



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE ACOPLAMIENTO RESONANTE MAGNÉTICO DE CAMPO CERCANO PARA DISPOSITIVOS DE BAJO CONSUMO DE POTENCIA EN EL HOGAR

JAIME RODRIGO VINUEZA COBA

**Trabajo de Titulación modalidad: Proyectos de Investigación y Desarrollo,
presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH,
como requisito parcial para la obtención del grado de:**

MAGÍSTER EN SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES

Riobamba – Ecuador

junio, 2018

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, denominado: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE ACOPLAMIENTO RESONANTE MAGNÉTICO DE CAMPO CERCANO PARA DISPOSITIVOS DE BAJO CONSUMO DE POTENCIA EN EL HOGAR”**, de responsabilidad del Ing. Jaime Rodrigo Vinuesa Coba ha sido minuciosamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal de Tesis:

Dr. Juan Vargas Guambo

PRESIDENTE

Ing. Fabricio Santacruz; M.Sc.

TUTOR

Ing. Mónica Zabala; M.Sc.

MIEMBRO

Ing. Jefferson Ribadeneira; Ph.D.

MIEMBRO

Riobamba, junio 2018.

©2018, Jaime Rodrigo Vinueza Coba

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Jaime Rodrigo Vinueza Coba, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de Titulación y el patrimonio intelectual del mismo pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

JAIME RODRIGO VINUEZA COBA

No. Cédula: 060360362-2

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación al Ser Supremo que me ha protegido durante el transcurso de mi vida y ha permitido que disfrute del deleite de la felicidad

Rodrigo Vinueza

AGRADECIMIENTO

A mi madre y mis hermanas, quienes son el sustento de mi existir.

A Mónica y Anahí, dos estrellas que iluminan mi camino.

Rodrigo Vinuesa

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

PWT	Transferencia Inalámbrica de Energía
Witricity	Electricidad Inalámbrica
Tx	Transmisor
Rx	Receptor
SAR	Radio de Absorción Especifico
FR4	Flame Retardant 4

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1	Parámetros de diseño de las antenas Tx y Rx	28
Tabla 4-1	Valores de eficiencia de sistema de acuerdo a la distancia de separación	45
Tabla 4-2	Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 10 mm	49
Tabla 4-3	Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 20 mm	50
Tabla 4-4	Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 30 mm	50
Tabla 4-5	Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 40 mm	51
Tabla 4-6	Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 50 mm	52
Tabla 4-7	Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 60 mm	52
Tabla 4-8	Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 70 mm	53
Tabla 4-9	Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 80 mm	54
Tabla 4-10	Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 90 mm	54
Tabla 4-11	Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 100 mm	55
Tabla 4-12	Eficiencia del sistema acorde a los datos de la implementación.....	61
Tabla 4-13	Tasa de error porcentual entre los valores de la simulación vs implementación .	61
Tabla 4-14	Error cuadrático medio de los valores simulados y medidos.....	62
Tabla 4-15	Eficiencia del sistema con obstáculos entre las antenas separadas por 30 mm ...	63
Tabla 4-16	Eficiencia del sistema con obstáculos entre las antenas separadas por 100 mm .	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1	Campo magnético de la Tierra	11
Figura 2-2	Líneas de campo electromagnético alrededor de dos imanes.....	11
Figura 2-3	Líneas de campo electromagnético formadas alrededor de una bobina	12
Figura 2-4	Campo magnético inducido de una bobina a otra	12
Figura 2-5	Fuente de potencia tipo Witricity con el uso de campos magnéticos oscilantes ..	13
Figura 2-6	Diseño de un dispositivo Witricity en un sustrato Rogers RO3010.....	16
Figura 2-7	Diseño de antenas con aislante FR4 con tamaño de 80 mm x 80 mm	16
Figura 3-1	Etapas del sistema transmisor de energía inalámbrica	18
Figura 3-2	Disposición de pines del oscilador controlado por voltaje.....	19
Figura 3-3	Rangos de frecuencia y potencia de salida del oscilador controlado por voltaje .	19
Figura 3-4	Disposición de pines del amplificador de baja potencia	19
Figura 3-5	Rangos de frecuencia y potencia de salida del amplificador de baja potencia.....	20
Figura 3-6	Disposición de pines de amplificador de bajo ruido	20
Figura 3-7	Rangos de frecuencia y potencia de salida del amplificador de bajo ruido.....	20
Figura 3-8	Alineación de la antenas, ambas separadas por un espacio de aire	21
Figura 3-9	Circuito equivalente del diseño de las antenas	22
Figura 3-10	Espiras de la antena.....	23
Figura 3-11	Vista de la capacitancia de la antena.....	25
Figura 3-12	Circuito básico rectificador doblador de voltaje	26
Figura 3-13	Antenas Rx y Tx separadas por un espacio de aire	27
Figura 3-14	Parámetros de diseño de las antenas Tx y Rx (vista superior)	29
Figura 3-15	Parámetros de diseño de las antenas Tx y Rx (vista inferior)	29
Figura 3-16	Antenas impresas en el sustrato FR4.....	31
Figura 3-17	Generadores MMIC de radio - frecuencia y amplificación.....	31
Figura 3-18	Circuito doblador – rectificador de voltaje.....	32
Figura 4-1	Escala utilizada para medir la distribución de corriente en las antenas Rx y Tx .	33
Figura 4-2	Distribución de corriente superficial a una distancia de 10 mm entre Tx y Rx ...	34
Figura 4-3	Distribución de corriente a una distancia de 20 mm entre Tx y Rx	35
Figura 4-4	Distribución de corriente superficial a una distancia de 30 mm entre Tx y Rx ...	35
Figura 4-5	Distribución de corriente superficial a una distancia de 40 mm entre Tx y Rx ...	36
Figura 4-6	Distribución de corriente superficial a una distancia de 50 mm entre Tx y Rx ...	36
Figura 4-7	Distribución de corriente superficial a una distancia de 60 mm entre Tx y Rx ...	37
Figura 4-8	Distribución de corriente superficial a una distancia de 70 mm entre Tx y Rx ...	37
Figura 4-9	Distribución de corriente superficial a una distancia de 80 mm entre Tx y Rx ...	38

Figura 4-10	Distribución de corriente superficial a una distancia de 90 mm entre Tx y Rx ...	38
Figura 4-11	Distribución de corriente superficial a 100 mm entre Tx y Rx	39
Figura 4-12	Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 10 mm	40
Figura 4-13	Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 20 mm	40
Figura 4-14	Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 30 mm	41
Figura 4-15	Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 40 mm	41
Figura 4-16	Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 50 mm	42
Figura 4-17	Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 60 mm	42
Figura 4-18	Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 70 mm	43
Figura 4-19	Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 80 mm	43
Figura 4-20	Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 90 mm	44
Figura 4-21	Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 100 mm	44
Figura 4-22	Comparación de los resultados simulados entre 10 mm a 100 mm	46
Figura 4-23	Comparación de los resultados simulados entre de 10 mm a 100 mm	47
Figura 4-24	Comparación de los resultados simulados entre de 10 mm a 100 mm	47
Figura 4-25	Implementación del sistema de antenas	48
Figura 4-26	Medición de los valores de voltaje transmitidos con un osciloscopio	48
Figura 4-27	Voltaje recibido a una distancia de 10 mm	56
Figura 4-28	Voltaje recibido a una distancia de 20 mm	56
Figura 4-29	Voltaje recibido a una distancia de 30 mm	57
Figura 4-30	Voltaje recibido a una distancia de 40 mm	57
Figura 4-31	Voltaje recibido a una distancia de 50 mm	58
Figura 4-32	Voltaje recibido a una distancia de 60 mm	58
Figura 4-33	Voltaje recibido a una distancia de 70 mm	59
Figura 4-34	Voltaje recibido a una distancia de 80 mm	59
Figura 4-35	Voltaje recibido a una distancia de 90 mm	60
Figura 4-36	Voltaje recibido a una distancia de 100 mm	60
Figura 4-37	Comparativa de los datos de la simulación e implementación	62
Figura 4-38	Medición de la eficiencia utilizando poli estireno expandido entre las antenas ...	63
Figura 4-39	Diseño alternativo de antenas de transmisión de energía inalámbrica	65
Figura 4-40	Diseño alternativo de antenas de transmisión de energía inalámbrica	66

ÍNDICE

RESUMEN.....	xiii
SUMMARY	xiv
CAPITULO 1	
1. MARCO REFERENCIAL	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Justificación de la investigación	4
1.3.1. <i>Justificación Teórica</i>	4
1.3.2. <i>Justificación Práctica</i>	6
1.3.3. <i>Justificación Metodológica</i>	6
1.4. Objetivos	7
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	7
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	7
1.5. Hipótesis	7
CAPITULO 2	
2. ESTADO DEL ARTE	8
2.1. Transmisión Inalámbrica de Energía	8
2.2. Conceptos Básicos	10
2.3. Avances en sistemas PWT con líneas microstrip	15
CAPITULO 3	
3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	17
3.1. Descripción del sistema	17
3.1.1. <i>Fuente de energía</i>	18
3.1.1.1. <i>Convertor de radio frecuencia y amplificación</i>	18
3.1.2. <i>Antena Transmisora y Receptora</i>	21
3.1.2.1. <i>Diseño de la bobina</i>	23
3.1.2.2. <i>Diseño de los capacitores</i>	24
3.1.3. <i>Conversión a DC y amplificación</i>	26
3.1.4. <i>Carga</i>	27
3.3. Construcción del sistema	30
CAPITULO 4	
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
4.1. Simulación	33
4.1.1. <i>Corriente Superficial</i>	34

4.1.2.	<i>Parámetros de dispersión</i>	39
4.2.	Implementación del sistema	48
4.2.1.	<i>Medición de resultados del sistema de antenas</i>	49
4.2.2.	<i>Eficiencia del sistema</i>	60
4.2.3.	<i>Error obtenido entre los resultados de la simulación y de la implementación</i>	61
4.2.4.	<i>Versatilidad del sistema con obstrucción de distintos materiales</i>	63
4.3.	Comparativa del sistema con trabajos de otros investigadores	64
	Conclusiones	67
	Recomendaciones	68
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, titulado “Implementación de un Sistema de Transmisión Inalámbrica de Energía Eléctrica a través de Acoplamiento Resonante Magnético de Campo Cercano para Dispositivos de Bajo Consumo de Potencia en el Hogar” tuvo como propósito, desarrollar métodos de alimentación eléctrica acorde a la modernización y avance tecnológico de la sociedad. Se utilizaron métodos matemáticos probados en anteriores aportes investigativos para el diseño de las antenas encargadas de la transmisión inalámbrica de energía con tecnología microstrip, sobre una placa FR4, además, se hace uso de circuitos integrados con tecnología MMIC para la generación y amplificación de ondas de radio – frecuencia en el rango de los 16 MHz a 23 MHz como fuente de energía. En la etapa de recepción se utiliza un circuito doblador de voltaje de 3 etapas con el propósito de rectificar y amplificar la señal recibida. Los resultados obtenidos en la implementación del sistema, demuestran una recepción de la energía recibida entre el 20% y 30% del total transmitido, para distancias comprendidas entre 10 y 90 milímetros entre las antenas sin obstáculos. Ésta investigación indica que es factible utilizar energía inalámbrica para cargar dispositivos de bajo consumo de potencia, comprobando que, con obstáculos, decae ínfimamente la eficiencia del sistema al atravesar materiales como aglomerado, plástico, vidrio, poli estireno expandido, tela y madera, perdiendo totalmente el rendimiento con metal.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <TELECOMUNICACIONES>, <CIRCUITO DOBLADOR DE VOLTAJE>, <RADIACION ELECTROMAGNÉTICA>, <ACOPLAMIENTO RESONANTE MAGNÉTICO>, <TRANSFERENCIA INALÁMBRICA DE ENERGÍA>, <MICROSTRIP (TIPO DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN)>, < CIRCUITO INTEGRADO MONOLÍTICO DE MICROONDAS (MMIC)>

SUMMARY

The present research work, entitled " Implementation of a wireless transmission system of electric energy through magnetic resonant coupling of near field for low power consumption devices in the home" was intended to develop electric power methods according to the modernization and technological advance of society. Mathematical methods tested in previous research contributions were used for the design of the antennas responsible for the wireless transmission of energy with microstrip technology, on an FR4 substrate, in addition, was used integrated circuits with MMIC technology for the generation and amplification of radio - frequency waves in the range of 16 MHz to 23 MHz as an energy source. In the reception, a 3-stage voltage doubling circuit is used for the purpose of rectifying and amplifying the received signal. The results obtained in the implementation of the system, show a reception of the energy received between 20% and 30% of the total transmitted, for distances between 10 and 90 millimeters between the antennas without obstacles. This research indicates that it is feasible to use wireless power to charge devices with low power consumption, verifying that, with obstacles, the efficiency of the system decreases when passing through materials such as agglomerate, plastic, glass, expanded polystyrene, cloth and wood, totally losing the performance with metal.

Keywords: <TELECOMMUNICATIONS>, <VOLTAGE DOUBLING CIRCUIT>, <ELECTROMAGNETIC RADIATION>, <MAGNETIC RESONANT COUPLING>, <WIRELESS POWER TRANSFER>, <MICROSTRIP (KIND OF TRANSMISSION LINE)>, <MONOLITHIC MICROWAVE INTEGRATED CIRCUIT (MMIC)>

CAPÍTULO 1

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

Los primeros registros del uso de transmisión inalámbrica de energía eléctrica se remontan hace más de 100 años cuando Nikola Tesla desarrolló el circuito de bobina que lleva su nombre, logrando mediante variaciones en el flujo de campo magnético, obtener la transmisión de energía sin la utilización de ningún medio físico. Las aplicaciones de sus descubrimientos son variadas en la actualidad, como, por ejemplo, los sistemas de transformación eléctrica a través de inducción electromagnética utilizados para el sistema de alimentación de todo tipo de artefactos del hogar y la industria.

La transferencia inalámbrica de energía, es básicamente un mecanismo por el cual la energía eléctrica puede ser transmitida desde una fuente de alimentación a una carga eléctrica sin la necesidad de usar cables. La investigación para desarrollar un sistema de transmisión inalámbrica de energía eléctrica, de manera particular para aplicaciones de carga inalámbrica, ha sido atractiva para los investigadores debido a la necesidad de buscar formas más convenientes en sistema de carga eléctrica.

Algunas técnicas de radiación de energía, las cuales giran alrededor de propuestas existentes en el mercado, hacen uso de tecnología de RF, la cual transmite una señal a través del aire mediante el uso de ondas de radio. Estas técnicas, que están clasificadas como no perjudiciales para la salud de los humanos, es usualmente aplicada para transferir inalámbricamente energía a dispositivos de bajo consumo de energía, sin embargo, en algunos casos, la debilidad de la potencia recibida en el circuito receptor inalámbrico, hace necesario usar circuitos amplificadores, necesarios para fortalecer la señal recibida.

Otra técnica de transferencia inalámbrica de energía, la cual también es conocida como radiación de potencia, es implementada mediante el uso de radiación de ráfagas electromagnéticas en la región de campo – lejano, tales como las microondas o rayos láser. A diferencia de la tecnología de RF, la radiación de potencia está caracterizada como una técnica de transmisión radiactiva con posibles daños para la salud de los seres humanos y la cual puede transmitir señales potentes a largas distancias.

En todo caso, un problema importante que se debe poner atención está relacionado con todos los sistemas de transmisión inalámbrica de energía eléctrica con posibles daños a los seres vivos debido a largas exposiciones a la radiación de energía, para evitarlo es recomendable una exposición limitada a este tipo de sistemas.

Varios diseños de sistema de transferencia inalámbrica de energía que han sido presentados por investigadores, hacen uso de métodos como el acoplamiento fuerte resonante magnético, también conocido como Wireless Electricity (Witricity), acoplamiento inductivo y capacitivo convencional y antenas rectificadoras conocidas como rectenas.

El sistema planteado en este documento, utiliza el sistema de acoplamiento inductivo – capacitivo de campo cercano. La técnica resonancia magnética que también se aplica al proyecto, usa dos objetos acoplados magnéticamente dentro de una región de campo – cercano no – radiativa en el orden de los mega hertzios (MHz).

En dicho sistema, la energía eléctrica desde el transmisor es transferida inalámbricamente a lo largo de cortas distancias hacia el receptor por campos magnéticos mediante el uso de acoplamiento inductivo entre las dos antenas radiadoras.

Según lo consultado en la bibliografía (A. Munir, y B. T. Ranum, 2015), la forma más eficiente de realizar esta técnica, es acoplar dos diseños idénticos de antenas que trabajen sobre una similar frecuencia de resonancia.

La mayoría de gadgets comerciales modernos, incluyendo a teléfonos inteligentes, tabletas, computadoras portátiles, marcapasos, etc., poseen la capacidad de utilizar electricidad inalámbrica. Estos dispositivos son comúnmente diseñados para caber en un tamaño compacto, por lo que es necesario, construir receptores de tamaño reducido para que puedan ser instalados en dichos gadgets disimuladamente, objetivo que persigue el proyecto de titulación.

1.2. Planteamiento del problema

En los recientes años, varias investigaciones han desarrollado la tecnología de transferencia inalámbrica de energía eléctrica en diversos campos de la vida cotidiana, por ejemplo, la carga inalámbrica que algunos teléfonos inteligentes en el mercado ya lo utilizan o la propuesta de varios fabricantes automotrices de cargar los autos eléctricos por inducción mientras viajan por la carretera o al aparcar en el garaje del hogar.

En Ecuador, las aplicaciones de este método de transmisión de energía han sido muy escasas, el despliegue de esta tecnología permitiría el uso de aparatos eléctricos y electrónicos sin la necesidad de cables de alimentación, como es la visión y la propuesta de Witricity, algo que en concordancia con la filosofía del gobierno ecuatoriano en la implementación de líneas de 220V a los hogares del país para el uso masivo de cocinas de inducción, facilitaría enormemente la implementación.

El interés del autor en este campo proviene de la posibilidad de la independencia de los cables en los aparatos electrónicos de uso común, facilitando y brindando un mejor estilo de vida a los consumidores. En el área de consumo para el hogar, la tecnología de carga inalámbrica de energía eléctrica se puede utilizar para alimentar todos los dispositivos de la residencia sin la necesidad de tendido de cables eléctricos al interior de la misma, que, en conjunto con un sistema de obtención de energía renovable, se podría lograr hogares más seguros y autosustentables.

En muchos de los hogares ecuatorianos en especial de clase baja, el uso y consumo de energía eléctrica se lo hace con una infraestructura deficiente al interior de los domicilios lo cual ha provocado consecuencias fatales para sus ocupantes. Las aplicaciones de la energía inalámbrica podrán ayudar a un consumo más eficiente y seguro, evitando la red de cables y la inseguridad latente que eso implica.

Aparte de aplicaciones en el hogar, la electricidad inalámbrica puede ayudar en otros campos tan variados como la medicina, aportando con un medio de transmisión seguro a dispositivos biomédicos trasplantados bajo la piel y que podrían ser cargados de forma no intrusiva y sin riesgo para el paciente, además los aparatos electrónicos en salas de cirugía prescindirían de cables, brindando una mayor libertad y seguridad a los médicos a través de una óptima limpieza con dispositivos médicos que pueden ser fácilmente reubicables. Referente al punto anterior, la intrusión al mercado de dispositivos denominados “vestibles” o “wearables” en el campo de la salud, brindaría la oportunidad de monitorear en todo momento cada aparato conectado al paciente, los cuales serían recargados por electricidad inalámbrica.

En el sector automotriz, según las tendencias de mercado actuales y los empeños de varios sectores tecnológicos en ser menos dependientes de combustibles fósiles, se está usando medios de transporte eléctricos los cuales obviamente utilizarán baterías para su funcionamiento que podrían ser recargadas en el hogar con el simple acto de ingresar el auto a la cochera, despreocupando totalmente al dueño del vehículo de hacerlo de manera manual. Por otro lado, desde la perspectiva de las empresas constructoras, la electricidad inalámbrica supondría una

mejora en la eficiencia de la cadena de producción, posibilitando reducir espacio antes ocupado por cables.

Otra área plausible de aporte, sería en el campo de los vehículos aéreos no tripulados, que como en los casos anteriores, se eliminaría el espacio ocupado por cables brindando las facilidades necesarias para otros módulos. Similar característica se aplica a vehículos submarinos, en donde el agua es un factor determinante de diseño en la red de alimentación energética, la cual se puede evitar con una fuente de energía inalámbrica brindando mayor seguridad, eficiencia y rentabilidad.

Amplias son las posibilidades de uso, siendo la tecnología de transmisión de energía inalámbrica útil en cualquier área en donde se utilice maquinaria o aparatos que funcionen con un diferencial de potencial, y que brinda beneficios como la reducción de costos asociados con el mantenimiento directo a los conectores de energía, ventaja evidente para la carga de dispositivos electrónicos que se usa diariamente, la posibilidad de transferencia de energía eléctrica segura para aplicaciones que necesiten permanecer estériles o herméticamente sellados, además la electrónica puede ser cerrada completamente, reduciendo el riesgo de corrosión debido a elementos como el oxígeno o el agua, entrega de energía robusta e invariable para equipamiento que rote o esté compuesto por partes que estén en constante movimiento y entrega confiable de energía para sistemas de uso crítico en ambientes húmedos o totalmente rodeados de agua, suciedad o en ambientes hostiles.

1.3. Justificación de la investigación

1.3.1. Justificación Teórica

Diagnosticar la situación actual nos permitirá generar alternativas viables para la implementación de un sistema de suministro eléctrico alternativo, eficiente, ampliable y sin riesgo para la seguridad de los usuarios.

Acorde a la red de tendido eléctrico nacional, es conveniente analizar diferentes métodos de implementación según las necesidades de los consumidores y por ende de los recursos financieros del mercado con el objetivo de determinar la configuración de hardware más óptimo a utilizarse.

Los avances en tecnología permiten a los habitantes de la sociedad moderna obtener una mejor calidad de vida, en el caso de la población ecuatoriana, un avance en el área de transmisión de energía eléctrica inalámbrica otorgaría ventajas decisivas en áreas de la producción o servicios, posibilitando la competitividad y abriendo el camino para el desarrollo.

En varios estudios ya realizados en este tema, se ha demostrado que el campo magnético necesario para la transmisión de energía no es perjudicial para la salud de los usuarios, la técnica de transmisión inalámbrica de energía o conocido como PWT del anglosajón Power Wireless Transfer, en la mayoría de experimentos realizados muestra un bajo índice SAR (Specific Absorption Rate) o Tasa de Absorción Específica el cual indica que la radiación no es perjudicial para los seres humanos.

Para un área de cobertura amplia, existen métodos de difusión de PWT los cuales hacen uso de bobinas de alta potencia con el objetivo de suministrar energía a todos los aparatos eléctricos y electrónicos de uso cotidiano en un hogar promedio. Para un mejor entendimiento, se podría utilizar la analogía de los estándares de comunicación 802.11xx o más conocido “Wi-Fi”, que actualmente disipan campos electromagnéticos en el hogar con el propósito de interconectar dispositivos, los sistemas PWT utilizarían estos mismos campos electromagnéticos para proveer de energía e inclusive enviar información simultáneamente, dejando la puerta abierta a un futuro cercano de fusionar ambos sistemas, de esta manera todas aquellas personas que entren a la zona de cobertura se beneficiarían de la carga de sus dispositivos móviles, igualmente, la reubicación de los electrodomésticos y artefactos eléctricos sería una tarea mucho más sencilla ya que se prescindiría de los cables de alimentación, así como la limpieza e higiene de las mismas se facilitaría. Sin duda, una alternativa tecnológica de suministro de energía eléctrica sería acogida de gran manera por la sociedad, un paso más para salir del subdesarrollo.

En el caso de realizar un estudio de PWT de largo alcance el cual no es el objetivo de este trabajo, se podría realizar acuerdos en cooperación con el Gobierno Nacional para implementar esta tecnología en proyectos enfocados a la educación, por ejemplo, se podría suplir de energía eléctrica inalámbrica a toda una escuela del milenio, representando ahorro en las redes de tendido eléctrico y facilitando una estratégica ubicación de los artefactos tecnológicos.

En todo caso, el PWT de campo cercano que hace mención el presente proyecto tiene como principal desventaja la corta distancia de separación entre el transmisor y receptor para una transmisión eficiente de energía, en las investigaciones en el tema desarrolladas anteriormente se ha determinado que la separación máxima oscila entre los 30 milímetros a 40 milímetros con alrededor de 70% de eficacia (M. H. M. Salleh, N. Seman, and D. N. A. Zaidel, 2014), sin embargo, como se indicará más adelante, en los resultados de las pruebas de la implementación del proyecto se logra transmitir energía alrededor de una distancia máxima de 100 mm. Sin duda, la limitante de la distancia de separación provoca que los campos de aplicación no sean tan amplios, enfocándose

en el sector de dispositivos de baja potencia como teléfonos celulares, cepillos de dientes eléctricos, marca pasos, dispositivos cuantificadores, etc.

No cabe duda que esta tecnología aporta portabilidad dentro del área de servicio, característica importante en el futuro de la conexión de dispositivos móviles, el cual se convertiría en un complemento para las redes de alta velocidad 5G que en los próximos años sería ya una realidad. De esta manera se lograría dispositivos móviles más autónomos e independientes del cargador convencional.

Cualquiera que sea la aplicación, la eliminación de los conectores físicos y por ende de los cables de alimentación eléctrica en los aparatos, brindaría un gran número de beneficios a los consumidores y usuarios.

1.3.2. Justificación Práctica

La practicidad del presente proyecto contribuiría a la mayor versatilidad del uso de dispositivos de consumo de baja potencia de los usuarios y/o consumidores. El presente trabajo podría servir de base para un proyecto más ambicioso en alianza con los sectores productivos enfocados al hogar, por ejemplo, se acordaría incluir sistemas PWT en electrodomésticos, muebles y demás artefactos de uso diario del hogar que suministrarían de manera fácil y eficaz electricidad a dispositivos de bajo consumo de potencia.

Como parte de esta alianza mencionada anteriormente, se podría insertar un sistema PWT en los reposa – brazos de los muebles de sala, permitiendo recargar la batería de un dispositivo portable de bajo consumo de potencia mientras su propietario descansa plácidamente.

1.3.3. Justificación Metodológica

El proyecto se desarrolla con la finalidad de investigar nuevos métodos de transmisión inalámbrica de energía y el cual explora la idea a través de la utilización de circuitos MMIC para la generación y amplificación de la señal de radiofrecuencia y antenas microstrip con circuitos equivalentes RLC deducidos a partir del Método de los Elementos Finitos para la transmisión/recepción de la señal.

Actualmente en áreas de investigación ya se ha sentado los precedentes y las bases para sistemas PWT de alta y baja potencia, inclusive existen ciertos productos en el mercado que ofrecen esta solución a elementos de bajo consumo energético, sin embargo, en el presente trabajo se proponen

los fundamentos para la realización de un sistema de radiación ajeno a las bobinas convencionales con el propósito de ampliar las posibilidades para que futuros sistemas PWT sean competitivos y beneficien al usuario final.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Implementar un sistema de transmisión inalámbrica de energía eléctrica a través de acoplamiento resonante magnético de campo cercano para dispositivos de bajo consumo de potencia en el hogar.

