



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Diseño e implementación de un prototipo de transmisión inalámbrica de energía para interiores y exteriores

TRABAJO DE TITULACIÓN.

AUTORES: Robalino Quito Richard Andrés, Vásquez Tapia Juan Carlos

DIRECTOR: Jaramillo Pacheco Jorge Luis, Mgs

LOJA-ECUADOR

2017



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

Septiembre, 2017

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Magister

Jorge Luis Jaramillo Pacheco

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación en diseño e implementación de un prototipo de transmisión inalámbrica de energía para interiores y exteriores realizado por Richard Andrés Robalino Quito, Juan Carlos Vásquez Tapia ha sido revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, Mayo del 2017

f).....

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Nosotros, Juan Carlos Vásquez Tapia, Richard Andrés Robalino Quito declaramos ser autores en cuanto a diseño e implementación del presente trabajo de titulación: Diseño e implementación de un prototipo de transmisión inalámbrica de energía para interiores y exteriores, de la Titulación en Electrónica y Telecomunicaciones, siendo el Mgs. Jorge Luis Jaramillo Pacheco director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f. _____

Richard Andrés Robalino Quito
Cédula: 1104728140.

f. _____

Juan Carlos Vásquez Tapia
Cédula: 1105344376.

DEDICATORIA

El éxito es caerse mil veces, aprender, levantarse y empezar algo nuevo con más
inteligencia

El éxito de un emprendedor está directamente relacionado con la energía que este posee para poder desaparecer la mayor cantidad de miedos posibles, por tal motivo este trabajo se lo dedico a mi familia, a mis padres y hermanos por ser los principales generadores de esa energía que me levanta cada día para trabajar por mis sueños.

Con el esfuerzo de mis padres, su apoyo y amor combinado con mi pasión por la electrónica y las telecomunicaciones, hemos podido cumplir un sueño más que me permitirá ayudar a hacer de este mundo algo mejor y a mejorar la vida de las personas.

DEDICATORIA

Primeramente quiero agradecer a Dios por brindarme la vida y las fuerzas necesarias para poder culminar con éxito una de mis metas propuestas. Un agradecimiento profundo a mis queridos padres, cuyo amor y apoyo incondicional han sido los pilares que me han sostenido durante toda mi vida.

Un agradecimiento a mis hermanos y familiares que siempre me han tendido la mano cuando más lo necesitaba. A mis profesores por brindarme su conocimiento, experiencia y apoyo en toda mi vida estudiantil.

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento a Dios, a mis padres, hermanos y familiares que me han apoyado incondicionalmente de una forma u otra en toda mi vida estudiantil.

Asimismo un agradecimiento sincero a mis profesores y amigos que me han compartido sus conocimientos y experiencias durante estos cinco años de carrera universitaria

Richard Andrés Robalino Quito.

Primeramente quiero agradecer a Dios por brindarme la vida y las fuerzas necesarias para poder culminar con éxito una de mis metas propuestas. Un agradecimiento profundo a mis queridos padres, cuyo amor y apoyo incondicional han sido los pilares que me han sostenido durante toda mi vida.

Un agradecimiento a mis hermanos y familiares que siempre me han tendido la mano cuando más lo necesitaba. A mis profesores por brindarme su conocimiento, experiencia y apoyo en toda mi vida estudiantil

Juan Carlos Vásquez Tapia

INDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	II
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	VI
INDICE DE CONTENIDOS	VII
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO I INGENIERÍA DE CONCEPTO	5
1.1. ESTADO DEL ARTE	6
CAPÍTULO II INGENIERÍA BÁSICA	12
2.1. GENERALIDADES	13
2.2. INGENIERÍA BÁSICA DEL PROTOTIPO DE INTERIORES	13
2.2.1. Fuente lineal.....	14
2.2.1.1. Transformador.	15
2.2.1.2. Rectificador.....	16
2.2.1.3. Filtro.....	16
2.2.2. Oscilador Colpitts	17
2.2.3. Divisor de Wilkinson.	20
2.2.4. Amplificador.....	24
2.2.5. Antenas para transmisión y recepción.....	25
2.2.5.1. Antenas para transmisión en el prototipo de provisión de energía a sistemas de iluminación.	25
2.2.5.2. Antenas para transmisión en el prototipo de provisión de energía a dispositivos móviles sobre mobiliario.....	33
2.2.6. A manera de resumen	37
2.3. INGENIERÍA BÁSICA DEL PROTOTIPO PARA EXTERIORES.....	37
2.3.1. Fuente conmutada.....	38
2.3.2. Amplificador.....	38
2.3.3. Antenas para transmisión y recepción.....	39

2.3.4.	Sobre pérdidas en el espacio libre.....	40
2.3.5.	Acoplamiento de impedancia.....	42
2.3.6.	Módulo conversión RF a CC.....	47
2.3.7.	Sobre el almacenamiento de energía.....	48
CAPÍTULO III INGENIERÍA DE DETALLE.....		50
3.1.	Generalidades.....	51
3.2.	INGENIERÍA DE DETALLE DEL PROTOTIPO PARA INTERIORES.....	51
3.2.1.	Amplificador de RF.....	51
3.2.2.	Antenas para transmisión y recepción.....	54
3.2.2.1.	Antenas para transmisión en el prototipo de provisión de energía a sistemas de iluminación.....	54
3.2.2.2.	Antenas para transmisión en el prototipo de provisión de energía a dispositivos móviles sobre mobiliario.....	56
3.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	57
3.3.1.	Análisis de resultados obtenidos en la implementación de la solución para interiores.....	57
3.3.2.	Solución para exteriores.....	62
CONCLUSIONES.....		65
ANEXOS.....		67

RESUMEN

En esta memoria de trabajo de titulación, se describe los resultados obtenidos en las etapas de ingeniería de concepto, ingeniería básica e ingeniería de detalle en el diseño e implementación de aplicaciones de transmisión inalámbrica de energía, tanto para interiores como para exteriores. Los prototipos diseñados e implementados utilizan la inducción electromagnética como soporte de la transmisión inalámbrica de energía: ondas de radiofrecuencia generadas en el emisor son capturadas en el receptor, mediante acoplamiento inductivo resonante, y transformadas en corriente continua utilizando rectificadores de bajo consumo energético. El diseño e implementación de los prototipos se basan en parámetros básicos como eficiencia, pérdidas por inserción y retorno, pérdidas por rectificación, costo y calidad.

PALABRAS CLAVES: Energía, transmisión inalámbrica de energía, transmisión inalámbrica de energía bajo el principio de inducción electromagnética.

ABSTRACT

This thesis report describes the results obtained in the concept engineering stages, basic engineering and detail engineering in the design and implementation of wireless energy transmission applications, both for indoor and outdoor use. Applications designed and implemented use electromagnetic induction as a support for wireless energy transmission: radio waves generated at the emitter are captured at the receiver by inductive resonant coupling and transformed into DC using low energy rectifiers. The design and implementation of applications are based on basic parameters such as efficiency, insertion and return losses, rectification losses, cost and quality.

KEYWORDS: Energy, wireless transmission of energy, wireless transmission of energy under the principle of electromagnetic induction.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento exponencial de la tecnología y la comodidad que esta produce en los usuarios, hace cada vez mayor la demanda en el uso de dispositivos inalámbricos para dar la autonomía que la generación del siglo XXI exige, llevando a enfocarse en dos soluciones, la primera consiste en aumentar la capacidad de la baterías para mantener en funcionamiento los sistemas, lo que conlleva a una mayor contaminación ambiental [16], el otro enfoque se basa en el empleo de semiconductores de bajo consumo energético, donde las baterías podrían ser remplazadas por otras fuentes tales como la energía inalámbrica, que es una tecnología emergente que pretende brindar al usuario final libertad, ahorro, movilidad e independencia del cobre para mantener activos sus dispositivos.

La radiación electromagnética se ha venido usando típicamente para transmitir información de manera inalámbrica, pero dicha información viaja a través del espacio libre mediante ondas electromagnéticas desde una antena transmisora a una receptora, por lo tanto en teoría se podría transmitir la energía eléctrica de la misma forma en la que se transmite la información.[9]

En el presente trabajo de fin de titulación se presenta el diseño y desarrollo de un sistema de emisión-recepción, el cual toma energía de la red pública, genera una onda electromagnética de Radiofrecuencia (RF) que permite transmitir esa energía de forma inalámbrica hacia el receptor, que a su vez entrega esa energía en corriente continua (CC), el objetivo técnico es lograr la mayor eficiencia con la mayor distancia posible.

Este tipo de tecnología se enfoca en dos aplicaciones, para exteriores, enfocada en aplicativos de red de sensores, entre otros y la segunda para interiores, que se enfoca en dispositivos de bajo consumo, internet de las cosas, etc. El objetivo comercial es crear un prototipo que nos permita disminuir el uso del cobre en la transmisión de energía y reducir la brecha entre transmisores de potencia inalámbrica industriales y cargadores inalámbricos por contacto, dando de esta manera sistemas de distribución de energía inalámbricos mucho más flexibles, cómodos, de bajo costo y con autonomía para los usuarios.

Los prototipos de transmisión inalámbrica de energía para interiores y exteriores se encuentran claramente definidos, en las cuales aparecen no solamente diferencias de operación sino también diferencias de concepto. Aplicando estas diferencias en cada etapa de diseño, ambos poseen el mismo diagrama de bloques funcionales, el cual consta de un transmisor de 10W (40dBm) para interiores y 15W (31.7 dBm) para exteriores, acoplados a una antena transmisor. En la recepción se encuentra una antena acoplada a un circuito

convertidor de RF - CC empleando semiconductores de bajo consumo, con una impedancia cercana a 50Ω . Mediante el uso de los parámetros S se realizó el diseño, desarrollo y optimización del prototipo implementado.

Este documento se ha organizado del siguiente modo: en el capítulo I se plantea la Ingeniería de concepto, conceptualización y el estado del arte, en el capítulo II se detalla toda la ingeniería básica utilizada para el diseño y elaboración de ambos prototipos, en el capítulo III se analiza el performance de ambos prototipos implementados. Finaliza el documento resaltando sus principales conclusiones y posibles trabajos futuros.

CAPÍTULO I
INGENIERÍA DE CONCEPTO

1.1. Estado del arte

Transmisión inalámbrica de energía, (*TIE*), es el proceso mediante el cual un dispositivo toma la energía eléctrica alterna, presente en la red de distribución de energía eléctrica, la convierte a corriente continua (CC), con la cual se genera una onda electromagnética, y transmite esta energía de forma inalámbrica hacia un receptor capaz de captar la energía presente en el campo magnético y convertirlo a corriente continua (CC).

Esta energía en CC tiene dos posibles usos: la primera opción consiste en utilizarla directamente para alimentar algún tipo de dispositivo, por ejemplo un celular, un router, etc. La segunda consiste en almacenarla en súper condensadores o baterías para su posterior uso.

La idea de la distribución de energía eléctrica sin utilizar cables de cobre o líneas de transmisión, viene creciendo desde hace más de 100 años, gracias a la inducción electromagnética o inducción de campo cercano que Michael Faraday descubrió en 1831, y se ha venido utilizando como principio de funcionamiento en los transformadores y motores eléctricos, entre otras aplicaciones.

La Figura 1 muestra el concepto de transmisión inalámbrica de energía. Este fenómeno se produce mediante un acoplamiento magnético resonante, involucrando dos antenas con frecuencias de resonancia similares, que a su vez estas intercambian energía a través de las oscilaciones de sus campos magnéticos variables.

El sistema TIE para interiores, consta de una bobina transmisora L1 y una bobina receptora L2. Ambas antenas forman un sistema de bobinas resonantes acopladas magnéticamente a una cierta frecuencia. Para el caso de exteriores se reemplaza las bobinas por antenas Yagi.

La tendencia a crear dispositivos móviles ha llevado a realizar muchos estudios en la transferencia de energía inalámbrica, mediante el principio de acoplamiento inductivo resonante [2].

El sistema de antenas transmisoras se basan en la Ley de Ampere, las cuales al ser excitadas por una corriente AC genera un campo magnético variable en el tiempo y un sistema receptor apoyado en la Ley de Faraday el cual "captura" el campo magnético que atraviesa el anillo receptor y mediante un sistema de rectificación convierte esta señal de RF a CC.[10] Cuanto mayor flujo magnético alcance al receptor, mejor será el

acoplamiento entre los anillos. El grado de acoplamiento se expresa con el factor de acoplamiento k . [11]

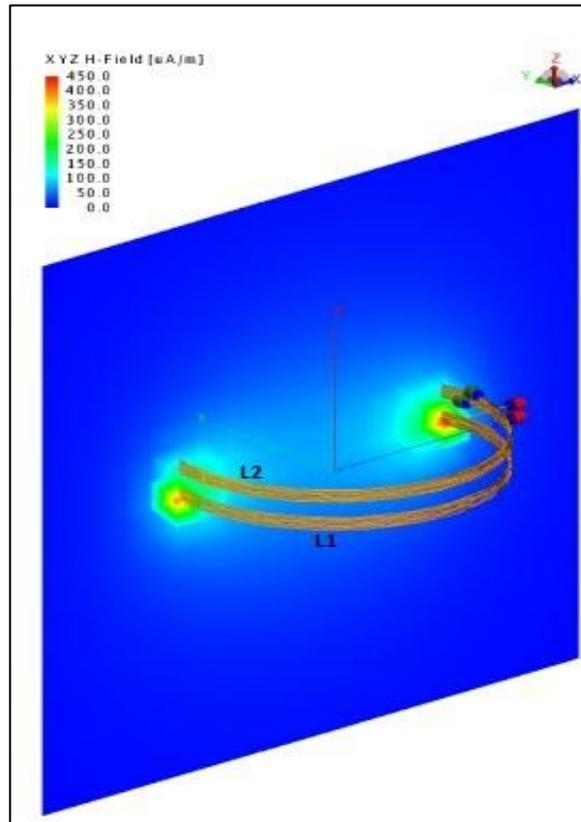


Figura 1. Inducción magnética resonante.
Fuente: Autores
Elaboración: Propia

El problema radica en que el receptor, L2, debe estar a una distancia relativamente corta del anillo transmisor, L1, para que se cumpla este acoplamiento magnético sin perder eficiencia, por lo tanto el objetivo que persiguen estos estudios es aumentar la distancia entre bobinas y reduciendo el tamaño de las bobinas, dada una frecuencia óptima de operación.

La eficiencia de la transferencia de energía depende del factor de acoplamiento (k) entre los inductores y de la calidad del acoplamiento (Q). El factor acoplamiento se determina por la distancia entre los inductores y la razón de cambio entre el diámetro de L2 con respecto a L1 [9].

La calidad del acoplamiento depende más de la forma de las bobinas y la inclinación con respecto al plano de referencia. [9]

La Figura 2 muestra la inductancia (L) y la resistencia (R) en función del diámetro y forma de las bobinas, lo que determina el factor de calidad de acoplamiento del sistema de transmisión inalámbrica de energía.

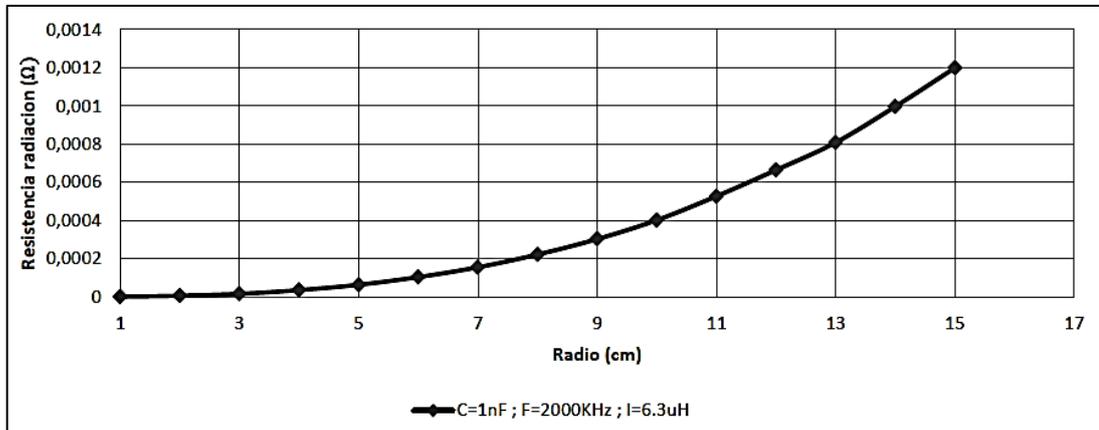


Figura 2. Inductancia, Capacitancia y Resistencia de radiación en función del radio de la bobina a una frecuencia fija de 2MHz.

Fuente: Autores
Elaboración: Propia

El factor de calidad (Q) se encuentra definido por la relación de la inductancia (L) con la resistencia (R) de la bobina. La definición general del factor de calidad se basa en la relación entre la potencia aparente en el dispositivo y las pérdidas de energía hasta llegar al mismo. El factor de calidad de acoplamiento de una bobina se la calcula mediante la ecuación (1), [12]

$$Q = \frac{(2\pi f)L}{R} \quad (1)$$

En dónde,

Q, es el factor de calidad, adimensional

f, es la frecuencia de resonancia , Hz

L, es la inductancia de la bobina, H

R, es la resistencia de la bobina, Ω

La calidad de acoplamiento (Q) puede tener un valor entre 0 e infinito. Pero técnicamente es difícil obtener valores muy por encima de 1000 para las bobinas [3]. Para una eficiencia óptima, se deben usar valores de alrededor de 100 ya que un factor de calidad de acoplamiento inferior a 10 no es muy útil.[11]

Para una bobina transmisora como receptora de 11cm y una inductancia de 6.3 uH dada una frecuencia de 1.8 MHz, se define un factor de calidad de acoplamiento $Q=100$, esto implica que tanto la bobina transmisora como la receptora poseen la misma forma y se encuentran paralelas entre si.

La Figura 3 muestra la eficiencia del sistema en función de la distancia de separación entre las bobinas, la eficiencia disminuye notablemente por dos razones, la primera al aumentar la distancia entre las bobinas y la segunda al disminuir la relación entre el diámetro de la transmisora con respecto a la receptora.

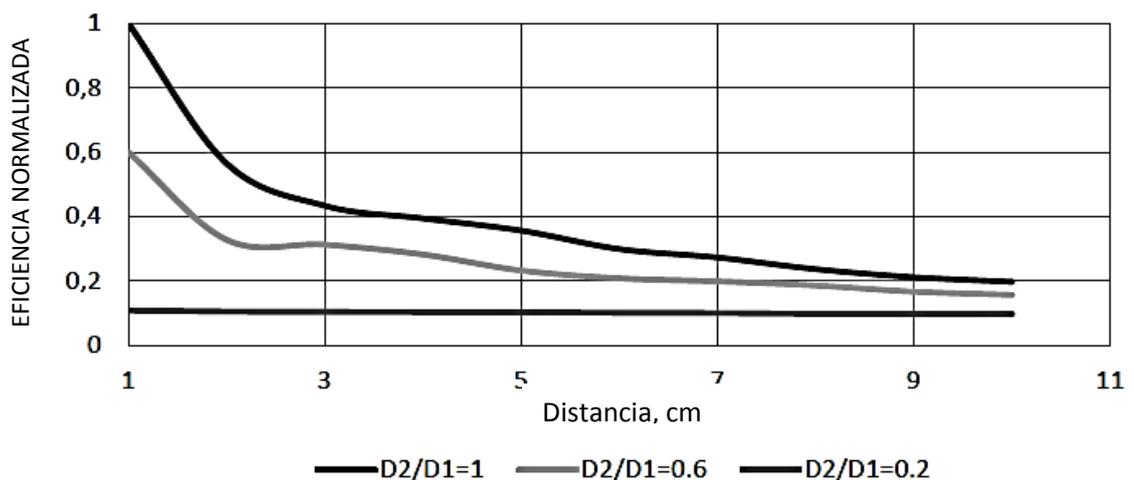


Figura 3. Eficiencia del sistema en función de la distancia entre bobinas y su relación entre el diámetro de la transmisora con respecto a la receptora

Fuente: Autores

Elaboración: Propia

Numerosas empresas como E-Coupled, MIT, Wild Charge, Powermat, Mojomobility, WiPower, NASA, ivolta, desarrollan prototipos comerciales tanto para interiores como para exteriores aprovechando el principio antes mencionado, al cual le añaden control, automatización y comunicación.[13]

A principios del siglo XX en 1891, el físico Nikola Tesla desarrolló un equipo generador de alta frecuencia y alta tensión llamado "bobina Tesla", es un tipo de transformador resonante, con el cual consiguió generar transferencia inalámbrica de

energía eléctrica mediante ondas electromagnéticas que generan tensiones de radiofrecuencia (RF) muy elevadas (de decenas de miles e incluso cientos de miles de voltios), por lo que dan lugar a coloridas descargas eléctricas en el aire de alcances que pueden llegar a ser del orden de pocos metros, lo que las hace muy espectaculares. [13]

En el año 2007, un equipo, formado por investigadores de los Departamentos de Energía Eléctrica, Física, Ciencia Computacional del Instituto para las Nanotecnologías del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), realizaron un proyecto de transmisión de energía inalámbrica con una eficiencia energética del 90% a distancias menores de un metro, todas las características de diseño se muestran en la Tabla 2. [14]

Tabla 1. Productos comerciales basados en transferencia Inalámbrica de energía.

Empresa	Potencia	Eficiencia	Distancia	Frecuencia	Aplicación	Método
Witricity, MIT	Tx: 30W	40%	2m	6.78 MHz	Interiores	Acoplamiento inductivo resonante
Sistema Dipolo bobinas resonante	Tx 209 W	9.2%	5m	20 kHz	Interiores	Acoplamiento inductivo resonante
Oral B, vitality Cepillos de dientes eléctricos	Tx: 5W	60%	3cm	100 a 200 KHz	Interiores	Acoplamiento inductivo resonante
Samsung Base de carga para celulares	Tx: 7.5W	76%	4-10 mm	100 a 200 KHz	Interiores	Acoplamiento inductivo
Nokitek Base de carga para	Tx: 7.5W	72%	4-10 mm	100 a 200 KHz	Interiores	Acoplamiento inductivo

celulares para autos						
HEVO Power Carga inalámbrica para autos		equiparable al cable de cobre	4-10 mm	100 a 200 KHz	Interiores	Acoplamiento inductivo
Ambient RF En áreas urbanas	Cosecha de energía	40%	1.6m	0,3 a 3 GHz	Exteriores	Harvesting

Fuente: [5], [8], [9].
Elaboración: Propia

Duracell anunció recientemente su Power WICC, una tarjeta de recarga inalámbrica sumamente delgada que tiene el potencial para adaptarse a todos los dispositivos móviles e incluye todos los circuitos de carga inalámbrica necesarios, pudiendo también servir de antena NFC (comunicaciones de corto alcance). [15]

De acuerdo a la investigación realizada y tomando como modelo referencial para interiores a Witricity y para exteriores al proyecto Ambient RF se pretende diseñar e implementar dos prototipos de transmisión inalámbrica de energía, para exteriores e interiores, donde dada una frecuencia y una potencia de transmisión se modificarán parámetros en cuanto al tamaño de antenas, posición y distancia entre la antena transmisora y la antena receptora.

La Figura 4 muestra el diagrama de bloques funcionales equivalente tanto para los prototipos de interiores como para el de exteriores.

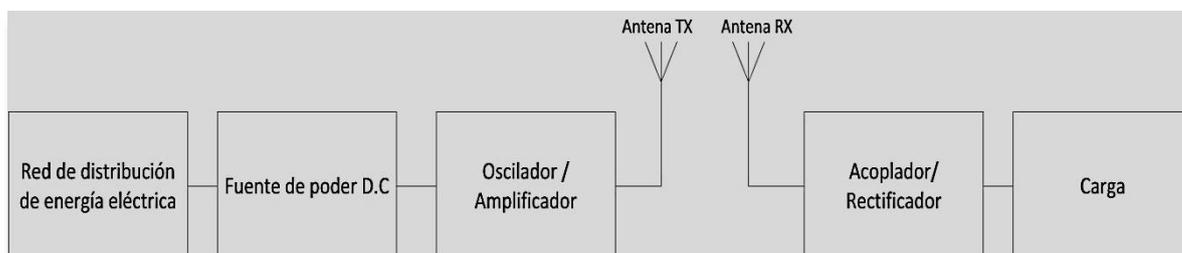


Figura 4. Diagrama de bloques funcionales del prototipo de transmisión inalámbrica de energía para interiores y exteriores.

Fuente: Autores
Elaboración: Autores

CAPÍTULO II
INGENIERÍA BÁSICA

2.1. Generalidades

Con el objetivo de cubrir todo el espectro de aplicaciones que la revisión bibliográfica mostro para transmisión inalámbrica de energía, el equipo de trabajo decidió diseñar en esta etapa, dos soluciones, una para interiores y otra para exteriores.

2.2. Ingeniería básica del prototipo de interiores

Basados en los criterios del concepto desarrollado por Witricity (Ver Tabla 2), el prototipo para interiores se orientará a la provisión de energía eléctrica a dispositivos de bajo consumo, que cumplan con especificaciones domésticas, ubicados a no más de 10 cm del emisor de energía. Se espera que el prototipo antes mencionado presente indicadores de uso eficiente de energía, superiores al 80%.

Tabla 2. Parámetros del concepto de Witricity.

Principio de Operación	Acoplamiento Inductivo Resonante	
Frecuencia de operación	9.9 MHz	
Diámetro de las bobinas	60 cm	
Número de vueltas	5	
Distancia	< 1 m	>2m
Eficiencia	90 %	45%
Potencia transmitida	100 W	
Potencia Recibida	60 W	
Diámetro de antenas	Superior a 2 m	

Fuente: [7]

Elaboración: Autores

Para cumplir con los objetivos propuestos dentro del prototipo de interiores, el equipo de trabajo decidió priorizar la transmisión inalámbrica de energía por acoplamiento inductivo resonante, para una determinada frecuencia y potencia transmitida, permitiendo lograr una mayor eficiencia y también aumentar la distancia de separación, reduciendo el diámetro de antenas.

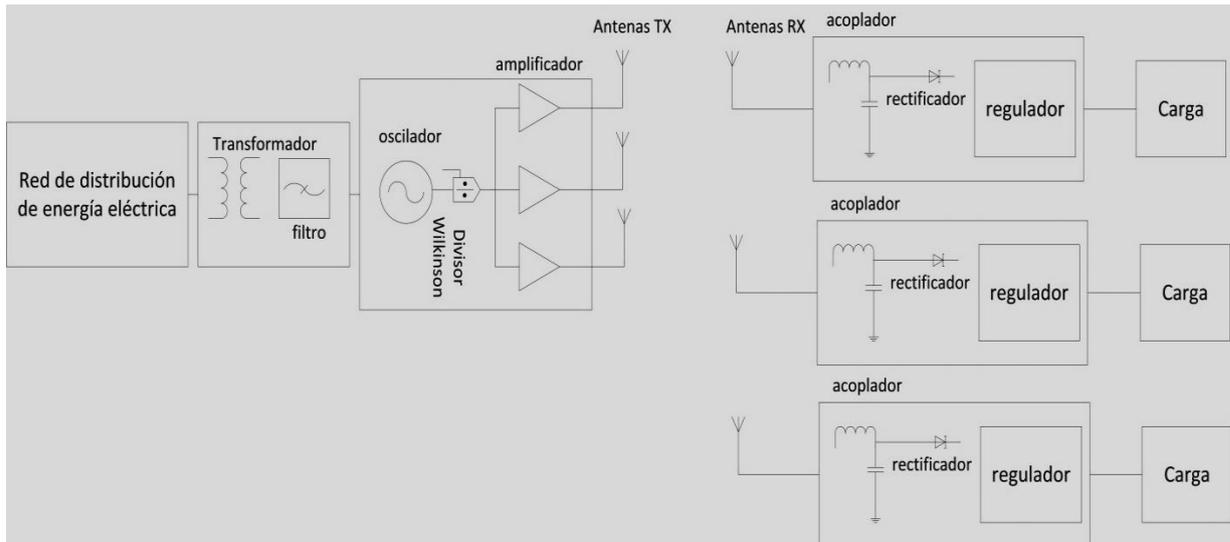


Figura 5. Diagrama de bloques funcionales del prototipo para interiores.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

La Figura 5 muestra el diagrama funcional del prototipo orientado a interiores. La energía proveniente de la red de distribución eléctrica, se rectifica a corriente continua (CC) mediante una fuente lineal que alimenta a un oscilador Colpitts el cual genera una onda oscilante de RF, La señal oscilante se divide mediante un divisor de Wilkinson, hacia tres etapas de amplificación de 40 dBm (10 W) cada una. Cada una de estas señales amplificadas se las transmite por medio de antenas tipo lazo, para cada una de las aplicaciones.

