterar los resultados y sin degradación de la señal [24].

Un dispositivo con características pobres de susceptibilidad e inmunidad es fácilmente identificable por el usuario o cliente quien puede observar un desempeño deficiente, causando que el producto deje de ser adquirido y el mercado regula la producción del mismo. Pero el mercado no es eficiente regulando la emisión, debido a que quien nota el efecto negativo de este factor son otras personas diferentes al cliente y es muy difícil definir cuál es la fuente de la contaminación electromagnética en un ambiente con abundantes dispositivos electrónicos [22].

Los aspectos de EMI y EMC pueden incluirse en el proceso de diseño en forma de requerimientos técnicos para satisfacer la reglamentación local de un ente del Estado, apoyado en un estándar técnico de una entidad independiente o estatal. Cuando se hace de esta manera se ven ahorros en esfuerzo, tiempo y dinero. Una forma menos eficiente de considerarla es, adaptar el objeto después de haber sido construido; poner un escudo protector al producto, lo que puede verse como una medida correctiva. Entendido lo anterior, se dice que un dispositivo es electromagnéticamente compatible si:

1. No causa interferencia con otros sistemas
2. No es susceptible a las emisiones de otros sistemas
3. No causa interferencia con él mismo

2.7.2 Radiación no ionizante

Las personas están expuestas a fuentes de radiación electromagnética todos los días. Algunos ejemplos son el televisor, el radio y el celular, estos producen radiación no ionizante, al igual que la luz visible, el radar, la luz láser y la luz ultravioleta. Se le llama radiación no ionizante, porque la energía que contiene no es suficiente para ionizar átomos o moléculas, es decir, quitarles un electrón, lo que haría que la materia se modifique y se produzcan daños a nivel celular en los seres vivos [23].

La OMS ha añadido las radiaciones no ionizantes a las posibles causas de cáncer en humano, a pesar de que no existen evidencias concretas de esto. Los estándares para limitar la exposición de las personas a este tipo de radiación se desarrollan bajo el principio de prevención, tomando como base que la exposición prolongada puede causar acumulación de energía en los tejidos humanos y producir daños biológicos [24].

2.7.3 Tasa de absorción específica (SAR)

Esta es una medida que se utiliza principalmente en el diseño de celulares, corresponde a la cantidad relativa de energía de RF que es absorbida por un tejido de un usuario. Se expresa en vatios por kilogramo, siendo el límite impuesto por la FCC de 1.6W/Kg. El límite SAR depende de la parte del cuerpo, siendo crítico el caso de radiación a la cabeza del usuario. Por tanto, para determinar que un dispositivo cumple con los límites de SAR deben hacerse pruebas en múltiples posiciones habituales de uso cercano al cuerpo humano.

El empleo más común de esta medida se refiere a teléfonos móviles, en cuyo caso el teléfono se ubica junto a la cabeza en la posición de habla más habitual, y se informa del valor SAR para la parte de la cabeza que más energía haya recibido. También puede emplearse para otros dispositivos de radiofrecuencia que se usen cerca del cuerpo, como equipos de manos libres o teléfonos inalámbricos de línea fija. La regulación se hace con base en la teoría de radiaciones no ionizantes, bajo el principio de precaución para evitar posibles daños a la salud humana.

2.7.4 Resumen de instituciones que regulan las telecomunicaciones

En la Tabla 14 se presenta un listado de instituciones que se encargan específicamente de desarrollar documentos para guiar las gestiones de las telecomunicaciones desde el punto de vista técnico y/o legal. Como se explica en el capítulo 1, las normas se hacen cumplir por medio de acciones legales y de esta forma se regula el trabajo del ingeniero electrónico en el campo de las telecomunicaciones.

Tabla 14 Resumen de instituciones que desarrollan documentos para la reglamentación técnica y/o legal de las telecomunicaciones.

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Agencia Nacional del Espectro (ANE)</p>	<p>Hace planeación, vigilancia y control del uso del espectro radioeléctrico en Colombia. Tiene facultades para sancionar a quienes incurran en faltas a los decretos nacionales en el tema.</p>	<p>Resolución 2118 de 2011 – Por el cual se establecen las condiciones, los requisitos y se determina el trámite para otorgar permisos para el uso del espectro radioeléctrico.</p>
<p>http://www.ane.gov.co/</p>		
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC)</p>	<p>Es la entidad encargada de diseñar, adoptar y promover las políticas, planes, programas y proyectos del sector de las tecnologías de la información y las comunicaciones. Entre otras cosas, se encarga de velar por la salud de los colombianos bajo exposición a emisiones de radiación no ionizante, esto lo hace mediante regulaciones para la instalación de dispositivos electrónicos en determinados sectores.</p>	<p>* Decreto 195 de 2009 * RESOLUCIÓN 001645 DE 29 DE JUL 2005 * Decreto 1078 de 2015</p>
<p>http://www.mintic.gov.co</p>		
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Comisión Electrotécnica Internacional</p>	<p>La IEC es una organización internacional de estandarización que trabaja en el área de la electrónica, la eléctrica y las tecnologías relacionadas, sin ánimos e lucro y no gubernamental. Sus áreas de interés incluyen todas las electro-tecnologías, electrónica, magnética y electromagnética, electroacústica, multimedia, telecomunicaciones y tecnologías médicas. Desarrolla estándares de terminología,</p>	<p>Documentos desarrollados por el subcomité para las Telecomunicaciones y el intercambio de información entre sistemas.</p>

	<p>simbología, medición y seguridad en estos campos.</p>	
	<p>http://www.iec.ch/</p>	
<p>Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU)</p>	<p>Es el organismo de las Naciones Unidas para las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Su labor es la asignación del espectro radioeléctrico y las orbitas de satélite, vigila y coordina de forma internacional las normativas nacionales sobre la asignación del espectro. Los productos distintos de los de carácter normativo incluyen Apéndices a las Recomendaciones, Manuales de ITU, Guías de aplicación y Suplementos. Los documentos se encuentran agrupados por temas a los que les llaman series.</p>	<p>ITU k.52 Por medio de la cual se establecen los requerimientos de radiación de dispositivos de radiofrecuencia.</p>
	<p>http://www.itu.int/oficial</p>	
<p>Instituto Europeo de Estandarización en Telecomunicaciones (ETSI)</p>	<p>Es una organización independiente de estandarización, sin fines de lucro, en la industria de las telecomunicaciones, concentrada en la normativa para fabricantes de equipos, administraciones proveedores de servicios, organismos de investigación y operadores de redes en Europa. Contempla temas técnicos y de seguridad en cada aplicación de las telecomunicaciones, aportando estándares concretos para cada servicio.</p>	<p>Normas técnicas para el uso y control de las telecomunicaciones y los sistemas relacionados.</p>
	<p>http://www.etsi.org</p>	

3. CASO DE APLICACIÓN: DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA ANTENA DIPOLO

El caso que se presenta en este capítulo se ha pensado con fines metodológicos. Se sigue la metodología expuesta en un Capítulo 2 para el proceso de diseño, implementación y caracterización de una antena, siendo este un rediseño, pues se toman modelos de la literatura para ser modificados de acuerdo a los requerimientos de diseño.

3.1 DECLARACIÓN DEL PROBLEMA

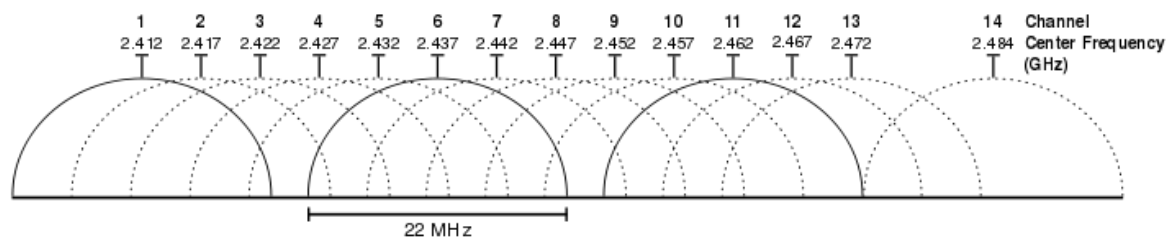
“Construir una antena de bajo costo para el servicio de WiFi que pueda ser incorporada por dentro de un router domestico de tamaño estándar y funcionar adecuadamente en todos los canales disponibles”

A continuación, se presenta una corta contextualización de acuerdo a las tres preocupaciones concretas que se ponen de manifiesto en la declaración del problema: costo, tamaño y servicio.

- Protocolo de internet de transmisión inalámbrica

El protocolo por el que se rigen las redes inalámbricas de área local (WLAN) es IEEE 802.11, desarrollado por el IEEE. La banda que corresponde a este servicio es 2.4GHz y se divide en 14 canales que están destinados a servicios más específicos, cada canal con 22MHz de ancho de banda, donde se produce solapamiento entre los canales. En la Figura 16 se muestra la gráfica de superposición de los canales, donde se resaltan los canales 1, 6, 11 y 14, que no se solapan entre ellos.

Figura 16. Canales de la banda de 2.4 GHz.



Fuente [21]

- Características de antenas típicas para servicio de WiFi

El rango típico para una antena bajo techo en el protocolo 802.11 a una frecuencia de 2.4 GHz con un ancho de banda de 20MHz por canal, siendo posible solo tener un canal activado a la vez, es de 20 m; cuando se ubica en el exterior libre de obstáculos como paredes, el rango aumenta a 100 m. En la Tabla 15 se presentan cuatro antenas.

Tabla 15 Comparación de rango de cuatro antenas de WiFi.

Antena	Ambiente	Ganancia	Tipo	Rango aproximado
TP-Link TL-ANT2409A	Bajo techo - Exterior	9 dBi	Direccional	1.77km/1km/140m (1/11/54Mbps)
TP-Link TL-ANT2424B	Exterior	24 dBi	Parabolica	56km/31.5km/4.44km (1/11/54Mbps)
C Crane US3 Super USB	Interior - Exterior	4.5 dBi	Omni-direccional	90 m - 1.6 km
Amped Wireless A8EX	Exterior	8 dBi	Omni-direccional	1.6 km

Fuente: construcción propia a partir de información obtenida de BestBuy.com

En una búsqueda en BestBuy.com, un distribuidor retail, se encuentran routers de características variadas. Hay diferentes opciones, están los que no tienen antena visible, siendo estos los de menor tamaño, así como los que cuentan con una o más antenas. Dada la declaración del problema, se consideran de interés aquellos dispositivos cuya antena esté instalada por dentro del router. En la Tabla 16 se presentan cuatro modelos de este tipo de router, con sus dimensiones físicas máximas aproximadas.

Tabla 16 Comparación de dimensiones entre 4 routers sin antena externa.