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Realizar el diagnóstico situacional en referencia a la infraestructura actual que suministra energía eléctrica a dispositivos electrónicos de bajo consumo de potencia enfocados al hogar de la ciudad de Riobamba.
- b. Diseñar un sistema de transmisión inalámbrica de energía eléctrica que permita un uso versátil para el suministro energético de dispositivos de bajo consumo de potencia en el hogar.
- c. Implementar un sistema de transmisión inalámbrica de energía eléctrica a través de acoplamiento resonante magnético y líneas microstrip para brindar alternativas eficientes en la alimentación de energía eléctrica enfocadas a dispositivos de bajo consumo de potencia en el hogar.

1.5. Hipótesis

La implementación de un sistema de transmisión inalámbrica de energía eléctrica a través de acoplamiento resonante magnético de campo cercano, aportará versatilidad en el suministro energético para dispositivos de bajo consumo de potencia en el hogar.

CAPÍTULO 2

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Transmisión Inalámbrica de Energía

Un sistema de transferencia de potencia inalámbrica (PWT de Power Wireless Transfer) es básicamente un mecanismo por el cual la energía eléctrica puede ser transmitida desde una fuente de energía a un objetivo eléctrico sin la utilización de ningún tipo de cables (R. M. Dickinson, 1976). Haciendo un poco de historia, el concepto de electricidad inalámbrica no es nuevo, de hecho, su descubrimiento data del siglo XIX, cuando Nikola Tesla usó sistemas conductivos para transferir energía inalámbricamente.

Algunas técnicas actuales han girado alrededor de este tema usando tecnología de radiofrecuencia, esta técnica la cual es clasificada como no radiativa es usualmente aplicada para transferir inalámbricamente electricidad a dispositivos de baja carga en la región de campo cercano, sin embargo, debido a la debilidad de la potencia recibida en el circuito receptor inalámbrico la potencia de recepción debería ser fortalecida usando algún circuito de amplificación.

Otras técnicas de transmisión inalámbrica las cuales también son conocidas como radiación de potencia, son implementadas mediante la radiación de rayos electromagnéticos en la región de campo lejano como las microondas o rayos láser (M. H. M. Salleh, N. Seman, and D. N. A. Zaidel, 2014). En contraste a la tecnología de radiofrecuencia, la radiación de energía es categorizada como técnica radiactiva en donde ésta puede transmitir una gran cantidad de energía eléctrica a grandes distancias, sin embargo, acarrea problemas importantes y en el cual se debe poner mucha atención con todos estos sistemas de transferencia inalámbrica de energía que tienen el principal inconveniente de causar un daño potencial a los seres vivos por una prolongada exposición de la radiación electromagnética (R. M. Dickinson, 1976), y para ello se debería imponer límites a la exposición de energía radiante.

Por tanto, si se habla de energía eléctrica, el pensamiento más común se dirige a todo tipo de cables que la transportan, sin embargo, la continua investigación y desarrollo ha traído consigo avances importantes para el provecho común de la sociedad, como la posibilidad del transporte y provisión de electricidad sin el uso de cables. Este tipo de nueva tecnología es denominado “Witricity” que para términos populares se traduciría como “Witricidad”, sinónimo en este caso

de Electricidad Inalámbrica. Cabe indicar que el término fue acuñado por un grupo de investigadores del Massachusetts Institute of Technology (MIT) quienes en el 2005 dieron a conocer un importante avance en el uso de la electricidad inalámbrica.

Como una nueva tecnología de transferencia inalámbrica de energía, la Witricidad está basada en el concepto de acoplamiento de resonancia magnética de campo cercano, es decir, el principio fundamental de su funcionamiento es que los objetos resonantes puedan intercambiar energía eficientemente mientras que los objetos no resonantes no lo hacen de manera eficiente (Ho, Wang, Fu & Sun, 2011). Hay algunos métodos para la transferencia inalámbrica de energía, como el uso de acoplamiento de campos magnéticos resonantes (Kurs, Moffat, Joannopoulos, Fisher & Soljic, 2007), acoplamientos inductivos (Pelliteri, Boscaino, Rosa & Capponi, 2012), captación de energía (El-Anzeery, El-Bagouri & Guindi, 2012) y acoplamiento capacitivo (Kline, Izyumin, Boser & Sanders, 2011).

Actualmente la tecnología de transferencia inalámbrica de energía está siendo usada comúnmente para cargar baterías o dispositivos electrónicos, los cuales tienen bajo consumo de potencia. Para diseñar un dispositivo WPT el uso del acoplamiento de campos magnéticos resonantes es generalmente basado en inductores con frecuencias de resonancia en decenas de mega Hertz (MHz) entre el transmisor y el receptor, los cuales, los diseños de ambos son usualmente idénticos para lograr la misma frecuencia de resonancia (Salleh, Seman & Dewan, 2013 y Ho, Wang, Fu & Sun, 2011).

Dicha frecuencia de resonancia depende principalmente del diseño de la capacitancia e inductancia que deberían estar especificadas a un rango bajo de frecuencia debido a la presencia de pérdidas de conductividad a alta frecuencia (Salleh, Seman & Zaidel, 2014).

La ventaja de los sistemas WPT, es que en su uso la potencia se desperdicia en menor cantidad en comparación con otros métodos de transferencia de energía inalámbrica, como la captación de energías por radioondas y la carga inductiva convencional, lo cual, se ha convertido en el método preferido de transferencia inalámbrica con una alta tasa de eficiencia de potencia.

Sin embargo, hay dos retos en el diseño de un dispositivo de estas características, primero, diseñar un dispositivo Witricity que tenga una aceptable eficiencia de potencia, y segundo, diseñarlo en un tamaño compacto para que pueda ser implementado en espacios reducidos para su aplicación en dispositivos modernos como teléfonos inteligentes, computadoras portátiles, cepillos de dientes eléctricos, implantes médicos, etc. (Salleh, Seman & Dewan, 2013).

En el futuro, Witricity asegura que dispositivos como teléfonos móviles, computadoras portátiles y demás dispositivos recurrentes de electricidad, se recarguen de manera automática, eliminando

la necesidad de conectarlos a tomacorrientes. Witricity trabaja con las bases de la electricidad y magnetismo, y puede utilizar técnicas de transmisión a través de acoplamientos capacitivos, inductivos y la utilización de campos magnéticos resonantes.

Por todos es conocido el uso de campos electromagnéticos para la transmisión de información, sin embargo, para el uso de transmisión inalámbrica de energía, una cantidad considerable de la misma se desperdicia acorde al aumento de distancia debido a la naturaleza omnidireccional de las radio ondas, por ello, hay investigaciones que usan láseres para la transmisión de potencia sin cables, no obstante, cabe indicar que para su uso, además de contar como requisito indispensable una línea de vista sin obstáculos, es también altamente peligrosa para los seres humanos, en todo caso, el proyecto propuesto, no ahondará en este tipo de transmisión debido a las restricciones tecnológicas y económicas que supone hacerlo.

Se debe aclarar que, aunque a primera vista, la tecnología Witricity suponga utilizar la tradicional inducción magnética como lo usan los transformadores de energía los cuales transmiten la energía de una bobina a otra inalámbricamente a través de una corta distancia, no es así, en el caso de los transformadores, los bobinados deben estar muy cerca debido a que su eficiencia decae drásticamente cuando la distancia entre ellas aumenta. En cambio, con Witricity, se puede lograr un acoplamiento fuerte y altamente eficiente a través de un determinado espacio mediante el uso de campos magnéticos resonantes.

2.2. Conceptos Básicos

Para un entendimiento más amplio, se describen brevemente los conceptos relacionados con los sistemas WPT:

- **Electricidad:** se considera electricidad al flujo de electrones a través de un conductor (como un cable) o través de la atmosfera (como la luz) y el cual viaja de un lugar a otro.
- **Magnetismo:** calificada como una fuerza fundamental de la naturaleza, el cual causa que ciertos tipos de materiales se atraigan o se repelen el uno al otro. Los imanes y el campo magnético de la tierra son ejemplos de objetos que tienen un constante campo magnético.

Los campos magnéticos oscilantes varían con el tiempo, y pueden ser generados por la corriente alterna (AC) fluyendo a través de un alambre, la fuerza, dirección y extensión de los campos magnéticos son frecuentemente representadas y visualizadas mediante líneas de campo magnético.

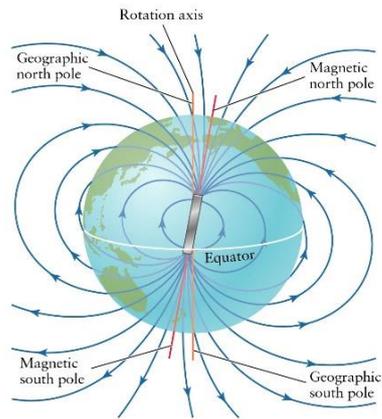


Figura 2-1 Campo magnético de la Tierra

Fuente: <https://www.patana.ac.th/secondary/science/anrophysics/ntopic6/commentary.htm>

- **Electromagnetismo:** un término para la interdependencia de la variación en el tiempo de los campos eléctrico y magnético. Por ejemplo, un campo magnético oscilante produce un campo eléctrico, y viceversa, un campo eléctrico produce un campo magnético.

De esta manera, se puede referir a la corriente eléctrica que fluye por un cable y el cual produce un campo magnético que envuelve al alambre. Si la corriente va en sentido contrario, el campo magnético también revierte su dirección.

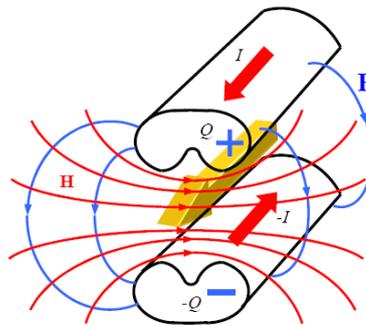


Figura 2-2 Líneas de campo electromagnético alrededor de dos imanes

Fuente: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/208019/MODULO%20ANTENAS%20Y%20PROPAGACION-2011/leccin_1_definicion_de_lineas_de_transmision.html

- **Inducción Magnética:** una espira o una bobina de material conductor como el cobre que acarrea una corriente alterna (AC), es una estructura eficiente para generar o capturar un campo magnético. Si una espira conductiva es conectada a una fuente de alimentación de corriente alterna, ésta, generará un campo magnético oscilante alrededor de la espira. Una segunda espira conductiva, acercada lo suficientemente cerca a la primera, puede “capturar” alguna porción del campo magnético oscilante, que, a su vez, genera o induce una corriente

eléctrica en la segunda espira. La corriente generada en la segunda bobina puede ser usada para alimentar eléctricamente a otros dispositivos. Este tipo de transferencia de potencia eléctrica de una espira o bobina a otra es conocida como inducción magnética. Algunos ejemplos comunes basados en inducción magnética son los transformadores eléctricos y los generadores eléctricos.

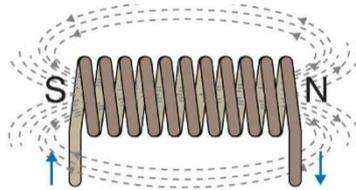


Figura 2-3 Líneas de campo electromagnético formadas alrededor de una bobina

Fuente: <http://slideplayer.es/slide/5414314/>

- **Acoplamiento de energía:** un transformador eléctrico es un dispositivo que usa inducción magnética para transferir energía desde el devanado primario al devanado secundario, sin que los mismos estén conectados el uno al otro de alguna manera, lo cual “transforma” la corriente eléctrica de un voltaje a otro diferente.

El acoplamiento magnético sucede cuando el campo magnético de un objeto interactúa con el de un segundo objeto e induce una corriente eléctrica en o sobre ese objeto. De este modo, la energía eléctrica puede ser transferida desde una fuente de alimentación a un dispositivo movido por electricidad.

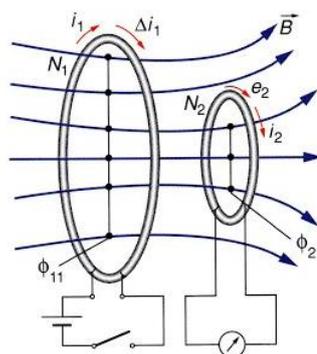


Figura 2-4 Campo magnético inducido de una bobina a otra

Fuente: <https://sites.google.com/site/espaciotiesla/electrodinamica>

- **Witricity:** los dispositivos Witricity son resonadores magnéticos especialmente diseñados para transferir potencia a través de un campo electromagnético cercano y acoplamiento resonante, además los objetos Witricity no pueden estar a no más de un cuarto de la longitud

de onda del emisor, que en muchos de los casos es una distancia razonable para el uso de dispositivos de uso diario. Cabe aclarar que los mencionados dispositivos Witricity usan frecuencias bajas para lograr mayores alcances, sin embargo, en el presente trabajo propuesto se utilizan frecuencias más altas que conllevan a reducir la distancia de separación entre los objetos que intercambian energía.

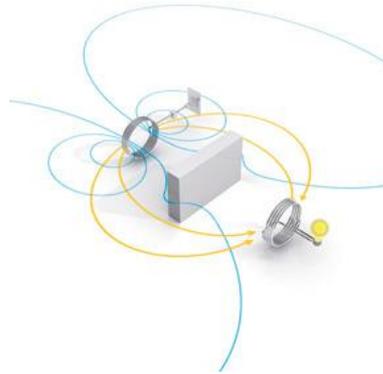


Figura 2-5 Fuente de potencia tipo Witricity con el uso de campos magnéticos oscilantes

Fuente: <http://witricity.com/technology/>

- **Resonancia:** la resonancia es una propiedad que existe en variados sistemas físicos. Se puede decir que es una frecuencia natural a la cual la energía es eficientemente añadida a un sistema oscilante. Un ejemplo de resonancia común, es la forma como un cantante puede destrozarse una copa de vidrio cantando una única nota clara y fuerte. En este ejemplo, la copa de vidrio es el sistema de bucle resonante. Para una mayor explicación, las ondas de sonido que viajan a través del aire son capturadas por el vidrio, y la energía sonora es convertida a vibraciones mecánicas en la copa. Cuando el cantante alcanza la nota musical que concuerda con la frecuencia de resonancia de la copa, el vidrio absorbe la energía vibrando y posteriormente rompiéndose. La frecuencia de resonancia de la copa dependerá del tamaño, forma, grosor y cuan lleno esté de algún líquido.
- **Acoplamiento Resonante Magnético:** el acoplamiento magnético ocurre cuando dos objetos intercambian energía a través de sus campos magnéticos variables u oscilantes. El acoplamiento resonante ocurre cuando las frecuencias naturales de los dos objetos son aproximadamente las mismas.

Para el caso particular del proyecto de titulación, el acoplamiento resonante magnético ocurre en sistemas electromagnéticos que operan a una específica frecuencia para la cual fueron diseñados, pudiendo excitarse debido al acoplamiento electromagnético, intercambiando energía a una cierta distancia.

- **Tecnología Microstrip:** Otro aspecto para entender los sistemas de transmisión inalámbrica de energía es el relacionado a los elementos radiadores de las ondas electromagnéticas, para el presente proyecto se escogió la técnica microstrip para la implementación del sistema inductivo y capacitivo de acople inalámbrico, para un mejor entendimiento, las antenas microstrip son aquellas líneas de transmisión conformadas por un conductor plano el cual se ubica sobre un medio dieléctrico que lo aísla de otro material conductor o plano de tierra.

Actualmente, las antenas microstrip son utilizadas en radio frecuencia y microondas. Este tipo de antenas son totalmente confiables, demostrando su efectividad a través de infinidad de estudios científicos y aplicaciones en distintas áreas de las telecomunicaciones, además, son altamente recomendadas por los diseñadores cuando se necesitan radiadores discretos o de bajo perfil.

Recientes investigaciones han sugerido la utilización de este tipo de antenas para la radiación de energía inalámbrica en lugar de bobinas de alambre. Su efectividad dependerá de los avances que obtengan con el tiempo los investigadores, no obstante, en la actualidad el porcentaje de rendimiento oscila entre el 40% y 70%, dependiendo de las características de los sistemas que los requieren.

Estas líneas de transmisión, hoy por hoy, son la base de los circuitos impresos para alta frecuencia (MMIC, por las siglas de Monolithic Integrated Microwave Circuits) – del cual se hablará más adelante – y en la creación de circuitos como acopladores, filtros, resonadores, antenas y otros.

Las líneas microstrip son fáciles de generar, debido a que para su fabricación se utilizan técnicas de circuitos impresos o circuitos integrados. Como ya se explicó anteriormente, la microstrip está compuesta de materiales conductivos separados por un aislante. El espesor del aislante o sustrato, su permitividad eléctrica y el grosor de la línea de transmisión son los parámetros fundamentales para el diseño de las líneas microstrip.

El uso de microstrip permite la implementación para la construcción de los elementos inductivos necesarios para el acoplamiento inductivo resonante que requiere el diseño del sistema de transmisión inalámbrica de energía.

Entre las principales ventajas de la utilización de antenas microstrip se encuentran la flexibilidad para la integración de elementos activos en el mismo sustrato, ocupan poco espacio y son livianas, son adaptables a cualquier superficie gracias a su diseño plano, son

de fabricación barata y de gran cantidad, tienen soporte para polarización lineal y circular, permiten un diseño flexible para el trabajo a distintas frecuencias, además son robustas al montarse en superficies rígidas, además no es necesario utilizar estructuras de soporte y el cálculo de diseño es fácil con un bajo costo en relación a otras tecnologías similares.

Por otra parte, sus principales desventajas se podrían considerar su soporte para pequeños anchos de banda, problemas de tolerancia, baja ganancia (~ 6 dB), considerables pérdidas óhmicas en la interface de alimentación de arrays, diseños de fuentes de alimentación complejas para un buen rendimiento en arrays, baja radiación de extremo a extremo, radiación indeseada proveniente alimentadores y uniones, no soportan grandes potencias (~100W), alta generación de ondas superficiales, la fabricación de antenas con sustratos de una alta constante dieléctrica es preferida para la integración con circuitos MMIC RF, sin embargo, como resultado brindan un bajo rendimiento y bajo ancho de banda y por último, la radiación producida desde los bordes inciden en los parámetros de la antena.

2.3. Avances en sistemas PWT con líneas microstrip

En trabajos de investigación previos, el sistema de transmisión denominado “Design of a Compact Planar Witricity Device with Good Efficiency for Wireless Applications” de M. H. M. Salleh, N. Seman, y D. N. A. Zaidel, se aborda la idea de utilizar líneas microstrip para el diseño de antenas planares como medio para transmitir energía inalámbricamente.

En el mencionado trabajo, se propone un dispositivo Witricity con un diseño plano inductivo y un variado número de placas capacitivas. Utiliza un sustrato Rogers RO3010, el cual provee de un diseño con 70% más eficiente y 75% más pequeño que otros sistemas que utilizan al sustrato Flame Retardant 4 (FR4), alcanzando una dimensión de 40 mm x 40 mm.

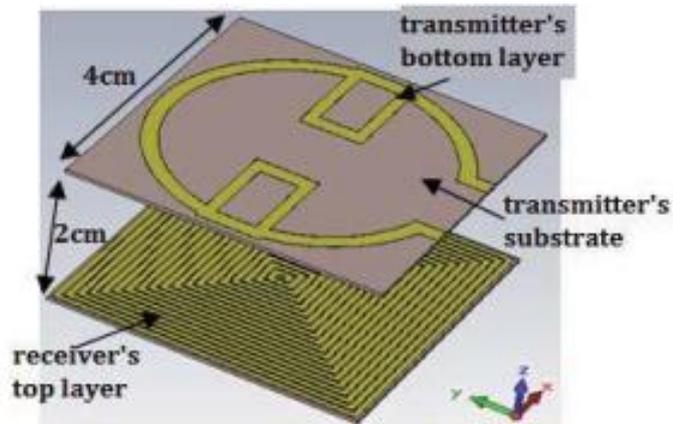


Figura 2-6 Diseño de un dispositivo Wircity en un sustrato Rogers RO3010

Fuente: M. H. M. Salleh, N. Seman, y D. N. A. Zaidel, 2014

Se demuestra adicionalmente en el trabajo investigativo, que la introducción de placas en forma de rectángulos que actúan de capacitores, mejoran la transferencia de energía a través de una mejor optimización en el coeficiente de reflexión de entrada además de aumentar el ancho de banda en la operación del sistema.

Además, se introduce un lazo de cobre adjunto a las placas de cobre capacitivas con el propósito de alimentar con energía a la antena transmisora y recibirla en el caso del receptor. El concepto de lazo es tomado originalmente del trabajo de (M. H. M. Salleh, N. Seman, and R. Dewan, 2013), quien utiliza un cable con grosor de 3 mm que van conectados directamente a la fuente de energía y a la carga en las antenas transmisora y receptora respectivamente.

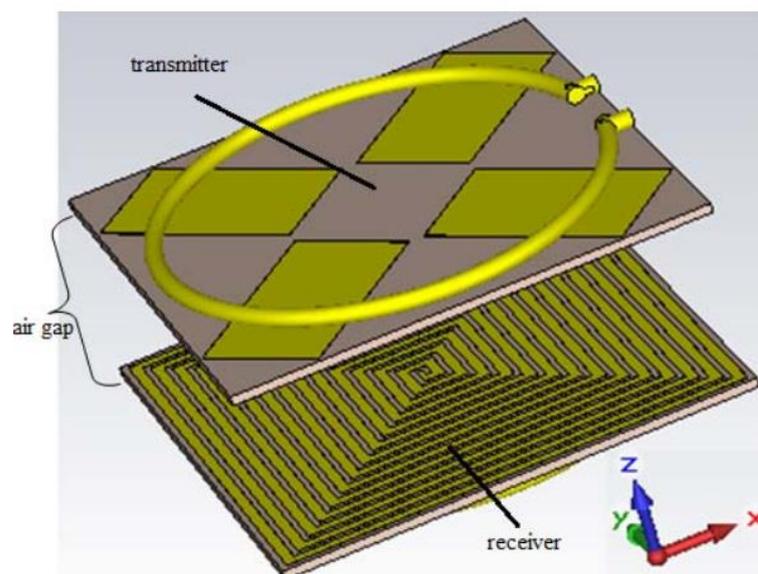


Figura 2-7 Diseño de antenas con aislante FR4 con tamaño de 80 mm x 80 mm

Fuente: M. H. M. Salleh, N. Seman, and R. Dewan, 2013

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

En un inicio, se pretendió diseñar un sistema de antenas de tamaño reducido con el objetivo de que pudieran caber en gadgets de pequeño tamaño, sin embargo, debido a la restricción geográfica del autor, tal intención no se la pudo llevar a buen recaudo debido a varias razones, entre ellas: la carencia de los materiales necesarios para el proyecto como un dieléctrico de altos estándares y un adecuado sistema de impresión del diseño en PCB, el cual en el país la resolución es baja para la impresión de distancias mínimas (rango menor a 1 mm) en el diseño.

Debido al primer tropiezo en el diseño, se decidió aumentar el tamaño de las antenas Tx y Rx. El siguiente paso consistió en escoger un adecuado sistema computacional, el cual pudiese manejar el maremágnum de datos que se iban a obtener en la simulación, para el efecto, se escogió una computadora portátil con un procesador i7 de Intel de Tercera Generación, con unos adecuados 8 Gb de Memoria RAM y Disco Duro SSD para un rápido almacenamiento de la gran cantidad de archivos resultantes.

Con el computador escogido, y luego de consultar varias lecturas técnicas en la rama, se escogió CST Microwave Studio 2016 para la simulación. El entorno gráfico y la disposición en el diseño puede marear en un principio, pero es breve, la curva de aprendizaje es rápida, y con el tiempo y la práctica, el usuario se adapta a la interfaz, logrando plasmar el diseño idealizado.

3.1. Descripción del sistema

La técnica aplicada para el sistema de transferencia inalámbrica de energía está basada en el concepto de aprovechamiento de campo cercano de acoplamiento de resonancia magnética, y el cual difiere de la técnica radiante de energía.

La energía eléctrica desde el transmisor es transferida inalámbricamente a través del aire en cortas distancias al receptor por campos magnéticos usando acoplamiento inductivo entre dos dispositivos radiantes. La energía eléctrica de Corriente Alterna opera en el rango de frecuencia de los 18 MHz a los 25 MHz y es generada usando un oscilador con tecnología MMIC controlado por voltaje y un amplificador de bajo ruido. Para obtener un voltaje de corriente directa a la salida

del circuito receptor, se utiliza un circuito rectificador – doblador de voltaje para amplificar y transformar en corriente directa la señal recibida. El circuito equivalente del sistema de transmisión de energía inalámbrica es presentado en la figura 3 – 1.

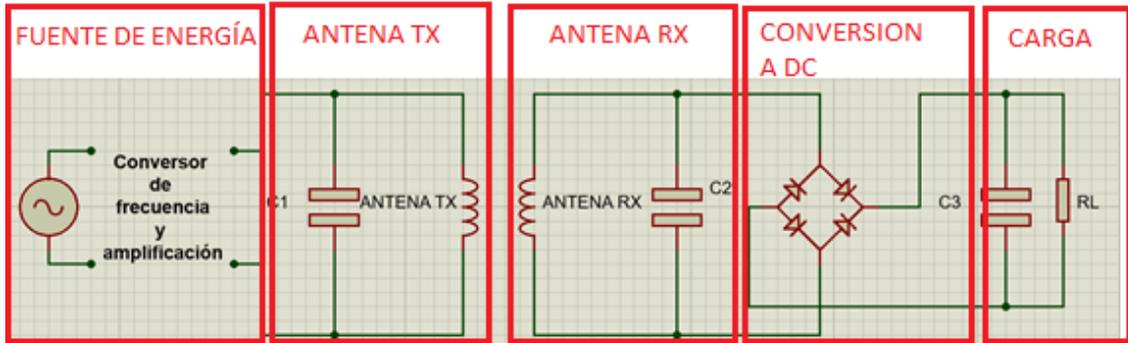


Figura 3-1 Etapas del sistema transmisor de energía inalámbrica

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

3.1.1. Fuente de energía

Esta etapa comprende la alimentación de corriente alterna al oscilador que supe de energía a los radiadores. Se utilizan dos sistemas de alimentación de energía con salida de corriente directa de 12 voltios, una fija y otra variable. La fija alimenta a los integrados, y la variable según el voltaje dado, establece una frecuencia determinada en los integrados.

3.1.1.1. Conversor de radio frecuencia y amplificación

Es necesario una señal de radio frecuencia para alimentar el sistema de antenas, para lo cual se utilizan integrados con tecnología MMIC para la oscilación y ganancia.

Los integrados a utilizar para el efecto han sido provistos por el portal www.mini-circuits.com y son los siguientes:

POS – 25 +

Oscilador Controlado por Voltaje con ancho de banda soportada de los 15 a 25 MHz y con aplicaciones para la implementación de instrumentos de medición, generadores de señal y sistemas de comunicación. La descripción del integrado es de tipo enchufable como se muestra en la figura 3 – 2.

