



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UN SISTEMA DE TRANSFERENCIA
INALÁMBRICA DE ENERGÍA PARA LA ALIMENTACIÓN DE VEHÍCULOS
ELÉCTRICOS UTILIZANDO BEAMFORMING

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

CRISTIAN HERNÁN TORRES VILLARROEL

PROFESOR GUÍA:
CLAUDIO ESTÉVEZ MONTERO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
NICOLÁS REYES GUZMÁN
ÁLVARO SILVA MADRID

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: CRISTIAN HERNÁN TORRES VILLARROEL
FECHA: 2018
PROF. GUÍA: CLAUDIO ESTÉVEZ MONTERO

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UN SISTEMA DE TRANSFERENCIA
INALÁMBRICA DE ENERGÍA PARA LA ALIMENTACIÓN DE VEHÍCULOS
ELÉCTRICOS UTILIZANDO BEAMFORMING

La utilización de vehículos eléctricos es una forma efectiva de contrarrestar el impacto negativo producido por la humanidad en el medio ambiente del planeta, a través de la reducción de gases nocivos emitidos a la atmósfera. Sin embargo, este tipo de automóviles aún no alcanza el suficiente desarrollo, lo que hace necesario efectuar mejoras para acelerar su industrialización. Un avance tecnológico relevante es la posibilidad de alimentar el vehículo mientras está en movimiento, lo que permitiría eliminar los largos tiempos de carga de las baterías.

El presente informe tiene como objetivo estudiar un sistema que permita transferir potencia a un automóvil en movimiento, utilizando la tecnología de direccionamiento de haces. Para esto, es necesario investigar previamente los conceptos de transferencia inalámbrica de energía, beamforming, diseño de antenas e interferencia de ondas.

Para estudiar el sistema se crean simulaciones y pruebas de concepto. Se inicia observando la interferencia de las ondas producidas por un arreglo lineal de parlantes a través de una simulación animada. Con el objetivo de definir características del modelo, se analizan los patrones de radiación producidos por un arreglo al variar los parámetros fundamentales, además de analizar el comportamiento del mismo en distintas bandas de frecuencia. Finalmente, se realizan ensayos con sonido para visualizar el comportamiento de beamforming en un escenario con cuatro parlantes.

La implementación de la simulación de interferencia consigue visualizar el comportamiento de las ondas en el tiempo y el espacio, conformando una primera aproximación al sistema. Por otro lado, la variación de los parámetros del arreglo permite definir el número de antenas, la distancia entre las mismas y la frecuencia de trabajo que permiten una mayor directividad del modelo. Finalmente, las pruebas de concepto con sonido conforman una aplicación válida de beamforming, logrando direccionar las ondas en un ángulo en particular.

El principal alcance del trabajo realizado es su función como puente en la creación de trabajos futuros. Por un lado, el sistema de transferencia de energía a un vehículo puede ser utilizado como base para una aplicación real, a través del diseño de las antenas y creación de prototipos. Por otro, las pruebas de concepto posibilitan la implementación estudios que busquen probar la validez de conceptos utilizados en telecomunicaciones, aplicadas a un grupo de parlantes como sustituto de un arreglo de antenas.

A la experiencia cinematográfica de mi vida.

A sus personajes.

Agradecimientos

A mi familia. Mis padres, Héctor y Maritza, cuyos sacrificios, valores y amor definen quien soy. Mi hermana Yanina, por marcar primero la ruta. Mi hermano Fabián, sus sueños por cumplir. Mi sobrino Bastián, con su inocencia silente. Los Torres, tradición y abundancia. Los Vilarroel, inspiración y talento.

A mis amigos. Nicolás, por ayudarme a levantar mi espíritu. Felipe, por estar siempre presente. Los del Lab de TICs, por acogerme. Los de Eléctrica, estudio y compañerismo. Los de Plan Común, encuentros esporádicos. Los del colegio, recuerdos que no se pierden. Los de GCine, visiones de mundo.

A mis profesores. Claudio, pues su entusiasmo y visión originó el presente trabajo. Nicolás, cuyo conocimiento permitió desarrollar y concretar ideas clave. Álvaro, ya que su preocupación y guía espiritual lograron que pudiera finalizar este proceso. Alfredo, quien fue punto de inflexión para mejorar.

A los demás. Los héroes anónimos, los hombres y mujeres comunes, los artistas. Los caminos de aquellos con los que crucé el mío. A los excluidos que no mencioné para evitar quedarme escribiendo toda la vida.

A la misma existencia. La música, resonancia emocional que iluminó mi juventud. El cine, que me ahogó con su verdad y me mostró mundos que me eran desconocidos. Los pequeños momentos con las personas que amas, que son todo lo que al final queda.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivo general	2
1.3. Objetivos específicos	2
1.4. Estructura de la memoria	2
2. Revisión del estado del arte	4
2.1. Vehículos eléctricos	4
2.1.1. Tipos de vehículos eléctricos	4
2.2. Ondas	5
2.2.1. Interferencia de ondas	7
2.3. Transferencia inalámbrica de energía	7
2.3.1. Métodos de transferencia inalámbrica de energía	8
2.3.2. Beneficios y problemas asociados	9
2.4. Espectro electromagnético	10
2.4.1. Bandas del espectro	11
2.4.2. Bandas ISM	12
2.5. Antenas	12
2.5.1. Tipos de antenas	13
2.5.2. Parámetros fundamentales	14
2.5.3. Arreglos de antenas	15
2.5.4. Campo cercano y lejano	17
2.5.5. Ecuación de transmisión de Friis	18
2.5.6. Amplificadores	19
2.6. Beamforming	19
2.7. Estado del arte	20
2.7.1. Transferencia de energía y beamforming a través de ondas de radio	20
2.7.2. Transferencia de energía y beamforming a través de ondas de sonido	21
3. Implementación	22
3.1. Escenario de trabajo	22
3.2. Interferencia de ondas	24
3.2.1. Simulación base	24
3.2.2. Patrón de radiación	25
3.3. Parámetros de diseño	25
3.3.1. Frecuencia de trabajo	25

3.3.2.	Características de las antenas	26
3.3.3.	Análisis de potencia	26
3.4.	Pruebas de concepto	27
3.4.1.	Parámetros del sistema conceptual	27
3.4.2.	Pruebas con direccionamiento variable	30
4.	Resultados y análisis	32
4.1.	Interferencia de ondas	32
4.2.	Parámetros de diseño	34
4.2.1.	Frecuencia de trabajo	34
4.2.2.	Tipo de antena	36
4.2.3.	Distancia entre antenas	38
4.2.4.	Número de antenas	41
4.2.5.	Análisis de consumo	43
4.3.	Pruebas de concepto	44
4.3.1.	Número de parlantes	44
4.3.2.	Distancia entre parlantes	46
4.3.3.	Reducción de ancho de banda	48
4.3.4.	Direccionamiento de haces	49
4.3.5.	Beamforming en tiempo real	50
5.	Conclusiones	53
5.1.	Trabajo Futuro	54
	Bibliografía	54

Índice de Tablas

2.1. Bandas del espectro electromagnético	10
2.2. Bandas ISM.	12
4.1. Potencia transferible en bandas ISM de baja frecuencia.	36
4.2. Potencia transferible en bandas ISM de alta frecuencia.	36