El equipo de trabajo decidió diseñar dos aplicaciones para interiores, uno orientado a proveer de energía a un sistema de iluminación y otro para proveer de energía a dispositivos móviles ubicados sobre cierto tipo de mobiliario, ambos prototipos se diferencian entre sí en el diseño de las antenas de transmisión.

2.2.1. Fuente lineal.

Tanto el oscilador como el amplificador necesitan energía en CC. La tensión de la red de distribución de energía eléctrica es alterna, por lo que se requiere de un proceso de rectificación. En el marco de este proyecto, para la provisión de CC el equipo de trabajo decidió emplear una fuente lineal, debido a tres razones fundamentales: sencillez, linealidad, y disponibilidad de materiales para su construcción en el mercado.

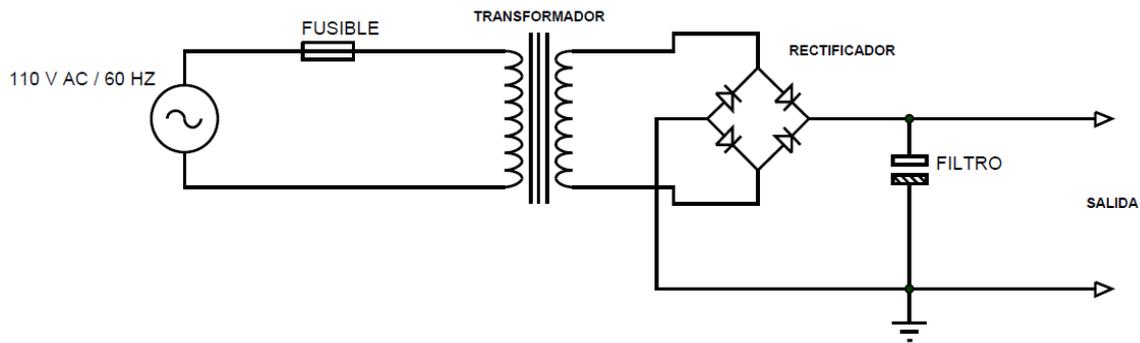


Figura 6. Diagrama de bloques funcionales de la fuente de alimentación lineal.
 Fuente: [3]
 Elaboración:[3]

La Figura 6 y Anexo III, muestran el diagrama funcional de una fuente de alimentación lineal. Esta fuente consta de un transformador, de un rectificador y de un filtro.

2.2.1.1. Transformador.

Según la ecuación (2), para una potencia de salida de $10W_{RF}$ (40 dBm) , el voltaje pico – pico (V_{p-p}) de la señal de salida sinusoidal es de $44.7 V_{p-p}$, disipados en una carga de 50Ω . Por motivos de disponibilidad de materiales en el mercado, se adquirió un transformador de 2 A, que posee dos devanados secundarios (120 V / 45 V, 120 V / 35 V), el cual cumple con los requisitos necesarios para alimentar con una tensión constante de salida en CC, de 44V para la etapa de potencia y 34 V para alimentar el oscilador Colpitts.

$$V = \sqrt{W \cdot Z} \quad (2)$$

En dónde,

V , es la tensión en CC, V

W , es la potencia salida RF , W

Z , es la impedancia de la carga, Ω

La intensidad nominal del fusible de alimentación, se calcula a través de la ecuación (3), la intensidad nominal del fusible se calculó en 1.75 A. Este valor se adaptó al existente en el mercado, de 2A.

$$I_2 = I_1 \left(\frac{N_1}{N_2} \right) = I_1 \frac{V_1}{V_2} \quad (3)$$

En dónde,

I_2 , Corriente en los devanados secundarios del transformador, A

I_1 , Corriente en el devanado primario del transformador , A

V_1 , Voltaje de entrada al transformador, Vpp

V_2 , Voltaje de salida en el devanado secundario, Vpp

2.2.1.2. Rectificador.

En el marco de este proyecto, el equipo de trabajo decidió utilizar un rectificador de onda completa de 2A, Véase Anexo III.

2.2.1.3. Filtro.

Para mejorar la calidad de la tensión de salida se requiere de un proceso de filtrado. En este proyecto, se utilizó un condensador conectado a la salida del puente de rectificación, cuyo valor nominal aproximado se calcula a través de la ecuación (4).

$$C = \frac{Q}{V_{m\acute{a}x} - V_{min}} = \frac{I_{m\acute{a}x}T}{V_{m\acute{a}x} - V_{min}} \quad (4)$$

En dónde,

C, es la capacitancia del condensador, F

T, es el periodo de la señal de la red , ms

$I_{m\acute{a}x}$, es la intensidad máxima en el secundario, A

V_{min} , es la tensión mínima que queremos que tenga la tensión de entrada y que determina el rizado de la fuente, V

$V_{m\acute{a}x}$, es el valor máximo de la tensión de entrada que equivale al valor de pico del secundario del transformador, Vpk

A manera de resumen los valores obtenidos y simulados para la fuente lineal se presentan a continuación:

Tabla 3. Resumen parámetros de diseño de la fuente lineal

Fusible , A	1
Transformador	110 VAC – 43 VAC / 35 VAC
Capacitores, uF	8350
Puente de Diodos 2 ^a	2W005

Fuente: Autores
Elaboración: Autores

2.2.2. Oscilador Colpitts

En este proyecto se decidió utilizar un oscilador con un único elemento activo. Este oscilador puede operar con tecnología BJT o MOSFET, pero por motivos de disponibilidad en el mercado se decidió usar el tipo BJT.

Existen dos posibles diseños de oscilador BJT: Colpitts y Hartley. Debido a que a frecuencias superiores a 1MHz, las bobinas utilizadas en los osciladores Hartley son de tamaño reducido, lo que dificulta su implementación, el equipo de trabajo decidió priorizar el oscilador Colpitts. La Figura 7 y Anexo III muestran el esquema de un oscilador Colpitts.

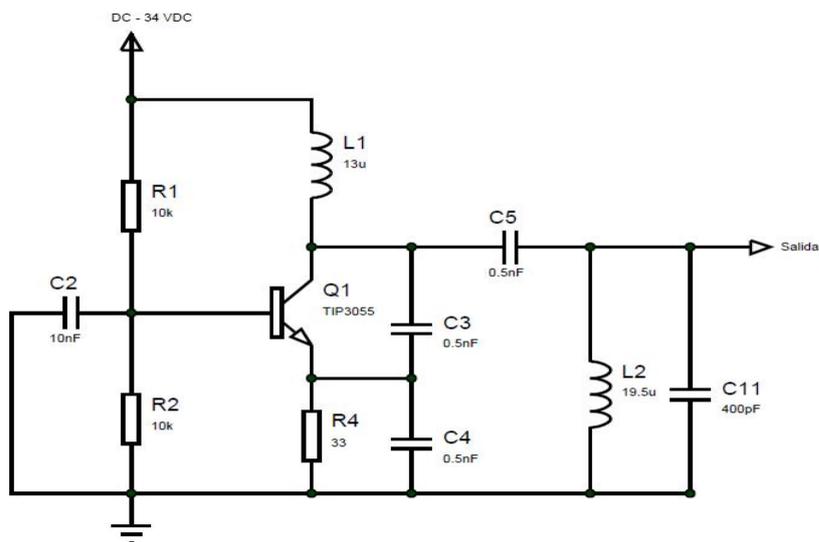


Figura 7. Diseño del oscilador Colpitts.

Fuente: [4]

Elaboración:[4]

Para determinar la frecuencia de resonancia del oscilador Colpitts, el equipo de trabajo decidió determinar la frecuencia de resonancia adecuada en la cual se tenga una alta eficiencia en el sistema de antenas, por lo cual se requiere de un proceso de modelado de antenas. Las antenas tipo lazo, se pueden modelar y simular utilizando esquemas con inductancias, resistencias y capacitancias propias del conductor y cuyos valores dependen de la geometría de la antena. La Figura 8 muestra el modelo circuital de las antenas lazo en sus dos modos, transmisor y receptor. Este modelo involucra la resistencia de radiación (R_{rad}), inductancia propia de la antena Loop (L_{Lazo}), resistencia del conductor en CC y AC y la capacitancia distribuida en toda la antena (C_{Lazo}).

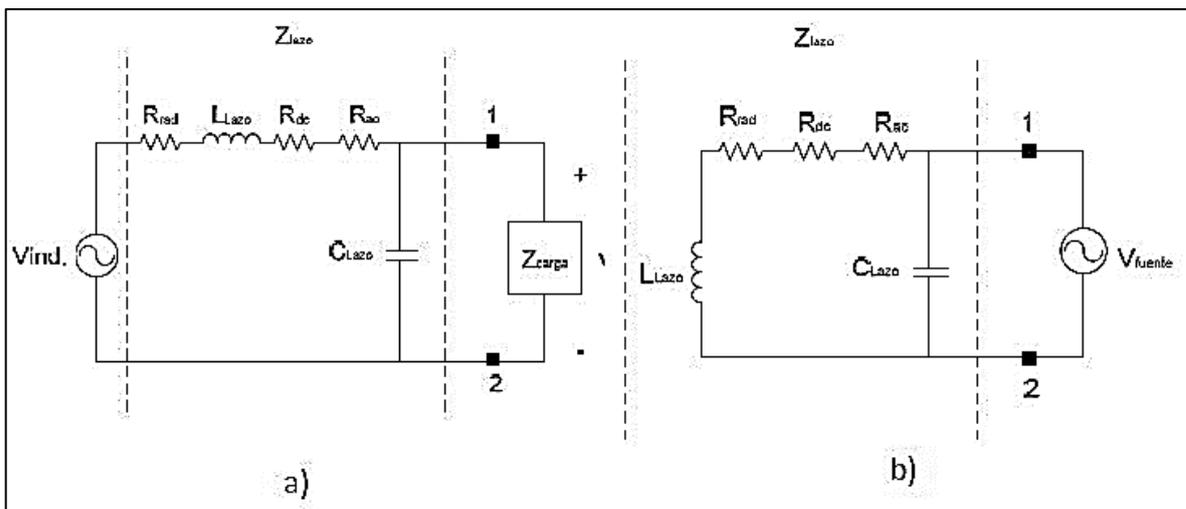


Figura 8. Modelo circuital de las antenas Loop magnéticas. a) Receptor, b) transmisor

Fuente: [8]

Elaboración: [8]

El modelo de antena lazo descrito, puede ser considerado como un circuito tanque, cuya capacitancia requerida, dada una frecuencia de resonancia y la inductancia de la bobina, se calcula a través de la ecuación (6).

$$C = \frac{\left(\frac{1}{2\pi f_0}\right)^2}{L} \quad (6)$$

En dónde,

f_0 , es la frecuencia de resonancia, Hz

L , es la inductancia, H

C , es la capacitancia, F

La resistencia de radiación para una antena tipo lazo, se calcula a través de la ecuación (7).

Para una capacitancia dada, la inductancia de la bobina decrece al aumentar la frecuencia,

permitiendo mantener la misma resistencia de radiación, con un menor número de vueltas. Basados en este criterio, el equipo de trabajo decidió trabajar con una frecuencia de 1.8 MHz.

$$R_r = 31.17N^2 \left(\frac{S^2}{\lambda^4} \right) \quad (7)$$

En dónde,

N , es el número de vueltas del lazo, vueltas

S , es el área de la antena, m^2

λ , es la longitud de onda, m

La Figura 9 muestra la variación de la resistencia de radiación de la antena tipo lazo resonante, a la frecuencia de 1.8 MHz, para diferentes radios de la bobina. La antena es mucho más eficiente cuando su diámetro aumenta, debido a que la resistencia de radiación crece.

Establecida la frecuencia del oscilador en 1.8 MHz, los parámetros del oscilador (ver Figura 7) se calcularon con ayuda de la ecuación (5).

$$W_{osc} = \frac{1}{\sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \quad (5)$$

En dónde,

W_{osc} , es la frecuencia de oscilación, Hz

L , es la inductancia propia de la antena Loop, H

C_1 , es la capacitancia uno del circuito de sintonía, F

C_2 , es la capacitancia dos del circuito de sintonía, F

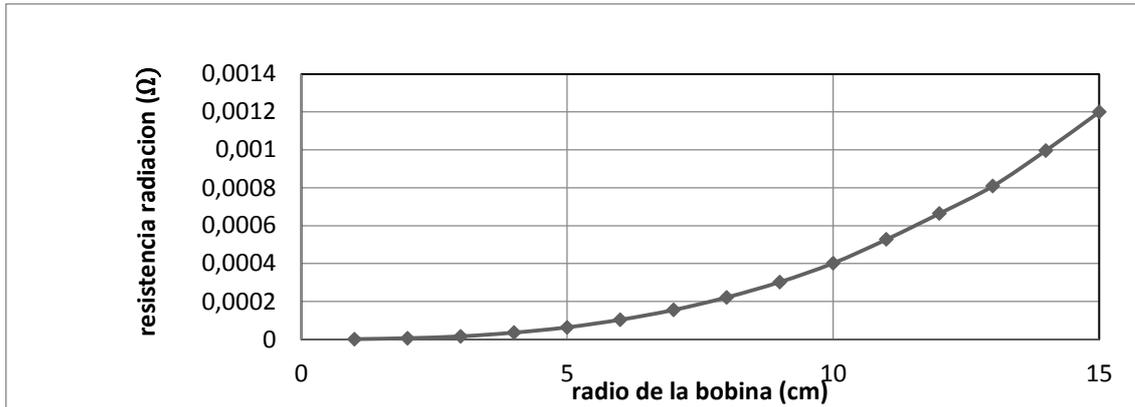


Figura 9. Variación de la resistencia de radiación de la antena tipo lazo en función del radio de la bobina, para una frecuencia de resonancia de 1,8 MHz.

Fuente: Autores
Elaboración: Propia

Los valores de los parámetros del oscilador (ver Figura 7), se encuentran detallados en la Tabla número 4.

Tabla 4. Parámetros de los elementos del oscilador Colpitts

R1, KΩ	10
R2, KΩ	10
L1, uH	13
L2, uH	19.5
C3, nF	0.5
C2, nF	10
C4, nF	0.5
R1, Ω	47
C5, nF	0.5
R4, Ω	33
BJT	TIP3055
C11, nF	0.4

Fuente: Autores
Elaboración: Autores

2.2.3. Divisor de Wilkinson.

Para suplir las necesidades de las dos aplicaciones a desarrollar en este proyecto, el equipo de trabajo decidió diseñar un amplificador de 3 salidas, de 10W de potencia cada una, con la finalidad de realizar los experimentos. Para esto se requiere dividir la señal oscilante proveniente del oscilador Colpitts, utilizando un divisor.

Esta división de potencia, con mínima pérdida por inserción, adaptación entre los puertos, y aislamiento entre los puertos de salida, es posible a través de un divisor de Wilkinson. En aplicaciones de radiofrecuencia, para caracterizar el comportamiento eléctrico de un dispositivo lineal de n puertos se utiliza los llamados parámetros de dispersión “S”. La ecuación (8) muestra la matriz de parámetros S que debe cumplir el diseño de un divisor de potencia de Wilkinson.

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{j}{\sqrt{2}} & -\frac{j}{\sqrt{2}} \\ -\frac{j}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ -\frac{j}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

La Figura 10 muestra la configuración del divisor de Wilkinson para tres puertos de salida. Este divisor consta de dos líneas de transmisión de $\lambda/4$, con una impedancia característica $\sqrt{2} \cdot Z_0$ y una resistencia entre los dos puertos de salida igual a $2 \cdot Z_0$.

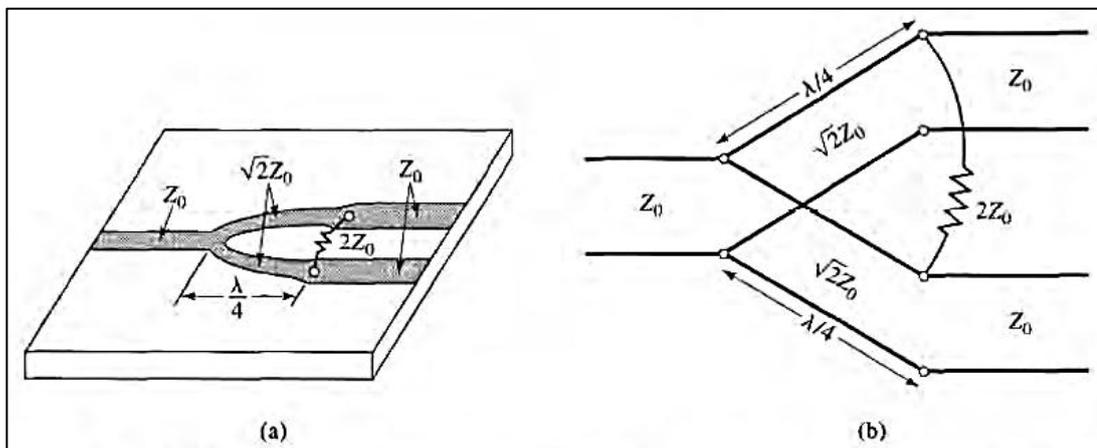


Figura 10. Divisor de Potencia de Wilkinson de tres puertos (a) Divisor implementado en microcinta, (b) circuito equivalente en líneas de transmisión

Fuente: Microwave Engineering. David M. Pozar
Elaboración: Microwave Engineering. David M. Pozar

Para construir un divisor de potencia de Wilkinson, se puede emplear dos tecnologías: microcinta y parámetros concentrados. En la Figura 11 y Anexo III se muestra el diseño del divisor de potencia de Wilkinson de 4 salidas. Debido al tamaño de las líneas de transmisión, el equipo de trabajo decidió priorizar la utilización de parámetros concentrados. Este circuito utiliza bobinas y condensadores para lograr una equivalencia de una línea de

transmisión de $\lambda/4$, a microcinta con una impedancia de $\sqrt{2}Z_0$. Los valores de los elementos de un divisor de Wilkinson para parámetros concentrados se calcularon con la ayuda de la ecuación (9).

$$L = \frac{\sqrt{2}Z_0}{2\pi f} \quad (9)$$

En dónde,

L , es la razón de onda estacionaria, adimensional positivo.

Z_0 , es la inductancia propia de la antena Loop , H

f , es la frecuencia de resonancia, Hz

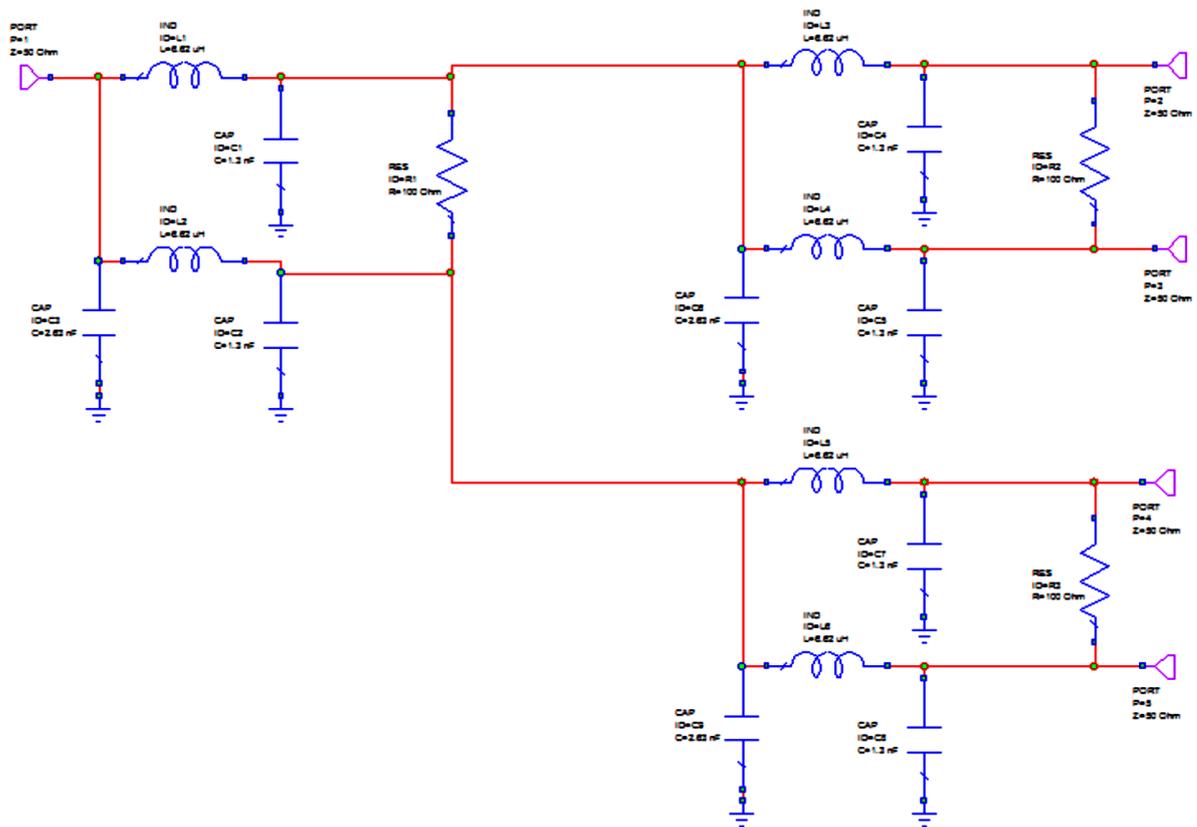


Figura 11. Divisor de Wilkinson para una frecuencia de resonancia de 1.8 MHz.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

Los valores de los parámetros del divisor de Wilkinson con parámetros concentrados, se encuentran detallados en la Tabla número 5.

Tabla 5. Parámetros del divisor de Wilkinson con parámetros concentrados

L1, L2, L3, L4 , L5, L6 mH	6.62
C1, nF	2.66
C2, nF	1.3
R1 , R2, R3 , Ω	100
P1 , P2 , P3, Ω	50

Fuente: Autores
Elaboración: Autores

Tres de las salidas del divisor se utilizan para alimentar a las cargas (iluminación y mobiliario), mientras que la cuarta salida se encuentra aislada mediante una carga fantasma, contribuyendo a la estabilidad del sistema. La Figura 12 muestra que el aislamiento entre los puertos de salida (S23, S34 y S45), El factor de acoplamiento para cada puerto (S11, S22, S33, S44, S55), perdidas por inserción entre el puerto 1 y los tres puertos de salida, (véase figura 12)

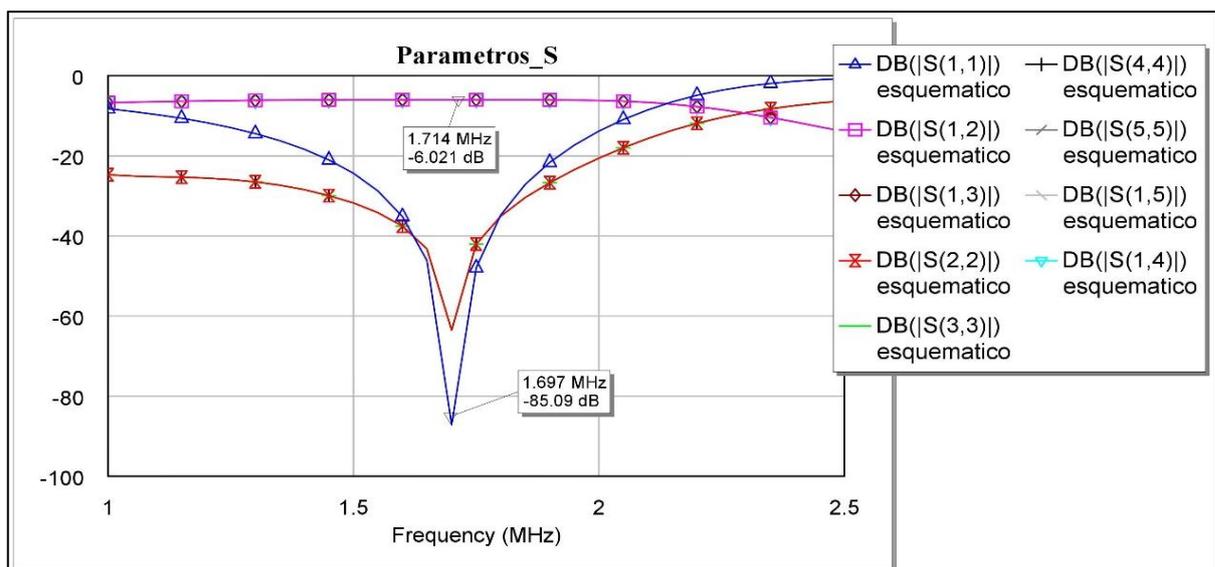


Figura 12. Parámetros S del divisor de Wilkinson

Fuente: Autores
Elaboración: Autores

2.2.4. Amplificador.

El amplificador debe tener una máxima ganancia de potencia, ancho de banda reducido y un alto rendimiento. Dada estas características el equipo de trabajo decidió realizar un amplificador clase C, debido a que estos amplificadores son inversores, tanto la entrada y la salida están en contrafase en el rango de trabajo óptimo. Por medio de la ecuación (10) se puede estimar la frecuencia de oscilación de la señal de salida del amplificador.

$$W_R = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{LC}} \quad (10)$$

En dónde,

W_R , Frecuencia de operación, Hz

L , Inductancia, H

C , capacitancia, F

La Figura 13 muestra el diseño del amplificador clase C, con el objetivo de obtener la máxima transferencia de energía, el equipo de trabajo decidió realizar dos acoples de impedancia mediante condensadores, uno ubicado en la base del transistor para adaptar la impedancia desde la salida del divisor de wilkinson a la entrada de la base del transistor BJT, el otro acoplamiento esta ubicado a la salida del colector del transistor, el cual sirve como capacitor de acoplo y adaptador de impedancia desde la salida del amplificador BJT hacia la carga fantasma.

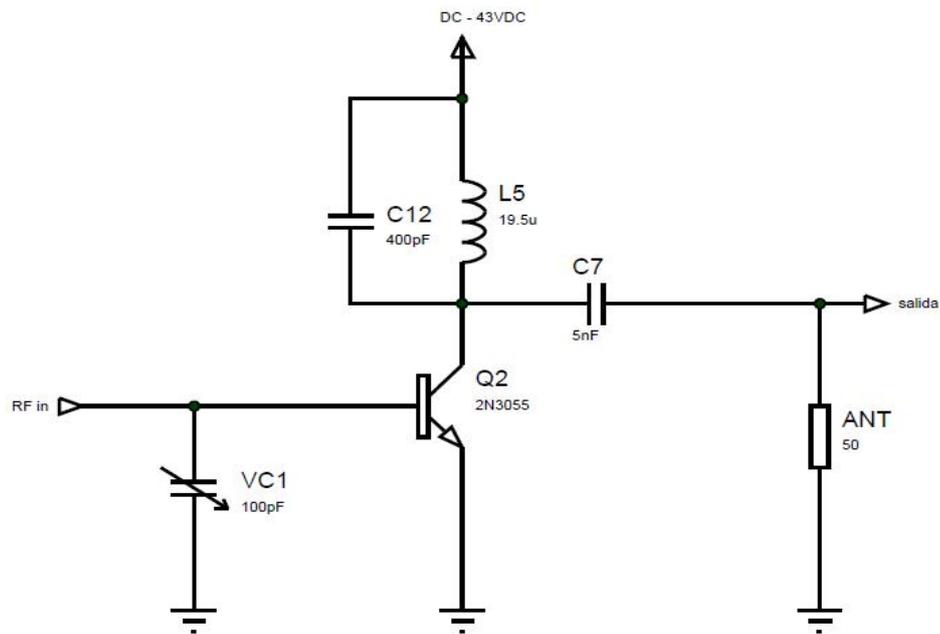


Figura 13. Esquemático amplificador clase C
 Fuente: [6]
 Elaboración: Autores

Los valores de los parámetros del amplificador de potencia, se encuentran detallados en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros del amplificador

L5, uH	19.5
C12, pF	400
ANT, Ω	50
Q1	2n3055
VC1, pF	100
C7, nF	5

Fuente: Autores
 Elaboración: Autores

2.2.5. Antenas para transmisión y recepción.

2.2.5.1. Antenas para transmisión en el prototipo de provisión de energía a sistemas de iluminación.

Considerando el criterio de diseño de Witricity, este prototipo se diseñó para una potencia dada de 10W, con una frecuencia de transmisión de 1.8MHz. En este caso, las antenas loop magnéticas se orientaron de forma tal, que entre la transmisión y la recepción exista el menor ROE posible, a una distancia comprendida entre 20 y 25cm. Se espera que el prototipo en cuestión presente indicadores de uso eficiente de energía, superiores al 80%.