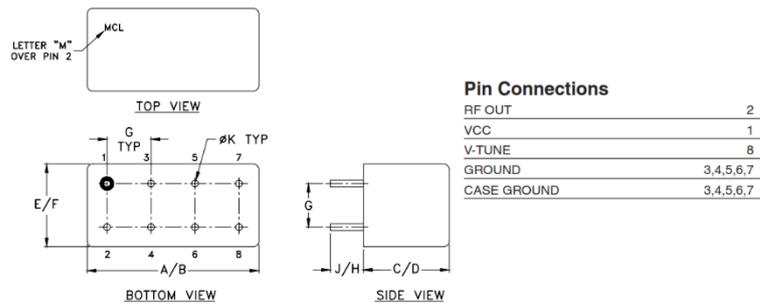


Figura 3-2 Disposición de pines del oscilador controlado por voltaje

Fuente: Datasheet del dispositivo POS – 25 +

V TUNE	TUNING SENS. (MHz/V)	FREQUENCY (MHz)			POWER OUTPUT (dBm)		
		-55°C	+25°C	+85°C	-55°C	+25°C	+85°C
1.00	0.71	11.10	10.89	10.75	5.86	6.18	5.83
2.00	0.81	12.04	11.75	11.59	8.04	8.67	8.57
3.00	1.15	13.42	13.01	12.78	8.77	9.49	9.52
4.00	1.63	15.34	14.75	14.44	9.01	9.83	9.91
5.00	2.12	17.68	16.93	16.56	9.01	9.63	9.77
6.00	2.58	20.36	19.55	19.10	8.45	9.07	9.24
7.00	3.13	23.51	22.67	22.15	7.43	8.03	8.26
8.00	3.72	27.36	26.32	25.75	5.46	6.09	6.32
9.00	4.07	31.53	30.25	29.67	3.69	4.42	4.64
10.00	3.48	34.59	33.61	33.09	2.45	2.99	3.22
11.00	2.21	36.37	35.74	35.30	1.67	2.10	2.35

Figura 3-3 Rangos de frecuencia y potencia de salida del oscilador controlado por voltaje

Fuente: Datasheet del dispositivo POS – 25 +

MAN – 1

Amplificador de baja potencia con un rango de operación desde los 0.5 a 500 MHz e impedancia característica de 50 ohm. Utilizado para aplicaciones de VHF/UHF, aplicaciones de alto rendimiento, sistemas de comunicación e instrumentación. De igual manera es de tipo enchufable.

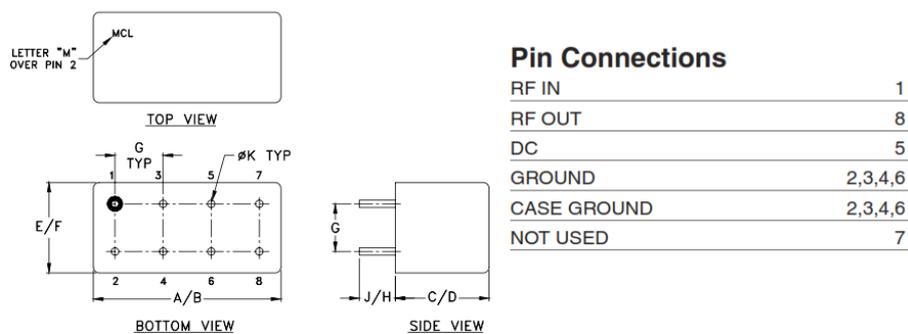


Figura 3-4 Disposición de pines del amplificador de baja potencia

Fuente: Datasheet del dispositivo MAN – 1

FREQUENCY (MHz)	GAIN (dB)			DIRECTIVITY (dB)			VSWR (:1)		NOISE FIGURE (dB)	POUT at 1 dB COMPR. (dBm)
	11V	12V	12.5V	11V	12V	12.5V	IN	OUT		
0.50	29.45	30.56	30.97	13.30	13.00	12.70	1.40	1.57	—	8.35
1.90	29.93	31.07	31.52	12.80	12.30	12.00	1.12	1.18	—	8.31
11.40	30.02	31.17	31.62	12.40	12.00	11.80	1.03	1.09	2.80	8.16
68.40	29.99	31.11	31.54	12.40	12.00	11.90	1.03	1.09	2.74	8.32
192.60	29.83	30.87	31.28	12.00	11.80	11.50	1.06	1.08	2.77	8.41
243.80	29.74	30.77	31.15	12.00	11.60	11.30	1.07	1.08	2.80	8.24
307.90	29.55	30.52	30.88	11.90	11.60	11.30	1.09	1.07	2.84	8.28
371.90	29.29	30.19	30.53	11.80	11.40	11.20	1.11	1.07	2.89	8.38
436.00	29.01	29.86	30.17	11.50	11.30	11.10	1.12	1.05	2.95	8.51
500.00	28.74	29.54	29.82	11.20	10.80	10.70	1.13	1.05	3.02	8.52

Figura 3-5 Rangos de frecuencia y potencia de salida del amplificador de baja potencia

Fuente: Datasheet del dispositivo MAN – 1

MAN – 1LN

Amplificador de bajo ruido con un rango de operación de 0.5 a los 500 MHz e impedancia característica de 50 ohms. Utilizado en aplicaciones de VHF/UHF, militares y sistemas de comunicaciones.

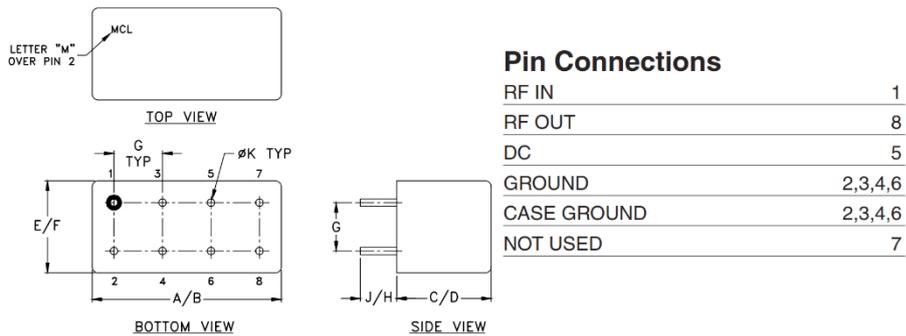


Figura 3-6 Disposición de pines de amplificador de bajo ruido

Fuente: Datasheet del dispositivo MAN – 1LN

FREQUENCY (MHz)	GAIN (dB)			DIRECTIVITY (dB)			VSWR (:1)		NOISE FIGURE (dB)	POUT at 1 dB COMPR. (dBm)
	11V	12V	12.5V	11V	12V	12.5V	IN	OUT		
0.50	29.88	31.30	31.73	13.20	12.90	12.60	1.35	1.67	—	8.01
1.90	30.44	31.89	32.32	12.50	12.10	11.60	1.13	1.18	—	8.42
11.40	30.58	32.02	32.45	12.50	11.70	11.40	1.04	1.05	2.82	8.32
68.30	30.71	32.13	32.54	12.70	11.50	11.50	1.07	1.05	2.91	8.54
192.60	30.89	32.27	32.66	12.20	11.00	11.10	1.18	1.12	2.81	8.47
243.80	30.93	32.30	32.69	11.60	10.40	10.90	1.24	1.15	2.84	8.45
307.90	30.94	32.29	32.68	11.30	10.40	10.30	1.31	1.23	2.88	8.50
371.90	30.90	32.20	32.58	11.10	9.90	10.30	1.39	1.30	2.95	8.45
436.00	30.82	32.07	32.42	10.40	10.20	9.80	1.45	1.31	3.01	8.49
500.00	30.63	31.80	32.12	9.30	7.80	7.30	1.50	1.46	3.08	8.52

Figura 3-7 Rangos de frecuencia y potencia de salida del amplificador de bajo ruido

Fuente: Datasheet del dispositivo MAN – 1LN

3.1.2. Antena Transmisora y Receptora

Como se ha expuesto anteriormente, la transmisión inalámbrica de energía se lo realiza a través de antenas microstrip. Ambas antenas, tanto de transmisión como de recepción usan el mismo diseño con el objetivo de cumplir la resonancia inductiva magnética.

Se considera para el proyecto, los diseños de antena de los trabajos investigados de (M. H. M. Salleh, N. Seman, y R. Dewan, 2013), (J. Wang, S.L.Ho, W.N. Fu, M. Sun, 2011), (X. Zhang, S. L. Ho and W. N. Fu, 2010), (M. Dadić, K. Petrović, R. Malarić, 2017) y (P. Yeole, 2013), como un circuito equivalente en inductores y capacitores denotado en la figura 3 – 11. De acuerdo al diseño, cuando el campo magnético del inductor colapsa, se induce una corriente eléctrica en el devanado que conduce a la carga del condensador, luego, cuando el condensador se descarga, la corriente eléctrica resultante crea un campo magnético en el inductor, para el siguiente ciclo, el proceso se repite una y otra vez por la naturaleza de la corriente alterna que actúa como fuente. La resonancia en el sistema ocurre, cuando la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva del circuito tienen la misma magnitud, dando como resultado la oscilación de la energía eléctrica entre los campos eléctricos y magnéticos del condensador y el inductor, respectivamente. En la resonancia, el inductor y el condensador tienen una impedancia en serie mínima y una impedancia en paralelo máxima, mientras que la reactancia inductiva y capacitiva son de igual magnitud.

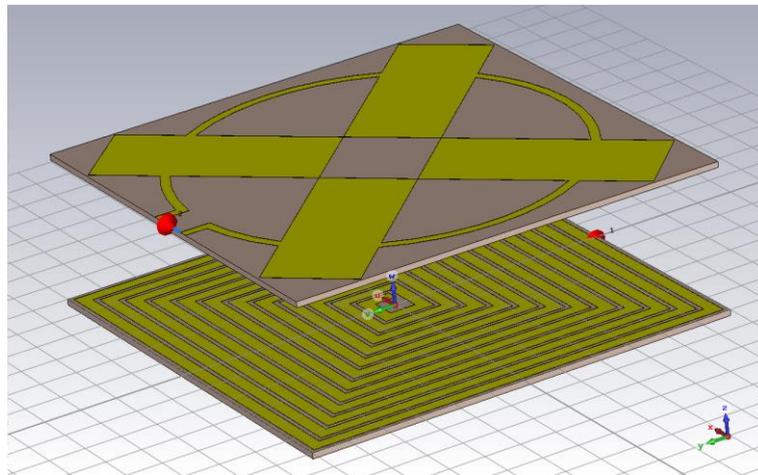


Figura 3-8 Alineación de la antenas, ambas separadas por un espacio de aire

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

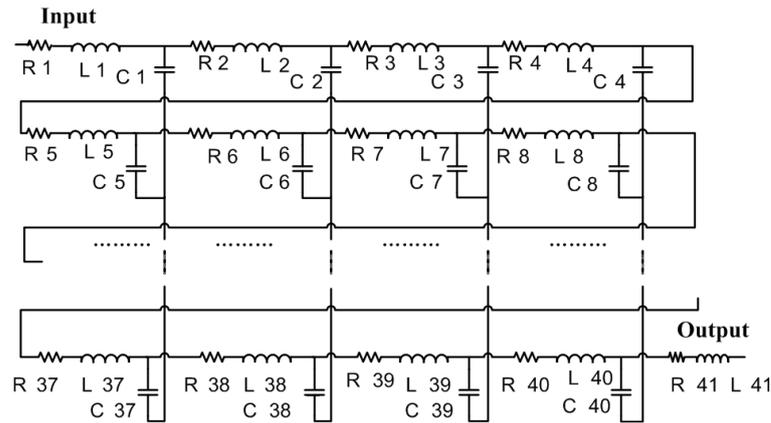


Figura 3-9 Circuito equivalente del diseño de las antenas

Fuente: H.Zhou, S.Yang, 2012

Acorde a H.Zhou, S.Yang, “Resonant Frequency Calculation of Witricity Using equivalent Circuit Model Combined with Finite Element Method,” el diseño del sistema de antenas resonantes, se considera como un circuito resistivo – inductivo – capacitivo, equivalente al representado en la figura 3 – 9, y a través del cual, se obtiene que:

$$\begin{aligned} \omega L &= \frac{1}{\omega C} \\ \omega^2 &= \frac{1}{LC} \\ \omega &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \\ f_r &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \end{aligned} \quad (1)$$

Donde,

- f_r es la frecuencia de resonancia, y es calculada usando la ecuación (1)
- C es la Capacitancia del sistema
- L es la Inductancia del sistema

Se observa que en la ecuación (1), f_r depende fuertemente de los valores de capacitancia e inductancia L . Se denota además que el valor de la capacitancia depende principalmente de las dimensiones de las tiras de cobre y del sustrato, mientras tanto que la inductancia depende del número de vueltas que actúan como bobinas situadas al otro lado de la antena.

3.1.2.1. Diseño de la bobina

Según (M. H. M. Salleh, N. Seman, and R. Dewan, 2013) se escogió la forma espiral – rectangular plana para el diseño debido a que tiene más ventajas con respecto a otras formas, como, la forma hexagonal, circular, de una sola espira, líneas serpenteantes o de alta impedancia según lo expuesto en (Iulian Rosu (2014), Microstrip, Stripline, and CPW Design), además, la forma espiral – rectangular, es más fácil de fabricar y tiene un uso más óptimo del espacio.

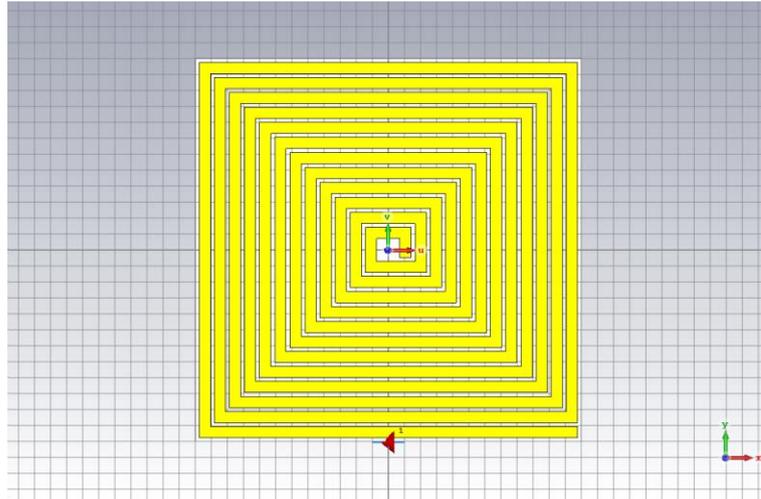


Figura 3-10 Espiras de la antena

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

El valor de la inductancia depende de las características de las espiras como la longitud de la tira de cobre y la geometría de la bobina que puede ser cuadrada, espiral o hexagonal. Para el efecto, se usa la fórmula de Wheeler (Zhang, LHo & Fu, 2011), y es calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$L_1 = K_1 \mu_0 \frac{n^2 (d_{out} + d_{in})}{2(1 + K_2 \rho)} \quad (2)$$

donde,

- L_1 representa la inductancia en el puerto 1
- μ_0 representa la permeabilidad en el espacio libre
- K_1 y K_2 son los coeficientes de diseño que dependen de la forma de la bobina y son iguales a 2.34 y 2.75, respectivamente para una bobina espiral rectangular.
- n representa el número de espiras de la bobina

- d_{out} y d_{in} representan el diámetro externo e interno de la bobina

La distancia de separación elegida entre cada giro de línea microstrip es de 1.2 mm, por una limitación práctica para la construcción de la antena. Se recalca, que la mencionada distancia incide en el número total de espiras que lleva la antena, la misma que afecta a la inductancia del sistema de acuerdo al valor de ρ , que es la relación de relleno del bobinado definido en (3), en donde un ρ pequeño indica un área de cobertura de la bobina reducido y un ρ grande ($\rho \approx 1$) indica un área cubierta de la bobina mucho mayor.

$$\rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} \quad (3)$$

El grosor del cobre es considerado una constante con un valor de 0.035 milímetros. Para observar el efecto de la inductancia se deberá incrementar o disminuir el número de vueltas en las bobinas de las antenas transmisora y receptora. Se puede deducir de la ecuación (2), que el incremento de espiras conduce a un incremento de la inductancia, ocasionando que el valor de la frecuencia de resonancia disminuya según la ecuación (1).

3.1.2.2. Diseño de los capacitores

En la figura 3 – 9, se describe la forma rectangular de la capacitancia del sistema de antenas. El sustrato utilizado para el proyecto es el Frame Retardant 4 (FR4) y cuenta con una permitividad eléctrica de $\epsilon_r = 4.3$ con grosor de 1.6 mm, además el conductor es hecho de cobre con un grosor de 0.035 mm. La selección del sustrato FR4 se debe a que es uno de los materiales de mayor asequibilidad en especial en el mercado ecuatoriano en donde es complicado encontrar elementos con aplicaciones específicas para radio frecuencia y también su costo es mucho más bajo en comparación con otros sustratos.

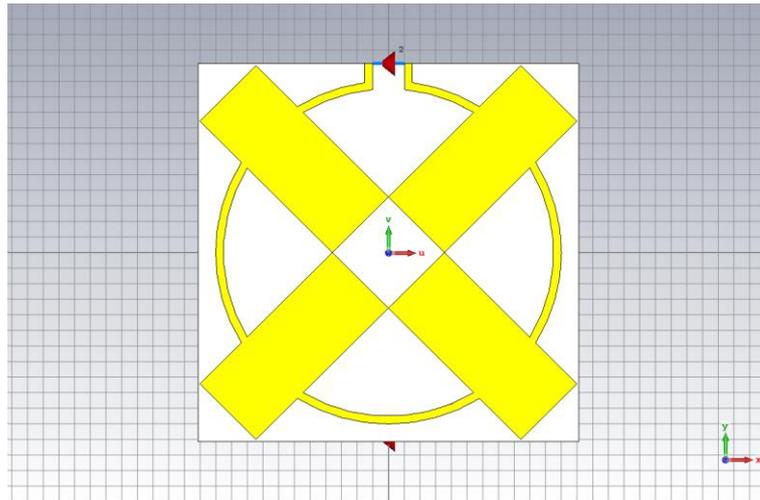


Figura 3-11 Vista de la capacitancia de la antena

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

En la cara superior de la antena transmisora, existen cuatro rectángulos de cobre actuando como capacitores. El valor de la capacitancia C , depende del área de cada rectángulo conductor (A), el grosor del aislante (d) y permitividad del sustrato (ϵ), mostrados en la ecuación (4). El efecto de los capacitores puede ser observado en la frecuencia de resonancia al variar sus valores.

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (4)$$

Se consideró como valores iniciales para las dimensiones de cada rectángulo de cobre de 35 mm x 20 mm, sin embargo, al utilizar la ecuación (4) y luego en (1), se obtuvo un valor de f_r no óptimo, por lo que se tuvo que modificar los valores a 59 mm x 25mm para alcanzar una frecuencia de resonancia más baja acorde a la frecuencia de la fuente. Los valores de las placas se asignaron empíricamente por parte del autor hasta encontrar una f_r deseada.

La espira de cobre que une los cuatro capacitores, según (M. H. M. Salleh, N. Seman, and D. N. A. Zaidel, 2014) sirve para conectar eléctricamente a los cuatro capacitores, en el caso de la antena transmisora, se enlaza con la fuente de alimentación, y en la antena receptora, transporta la señal obtenida a la carga.

Para analizar la eficiencia del sistema de transmisión inalámbrica de energía, se utilizan los parámetros de dispersión o comúnmente conocidos como los parámetros S . La pérdida por inserción (insertion loss), S_{21} y el coeficiente de reflexión (reflection coefficient o return loss), S_{11} , serán expuestos en el trabajo acorde a las ecuaciones (5) y (6) referenciadas del trabajo de investigación de M. H. M. Salleh, N. Seman, and R. Dewan (2013) :

$$\eta_{11} = |S_{11}|^2 \times 100\% \quad (5)$$

$$\eta_{21} = |S_{21}|^2 \times 100\% \quad (6)$$

En la ecuación (5), η_{11} , muestra la relación entre las cantidades de potencia reflejada y la entrada de potencia en el lado del transmisor, mientras que la ecuación (6), η_{21} , presenta las cantidades de la salida de potencia en el receptor debido a la entrada de potencia en el transmisor, ésta última se utilizará para medir la eficiencia del sistema, al calcular el porcentaje de energía recibida en el lado receptor.

3.1.3. Conversión a DC y amplificación

Es necesaria esta etapa a la salida de la antena receptora antes de la carga, debido a la baja intensidad de señal que recibirá la misma, por lo que esta etapa se encarga de amplificar y rectificar la señal de radio frecuencia recibida en un voltaje de corriente directa.

La figura 3 - 1 muestra un circuito básico rectificador doblador de voltaje (Zhang & Jia, 2010), (Ranum, Rahayu & Munir, 2015). Brevemente se describe su funcionamiento, cuando ingresa el pico negativo de la fuente AC, el diodo **D1** permite el flujo de corriente al capacitor **C_b**, cargándolo. Cuando la misma señal AC revierte la polaridad, el diodo **D1** se apaga, y **D2** a su derecha se enciende, de manera que la corriente emana en la fuente AC y **C_b**, cargando al capacitor **C_c**, y doblando la carga mantenida en **C_b**. El incremento en el voltaje es dos veces el voltaje de entrada, $V_{out} = V_{cc} = -2V1$. Debido al bajo voltaje de entrada que percibe el circuito rectificador doblador de voltaje, se utilizó 3 etapas del circuito de la figura 3 – 12, con el propósito de incrementar el voltaje de salida a la carga.

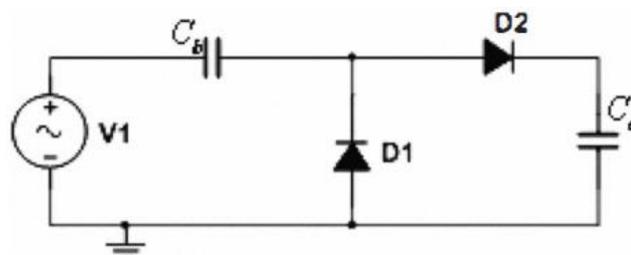


Figura 3-12 Circuito básico rectificador doblador de voltaje

Fuente: J. Zhang and Z. Jia, "Design of Voltage Doubling Rectifier Circuit in Wireless Sensor Networks"

Para la implementación del circuito descrito en la figura 3 – 12, se usó diodos Schottky, debido a su alta conmutación que permite detectar los rápidos cambios de pico de voltaje de radio frecuencia.

3.1.4. Carga

Para efectos de demostración del sistema de transmisión inalámbrico de energía, se utilizó como carga un Diodo Emisor de Luz, el cual se alimenta con la energía DC provista por la etapa rectificadora y amplificadora de la señal recibida inalámbricamente.

3.2. Diseño del sistema

La figura 3 - 13, muestra el diseño general del sistema de transmisión y el esquema de las antenas de transmisión y recepción, con los puertos Rx (de recepción de la señal transmitida), Tx (de transmisión de la señal) y medidas de las antenas en 3D.

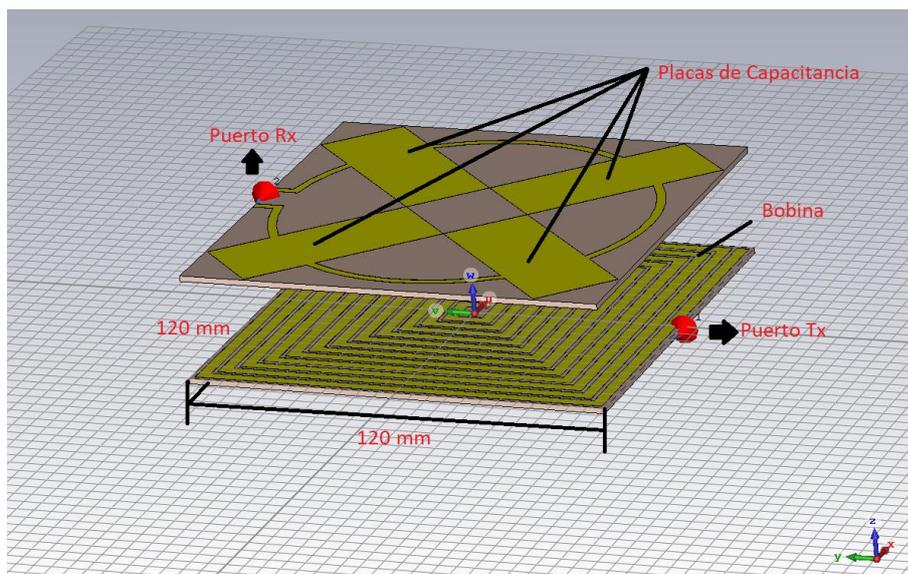


Figura 3-13 Antenas Rx y Tx separadas por un espacio de aire

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

Tanto el transmisor como el receptor se encuentran separadas por un espacio de aire que se varía entre 10 mm y 100 mm con el objetivo de medir la eficiencia del sistema en un rango de distancia típico en el uso de dispositivos de bajo consumo de potencia. Cada placa consiste de dos capas conductoras de cobre separadas por un aislante FR4. La capa superior de cobre mantiene el diseño espiral – rectangular de la bobina inductora (diseño similar de la bobina para Tx y Rx para cumplir el principio de resonancia), mientras que la capa inferior de cobre tiene cuatro tiras de cobre

dispuestas en forma rectangular estructuradas diagonalmente unidas por una bobina de una sola espira circular (espira en Tx y Rx).

Ambos dispositivos, transmisor y receptor, operan en una misma frecuencia, con el propósito de permitir que funcione apropiadamente la técnica de acoplamiento resonante magnético.

Al principio, se determinaron ciertos valores de partida para el sistema de transmisión inalámbrica, sin embargo, debido a las restricciones del mercado ecuatoriano en la obtención de materiales, así como la fabricación de elementos especiales, se optó por aumentar el tamaño de la antena hasta los 120 mm x 120 mm.