Índice de Ilustraciones

2.1. Tipos de vehículos eléctricos	5
2.2. Características en tiempo y distancia de una onda sinusoidal.	6
2.3. Comportamiento de una onda esférica en el espacio.	6
2.4. Interferencia constructiva (arriba) y destructiva (abajo).	8
2.5. Carga de batería de celular realizada de forma inalámbrica.	9
2.6. Antena dipolo.	13
2.7. Antena patch.	13
2.8. Patrón de radiación y parámetros asociados.	15
2.9. Arreglo planar de antenas microstrip.	16
2.10. Beamforming producido por un arreglo lineal.	19
3.1. Escenario de trabajo.	23
3.2. Diagrama del escenario de pruebas.	28
3.3. Escenario de pruebas de concepto para mediciones frontales.	29
3.4. Escenario de pruebas de concepto para mediciones posteriores.	30
4.1. Interferencia de ondas de dos antenas.	33
4.2. Ejemplos de interferencias: (a) 4 elementos, (b) 60 grados.	33
4.3. Potencia recibida en el rango de 10 a 60 metros para las bandas ISM.	34
4.4. Potencia transferible por banda ISM.	35
4.5. Patrones individuales de distintos tipos de antenas.	37
4.6. Patrones de radiación según tipo de antenas de un arreglo.	38
4.7. Patrones de radiación a 90 grados, modificando distancia entre elementos.	39
4.8. Patrones de radiación a 30 grados, modificando distancia entre elementos.	40
4.9. Patrones de radiación a 90 grados, modificando número de elementos.	41
4.10. Patrones de radiación a 30 grados, modificando número de elementos.	42
4.11. Patrón de radiación de un parlante.	44
4.12. Patrones de radiación de dos, tres y cuatro parlantes.	45
4.13. Patrones de radiación a 850, 1700 y 3400 Hz.	47
4.14. Patrones de radiación de 1 y 4 elementos.	48
4.15. Patrones de radiación direccionados en 90, 60 y 30 grados.	49
4.16. Sonido grabado en un ángulo de 0 grados.	50
4.17. Sonido grabado en un ángulo de 90 grados.	51
4.18. Beamforming de 0 a 180 grados.	52
4.19. Beamforming de 0 a 90 grados.	52

Capítulo 1

Introducción

La presente memoria se orienta a estudiar un sistema de transferencia inalámbrica de energía que permita alimentar un vehículo eléctrico a distancia. Para cumplir este cometido, se investigan las tecnologías pertinentes, tales como la técnica de beamforming y la transferencia de energía mediante radiofrecuencias, para luego realizar pruebas y simulaciones que permitan establecer los parámetros de un modelo válido. El enfoque del estudio está en el traspaso de potencia a través de ondas, por lo que crear un escenario funcional necesita de trabajo futuro en el diseño de las antenas y el sistema vehicular.

1.1. Motivación

Una de las mayores preocupaciones de las nuevas generaciones de ingenieros es el cuidado del medio ambiente en el que estamos insertos. Una de las tecnologías que permiten reducir la huella de carbono que producimos es la de los vehículos eléctricos, los cuales utilizan energía eléctrica para alimentar sus motores, reemplazando el uso de petróleo y sus derivados contaminantes. Esta tecnología no se ha impuesto en el mercado, lo que conduce a pensar que se deben realizar grandes mejoras para atraer a los automovilistas al uso de la misma.

Actualmente, los automóviles eléctricos son alimentados a través de una conexión cableada que carga las baterías del vehículo, lo que genera un largo tiempo de espera en que este no puede ser utilizado. Sin embargo, en una sociedad que se ha acostumbrado a la instantaneidad, es vital estudiar una solución que permita realizar la carga de baterías en tiempo real. Esta mejora podría ser un punto de inflexión en el uso de este tipo de vehículos.

La transferencia inalámbrica de energía permite alimentar aparatos eléctricos a distancia y se ha implementado en situaciones cotidianas, como lo es la carga de celulares sin la necesidad de un cable. Beamforming es una tecnología que logra direccionar los haces de energía generados en radiofrecuencias y ha sido utilizada en las últimas generaciones de redes móviles. La combinación de ambas puede generar un sistema experimental en que se transfiere energía de forma inalámbrica a un vehículo eléctrico, a través de un haz ondas de radio direccionado que sigue la trayectoria del automóvil.

Se establece la siguiente hipótesis, de acuerdo a la motivación establecida previamente: ¿Es factible realizar un sistema de transferencia inalámbrica para alimentar vehículos eléctricos utilizando beamforming?

1.2. Objetivo general

El objetivo general de la presente memoria es estudiar la factibilidad técnica de la implementación de un sistema que permita transferir potencia a un automóvil en movimiento, utilizando la tecnología de beamforming para direccionar el haz de energía creado mediante el uso de radiofrecuencias.

1.3. Objetivos específicos

Como complemento al objetivo general del proyecto, se presentan cuatro objetivos específicos. Estos objetivos permiten caracterizar las distintas etapas del desarrollo del proyecto, a través del establecimiento de una meta distinta para cada una de las fases de la memoria.

- Realizar una revisión del estado del arte que sirva como base teórica para el estudio. Estudiar los conceptos de transferencia inalámbrica de energía, beamforming, diseño de antenas e interferencia de ondas.
- Observar la interferencia producida por ondas provenientes de un arreglo lineal de antenas, mediante una simulación animada.
- Establecer los parámetros de diseño de los conceptos anteriormente estudiados, a través del estudio de directividad de los patrones de radiación producidos.
- Simular el comportamiento de beamforming en un escenario realista, a través de pruebas de concepto con ondas de sonido y un arreglo lineal de parlantes.

1.4. Estructura de la memoria

Para una mejor comprensión del trabajo realizado, la memoria se divide en cinco capítulos:

- **Introducción:** El presente capítulo, en el que se introduce el tema y se presentan los objetivos y la estructura de la memoria.
- **Revisión del Estado del Arte:** En este capítulo se realiza una contextualización de la memoria, comenzando por el estado actual de los vehículos eléctricos. Se prosigue con un estudio de los conceptos de ondas, transferencia inalámbrica de energía, espectro electromagnético, antenas y beamforming. Se finaliza con un análisis del estado del arte que permite aterrizar los términos estudiados al campo de trabajo de la memoria.

- **Implementación:** Se comienza la sección definiendo el escenario de transferencia inalámbrica de energía a un vehículo eléctrico en movimiento. Se detalla el procedimiento realizado para crear una simulación de interferencia de ondas y las distintas mediciones que permitieron dar lugar a los parámetros del modelo a diseñar. Finalmente, se detallan las características del escenario en que se enmarcan las pruebas de concepto realizadas con sonido.
- **Análisis de resultados:** Se da comienzo a esta sección mostrando los resultados de la simulación de interferencia de ondas. Se prosigue realizando un análisis de los patrones de radiación de un arreglo lineal, logrando definir parámetros del diseño de antenas. Se finaliza exponiendo los resultados de las pruebas de concepto efectuadas con un arreglo de parlantes.
- **Conclusiones:** Finalmente, se presentan las conclusiones que permiten dar por terminado el trabajo de memoria a partir de los resultados obtenidos. Se realizan recomendaciones para los posibles trabajos futuros que pueden surgir a partir del desarrollo de esta memoria.

Capítulo 2

Revisión del estado del arte

Para el correcto desarrollo de la memoria, se hace necesario realizar una completa revisión bibliográfica. Esta contextualización permite conocer el funcionamiento de todas las tecnologías involucradas, así como el estado del arte del tema en particular.

2.1. Vehículos eléctricos

Los automóviles han sido parte fundamental del desarrollo de la civilización humana durante los últimos cien años. El parque automotriz funciona como el motor de una nación, permitiendo tanto el transporte de personas como de bienes y servicios. Sin embargo, el uso de vehículos convencionales puede resultar perjudicial para la sociedad que moviliza.

El uso masivo de vehículos con motores de combustión interna está causando serios problemas para el medio ambiente y la vida humana. Utilizar este tipo de automóviles ayuda a reducir los recursos petroleros existentes en el planeta, aumenta la polución del aire en las grandes ciudades, y colabora en incrementar el calentamiento global de la Tierra. Es por esto, que nace la necesidad de tener una nueva tecnología que permita tanto alta eficiencia, como un funcionamiento seguro y limpio.

Los vehículos eléctricos (EV, *Electric Vehicles*) son el resultado de décadas de investigación en búsqueda de una tecnología que solucione los problemas del uso de motores de combustión interna. A continuación se describen brevemente los tipos fundamentales de EV.

2.1.1. Tipos de vehículos eléctricos

La Figura 2.1 muestra los cuatro tipos más relevantes de vehículos eléctricos. Estos corresponden a: de batería (BEV, *Battery Electric Vehicles*), híbridos (HEV, *Hybrid Electric Vehicles*), híbridos enchufables (PHEV, *Plug-In Hybrid Electric Vehicles*) e híbridos de celda de combustible (FCHEV, *Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles*) [1].