El equipo de trabajo propuso valorar el desempeño de un sistema de antenas correspondiente al esquema de inducción mutua mostrado en la Figura 14. Los componentes eléctricos de las antenas se calcularon con la ayuda de las ecuaciones (11)

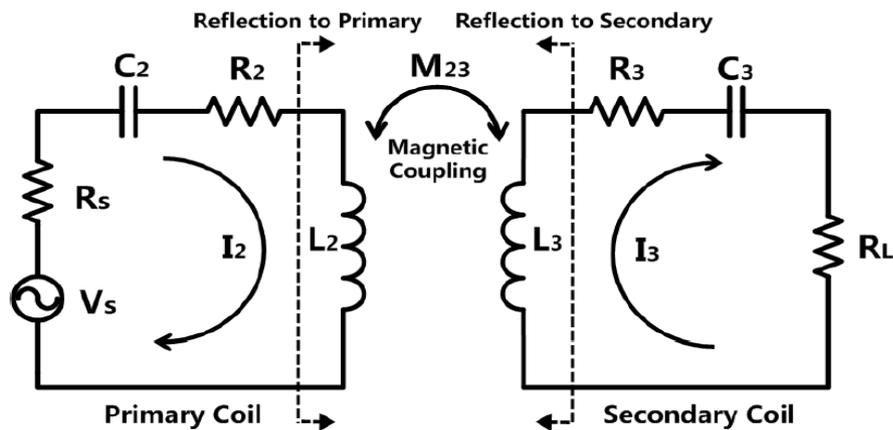


Figura 14. Inducción mutua entre la antena transmisora y receptora
 Fuente: energies-07-04316
 Elaboración: energies

(12) y (13), para una frecuencia de 1.8 MHz y una impedancia de sistema de 50 Ω. Los resultados se muestran en la Tabla 7.

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (11)$$

En dónde,

X_c , Reactancia capacitiva, Ω

ω , Frecuencia angular, rad/s

C , capacitancia, F

$$Z = \sqrt{R_2^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (12)$$

En dónde,

Z , Impedancia total del sistema, Ω

X_C , Reactancia capacitiva, Ω

X_L , Reactancia inductiva, Ω

R_2 , Resistencia de la bobina, Ω

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{X_L - X_C}{R_2} \right] \quad (13)$$

En dónde,

ϕ , Fase, rad

X_C , Reactancia capacitiva, Ω

X_L , Reactancia inductiva, Ω

R_2 , Resistencia de la bobina, Ω

Tabla 7. Parámetros del sistema de antenas del prototipo para provisión de energía a sistemas de iluminación

Transmisión	
Inductancia, uH	66
Capacitancia, pF	94
Recepción	
Inductancia, uH	66
Capacitancia, nF	1

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

Utilizando el aplicativo de software Feko 5.0, se simuló la inducción mutua entre la bobina transmisora y la bobina receptora, para una distancia de 20cm y un diámetro de bobinas de 22 cm. Los resultados obtenidos (ver Figura 15) muestran que la intensidad de campo magnético en la antena loop receptora es de 7.5 A/m, lo que equivale a que la señal se atenúa más del 50% (ver Figura 16) dando como resultado que el sistema de antenas seleccionado no es el adecuado.

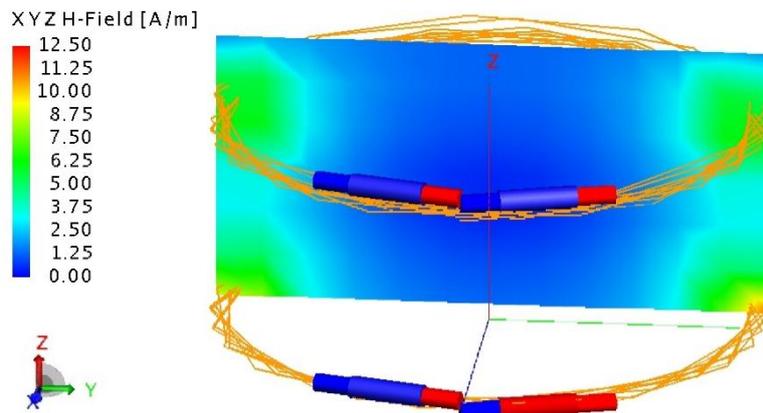


Figura 15. Campo magnético inducido para el aplicativo enfocado en iluminación
Fuente: Autores
Elaboración: Feko 5.0.

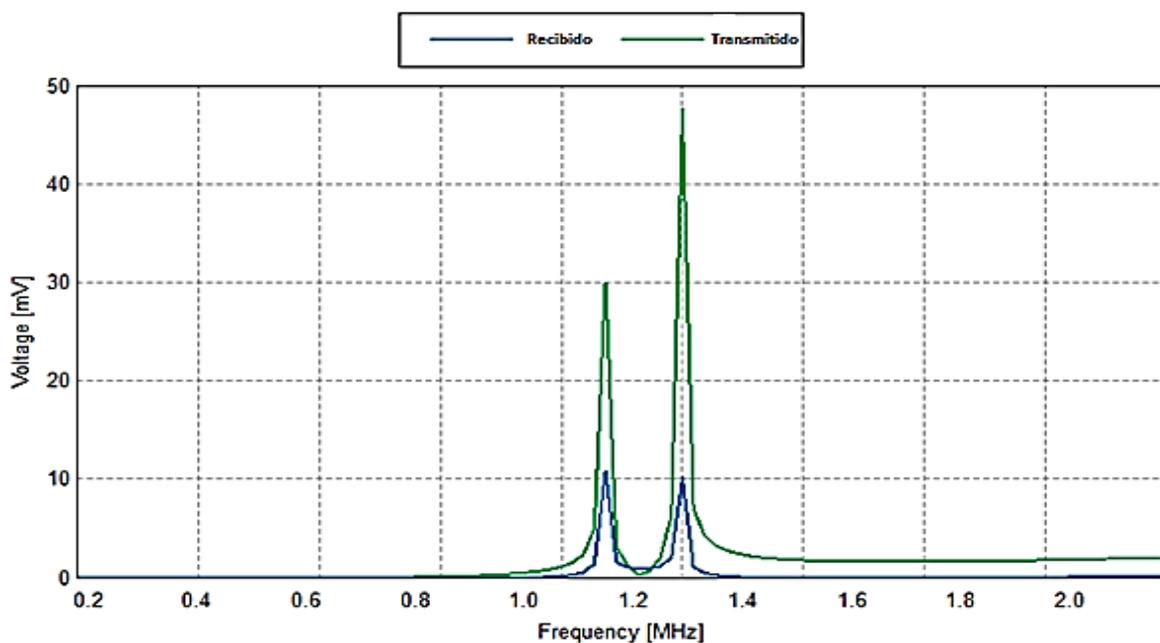


Figura 16. Voltaje inducido para el prototipo de inferiores enfocado a iluminación
Fuente: Autores
Elaboración: Feko 5.0

Con la intención de obtener más información de campo inducido, se decidió construir físicamente el sistema de antenas y determinar experimentalmente el valor del factor de acoplamiento k . La Figura 17 muestra los resultados obtenidos. Con esta información y con ayuda del aplicativo de software AWR 2009 se simuló el desempeño de las antenas para un valor de k igual a 0,08 correspondiente a una distancia de 20cm (ver Figura 18). Las Figuras 19, 20 y 21 muestran las formas de onda, el factor de acoplamiento y las pérdidas por inserción. La onda transmitida tiene una potencia de 0dBm corresponde a una señal

senoidal de 0.18 Vpp, mientras que la recibida es una onda senoidal de 0.12 Vpp en. El factor de acoplamiento para el puerto de entrada es de -0.7 dB, lo que muestra un ROE de 24.8. Las pérdidas por inserción alcanzan los -8 dB, lo que implica que el 85% la onda transmitida se refleja. Los resultados obtenidos mostraron que efectivamente el sistema de antenas seleccionado no era el adecuado. Para resolver esta situación, se decidió emplear un sistema de antenas con repetidor pasivo (ver Figura 22).

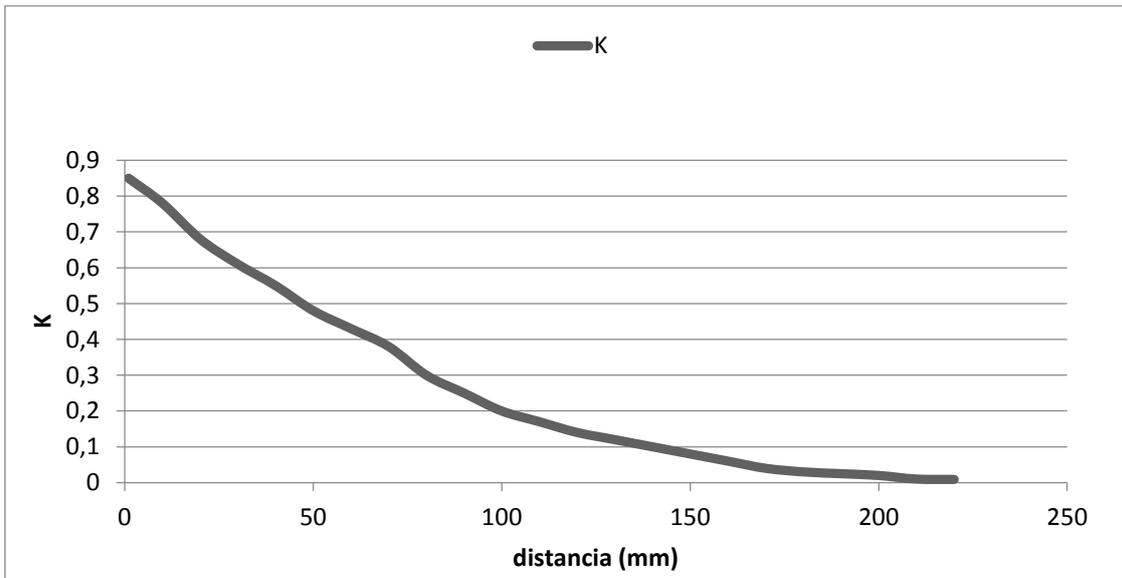


Figura 17. Factor k del acoplamiento mutuo entre la bobina transmisora y receptora.
 Fuente: Autores
 Elaboración: Excel

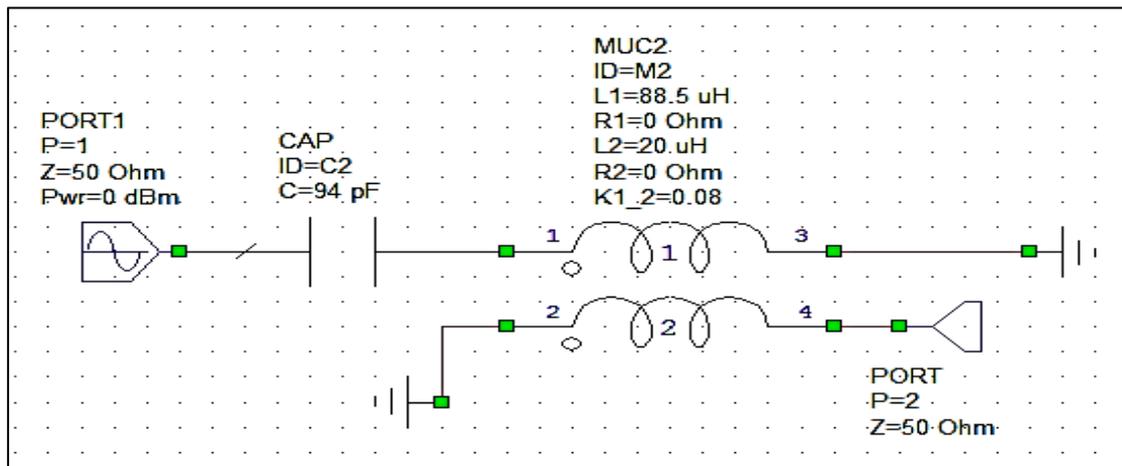


Figura 18. Resultado de la simulación de desempeño del sistema de bobinas para un valor de $k = 0.08$.
 Fuente: Autores
 Elaboración: AWR 2009

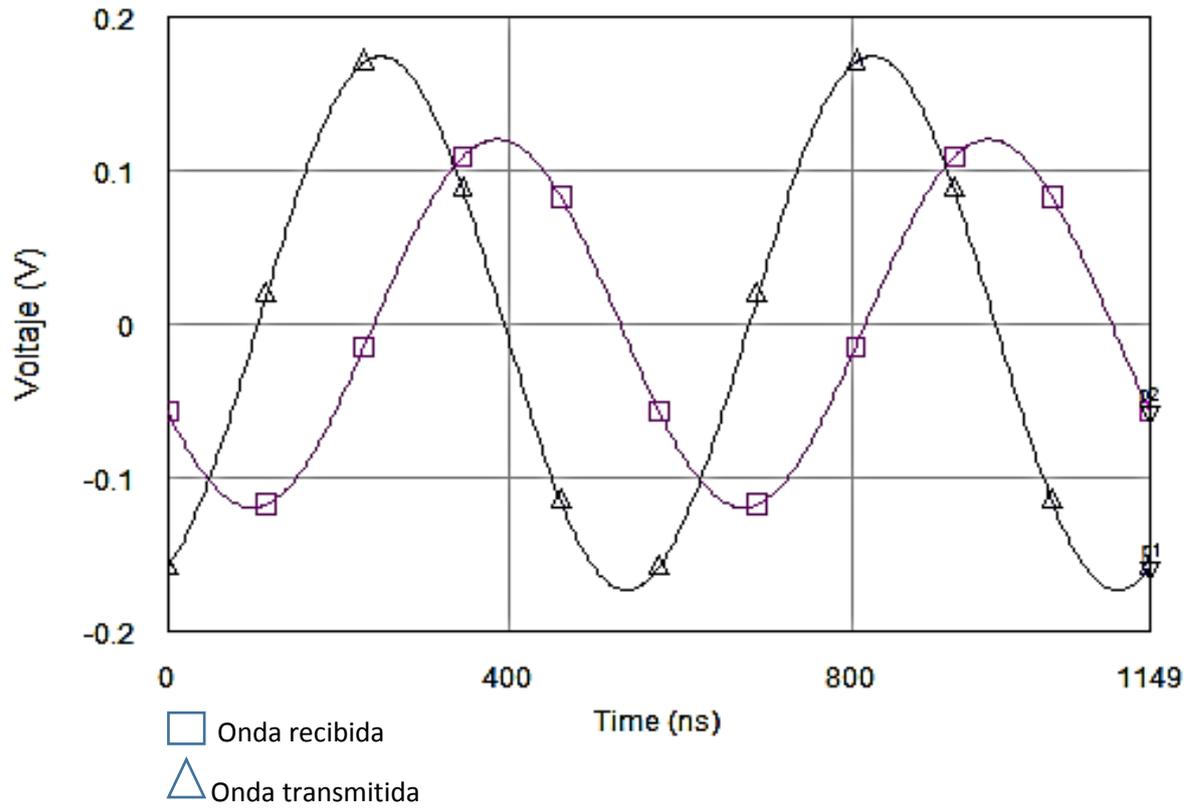


Figura 19. Forma de onda transmitida versus forma de onda recibida
Fuente: Autores
Elaboración: AWR 2009

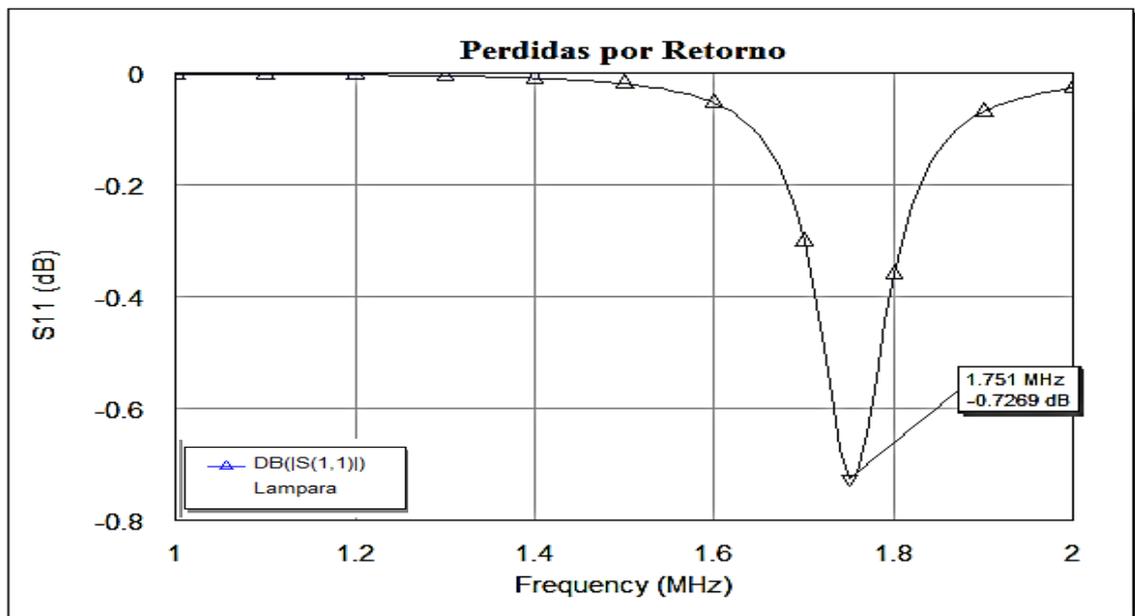


Figura 20. Pérdidas por retorno del sistema de antenas
Fuente: Autores
Elaboración: AWR 2009

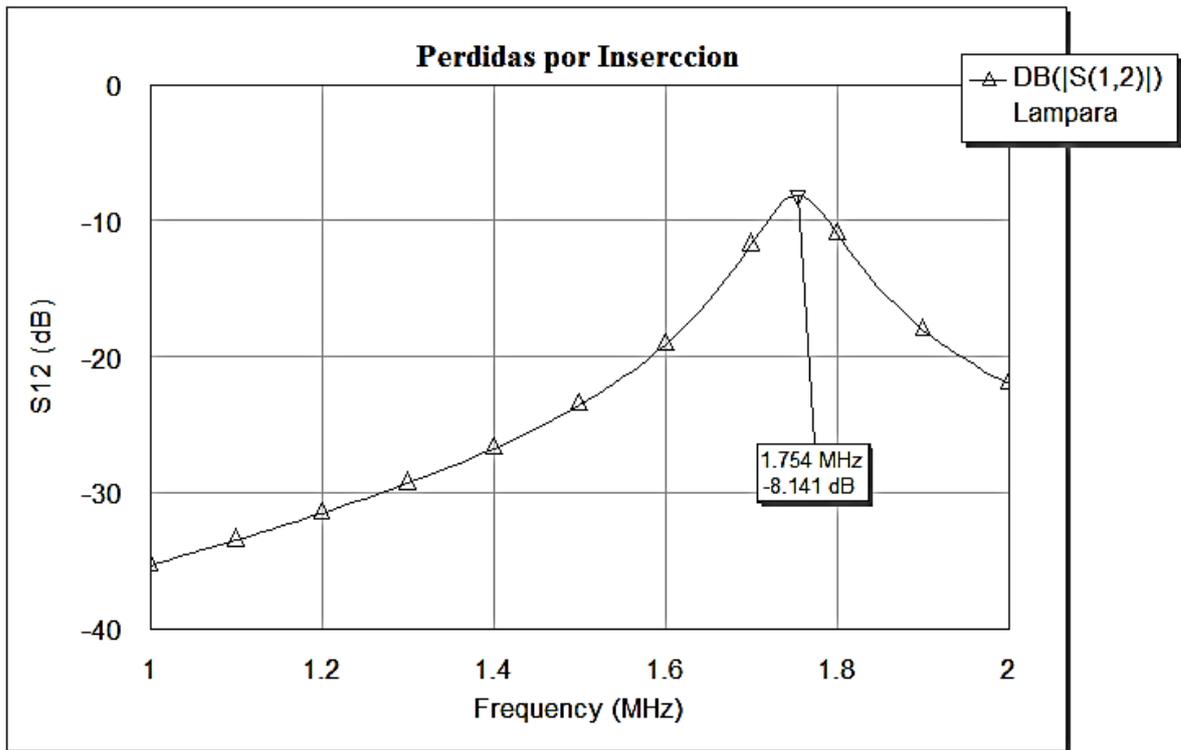


Figura 21. Pérdidas por inserción en el sistema de antenas.
 Fuente: Propia
 Elaboración: Autores

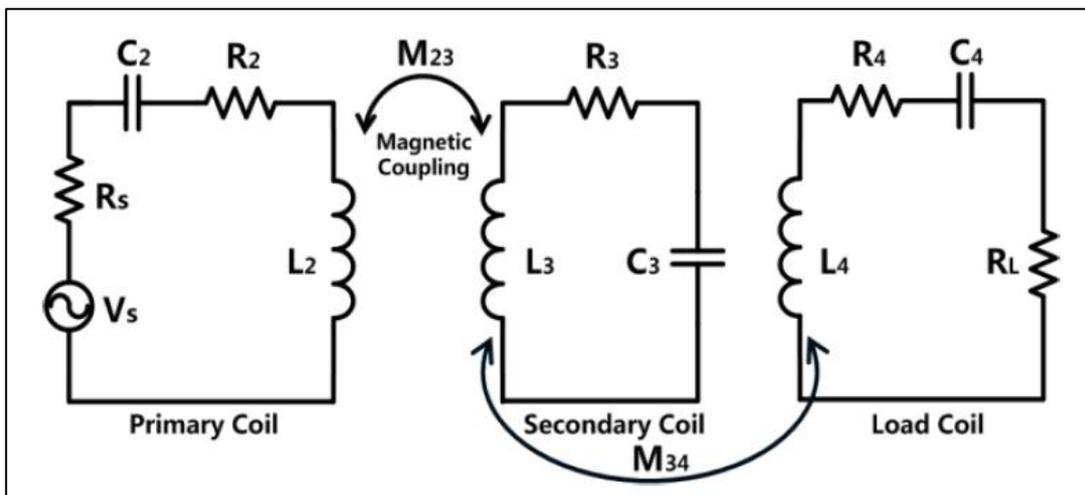


Figura 22. Inducción electromagnética mediante repetidores
 Fuente: Propia
 Elaboración: Autores

Para el nuevo sistema propuesto, utilizando el aplicativo de software AWR 2009 se simuló la inducción mutua entre la bobina transmisora y la bobina receptora utilizando un repetidor pasivo, para una distancia de 20 cm y un diámetro de bobinas de 22 cm (ver Figura 23). Las Figuras 24 y 25 muestran las pérdidas por retorno y las pérdidas por inserción. El factor de acoplamiento para el puerto de entrada es de -10.54 dB, lo que implica un ROE de 1.84. Las pérdidas por inserción alcanzan los -0.5 dB, lo que denota una pérdida de señal por reflexión del 8,3%. En general, los resultados obtenidos mostraron que el sistema de antenas con repetidores cumple con las especificaciones de diseño.

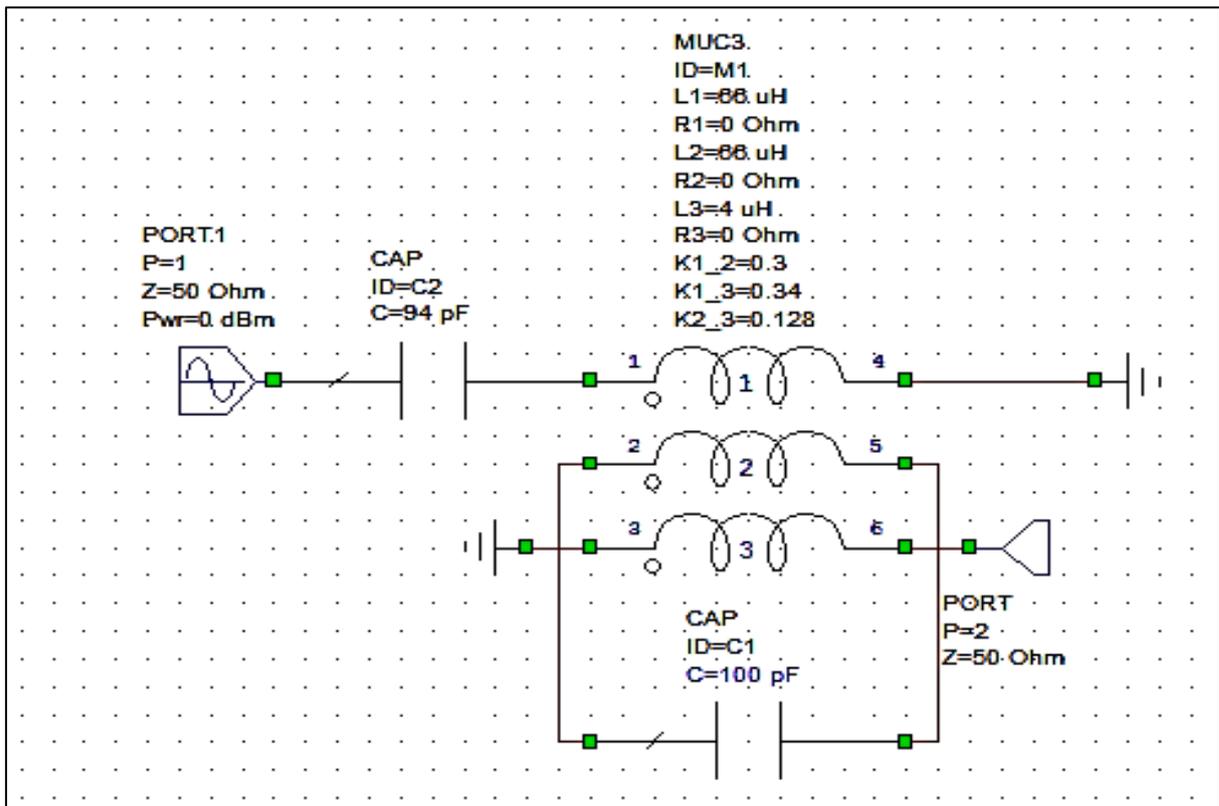


Figura 23. Simulación de la inducción electromagnética mediante repetidores

Fuente: Autores

Elaboración: AWR 2009.