Por lo tanto, luego de un razonamiento de los nuevos valores, se determinaron los siguientes:

Tabla 3-1 Parámetros de diseño de las antenas Tx y Rx

Parámetro	Antenas Tx y Rx
Tamaño	120 mm x 120 mm
Numero de vueltas de la bobina espiral – rectangular	14
Ancho de las espiras de la bobina espiral rectangular	3.5 mm
Placa capacitiva	59 mm x 25 mm
Radio interno de la única espira circular	52 mm
Ancho de la única espira circular	2.5 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

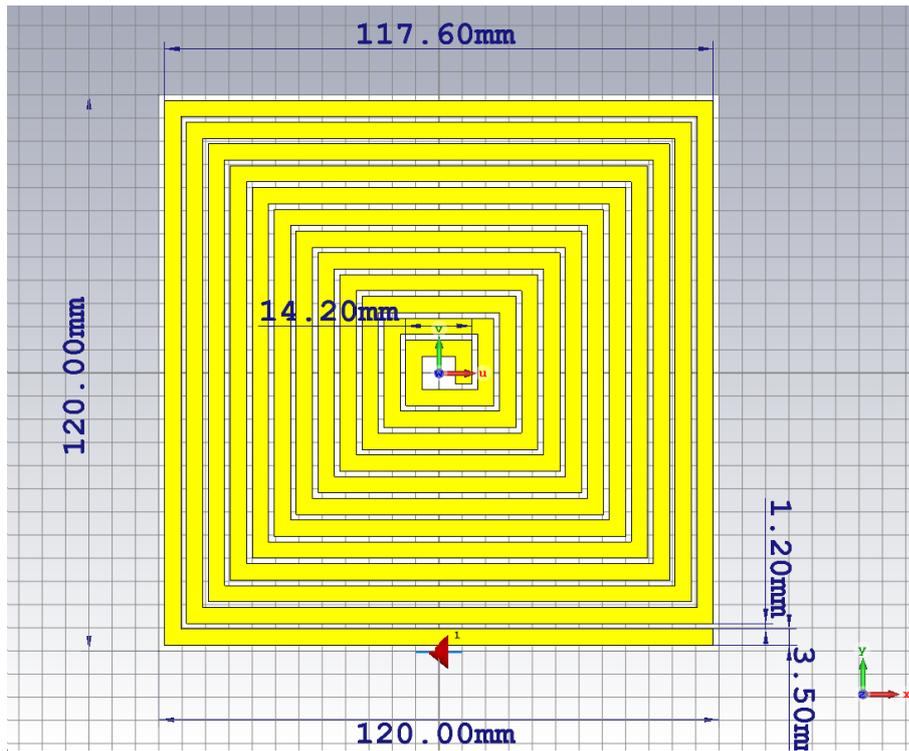


Figura 3-14 Parámetros de diseño de las antenas Tx y Rx (vista superior)

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

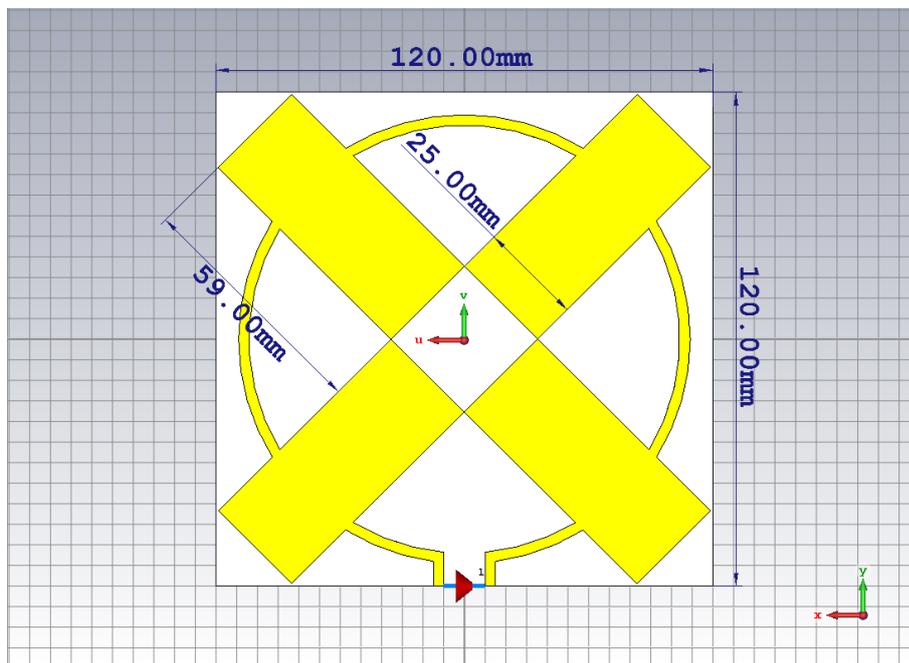


Figura 3-15 Parámetros de diseño de las antenas Tx y Rx (vista inferior)

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

Con los datos anteriores, se procede a obtener la frecuencia de resonancia del sistema de transmisión inalámbrica de energía, es así, que mediante la ecuación (2) se obtiene:

$$L = K_1 \mu_0 \frac{n^2 (d_{out} + d_{in})}{2(1 + K_2 \rho)}$$

$$L = (2.34)(1.2566 \times 10^{-6} \text{NA}^{-2}) \frac{14^2 (117.6 \times 10^{-3} \text{m} + 14.2 \times 10^{-3} \text{m})}{2(1 + (2.75)(0.78452203))}$$

$$L = 1.20290 \times 10^{-5} \text{H}$$

De igual forma de la ecuación (4) se obtiene el valor de la capacitancia, y basándose en la tabla 3 – 1, se obtiene lo siguiente:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

$$C = (4.3) \frac{(59 \text{ mm} \times 25 \text{ mm})}{(1.6 \text{ mm})}$$

$$C = 3.9640625 \text{ uF}$$

Con los datos obtenidos de la Inductancia y Capacitancia del sistema de antenas, se reemplaza en la ecuación (1) para encontrar la frecuencia de resonancia:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(1.20290 \times 10^{-5} \text{H})(3.9640625 \text{uF})}}$$

$$f_r = 23.0480 \text{ MHz}$$

Con los valores obtenidos anteriormente, se establece el punto de partida para la realización de la simulación.

3.3. Construcción del sistema

Se utilizaron dos conectores SMA hembras como puertos, para las antenas con sus respectivos claves coaxiales. Además, la conexión se aplicó únicamente a la espira que conecta a las placas

que actúan como capacitores, para que, mediante inducción, se transfiera la energía al elemento inductivo de la antena y posteriormente atravesase una corta distancia de aire hacia el receptor, como se muestra en la figura 3 – 16.

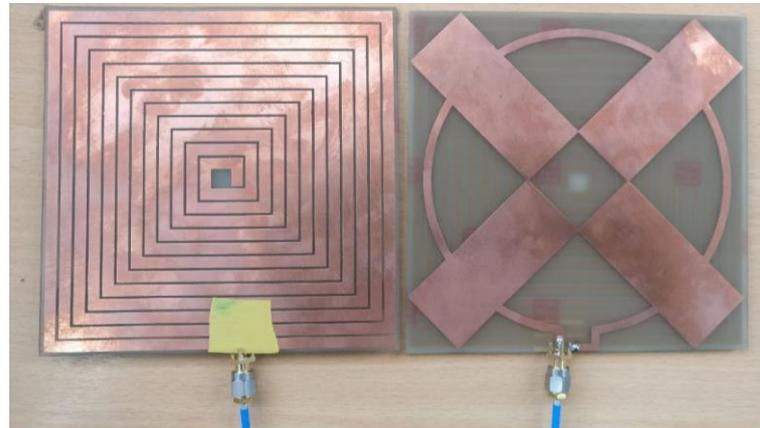


Figura 3-16 Antenas impresas en el sustrato FR4

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

Debido al encapsulamiento total en los integrados MMIC, la implementación de la etapa que comprende la generación de radio – frecuencia y amplificación, es relativamente fácil, ya que, solamente se debe alimentar con 5V los integrados para que éstos funcionen, adicionalmente, para la variación de frecuencia, se aplica distintos valores de voltaje en un pin específico del integrado.

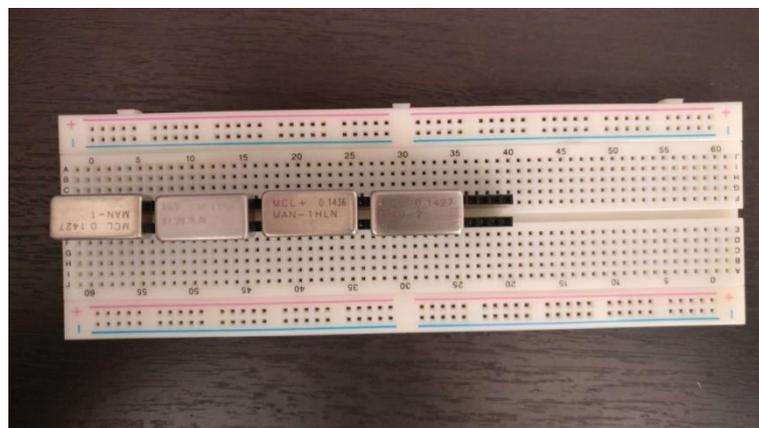


Figura 3-17 Generadores MMIC de radio - frecuencia y amplificación

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

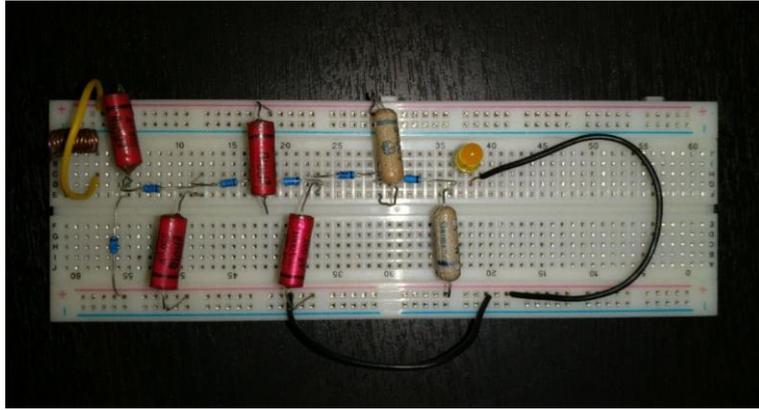


Figura 3-18 Circuito doblador – rectificador de voltaje

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Simulación

Los resultados están divididos en dos partes. La primera, se centra en la representación gráfica de la corriente superficial en las antenas y la segunda en los parámetros de dispersión – S, ambas partes, definen la eficiencia del sistema con distancias de separación que oscilan entre los 10 mm y los 100 mm. La distancia de hasta los 100 mm, se la toma en cuenta debido a las limitaciones del acople magnético a transmitir energía a largas distancias, además, se debe tomar en cuenta, que las distancias propuestas son apegadas a la realidad en caso de la utilización comercial del proyecto.

La corriente superficial indica el nivel de densidad de corriente y la distribución de la misma sobre la superficie del conductor de cobre durante el proceso de transferencia. La secuencia de colores como se muestra en la figura 4 - 1, se utiliza para comprender de mejor manera la distribución de la corriente medida en [A/m] (Amperios/metro) conforme al Sistema Internacional. La escala está fijada en valores comprendidos desde 0 [A/m] hasta los 30 [A/m].

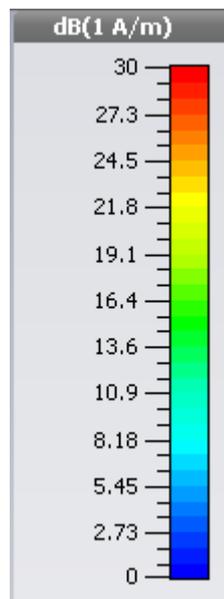


Figura 4-1 Escala utilizada para medir la distribución de corriente en las antenas Rx y Tx

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

El parámetro S_{21} es usado para analizar la eficiencia del sistema como se indicó en la ecuación (6). Dicha ecuación (6), presenta la eficiencia de la potencia de salida en el receptor tomando como referencia la potencia de entrada en el transmisor.

4.1.1. Corriente Superficial

De las figuras 4 – 2 a la 4 – 11, se expone la distribución de corriente en la superficie conductora del sistema de transmisión inalámbrica, las mismas que abarcan distancias desde los 10 mm hasta los 100 mm en pasos de 10 mm, entre las antenas Tx y Rx. Cada figura representa la transferencia de energía a una frecuencia de resonancia correspondiente a la distancia establecida, es decir, a la máxima transferencia posible de energía en cada una de las distancias simuladas.

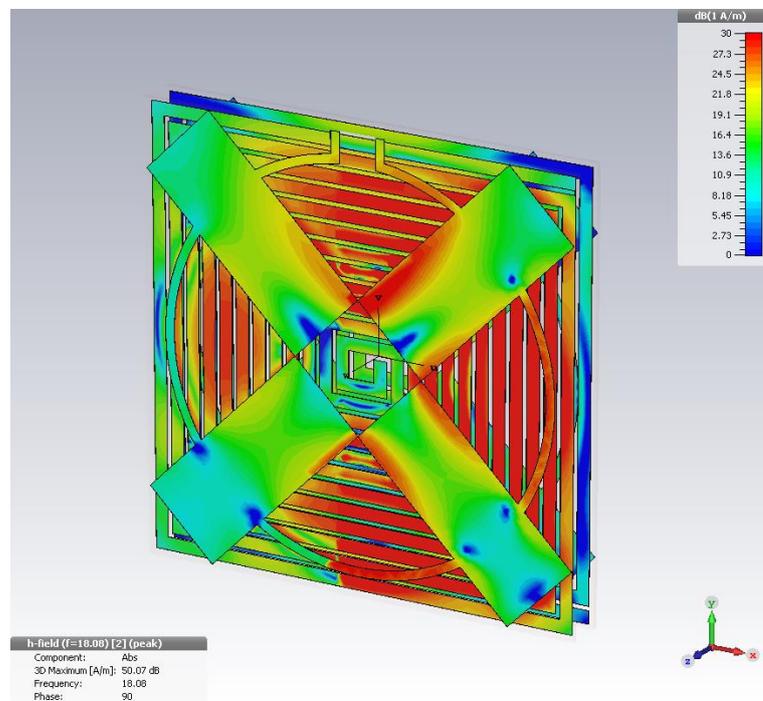


Figura 4-2 Distribución de corriente superficial a una distancia de 10 mm entre Tx y Rx

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

La más alta densidad de corriente superficial se puede observar en la figura 4 - 2, el cual refleja el más alto valor de potencia recibida, la misma, que está concentrada en el área media de la antena.

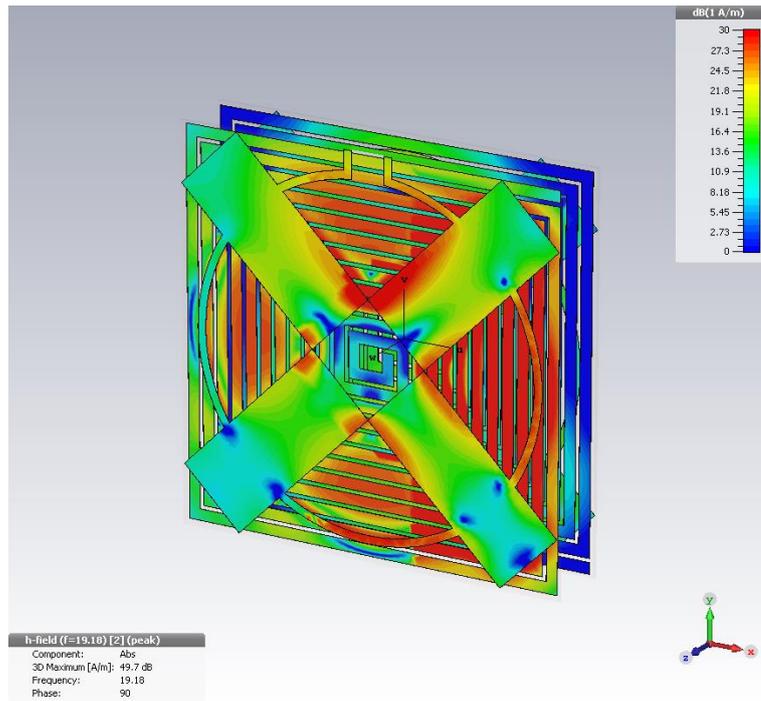


Figura 4-3 Distribución de corriente a una distancia de 20 mm entre Tx y Rx

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

Por otra parte, en la figura 4 - 3, la densidad de corriente decae levemente, se puede notar fácilmente en el área media del dispositivo, que el color predominante es el azul, que corresponde a una zona baja de 8 dB.

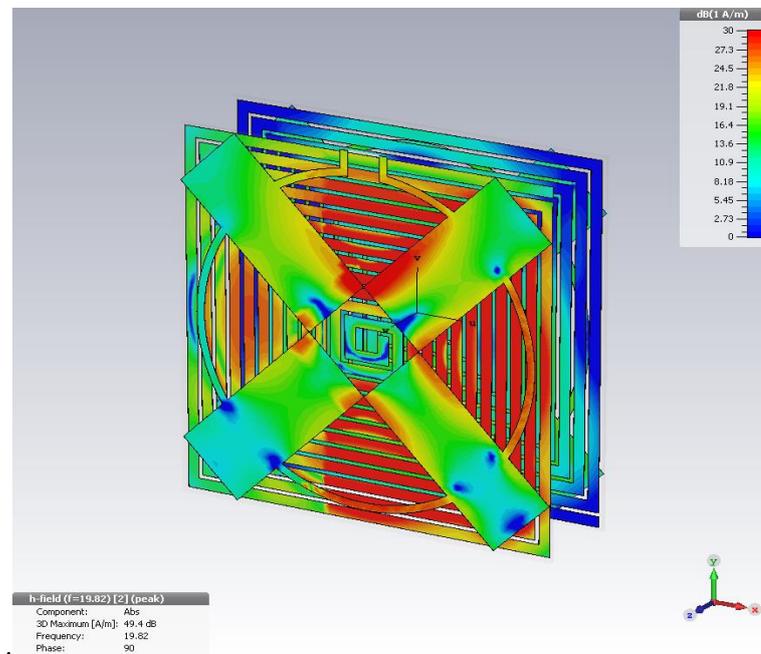


Figura 4-4 Distribución de corriente superficial a una distancia de 30 mm entre Tx y Rx

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

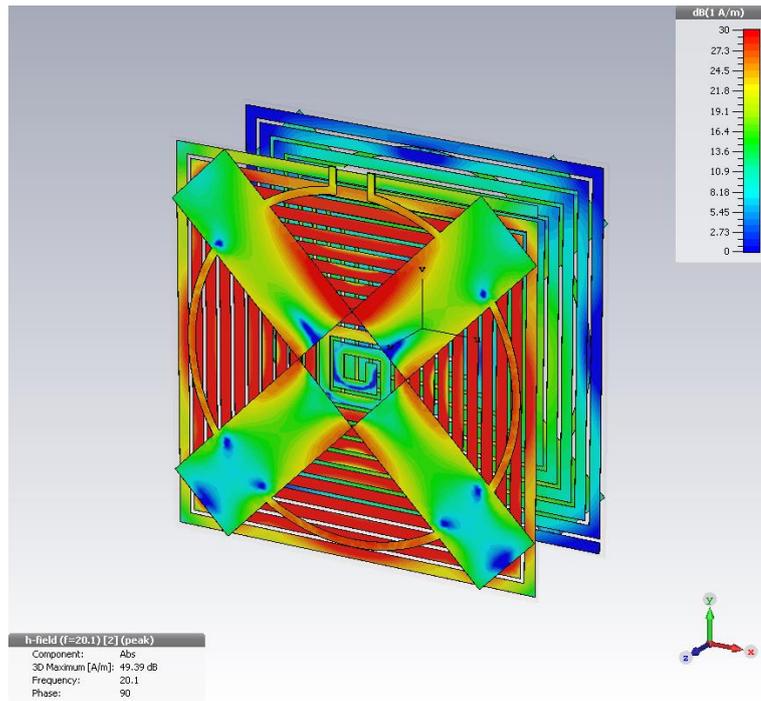


Figura 4-5 Distribución de corriente superficial a una distancia de 40 mm entre Tx y Rx

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

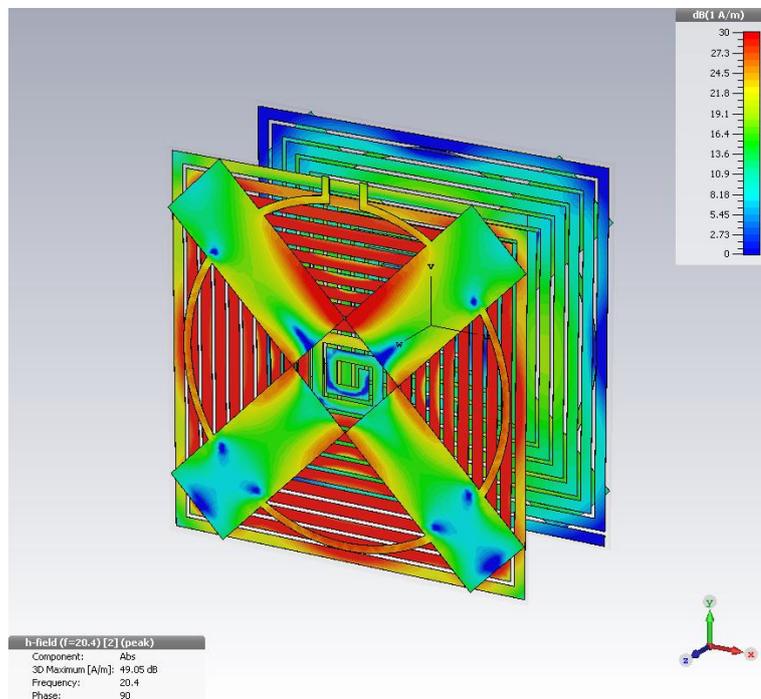


Figura 4-6 Distribución de corriente superficial a una distancia de 50 mm entre Tx y Rx

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

De las figuras 4 – 4 a 4 – 6, se observa un patrón similar en la corriente superficial, es decir, existe un eficiente acople magnético desde los 30 mm hasta los 50 mm.

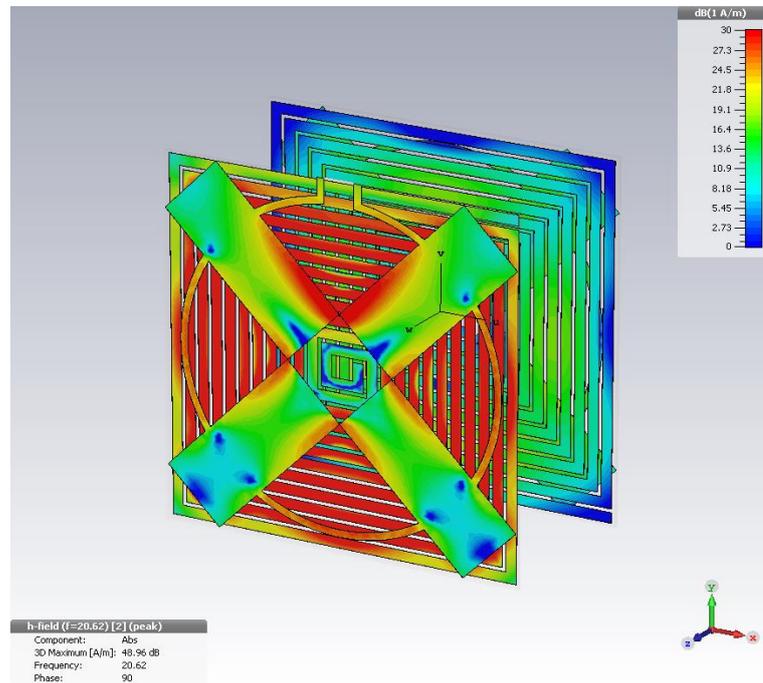


Figura 4-7 Distribución de corriente superficial a una distancia de 60 mm entre Tx y Rx

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

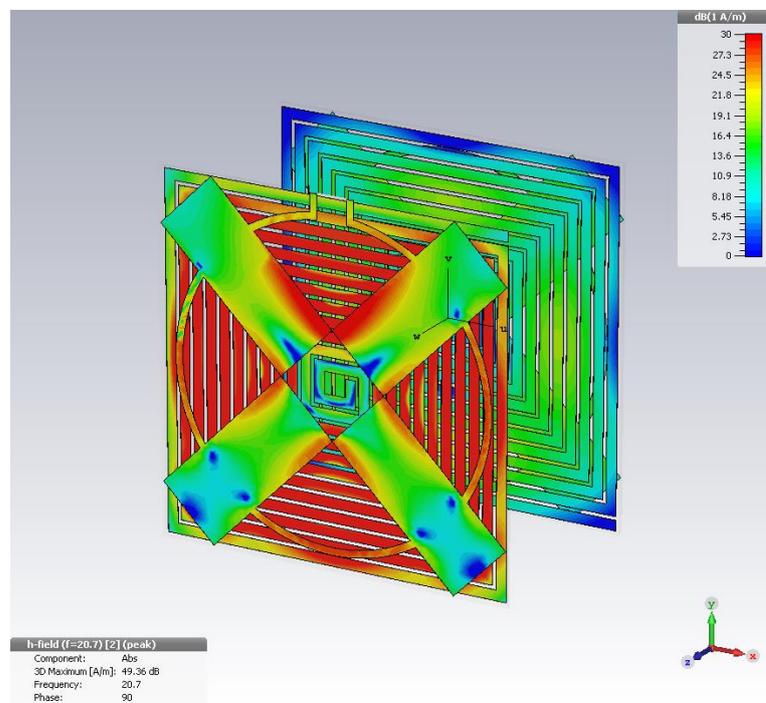


Figura 4-8 Distribución de corriente superficial a una distancia de 70 mm entre Tx y Rx

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

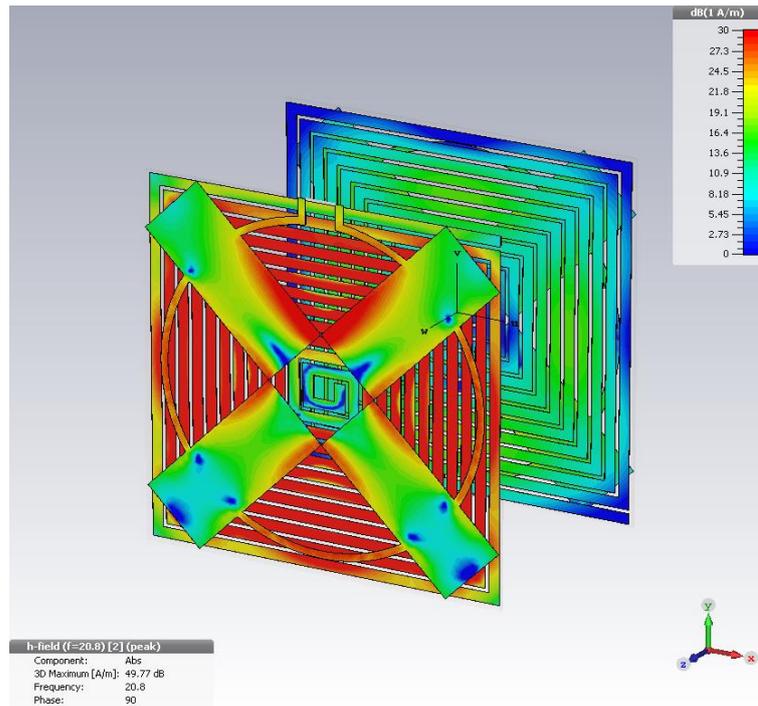


Figura 4-9 Distribución de corriente superficial a una distancia de 80 mm entre Tx y Rx

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

De las figuras 4 – 7 a 4 – 9, se sigue observando un intercambio de energía sostenible, a pesar que se nota un ligero descenso en la transferencia.