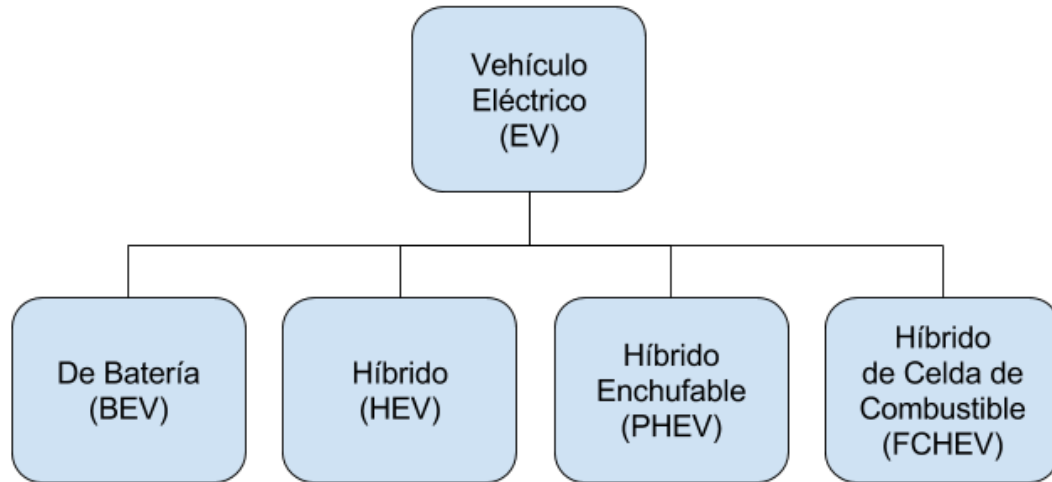


Figura 2.1: Tipos de vehículos eléctricos

BEV: Un vehículo eléctrico de este tipo utiliza baterías para almacenar energía. Esta luego se transforma en energía mecánica mediante el uso de un motor eléctrico. No se utiliza un motor de combustión interna.

HEV: Un vehículo híbrido combina un motor de combustión interna con un sistema de propulsión eléctrico. Este tipo de automóvil no necesita enchufarse, debido a que las baterías se cargan mediante el uso del motor.

PHEV: Un vehículo híbrido que contiene un banco de baterías de gran tamaño. Esta mayor capacidad permite que el vehículo sea cargado al enchufarse a una fuente externa de electricidad.

FCHEV: Un vehículo eléctrico que funciona mediante el uso de celdas de combustible. Esta tecnología reemplaza al motor de combustión interna y trabaja en paralelo con bancos de baterías.

2.2. Ondas

Una onda puede definirse como una perturbación que viaja a través de un medio. Al desplazarse, la vibración transporta energía y produce un comportamiento espacial y temporal, tal como se observa en la Figura 2.2. Las ondas pueden caracterizarse en el tiempo por su frecuencia (f), la que determina el número de ciclos que se generan en un segundo, o por su período (T), que es una medida del tiempo en que demora en dar un ciclo. Las ondas también pueden distinguirse en el espacio por su longitud de onda (λ), la que indica la distancia espacial que recorre la onda en generar un ciclo. Ambos comportamientos pueden relacionarse, debido que la multiplicación de la frecuencia de la oscilación y la longitud de la onda, corresponde a la velocidad de movimiento de la misma (c).

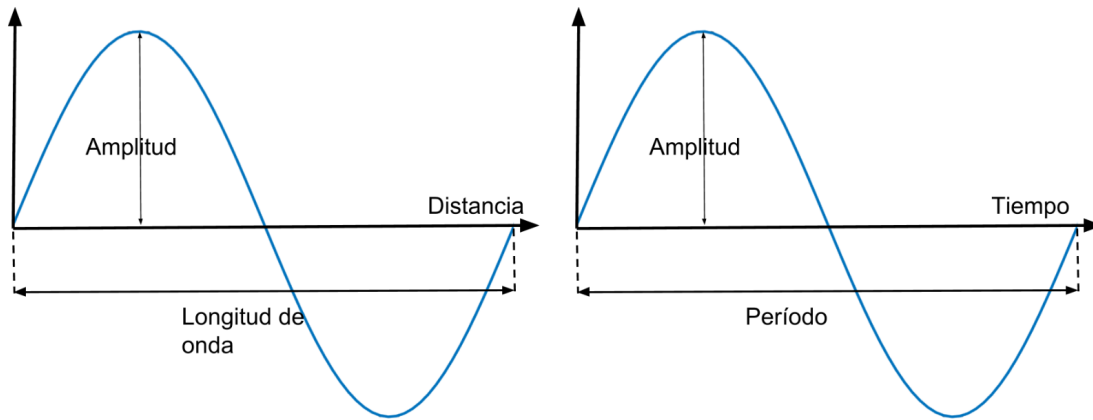


Figura 2.2: Características en tiempo y distancia de una onda sinusoidal.

Para caracterizar el comportamiento de la oscilación se utiliza la Ecuación de onda. Una onda plana está determinada por la Ecuación 2.1, en la que la constante A indica la amplitud y la exponencial determina su comportamiento espacial y temporal. El comportamiento espacial está determinado por el número de onda k , equivalente a $2\pi/\lambda$, mientras que el temporal se caracteriza por la frecuencia ω , equivalente a $2\pi \cdot f$.

$$\psi = Ae^{i(kx-\omega t)} \quad (2.1)$$

Una onda esférica difiere de la onda plana en que por conservación de la energía, la amplitud disminuye al aumentar la distancia al punto de origen. Como se observa en la Figura 2.3, la vibración decrece considerable en potencia con cada ciclo. El comportamiento de la onda esférica puede expresarse en coordenadas polares según la Ecuación 2.2, donde r corresponde a la distancia radial al punto que originó la perturbación en primer lugar.

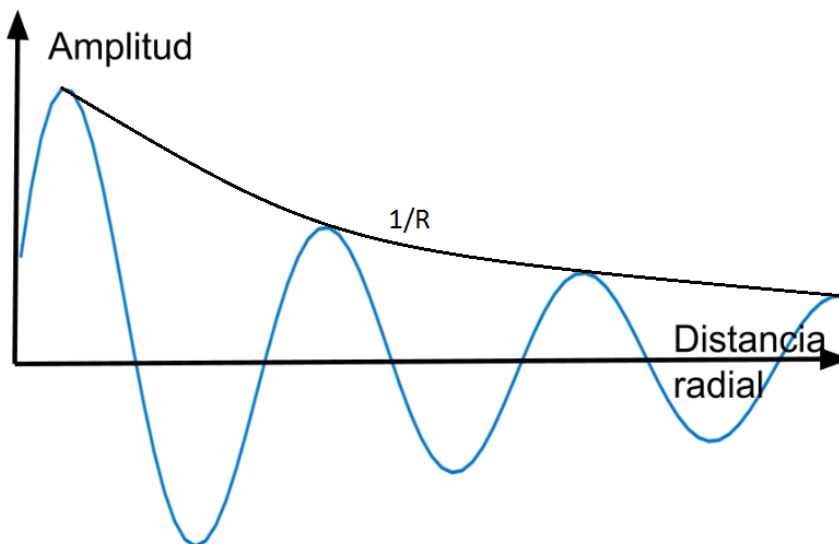


Figura 2.3: Comportamiento de una onda esférica en el espacio.

$$\psi = \frac{A}{r} e^{i(kx - \omega t)} \quad (2.2)$$

Teniendo en consideración la naturaleza del lugar donde se transmiten, las ondas se clasifican en dos tipos. Las ondas mecánicas son aquellas que necesitan un medio material para transportarse, como por ejemplo, los sismos y el sonido. Las ondas electromagnéticas y las gravitacionales no necesitan de un medio, por lo que pueden viajar a través del vacío, tal como la luz visible y las radiofrecuencias.