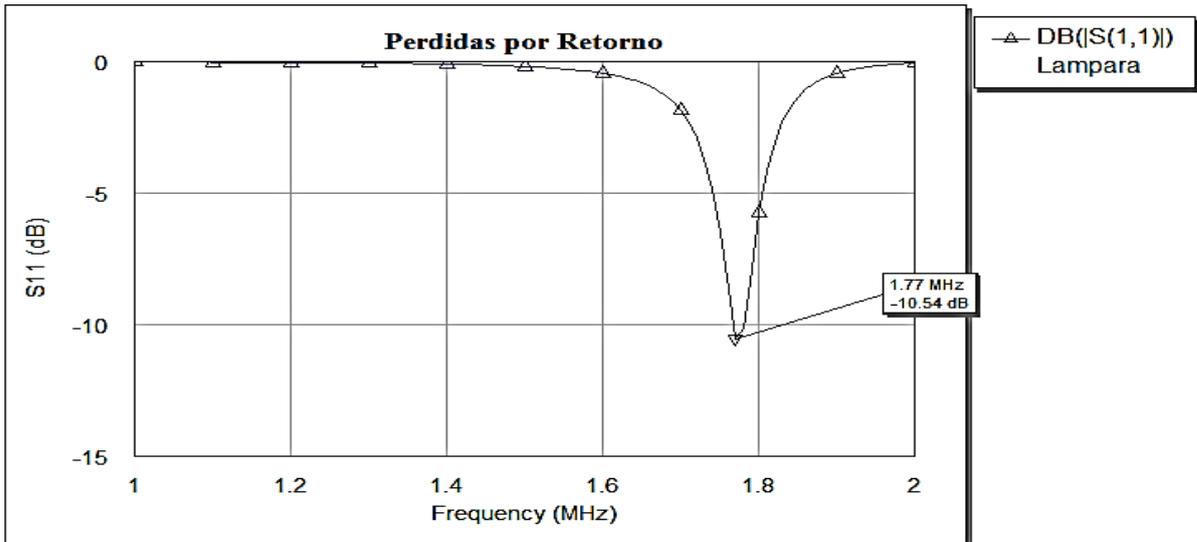


Figura 24. Pérdidas por retorno del sistema de antenas usando repetidores
Fuente: Autores
Elaboración: AWR 2009

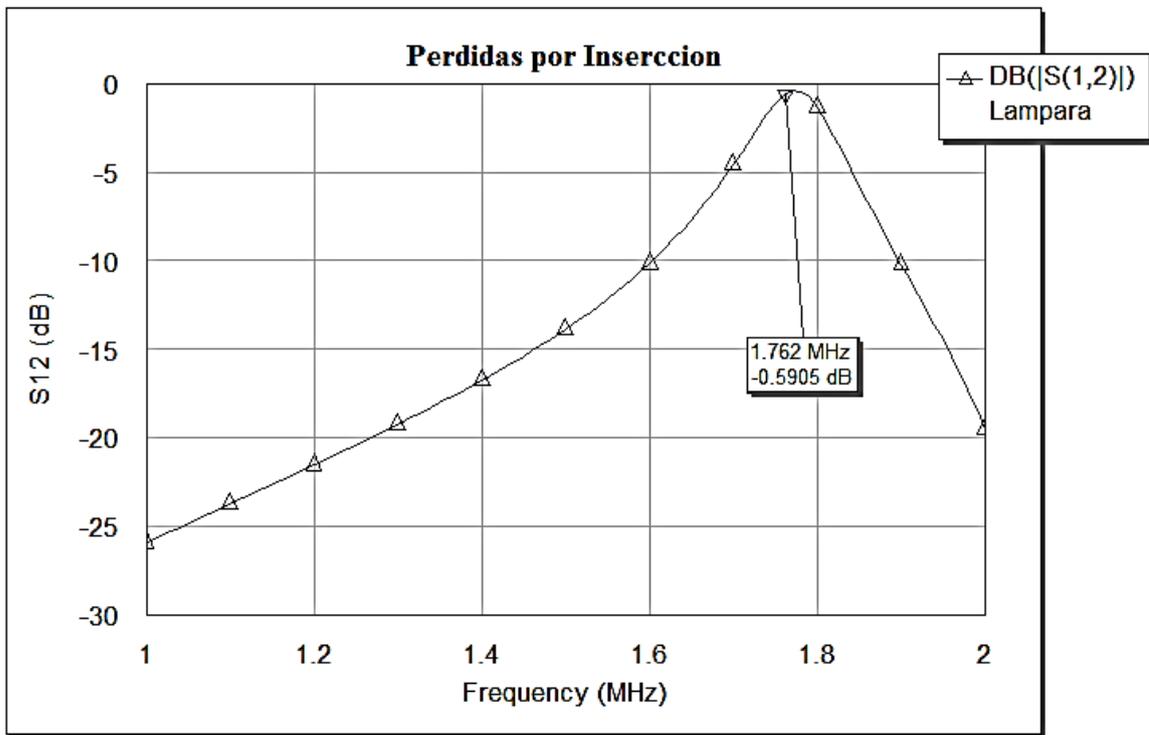


Figura 25. Pérdidas por inserccion en el sistema de antenas usando repetidores
Fuente: Autores
Elaboración: AWR 2009

2.5.5.2. Antenas para transmisión en el prototipo de provisión de energía a dispositivos móviles sobre mobiliario.

En el prototipo para la provisión de energía a dispositivos móviles, se mantuvo el uso del sistema de antenas con repetidores, y se definió a la distancia y al tamaño de las bobinas como parámetros variables de diseño

Utilizando el software Feko 5.0, se simuló la inducción mutua entre las bobinas transmisora y receptora (ver Figura 26), para una distancia de 10cm y con un diámetro de bobinas de 45 cm. La intensidad de campo magnético inducido en la antena loop receptora se apreció en 1.75 A/m , lo que equivale a una atenuación mínima con respecto a la señal de entrada (ver Figura 27), por lo que se concluye que el sistema de antenas seleccionado es adecuado. Las Figuras 28, 29 y 30 muestran las formas de onda, el factor de acoplamiento del sistema y las pérdidas por inserción. La onda transmitida tiene una potencia de 40 dBm, que corresponde a una señal senoidal de 33.48 V en Vpp, mientras que la recibida es una onda senoidal de 30.74V en Vpp. El acoplamiento del sistema alcanza los -22.88 dB que equivale a un ROE de 1.01, Las pérdidas por inserción alcanzan los -0.02 dB, lo que denota una pérdida por inserción mínima de señal y mas del 90% de la energía se transfiere. Los resultados descritos mostraron que el sistema de antenas seleccionado cumple con especificaciones de diseño.

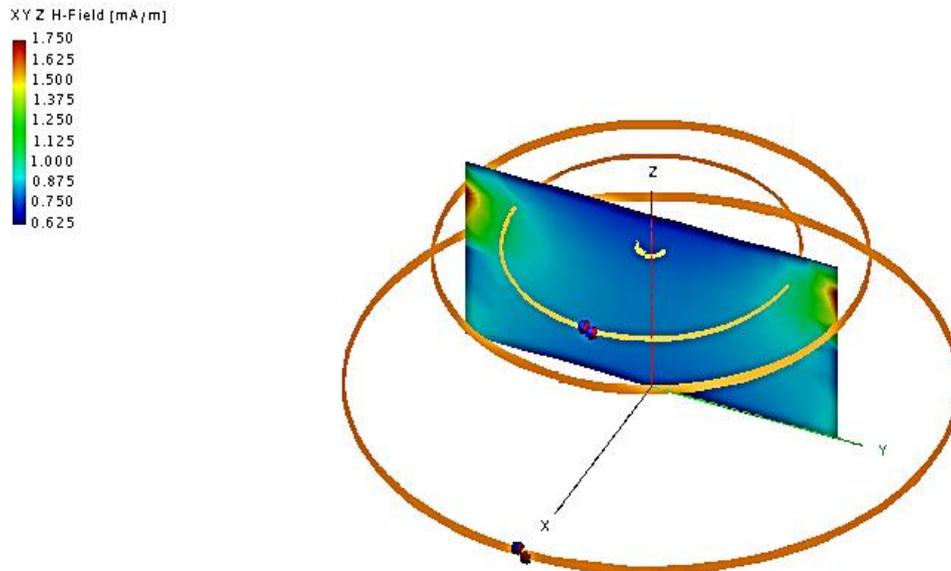


Figura 26. Campo magnético inducido para el prototipo enfocado en mobiliario
Fuente: Autores
Elaboración: Feko 5.0.

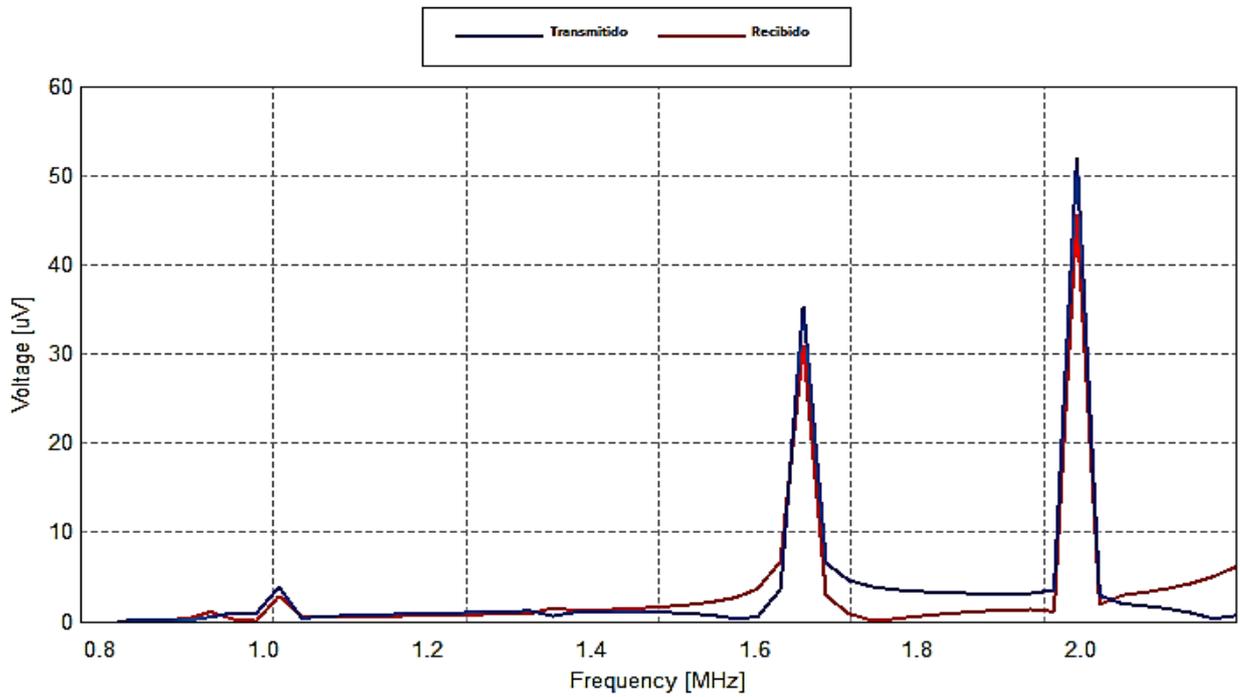


Figura 27. Fuerza electromotriz inducida para el prototipo enfocado en mobiliario
 Fuente: Autores
 Elaboración: Feko 5.0

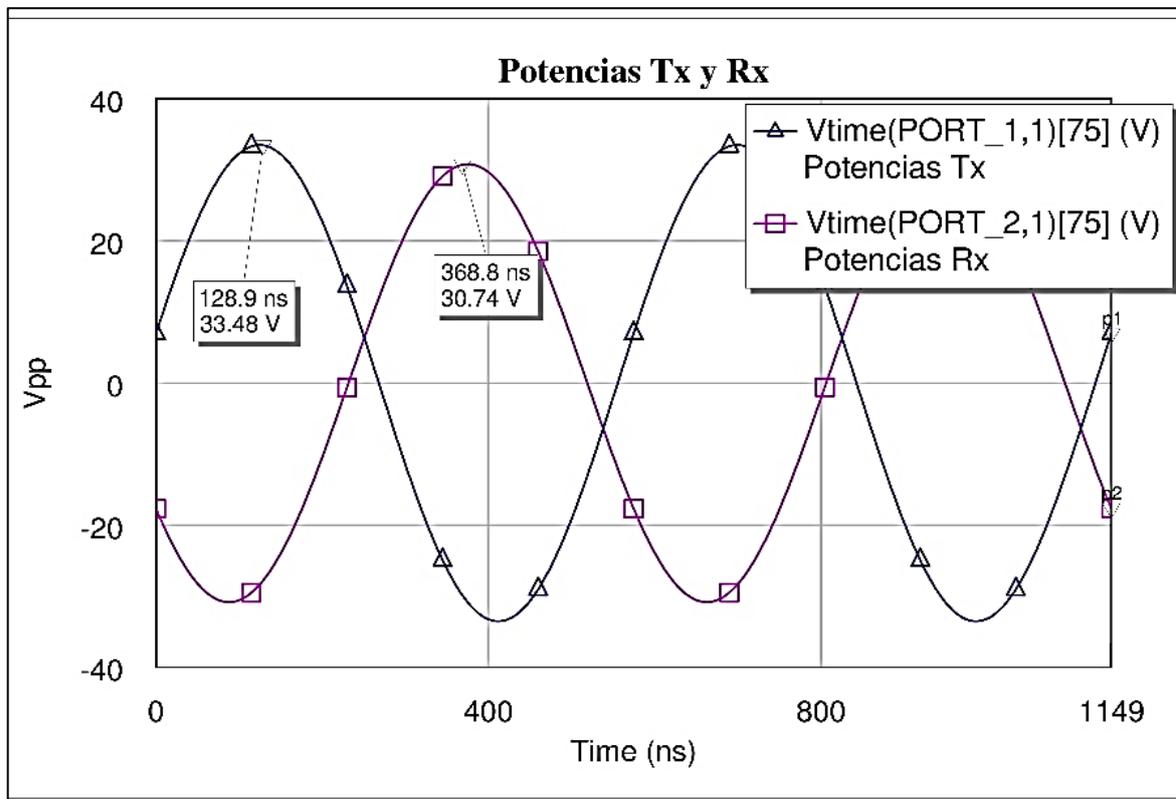


Figura 28. Formas de onda de Entrada y Salida del prototipo enfocado a mobiliario
 Fuente: Autores
 Elaboración: AWR 2009

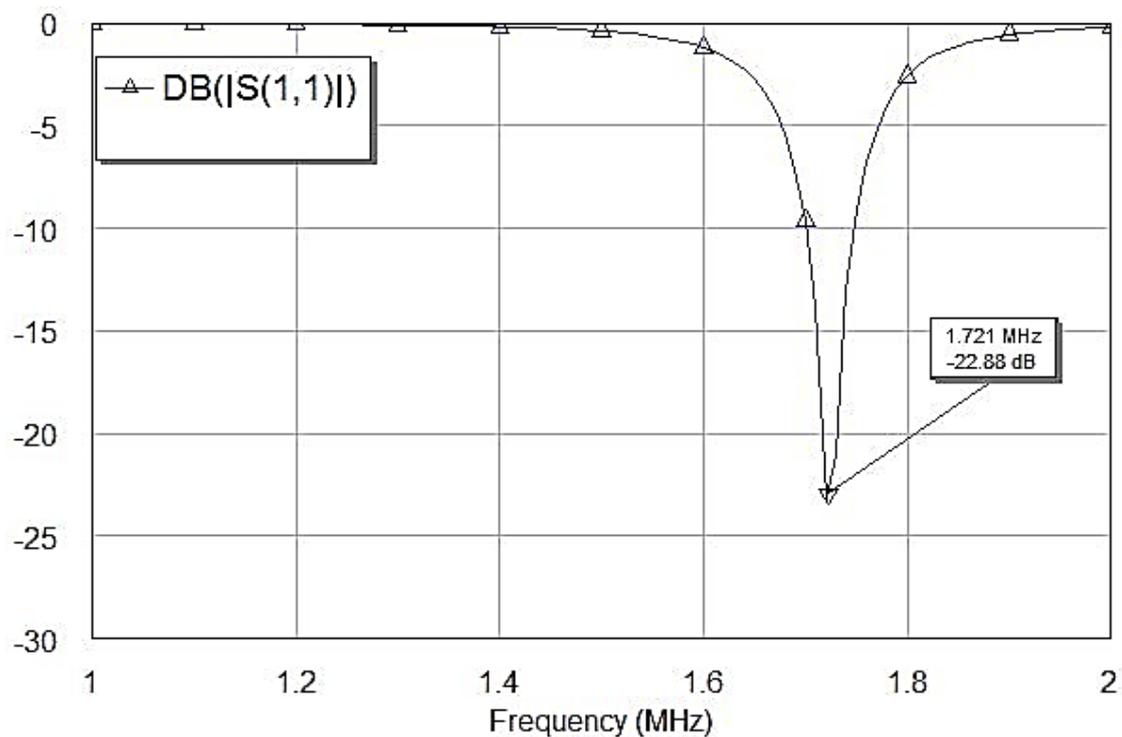


Figura 29. Pérdidas por retorno del sistema de antenas usando repetidores enfocado a mobiliario
 Fuente: Autores
 Elaboración: AWR 2009

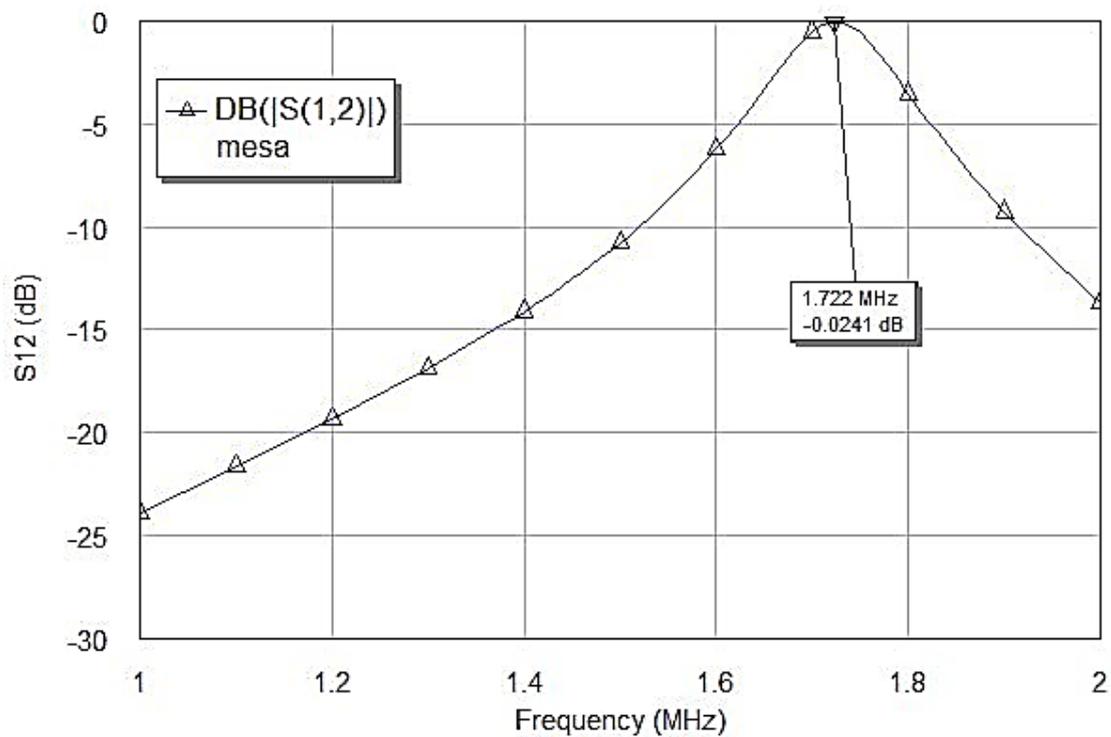


Figura 30. Pérdidas por inserción en el sistema de antenas usando repetidores enfocado a mobiliario.
 Fuente: Autores
 Elaboración: : AWR 2009

2.2.6. A manera de resumen

La Tabla 8 resume los parámetros de diseño básico del prototipo para interiores, desarrollados en esta etapa.

Tabla 8. Parámetros de diseño básico de los prototipos para Interiores

Parámetros	Para iluminación	Para mobiliario
Principio de operación	Acoplamiento inductivo resonante	
Frecuencia de operación	1.8 MHz	
Distancia	27 cm	20 cm
Eficiencia	>85%	>80%
Tipo de antenas	Circular	Rectangular
Medidas antenas	Diámetro = 20 cm	30 cm x 35 cm
Potencia transmitida	10 W	

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

2.3. Ingeniería básica del prototipo para exteriores.

Tomando como referencia la concepción del proyecto AmbientRF [16], El presente prototipo se pensó para una potencia de salida de 1.5W, con una frecuencia de transmisión de 447 MHz, las antenas yagi se orientarán de forma tal, que entre la transmisión y la recepción exista la menor pérdida de energía por apuntamiento de antenas, a una distancia de 8 m. Se espera que el aplicativo presente indicadores de uso eficiente de energía superiores al 8%. La Tabla 9 resume los parámetros de diseño del aplicativo.

Tabla 9. Parámetros de diseño del prototipo para exteriores.

Ancho de banda, GHz	0.3 - 3
Distancia, m	1.6
Eficiencia, %	>8

Fuente: Autores

Elaboración: Propia

La Figura 31 muestra el diagrama funcional para el prototipo de exteriores. La energía proveniente de la red de distribución eléctrica, se rectifica a corriente continua (CC) mediante una fuente conmutada que alimenta a un amplificador comercial de 1.5W de potencia, el cual amplifica una onda de RF, en la frecuencia de 447 MHz. Esta señal se

transmite por medio de una antena yagi. La onda es recibida por otra antena yagi, acoplada a un convertidor RF-CC. La corriente es rectificadada y almacenada en un súper condensador. El prototipo para exteriores se diseñará para proveer de energía a una red de sensores.

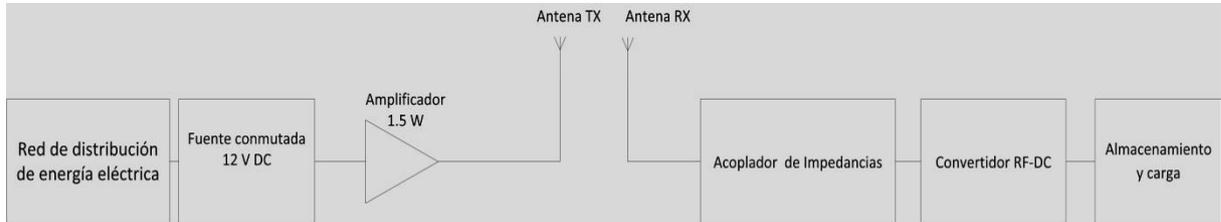


Figura 31. Diagrama de bloques funcionales del aplicativo de exteriores

Fuente: Autores

Elaboración: Visio 2013.

2.3.1. Fuente conmutada.

En el marco de este proyecto, el equipo de trabajo decidió utilizar una fuente conmutada comercial, cuyas características técnicas se describen en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros técnicos de diseño de la fuente conmutada

Tensión de entrada, V AC	100 – 240
Tensión de salida, V CC	12
Frecuencia entrada, Hz	50 - 60
Corriente de entrada, A	1.6
Corriente de salida, A	5.83
Eficiencia, %	80
Dimensiones, mm	150 x 59 x 34

Fuente: Fuente Li Shin [1]

Elaboración: Propia

2.3.2. Amplificador.

Para suplir las características de diseño, el equipo de trabajo decidió utilizar un amplificador de potencia de mercado, modelo RF SKU271686, cuyas características de técnicas se detallan en la Tabla 11.

Tabla 11. Parámetros técnicos del amplificador RF SKU271686

Tensión de entrada, V CC	12V	
Frecuencia de operación, MHz	1 - 500	
Potencia de salida, dBm	32	
Corriente de salida, A	0.3	
Supresión armónica, dBc	Baja frecuencia	Alta frecuencia
	-12	-20
Dimensiones, cm	5.5 x 4 x 1.6	
Tipo de conector	Sma hembra	

Fuente: Eldoer Electric [5]
 Elaboración: Propia

2.3.3. Antenas para transmisión y recepción.

Para este prototipo, se decidió utilizar un sistema de antenas Yagi, operando con los parámetros mostrados en la Tabla 12. Haciendo uso del aplicativo de software Feko 5.0 se simuló el patrón de radiación de las antenas Yagi, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 32,

Tabla 12. Parámetros de diseño de las antenas Yagi

Ancho de banda, kHz	200
ROE, adimensional	<1.4
Frecuencia operación, MHz	447
Directividad,	Alta
Ganancia, dBi	7.5

Fuente: Autores
 Elaboración: Propia

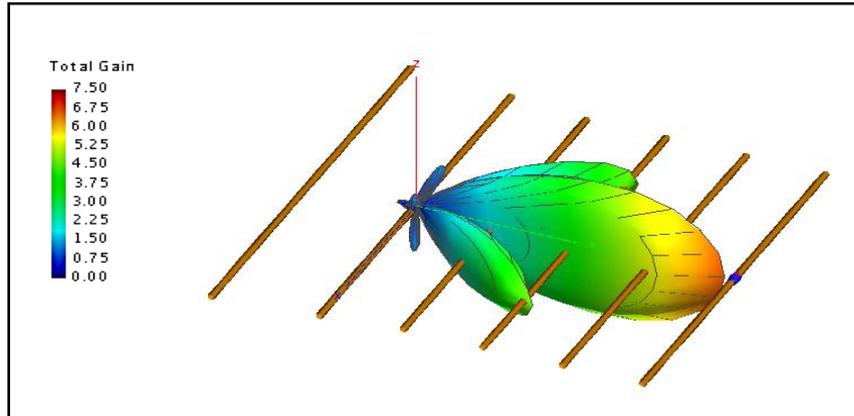


Figura 32. Patrón de radiación Yagi

Fuente: Propia

Elaboración: FEKO 5.0

2.3.4. Sobre pérdidas en el espacio libre.

La transmisión inalámbrica de energía en este prototipo orientado a exteriores se realiza mediante un enlace de radio punto a punto. Utilizando el aplicativo de software AWR 2009 se simuló las pérdidas del enlace en el espacio libre entre las antenas Yagi, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 33. Los resultados muestran que la densidad de potencia disminuye al aumentar la distancia, debido a que el frente de la onda se ensancha mientras se aleja del transmisor. Las pérdidas en el espacio libre se calcularon con la ayuda de las ecuaciones (14) y (15) para una frecuencia de 447 MHz, y una distancia de 8 m. La potencia total recibida se calculó con la ayuda de la ecuación (16). Los resultados se muestran en la Figura 34, la cual indica que el enlace es viable, debido a que las pérdidas a 8 m son compensables con las ganancias del transmisor y de las antenas.