Router	Dimensiones [cm]		
	Alto	Ancho	Profundidad
NETGEAR - Wireless-N Router	3,56	17,78	12,954
Belkin - N600 Dual-Band	19,05	6,35	6,35
NETGEAR - AC1600 Dual-Band	19,812	19,05	6,604
Linksys - N600 Dual Band	25,654	32,512	6,604

Finalmente, se hace una búsqueda en Digikey.com¹⁰, distribuidor de componentes electrónicos, con el fin de definir un rango aceptable de costo de desarrollo de la solución. Además, identificar algunos tipos de antena frecuentemente usados para este servicio. A partir de esto se define:

1. Rango aceptable del costo: \$10000 - \$30000.
2. Tipo de antena más usado: omnidireccional (dipolos y monopolos).

- Contextualización de antenas típicas para el servicio de WiFi

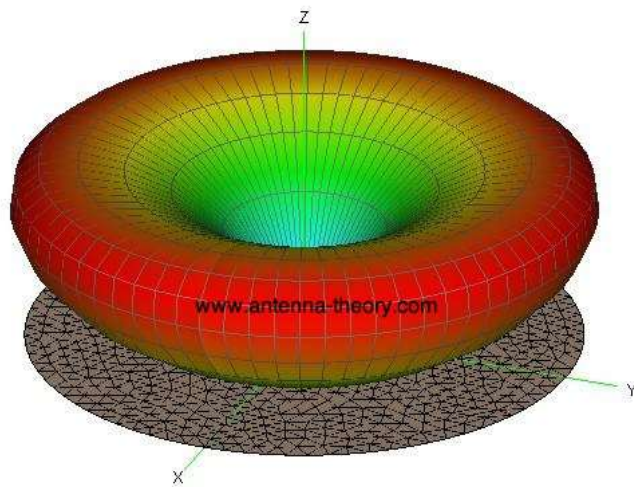
Para ampliar la información obtenida de Digikey, se realiza una búsqueda en BestBuy¹¹ y Alibaba¹², encontrando de nuevo que los tipos más comunes de antenas usadas para el servicio de WiFi doméstico son los dipolos y los monopolos. Se encuentran antenas alámbricas o impresas, de diferente material y topología

La característica que hace a las dos antenas mencionadas buenas opciones para el servicio de WiFi doméstico es la omnidireccionalidad de su patrón de radiación, que permite tener cobertura a la redonda con una estructura simple. En la Figura 17 se muestran el patrón típico de radiación de una antena monopolo, mientras en la Figura 18 se muestra el de una antena dipolo de media longitud de onda.

¹⁰ Distribuidor autorizado de componentes electrónicos de múltiples aplicaciones.

¹¹ Distribuidor de dispositivos electrónicos en Estados Unidos.

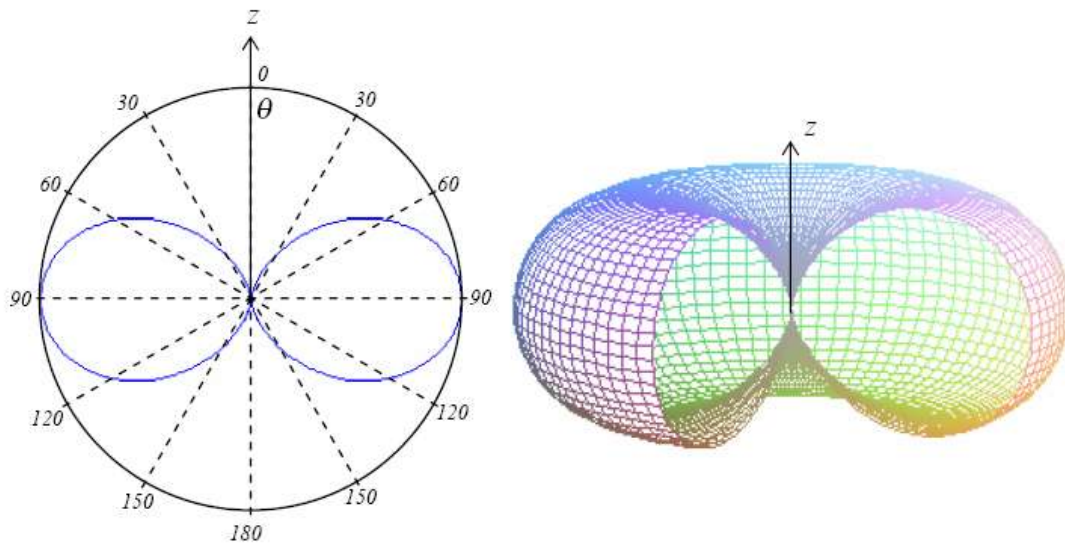
¹² Distribuidor mundial de productos de consumo incluyendo dispositivos electrónicos y antenas.



Fuente [21]

Figura 17 Patrón de radiación en tercera dimensión para una antena monopolo.

Figura 18 Patrón de radiación típico de una antena dipolo de media longitud de



Fuente [21]

onda.

3.2 DISEÑO CONCEPTUAL

En esta sección se resume la información relevante para el diseño, a partir de una revisión bibliográfica, se formula y selecciona la alternativa de solución y se desarrolla hasta estar de conformidad con los requerimientos.

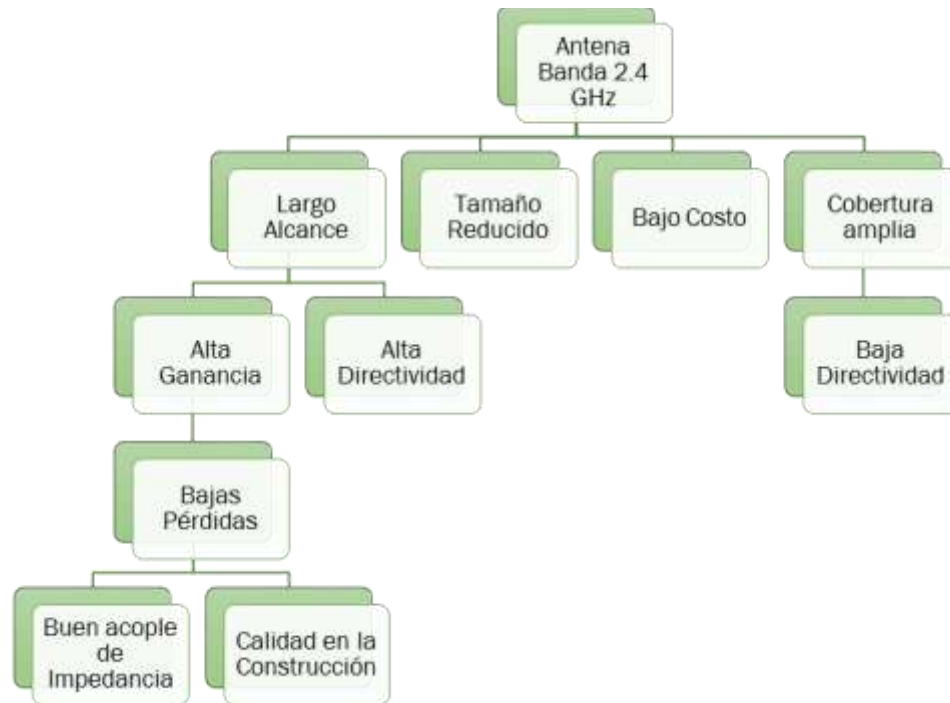
3.2.1 Definición de requerimientos

A partir de la declaración del cliente y la contextualización hecha, se puede hablar de requerimientos en valores numéricos, como se muestra a continuación:

1. Costo [\$10.000 - \$30.000]
2. Tamaño [64 cm² - 100 cm²]
3. Ancho de banda total 100 MHz

Estos tres requerimientos son los obtenidos a partir de la revisión de la declaración, pero es necesario formular otros requerimientos que permitan determinar con mayor precisión la solución que puede satisfacer la necesidad. En la Figura 19 se presenta un árbol de objetivos, cada objetivo se ha pensado para ofrecer el mejor servicio posible.

Figura 19. Árbol de objetivos para el caso práctico.



Del árbol de objetivos se puede ver que es necesario establecer compromisos entre algunos parámetros de antena, el análisis procede de forma cualitativa puesto que es apropiado para este caso en particular. Se da como sigue:

1. Dado que el servicio es WiFi doméstico, se establece que la cobertura debe darse en todas las direcciones para cualquier valor de theta en coordenadas esféricas. No sería apropiado, por ejemplo, que se pueda establecer conexión a 30 m cuando el punto de recepción se ubica por el frente del router, mientras a 1m por detrás del router no se recibe señal.
2. A partir del punto 1 se reflexiona que tampoco sería apropiado tener cobertura en todas las direcciones a 1 m de distancia del router, pero perder completamente la señal a 2 m.

Con las dos observaciones anteriores se procede a establecer los compromisos de diseño.

1. Cobertura a la redonda Vs Alcance: se sacrifica alcance por encima de 15 m, esperando obtener cobertura en todas las direcciones. Se debe escoger una antena de baja directividad para garantizar la cobertura, pero de potencia suficiente para garantizar el alcance.
2. Bajo costo Vs Alcance y Bajo Costo Vs Cobertura: se mantiene el costo bajo siempre y cuando no se comprometa el objetivo establecido en el punto 1. De esta forma se debe tratar de mejorar al alcance de la antena sin tener que aumentar su consumo de potencia haciéndola más eficiente, es decir, logrando un buen acople de impedancia y una implementación de calidad, estos dos factores incurren en el costo y se deben mejorar tanto como sea posible, mientras no se exceda el límite de \$30.000.
3. Tamaño reducido Vs cobertura, alcance y costo: el tamaño máximo de la antena se toma como no negociable, por tanto, debe mantenerse por debajo de los 100 cm². Se harán intentos por reducir el tamaño de la antena siempre y cuando no se violen los límites establecidos para los demás requerimientos.

En la Tabla 17 se presenta el resumen de requerimientos concretos para el diseño. Las características como ganancia, tipo de conector, impedancia de entrada y WSVR se concluyen a partir de la teoría general de antenas y de la revisión de los distribuidores mencionados.

Tabla 17. Tabla de características para antena dipolo en banda de 2.4 GHz.

Características	O	R	F	M
Frecuencia = 2.4GHz	✓		✓	
Ancho de Banda ≥ 100 MHz	✓		✓	
Ganancia ≥ 1.6 dBi	✓		✓	
Impedancia de entrada = 50	✓			
Conector SMA de 9mm			✓	✓
Funcionamiento en zona Urbana			✓	
Costo ≤ 30.000		✓		
WSVR ≤ 2	✓		✓	

Tamaño \leq 100 cm²

✓

3.2.2 Selección de antena

Partiendo de la contextualización donde se identifican tipos típicos de antenas utilizadas en servicios de WiFi doméstico: dipolos y monopolos, se crean gráficos morfológicos para escoger una opción entre estos dos tipos de antenas. En la Tabla 18 se comparan de acuerdo a sus parámetros de antena. La comparación en la Tabla 19 se hace como respuesta al requerimiento de tamaño reducido, sabiendo de la Tabla 10 que las antenas parche tienen como ventaja su tamaño reducido y su bajo costo.