2.2.1. Interferencia de ondas

Al colocar más de una fuente de onda en un escenario, la suma de todas las oscilaciones generan una señal cuyo comportamiento espacial es más complejo, pues la energía total corresponde a la suma de la energía de todas las ondas individuales. De este modo, se produce el efecto de interferencia, la que se llama constructiva cuando la superposición de ondas produce una oscilación de mayor amplitud que las originales, y destructiva, cuando produce una de menor amplitud.

Para ondas de igual frecuencia, el fenómeno está determinada por la fase, como se observa en la Figura 2.4. Para dos fuentes, la interferencia constructiva se produce cuando las oscilaciones no poseen desfase entre ellas, logrando duplicar la amplitud original, mientras que la interferencia destructiva se produce cuando el desfase es de 180 grados, logrando eliminar por completo la existencia de ondas. Es posible entonces, modificar la intensidad de la onda producida por superposición al modificar las fases de las oscilaciones originales, efecto conocido como beamforming, explicado con más detalle en la sección 2.6.

2.3. Transferencia inalámbrica de energía

Diversos dispositivos eléctricos empleados día a día utilizan baterías recargables, entre los que se encuentran teléfonos celulares, cámaras fotográficas, consolas de videojuegos y vehículos eléctricos. La existencia de este tipo de batería otorga autonomía a los aparatos, al prescindir de una conexión directa a la red eléctrica, a la vez que limita momentáneamente su libertad, debido a la necesidad de una conexión temporal para realizar el proceso de carga de la batería. Esta necesidad abre la puerta a nuevas formas de transferencia de energía.

La Transferencia o Transmisión Inalámbrica de Energía (WPT, *Wireless Power Transmission*) permite transferir energía, desde la red eléctrica hacia un aparato remoto con batería, utilizando el aire como medio. Esta tecnología puede ser utilizada en situaciones donde la transmisión cableada pueda resultar peligrosa o simplemente incómoda para el usuario.

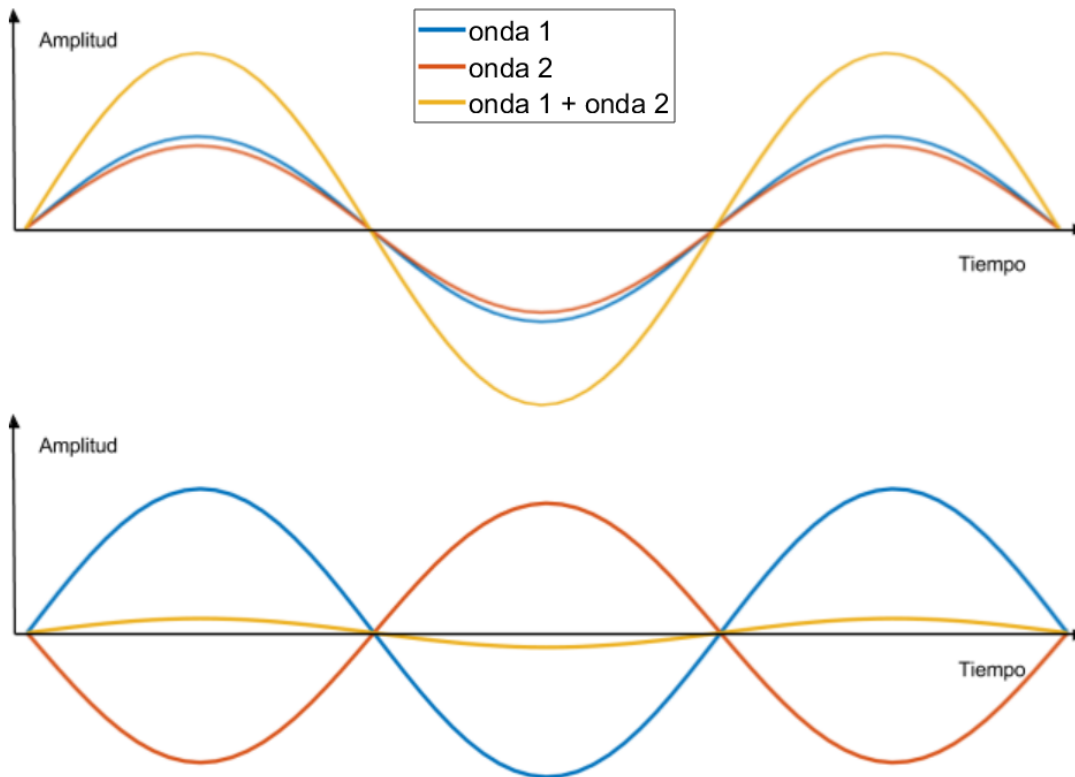


Figura 2.4: Interferencia constructiva (arriba) y destructiva (abajo).

2.3.1. Métodos de transferencia inalámbrica de energía

La primera demostración pública de un sistema WPT fue realizada por Nikola Tesla en 1891 al alimentar tubos de luz a través de acoplamiento capacitivo [2]. Tesla también demostró la posibilidad de transferir energía a través de inducción electromagnética, así como por medio de ondas de radio [3]. Estos tres métodos (inductivo, capacitivo y ondas de radio) se siguen estudiando en la actualidad, siendo las tres formas más utilizadas para transmitir potencia de manera inalámbrica.

Transferencia inductiva de energía: El método más conocido utiliza el principio de acoplamiento electromagnético para transmitir energía, tal como ocurre en un transformador. Dos bobinas se sitúan a poca distancia (del orden de unos pocos milímetros) y la energía eléctrica fluye desde la primera hacia la segunda. Esto es posible debido a que la primera bobina está conectada a una fuente de energía, produciendo un flujo magnético en la misma, el cual impacta la segunda, induciendo un voltaje [4]. Este método es ineficiente en largas distancias, ya que las bobinas deben estar cercanas la una de la otra para que se produzca el fenómeno.

Transferencia capacitiva de energía: Este método no es muy usado, aunque ha presentado bastante desarrollo en los últimos diez años [5]. La transmisión de poder se realiza a través de inducción electrostática entre las placas de un condensador. La principal razón por la que esta tecnología no se ha desarrollado al nivel de la transferencia inductiva, es su alta ineficiencia en casos en que la separación es mayor a un milímetro.

Transferencia de energía a través de ondas de radio: Este método utiliza antenas para emitir y recibir señales de radio a largas distancias. Las ondas pueden ser direccionadas desde el transmisor para conseguir que el receptor obtenga cantidades considerables de energía. Es posible lograr alcances de varios kilómetros, lo que permite a este método ser utilizado para recibir o transmitir energía a satélites que orbitan la Tierra. Una ventaja de esta tecnología es que pueden aplicarse conceptos propios de telecomunicaciones y electrónica para el estudio de la transferencia.

De todos los métodos mencionados, el utilizado en esta memoria es el de transferencia a través de ondas de radio. Este método posee gran alcance, lo que permite ser empleado en sistemas en que el objetivo de la transmisión se encuentra a una distancia considerable, ya sea fija o variable. Además, como la transferencia es realizada por radiofrecuencias, es posible realizar un estudio considerando conceptos aplicados en telecomunicaciones y diseño de antenas.

2.3.2. Beneficios y problemas asociados

Existen múltiples beneficios y problemas asociados a la implementación de un sistema de transferencia inalámbrica de energía [4]. El principal beneficio de WPT está en el uso de esta tecnología en la vida cotidiana, ya que puede ser útil al momento de cargar las baterías de teléfonos celulares (tal como muestra la Figura 2.5 [6]), computadores portátiles y otros aparatos similares. Además, es posible utilizar WPT en localidades de difícil acceso, para alimentar remotamente a la comunidad.



Figura 2.5: Carga de batería de celular realizada de forma inalámbrica.

Entre las principales desventajas de WPT se encuentra la interferencia producida en la transferencia, la que puede actuar sobre aparatos eléctricos de vital importancia, como en el servicio médico. Además, siendo una tecnología en desarrollo, tiene un alto costo de implementación y los arreglos de antenas utilizados ocupan demasiado espacio.