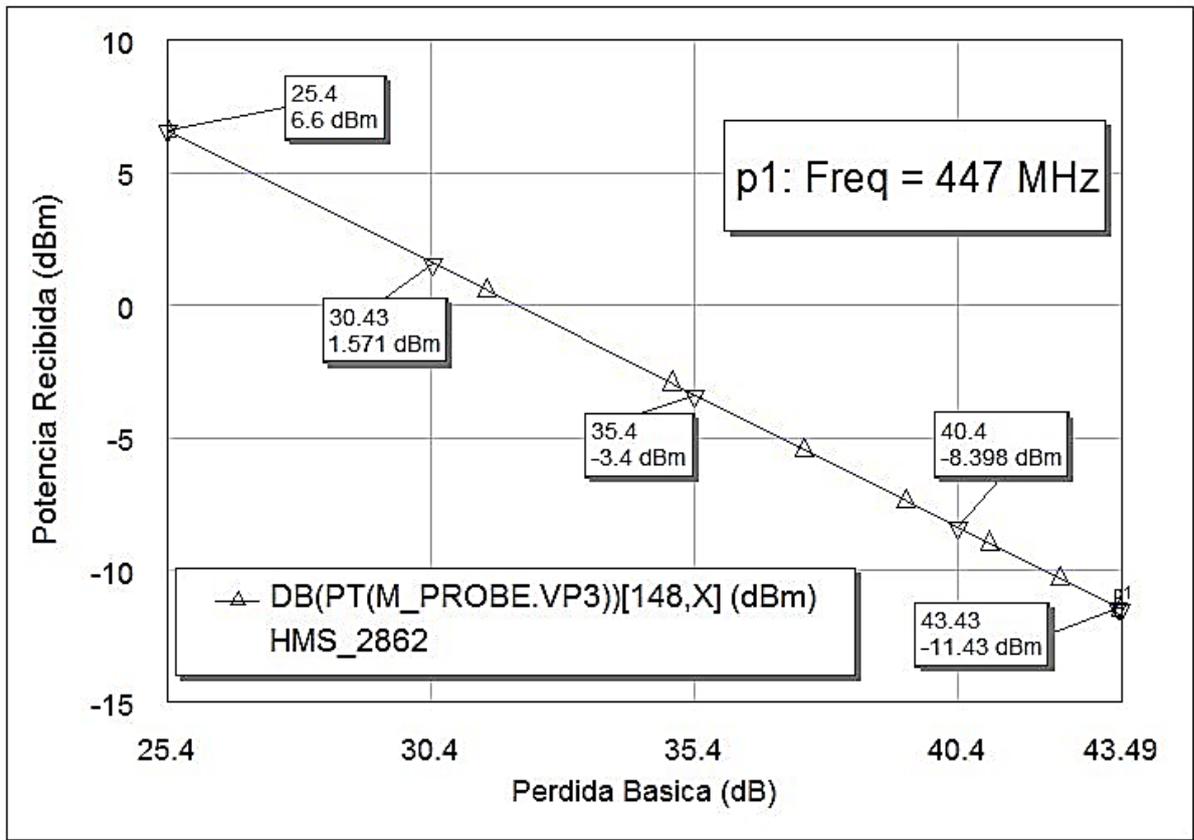


Figura 33. Pérdidas en el espacio libre para una distancia comprendida entre 1y 8 m, para una frecuencia de resonancia de 447 MHz
Fuente: Propia
Elaboración: AWR 2099

$$Lbf = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (14)$$

En dónde,

Lbf , es la pérdida básica de transmisión en el espacio libre, dB

d , es la distancia entre antenas, m

λ , es la longitud de onda, m

$$Lbf = 32.4 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d) \quad (15)$$

En dónde,

Lbf , es la pérdida básica de transmisión en el espacio libre, dB

d , es la distancia entre antenas, Km

f , es la frecuencia, MHz

$$P_{rx} = \frac{P_{tx}(G_{Tx} G_{Rx} \lambda^2)}{16\pi^2 D^2 L} \quad (16)$$

En donde,

P_{rx} , es la potencia de recepción, dB

G_{Tx} , es la ganancia de la antena transmisora, dB

G_{Rx} , es la ganancia de la antena receptora, dB

λ , es la longitud de onda, m

D , es la distancia de separación entre la antena Rx y la antena Tx, m

L , es el factor de pérdida del sistema (≥ 1), adimensional

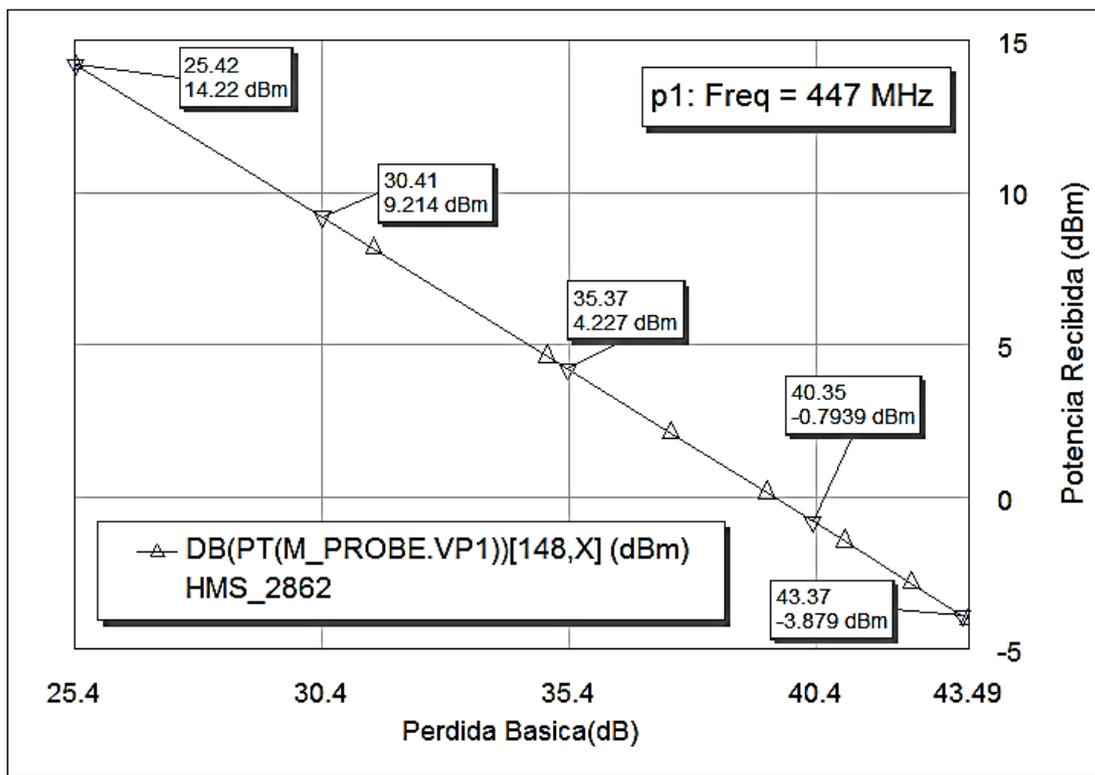


Figura 34. Atenuación de la señal en dBm para una distancia comprendida entre 1 – 8 m
Fuente: Autores
Elaboración: AWR 2009.

2.3.5. Acoplamiento de impedancia.

Para una máxima transferencia de energía, desde la antena receptora al dispositivo de bajo consumo, se requiere de un proceso de acoplamiento de impedancia. En el marco de este proyecto, para el acoplamiento de impedancia se decidió emplear una red de acoplamiento en π (ver Figura 35), debido a que se requiere de la mayor selectividad de resonancia posible. Para lograr una alta selectividad de resonancia, el circuito debe poseer un factor de

calidad Q elevado. Se conoce como factor Q a la razón entre la frecuencia resonante y el ancho de banda. [17]. En este proyecto, el factor Q para un circuito de impedancias se determinó utilizando la denominada carta de Smith. En un circuito tipo π , el extremo de mayor resistencia determina el Q del circuito. Los parámetros de la red de adaptación en π , se calcularon con ayuda de las ecuaciones (17) y (18) y se muestran en la Tabla 13.

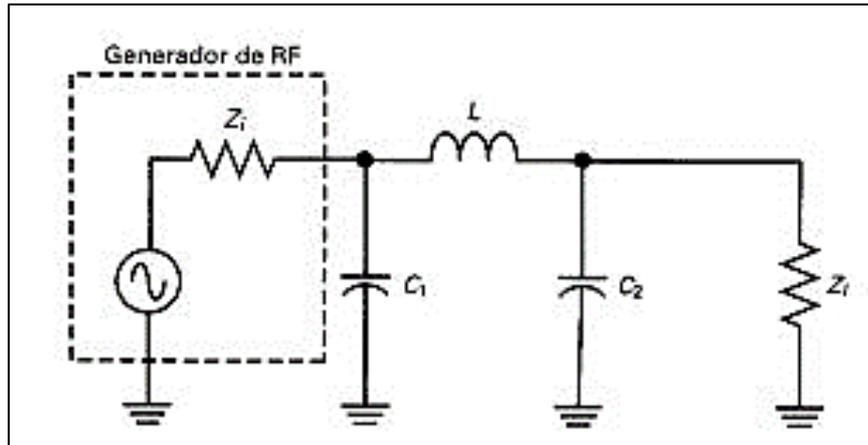


Figura 35. Red de adaptación de impedancias en π

Fuente: [3]

Elaboración: Autores

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (17)$$

En dónde,

L , es la inductancia de la bobina, H

f , es la frecuencia de resonancia, Hz

X_L , es el factor Q del circuito, adimensional

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad (18)$$

En dónde,

C , es la capacitancia de la bobina, F

f , es la frecuencia de resonancia, Hz

X_c , es la reactancia del condensador, Ω

Tabla 13. Parámetros de la red de adaptación en π

L, mH	200
C1, pF	50
C2, pF	446

Fuente: Autores
 Elaboración: Propia

En el marco de este proyecto, para rectificar la señal proveniente de la antena receptora, el equipo de trabajo decidió emplear diodos Schottky HSMS-282, debido a tres razones fundamentales: respuesta rápida, rápida recuperación y caída de voltaje en directa inferior a 0.3 V. La Figura 36 muestra la curva característica de este diodo.

El acople se realizó entre la impedancia de la antena receptora y la impedancia del diodo. La impedancia del diodo Schottky se simuló y modeló utilizando el aplicativo de software AWR 2009. Las Figuras 37 y 38 muestran la impedancia del diodo Schottky y su representación en la carta de Smith. Las Figura 39 y 40 muestra el resultado del acople de impedancias entre el diodo Schottky y la antena receptora.

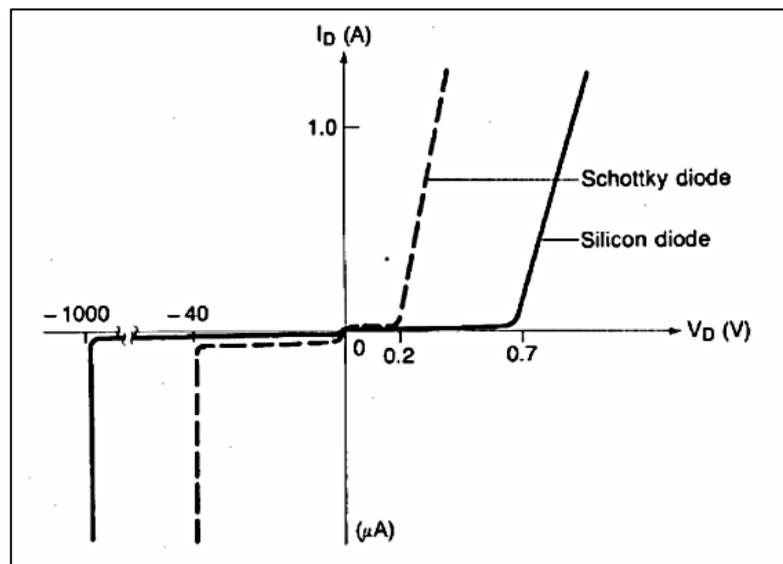


Figura 36. Curva característica del diodo Schottky

Fuente: [2]
 Elaboración: Autores

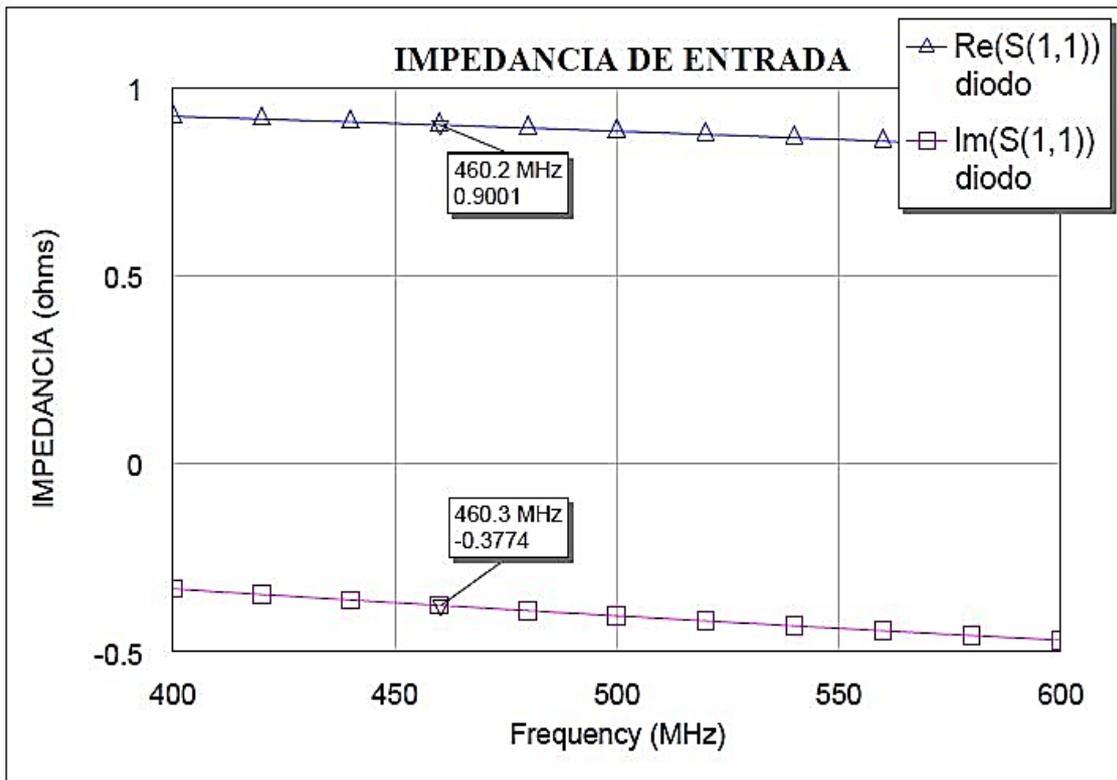


Figura 37. Impedancia de entrada diodo Schottky
Fuente: Propia
Elaboración: Autores

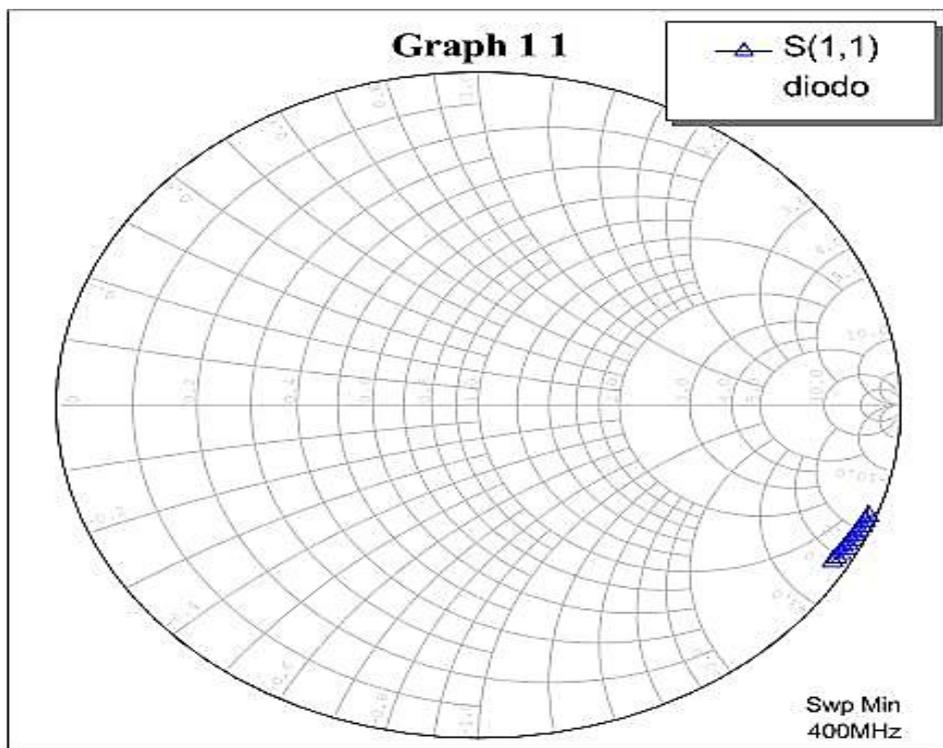


Figura 38. Carta de Smith para el diodo Schottky
Fuente: Propia
Elaboración: AWR2009

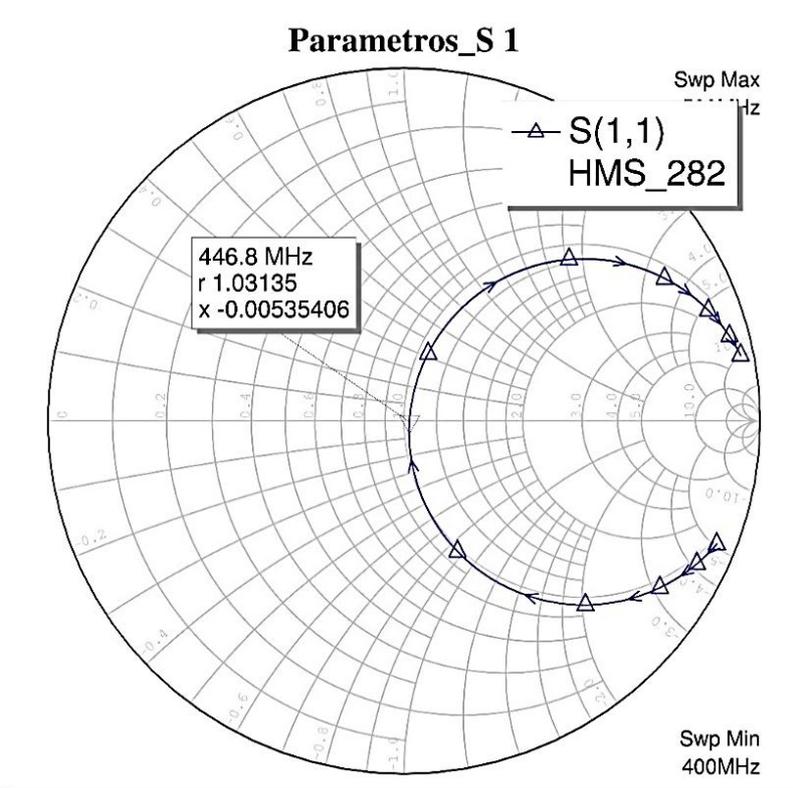


Figura 39. Acople de Impedancias en la carta de Smith

Fuente: Propia

Elaboración: Autores

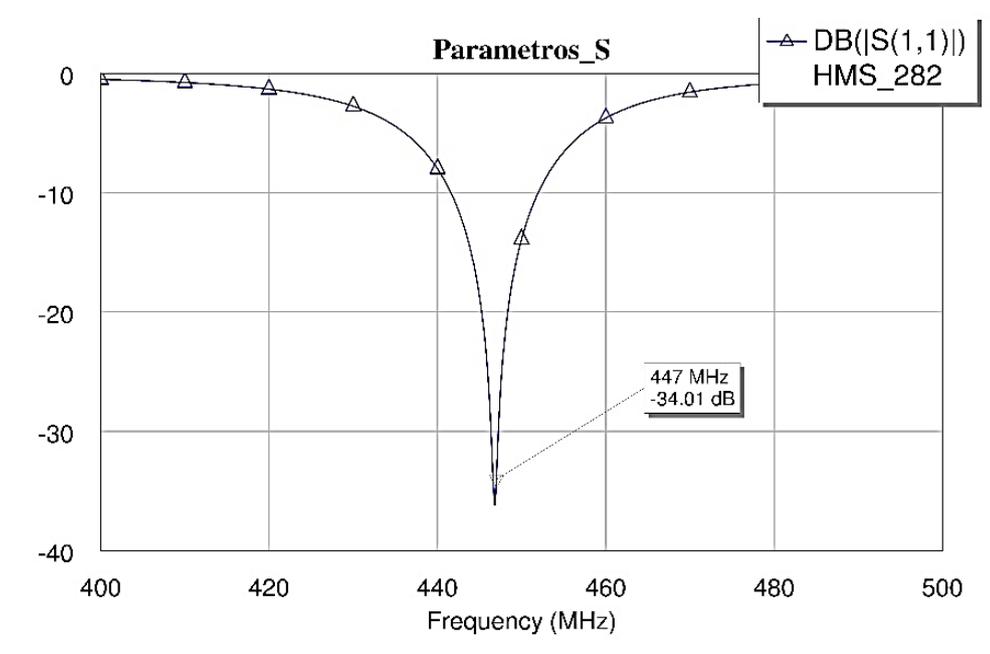


Figura 40. Parámetros S del acople de impedancias

Fuente: Propia

Elaboración: Autores

2.3.6. Módulo conversión RF a CC

El objetivo principal de este módulo es convertir la energía de radiofrecuencia en CC, con la mínima pérdida de energía. El equipo de trabajo propuso valorar el desempeño de un doblador de voltaje de una etapa, que utiliza diodos Schottky HSMS-282. Este doblador de voltaje se puede modelar como una batería de voltaje de entrada V_o y de resistencia interna R_o . La tensión de salida del doblador se calcula con la ayuda de la ecuación (16).

$$V_{out} = \frac{V_o}{R_o + R_L} R_L \quad (19)$$

En dónde,

V_o , es el voltaje incidente, V

R_o , es la resistencia interna, Ω

R_L , es la impedancia de la carga, Ω

Utilizando el aplicativo de software AWR 2009, se modeló y simuló el circuito convertidor obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 41. Los valores de los parámetros del convertidor se detallan en la Tabla 14. La Figura 42 muestra el voltaje de salida en CC del circuito, que alcanza los 0.63 V a través de una resistencia de 1000 Ω , dada una potencia de entrada de 0dBm.

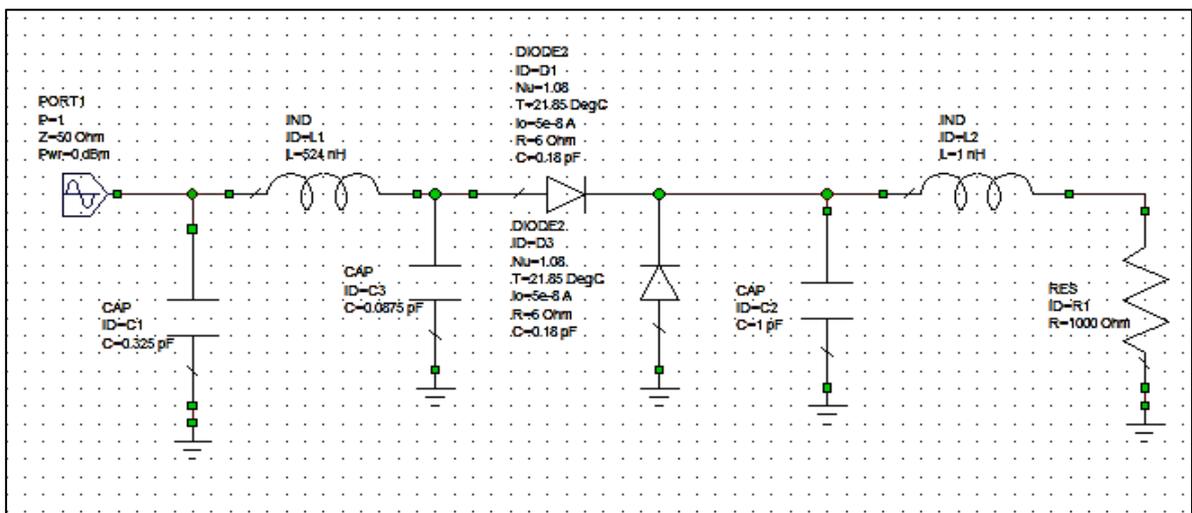


Figura 41. Resultado de la simulación de desempeño del convertidor RF-CC.

Fuente: Propia

Elaboración: AWR 2009

Tabla 14. Parámetros del convertidor RF-CC

L1, nH	524
C1 , pF	0.325
C3, pF	0.087
C2, pF	1
L2, nH	1
Diodo	HMS-282
R1, Ω	1000

Fuente:[8]
Elaboración: Autores

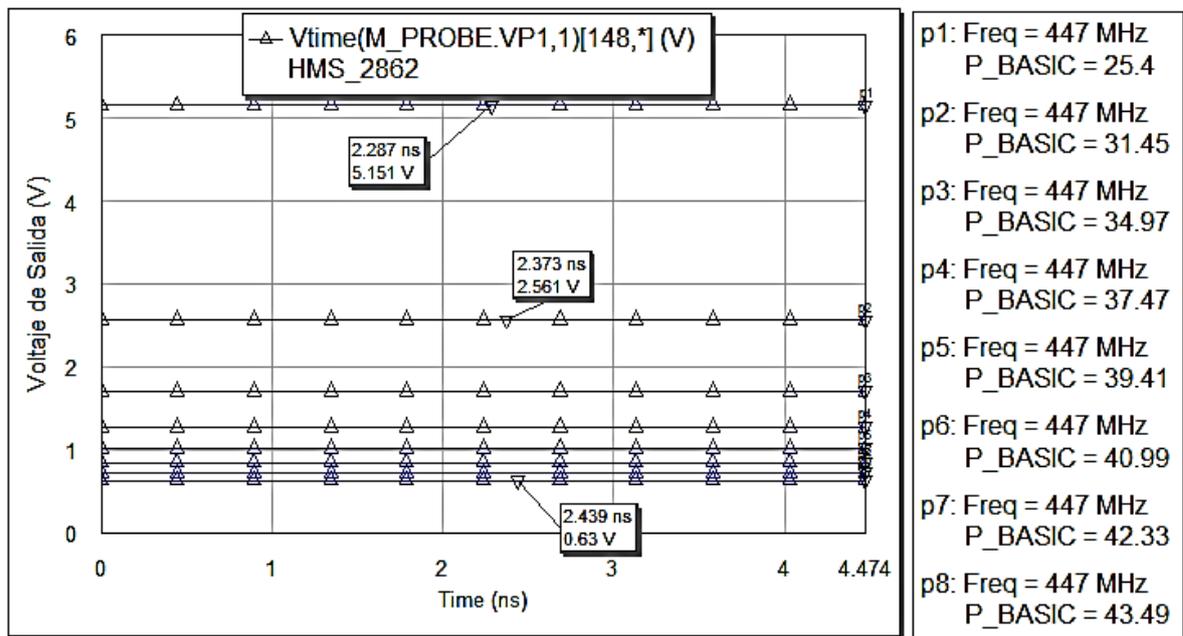


Figura 42. Tensiones de salida del convertidor RF-CC para distancias comprendidas entre 1 – 8 m
Fuente: Autores
Elaboración: AWR2009

2.3.7. Sobre el almacenamiento de energía

La energía en CC, proveniente del circuito RF-CC, carga un súper condensador. Esta opción de carga, permite aumentar la robustez del sistema, garantizando que dispositivos con consumo de potencia menor a 10mW siempre tendrá energía disponible para su funcionamiento.

La Tabla 15 resume los parámetros de diseño básico del prototipo para la provisión inalámbrica de energía para exteriores, desarrollado en esta etapa.

Tabla 15. Parámetros de diseño prototipo para exteriores

Frecuencia de operación, MHz	447
Ancho de banda, KHz	200
Potencia emitida Tx, W	1.5
Distancia, m	8
Potencia recibida Rx, dBm	-3.8
Salida en C, V	0.5
Eficiencia, %	> 8
ANTENAS YAGI	
Ganancia, dBi	7.5
ROE, adimensional	< 1.4

Fuente: Autores
 Elaboración: Propia

CAPÍTULO III
INGENIERÍA DE DETALLE

3.1. Generalidades.

Con el objetivo de optimizar los prototipos tanto de interiores como de exteriores diseñados en la etapa de ingeniería básica, el equipo de trabajo decidió que en la etapa de ingeniería de detalle se construirían los prototipos prestando atención a su performance en cinco parámetros básicos: potencia de onda transmitida, potencia de onda recibida, acoplamiento de puertos (S11), pérdidas por inserción (S12) y voltaje CC de salida.

3.2. Ingeniería de detalle del prototipo para interiores.

3.2.1. Amplificador de RF.

Utilizando el aplicativo de software PCB Ares 8.0, se diseñó el PCB del amplificador de 10W RF (ver Figura 43). La implementación física del PCB se muestra en la Figura 44. Las Figuras 45 y 46 muestra el esquema utilizado para la medición de la potencia entregada y del ROE,. Para este efecto, se utilizó un watímetro marca TEAM, que opera en un ancho de banda entre 1 y 30 MHz. La Figuras 47, 48 y 49 muestran la forma de onda de salida del amplificador, el ROE y la potencia de salida del amplificador.