Tabla 18 Grafico morfológico para comparación entre antenas monopolo y dipolo.

Características	Dipolo	Monopolo
Cobertura en todas las direcciones a la redonda	1	0
Baja directividad	1	0
Tamaño reducido	0	1

Tabla 19 Grafico morfológico para comparación de características entre antenas alámbricas y tipo parche.

Características	Alámbricas	Impresas
Bajo Costo	1	1
Tamaño reducido	0	1

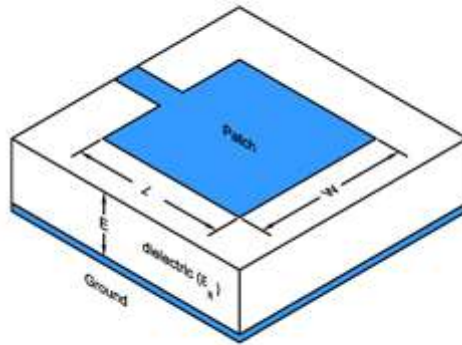
Según las comparaciones anteriores se escoge un *dipolo impreso*. Ahora corresponde hacer una contextualización sobre las antenas impresas y las antenas dipolo.

3.2.3 Modelado de antena

Para entender cómo se debe modelar el dipolo impreso para la aplicación que se requiere, se debe tener una fundamentación teórica que permita establecer expectativas de los resultados en las diferentes etapas. A continuación, se presenta una corta contextualización de los temas necesarios.

- Antenas parche

Las antenas impresas han ido ganando protagonismo por ser fácilmente fabricadas y de bajo costo. Por lo general el metal que constituye la antena está hecho de cobre, que reposa sobre una placa de material dieléctrico. En la Figura 23 se presenta la antena impresa conocida como antena parche con sus parámetros de diseño.



Fuente [21]

Figura 20 Antena parche.

La frecuencia de resonancia de este tipo de antena se expresa como sigue:

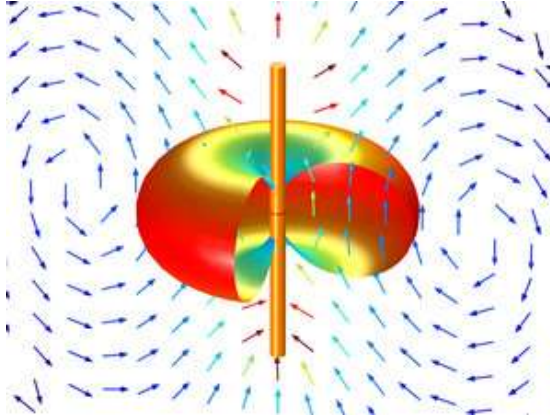
$$f_c = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (13)$$

Esta ecuación ofrece indicios sobre cómo se comporta el dipolo impreso. Es de gran importancia tener en cuenta el sustrato sobre el que se modela la antena.

- Antena dipolo de media longitud de onda

En la Figura 18 se muestra el patrón de radiación de una antena dipolo de media longitud de onda, que tiene forma de dona. Los lugares donde no se presenta radiación coinciden con los brazos del dipolo como se ve en la Figura 24. Al revisar la Ecuación 14 se expresa la corriente en los brazos del dipolo como una corriente senoidal, coincidiendo el extremo del dipolo con un nulo de la onda, lo que causa que no se produzca corriente en esa dirección.

Figura 21 Dipolo de media longitud de onda con su patrón de radiación en 3D.



Fuente [21]

$$I(z) = \begin{cases} I_0 \sin\left[k\left(\frac{L}{2}-z\right)\right], & 0 \leq z \leq \frac{L}{2} \\ I_0 \sin\left[k\left(\frac{L}{2}+z\right)\right], & -\frac{L}{2} \leq z \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

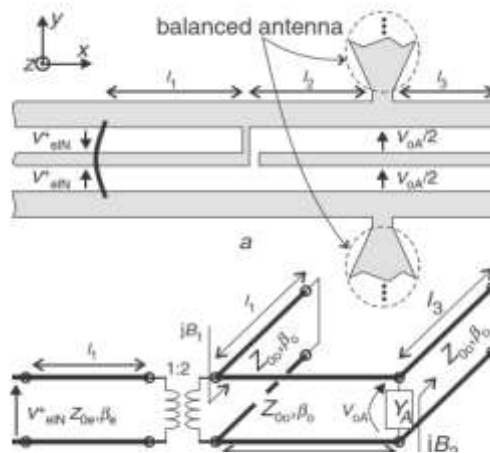
Los dipolos son estructuras balanceadas, las corrientes que circulan por sus brazos son iguales, pero de dirección opuesta y afectar ese balanceo puede causar que el patrón de radiación se modifique. Las corrientes que llegan al puerto de alimentación de la antena deben estar balanceadas, sin embargo, las antenas suelen alimentarse con cable coaxial, que dada su geometría entrega corrientes desbalanceadas.

Con la adaptación de un circuito a la entrada de la antena se puede lograr balancear las corrientes que llegan del cable coaxial para entregarlas a la antena, estos circuitos son llamados balun, que es una contracción del inglés *balanced-unbalanced*. Existen diferentes estructuras conocidas de balun, algunas incluso logran hacer adaptación de impedancia.

- Selección de la topología de antena dipolo tipo parche

En la Figura 21 se muestra un dipolo con una estructura que permite pasar de alimentación coplanar a alimentación de microcinta a la vez que balancea la alimentación para que pueda ser incorporado con cualquier antena de tipo balanceada. Esta topología puede ser usada con cualquier tipo de antena balanceada y sus dimensiones deben ajustarse para mantener una relación con la frecuencia de diseño, pero algunas de las dimensiones marcadas en el esquema pueden llegar a hacerse cero [25].

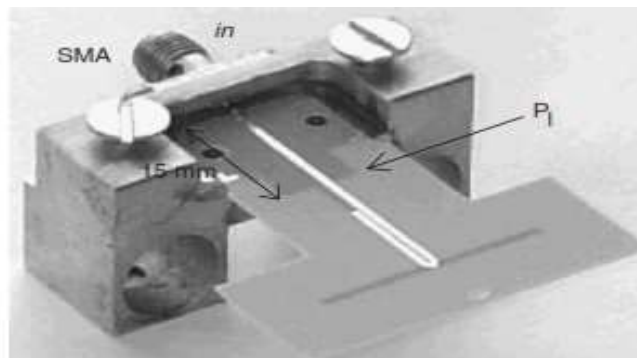
Figura 22. Esquema de línea coplanar a microcinta para antena balanceada.



Fuente [27]

En la Figura 23 se observa un dipolo con balun tipo j en circuito abierto, siendo el balun un factor de ajuste para la resonancia y el ancho de banda de la antena. Este modelo se presenta [26] para una frecuencia de 5,2 GHz, acompañado de los circuitos equivalentes en elementos distribuidos y un análisis para llegar a sus medidas.

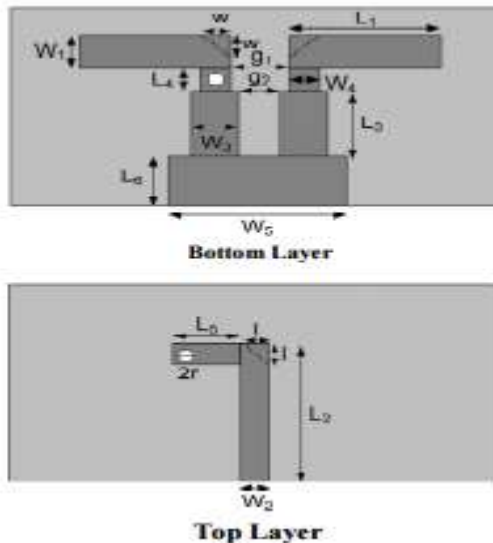
Figura 23. Dipolo impreso con balun tipo J



Fuente [28]

Finalmente, en [27] se presenta un dipolo impreso con balun en corto circuito, para la banda de 2.4GHz y un análisis para las variaciones de acuerdo a la distancia del gap de alimentación entre los dos brazos del dipolo.

Figura 24. Dipolo con balun vía hueco



Fuente [29]

De las características descritas en los documentos de referencia y algunas búsquedas adicionales para estos tres modelos se puede decir que funcionan en general de la misma forma, no presentándose en concreto diferencias en mejoramiento del nivel de resonancia ni en el ancho de banda, dependiendo estas características de la variación de los parámetros de cada modelo.

Los tres modelos presentados tienen la ventaja de traer incorporado un balanceo de corrientes mediante balun a la vez que este hace un acople de impedancia. Se procede a seleccionar el modelo al que se le hace el rediseño. La solución se escoge de acuerdo a conveniencia para el proceso de implementación, es decir, pensando en un posible proceso de sintonización, de tal forma que puedan ser modificados los parámetros de diseño. Se descartan la primera y la tercera opción debido a que el corto que se hace con la vía de alimentación, en los dos casos, no podría modificarse de ser necesario.

- Simulación

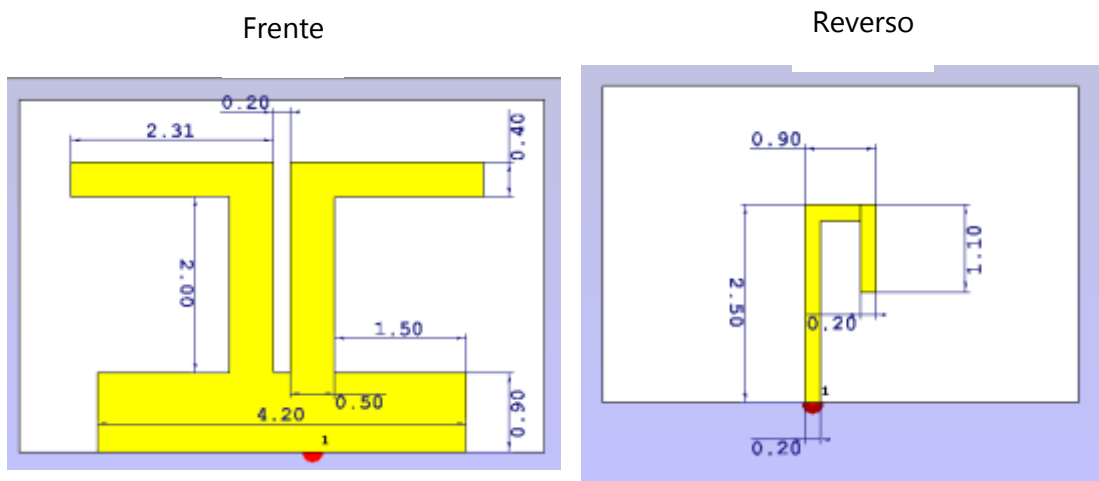
Del conocimiento general que se ha adquirido de los dipolos y las antenas impresas se puede esperar algunos resultados, como son patrón de radiación y ganancia. Para la simulación de la antena se usa el software CST Studio Suite,

con licencia institucional adquirida por la Universidad. Las consideraciones son las siguientes

1. Grosor de la baquelita: 1mm. Material FR-4
2. Grosor de la capa de cobre: 0.2 mm.
3. Tamaño de la placa 8cm*8cm

En la Figura 25 se muestra el modelo con sus dimensiones en cm y en la Figura 26 se muestra el comportamiento del parámetro S11 dónde se comprueba la frecuencia de resonancia. Por último, en la Figura 27 se muestra el patrón de

Figura 25 Dimensiones del dipolo implementado en el primer intento.



radiación con los valores de ganancia.