Existen algunos problemas que WPT debe superar si se desea imponer a las tecnologías existentes. El principal es que las técnicas utilizadas son ineficientes y no permiten alcanzar el rendimiento necesario para ser aplicadas en un ambiente real. Esta dificultad puede resultar clave a la hora de diseñar un sistema de transferencia inalámbrica para alimentar un automóvil, y debe ser un factor de mejora para futuros estudios.

Entre los impactos de esta tecnología se cuentan fisiológicos y económicos. La radiación emitida es menor que la registrada en hornos microondas y equipos de telecomunicaciones, pero debe ser considerada a la hora de implementar un sistema de transferencia inalámbrica en un escenario realista. En cuanto a la economía, se reduciría la cantidad de combustible utilizado en la transmisión y distribución de energía.

2.4. Espectro electromagnético

Debido al comportamiento de la luz como onda, se le pueden asignar valores de frecuencia, amplitud, longitud de onda y fase. La frecuencia es la propiedad más trascendental de una onda electromagnética, pues a partir de esta se puede determinar tanto la cantidad de energía que esta traslada, como el uso que se le pueda dar.

Las ondas electromagnéticas se dividen en siete grandes grupos de acuerdo a su frecuencia, lo que se conoce como espectro electromagnético. En la Tabla 2.1 se muestran las siete bandas en orden de mayor a menor frecuencia: rayos gamma, rayos X, ultravioleta, luz visible, infrarrojo, microondas y ondas de radio. Esta división se produce para comprender mejor las propiedades y aplicaciones que tiene el espectro según su frecuencia.

Tabla 2.1: Bandas del espectro electromagnético

Banda	Rango de Frecuencia
Rayos gamma	$> 3 \cdot 10^{19} Hz$
Rayos X	$3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{19} Hz$
Ultravioleta	$7,89 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16} Hz$
Luz visible	$3,84 \cdot 10^{14} - 7,89 \cdot 10^{14} Hz$
Infrarrojo	$3 \cdot 10^{11} - 3,84 \cdot 10^{14} Hz$
Microondas	$10^9 - 3 \cdot 10^{11} Hz$
Ondas de radio	$< 10^9 Hz$

2.4.1. Bandas del espectro

Los rayos gamma son la radiación más energética del espectro y es producida por elementos radiactivos y procesos subatómicos. La radiación gamma es capaz de penetrar profundamente la materia, lo que la hace extremadamente peligrosa para el ser humano. Este tipo de onda se utiliza en esterilización de componentes médicos y tratamiento del cáncer.

Los rayos X son una radiación de alta energía y se producen por fenómenos nucleares. Estas ondas pueden ser tanto reflejadas como absorbidas por la materia, lo que puede ser peligroso para la vida humana. Las ondas de esta banda son utilizadas en medicina, para capturar radiografías y realizar resonancias magnéticas.

La luz ultravioleta posee relativamente alta energía y se produce en fuentes como el Sol. La radiación ultravioleta puede ser absorbida por la piel, lo que conlleva a tomar precauciones debido a la acción de la luz solar. Esta banda tiene diversas aplicaciones, tales como la esterilización de alimentos, el control de plagas y las lámparas fluorescentes.

La luz visible es, como indica su nombre, el rango del espectro que es visible al ojo humano y es la radiación que comúnmente nombramos como luz. Este es el rango en que el Sol emite gran parte de su energía, lo que explica porque esta es la banda observable por los habitantes de la Tierra. Diversas aplicaciones de la luz visible se utilizan en telecomunicaciones, tales como la fibra óptica y la comunicación con luz visible (VLC, *Visual Light Communications*), los que representan las versiones cableada e inalámbrica de la comunicación por luz, respectivamente.

La luz infrarroja es inferior en energía a la luz visible, y es producida por objetos que producen calor, tales como animales y aparatos eléctricos. Este rango de onda tiene diversas aplicaciones, tales como los controles remotos y cámaras infrarrojas.

Las microondas son la penúltima banda del espectro, de baja energía y múltiples aplicaciones. Puede ser producida por dispositivos de estado sólido y tubos de vacío. Las microondas son conocidas por el horno microondas, pero su uso más frecuente es en telecomunicaciones, donde son usadas para transmisión de diversas formas de señales y aplicaciones, como la radiodifusión, la televisión y el Internet.

Las ondas de radio son la banda del espectro de menor energía. Pueden ser producidas fácilmente al aplicar corriente alterna de cierta frecuencia a una antena transmisora. Entre las múltiples aplicaciones en esta banda, se encuentran las transmisiones de radiodifusión, televisión y telefonía móvil.

Para el diseño de un sistema de transferencia de potencia, es posible descartar las tres primeras bandas, ya que presentan niveles de energía demasiado peligrosos para el ser humano y son difíciles de producir. La banda de luz visible no es recomendable, debido a que la transmisión de energía crearía una cantidad considerable de luz visible. La luz infrarroja es utilizada es un candidato considerable, pero las pérdidas producidas en esta banda son bastante mayores a las generadas en las de menor frecuencia. Las dos bandas posibles para el sistema son las microondas y las ondas de radio.

2.4.2. Bandas ISM

Es posible utilizar radiofrecuencias para aplicaciones fuera del área de las telecomunicaciones, tal como es el caso de la transferencia de energía. El artículo 1.15 de las regulaciones de radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*) define las aplicaciones industriales, científicas y médicas (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*), como la operación de equipamiento diseñado para usar la energía de una frecuencia para fines industriales, científicos, médicos o domésticos, excluyendo aplicaciones en el campo de telecomunicaciones [7].

Para aplicaciones ISM, la ITU asigna una serie de bandas de radio, las cuales pueden ser de dos tipos. El primer tipo está definido por el Artículo 5.138 y corresponde a regiones en que el uso debe ser autorizado por la administración local correspondiente y por los servicios de telecomunicación que ocupen esas bandas. El segundo está definido por el Artículo 5.150 y corresponde a zonas en que los servicios ocupantes deben aceptar las interferencias producidas por aplicaciones ISM. Las bandas correspondientes a ambos tipos, presentes en la región 2 de la ITU (continente americano), se observan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Bandas ISM.

Tipo de banda	Rango de frecuencias	Frecuencia central
Primer tipo	6,765 MHz – 6,795 MHz	6,78 MHz
Segundo tipo	13,553 MHz – 13,567 MHz	13,56 MHz
Segundo tipo	26,957 MHz – 27,283 MHz	27,12 MHz
Segundo tipo	40,66 MHz – 40,7 MHz	40,68 MHz
Segundo tipo	902 MHz – 928 MHz	915 MHz
Segundo tipo	2,4 GHz – 2,5 GHz	2,45 GHz
Segundo tipo	5,725 GHz – 5,875 GHz	5,8 GHz
Segundo tipo	24 GHz – 24,25 GHz	24,125 GHz
Primer tipo	61 GHz – 61,5 GHz	61,25 GHz
Primer tipo	122 GHz – 123 GHz	122,5 GHz
Primer tipo	244 GHz – 246 GHz	245 GHz

2.5. Antenas

Las conexiones cableadas son parte fundamental de las redes de telecomunicaciones, formando en la mayoría de los casos, los núcleos de las mismas. Sin embargo, ciertas situaciones requieren de una conexión inalámbrica, debido a la distancia del enlace, a la dificultad de realizar una conexión cableada, o la comodidad de los usuarios. Las antenas surgen como una estructura de transición entre el espacio libre y los dispositivos cableados, permitiendo emitir y recibir ondas electromagnéticas de una frecuencia determinada, lo que se traduce en una forma de transferencia de energía.

Además de poder transmitir y recibir potencia en forma de ondas electromagnéticas, una antena puede utilizarse para apuntar la radiación emitida en ciertas direcciones, debido a que su diseño y estructura le permite emitir energía con mayor fuerza en esas trayectorias. Esta tecnología es utilizada en sistemas avanzados de comunicación, los cuales requieren una mayor eficiencia en la transmisión.

2.5.1. Tipos de antenas

Múltiples tipos de antenas han sido desarrolladas a través de los años, ajustándose a distintos escenarios y requerimientos. A continuación se describen los más importantes de acuerdo con la bibliografía estudiada [8].