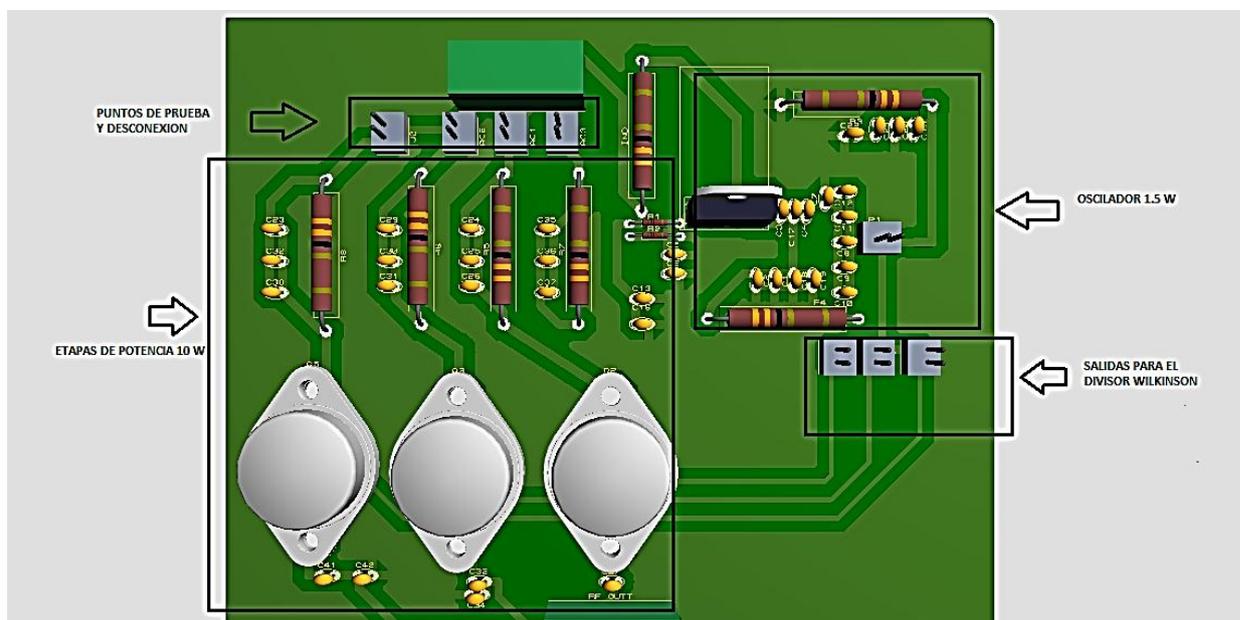


Figura 43. Placa de implementación del amplificador de 10W RF

Fuente: Autores

Elaboración: ARES PCB

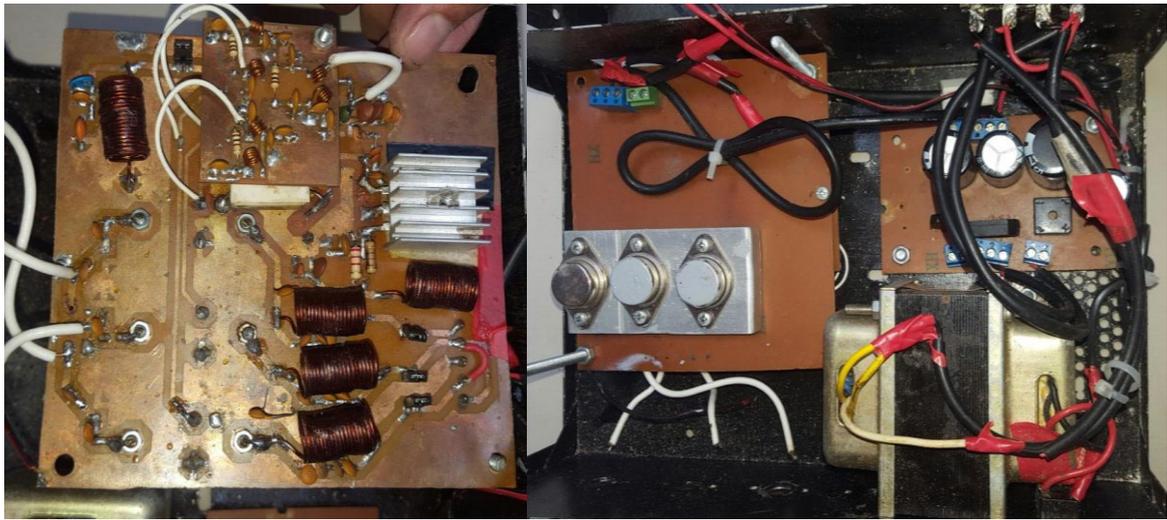


Figura 44. Implementación física del amplificador de 10W RF
 Fuente: Autores
 Elaboración: Autores

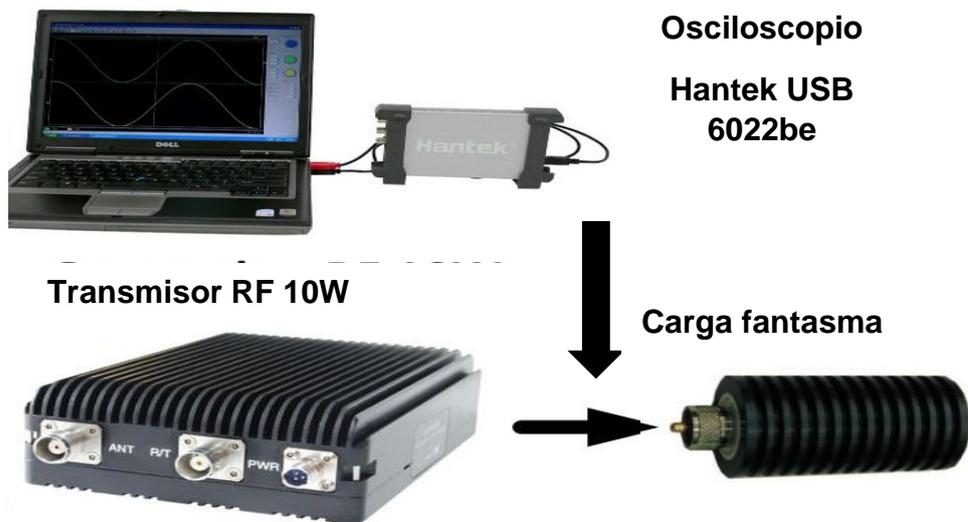


Figura 45. Esquema de medición de la forma de onda de salida del amplificador
 Fuente: Autores
 Elaboración: Autores



Figura 46. Esquema de medición del ROE
 Fuente: Autores
 Elaboración: Autores

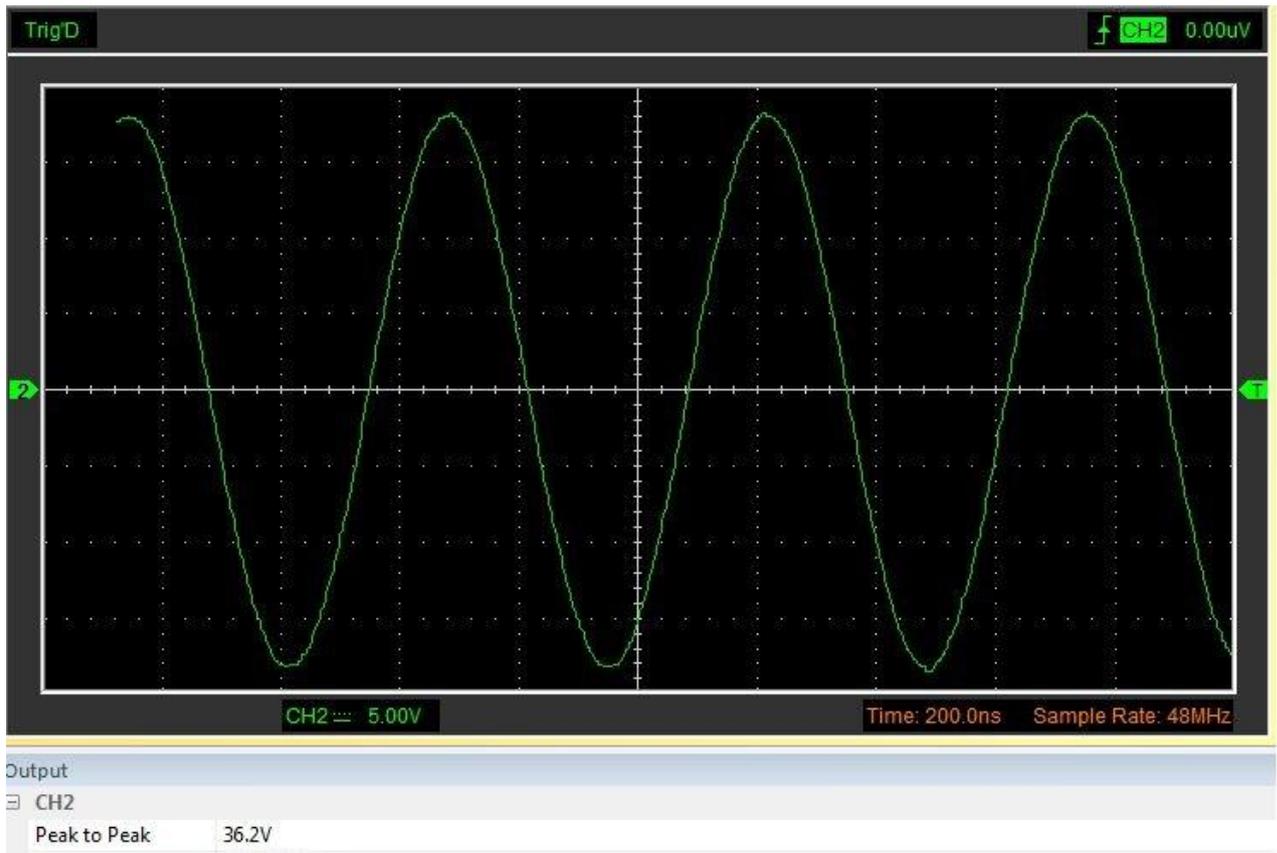


Figura 47. Forma de onda de salida del amplificador medido con un osciloscopio.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores



Figura 48. Medición del ROE a través de una carga de 50Ω

Fuente: Autores

Elaboración: Autores



Figura 49. Medición de la potencia de salida del amplificador.
Fuente: Autores
Elaboración: AWR2009

3.2.2. Antenas para transmisión y recepción.

3.2.2.1. Antenas para transmisión en el prototipo de provisión de energía a sistemas de iluminación.

La implementación física del sistema de antenas se muestra en las Figuras 50 y 51. La Figura 52 muestra el esquema utilizado para la medición de las pérdidas por inserción a través de una carga interna de 50Ω. Para este efecto, se utilizó un equipo MiniVNA Tiny marca Wimo, que opera en un ancho de banda entre 1 y 3000 MHz. Los resultados de las mediciones de ROE y pérdidas por inserción a una frecuencia de resonancia de 1.8MHz para una distancia comprendida entre 1 – 26 cm, se encuentran detallados en el anexo 1. En general los resultados obtenidos muestran que el sistema de antenas con repetidor cumple con los requerimientos de diseño propuestos.

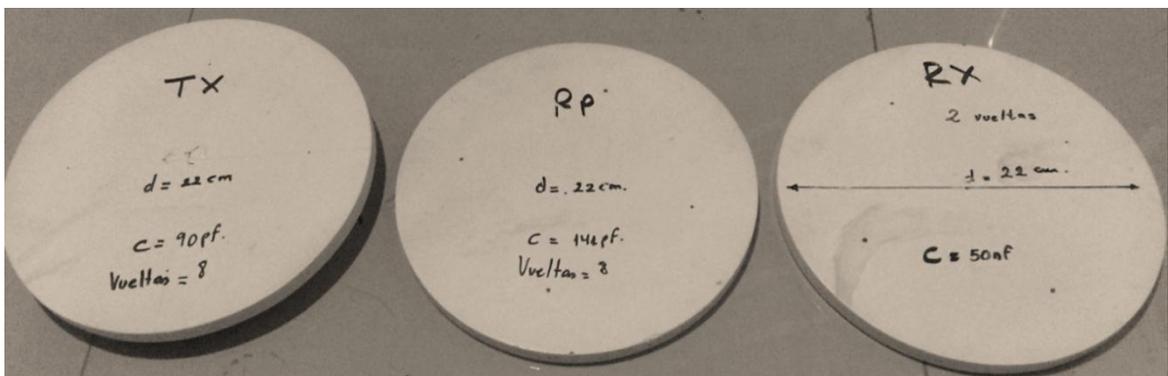


Figura 50. Antenas a utilizar en el sistema
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

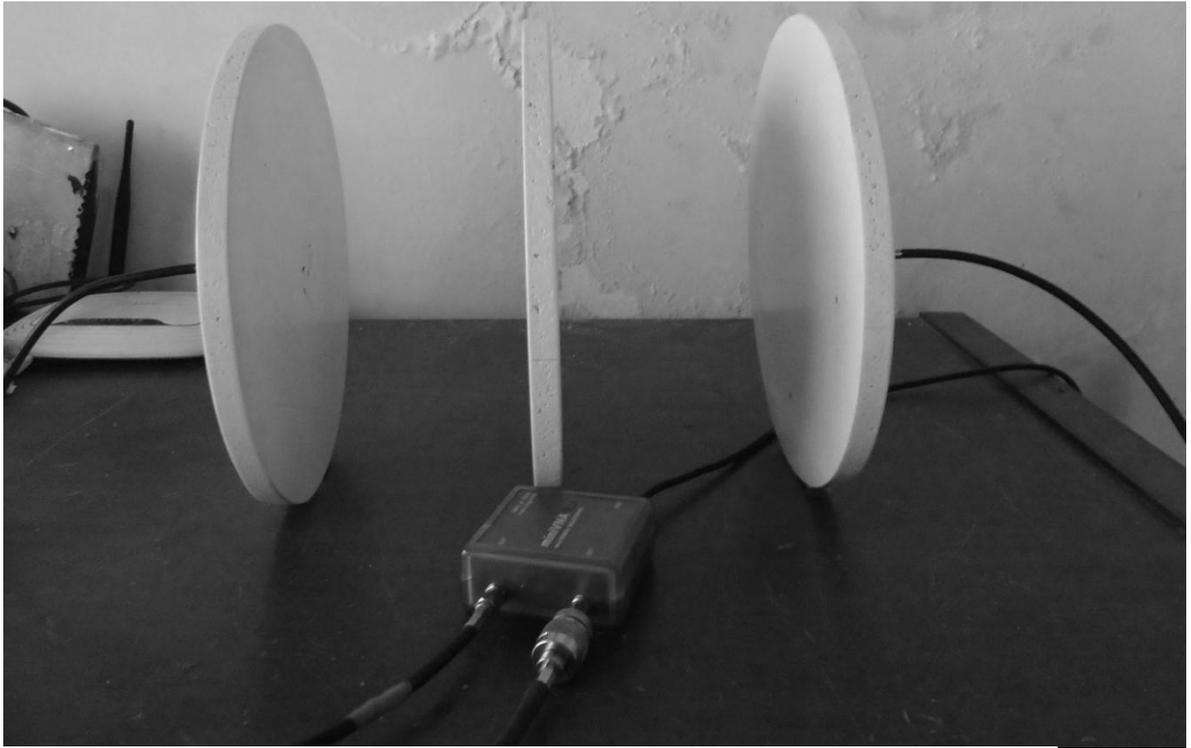


Figura 51. Implementación física del sistema de antenas con repetidor

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

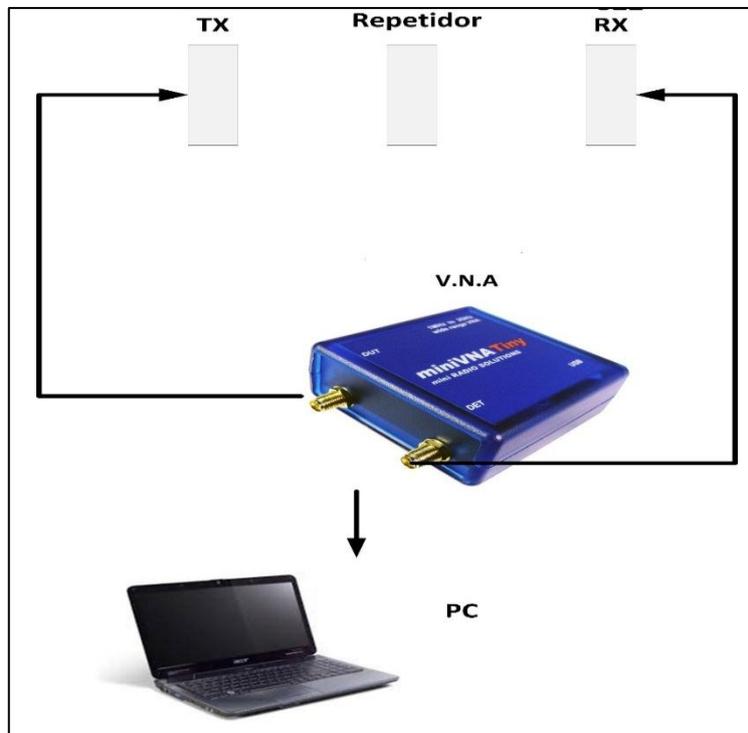


Figura 52. Esquema para la medición de las pérdidas por inserción y ROE

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

3.2.2.2. Antenas para transmisión en el prototipo de provisión de energía a dispositivos móviles sobre mobiliario

La implementación física del sistema de antenas para dispositivos móviles sobre mobiliario se muestra en las Figuras 53 y 54. La Figura 56 muestra el esquema utilizado para la medición de las pérdidas por inserción a través de una carga interna de 50Ω . Para este efecto, se utilizó un equipo MiniVNA Tiny marca Wimo, que opera en un ancho de banda entre 1 y 3000 MHz. Los resultados de las mediciones de ROE y pérdidas por inserción a una frecuencia de resonancia de 1.8MHz para una distancia comprendida entre 1 – 10 cm, se encuentran detallados en el anexo 1. En general los resultados obtenidos muestran que el sistema de antenas con repetidor cumple con los requerimientos de diseño propuestos.

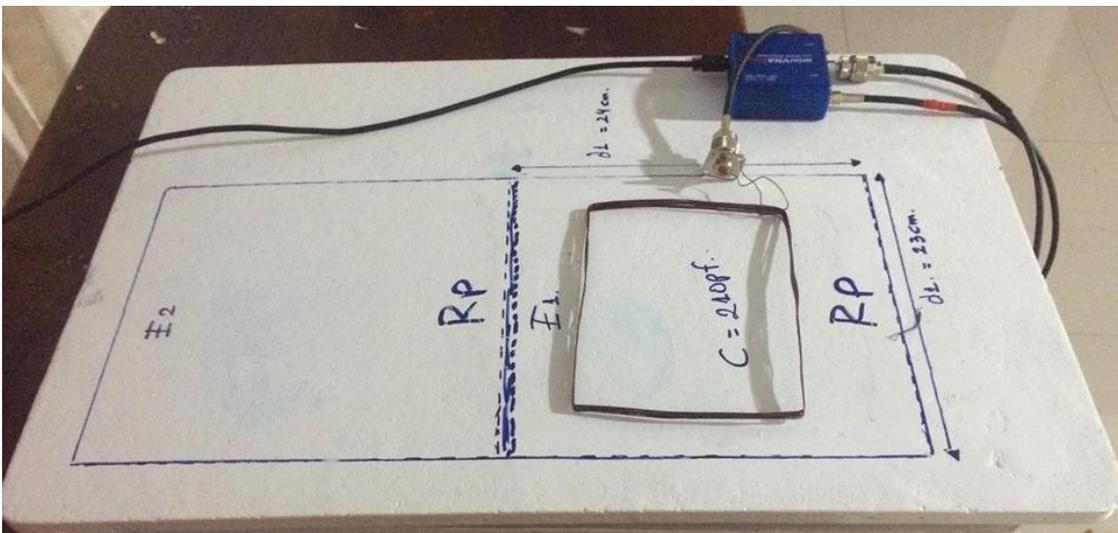


Figura 53. Antenas a utilizar en el sistema

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

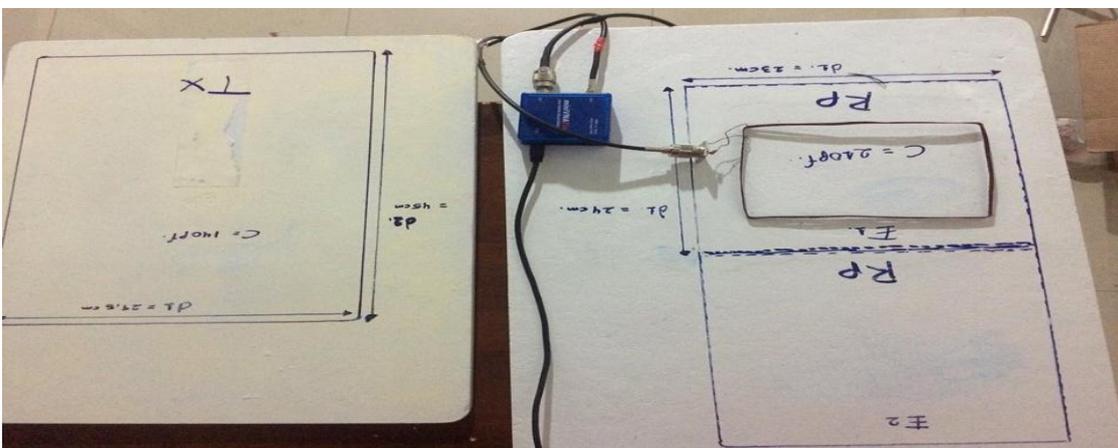


Figura 55. Antenas a utilizar en el sistema

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

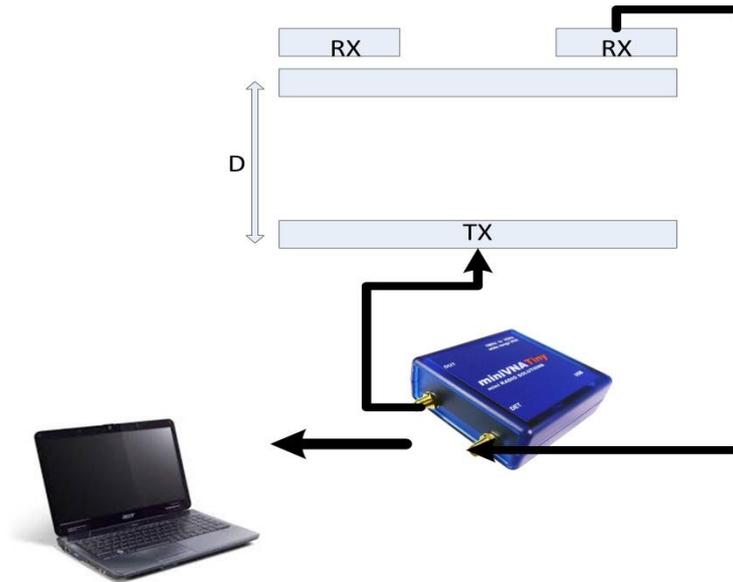


Figura 56. Esquema para la medición de las pérdidas por inserción y ROE
 Fuente: Autores
 Elaboración: Autores

3.3. Análisis de resultados

3.3.1. Análisis de resultados obtenidos en la implementación de la solución para interiores

De acuerdo a lo mostrado en la Tabla 8, el prototipo de interiores se diseñó e implementó para cubrir aplicaciones domésticas, con una potencia de 10 W en 1,8 MHz, a distancias entre 10 y 15 cm, con una eficiencia no menor al 80%.

Para verificar el cumplimiento de estos requerimientos de diseño, se planteó determinar la potencia emitida y la potencia recibida, a 0, 10, 20 y 26 cm de distancia entre emisor y el receptor, utilizando un equipo watímetro marca TEAM (que opera en un ancho de banda entre 1 y 30 MHz), de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 57.

Tal como lo muestra la Figura 58, el ROE entre el transmisor y la antena de transmisión es muy cercano a uno, Por cuanto en las dos aplicaciones desarrolladas (iluminación y mobiliario) se utilizó el mismo sistema de antenas, se decidió realizar mediciones únicas. La Tabla 16 muestra los resultados obtenidos. Las Figuras 59 y 60 muestran la potencia recibida del prototipo de provisión de energía a sistemas de iluminación y mobiliaria para una distancia de 25cm y 15cm para dispositivos móviles sobre mobiliaria.

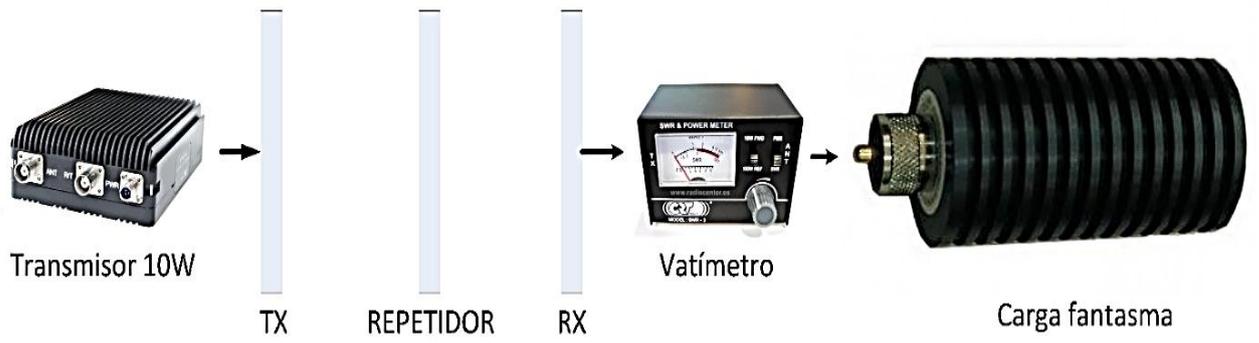


Figura 57. Esquema para la medición de potencia recibida en el prototipo para interiores
 Fuente: Autores
 Elaboración: Autores



Figura 58. Medición del ROE entre el transmisor y la antena transmisora.
 Fuente: Autores
 Elaboración: Autores



Figura 59. Medición de la potencia recibida en el aplicativo de iluminación.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores



Figura 60. Medición de la potencia recibida en el aplicativo de mobiliario.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

Tabla 16. Resultados obtenidos al evaluar el desempeño del prototipo para interiores.