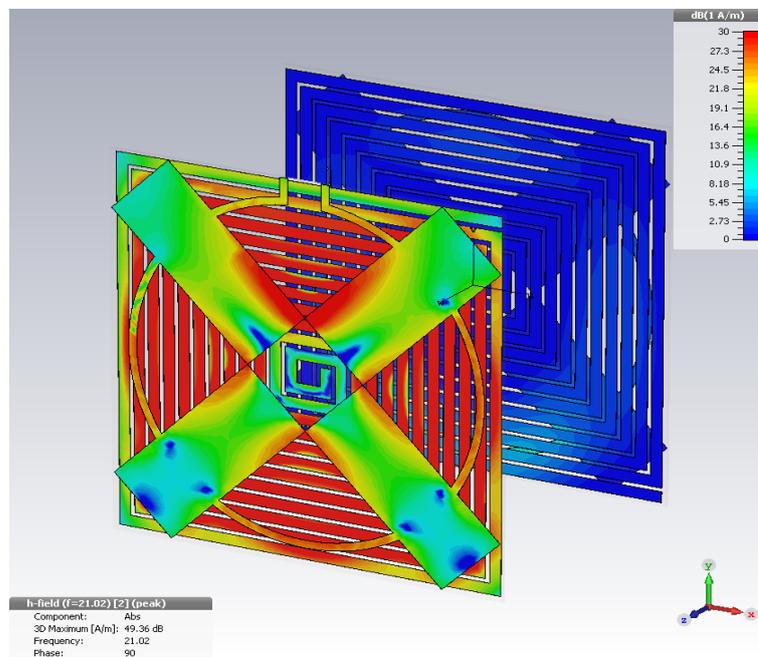


Figura 4-10 Distribución de corriente superficial a una distancia de 90 mm entre Tx y Rx

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

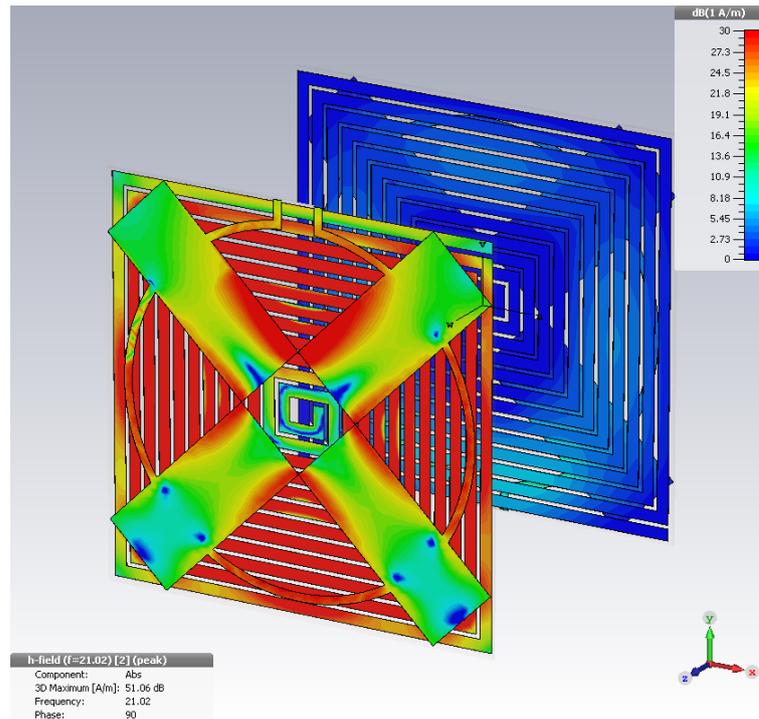


Figura 4-11 Distribución de corriente superficial a 100 mm entre Tx y Rx

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

En las figuras 4 – 10 y 4 – 11, se observa un drástico cambio en la densidad de corriente superficial, observando una cantidad más baja de corriente, lo cual indica, que el sistema tiende a experimentar una menor ganancia de potencia para distancias mayores a 80 mm.

4.1.2. Parámetros de dispersión

Para entender los parámetros de dispersión – S, de manera numérica, S_{nn} , representa la potencia reflejada en el puerto n^{th} de la antena radiadora, mientras que S_{nm} , representa la potencia transmitida desde el puerto m^{th} al puerto n^{th} .

En la simulación, el puerto 1, está configurado como puerto de entrada, en donde, la potencia “entra” al parche microstrip radiante, y el puerto 2, actúa como puerto de salida, en donde, la potencia es obtenida inalámbricamente desde la antena transmisora. Si el valor de S_{11} , es muy bajo y el valor de S_{21} , es cercano a los 0 dB, entonces significa que la antena radiante microstrip funciona apropiadamente y los valores de recepción inalámbricos son adecuados para alimentar el circuito de amplificación en la implementación. Por lo tanto, los valores S_{11} y S_{21} , serán indicadores clave en la evaluación del rendimiento del sistema.

Desde la figura 4 – 12 hasta la 4 – 21, se presentan los valores de S_{21} , (es decir la cantidad de energía que sale desde el puerto 1 – Tx hasta el puerto 2 – Rx) en valores lineales, con el propósito de conocer en valores porcentuales el rendimiento del sistema.

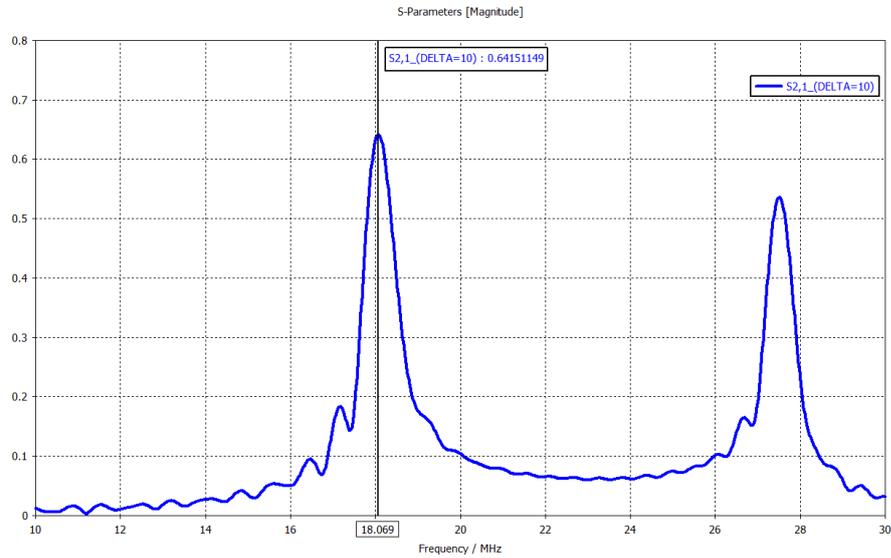


Figura 4-12 Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 10 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

A la distancia de 10 mm, se observa dos frecuencias de operación del sistema de antenas, la primera y la cual tiene una mayor potencia a 18.069 MHz con un valor $S_{21} = 0.6415$ y la otra a 27.52 MHz.

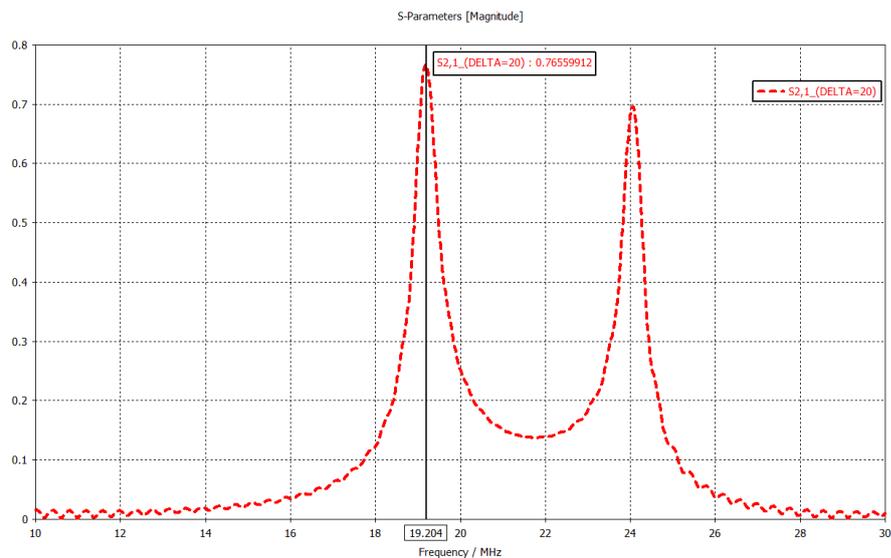


Figura 4-13 Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 20 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

De la figura 4 – 13, se observa un comportamiento similar, con dos frecuencias de funcionamiento, la primera con una mejor eficiencia a 19, 204 MHz con $S_{21} = 0.7655$ y la otra a 24.06 MHz.

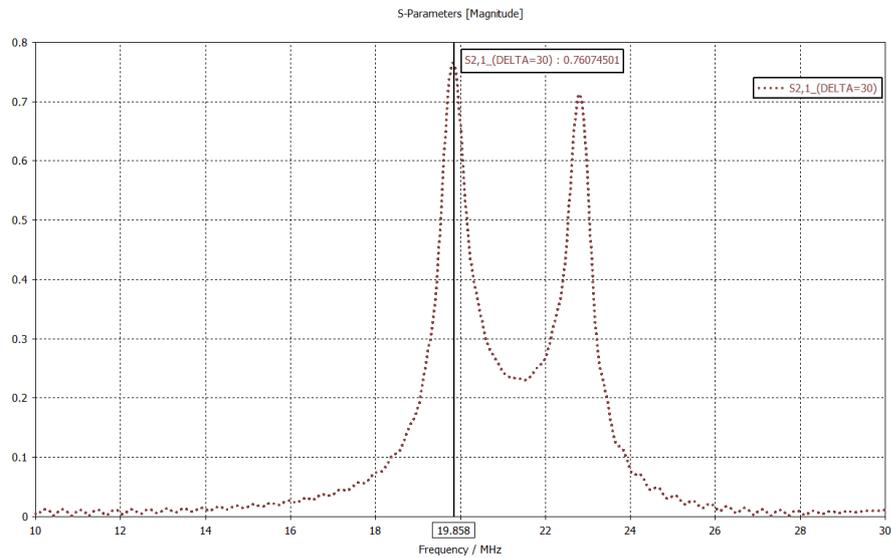


Figura 4-14 Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 30 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

Con una separación de 30 mm, la eficiencia del sistema se mantiene con un valor de $S_{21} = 0.7607$ a 19.858 MHz, y con una segunda frecuencia resonante de 22.82 MHz.

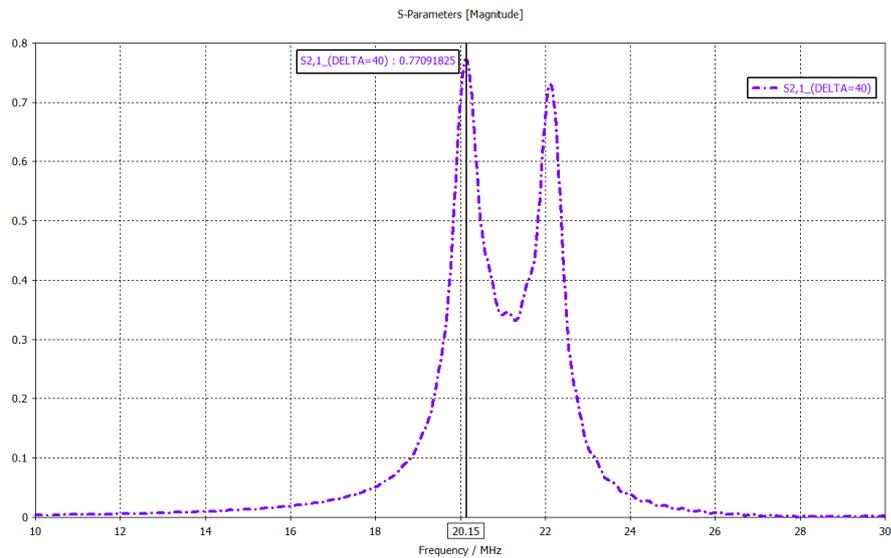


Figura 4-15 Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 40 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

De la figura 4 – 15, se observa una eficiencia similar a 20.15 MHz con un valor de $S_{21} = 0.7709$, también se nota una segunda frecuencia de resonancia a 22.14 MHz.

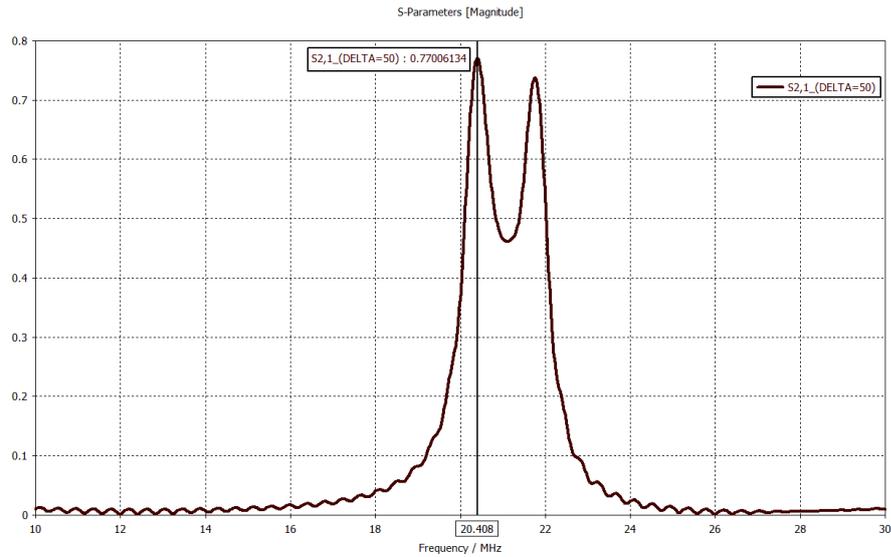


Figura 4-16 Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 50 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

De la figura 4 – 16, se observa que la mejor eficiencia se da a 20.408 MHz con un valor de $S_{21} = 0.7700$, con una segunda frecuencia de resonancia de 21.8 MHz

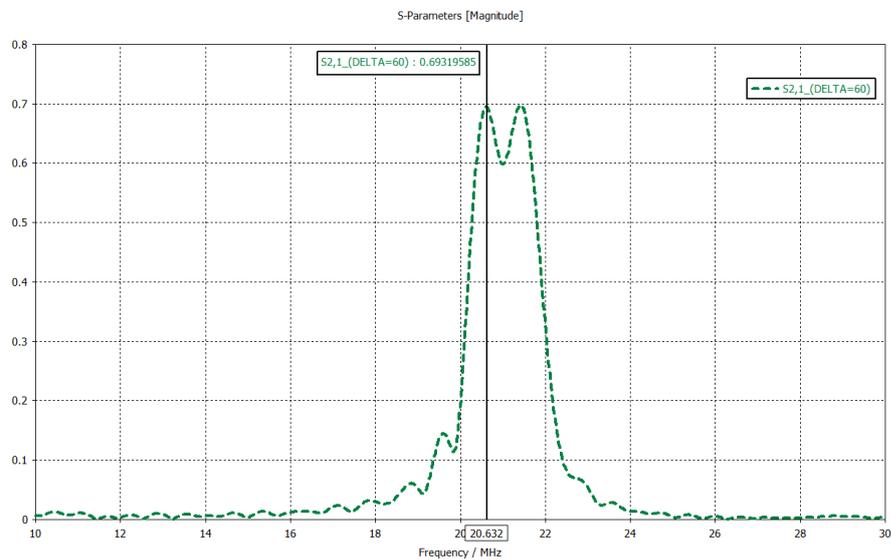


Figura 4-17 Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 60 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

A la distancia de 60 mm se evidencia que a las frecuencias de 20.632 MHz y 21.56 MHz, se da un mismo valor de $S_{21} = 0.6931$.

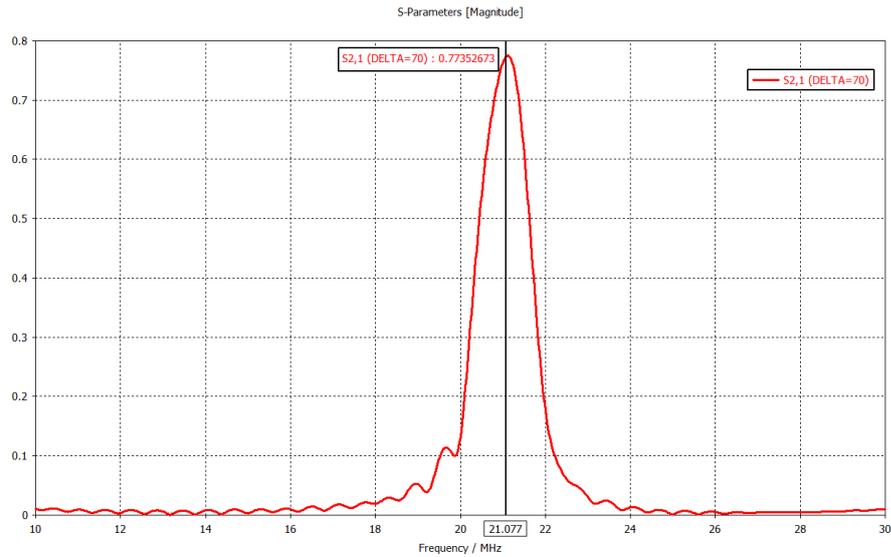


Figura 4-18 Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 70 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

En la figura 4 – 18, se observa que el sistema solamente responde a una sola frecuencia de resonancia equivalente a 21.07 MHz con un valor $S_{21} = 0.7735$

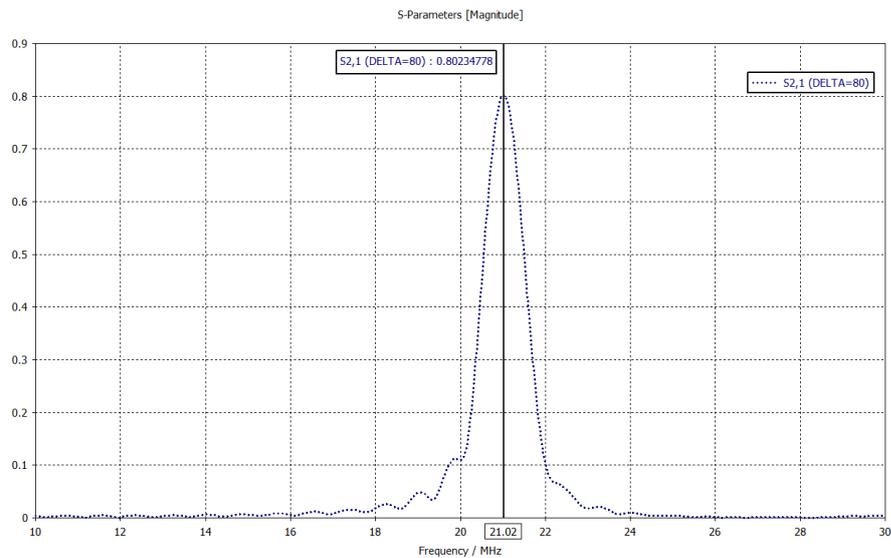


Figura 4-19 Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 80 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

De la figura 4 – 19, se evidencia que el sistema tiene una frecuencia de resonancia de 21.02 MHz con un valor de $S_{21} = 0.8023$.

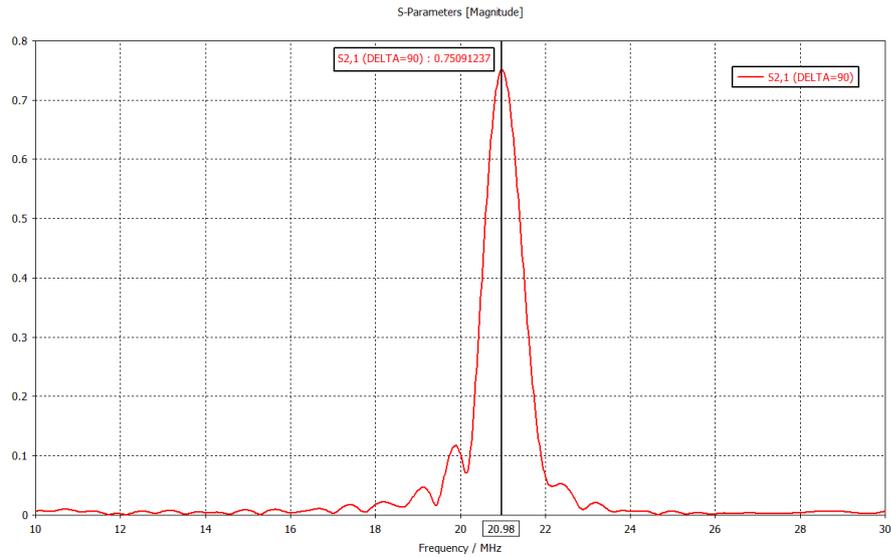


Figura 4-20 Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 90 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

A la distancia de 90 mm, el sistema resuena a 20.98 MHz con un valor de $S_{21} = 0.7509$.

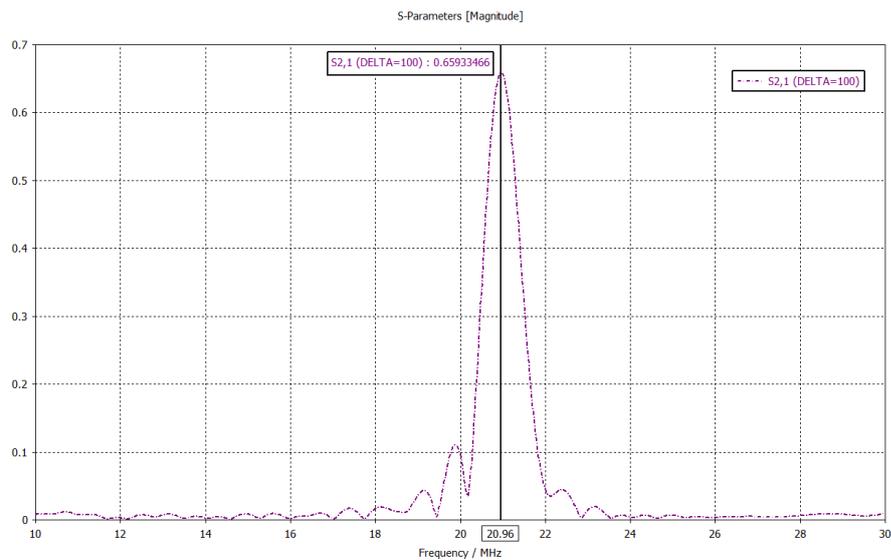


Figura 4-21 Resultados simulados del sistema radiante para una separación de 100 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

Finalmente, a una distancia de 100 mm, la frecuencia de resonancia del sistema se ubica en 20.96 MHz, con un valor menor de $S_{21} = 0.6593$.

De los valores obtenidos anteriores, se desprende la tabla comparativa 4 – 1, haciendo uso de la ecuación (6).

Tabla 4-1 Valores de eficiencia de sistema de acuerdo a la distancia de separación

Distancia de separación (mm)	Frecuencia de Operación (MHz)	S_{21}	Eficiencia del sistema η_{21} (%)
10	18.069	0.6415	41.15
20	19.204	0.7655	58.59
30	19.858	0.7607	57.86
40	20.15	0.7709	59.42
50	20.408	0.7700	59.29
60	20.632	0.6931	48.03
70	21.12	0.7749	60.04
80	21.02	0.8024	64.38
90	20.98	0.7509	56.38
100	20.96	0.6592	43.45

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

De la tabla 4 -1, se puede observar que a medida que se aumenta la distancia de separación entre las antenas radiantes, su frecuencia de resonancia varía hasta el valor calculado y en el cual trabajara si no estuviera en acoplamiento con otra antena. Además, según lo explicado anteriormente, debido a la cercanía entre las dos antenas, la distancia de 10 mm, provoca que exista un sobre – acoplamiento, lo que causa que gran parte del campo magnético se refleje en dirección contraria a la definida, lo que, a la vez, incide en un bajo porcentaje de eficiencia del sistema.

Por otra parte, se puede observar, que los resultados de la simulación indican que, entre el espacio de 20 mm a 50 mm, existe una eficiente transferencia de energía, sin embargo, de las gráficas se desprende que el ancho de banda disminuye conforme la distancia aumenta, adicionalmente, se evidencia una mejora del funcionamiento del sistema entre los 70 mm y 80 mm, situación que difiere de con los resultados medidos de la implementación.

A continuación, se observa el mismo parámetro S_{21} en escala logarítmica, para verificar que el sistema es adecuado para implementarlo.

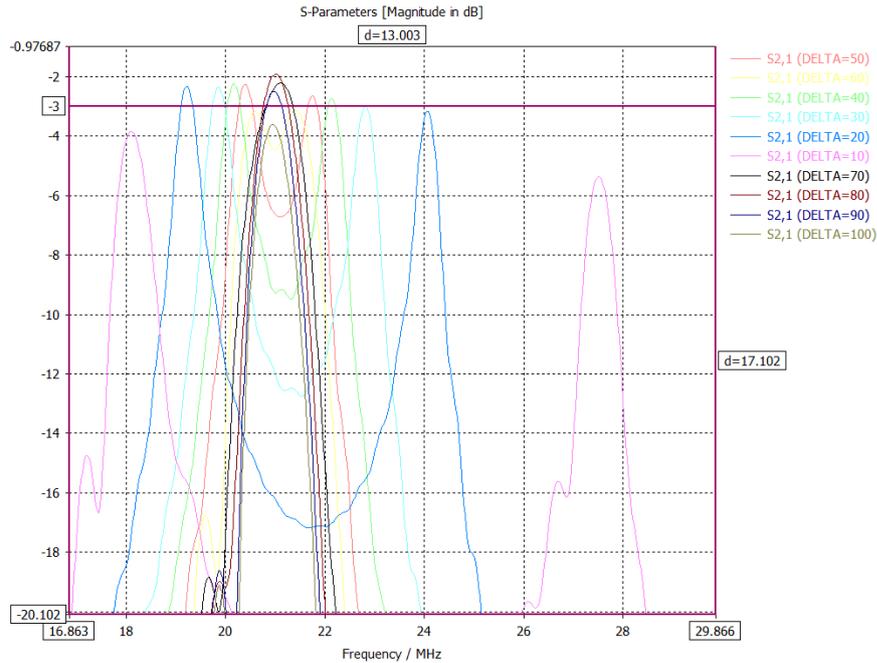


Figura 4-22 Comparación de los resultados simulados entre 10 mm a 100 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

En referencia a la figura 4 - 22, las curvas indican que existe un buen acoplamiento en el sistema, nótese la línea de -3 dB que indica el rendimiento del 50% del sistema. Los resultados de la simulación indican como ya se analizó anteriormente, que el mejor acoplamiento existe entre el espacio comprendido entre los 20 mm y 50 mm, con un pico máximo en los 40 mm con una eficiencia de 59.42% y un ancho de banda efectivo entre los 20.15 MHz hasta los 22.2 MHz.

Se demuestra mediante la simulación que el sistema propuesto transfiere energía inalámbricamente hasta los 100 milímetros de distancia entre las antenas con más del 40 % de eficiencia del acoplamiento, y el cual también concuerda con los gráficos de corriente superficial mostrados al inicio del capítulo.

Los coeficientes de reflexión del transmisor y receptor cuando se encuentran acoplados se muestran en las figuras 4 – 22 y 4 – 23 respectivamente. Un valor positivo más grande de pérdida de retorno, indica una pequeña cantidad de potencia relativa reflejada a su potencia incidente. Se puede observar que, a distancias entre 20 mm y 50 mm, cumplen con superar la referencia de los 10 dB.

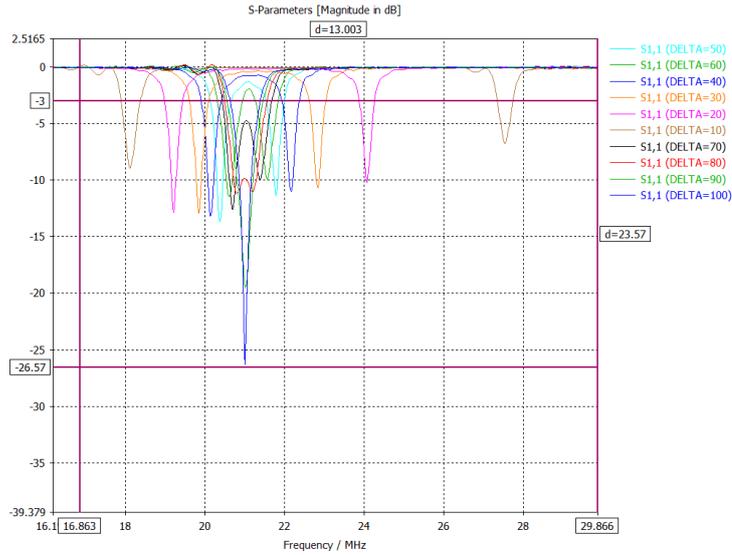


Figura 4-23 Comparación de los resultados simulados entre de 10 mm a 100 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

La pérdida de retorno en el lado del receptor en la simulación (Puerto 2 o Rx) se muestra en la figura 4 – 24, basado en la magnitud de su coeficiente de reflexión. Puede observarse que la frecuencia de resonancia incrementa conforme se aumenta la distancia de separación entre las dos antenas radiantes, con una aceptable pérdida de retorno superior a los 10 dB, lo cual indica que existe un eficiente acople de impedancias del receptor a cada una de las distancias medidas.