Figura 26 Respuesta del parámetro S11 para las medidas correspondientes a la Figura 23.

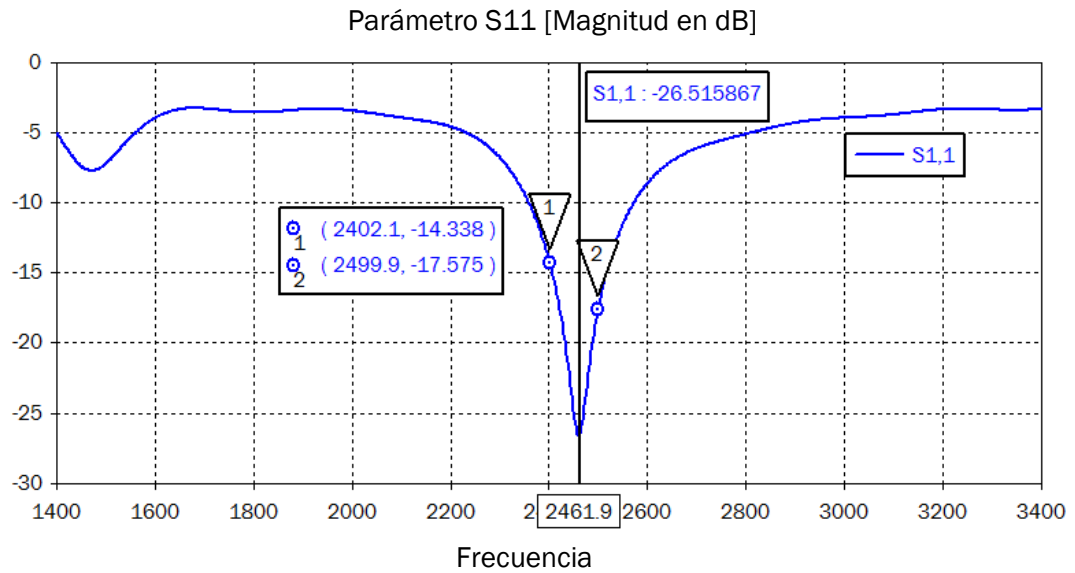
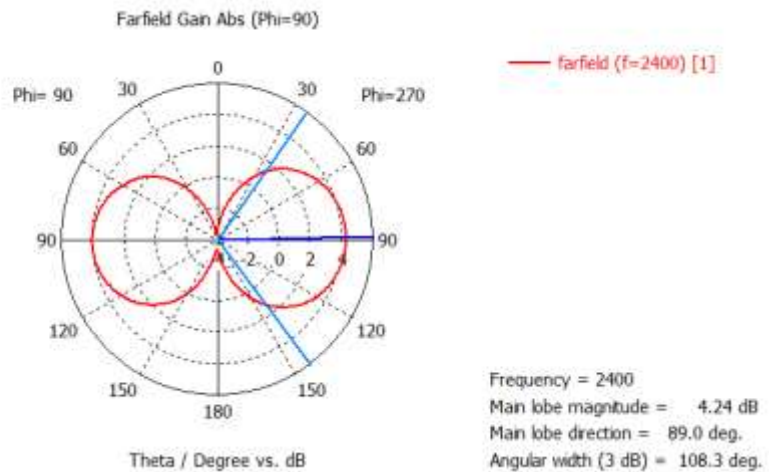


Figura 25 Patrón de radiación en coordenadas polares del dipolo correspondiente a la figura 25.



3.2.4 Construcción y sintonización del prototipo (implementación)

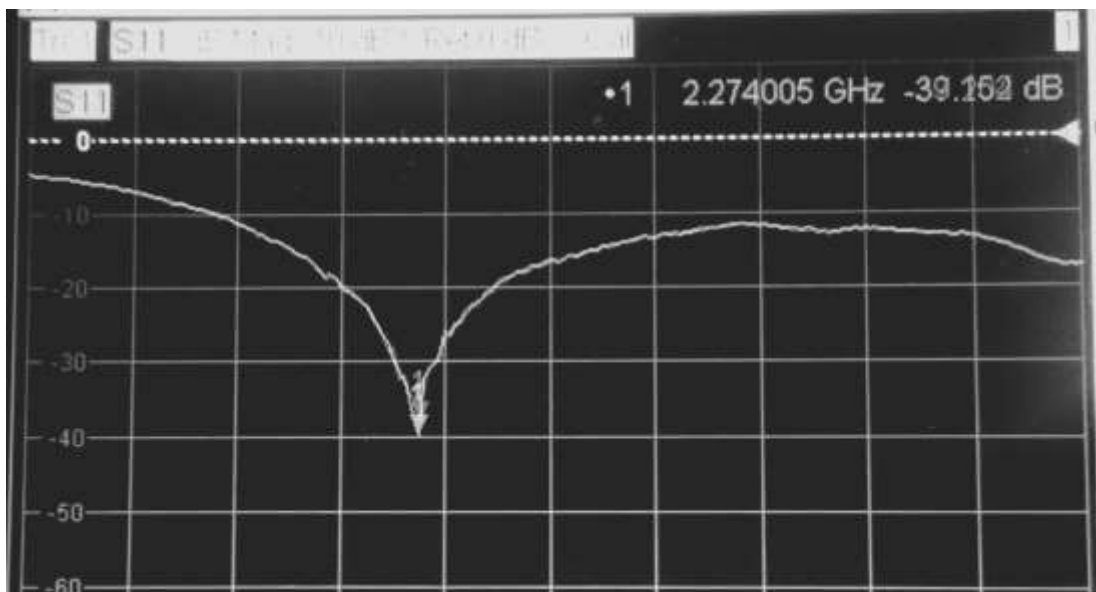
Se crea un plano CAD y se pasa a una empresa encargada de hacer circuitos impresos, el tiempo de construcción es de 1 día y se reciben los resultados. En la Tabla 20 se resumen los costos.

Tabla 20. Resumen de costos de antena diseñada.

Concepto	Valor
Antena	12.000
Conector SMA Hembra de 9mm	3000
Total	15000

La sintonización se realiza con base en el parámetro S11 medido con un VNA de la marca Rhode & Schwarz. Los resultados se muestran en la Figura 28, no son satisfactorios pues la frecuencia de resonancia se encuentra en 2.27 GHz. En este punto es necesario hacer una realimentación.

Figura 26. Frecuencia de resonancia para dimensiones correspondientes a la figura 27.

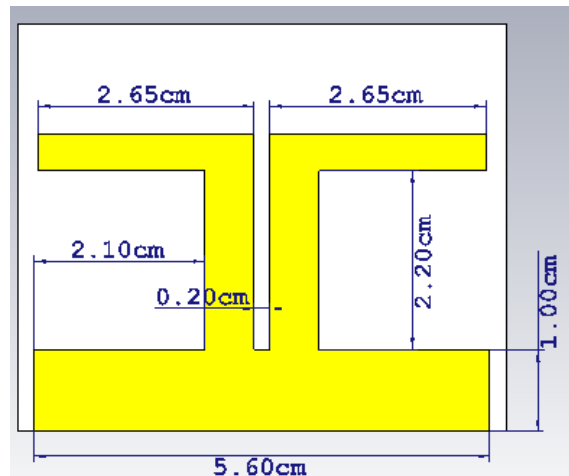


3.2.5 Pasos de la realimentación realizada.

1. Revisión de los resultados de la implementación Se mide la antena impresa y se observa que las medidas no coinciden con las que se enviaron

en el plano CAD. En este sentido, como prevención se hace una impresión de prueba para verificar las medidas y enviarla de nuevo a implementación. Los pasos que siguen se hacen con base en esta observación. En la Figura 27 se presentan las medidas reales de la antena después de la etapa de implementación, sin ningún ajuste.

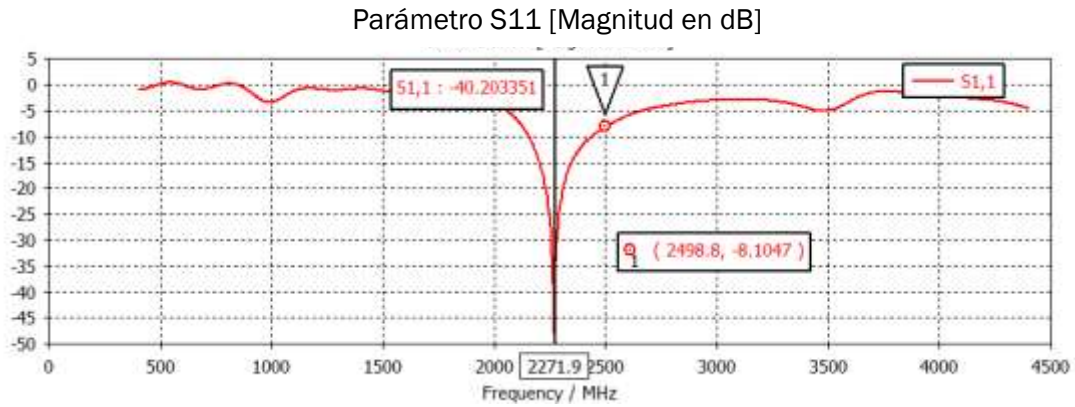
Figura 27 Medidas reales después de implementación.



2. Ajuste del modelo en simulación con la realidad Se modifica el modelo de simulación con las medidas de la antena real y se comparan los resultados obtenidos en medición y los que se obtienen en simulación. Esto con el fin de detectar si existe un problema en la configuración del simulador.

La frecuencia de resonancia en medición es de 2.27 GHz, mientras que el valor de la frecuencia de resonancia con esas mismas medidas en simulación es de 2 GHz. Existe una discrepancia entre la realidad y la simulación, por tanto, el grosor de la placa dieléctrica se ajusta a 1 mm y el grosor de la placa de cobre a 0.2 mm. Esto se hace mediante barrido paramétrico hasta encontrar los valores de coincidencia. En la figura 28 se observa la respuesta del parámetro S11 con esta modificación.

Figura 28. Respuesta del parámetro S11 para modelo correspondiente a la Figura 27. Grosor placa dieléctrica de 1 mm, grosor de placa de cobre de 0.2 mm.