Frecuencia, MHZ	Distancia, cm	Potencia emitida, dBm	Potencia emitida, W	Perdida, dB	Potencia recibida, dBm	Potencia recibida, W	Rendimiento, %	VPP, V	Vrms, V	Carga, Ω	Irms, A
1.8	0	40	10	2,54	37,46	7,959	79.59%	33,382 2	23,3675 4	50	0,46735 1
1.8	1	40	10	2,64	37,36	7,778	77.78 %	33,000 08	23,1000 6	50	0,46200 1
1.8	2	40	10	3,8	36,2	5,955	59.55%	28,874 53	20,2121 7	50	0,40424 3
1.8	3	40	10	4,76	35,24	4,774	47.74%	25,853 24	18,0972 7	50	0,36194 5
1.8	20	40	10	13,91	26,09	0.580	5.80%	9,0160 23	6,31121 6	50	0,12622 4
1.8	26	40	10	2,5	37,5	8,0328	80.03%	28,907 8	20,2354 6	50	0,40470 9

Fuente: Autores
Elaboración: Propia

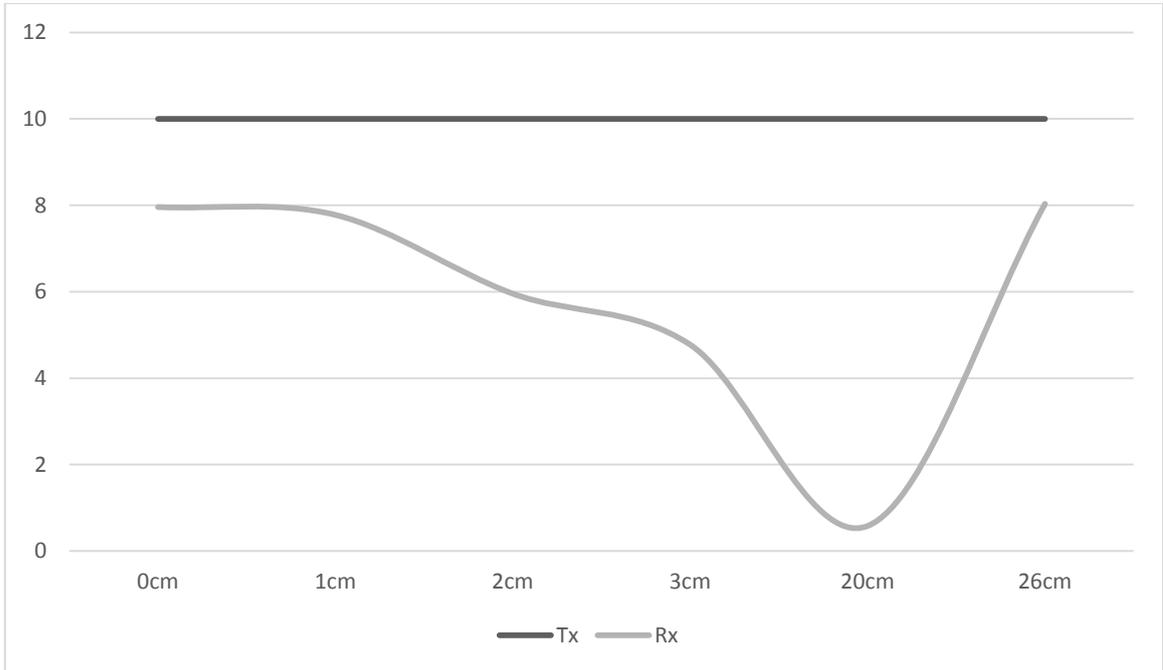


Figura 61. Potencia emitida, recibida en el prototipo para interiores.
 Fuente: Autores
 Elaboración: Autores

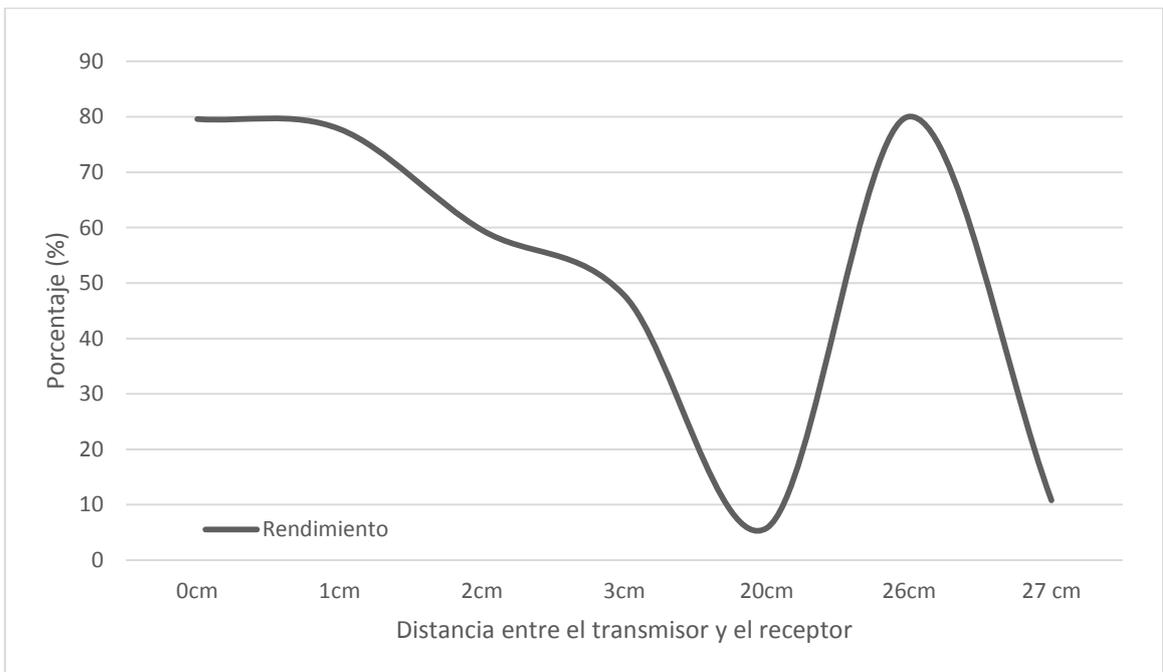


Figura 62. Curva de rendimiento en el prototipo para interiores.
 Fuente: Autores
 Elaboración: Autores

La figura 62 muestra la curva de rendimiento en las cuales se aprecia tres zonas de trabajo. En la primera (entre 0 y 3 cm), el rendimiento varía entre 70 y 50%. Estos valores son compatibles con la eficiencia de la mayor parte de tecnología disponible en el mercado, que opera en ese rango de distancia. En la segunda zona (entre 3 y 25 cm), el rendimiento desciende hasta un 20% debido al desacoplamiento inductivo entre las antenas. En la tercera zona (entre 25 y 26.5 cm) el rendimiento se recupera y sobrepasa el 70% por cuanto se establece la distancia óptima para un buen acoplamiento inductivo entre las antenas.

3.3.2. Solución para exteriores.

De acuerdo a lo mostrado en la Tabla 15, el prototipo para exteriores se diseñó e implementó para alimentar una red de sensores, con transmisión de energía en potencias de 1.5 W en 447 MHz, a distancias entre 7 y 8 m, con una eficiencia no menor al 5%.

Para verificar el cumplimiento de estos requerimientos de diseño, se planteó determinar la potencia recibida a la salida del convertidor RF-CC para una carga de 1000 Ω , a 0.5, 1, 4, 5, 7 y 8 m de distancia entre el emisor y el receptor. La medición de la potencia se realizó a través del registro del voltaje y de la intensidad de corriente, utilizando un voltímetro digital marca DT 6808, de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 63. La Tabla 17 muestra los resultados obtenidos.

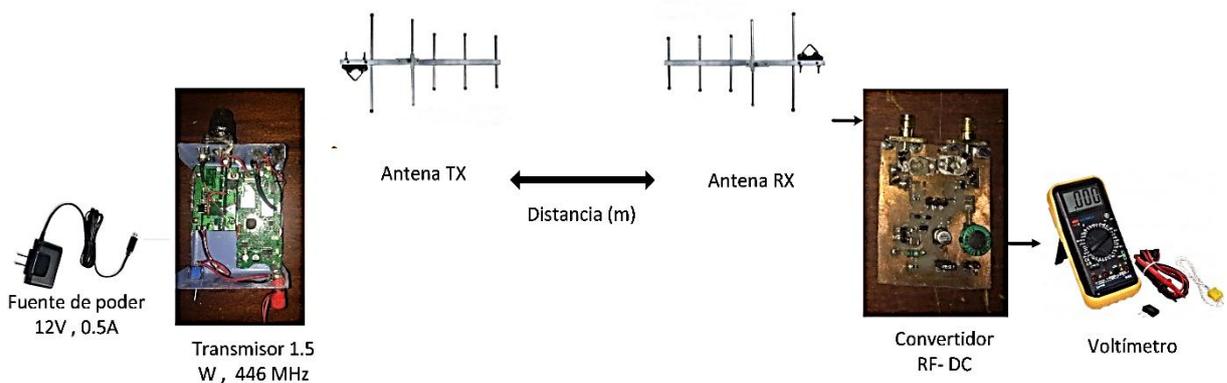


Figura 63. Esquema para la medición de potencia emitida y recibida en el prototipo para exteriores.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

Tabla 17. Resultados obtenidos al evaluar el desempeño del prototipo para exteriores.

Distancia, m	Potencia transmitida, dBm	Potencia transmitida, W	Perdida básica, dB	Potencia recibida, dBm	Potencia recibida, W	Voltaje, V	Corriente, mA	Potencia recibida, mW	Rendimiento, %
0,5	31,8	1,51	19,4	26,4	0,43	7,5	7,2	54	28,84
1	31,8	1,5	25,4	20,3	0,11	5,35	5,243	28,1	7,2
2	31,8	1,5	31,5	14,3	0,03	3,77	3,6946	13,9	1,8
3	31,8	1,5	34,9	10,9	0,01	2,15	2,107	4,5	0,8
4	31,8	1,5	37,5	8,3	0,01	1,7	1,666	2,8	0,4
5	31,8	1,5	39,4	6,4	0,00	0,95	0,931	0,9	0,3
6	31,8	1,5	41,0	4,8	0,00	0,8	0,784	0,6	0,2
7	31,8	1,5	42,3	3,4	0,00	0,71	0,6958	0,5	0,1
8	31,8	1,5	43,4	2,4	0,00	0,5	0,49	0,2	0,1

Fuente: Autores
 Elaboración: Propia

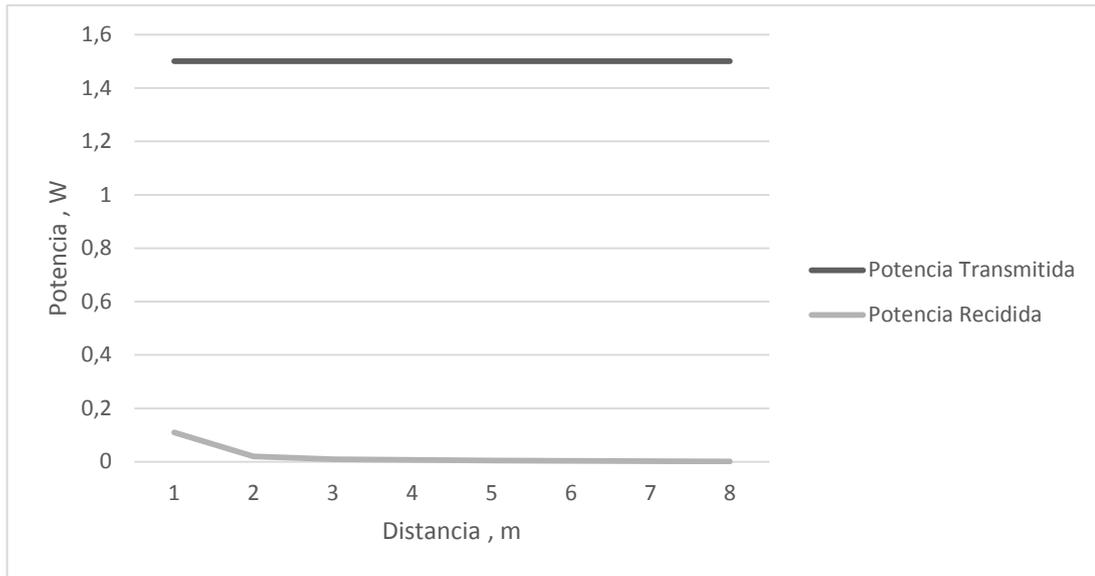


Figura 64. Potencia de entrada, potencia de salida del prototipo para exteriores.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

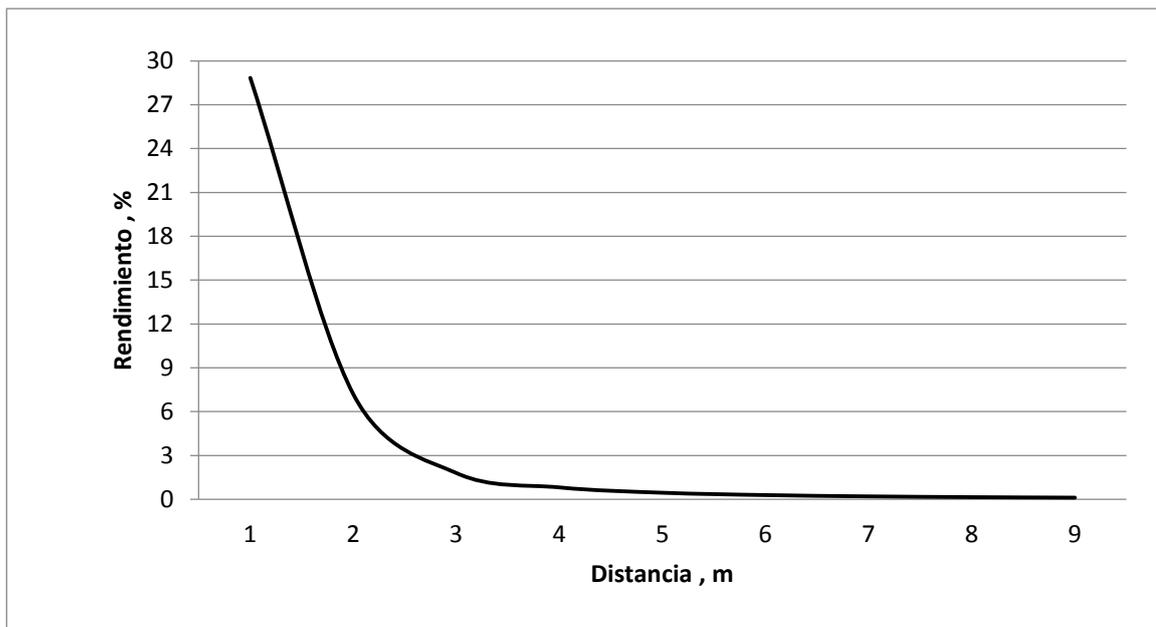


Figura 65. Rendimiento del prototipo para exteriores.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

La curva de rendimiento muestra dos zonas de trabajo (véase figura 65). En la primera (entre 0 y 3 m), el rendimiento varía entre 28 y 2%. En la segunda zona (entre 3 y 9 m), el rendimiento decrece a un valor cercano a 0%, esto implica que el requerimiento de diseño en cuanto a eficiencia no se cumple con el diseño implementado en ingeniería básica.

CONCLUSIONES

Los resultados experimentales obtenidos en este proyecto, demuestran que es posible la transmisión inalámbrica de energía en aplicaciones tanto para interiores y exteriores. Logrando eficiencias muy elevadas mayores al 80%.

Los resultados también muestran que los mejores indicadores de eficiencia, se obtienen al mejorar el acoplamiento desde el transmisor hacia la antena, disminuyendo mucho las pérdidas por reflexión.

La eficiencia en general de los aplicativos diseñados e implementados radica en el desempeño del sistema de antenas. Este desempeño a su vez depende de la distancia entre el transmisor, el repetidor pasivo y la bobina receptora.

El aplicativo diseñado e implementado para exteriores, presenta una eficiencia cercana al 0.08% para una distancia de 8m, mostrando no cumplir con los requerimientos esperados, por otro lado el prototipo implementado tiene la capacidad de alimentar dispositivos electrónicos cuyo consumo no superen los 0.5mW, por ejemplo relojes de mano, mini estaciones meteorológicas, entre otros.

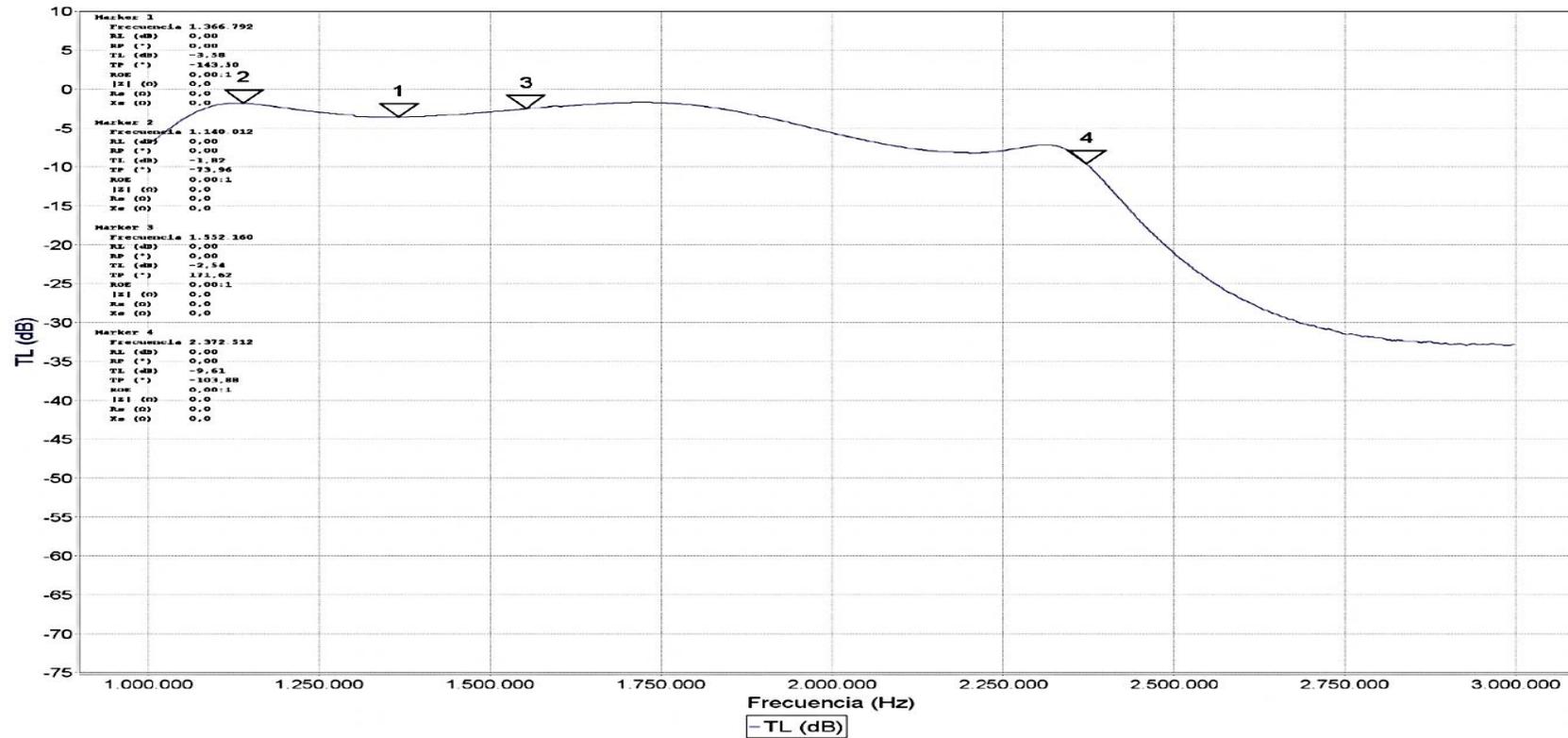
Se recomienda para trabajos futuros centrarse en el diseño e implementación del sistema de antenas para lograr mejorar la eficiencia en la transmisión inalámbrica de energía, y en el diseño de Transmisores más eficientes.

El indicador de eficiencia más relevante en el desarrollo del trabajo, fue la elección de la frecuencia. En el caso del prototipo para interiores es recomendable experimentar en frecuencias mas elevadas con la finalidad llegar a una frecuencia más óptima para la transmisión de energía inalámbrica.

ANEXOS

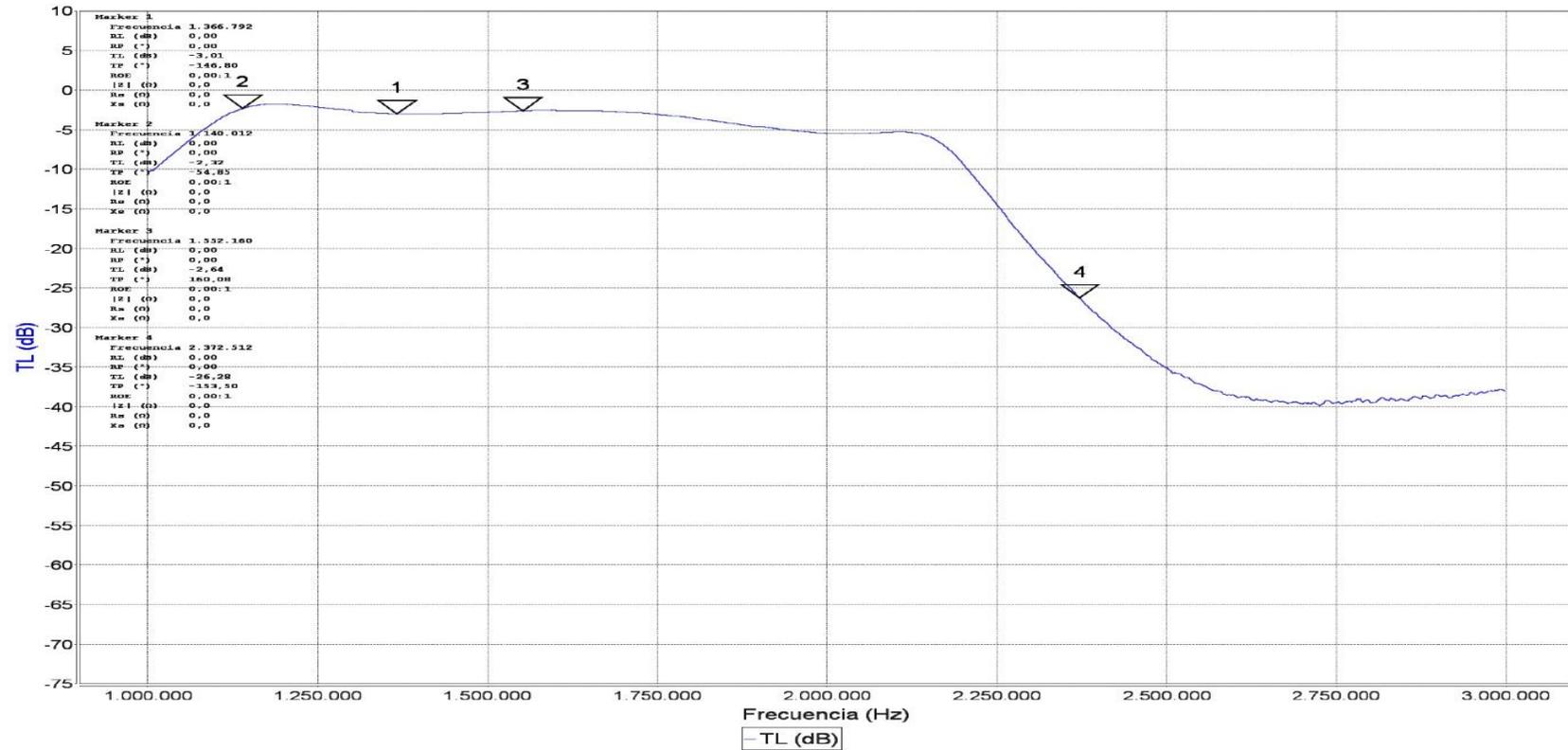
ANEXO I.

S12- "LAMPARA 0cm con repetidor"



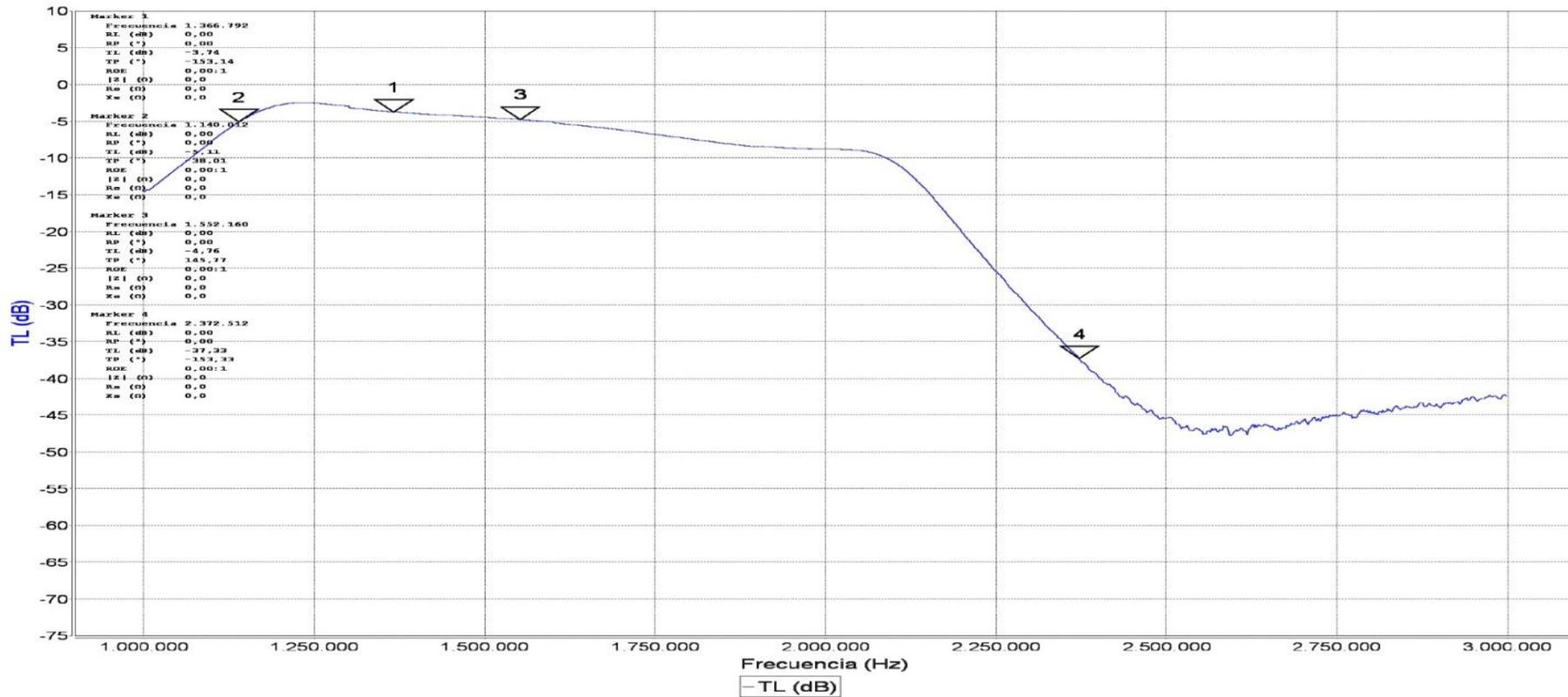
Marcador	Frecuencia	RL (dB)	RP (°)	TL (dB)	TP (°)	ROE	Z ()	Rs ()	Xs ()
1	1.366.792	0,00	0,00	-3,58	-143,50	0,00:1	0,0	0,0	0,0
2	1.140.012	0,00	0,00	-1,82	-73,96	0,00:1	0,0	0,0	0,0
1-2	226.780	0,00	0,00	1,76	69,54	---	0,0	0,0	0,0
3	1.552.160	0,00	0,00	-2,54	171,62	0,00:1	0,0	0,0	0,0
4	2.372.512	0,00	0,00	-9,61	-103,88	0,00:1	0,0	0,0	0,0

S12- "LAMPARA 1cm con repetidor"



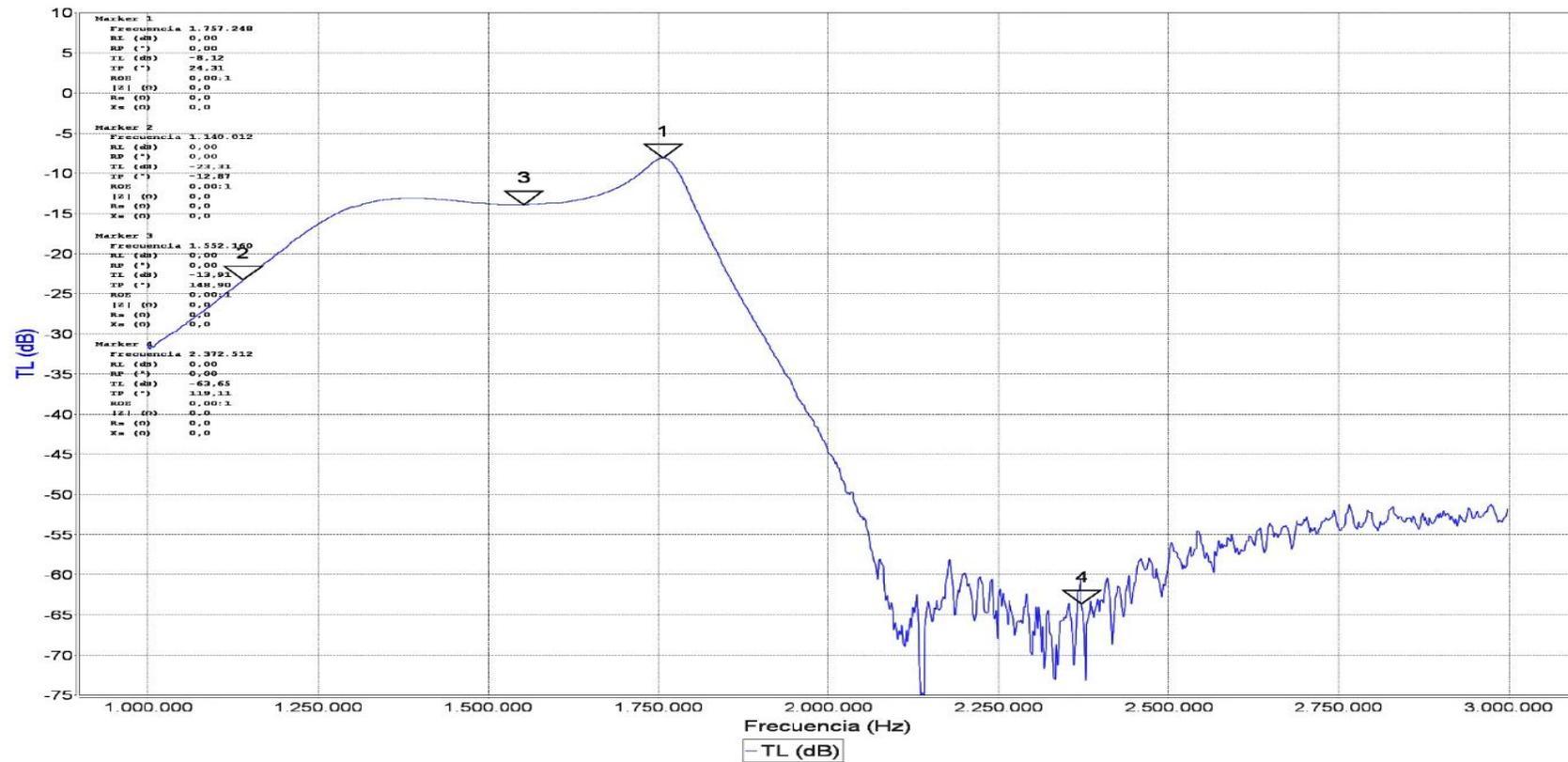
Marcad or	Frecuencia	RL (dB)	RP (°)	TL (dB)	TP (°)	ROE	Z (Ω)	Rs (Ω)	Xs (Ω)
1	1.366.792	0,00	0,00	-3,01	-146,80	0,00:1	0,0	0,0	0,0
2	1.140.012	0,00	0,00	-2,32	-54,85	0,00:1	0,0	0,0	0,0
1-2	226.780	0,00	0,00	0,69	91,94	---	0,0	0,0	0,0
3	1.552.160	0,00	0,00	-2,64	160,08	0,00:1	0,0	0,0	0,0
4	2.372.512	0,00	0,00	-26,28	-153,50	0,00:1	0,0	0,0	0,0