Por lo tanto, los datos de la simulación indican que existe un buen rendimiento de pérdida de retorno en el puerto 2 (Rx) a distancias de 10 mm a 100 mm.

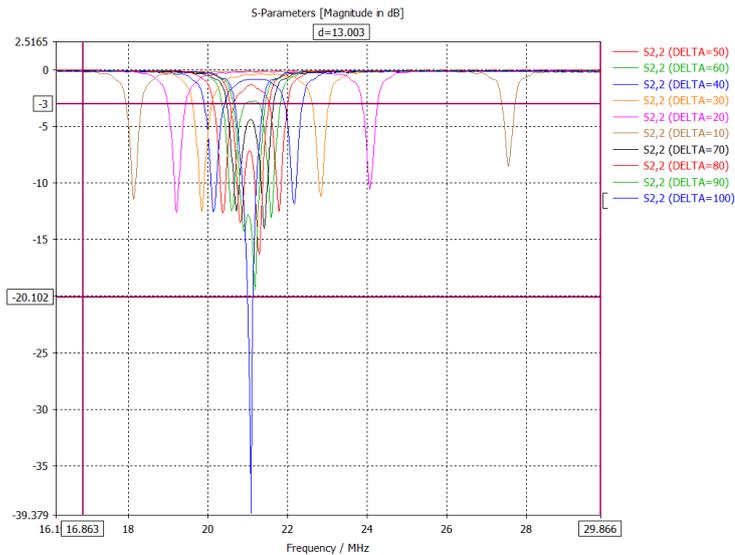


Figura 4-24 Comparación de los resultados simulados entre de 10 mm a 100 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

4.2. Implementación del sistema

Para la medición de resultados, se utilizó un osciloscopio y un generador de señales para proveer el voltaje y frecuencia necesarios para la transmisión. Como carga se ocupó un diodo LED de baja potencia con la ayuda del circuito doblador – rectificador de voltaje.

En el aspecto practico, las medidas resultaron ser menores de lo esperado, con una eficiencia inferior de la simulación, pero que, sin embargo, debido a la amplificación en la recepción, se logró recuperar la señal para la resistencia de carga.

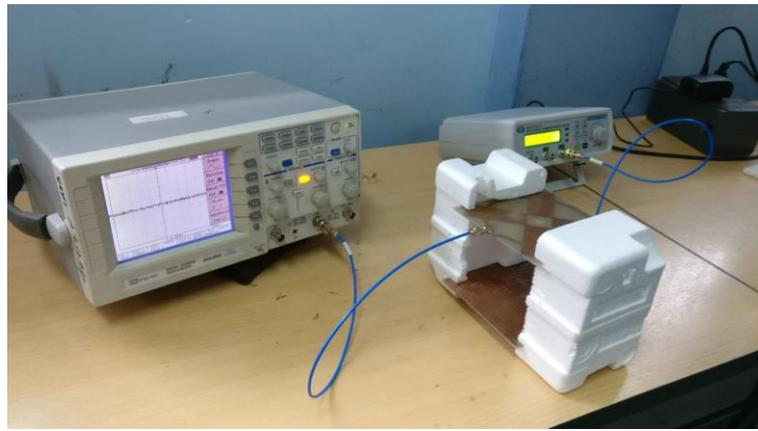


Figura 4-25 Implementación del sistema de antenas

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

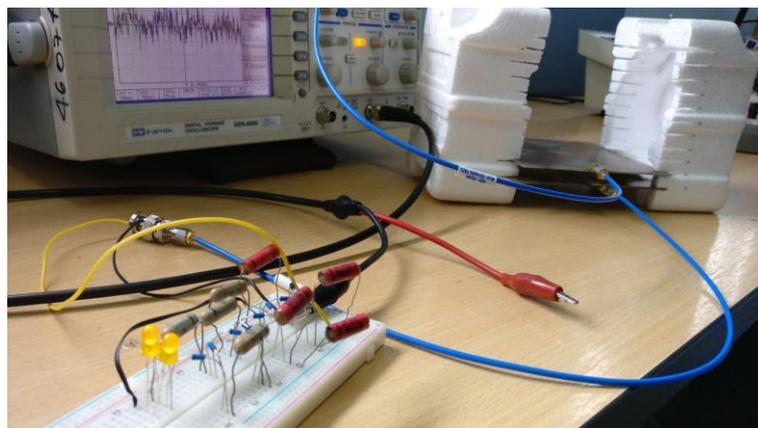


Figura 4-26 Medición de los valores de voltaje transmitidos con un osciloscopio

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

4.2.1. Medición de resultados del sistema de antenas

Se detalla a continuación, valores obtenidos de voltaje transmitidos a distintas distancias de separación comprendidas entre los 10 mm y 100 mm. Se consideran los voltajes pico – pico y efectivo rms para la recepción.

Tabla 4-2 Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 10 mm

Distancia (mm)	Frecuencia de operación (MHz)	Vpp Rx (mV)	Vrms Rx (mV)	Ancho de banda	Frecuencia de transferencia máxima
10	13	1040	280	12 MHz - 24.7 MHz	15.7 MHz / 4240 Vpp / 1440 Vrms
10	13,5	1260	340		
10	14	1400	439		
10	14,5	1300	473		
10	15	1940	690		
10	15,5	3520	1250		
10	16	3040	1030		
10	16,5	1440	454		
10	17	900	277		
10	17,5	680	185		
10	18	580	141		
10	18,5	500	139		
10	19	580	177		
10	19,5	640	191		
10	20	780	191		
10	20,5	1020	313		
10	21	1380	418		
10	21,5	1060	336		
10	22	720	190		
10	22,5	560	115		
10	23	480	114		
10	23,5	360	86		
10	24	340	76		
10	24,5	320	62		
10	25	480	117		

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

Tabla 4-3 Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 20 mm

Distancia (mm)	Frecuencia de operación (MHz)	Vpp Rx (mV)	Vrms Rx (mV)	Ancho de banda	Frecuencia de transferencia máxima
20	15	1040	322	13 MHz - 22.5 MHz	16.9 MHz / 3620 Vpp / 1280 Vrms
20	15,5	1080	360		
20	16	1420	499		
20	16,5	2380	849		
20	17	3620	1250		
20	17,5	2160	680		
20	18	1380	408		
20	18,5	1000	291		
20	19	760	235		
20	19,5	600	193		
20	20	600	187		
20	20,5	580	181		
20	21	700	214		
20	21,5	940	293		
20	22	1700	511		
20	22,5	1820	598		
20	23	1460	433		
20	23,5	980	368		
20	24	800	185		
20	24,5	740	207		
20	25	760	191		

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

Tabla 4-4 Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 30 mm

Distancia (mm)	Frecuencia de operación (MHz)	Vpp Rx (mV)	Vrms Rx (mV)	Ancho de banda	Frecuencia de transferencia máxima
30	15	640	176	13.9 MHz - 25 MHz	17.5 MHz / 3400 Vpp / 1200 Vrms
30	15,5	780	247		
30	16	920	278		
30	16,5	1280	386		
30	17	2080	665		
30	17,5	3400	1200		
30	18	2240	763		
30	18,5	1500	497		
30	19	1300	391		
30	19,5	1240	388		
30	20	1400	438		

30	20,5	2180	675
30	21	1320	464
30	21,5	760	225
30	22	640	154
30	22,5	700	180
30	23	1060	337
30	23,5	1160	372
30	24	920	278
30	24,5	840	255
30	25	880	285

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

Tabla 4-5 Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 40 mm

Distancia (mm)	Frecuencia de operación (MHz)	Vpp Rx (mV)	Vrms Rx (mV)	Ancho de banda	Frecuencia de transferencia máxima
40	15	440	120	15.1 MHz - 21.6 MHz	17.9 MHz / 3260 Vpp / 1140 Vrms
40	15,5	560	163		
40	16	700	195		
40	16,5	860	250		
40	17	1200	384		
40	17,5	2240	765		
40	18	3160	1100		
40	18,5	2060	700		
40	19	1780	575		
40	19,5	2040	658		
40	20	2180	768		
40	20,5	1020	330		
40	21	580	166		
40	21,5	420	112		
40	22	380	104		
40	22,5	420	130		
40	23	640	172		
40	23,5	960	319		
40	24	780	235		
40	24,5	680	207		
40	25	600	150		

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

Tabla 4-6 Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 50 mm

Distancia (mm)	Frecuencia de operación (MHz)	Vpp Rx (mV)	Vrms Rx (mV)	Ancho de banda	Frecuencia de transferencia máxima
50	15	320	83	16.1 MHz - 20.7 MHz	18.1 MHz / 3160 / 1100
50	15,5	400	102		
50	16	520	133		
50	16,5	640	178		
50	17	820	256		
50	17,5	1420	480		
50	18	2960	1030		
50	18,5	2600	903		
50	19	2240	760		
50	19,5	2440	865		
50	20	1140	382		
50	20,5	600	172		
50	21	380	93		
50	21,5	280	80		
50	22	260	60		
50	22,5	320	71		
50	23	440	160		
50	23,5	740	234		
50	24	600	165		
50	24,5	560	138		
50	25	360	111		

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

Tabla 4-7 Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 60 mm

Distancia (mm)	Frecuencia de operación (MHz)	Vpp Rx (mV)	Vrms Rx (mV)	Ancho de banda	Frecuencia de transferencia máxima
60	15	260	61	16.4 MHz - 20.3 MHz	18.3 MHz / 3080 Vpp / 1080 Vrms
60	15,5	300	82		
60	16	400	114		
60	16,5	480	124		
60	17	620	183		
60	17,5	1020	330		
60	18	2200	748		
60	18,5	2960	1030		
60	19	2640	910		
60	19,5	1800	629		
60	20	760	219		
60	20,5	380	90		
60	21	280	65		

60	21,5	200	45
60	22	200	43
60	22,5	220	46
60	23	300	78
60	23,5	540	150
60	24	460	155
60	24,5	400	160
60	25	260	80

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

Tabla 4-8 Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 70 mm

Distancia (mm)	Frecuencia de operación (MHz)	Vpp Rx (mV)	Vrms Rx (mV)	Ancho de banda	Frecuencia de transferencia máxima
70	15	200	46	16.9 MHz - 20.1 MHz	18.5 MHz / 3060 Vpp / 1050 Vrms
70	15,5	260	63		
70	16	300	72		
70	16,5	380	110		
70	17	480	135		
70	17,5	740	239		
70	18	1600	548		
70	18,5	3060	1050		
70	19	2700	944		
70	19,5	1260	417		
70	20	520	147		
70	20,5	300	74		
70	21	260	53		
70	21,5	180	35		
70	22	160	33		
70	22,5	180	37		
70	23	260	57		
70	23,5	440	120		
70	24	380	102		
70	24,5	300	74		
70	25	240	54		

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

Tabla 4-9 Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 80 mm

Distancia (mm)	Frecuencia de operación (MHz)	Vpp Rx (mV)	Vrms Rx (mV)	Ancho de banda	Frecuencia de transferencia máxima
80	15	160	35	17.3 MHz - 19.9 MHz	18.6 MHz / 2940 Vpp / 1010 Vrms
80	15,5	220	45		
80	16	260	57		
80	16,5	300	70		
80	17	360	128		
80	17,5	600	182		
80	18	1220	400		
80	18,5	2800	983		
80	19	2460	850		
80	19,5	920	294		
80	20	400	107		
80	20,5	260	55		
80	21	180	37		
80	21,5	160	28		
80	22	140	26		
80	22,5	180	31		
80	23	180	46		
80	23,5	340	114		
80	24	320	70		
80	24,5	260	67		
80	25	200	45		

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

Tabla 4-10 Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 90 mm

Distancia (mm)	Frecuencia de operación (MHz)	Vpp Rx (mV)	Vrms Rx (mV)	Ancho de banda	Frecuencia de transferencia máxima
90	15	120	29	17.5 MHz - 19.7 MHz	18.7 MHz / 2700 Vpp / 929 Vrms
90	15,5	200	41		
90	16	220	46		
90	16,5	240	57		
90	17	320	80		
90	17,5	440	145		
90	18	980	320		
90	18,5	2440	854		
90	19	2060	705		
90	19,5	700	219		
90	20	440	109		
90	20,5	220	44		
90	21	160	30		

90	21,5	120	25
90	22	140	24
90	22,5	140	27
90	23	160	35
90	23,5	300	74
90	24	280	66
90	24,5	220	50
90	25	180	36

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

Tabla 4-11 Valores medidos del sistema de transmisión inalámbrica a 100 mm

Distancia (mm)	Frecuencia de operación (MHz)	Vpp Rx (mV)	Vrms Rx (mV)	Ancho de banda	Frecuencia de transferencia máxima
100	15	140	25	17.7 MHz - 19.5 MHz	18.7 MHz / 2340 Vpp / 805 Vrms
100	15,5	160	32		
100	16	200	37		
100	16,5	200	45		
100	17	260	63		
100	17,5	380	120		
100	18	760	239		
100	18,5	2040	700		
100	19	1640	570		
100	19,5	540	170		
100	20	280	60		
100	20,5	200	36		
100	21	160	26		
100	21,5	140	22		
100	22	100	20		
100	22,5	120	25		
100	23	160	32		
100	23,5	240	55		
100	24	220	52		
100	24,5	180	40		
100	25	180	40		

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

Con los datos medidos expuestos de las tablas 4 – 2 a 4 – 11, se exponen figuras con los mismos datos para una mejor comprensión de los valores transmitidos.

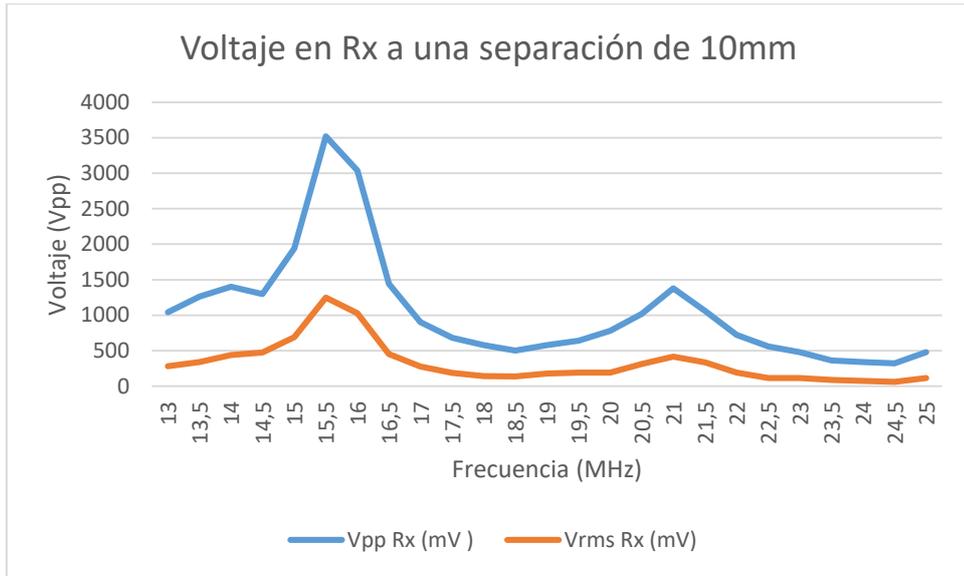


Figura 4-27 Voltaje recibido a una distancia de 10 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

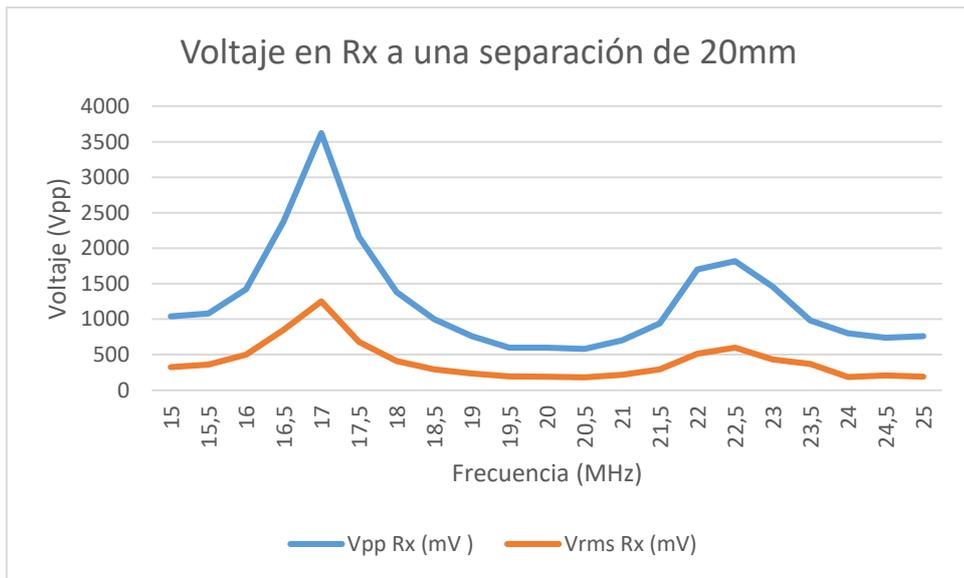


Figura 4-28 Voltaje recibido a una distancia de 20 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

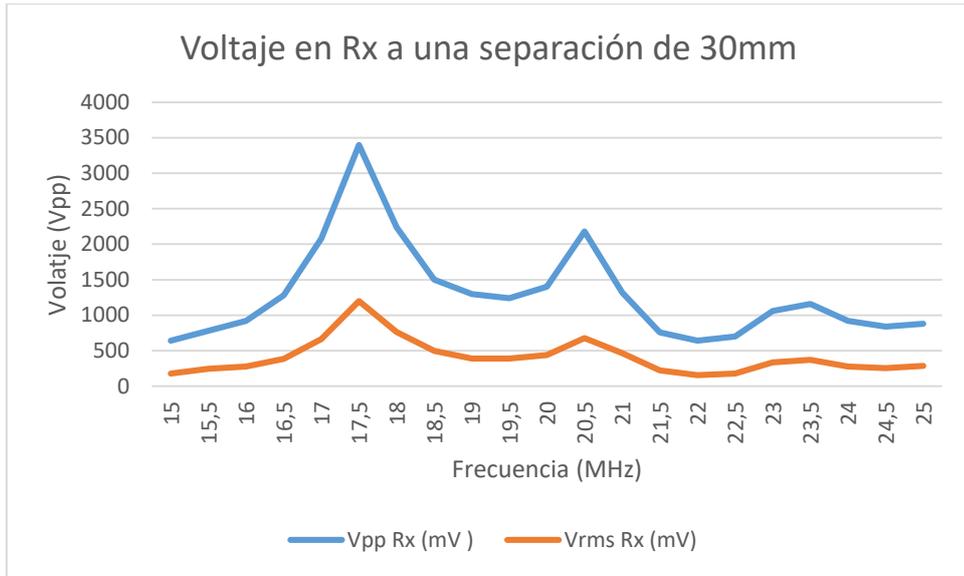


Figura 4-29 Voltaje recibido a una distancia de 30 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

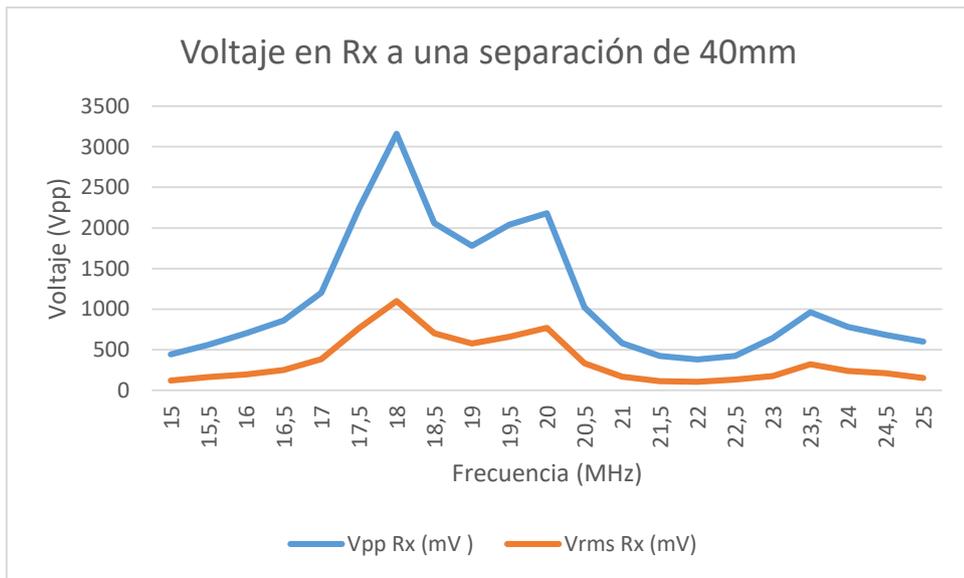


Figura 4-30 Voltaje recibido a una distancia de 40 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

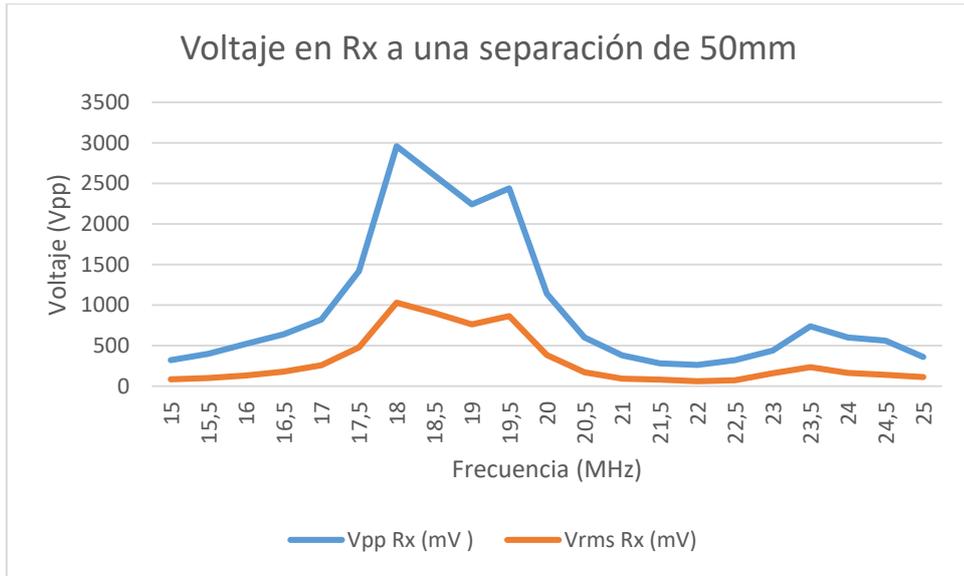


Figura 4-31 Voltaje recibido a una distancia de 50 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

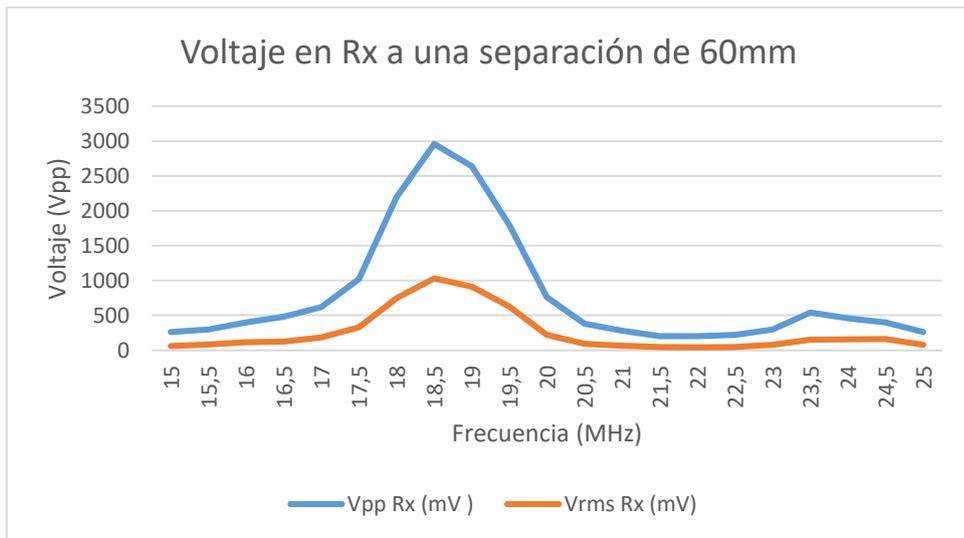


Figura 4-32 Voltaje recibido a una distancia de 60 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

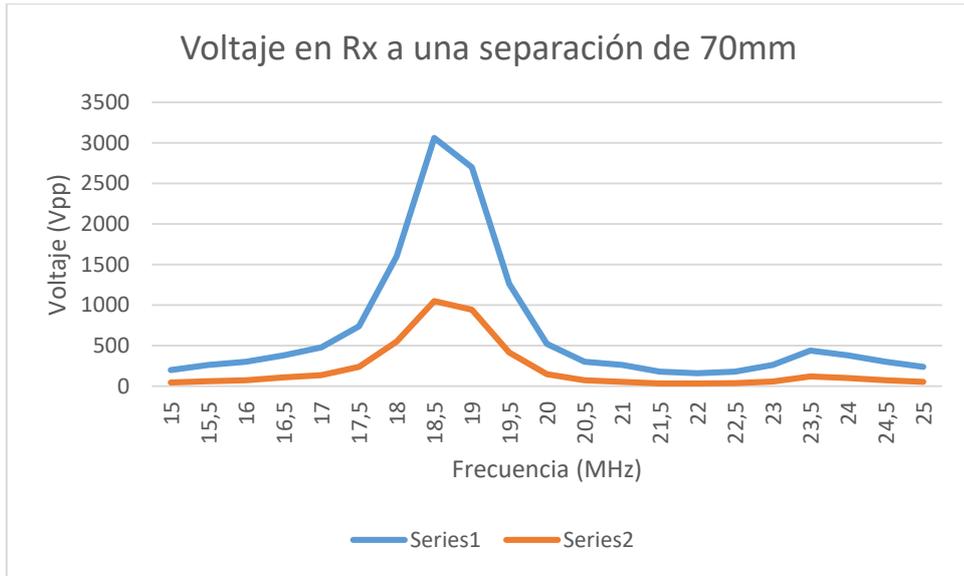


Figura 4-33 Voltaje recibido a una distancia de 70 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