Antena de alambre: Es el tipo de antena más común, usado en automóviles, edificios, routers, entre otros. Está compuesto por conductores de alambre con una sección transversal despreciable y dimensión máxima de una longitud de onda. Puede tener forma de dipolo (alambre recto), como se muestra en la Figura 2.6 [9], o de espiral o hélice.

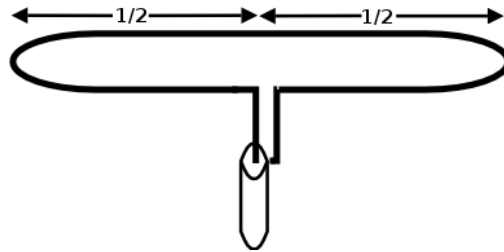


Figura 2.6: Antena dipolo.

Antenas patch: Este tipo de antena consiste en un parche metálico ubicado sobre un sustrato colocado a tierra. Comenzó a utilizarse en exploración espacial, pero actualmente se utiliza en diversas aplicaciones comerciales. Tal como se observa en la Figura 2.7, una antena patch es simple y de poco tamaño, lo que permite que sea usada en múltiples diseños [10]. A estas antenas también se le denominan microstrip, debido a que se crean en placas de circuito impreso.

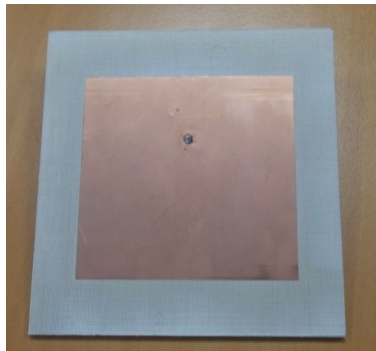


Figura 2.7: Antena patch.

2.5.2. Parámetros fundamentales

Múltiples parámetros obtenidos del estudio de antenas pueden ser útiles para el diseño de un sistema de transferencia inalámbrica. Los criterios más relevantes se presentan a continuación [11].

El patrón de radiación de una antena es la interpretación gráfica de las propiedades radiactivas de la misma en el espacio, siendo representada en coordenadas esféricas en torno al punto de radiación. Estos patrones típicamente se utilizan para indicar el valor de la potencia en el espacio, lo que se denomina patrón de potencia. Es común ver estos patrones desplegados en dos o tres dimensiones.

La Figura 2.8 es una representación polar del patrón de radiación de una antena [12]. Un lóbulo (lobe) es una porción del patrón que posee alta potencia, con respecto a las regiones de baja intensidad que la rodean. Un patrón puede poseer múltiples lóbulos, por lo que es posible clasificarlos en distintos tipos. El lóbulo mayor o principal (major lobe) es el de más alta potencia, los lóbulos menores (minor lobes) corresponden al resto, de menor intensidad en comparación con el principal e indeseados en la mayoría de las aplicaciones. Los lóbulos laterales (side lobes) son aquellos lóbulos menores más próximos al principal, mientras que el lóbulo posterior (back lobe) es el que se encuentra en dirección opuesta al principal.

El ancho del haz de un patrón es la separación angular entre dos puntos de igual intensidad de radiación que están equidistantes al lóbulo mayor. En otras palabras, el ancho del haz es el ángulo, medido desde el punto de máxima potencia, en el que se alcanza una radiación determinada. Los más utilizados son el ancho del haz de media potencia (HPBW, *Half-power beamwidth*), que mide la distancia angular en que se alcanza la mitad de la potencia máxima, y el ancho del haz del primer nulo (FNBW, *First null beamwidth*), que mide la distancia angular en que por primera vez la energía es nula en esa dirección particular. Es relevante entender que obtener un menor ancho del haz trae como consecuencia un aumento en intensidad en las bandas laterales, lo que lleva a considerar una solución intermedia.

Los patrones de radiación se pueden clasificar en tres categorías. Un patrón isotrópico es producido por una radiación igual en todos los sentidos, y es utilizado sólo como referencia, ya que no es posible construirlo de forma práctica. Un patrón direccional puede radiar con mayor eficacia en ciertas direcciones, tal como lo hacen las antenas parabólicas. Un patrón omnidireccional posee radiación idéntica solo en un plano, como en un dipolo, siendo la aplicación más realista de un patrón isotrópico.

La directividad es la razón entre la intensidad de radiación en una dirección determinada y la intensidad promedio. La máxima directividad es aquella registrada en la dirección de máxima intensidad. Este parámetro es utilizado para determinar que tan bien se transfiere la energía en un ángulo dado.

La eficiencia de una antena considera pérdidas causadas por la mala adaptación de impedancias entre la línea de transmisión y la antena, y por las pérdidas mismas de los conductores. Es un término vital de comprender para lograr la máxima eficacia en la transferencia de energía.

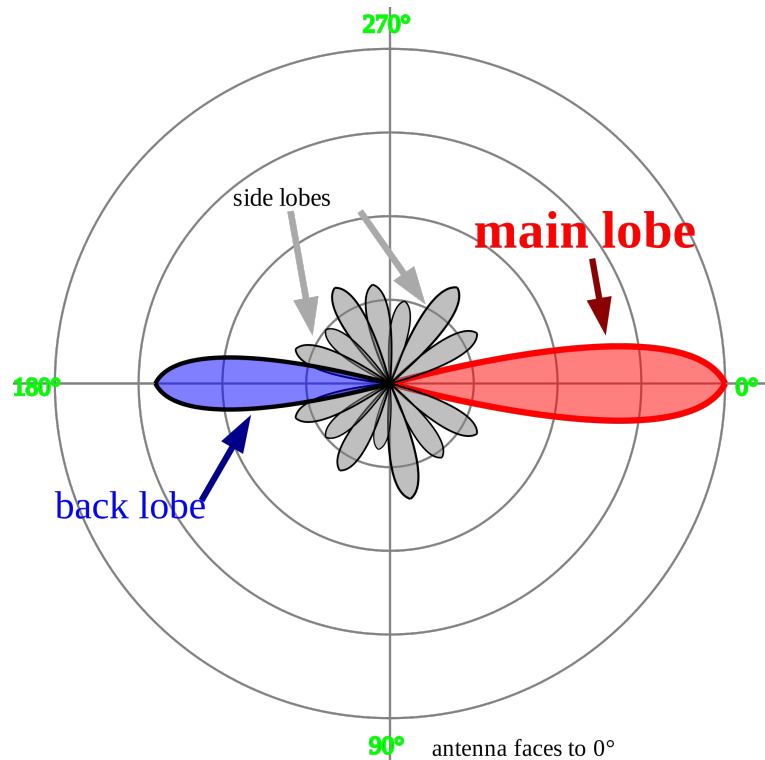


Figura 2.8: Patrón de radiación y parámetros asociados.

El área efectiva de una antena receptora es una forma de medir la eficiencia de la misma. Se define como el área en que efectivamente se está recibiendo la energía de la onda incidente y usualmente es menor al área física de la antena.

La ganancia de una antena en una dirección determina la razón entre la intensidad medida en esa dirección y la intensidad medible si la antena fuera isotrópica. Las ganancias de las antenas, sumadas a las pérdidas asociadas a los distintos medios, colaboran en comprender el estado de la eficiencia de la transferencia. La Ecuación 2.3 permite conocer el valor de ganancia de una antena, a partir del área efectiva y la longitud de onda a transmitir.

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2.3)$$

2.5.3. Arreglos de antenas

En general, las antenas poseen patrones de radiación bastantes anchos y baja directividad. Esto se traduce en elementos poco efectivos a la hora de una transferencia directa de energía. Surge entonces la posibilidad de construir un arreglo en una configuración particular que permita aumentar la directividad de las antenas como conjunto.