S12- "LAMPARA 3cm con repetidor"



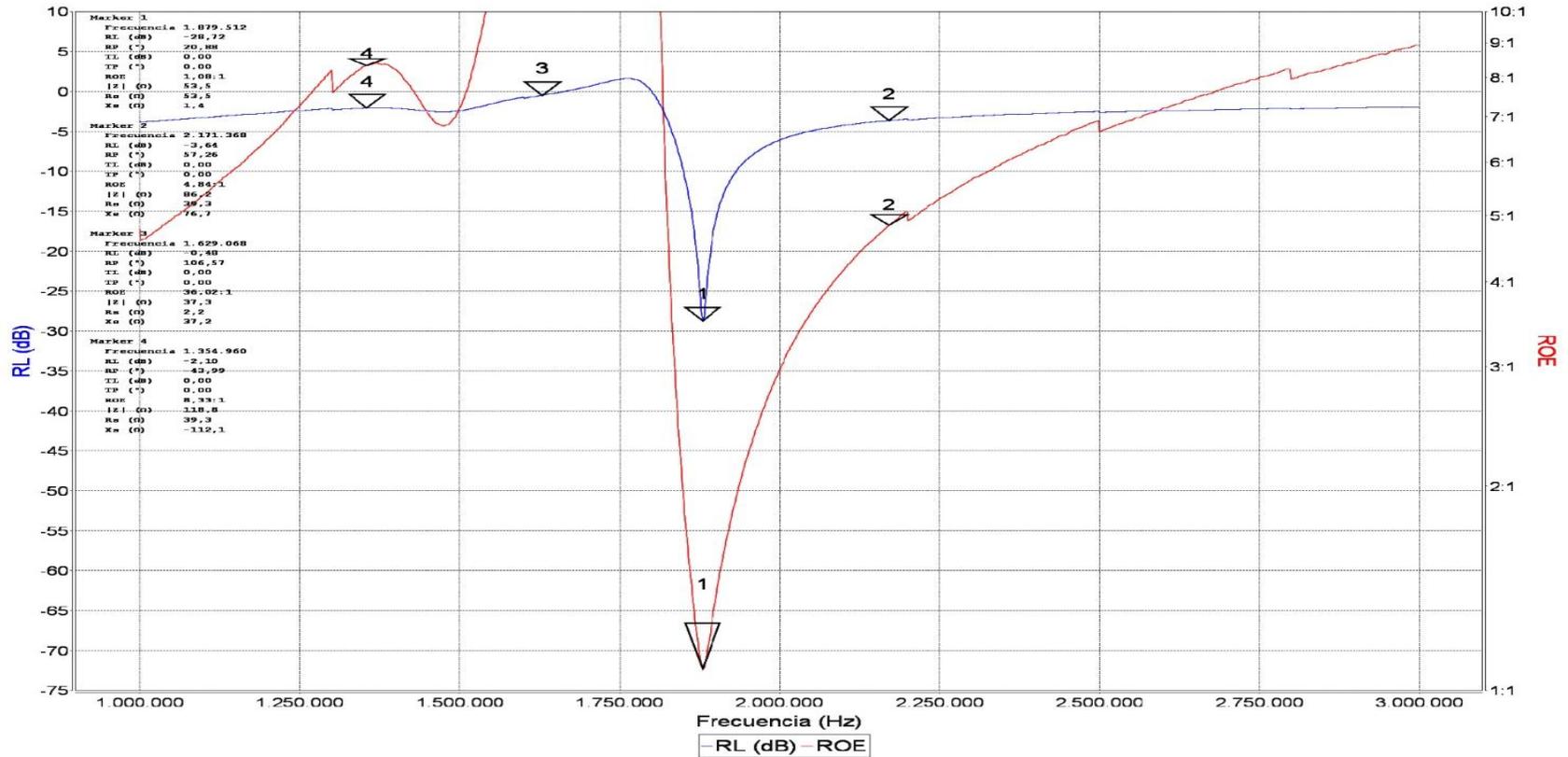
Marcador	Frecuencia	RL (dB)	RP (°)	TL (dB)	TP (°)	ROE	Z ()	Rs ()	Xs ()
1	1.366.792	0,00	0,00	-3,74	-153,14	0,00:1	0,0	0,0	0,0
2	1.140.012	0,00	0,00	-5,11	-38,01	0,00:1	0,0	0,0	0,0
1-2	226.780	0,00	0,00	1,37	115,14	---	0,0	0,0	0,0
3	1.552.160	0,00	0,00	-4,76	145,77	0,00:1	0,0	0,0	0,0
4	2.372.512	0,00	0,00	-37,33	-153,33	0,00:1	0,0	0,0	0,0

S12- "LAMPARA 20cm con repetidor"



Marcad or	Frecuencia	RL (dB)	RP (°)	TL (dB)	TP (°)	ROE	Z ()	Rs ()	Xs ()
1	1.757.248	0,00	0,00	-8,12	24,31	0,00:1	0,0	0,0	0,0
2	1.140.012	0,00	0,00	-23,31	-12,87	0,00:1	0,0	0,0	0,0
1-2	617.236	0,00	0,00	15,19	37,18	---	0,0	0,0	0,0
3	1.552.160	0,00	0,00	-13,91	148,90	0,00:1	0,0	0,0	0,0
4	2.372.512	0,00	0,00	-63,65	119,11	0,00:1	0,0	0,0	0,0

S11- "LAMPARA"



Marca or	Frecuencia	RL (dB)	RP (°)	TL (dB)	TP (°)	ROE	Z (Ω)	Rs (Ω)	Xs (Ω)
1	1.879.512	-28,72	20,88	0,00	0,00	1,08:1	53,5	53,5	1,4
2	2.171.368	-3,64	57,26	0,00	0,00	4,84:1	86,2	39,3	76,7
1-2	291.856	25,08	36,38	0,00	0,00	---	32,7	14,2	75,3
3	1.629.068	-0,48	106,57	0,00	0,00	36,02:1	37,3	2,2	37,2
4	1.354.960	-2,10	-43,99	0,00	0,00	8,33:1	118,8	39,3	-112,1

ANEXO II.

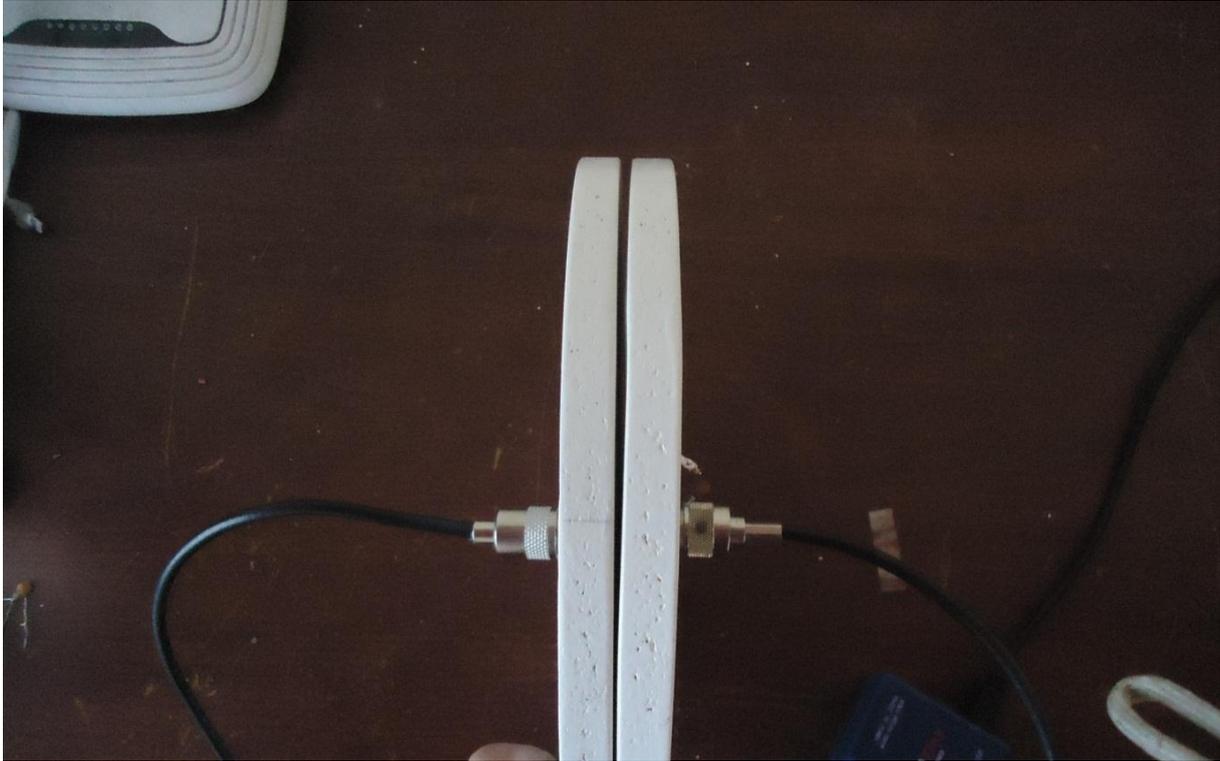


Figura 66. Medición de antenas para interiores a una distancia de 0cm

Fuente: Autores

Elaboración: Autores



Figura 67. Medición de antenas para interiores con repetidor pasivo a una distancia de 26cm

Fuente: Autores

Elaboración: Autores



Figura 68. Medición de la transmisión de energía a 26 cm utilizando repetido pasivo.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

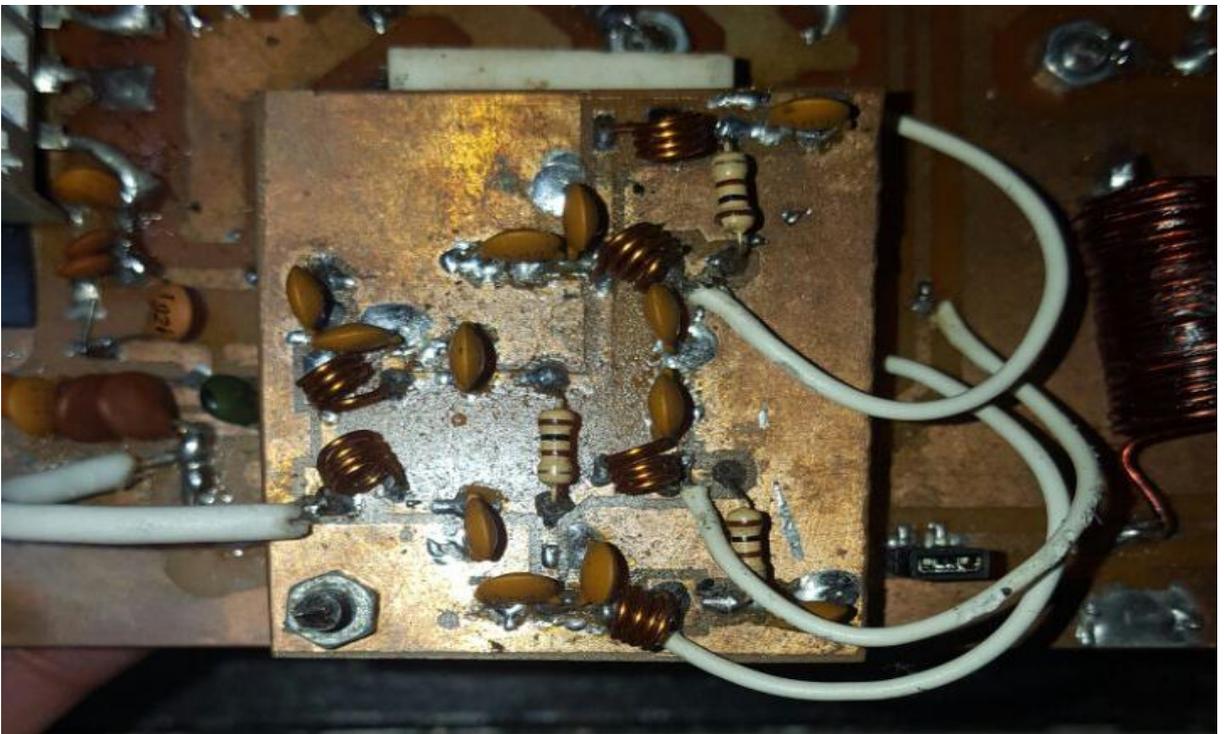


Figura 69. Divisor de wilkinson implementado y montado en el transmisor para interiores.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores



Figura 70. Medición de antenas para interiores enfocado a mobiliario.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores

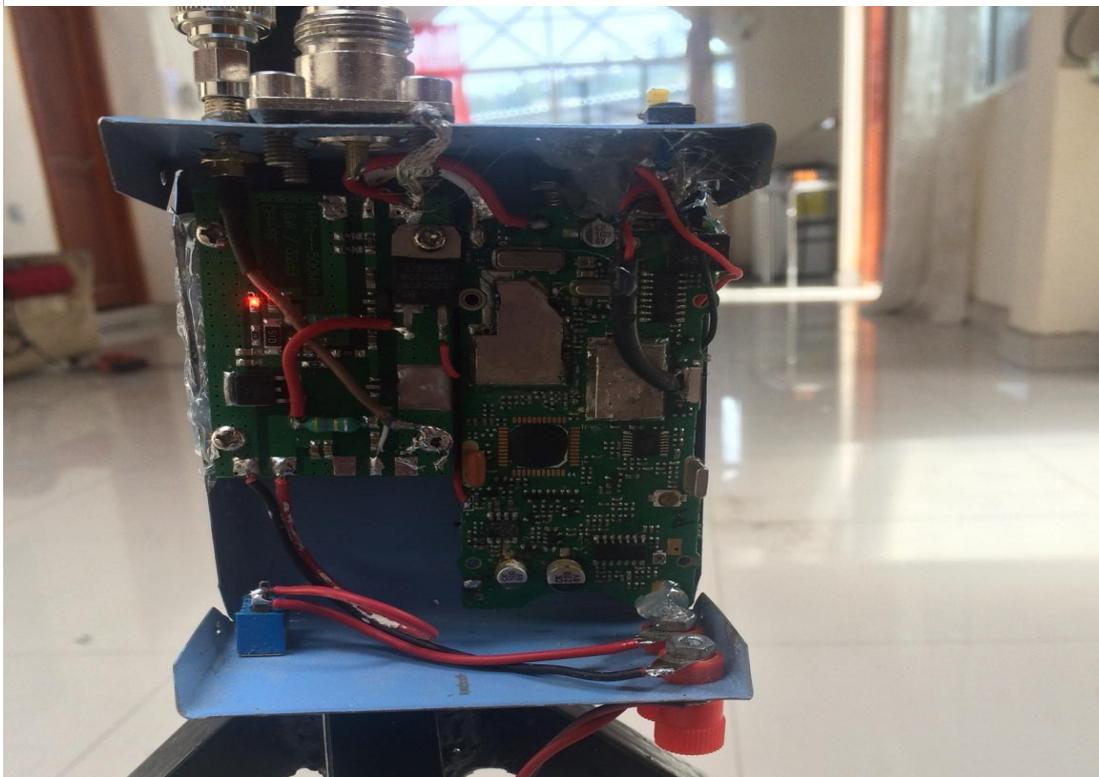


Figura 71. Transmisor para exteriores 1.5W – 447 MHz.

Fuente: Autores

Elaboración: Autores



Figura 72. Trasmisor y convertidor RF-CC para exteriores.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

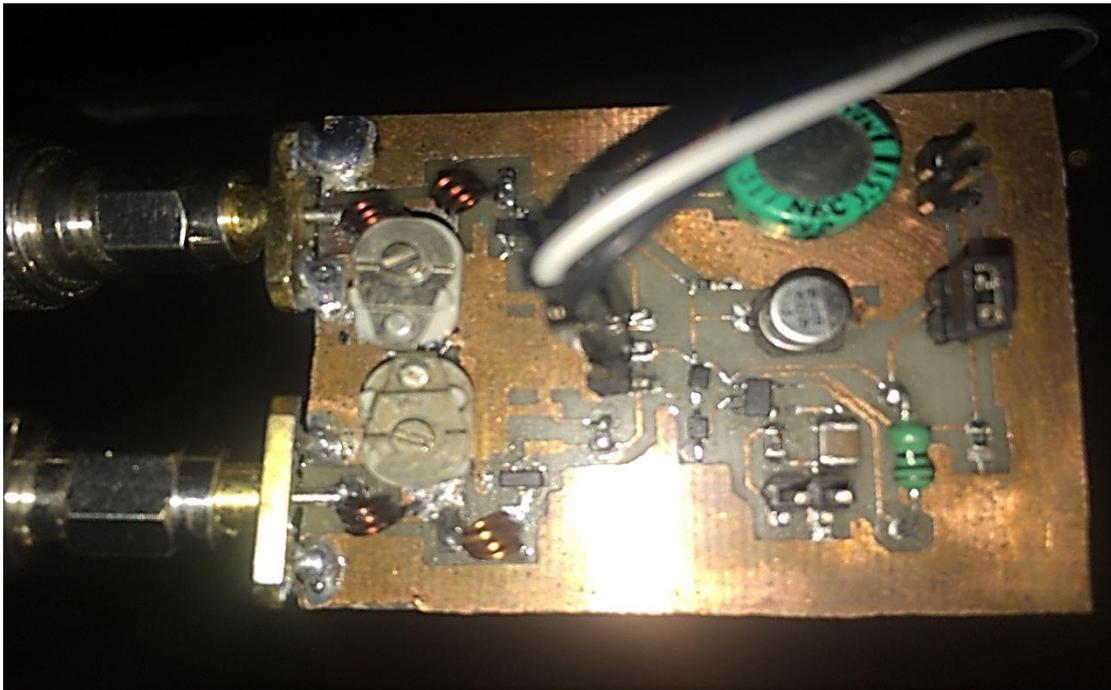
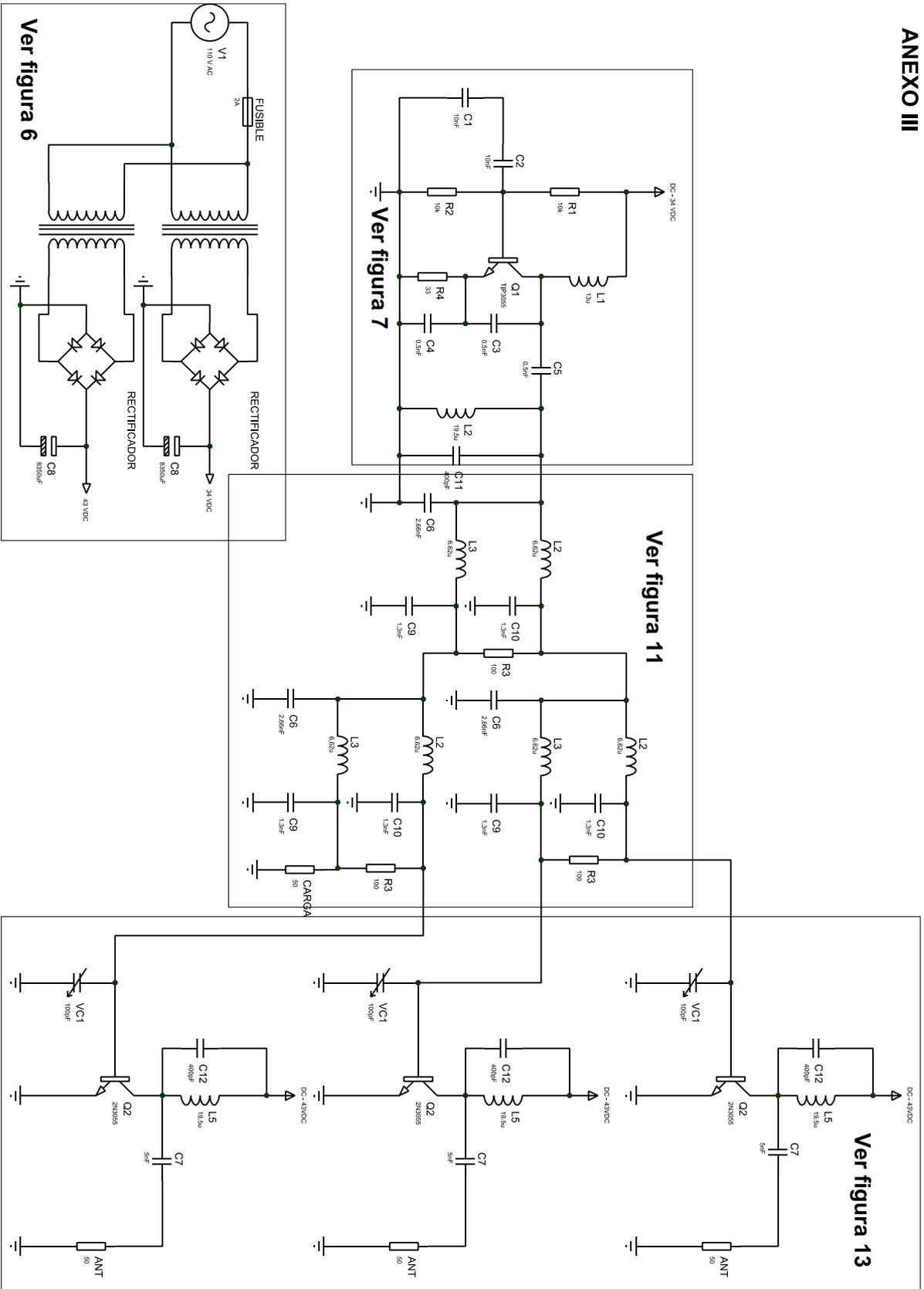


Figura 73. Convertidor RF-CC para exteriores.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores



Figura 74. Conjunto de antenas Yagi utilizadas para el experimento en exteriores.
Fuente: Autores
Elaboración: Autores

ANEXO III



BIBLIOGRAFÍA

- [1] ebay. *Genuine Power Supply Li Shin 0451B1270 Adapter 12V 5.83A AC/DC*. Available: <http://picclick.fr/Genuine-Power-Supply-Li-Shin-0451B1270-Adapter-12V-381266738906.html>
- [2] L. L. R. Abaúnza. El diodo schottky o diodo de barrera. *Revista ES*. Available: <http://www.electrosector.com/wp-content/ftp/descargas/diodo.pdf>
- [3] O. M. S. Cruz. Adaptación de Impedancias [Online]. Available: <http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/Aplicada/Cap11Adaptaciondeimpedancias2008.pdf>
- [4] U. d. I. I. Balears. Osciladores [Online]. Available: http://www.uib.cat/depart/dfs/GTE/education/telematica/sis_ele_comunicacio/Apuntes/Capitulo%206.pdf
- [5] E. E. M. Store. (2016). *New Electric Unit High quality 1MHz - 500MHZ 1.5W New HF FM VHF UHF RF Power Amplifier For Ham Radio + Heatsink 5.5x4x1.6cm*. Available: <https://es.aliexpress.com/item/New-Electric-Unit-High-quality-1MHz-500MHZ-1-5W-New-HF-FM-VHF-UHF-RF-Power/32631508369.html?spm=2114.43010308.4.2.9o5MxY>
- [6] UTN, "Amplificadores clase C," in *Amplificadores de Potencia de RF* vol. Unidad 6, F. R. M. Universidad Tecnológica Nacional, Ed., Electrónica Aplicada III ed, p. 26.
- [7] F. R. M. Universidad Tecnológica Nacional. (2016, Transmisión Inalámbrica de Energía *Máquinas e instalaciones Eléctricas.*, 71. Available: http://www1.frm.utn.edu.ar/mielectricas/docs2/Inal%C3%A1mbrica/Transmisi%C3%B3n%20de%20energ%C3%ADa_1.0.pdf
- [8] O. F. P. Osorio, "Diseño de antena de Lazos para medición de campo magnético producido por descargas atmosféricas," Trabajo dirigido de grado para optar el título de Ingeniero Electricista Facultad de Minas, Ingeniería Eléctrica y Mecánica, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2009.
- [9] N. Tesla, "THE TRANSMISSION OF ELECTRICAL ENERGY WITHOUT WIRES," in *Twenty First Century Books*, Breckenridge, Ed., ed: Electrical World and Engineer, 1904.
- [10] A. Garcia, "Ley de Ampere, ley de Faraday, ley de Gauss y ley de Lenz.," ed: <http://conocedores4.blogspot.com>, 2015.
- [11] E. P. S. d. e. d. Barcelona, "PRINCIPIOS BASICOS DE LA TRANSMISIÓN INALAMBRICA DE ENERGÍA Y FORMULAS DE DESARROLLO," in *Anexos*, EPSEP, Ed., Anexos ed, p. 11.
- [12] I. P. Cmaps. Factor Q [Online]. Available: https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi7krDa4urSAhUBVSYKHx2C94QFggeMAE&url=http%3A%2F%2Fcurso.ihmc.us%2Frid%3D1148409012888_1641521913_7025%2FFactor%2BQ.doc&usq=AFQjCNH3o2wgwkc6S2bOZfIFRnaiZE_TbQ&sig2=CKsZN1efL1WFTEa-o-8ufdw&bvm=bv.150475504,d.eWE
- [13] A. J. S. A. Miguel Ángel Pitol Reyes, "EXPERIMENTO DE TRANSFERENCIA INALÁMBRICA DE ENERGÍA CON RECEPTOR PORTABLE," Tesis, FACULTAD DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA Y CIENCIAS ATMOSFÉRICAS, UNIVERSIDAD VERACRUZANA, 2013.
- [14] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *science*, vol. 317, pp. 83-86, 2007.
- [15] L. M. V. Arroyo, "Electricidad Inalámbrica," Trabajo de Fin de Tiulación, Mecánica y Eléctrica, 2015.

- [16] P. D. M. Manuel Piñuela, Stepan Lucyszyn, "Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments," *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, vol. 61, p. 2726, Julio 2013.
- [17] A. C. N. Juan Malataxi Amagua, "Construcción de un circuito de luces de seis canales accionadas por sonido " Proyecto previo a la obtención de tecnólogo en electrónica y telecomunicaciones, Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2007.