- Ajuste de modelo en simulación para lograr resonancia de 2.4 GHz. Con la simulación y la realidad coincidiendo en resonancia de 2.27GHz se procede a modificar el modelo de la antena para obtener resonancia de 2,4 GHz. Se crea nuevo plano CAD y se envía de nuevo a manufactura. Se mantienen las dimensiones del grosor de la placa dieléctrica y de la placa de cobre. En la Figura 29 se presentan las medidas del nuevo modelo, y en la Figura 30 se presenta la respuesta del parámetro S11 para este modelo.

Figura 29. Antena dipolo a 2.4 GHz, medidas correspondientes a la modificación del modelo.

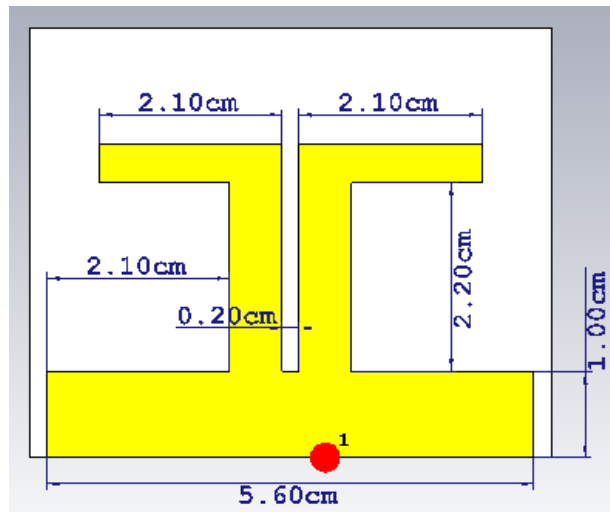
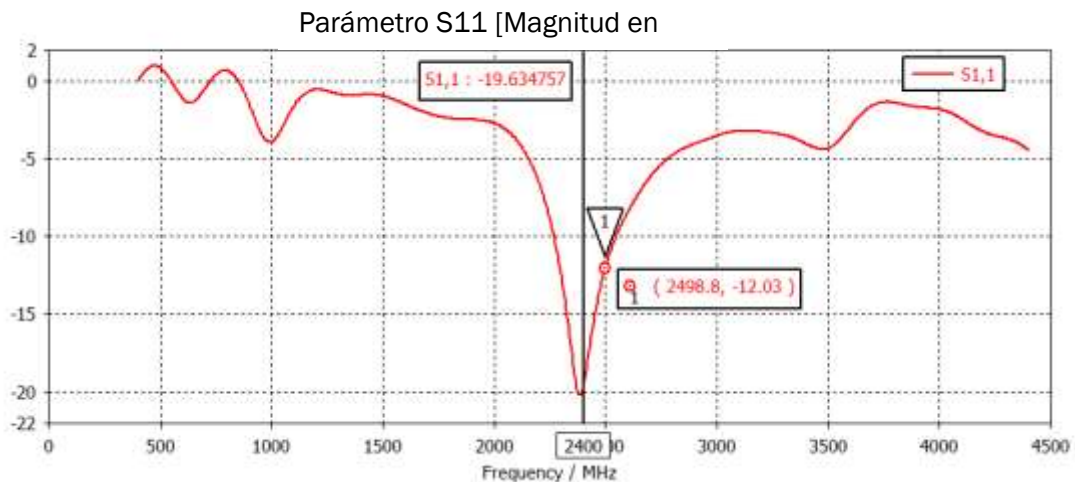


Figura 30 Respuesta del parámetro S11 para modelo correspondiente a la Figura 29.



4. Modificación artesanal de la implementación La antena que fue impresa con las dimensiones incorrectas se modifica de forma artesanal, acortando la longitud del brazo del dipolo hasta coincidir con las dimensiones en la Figura 29. La respuesta del parámetro S11 después de la modificación se observa en la Figura 31.

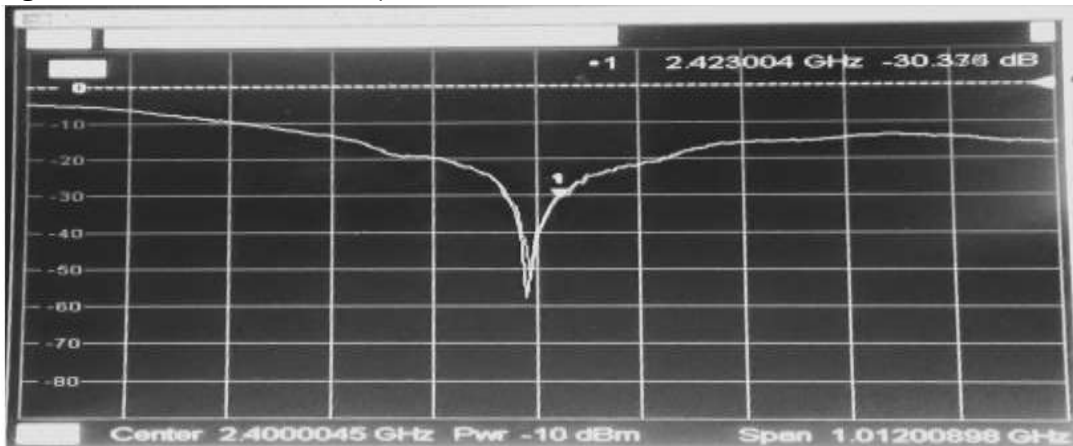
Deben cuidarse las condiciones de medición pues la frecuencia de resonancia se ve afectada cuando se sostiene en la mano, la medición se lleva a cabo dejándola libre, estando apoyada la sonda de medición más no la antena.

Dado que en la Universidad no se cuenta con instalaciones apropiadas para llevar a cabo un proceso de caracterización riguroso, la etapa de **caracterización** se limita a la medición del parámetro S11, con base en este parámetro se puede asegurar lo siguiente:

1. La frecuencia de trabajo coincide con el diseño.
2. La impedancia de entrada presenta buen acople con la línea de alimentación debido al nivel de resonancia de -30 dB, lo que lleva a que estando en operación la antena presente pocas pérdidas por acople.

Una etapa de caracterización más completa hubiera permitido determinar si el patrón de radiación de la antena implementada corresponde al de la Figura 25, para realizar este proceso de caracterización se requiere una cámara anecoica. En Colombia existe solo una cámara anecoica y está ubicada en la Universidad de los Andes en Bogotá, que solicita diligenciar un formato similar al del Anexo C y lleva a cabo el proceso con personal propio de la institución.

Figura 31. Resultados finales después de sintonización artesanal.



CONCLUSIONES

Del seguimiento de la metodología que se hace en el Capítulo 3 mediante un caso de estudio se concluye que la metodología es útil para obtener una antena funcional aun cuando no se sigan todas las etapas de forma estricta, debido a ajustes que se hacen necesarios por limitaciones en instalaciones, instrumentación o técnicas de fabricación. Esto soporta la intención de la metodología de ser guía más no camisa de fuerza, que ha sido seguida con criterio propio por el autor.

En la Sección 3.2.5 se llevan a cabo unos pasos para la realimentación de los resultados no satisfactorios, la metodología fue de gran ayuda en este paso en particular, debido a la sugerencia de revisar los resultados desde los más recientes hacía atrás. De esta forma se pudo detectar en primera instancia que las medidas de la placa construida eran incorrectas, seguido de un ajuste en simulación para verificar que no había una buena coincidencia y finalmente el ajuste de la realidad con la simulación (sintonización) para buscar los nuevos resultados.

El desarrollo que se hace del caso de estudio, donde se obtiene una antena funcional en la frecuencia de diseño 2.4 GHz, para servicio de WiFi, se compara con otros productos de trabajos de grado o proyectos de asignaturas y se identifican algunas etapas de la metodología que no suelen seguirse a nivel de pregrado. Estas etapas son las correspondientes a la **preparación para el mercado, diseño para EMC y caracterización de todos los parámetros**. Con base en esto se concluye que es habitual que los diseños producidos a nivel de pregrado queden en una versión de prototipo funcional.

A partir de los resultados en Figura 31 y de los conocimientos previos, se puede observar que esta antena es susceptible a transmitir interferencia, dado que para bandas de frecuencia diferentes a las de operación el parámetro S11 no se hace igual a 0 dB. Si el sistema (router) a la que se le conectara llegara a producir ruido es posible que sea transmitido, para corregir este problema se hace necesario el **diseño para EMC** con el fin de limitar las emisiones en frecuencias diferentes a las comprendidas en la banda de 2.4GHz a 2.5GHz. Esta etapa no se ha desarrollado en el caso de estudio debido a que el diseño de filtros en microcinta requiere especial atención y el estudio de estos no está contemplado en el plan de trabajo de grado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HYLTON, Pete. The process of designing a design process: An outside-the-box engineering technology capstone course. En: Frontiers in Education Conference (FIE). Octubre, 2010. p. 1-6.
- [2] BRAHA, Dan y MAIMON, Oded. The design process: Properties, paradigms, and structure. En: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A:Systems and Humans. Julio, 1998. vol. 28, . p. 66-146.
- [3] KHANDANI, Seyyed. Engineering Design Process. [en línea]. 2005. [citado en 21 de octubre de 2016]. Disponible en internet: <<http://www.iisme.org/ETPExemplary.cfm>>.
- [4] CLIVE, Dym; LITTLE, Patrick y ORWIN, Elizabeth. Engineering Design a Project-Based Introduction. 4 ed. New Jersey.: Wiley, 2013. 338 p.
- [5] DIETER, George y SCHMIDT, Linda. Engineering Design. 4 ed. Ohio.: McGraw-Hill, 2015.
- [6] Z, Sue; J. Liu, "A design thinking process model for capturing and formalizing design intents," *Proceedings of the 2008 International Symposium on Computational Intelligence and Design, ISCID 2008*, vol. 2, no. ml, pp. 330–333, 2008.
- [7] CAPABIANCO, Brenda; DIES-DUX, Heidi; MENA, Irene; y WELLER, Jessica. What is an Engineer? Implications of Elementary School Student Conceptions for Engineering Education. En: Journal of Engineering Education. vol. 100, no. 2., p. 304-328.
- [8] DYM, Clive; AGOGINO, Alice y OZGUR, Eris. Engineering design thinking, teaching, and learning. En: IEEE Engineering Management Review. Septiembre, 2006. no. p. 65-65.
- [9] KOCABIYIK, Elif. Engineering Concepts in Industrial Product Design With A Case Study of Bicycle Design. Maestría en diseño industrial. Esmirna.: Instituto Tecnológico de Esmirna. Departamento de diseño Industrial, 2004. 167 p.