Un arreglo de elementos idénticos está definido por su factor de arreglo (array factor). Este corresponde al factor en que se debe multiplicar el campo electromagnético de un elemento para obtener el campo producido por el arreglo completo, tal como indica la Ecuación 2.4.

$$E_{arreglo}(\theta) = AF \times E(\theta) \quad (2.4)$$

Para un arreglo lineal, el factor de arreglo puede calcularse según la Ecuación 2.5, donde N corresponde al número de elementos. El valor de Ψ es relevante cuando se desea direccionar el haz, y es calculable de acuerdo a la Ecuación 2.6, en la que k es el número de onda, d es la distancia entre los elementos, θ es el valor de ángulo en coordenadas polares y β es el ángulo de desfase entre las antenas.

$$AF = \frac{\text{sen}(\frac{N}{2}\Psi)}{\frac{\Psi}{2}} \quad (2.5)$$

$$\Psi = kd\cos\theta + \beta \quad (2.6)$$

El valor máximo del factor de arreglo de la Ecuación 2.5 se alcanza cuando Ψ es igual a cero. De este modo, se puede obtener que el desfase β que entrega direccionamiento en un ángulo θ , está dado por la Ecuación 2.7.

$$\beta = -kd\cos\theta \quad (2.7)$$

Un arreglo de antenas posee parámetros configurables. Los más interesantes para este estudio son: la configuración geométrica del arreglo, la distancia relativa entre los elementos y la fase de excitación de los mismos [13].

En cuanto a la configuración geométrica del arreglo, las más usuales son arreglos lineales y planares. Los primeros permiten direccionar el haz en una dimensión, mientras que los segundos lo hacen en dos dimensiones. La Figura 2.9 muestra un esquema que representa un arreglo planar de antenas microstrip [14].

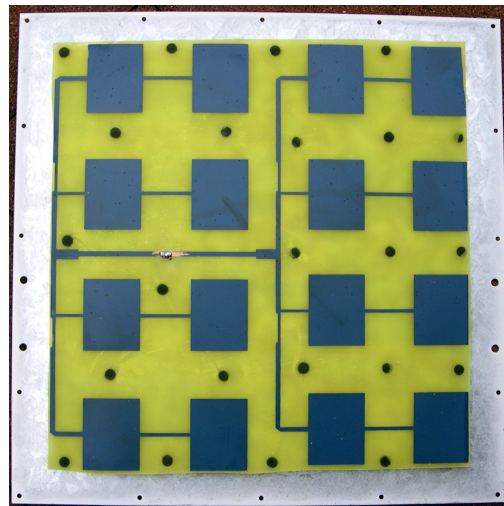


Figura 2.9: Arreglo planar de antenas microstrip.

Las distancias relativas entre los elementos se encuentran en el rango de la longitud de la onda con el que se trabaja. Cambios en las separaciones pueden originar aparición de lóbulos laterales, los cuales no son deseados para direccionar un haz.

Cambios en las fases de excitación son claves para realizar transformaciones en la dirección del haz principal. Por ejemplo, en un arreglo de dos antenas, es posible direccionar el haz en 90 grados al tener ambos elementos con la misma fase. En arreglos más extensos es posible efectuar configuraciones de ángulos más complejas para modificar en tiempo real la dirección del haz.

2.5.4. Campo cercano y lejano

Al transmitir una onda electromagnética, una antena genera en torno a ella un campo electromagnético, el cual se comporta de distintas maneras según la distancia a la que se encuentre la fuente que produjo la onda. Es posible dividir el espacio alrededor de una antena en tres regiones: campo cercano reactivo, campo cercano radiativo y campo lejano [11].

El campo cercano reactivo es la región más cercana a la antena, en la que predomina el campo electromagnético reactivo, denominado así ya que los campos eléctrico y magnético no son perpendiculares, lo que limita la radiación de la onda. La zona se define de acuerdo con la Ecuación 2.8, en el que el límite depende de la mayor dimensión de la antena (D) y la longitud de onda utilizada (λ), ambas medidas en metros.

En esta zona del campo es muy complejo modelar el comportamiento de las componentes eléctrica y magnética del mismo, lo que hace difícil conocer el valor de la potencia en un punto del espacio. Existen tanto ondas electromagnéticas radiadas desde la antena, como ondas reflejadas. La naturaleza reactiva de la región hace que la energía transmitida retorne a la antena, almacenando la energía dentro de la zona y dificultando el traspaso de potencia.

$$R < 0,62\sqrt{D^3/\lambda} \quad (2.8)$$

El campo cercano radiativo es la zona entre los campos cercano reactivo y lejano, en el que predomina la radiación electromagnética y en que la distribución angular depende de la distancia a la antena. Los límites de esta región se definen según la Ecuación 2.9, con todas los valores medidos en metros.

Las ondas reflejadas pierden importancia en la región del campo cercano radiativo, debido a que existe una mayor distancia hacia la antena. Si bien la mayoría de las oscilaciones son radiadas desde la antena, sigue siendo complejo predecir la relación entre los campos eléctrico y magnético.

$$0,62\sqrt{D^3/\lambda} \leq R < 2D^2/\lambda \quad (2.9)$$

El campo lejano es la zona más distanciada de la antena, en la cual la distribución angular del campo es independiente de la distancia a la fuente de emisión. El límite que define el comienzo de esta región, en metros, está determinado por la Ecuación 2.10.

En el campo lejano es posible predecir el comportamiento de las ondas electromagnéticas a partir de las ecuaciones de Maxwell. Esto permite conocer con precisión la naturaleza de la transferencia de energía, según el modelo clásico de un campo electromagnético.

$$R \geq 2D^2/\lambda \quad (2.10)$$

Los límites anteriores son aplicables para antenas de dimensiones más grandes que media longitud de la onda a transmitir. En antenas de menor tamaño a las mencionadas, la zonas del campo pueden redefinirse para depender solamente de λ , tal como lo indican los límites de la ecuación 2.11.

$$\lambda < R < 2\lambda \quad (2.11)$$

2.5.5. Ecuación de transmisión de Friis

La Ecuación 2.12 corresponde a la fórmula de transmisión de Friis y se refiere a las pérdidas producidas en la transmisión de una onda electromagnética en el vacío, según la distancia entre emisor y receptor (R), y la longitud de onda utilizada (λ), ambas en metros, además de las ganancias de las antenas transmisora (G_t) y receptora (G_r), en veces. Este modelo es válido para el campo lejano, en el que el comportamiento de la oscilación es predecible de acuerdo a las ecuaciones de Maxwell.

$$\frac{P_t}{P_r} = \frac{(4\pi R)^2}{G_r G_t \lambda^2} \quad (2.12)$$

Considerando que la ganancia de una antena, de acuerdo a la ecuación 2.3, depende de su área efectiva (A_e) y de la longitud de onda (λ), es posible provocar que las pérdidas también dependan de estos dos factores, tal como se observa en la Ecuación 2.13. Se observa que para una antena en particular, las pérdidas aumentan con la longitud de onda, lo que indica que sería más favorable utilizar altas frecuencias. Además, las pérdidas disminuyen al incrementar las áreas efectivas de las antenas, por lo que al aumentar el tamaño de los arreglos se incrementará la eficiencia de la transmisión.

$$\frac{P_t}{P_r} = \frac{(\lambda R)^2}{A_r A_t} \quad (2.13)$$

2.5.6. Amplificadores

Debido a las pérdidas sufridas en la transmisión, las señales recibidas por una antena o un micrófono poseen poca potencia, lo que las hace difíciles de detectar. Una etapa de amplificación permite aumentar la intensidad de la onda, logrando obtener una señal comprensible para las futuras etapas del aparato receptor.

Un amplificador aumenta la distorsión de la señal original al amplificar también el ruido que la acompaña. Esto es importante en telecomunicaciones, debido a que se desea recuperar de forma exacta la información la señal transmitida. Sin embargo, en transferencia de energía, la distorsión de la señal no es relevante debido a que no se desea enviar información, sino energía.

Debido a limitaciones técnicas, los amplificadores poseen límites en el rango de amplificación. Estos límites dependen de la frecuencia de trabajo de la transmisión, siendo posible tener un rango más amplio a bajas frecuencias.

2.6. Beamforming

Como se ha mencionado anteriormente, los arreglos de antenas son una alternativa trascendental a la hora de construir antenas con alta directividad, parámetro vital para una transferencia de energía eficiente. Sin embargo, un arreglo con parámetros fijos apunta en una dirección determinada, por lo que no otorga suficiente libertad al momento de realizar transmisión de potencia a objetos móviles. Surge la posibilidad de crear antenas inteligentes, que sean capaces de anteponerse a los cambios del sistema, como en las últimas generaciones de telefonía móvil.