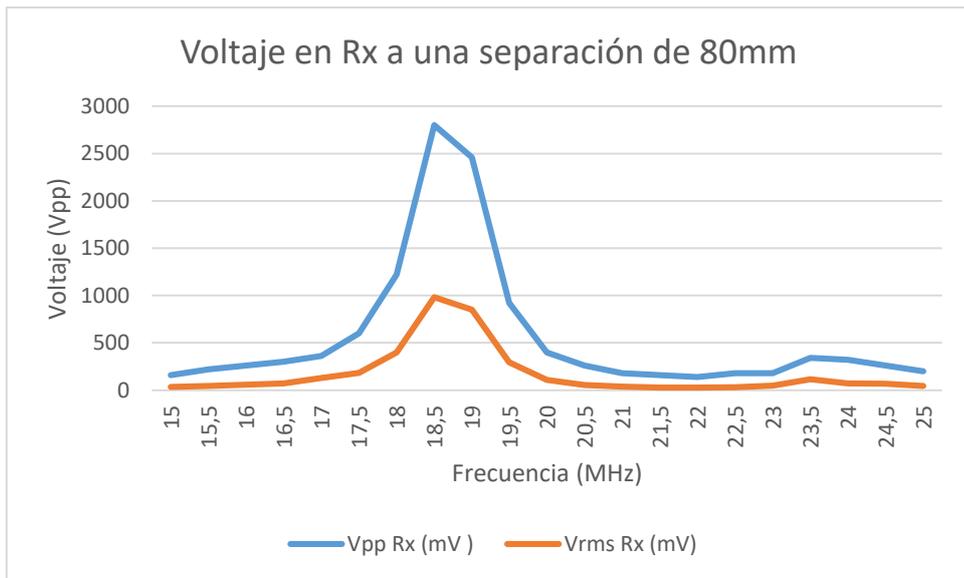


Figura 4-34 Voltaje recibido a una distancia de 80 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

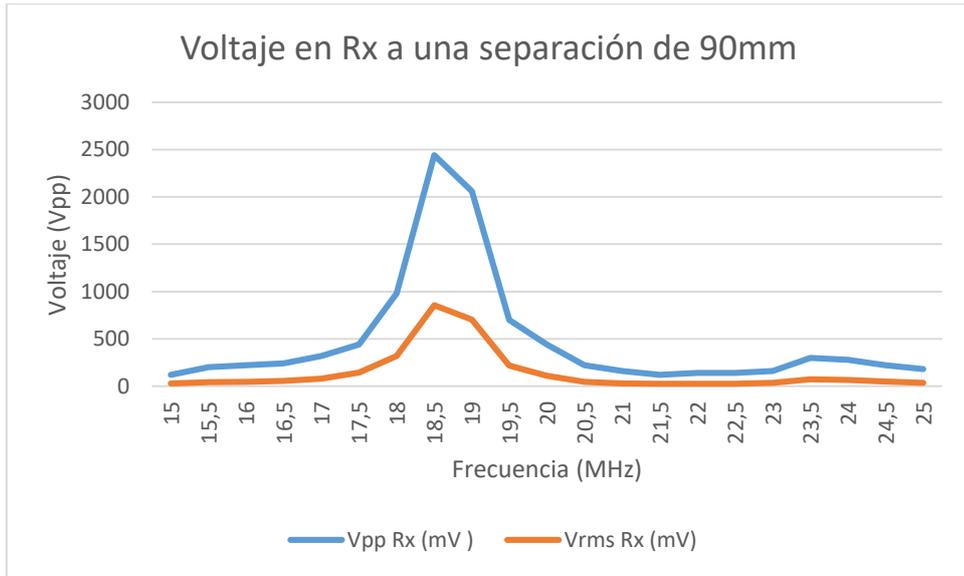


Figura 4-35 Voltaje recibido a una distancia de 90 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

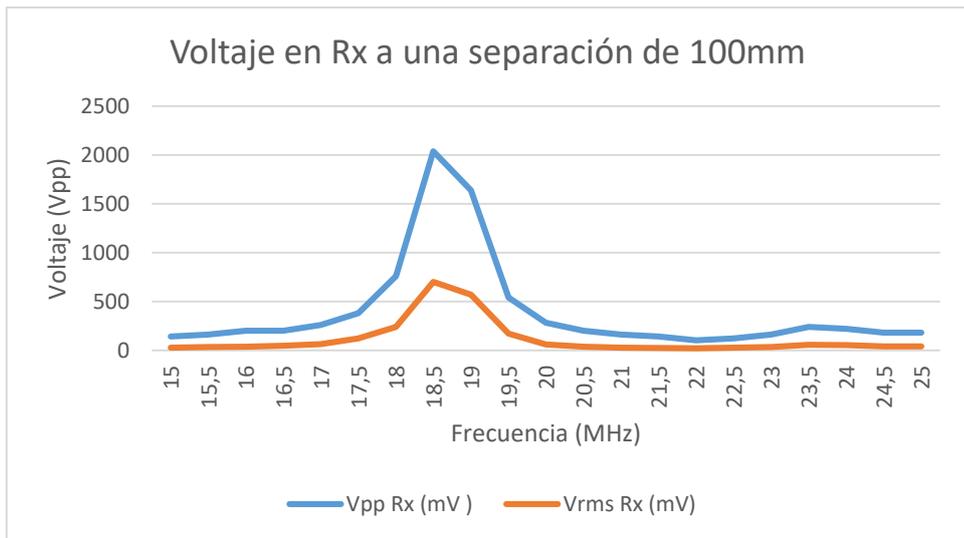


Figura 4-36 Voltaje recibido a una distancia de 100 mm

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

4.2.2. Eficiencia del sistema

La tabla 4 – 12, mide la eficiencia del sistema acorde a la distancia, se observa que el rendimiento decae conforme se aumenta la distancia de separación, además que la mejor distancia para transmitir energía es a 10 mm.

Tabla 4-12 Eficiencia del sistema acorde a los datos de la implementación

Distancia (mm)	Frecuencia de transferencia máxima (MHZ)	Vpp Rx (mV)	Vpp Tx (mV)	Eficiencia del sistema
10	15,7	4240	13500	31,41%
20	16,9	3620	13200	27,42%
30	17,5	3400	13200	25,76%
40	17,9	3260	13200	24,70%
50	18,1	3160	13100	24,12%
60	18,3	3080	12900	23,88%
70	18,5	3060	12800	23,91%
80	18,6	2940	12700	23,15%
90	18,7	2700	12600	21,43%
100	18,7	2340	12600	18,57%

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

4.2.3. Error obtenido entre los resultados de la simulación y de la implementación

En la tabla 4 – 13 se expone la tasa de error obtenida entre los resultados del sistema simulado e implementado. Se observa que la mayor tasa de error sucede a los 10 mm de distancia.

Tabla 4-13 Tasa de error porcentual entre los valores de la simulación vs implementación

Distancia (mm)	Frecuencia de transferencia medida (MHZ)	Frecuencia de transferencia Simulada (MHZ)	Porcentaje de error simulado - medido
10	15,7	18	14,65%
20	16,9	19,2	13,61%
30	17,5	19,8	13,14%
40	17,9	20,1	12,29%
50	18,1	20,4	12,71%
60	18,3	20,6	12,57%
70	18,5	21,12	14,16%
80	18,6	21,02	13,01%
90	18,7	20,98	12,19%
100	18,7	20,96	12,09%

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

En la figura 4 – 37, se observa gráficamente la relación de error de la frecuencia de resonancia conforme a la distancia de separación de las antenas entre los datos obtenidos de la simulación en comparación con los datos tomados del sistema implementado.

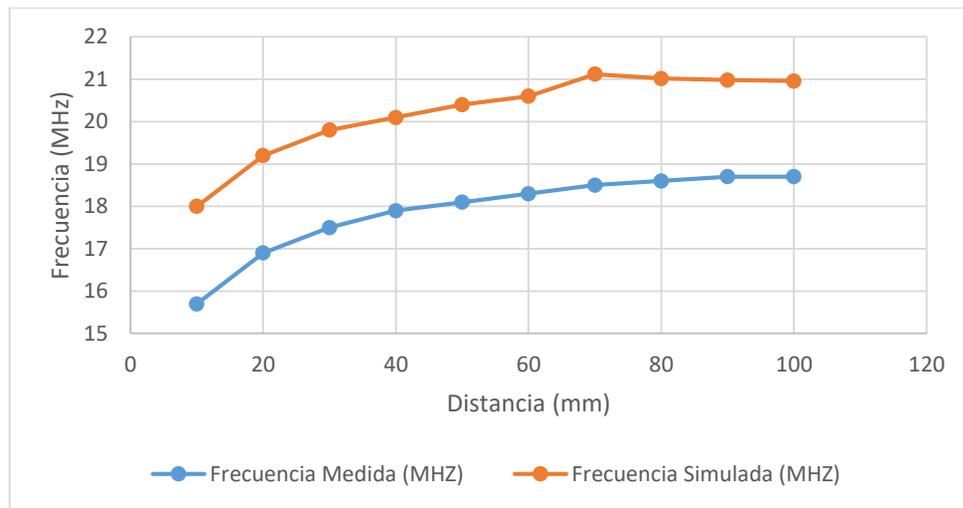


Figura 4-37 Comparativa de los datos de la simulación e implementación

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

La diferencia entre los resultados medidos y simulados se debe a la variación en la permitividad eléctrica del sustrato FR4, idealmente debe mantener el valor de 4.3 como se lo hace en la simulación, sin embargo, en la práctica, no es una constante, debido a que puede variar por la calidad de fabricación, la posición en el medio, la frecuencia del campo aplicado, la temperatura, humedad, entre otros parámetros, inclusive, las tolerancias en los componentes electrónicos utilizados afectan los resultados finales obtenidos.

Los valores cuadráticos medios de los valores medidos con relación a los simulados se indican en la tabla 4 – 14, obteniendo como resultado un RMSE (Root Mean Square Error) de 2.33 [MHz], lo cual indica que en dicha cantidad de MHz se desvía en promedio cada valor simulado

Tabla 4-14 Error cuadrático medio de los valores simulados y medidos

Distancia (mm)	Frecuencia Simulada (MHz)	Frecuencia Medida (MHz)	Residuos	Error Cuadrático	RMSE
10	18	15.7	-2.3	5.29	2.33 [MHz]
20	19.2	16.9	-2.3	5.29	
30	19.8	17.5	-2.3	5.29	
40	20.1	17.9	-2.2	4.84	
50	20.4	18.1	-2.3	5.29	
60	20.6	18.3	-2.3	5.29	
70	21.12	18.5	-2.62	6.8644	
80	21.02	18.6	-2.42	5.8564	
90	20.98	18.7	-2.28	5.1984	
100	20.96	18.7	-2.26	5.1076	

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinueza, 2017

4.2.4. Versatilidad del sistema con obstrucción de distintos materiales

En la vida real, el sistema debe funcionar bajo distintos escenarios, para lo cual, se utilizaron varios tipos de materiales que sirvieron como obstáculos entre el sistema de antenas para simular la implementación en proyectos prácticos.

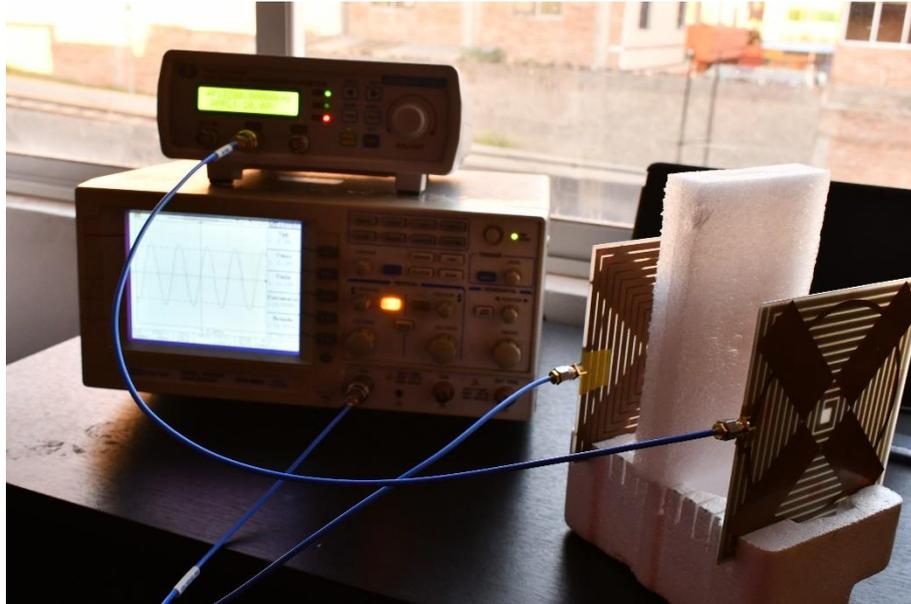


Figura 4-38 Medición de la eficiencia utilizando poli estireno expandido entre las antenas

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

En las tablas 4 – 15 y 4 – 16, se exponen los resultados de la pérdida de eficiencia del sistema en los escenarios mencionados.

Tabla 4-15 Eficiencia del sistema con obstáculos entre las antenas separadas por 30 mm

Material	Frecuencia de trabajo	Vpp Tx (mV)	Vpp Rx (Vpp) Sin Material	Vpp Rx (Vpp) Con Material	Pérdida
Aglomerado	17.5	13200	3300	3200	3.03%
Plástico	17.5	13200	3300	3300	0.00%
Madera	17.5	13200	3300	3080	6.67%
Metal	17.5	13200	3300	80	97.58%
Vidrio	17.5	13200	3300	3200	3.03%
Poli estireno expandido	17.5	13200	3300	3300	0.00%
Tela	17.5	13200	3300	3240	1.82%
Cartón	17.5	13200	3300	3300	0.00%

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

Tabla 4-16 Eficiencia del sistema con obstáculos entre las antenas separadas por 100 mm

Material	Frecuencia de trabajo	Vpp Tx (mV)	Vpp Rx (Vpp) Sin Material	Vpp Rx (Vpp) Con Material	Pérdida
Aglomerado	18.7	12600	2340	2300	1.71%
Plástico	18.7	12600	2340	2340	0.00%
Madera	18.7	12600	2340	2300	1.71%
Metal	18.7	12600	2340	640	72.65%
Vidrio	18.7	12600	2340	2300	1.71%
Poli estireno expandido	18.7	12600	2340	2340	0.00%
Tela	18.7	12600	2340	2320	0.85%
Cartón	18.7	12600	2340	2340	0.00%

Fuente: Realizado por Rodrigo Vinuesa, 2017

En la tabla 4 – 15, se consideró utilizar una distancia de separación de 30 mm, ya que se abarca de manera general la mayoría de grosores en el cual el sistema de antenas pudiere ser implementado.

Se observa que, con materiales como el aglomerado, plástico, vidrio, poli estireno expandido y tela, la eficiencia sufre mínimas pérdidas a ser consideradas, logrando transmitir la energía inalámbrica sin problema alguno.

En el caso de la madera, se observa una baja en el rendimiento del 6.67%, que se debe tomar en cuenta para la implementación del sistema en un mueble de este material y no tener pérdidas indeseables en el lado del receptor.

Por otra parte, al utilizar metal como obstáculo, se obtiene una pérdida total de la transmisión

4.3. Comparativa del sistema con trabajos de otros investigadores

En el trabajo desarrollado por M. H. M. Salleh, N. Seman, and D. N. A. Zaidel, “Design of a Compact Planar Witricity Device with Good Efficiency for Wireless Applications”, en el cual se utiliza un par de antenas bajo el mismo principio de diseño que en este trabajo de titulación, logran obtener una eficiente transmisión de energía hasta los 30 mm de separación.

A 20 mm, obtienen 71% de eficiencia mientras que a 30 mm decae al 43%, concluyendo los investigadores que para alcanzar un mejor rendimiento es necesario usar otro sustrato o cualquier otro material con una mayor permitividad dieléctrica.

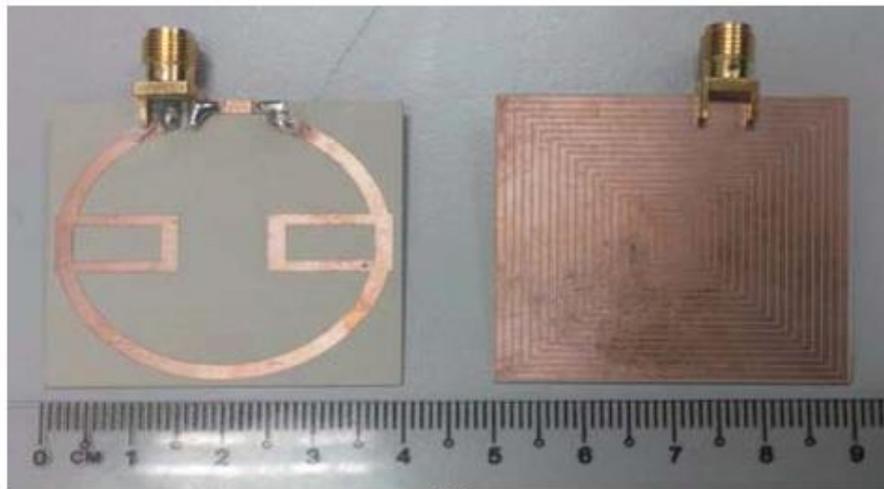
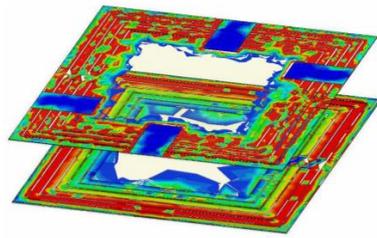


Figura 4-39 Diseño alternativo de antenas de transmisión de energía inalámbrica

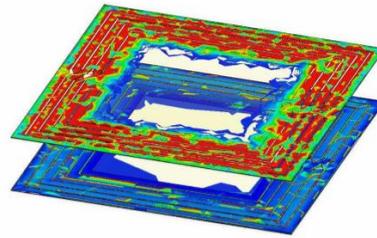
Fuente: M. H. M. Salleh, N. Seman, and D. N. A. Zaidel, “Design of a Compact Planar Witricity Device with Good Efficiency for Wireless Applications”, 2014

Comparando resultados, se observa que el proyecto expuesto en éste documento, presenta una inferior eficiencia a las mismas distancias (71% a 20 mm frente a 27.42% a la misma distancia y 43% a 30 mm frente a 25.76% a la misma distancia), sin embargo, el sistema de M. H. M. Salleh, N. Seman, and D. N. A. Zaidel, sufre un decaimiento pronunciado de la eficiencia a partir de los 30 mm de separación, problema que no sucede con las antenas propuestas en éste proyecto, obteniendo una baja del rendimiento sistemática según se amplía la distancia de separación entre las antenas.

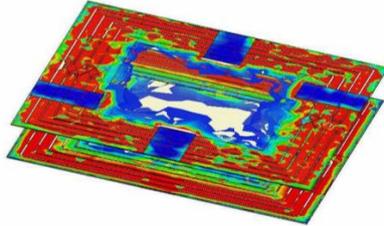
Por otra parte, en la investigación presentada por S. L. Ho, J. Wang, W. N. Fu, M. Sun, “A Comparative Study Between Witricity and Traditional Inductive Magnetic Coupling in Wireless Charging,” con un diseño distinto, pero utilizando el mismo principio de acoplamiento resonante magnético, transmiten energía en distancias comprendidas entre los 20 mm hasta los 200 mm al 70.36% y 13.72% de eficiencia respectivamente, rendimiento superior, comparado con los datos obtenidos en la presente investigación.



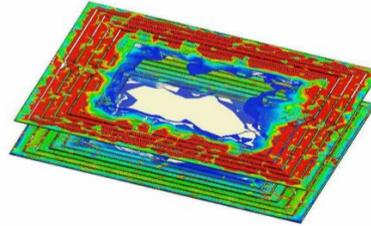
Witricity system (with 5 cm distance)



Traditional magnetic coupling system (with 5 cm distance)



Witricity system (with 2 cm distance)



Traditional magnetic coupling system (with 2 cm distance)

Figura 4-40 Diseño alternativo de antenas de transmisión de energía inalámbrica

Fuente: S. L. Ho, J. Wang, W. N. Fu, M. Sun, "A Comparative Study Between Witricity and Traditional Inductive Magnetic Coupling in Wireless Charging," 2011

CONCLUSIONES

- Se evidencia que, en el sistema a menor distancia de separación entre las antenas, existe una mejor eficiencia, comprobando que, a una separación de 10 mm, se obtiene un rendimiento del 31.41% del voltaje transmitido, decayendo al 18.57% a una separación de 100 mm.
- Se comprobó la versatilidad del sistema mediante la utilización de distintos materiales entre las antenas transmisora y receptora a distancias de separación de 30 mm y 100 mm, manteniendo la eficiencia con aglomerado, plástico, vidrio, poli estireno expandido y tela, el rendimiento decae al utilizar madera, con una disminución de la eficiencia del 6,67% a 30 mm de separación y del 1,71% a 100 mm de separación, por el contrario, al utilizar metal, la transferencia inalámbrica de energía se interrumpe totalmente, debido a sus características conductoras de electricidad y magnetismo, absorbiendo la señal inalámbrica.
- La determinación de la frecuencia de resonancia del sistema, es crítica, para evitar interferencia con otras señales de radio frecuencia.
- Mediante la simulación, se observó, que al variar aspectos en el material dieléctrico como el espesor o la permitividad eléctrica, se puede crear antenas con un tamaño más reducido que el propuesto, debido a que mejores valores de permitividad eléctrica del sustrato, mejoran la calidad de transferencia eléctrica con menor cantidad del material.
- Se determinó que la distancia optima de funcionamiento del sistema sin obstáculos comprende desde los 10 milímetros hasta los 50 milímetros con un valor promedio de recepción de 26.68% del voltaje transmitido.
- Se encontraron diferencias entre los valores obtenidos de la simulación del sistema y su implementación, debido a que la permitividad eléctrica del sustrato utilizado difiere del valor ideal.
- El uso de dieléctricos como FR4, brinda la facilidad económica para proyectos de investigación de sistemas de transferencia inalámbrica de potencia, sin embargo, limita en aspectos fundamentales como la reducción del tamaño de las antenas radiantes.

RECOMENDACIONES

- No se recomienda utilizar los integrados MMIC de la serie POS – 25+ como oscilador en conjunto con los amplificadores MAN 1, MAN 2 y MAN 1LH para la etapa de la generación de señal, debido a que no entregan un alto nivel de voltaje si se piensa utilizar una carga con mayor potencia que un diodo LED como el utilizado en el proyecto.
- Es recomendable realizar una simulación previa a la implementación con el fin de asegurar el funcionamiento adecuado del sistema.
- El adecuado uso de material aislante de energía estática, así como también, la utilización de herramientas alternas de generación de ondas de radio frecuencia, evitará daños por manipulación a los circuitos integrados del sistema.
- El manejo de otras herramientas de software de diseño de circuitos de artes gráficas en general, ayuda enormemente para la generación de la plantilla de las antenas que finalmente se imprime en el sustrato.
- En Ecuador, debido a que la industria electrónica no se ha desarrollado al mismo ritmo que en otros países considerados de primer mundo, la obtención de los materiales y herramientas necesarios para la realización de proyectos como el expuesto en el presente documento, es bastante limitada.
- Se recomienda la utilización de un sustrato con mejores prestaciones para el desarrollo de antenas con un diseño más compacto.
- Para evitar interferencia magnética en el sistema, no se recomienda la implementación en ambientes metálicos, ya que, según las mediciones, se genera una pérdida mínima del 72%, provocando la total anulación de transferencia de energía.
- Con el objetivo de mejorar la eficiencia del sistema de transmisión, en un trabajo futuro del proyecto se propone cambiar el sustrato dieléctrico por uno de mejor permitividad eléctrica con el objetivo de fabricar antenas de tamaño reducido y mejorar la eficiencia del mismo, además, se considerará utilizar fuentes con mayor potencia, con el propósito de abarcar productos con mayores necesidades de recursos energéticos.
- Finalmente, sería interesante desarrollar investigaciones en sistemas de transmisión de energía eléctrica para electrodomésticos y dispositivos con fuentes de voltaje alternos de alta potencia, para lo cual se utilizarían otro tipo de antenas a las utilizadas en el proyecto expuesto en el presente documento.

BIBLIOGRAFÍA

- Agbinya, J.I.** (2012), *Wireless Power Transfer*. River Publishers
- Agbinya, J.I.** (2011), *Principles of Inductive Near Field Communications for Internet of Things*. River Publishers
- André K., Moffat R., Joannopoulos J. D., Fisher P., Soljic M.** (2007), “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances”, *Science AAAs*. 83 – 85.
- Dadić M., Petrović K., Malarić R.,** (2017), “FEM Analysis of a PCB Integrated Resonant Wireless Power Transfer,” 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, pp. 166-170.
- Dickinson R. M.** (1976), “Performance of a high-power, 2.388-GHz receiving array in wireless power transmission over 1.54 km”, in *Proceeding of IEEE-MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Chery Hill, USA, pp. 139 – 141.
- El-Anzeery H. M. G. E. D. M., El-Bagouri M. A. E. A. S., and Guindi R.,** (2012), “Novel Radio Frequency Energy Harvesting Model,” in *Power Engineering and Optimization Conference (PEDCO) Melaka, Malaysia, 2012 IEEE International*, pp. 209 – 213.
- Ho S. L., Wang J., Fu W. N., Sun M.,** (May. 2011), “A Comparative Study Between Witricity and Traditional Inductive Magnetic Coupling in Wireless Charging,” *IEEE Transactions onMagnetics*, vol. 47, no. 5, pp. 1522 – 1525.
- Kline M., Izyumin I., Boser B., and Sanders S.,** (2011), “Capacitive Power Transfer for Contactless Charging,” in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty – Sixth Annual IEEE*, pp. 1398 – 1404.
- Munir A. and Ranum B. T.** (2015), “Wireless Power Charging System for Mobile Device Based on Magnetic Resonance Coupling”, *The 5th International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, August 10-11, 2015, Bali, Indonesia, pp. 221-224.
- Nottiani D.G., Leccese F.,** (2012), “A Simple Method for Calculating Lumped Parameters of Planar Spiral Coil for Wireless Energy Transfer,”*11th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, vol., no., pp. 869 – 872.
- Pelliteri F., Boscaino V., Rosa R. L., and Capponi G.,** (2012), “Improving the Efficiency of a Standard Compliant Wireless Battery Charger,” in *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012 47th International*, pp. 1 – 6.
- Peng W., Zhao G.,** (2012), “Experimental Analysis on Wireless Power Transmission Based on Magnetic Resonant Coupling,” *2nd International Conference onRemote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE)*, vol., no., pp. 1,4.

- Rahayu N.W.D.E., Munir A.,** (August 2014), "Radiator for Wireless Charging Application Based on Electromagnetic Coupling Resonant," Proceeding of International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI 2014), Yogyakarta, Indonesia, pp. 496 – 499, 20-21.
- Ranum B. T., Rahayu N. W. D. E., and Munir A.,** (Mar. 2015), "Characterization of Wireless Power Charging Receiver for Mobile Device," International Journal of Electrical Engineering and Informatics, Vol. 7, No. 1, pp. 130 – 139.
- Rosu I.** (2014), Microstrip, Stripline, and CPW Design
- Shinohara N.** (2014), Wireless Power Transfer via Radiowaves. Wiley
- Salleh M. H. M., Seman N., and Zaidel D. N. A.** (2014), "Design of a Compact Planar Witricity Device with Good Efficiency for Wireless Applications", Proceedings of Asia – Pacific Microwave Conference, pp. 1369 – 1371.
- Salleh M. H. M., Seman N., and Dewan R.,** (2013), "Reduced – Size Witricity Charger Design and its Parametric Study," IEEE International RF and Microwave Conference (RFM2013), December 09 – 11, Penang, Malaysia, pp. 387 – 390.
- Sun X., Cao M., Hao J., Guo Y.,** (2012), "A Rectangular Slot Antenna with Improved Bandwidth," AEU – International Journal of Electronics and Communications, vol. 66, pp.465-466,6.
- Wang J., Ho S.L., Fu W.N., Sun M.,** (2010), "Finite Element Analysis and Corresponding Experiment of Resonant Energy Transmission for Wireless Transmission Device using Witricity," 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), on, vol., no., pp. 1,1.
- Wang J., Ho S.L., Fu W.N., Sun M.,** (October 2011), "Analytical Design Study of a Novel Witricity Charger with Lateral and Angular Misalignments for Efficient Wireless Energy Transmission," IEEE Transactions on Magnetics, vol.47, no.10, pp. 2616-2619.
- Xiu Zhang, Ho S. L. and Fu W. N.,** (2010), "Modeling and design of a wireless power transfer cell with planar spiral structures," Digests of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, Chicago, IL, pp. 1-1.
- Zhang F., Hackwoth S.A., Liu X., Li C., Sun M.,** (2010), "Wireless Power Delivery for Wearable Sensors and Implants in Body Sensor Networks," Annual International Conference of the IEEE on Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), vol., no., pp. 692,695.
- Zhang X., Ho S. L., Fu W.N.,** (2011), "Quantitative Analysis of a Wireless Power Transfer Cell with Planar Spiral Structures," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, no. 10, pp. 3200-3203.