- [10] CHIA-CHEN, Lu. The relationship between student design cognition types and creative design outcomes. En: Design Studies. vol. 36. p. 59-76.
- [11] KAWAMOTO, Kensaku Y GREENES, Robert. The Role of Standards. What We Can Expect and When. 2 ed. Nueva York.: Elsevier Inc, 2014. 625 p.
- [12] NILS, Brunsson y JACOBSSON, Bengt. A world of standards. Oxford.: Oxford University Press, 2002. 198 p.
- [13] GROSSEL, Stanley Regulations, Codes, and Standards. En: Deflagration and Detonation Flame Arresters. 1 ed. Nueva York: John Wiley, 2002. p. 66-153.
- [14] WOHLIN, Claes y RUNESON, Per. Certification of Software Components. En: IEEE Transactions on Software Engineering. Junio, 1994. vol. 20, no. 6,. p. 494-499.
- [15] CORBETT, Charles y KIRSH, David. International diffusion of ISO 14000 certification. Production and Operations Management. [en línea]. 2001. [citado en 21 de octubre de 2016]. Disponible en internet: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1937-5956.2001.tb00378.x>>.
- [16] MENDEL, Joanne. A taxonomy of models used in the design process. En: Interactions. Enero, 2012. vol.19, no. 1, p. 81-85.
- [17] Design Council. A Study of the Design Process. En: Design Council. Enero, 2007. vol. 44. p. 1-144.
- [18] TANG, Dunbing; ZHANG, Li; LI, Zhizong; LI, Dongbo y ZHANG, Shiqi. Re-engineering of the design process for concurrent engineering. Computers and Industrial Engineering. 2000. vol. 38, no. 4. p. 91-479.
- [19] PETERS, Michael; KETHLEY, Bryan; BULLINGTON, Kimball. Course Design Using the House of Quality. Journal of Education for Business [en línea].2005. [citado en 20 de octubre de 2016]. Disponible en internet: <<http://dx.doi.org/10.3200/JOEB.80.6.309-315>>.
- [20] HUANG, Yi y BOYLE, Kevin. Antennas: From Theory to Practice. 1 ed. Nueva York.: Wyles, 2008. 356 p.

- [21] KRAUS, J. Antennas [en línea]. 1998. [citado en 20 de octubre de 2016]. Disponible en internet: <<http://www.citeulike.org/group/1396/article/437688>>.
- [22] HURD, GA. IEEE Standard Test Procedures for Antennas [en línea]. 1980. [citado en 20 de octubre de 2016]. Disponible en internet: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ep.1980.0385>>.
- [23] STANDARDS IEEE. IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas. En: IEEE xplore. Abril, 2004.
- [24] CLAYTON, Paul. Introduction to Electromagnetic Compatibility. En: IEE Review. 1992. 280 p.
- [25] D. B. Davidson, *Computational Electromagnetics for RF and Microwave Engineering*, vol. 1. New York: Cambridge University Press, 2015.
- [26] Z. Sienkiewicz, "International workshop on non-ionizing radiation protection in medicine.," *Medical physics*, vol. 40, no. 11, p. 117001, 2013.
- [27] A. M. Sánchez, M. Ribó, L. Pradell, J. Anguera, and A. Andújar, "CPW balun for printed balanced antennas," vol. 50, no. 11, pp. 785–786, 2014.
- [28] C. Liang, L. Li, and H. Zhai, "Variational stability form for the capacitance of an arbitrarily shaped conducting plate," *Chinese Journal of Electronics*, vol. 13, no. 4, pp. 714–718, 2004.
- [29] J. Y. Lee and S. N. Hwang, "A high-gain boost converter using voltage-stacking cell," *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 57, no. 6, pp. 982–984, 2008.
- [30] THOMAS A. MILLIGAN, *MODERN ANTENNA DESIGN*, Second Edi., vol. 53, no. 9. Wiley, 2005.
- [31] S. Silver, "Microwave Antenna Theory and Design," pp. 97–100, 1984.

BIBLIOGRAFÍA

A. M. Sánchez, M. Ribó, L. Pradell, J. Anguera, and A. Andújar, "CPW balun for printed balanced antennas," vol. 50, no. 11, pp. 785–786, 2014.

BRAHA, Dan y MAIMON, Oded. The design process: Properties, paradigms, and structure. En: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans. Julio, 1998. vol. 28, . p. 66-146.

C. Liang, L. Li, and H. Zhai, "Variational stability form for the capacitance of an arbitrarily shaped conducting plate," Chinese Journal of Electronics, vol. 13, no. 4, pp. 714–718, 2004.

CAPABIANCO, Brenda; DIEFES-DUX, Heidi; MENA, Irene; y WELLER, Jessica. What is an Engineer? Implications of Elementary School Student Conceptions for Engineering Education. En: Journal of Engineering Education. vol. 100, no. 2,. p. 304-328.

CHIA-CHEN, Lu. The relationship between student design cognition types and creative design outcomes. En: Design Studies. vol. 36. p. 59-76.

CLAYTON, Paul. Introduction to Electromagnetic Compatibility. En: IEE Review. 1992. 280 p.

CLIVE, Dym; LITTLE, Patrick y ORWIN, Elizabeth. Engineering Design a Project-Based Introduction. 4 ed. New Jersey: Wiley, 2013. 338 p.

CORBETT, Charles y KIRSH, David. International diffusion of ISO 14000 certification. Production and Operations Management. [en línea]. 2001. [citado en 21 de octubre de 2016]. Disponible en internet: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1937-5956.2001.tb00378.x>>.

D. B. Davidson, Computational Electromagnetics for RF and Microwave Engineering, vol. 1. New York: Cambridge University Press, 2015.

Design Council. A Study of the Design Process. En: Design Council. Enero, 2007. vol. 44. p. 1–144.

DIETER, George y SCHMIDT, Linda. Engineering Design. 4 ed. Ohio.: McGraw-Hill, 2015.

DYM, Clive; AGOGINO, Alice y OZGUR, Eris. Engineering design thinking, teaching, and learning. En: IEEE Engineering Management Review. Septiembre, 2006. no. p. 65-65.

GROSSEL, Stanley Regulations, Codes, and Standards. En: Deflagration and Detonation Flame Arresters. 1 ed. Nueva York: John Wiley, 2002. p. 66-153.

HUANG, Yi y BOYLE, Kevin. Antennas: From Theory to Practice. 1 ed. Nueva York.: Wyles, 2008. 356 p.

HURD, GA. IEEE Standard Test Procedures for Antennas [en línea]. 1980. [citado en 20 de octubre de 2016]. Disponible en internet: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ep.1980.0385>>.

HYLTON, Pete. The process of designing a design process: An outside-the-box engineering technology capstone course. En: Frontiers in Education Conference (FIE). Octubre, 2010. p. 1-6.

J. Y. Lee and S. N. Hwang, "A high-gain boost converter using voltage-stacking cell," Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 57, no. 6, pp. 982–984, 2008.

KAWAMOTO, Kensaku Y GREENES, Robert. The Role of Standards. What We Can Expect and When. 2 ed. Nueva York.: Elsevier Inc, 2014. 625 p.

KHANDANI, Seyyed. Engineering Design Process. [en línea]. 2005. [citado en 21 de octubre de 2016]. Disponible en internet: <<http://www.iisme.org/ETPExemplary.cfm>>.

KOCABIYIK, Elif. Engineering Concepts in Industrial Product Design With A Case Study of Bicycle Design. Maestría en diseño industrial. Esmirna.: Instituto Tecnológico de Esmirna. Departamento de diseño Industrial, 2004. 167 p.

KRAUS, J. Antennas [en línea]. 1998. [citado en 20 de octubre de 2016]. Disponible en internet: <<http://www.citeulike.org/group/1396/article/437688>>.

MENDEL, Joanne. A taxonomy of models used in the design process. En: Interactions. Enero, 2012. vol.19, no. 1, p. 81-85.

NILS, Brunsson y JACOBSSON, Bengt. A world of standards. Oxford.: Oxford University Press, 2002. 198 p.

PETERS, Michael; KETHLEY, Bryan; BULLINGTON, Kimball. Course Design Using the House of Quality. Journal of Education for Business [en línea].2005. [citado en 20 de octubre de 2016]. Disponible en internet: <<http://dx.doi.org/10.3200/JOEB.80.6.309-315>>.

S. Silver, "Microwave Antenna Theory and Design," pp. 97–100, 1984.

STANDARDS IEEE. IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas. En: IEEE xplore. Abril, 2004.

TANG, Dunbing; ZHANG, Li; LI, Zhizong; LI, Dongbo y ZHANG, Shiqi. Re-engineering of the design process for concurrent engineering. Computers and Industrial Engineering. 2000. vol. 38, no. 4. p. 91-479.

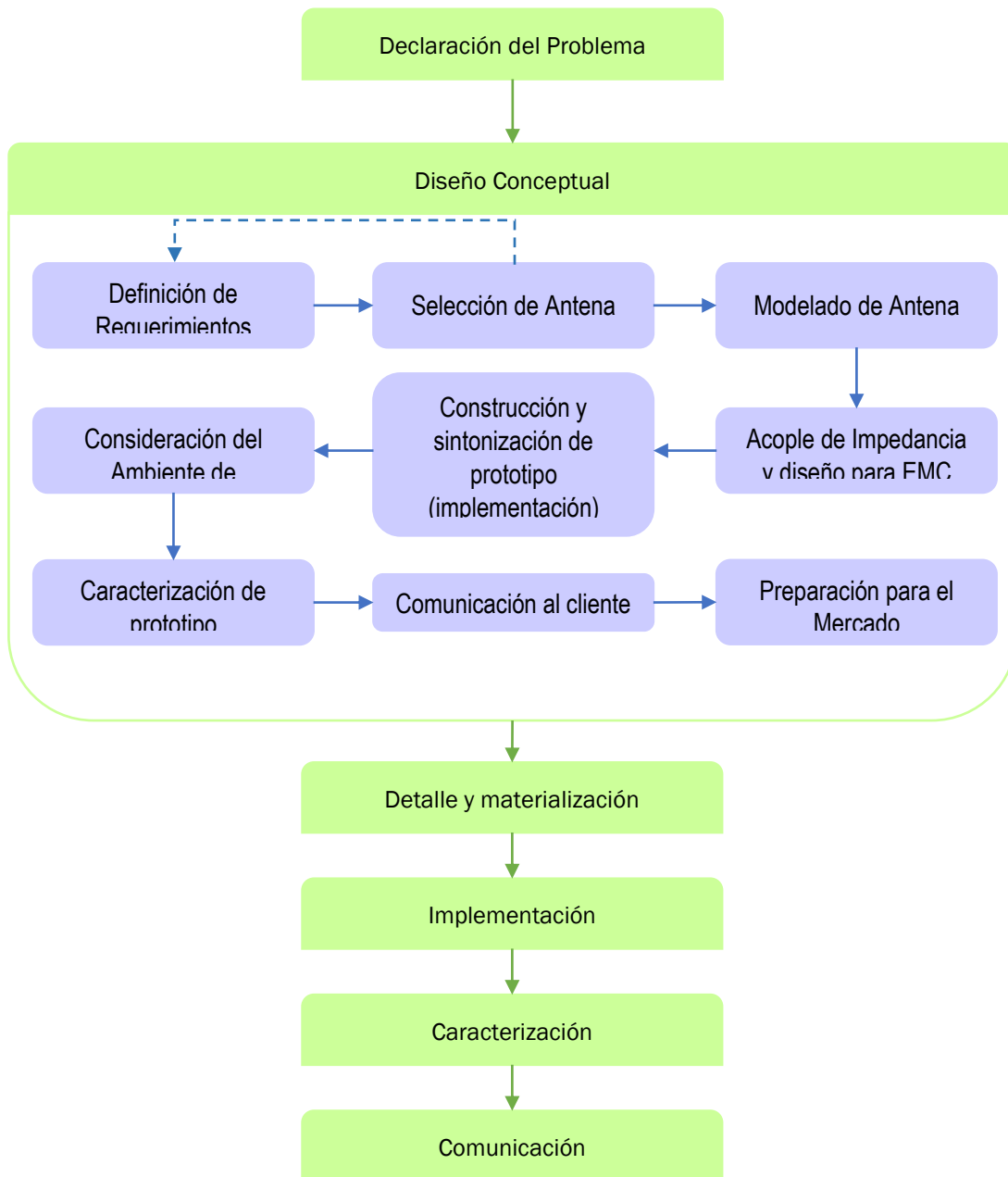
THOMAS A. MILLIGAN, MODERN ANTENNA DESIGN, Second Edi., vol. 53, no. 9. Wiley, 2005.