Zhang J. and Jia Z., (Dec. 2010), “Design of Voltage Doubling Rectifier Circuit in Wireless Sensor Networks,” in Proceeding of International Conference on PIC, Sanghai, China, pp. 456 – 459.

Zhou H., Yang S., (2012), “Resonant Frequency Calculation of Witricity Using Equivalent Circuit Model Combined with Finite Element Method,” International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications (ICEF), 2012 Sixth, vol., no., pp.1,4.

ANEXOS

Anexo A: Datasheets de los integrados MMIC en la etapa de conversión de frecuencia y amplificación

Plug-In Amplifier

50Ω Low Power 0.5 to 500 MHz

MAN-1



CASE STYLE: A05

Features

- wideband, 0.5 to 500 MHz
- low noise, 4.5 dB typ.
- hermetic, metal case
- protected by US Patent, 6,943,629

Applications

- VHF/UHF
- military, hi-rel applications
- communication systems
- instrumentation

Amplifier Electrical Specifications

MODEL NO.	FREQUENCY (MHz)		GAIN (dB)		MAXIMUM POWER (dBm)			DYNAMIC RANGE		VSWR (:1) Typ.		DC POWER	
	f_L	f_U	Min.	Flatness Max.	Output (1 dB Compr.)	Input (no damage)	NF (dB) Typ.	IP3 (dBm) Typ.	In	Out	Volt (V) Nom.	Current (mA) Max.	
MAN-1	0.5	500	28	±1.4	+8	+8	+15	4.5	+18	1.8	1.8	12	60

Open load is not recommended, potentially can cause damage.
With no load derate max. input power by 20 dB

f_L = low range (f_L to $f_U/2$)

f_U = upper range ($f_U/2$ to f_U)

Pin Connections

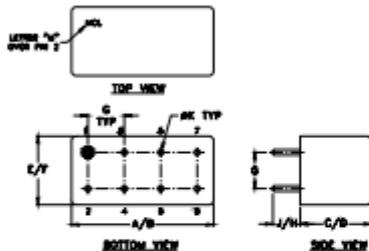
RF IN	1
RF OUT	8
DC	5
GROUND	2,3,4,6
CASE GROUND	2,3,4,6
NOT USED	7

Maximum Ratings

Operating Temperature	-54°C to 85°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
DC Voltage	+12.5V Max.

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

Outline Drawing



Outline Dimensions (inch/mm)

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	wt
.770	.800	.240	.250	.370	.400	.200	.20	.14	.031	grams
19.558	20.32	6.096	6.35	9.398	10.16	5.08	5.08	3.566	0.7874	3.7

Notes

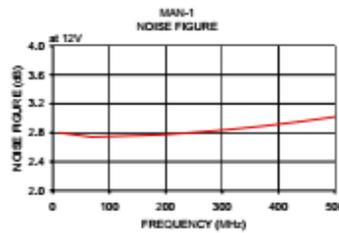
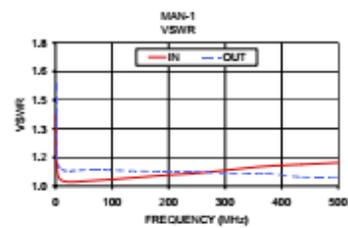
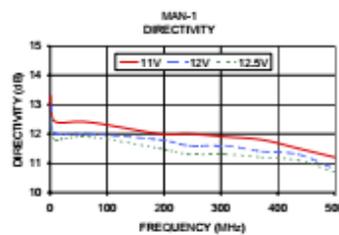
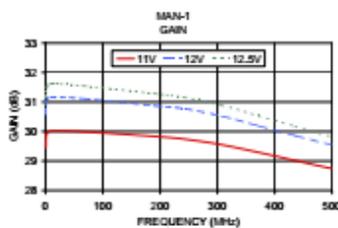
- A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
 B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuits' applicable established test performance criteria and measurement instructions.
 C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"). Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at www.minicircuits.com/MICLStore/terms.jsp



www.minicircuits.com P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4500 sales@minicircuits.com

REV. A
M551107
MAN-1
150621
Page 1 of 2

FREQUENCY (MHz)	GAIN (dB)			DIRECTIVITY (dB)			VSWR (:1)		NOISE FIGURE (dB)	P _{OUT} at 1 dB COMPR. (dBm)
	11V	12V	12.5V	11V	12V	12.5V	IN	OUT		
0.50	29.45	30.56	30.97	13.30	13.00	12.70	1.40	1.57	—	8.35
1.90	29.93	31.07	31.52	12.80	12.30	12.00	1.12	1.18	—	8.31
11.40	30.02	31.17	31.62	12.40	12.00	11.80	1.03	1.09	2.80	8.16
68.40	29.99	31.11	31.54	12.40	12.00	11.90	1.03	1.09	2.74	8.32
192.60	29.83	30.87	31.28	12.00	11.80	11.50	1.06	1.08	2.77	8.41
243.80	29.74	30.77	31.15	12.00	11.60	11.30	1.07	1.08	2.80	8.24
307.90	29.55	30.52	30.88	11.90	11.60	11.30	1.09	1.07	2.84	8.28
371.90	29.29	30.19	30.53	11.80	11.40	11.20	1.11	1.07	2.89	8.38
436.00	29.01	29.86	30.17	11.50	11.30	11.10	1.12	1.05	2.95	8.51
500.00	28.74	29.54	29.82	11.20	10.80	10.70	1.13	1.05	3.02	8.52



Notes
 A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
 B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuits' applicable established test performance criteria and measurement instructions.
 C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits' standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at www.minicircuits.com/MCStore/terms.jsp



Plug-In Low Noise Amplifier

MAN-1LN

50Ω 0.5 to 500 MHz



CASE STYLE: A05

Features

- low noise, 3.0 dB typ.
- hermetic case
- protected by US Patent, 6,943,629

Applications

- VHF/UHF
- military, hi-rel applications

Low Noise Amplifier Electrical Specifications

MODEL NO.	FREQUENCY (MHz)		NOISE FIGURE (dB)	GAIN (dB)			MAXIMUM POWER (dBm)		INTERCEPT POINT (dBm)	VSWR (-1) Typ.		DC POWER	
	f_L	f_H		Typ.	Min.	m	Total Range	Output (1 dB Compr.)		Input (no damage)	IP3 Typ.	In	Out
	Flatness Max.												
MAN-1LN	0.5	500	3.0	28	+0.5	+1.4	+7*	+15	+18	1.8	1.8	12	60

m = mid range [2 fL to fUH]

Open load is not recommended, potentially can cause damage.

With no load derate max input power by 20 dB

* Below 5 MHz, 1 dB compression point decreases to 6.5 dBm.

Pin Connections

RF IN	1
RF OUT	8
DC	5
GROUND	2,3,4,6
CASE GROUND	2,3,4,6
NOT USED	7

Maximum Ratings

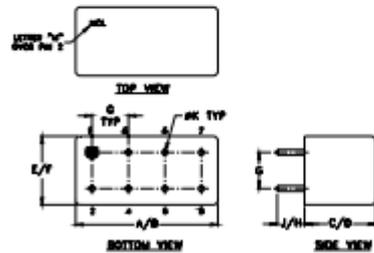
Operating Temperature -54°C to 85°C

Storage Temperature -55°C to 100°C

DC Voltage +12.5V Max.

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

Outline Drawing



Outline Dimensions (inch/mm)

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	wt
.770	.800	.340	.250	.370	.400	.200	.20	.14	.031	grams
19.558	20.32	8.608	6.35	9.398	10.16	5.08	5.08	3.556	0.7874	3.7

Notes

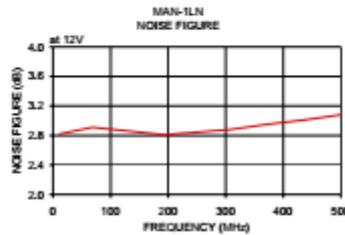
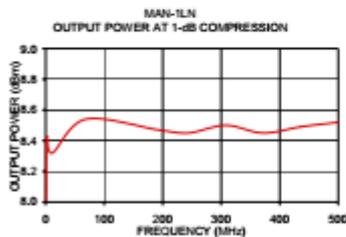
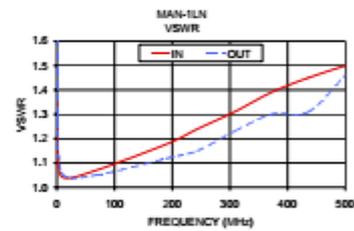
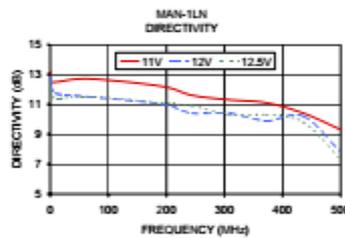
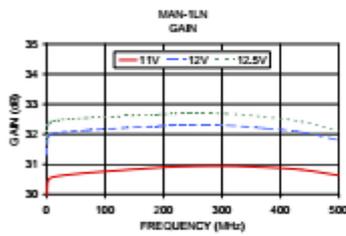
- Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
- Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuits' applicable established test performance criteria and measurement instructions.
- The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits' standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"). Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at www.minicircuits.com/MCIShowTerms.jsp

Mini-Circuits

www.minicircuits.com P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4500 sales@minicircuits.com

REV. A
M151107
MAN-1LN
150921
Page 1 of 2

FREQUENCY (MHz)	GAIN (dB)			DIRECTIVITY (dB)			VSWR (:1)		NOISE FIGURE (dB)	POUT at 1 dB COMPR. (dBm)
	11V	12V	12.5V	11V	12V	12.5V	IN	OUT		
0.50	29.88	31.30	31.73	13.20	12.90	12.60	1.35	1.67	—	8.01
1.90	30.44	31.89	32.32	12.50	12.10	11.60	1.13	1.18	—	8.42
11.40	30.58	32.02	32.45	12.50	11.70	11.40	1.04	1.05	2.82	8.32
68.30	30.71	32.13	32.54	12.70	11.50	11.50	1.07	1.05	2.91	8.54
192.60	30.89	32.27	32.66	12.20	11.00	11.10	1.18	1.12	2.81	8.47
243.80	30.93	32.30	32.69	11.60	10.40	10.90	1.24	1.15	2.84	8.45
307.90	30.94	32.29	32.68	11.30	10.40	10.30	1.31	1.23	2.88	8.50
371.90	30.90	32.20	32.58	11.10	9.90	10.30	1.39	1.30	2.95	8.45
436.00	30.82	32.07	32.42	10.40	10.20	9.80	1.45	1.31	3.01	8.49
500.00	30.63	31.80	32.12	9.30	7.80	7.30	1.50	1.46	3.08	8.52



Notes

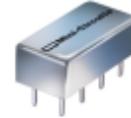
- A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
- B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuits' applicable established test performance criteria and measurement instructions.
- C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits' standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"). Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at www.minicircuits.com/MC/Store/terms.jsp



Plug-In Voltage Controlled Oscillator

POS-25+

Wideband 15 to 25 MHz



CASE STYLE: A06

Features

- output suitable for LO drive to level 7 mixers
- low phase noise
- hermetically sealed

Applications

- test instruments
- signal generators
- agile communications systems

+RoHS Compliant

The +Suffix identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications

Electrical Specifications

FREQUENCY (MHz)			POWER OUTPUT (dBm)			TUNING VOLTAGE (V)			PHASE NOISE (dBc/Hz)				PULLING pk-pk @ 12 dBc (MHz)		PUSHING (MHz/V)		TUNING SENSITIVITY (MHz/V)		HARMONICS (dBc)		3 dB MODULATION BANDWIDTH (MHz)		DC OPERATING POWER	
									SSB at offset frequencies: Typ.															
Min.	Max.	Typ.	Min.	Max.	Typ.	1 kHz	10 kHz	100 kHz	1 MHz	Typ.	Typ.	Typ.	Typ.	Typ.	Max.	Typ.	Typ.	Vcc (volts)	Current (mA) Max.					
15	25	+7.0	1	11		-86	-105	-125	-145	0.06	0.04	1-4	-26	-15	0.06	12	20							

Pin Connections

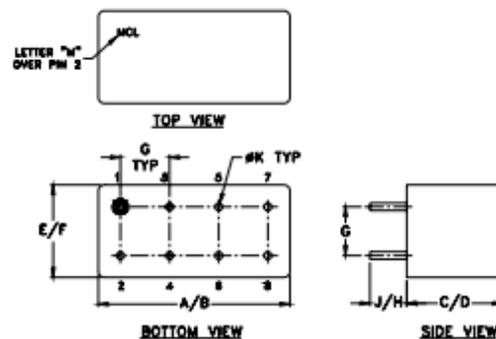
RF OUT	2
VCC	1
V-TUNE	8
GROUND	3,4,5,6,7
CASE GROUND	3,4,5,6,7

Maximum Ratings

Operating Temperature	-55°C to 85°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
Absolute Max. Supply Voltage (Vcc)	+15V
Absolute Max. Tuning Voltage (Vtune)	+12V

all specifications: 50 ohm system
Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

Outline Drawing



Outline Dimensions (inches)

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	wt
.770	.800	.285	.310	.370	.400	.200	.20	.14	.031	grams
19.558	20.32	7.239	7.874	9.398	10.16	5.08	5.08	3.558	0.7874	5.2

Notes

- A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuits' applicable established test performance criteria and measurement instructions.
C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits' standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at www.minicircuits.com/VC_Store/terms.jsp

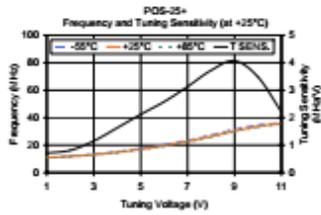
REV. K
M151167
ED-5167
POS-25+
SMT/CGRAM
150930



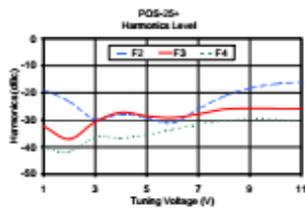
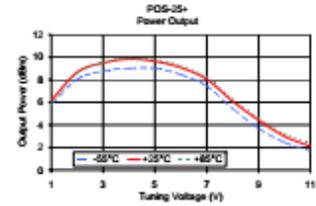
www.minicircuits.com P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4500 sales@minicircuits.com

Performance Data & Curves

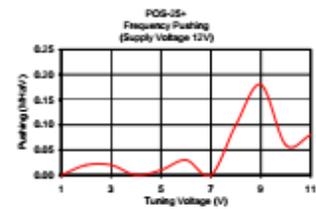
POS-25+



V TUNE	TUNING SENS. (MHz/V)	FREQUENCY (MHz)			POWER OUTPUT (dBm)		
		-55°C	+25°C	+85°C	-55°C	+25°C	+85°C
1.00	0.71	11.10	10.89	10.75	5.86	6.18	5.83
2.00	0.81	12.04	11.75	11.59	8.04	8.67	8.57
3.00	1.15	13.42	13.01	12.78	8.77	9.49	9.52
4.00	1.63	15.34	14.75	14.44	9.01	9.83	9.91
5.00	2.12	17.88	16.93	16.56	9.01	9.83	9.77
6.00	2.58	20.36	19.55	19.10	8.45	9.07	9.24
7.00	3.13	23.51	22.67	22.15	7.43	8.03	8.28
8.00	3.72	27.36	26.32	25.75	5.46	6.09	6.32
9.00	4.07	31.53	30.25	29.67	3.89	4.42	4.64
10.00	3.48	34.59	33.61	33.09	2.45	2.99	3.22
11.00	2.21	36.37	35.74	35.30	1.67	2.10	2.35



V TUNE	HARMONICS (dBc)			FREQ. PUSHING (MHz/V)
	F2	F3	F4	
1.00	-18.88	-32.27	-40.34	0.00
2.00	-23.24	-37.04	-41.63	0.02
3.00	-29.76	-30.70	-36.42	0.02
4.00	-27.81	-27.25	-36.68	0.00
5.00	-29.26	-28.58	-35.54	0.01
6.00	-31.13	-29.18	-33.56	0.03
7.00	-25.97	-27.89	-31.63	0.00
8.00	-21.31	-26.08	-30.32	0.10
9.00	-18.38	-25.78	-29.70	0.18
10.00	-16.78	-25.79	-29.88	0.06
11.00	-16.06	-25.86	-30.56	0.08



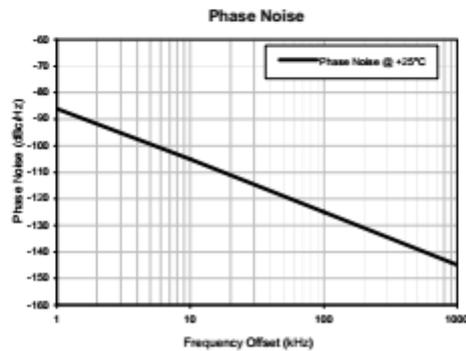
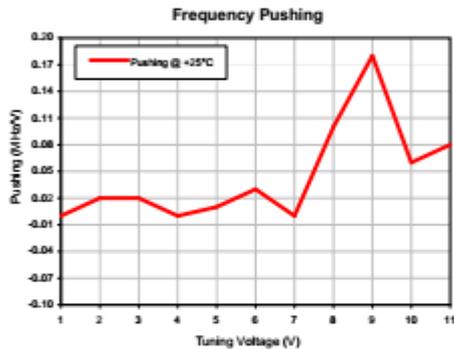
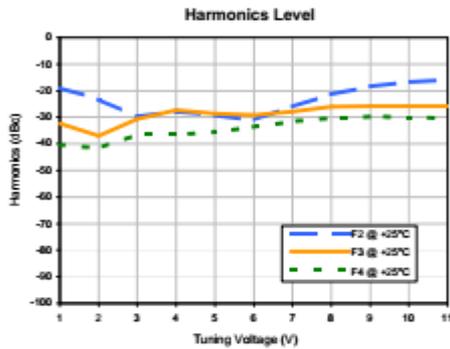
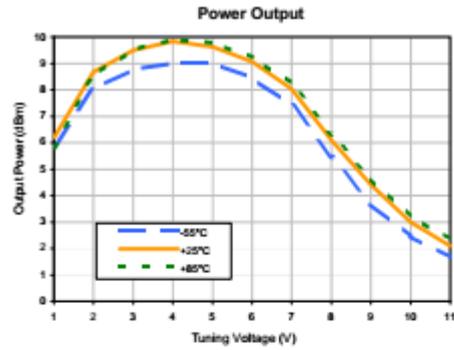
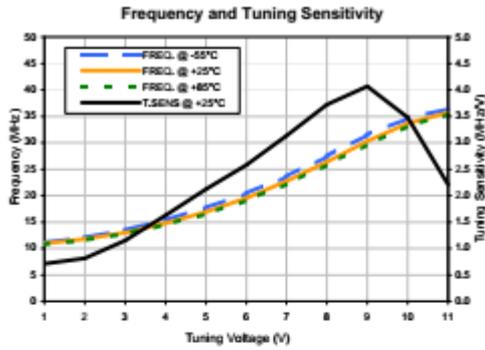
Notes
 A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
 B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuits' applicable established test performance criteria and measurement instructions.
 C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits' standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at www.minicircuits.com/MC_Store/terms.jsp



Voltage Controlled Oscillator

POS-25+

Typical Performance Data



The Design Engineers Search Engine finds the model you need, instantly • For detailed performance specs & shopping online see

Mini-Circuits®

RF/MICROWAVE COMPONENTS • ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED RoHS compliant
P.O. Box 350166, Brooklyn, New York 11235-0003 (718) 934-4500 Fax (718) 332-4961

minicircuits.com

REV. X1
POS-25+
060920
Page 1 of 1

Voltage Controlled Oscillator

POS-25+

Typical Performance Data

V TUNE	TUNE SENS (MHz/V)	FREQUENCY (MHz)			POWER OUTPUT (dBm)			HARMONICS (dBc)			FREQ. PUSH (MHz/V)	FREQ OFFSET (KHz)	PHASE NOISE (dBc/Hz)
		-55°C	+25°C	+85°C	-55°C	+25°C	+85°C	F2	F3	F4			
1.0	0.71	11.1	10.9	10.8	5.86	6.18	5.83	-18.9	-32.3	-40.3	0.00	1	-86
2.0	0.81	12.0	11.8	11.6	8.04	8.67	8.57	-23.2	-37.0	-41.6	0.02	10	-105
3.0	1.15	13.4	13.0	12.8	8.77	9.49	9.52	-29.8	-30.7	-36.4	0.02	100	-125
4.0	1.63	15.3	14.8	14.4	9.01	9.83	9.91	-27.8	-27.3	-36.7	0.00	1000	-145
5.0	2.12	17.7	16.9	16.6	9.01	9.63	9.77	-29.3	-28.6	-35.5	0.01		
6.0	2.58	20.4	19.6	19.1	8.45	9.07	9.24	-31.1	-29.2	-33.6	0.03		
7.0	3.13	23.5	22.7	22.2	7.43	8.03	8.26	-26.0	-27.9	-31.6	0.00		
8.0	3.72	27.4	26.3	25.8	5.46	6.09	6.32	-21.3	-26.1	-30.3	0.10		
9.0	4.07	31.5	30.3	29.7	3.69	4.42	4.64	-18.4	-25.8	-29.7	0.18		
10.0	3.48	34.6	33.6	33.1	2.45	2.99	3.22	-16.8	-25.8	-29.9	0.06		
11.0	2.21	36.4	35.7	35.3	1.67	2.10	2.35	-16.1	-25.9	-30.6	0.08		



Mini-Circuits®
 IF/RF MICROWAVE COMPONENTS • ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED RoHS compliant
 P.O. Box 350166, Brooklyn, New York 11235-0003 (718) 934-4500 Fax (718) 932-4661
 The Design Engineers Search Engine finds the model you need, instantly • For detailed performance specs & shopping online see



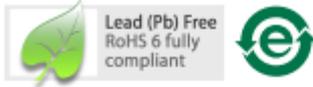
REV. X1
 POS-25+
 060920
 Page 1 of 1

Anexo B: Datasheet del Diodo Schottky de alta sensibilidad y radio frecuencia utilizado en la etapa dobladora de voltaje y rectificación

HSMS-286x Series
Surface Mount Microwave Schottky Detector Diodes



Data Sheet

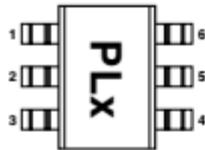


Description

Avago's HSMS-286x family of DC biased detector diodes have been designed and optimized for use from 915 MHz to 5.8 GHz. They are ideal for RF/ID and RF Tag applications as well as large signal detection, modulation, RF to DC conversion or voltage doubling.

Available in various package configurations, this family of detector diodes provides low cost solutions to a wide variety of design problems. Avago's manufacturing techniques assure that when two or more diodes are mounted into a single surface mount package, they are taken from adjacent sites on the wafer, assuring the highest possible degree of match.

Pin Connections and Package Marking

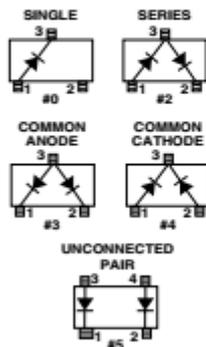


- Notes:
1. Package marking provides orientation and identification.
 2. The first two characters are the package marking code. The third character is the date code.

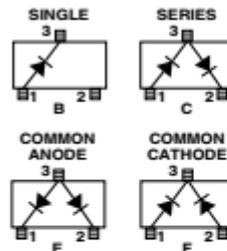
Features

- Surface Mount SOT-23/SOT-143 Packages
- Miniature SOT-323 and SOT-363 Packages
- High Detection Sensitivity:
 - up to 50 mV/μW at 915 MHz
 - up to 35 mV/μW at 2.45 GHz
 - up to 25 mV/μW at 5.80 GHz
- Low FIT (Failure in Time) Rate*
- Tape and Reel Options Available
- Unique Configurations in Surface Mount SOT-363 Package
 - increase flexibility
 - save board space
 - reduce cost
- HSMS-286K Grounded Center Leads Provide up to 10 dB Higher Isolation
- Matched Diodes for Consistent Performance
- Better Thermal Conductivity for Higher Power Dissipation
- Lead-free
- * For more information see the Surface Mount Schottky Reliability Data Sheet.

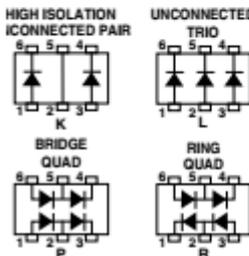
SOT-23/SOT-143 Package Lead Code Identification (top view)



SOT-323 Package Lead Code Identification (top view)



SOT-363 Package Lead Code Identification (top view)



SOT-23/SOT-143 DC Electrical Specifications, $T_C = +25^\circ\text{C}$, Single Diode

Part Number HSMS-	Package Marking Code	Lead Code	Configuration	Forward Voltage V_F (mV)		Typical Capacitance C_T (pF)
2860	T0	0	Single	250 Min.	350 Max.	0.30
2862	T2	2	Series Pair ^[1,2]			
2863	T3	3	Common Anode ^[1,2]			
2864	T4	4	Common Cathode ^[1,2]			
2865	T5	5	Unconnected Pair ^[1,2]			
Test Conditions				$I_F = 1.0 \text{ mA}$		$V_R = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}$

Notes:

1. ΔV_F for diodes in pairs is 15.0 mV maximum at 1.0 mA.
2. ΔC_T for diodes in pairs is 0.05 pF maximum at -0.5V .

SOT-323/SOT-363 DC Electrical Specifications, $T_C = +25^\circ\text{C}$, Single Diode

Part Number HSMS-	Package Marking Code	Lead Code	Configuration	Forward Voltage V_F (mV)		Typical Capacitance C_T (pF)
286B	T0	B	Single	250 Min.	350 Max.	0.25
286C	T2	C	Series Pair ^[1,2]			
286E	T3	E	Common Anode ^[1,2]			
286F	T4	F	Common Cathode ^[1,2]			
286K	TK	K	High Isolation Unconnected Pair			
286L	TL	L	Unconnected Trio			
286P	TP	P	Bridge Quad			
286R	ZZ	R	Ring Quad			
Test Conditions				$I_F = 1.0 \text{ mA}$		$V_R = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}$

Notes:

1. ΔV_F for diodes in pairs is 15.0 mV maximum at 1.0 mA.
2. ΔC_T for diodes in pairs is 0.05 pF maximum at -0.5V .