WOHLIN, Claes y RUNESON, Per. Certification of Software Components. En: IEEE Transactions on Software Engineering. Junio, 1994. vol. 20, no. 6., p. 494-499.

Z, Sue; J. Liu, "A design thinking process model for capturing and formalizing design intents," Proceedings of the 2008 International Symposium on Computational Intelligence and Design, ISCID 2008, vol. 2, no. ml, pp. 330–333, 2008.

Z. Sienkiewicz, "International workshop on non-ionizing radiation protection in medicine.," Medical physics, vol. 40, no. 11, p. 117001, 2013.

ANEXO A - CARTILLA RESUMEN: METODOLOGÍA PARA EL PROCESO DE DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA ANTENA



Declaración del Problema

1. Revisar de forma conjunta con el cliente la situación para la que requiere una antena.
2. Definir condiciones de operación y lugar de instalación.
3. Contextualizar la situación por medio de notas de aplicación, hojas de datos, trabajos investigativos, teoría general básica o avanzada de antenas.
4. Definir de forma cualitativa el comportamiento requerido de los parámetros de antena.

Diseño Conceptual

Definición de Requerimientos

Selección de Antena

1. Definir de forma cualitativa el comportamiento de los parámetros de antena (Ej. Patrón de radiación omnidireccional, largo alcance).
2. Seleccionar tipos de antenas que puedan proporcionar el comportamiento de todos o algunos parámetros.
3. Hacer compromisos de cumplimiento entre parámetros cuando no es posible obtener el 100% deseado de cada uno.
4. Revisión de soluciones similares en el mercado o trabajos investigativos (Si es rediseño)
5. Establecer valores cuantitativos para los parámetros de antena (ganancia, potencia, alcance)

Modelado de Antena

1. Contextualización sobre el tipo de antena seleccionado.
2. Modelado teórico matemático.
3. Modelado mediante métodos numéricos y/o herramientas de simulación.
4. Consideración de elementos de conexión.
5. Consideración de características no ideales de la antena.

Acople de Impedancia y diseño para EMC

Acople de impedancia

1. Escoger impedancia de entrada objetivo.
2. Modelar red de acople en elementos distribuidos.
3. Encontrar el equivalente de la red de acople en microcinta.
4. Implementar.
5. Medir parámetros S.
6. Sintonizar. Ajustar de forma iterativa hasta que el modelo coincida con la realidad.

Diseño para EMC

1. Definir características, ancho de banda, tamaño, grado y capacidad de potencia.
2. Escoger una topología de filtro con elementos distribuidos con base en 1.
3. Modelar o simular la respuesta del filtro.
4. Encontrar la representación adecuada de los elementos distribuidos y la topología en microcinta. (Si aplica, de acuerdo a la frecuencia de operación)

Consideración del Ambiente de Operación

1. Definir los elementos permanentes o temporales que pueden afectar las características de radiación de la antena.
2. Incluir en simulación los elementos presentes de forma permanente.
3. Considerar casos típicos de elementos temporales que puedan afectar las características de radiación.
4. Simulación de SAR cuando aplique.

Construcción y sintonización de prototipo (implementación)

1. Implementar la antena.
2. Medir parámetros S, impedancia de entrada.
3. Sintonizar. Ajustar de forma iterativa las dimensiones de la antena que definan sus parámetros hasta que la realidad tenga una coincidencia aceptable con la simulación.
4. Verificar funcionamiento de filtro para EMC y red de acople de impedancia.

5. Ensamblar, en este orden, filtro para EMC, red de acople de impedancia y antena.
6. Medir parámetro S11 y verificar frecuencia de resonancia y magnitud. Sintonizar si necesario.

Caracterización de prototipo

1. Preparar el campo de medición (cámara anecoica o medición en campo).
2. Medición de parámetros de acuerdo a Procedimientos Estándar para la medición de Antenas de IEEE (IEEE Std 149-1979). Procedimiento descrito en la etapa “Caracterización”.

Comunicación al cliente

1. Presentación de resultados de medición de filtro para EMC, red de acople de impedancia y caracterización de prototipo.
2. Observación y ajuste de acuerdo a las indicaciones del cliente.
3. Aprobación del diseño.

Preparación para el Mercado

1. Medición de parámetros de antena en rango de medición.
2. Certificación de conformidad a la norma UIT-T K.52.
3. Pago por concepto de homologación ante la CRC.
4. Comprobante de pago a FONTIC.
5. Entrega de documentación de certificación y hoja de especificaciones mediante SiVirtual.
6. Registro de marca ante la superintendencia de Industria y comercio.
7. Registro de la antena bajo la marca propia.
8. Adquisición del código de barras.

Detalle y materialización

1. Listado de materiales.
2. Construcción de plano CAD.

3. Reporte por escrito de indicaciones adicionales.

Implementación

1. Revisión de planos CAD.
2. Construcción del numero especificado de muestras.

Caracterización

1. Establecimiento del porcentaje de muestras que se van a caracterizar.
2. Selección de las muestras.
3. Proceso de caracterización de acuerdo a Procedimientos Estándar para la medición de Antenas de IEEE (IEEE Std 149-1979). Resumen de pasos en la Sección 2.4.2 del Libro.
4. Construcción de hoja de datos de la antena, basada en valores promedio de las muestras caracterizadas.

Comunicación

1. Informe final de los resultados de la etapa de implementación y caracterización para el cliente.
2. Instrucciones, hoja de datos y recomendaciones de uso para el usuario.
3. Puesta en el mercado para su venta.

ANEXO B – PARÁMETROS DE ANTENA

Los parámetros de una antena pueden medirse estando configurada como transmisora o receptora el principio de reciprocidad¹³, sin embargo, suelen asociarse a una función de la antena que se da en recepción o transmisión. Adicional a esto, es posible clasificarlos según tengan que ver con el campo eléctrico o con la representación circuital de la antena.

1. Potencia radiada

Es el total de la potencia que radia la antena en todas las direcciones, se puede obtener a partir de la densidad que potencia radiada, que se entiende como la potencia por unidad de superficie en una determinada dirección, expresada en unidades de vatios por metro cuadrado, se obtiene a partir de los valores eficaces de los campos eléctrico y magnético [30]. Es el promedio temporal del vector de Poynting y representa la potencia media radiada por unidad de área transversal a la dirección de propagación.

$$\vec{s}_{AV} = \frac{1}{2} Re\{\vec{E} \times \vec{H}^*\} \quad (1)$$

Teniendo en cuenta que la impedancia característica se puede definir como el modulo del campo eléctrico y el campo magnético, la potencia radiada se puede calcular a partir de las dos componentes del campo eléctrico

$$\vec{P}_{rad}(\theta, \phi) = \frac{\vec{E}_\theta^2 + \vec{E}_\phi^2}{\eta} \quad (2)$$

La potencia total radiada por la antena en todas las direcciones se obtiene al encerrar la antena en una esfera imaginaria y sumar todas las potencias correspondientes para las unidades de superficie, esto se hace por medio de una integral.

$$P_{rad} = \oint_S \vec{s}_{AV} \cdot \vec{ds} \quad (3)$$

Además, la potencia total radiada se puede obtener también a partir de la intensidad de radiación, que cuantifica la potencia que radia la antena en una unidad de superficie que se le llama ángulo sólido, si se aumenta la distancia de observación a la antena, la superficie del ángulo sólido también aumenta, pero en total sigue conteniendo la misma cantidad de líneas de campo, por tanto, contiene la misma potencia. Por esto es un parámetro independiente de la distancia y se expresa en unidades de vatios por estereorradián.

¹³ Los parámetros de antena son idénticos en recepción que en transmisión.

$$U(\theta, \phi) = r^2 s_{AV} \quad (4)$$

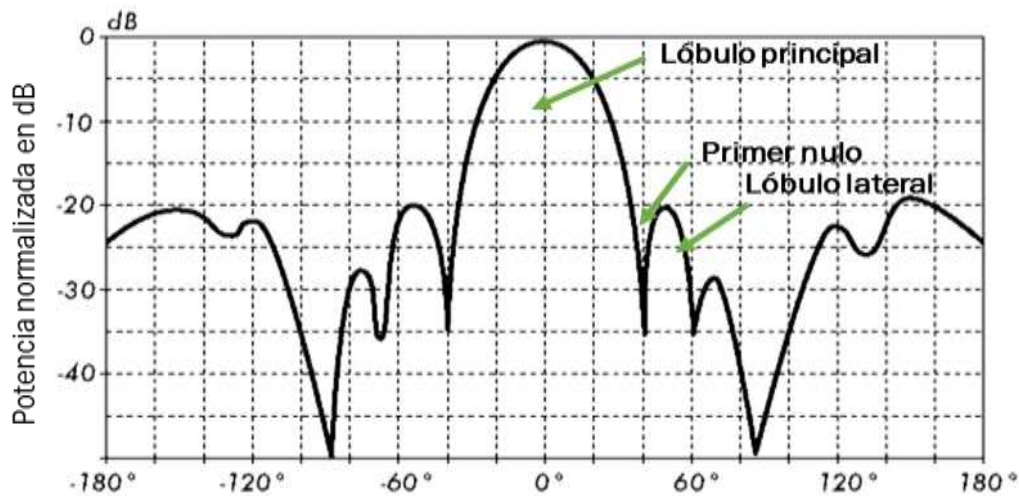
Siendo,

$$P_{rad} = \oint_S U(\theta, \phi) d\Omega \quad (5)$$

2. Patrón de radiación

El patrón de radiación de una antena es un gráfico del campo radiado como función de la dirección para una distancia fija, que debe ser mayor que el límite del campo lejano. El patrón 3D es una representación muy completa de las características de radiación de una antena, sin embargo, consume demasiado tiempo y por esto se puede hacer solo las mediciones de los dos planos principales, el campo E y el campo H, que son los planos donde se desplazan el campo eléctrico y el campo magnético respectivamente[22].

Figura 32. Diagrama de radiación.



EL gráfico se hace con base en el campo eléctrico o la densidad de potencia radiada y suele representarse en dB para que los dos coincidan. Además, la escala logarítmica facilita la visualización de los detalles de los lóbulos secundarios. El gráfico puede representarse en coordenadas polares o cartesianas, siendo esta segunda opción la comúnmente llamada gráfico universal. En la Figura 7 se presentan las características que se pueden encontrar[31].

5. Lóbulo principal: zona en que la radiación es máxima.
6. Lóbulos laterales: zona que rodea los máximos y contienen menos potencia que el lóbulo principal.
7. Lóbulo secundario: lóbulo lateral de mayor concentración de potencia.
8. Lóbulo posterior: lóbulo ubicado diametralmente opuesto al lóbulo principal.
9. Ancho de haz a mitad de potencia: separación angular de las direcciones para las que el diagrama de radiación toma el valor de mitad del máximo o 0.707 del campo eléctrico.
10. Ancho de haz entre ceros: separación angular de las direcciones del espacio para las cuales el lóbulo principal toma un valor nulo.
11. Relación delante-atrás: cociente entre la potencia contenida en el lóbulo principal y el lóbulo posterior.
12. Relación del lóbulo principal al secundario: cociente entre la potencia contenida en el lóbulo principal y el secundario.

3. Directividad

La directividad de una antena, $D(\theta, \phi)$ es una medida de la concentración de la potencia radiada en una dirección particular para una distancia fijada [23]. Se define como la razón de la intensidad de radiación en una dirección dada y la intensidad de radiación promedio en todas las direcciones. La directividad puede ser fácilmente encontrada a partir del patrón de radiación, estando en dirección de la máxima potencia radiada. A partir de este valor se calcula la ganancia.

$$D = \frac{4\pi |E(\theta, \phi)|_{Max}^2}{\int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |E(\theta, \phi)|^2 \cos\theta d\theta d\phi} \quad (6)$$

En la segunda parte de esta expresión se muestra que, en otras palabras, la directividad es la relación entre la potencia que radia la antena y la que radiaría una antena isotrópica en una dirección dada, teniendo las dos la misma potencia radiada promedio. La antena isotrópica radia igual en todas las direcciones, por esto la densidad de potencia radiada se halla dividiendo la potencia de entrada en el área superficial de la esfera imaginaria ubicada a una distancia radial R [22].

La directividad se puede observar en el patrón de radiación, en la dirección de mayor radiación, cuando la antena tiene un lóbulo principal pronunciado se puede aproximar por medio de los anchos angulares del lóbulo principal en los dos planos principales.

$$D \approx \frac{4\pi}{\theta_{HP}\phi_{HP}} \quad (7)$$

4. Ganancia

La ganancia es la habilidad de la antena para dirigir la potencia que le es entregada en una dirección en particular [23]. Se mide en la dirección de máxima radiación. Su definición es similar a la de la Directividad, pero la relación no se establece con la potencia radiada sino con la que se le entrega en sus terminales. Esto permite tener en cuenta las pérdidas de la antena, puesto que no toda la potencia entregada es radiada al espacio[22].

$$G = \frac{4\pi U}{P_{entrada}} \quad (8)$$

$$G(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{\frac{P_{entregada}}{4\pi r^2}} = \eta_e D(\theta, \phi) \quad (9)$$

El radiador isotrópico se considera 100% eficiente, y la ganancia cumple la función de incrementar la densidad de potencia en la dirección de máxima radiación.

Tomando las expresiones para la eficiencia y la ganancia, se ve que la diferencia está en que la ganancia considera las pérdidas y esto introduce un factor de eficiencia de radiación, que se obtiene de la relación entre la potencia radiada y la entregada a la antena.

$$\eta_e = \frac{P_{rad}}{P_{entrada}} \quad (10)$$

Las pérdidas del material o la potencia reflejada debida a un bajo acople de impedancia reducen la potencia radiada. En un sistema la impedancia de salida del transmisor o del receptor puede no estar bien acoplado a la impedancia de entrada de la antena. Las mediciones de precisión de ganancia requieren un sintonizador entre la antena y el receptor para acoplarlos. Pero el efecto del desacople también puede ser calculado y removido después de la medición.

5. PIRE

Es un parámetro que nace a partir de la ganancia de antena. La potencia isotrópica radiada equivalente es la cantidad de potencia que hubiera sido radiada por un radiador isotrópico para producir el pico de densidad de potencia en la dirección de máxima ganancia, es decir

$$PIRE = P_{rad}G \quad (11)$$

Usualmente se expresa en dB y es muy útil en radio transmisiones pues las pérdidas por el medio de transmisión entre dos antenas se pueden calcular fácilmente como la razón entre el PIRE de la antena transmisora y el PIRE de la antena receptora.

6. Área Efectiva

El concepto de área efectiva de la antena se creó para establecer una relación entre la ganancia y la directividad y las dimensiones físicas de la antena[21]. Las antenas capturan potencia de las ondas que pasan cerca de ellas, y parte de esa potencia la llevan hacia sus terminales. Teniendo la densidad de potencia de la onda incidente y la apertura efectiva de la antena se puede obtener la potencia que se induce en los terminales.

$$P_{terminales} = S * A_{efectiva} \quad (12)$$

Además, la apertura efectiva está ligada a la directividad y por tanto a la ganancia.

$$A_{efectiva} = \frac{\lambda^2}{4\pi} * D \quad (13)$$

7. Pérdidas por Desacople de Impedancia de entrada

Cuando no se hace un buen acople de impedancia entre la antena y la línea de transmisión usada para alimentarla, la eficiencia del sistema se reduce debido a la potencia que se refleja en el punto de conexión. Una porción del voltaje de entrada se refleja ρV [21].

$$\vec{\Gamma} = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (14)$$

En esta expresión, Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión y Z_A es la impedancia de entrada de la antena.

Cuando la onda que viaja hacia la antena y la que se refleja se superponen se crea una onda resultante, las tensiones extremas de esta onda se deben obtener para poder calcular el ROE (VSWR- voltage standing-wave ratio, de sus siglas en inglés) que es una medida de la potencia reflejada en la línea de transmisión.

$$ROE = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (15)$$

$$V_{max} = (1 + |\Gamma|)V_i \quad (16)$$

$$V_{min} = (1 - |\Gamma|)V_i \quad (17)$$

La pérdida por reflexión se expresa comúnmente en decibeles y se obtiene como sigue:

$$\text{Pérdidas por reflexión} = -20\log |\Gamma| \quad (18)$$

8. Factor de Antena

Es una medida que se toma a las antenas trabajando en recepción de señal, como una relación del campo eléctrico que captura la antena en su área efectiva y que induce tensión en los terminales de la antena [24]. Este factor se puede ver afectado por un mal acople de impedancia de la antena receptora.

$$AF = \frac{E_i}{V_{inducido}} \quad (19)$$

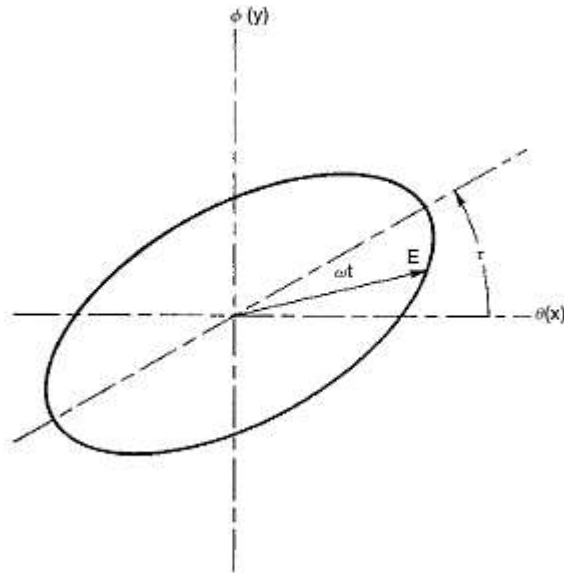
El factor de antena tiene unidades de $\frac{1}{m}$ pero se expresa normalmente en dB. Siempre se asume que la antena en medición está alineada con el campo eléctrico, es decir que la polarización es la componente del campo eléctrico medida.

$$AF = \sqrt{\frac{\eta}{Z_L A_{efectiva}}} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{4\pi}{Z_L G}} \quad (20)$$

9. Polarización

La polarización de una onda es la dirección del campo eléctrico. En el campo lejano la onda solo tiene componentes θ y ϕ del campo eléctrico. También se puede expresar la dirección del campo eléctrico en términos de una onda plana que se propaga a lo largo del eje z. La polarización tiene que ver con métodos de descripción de espacios de dos dimensiones[22].

Figura 33. Elipse de polarización.



Las dos que siguen son polarizaciones lineales:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= E_{\theta}(\hat{\theta} + \rho_L \hat{\phi}) \\ \vec{E} &= E_x(\hat{x} + \rho_L \hat{y})\end{aligned}\tag{21}$$

ρ_L es la razón de polarización lineal, es una constante compleja. Es la variación de la propagación en el tiempo, tiene una forma que puede ser lineal, circular o elíptica.

La polarización es una propiedad de frecuencia sencilla de radiación electromagnética que describe la forma y la orientación del locus de la extremidad de los vectores de campo como una función del tiempo. Cuando solo se consideran las ondas planas, es suficiente con especificar la polarización del vector de campo eléctrico, de este se deduce el campo magnético con una rotación de 90° y la multiplicación por la admitancia intrínseca [22].

ANEXO C- FORMULARIO PARA LA SOLICITUD DE CARACTERIZACIÓN EN CÁMARA ANECOICA – EJEMPLO ETS LINDGREN

Test Requester Information

Test Article Expert:	Contact Information (Phone, E-mail, Address):
----------------------	---

Test Objectives

Purpose of Test:	
Proposed Test Start Date:	Critical Test Start Date:

Test Article

Test Article Description:	
Physical Dimensions (L/W/H):	
Weight:	Center of Gravity:

Test Article Interface

Test Article Mounting (Mounting flange provided by requester/supplied by facility):
Power Requirements:
Antenna Interface (Requester/Facility-provided cables and connectors):

Test Article Handling Requirements

Cleanliness Level:	Controlled Access:
Special Moving/Handling:	