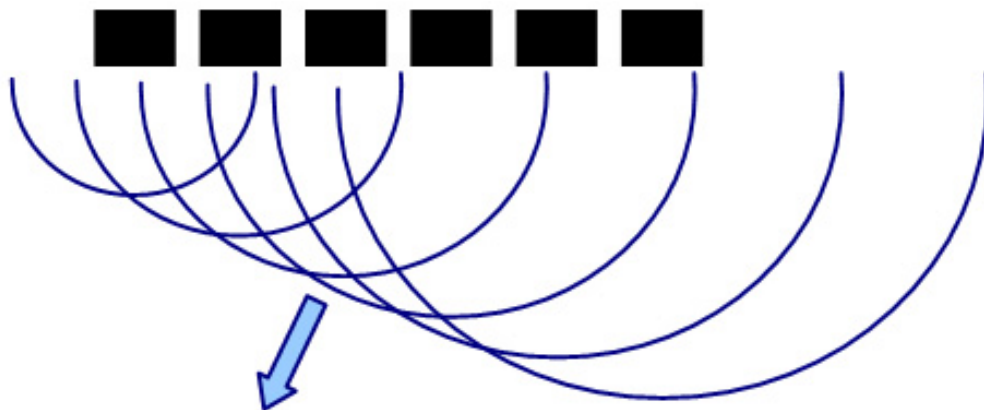


Figura 2.10: Beamforming producido por un arreglo lineal.

Beamforming (que podría traducirse como “formación de haces”) es una tecnología que permite ajustar la dirección del haz de un arreglo de antenas por medio de la variación de la fase y magnitud de la excitación de sus elementos, como se observa en la Figura 2.10 [15]. La forma más simple de realizar beamforming es a través de la instalación de módulos junto a los elementos del arreglo, que sean capaces de modificar las fases insertadas en las antenas. Sin embargo, estos módulos de cambio de fase (phase shift module), no poseen la inteligencia suficiente para anticiparse a un receptor distante en movimiento, debido a que son diseñados para entregar un cambio de fase fijo.

Beamforming adaptativo es una tecnología que permite modificar la dirección del haz de acuerdo con las condiciones mismas del sistema. El algoritmo utiliza un señal de referencia para ajustar las magnitudes y fases de cada elemento. Esta señal se transmite desde el receptor y es utilizado para determinar su posición en tiempo real [16].

2.7. Estado del arte

2.7.1. Transferencia de energía y beamforming a través de ondas de radio

Uno de los ejemplos más simples y concretos de un sistema de transferencia de energía por ondas de radio se encuentra en el trabajo de Chang-Jun Ahn [17]. En 2011 publicó un paper que describe el prototipo de un sistema de WPT para vehículos eléctricos, trabajando en una frecuencia de $5,8 \text{ GHz}$ y con una distancia de transferencia de 40 cm . La transmisión se efectúa utilizando un arreglo de cuatro antenas de bocina, mientras que la recepción se realiza con un arreglo de dieciseis antenas microstrip. El paper analiza la eficiencia de la transmisión a distintas distancias, en el rango de 0 a 40 cm , concluyendo sobre la necesidad de implementar beamforming para incrementar el rendimiento de la transferencia.

En 2015, Chang-Jun Ann publicó un paper que describe un segundo prototipo, el cual está enfocado en transmitir energía a globos de gran altitud, trabajando en la frecuencia de $5,8 \text{ GHz}$ [18]. Debido a la gran distancia de transmisión, el sistema considera el uso de un método aproximado de beamforming. Se utilizaron los mismos tipos de arreglos que en el experimento anterior, cuatro antenas de bocina para la transmisión y dieciseis antenas microstrip para la recepción. Se comparan las transferencias de energía con y sin beamforming, determinando que el método utilizado aumenta el rendimiento hasta en 1.5 veces.

En 2017 se publicó una investigación realizada en el campo de Internet de las Cosas (IoT), enfocada en WPT [19]. El paper presenta un modelo analítico del desvanecimiento del canal y una adaptación de un algoritmo de beamforming para el uso en transmisión de energía. Se construye un prototipo con cuatro radios definidas por software funcionando como antenas transmisoras y una tarjeta recolectora de energía como antena receptora, con el sistema trabajando a 915 MHz . La implementación del algoritmo de beamforming permite incrementar la eficiencia de la transferencia, rendimiento que además crece al aumentar el número de antenas del arreglo transmisor.

2.7.2. Transferencia de energía y beamforming a través de ondas de sonido

La generación de energía eléctrica a partir del sonido es una tecnología poco estudiada, aunque resulta interesante como una fuente alternativa de energía. En 2013 se publicó una investigación que utiliza múltiples transductores piezoeléctricos para convertir señales de audio en energía, la cual es almacenada en supercondensadores [20]. Se consiguió cargar una batería de 9 V en aproximadamente media hora con la potencia capturada, en laboratorio. Además, se logró capturar energía en escenario realista, al convertir el sonido de un tren en movimiento en energía eléctrica medible.

En 2014, el mismo grupo de investigación diseñó un cargador de teléfonos celulares que funciona a partir de la energía del sonido ambiente [21]. Un micrófono piezoeléctrico es utilizado para transformar el audio en energía, el cual se utiliza para cargar una batería de 3,7 V en un plazo de 20 minutos.

Beamforming de audio es una tecnología bastante atractiva, debido a su uso en dispositivos de telefonía celular y equipos de sonido envolvente. En 2014, un equipo de investigación de la IEEE propuso un método para grabar el audio proveniente de un sistema multicanal [22]. La técnica utiliza un arreglo de micrófonos omnidireccionales para formar un haz de sonido directivo en dirección a cada uno de los parlantes del sistema, logrando una mejor calidad de sonido que otros métodos implementados con micrófonos direccionales.

En 2014, Samsung utilizó beamforming de audio para mejorar la experiencia de usuario de su Galaxy S5 [23]. Dos micrófonos permiten direccionar el haz de sonido capturado en tres modos: normal, entrevista y conversación. El primero es un patrón omnidireccional, mientras que el segundo enfoca el haz hacia la parte superior del teléfono y el tercero hacia las partes superior e inferior.

Capítulo 3

Implementación

En el presente capítulo se detalla el trabajo efectuado en el desarrollo de esta memoria. Se comienza describiendo las características del escenario en el que se utilizaría el sistema de transferencia de potencia, para proseguir con la implementación de un programa que permite simular interferencia de ondas en un arreglo lineal de antenas, así como ilustrar su patrón de radiación. Se procede a describir las metodologías utilizadas para definir los parámetros de diseño del sistema a implementar, entre los que se encuentran la frecuencia de trabajo y el tipo de antena. Se finaliza describiendo la implementación de pruebas de concepto en las que se reemplazaron las antenas por parlantes, y las ondas de radio por ondas de sonido, en la cual se definen los parámetros ideales para realizar beamforming de audio en tiempo real.

Para la programación de los diversos códigos empleados, se utilizó la herramienta de software matemático MATLAB. Se escogió este programa porque permite crear complejas simulaciones de manera rápida y eficiente, debido a la gran cantidad de funciones ya implementadas. Además, MATLAB es simple de utilizar y con el que la mayoría de los estudiantes de la Facultad están familiarizados, lo que facilita el desarrollo de un trabajo futuro a partir de esta memoria utilizando los códigos ya creados.

3.1. Escenario de trabajo

Antes de efectuar simulaciones sobre el comportamiento de WPT y beamforming, es necesario definir ciertas características del escenario de trabajo. Estas propiedades son escogidas a partir del conocimiento adquirido en la realización de la revisión bibliográfica, permitiendo aterrizar el sistema a un escenario concreto, el cual se puede modificar en futuros trabajos si es necesario, considerando los resultados obtenidos en esta memoria y los alcances que puedan tener las futuras investigaciones. Por otro lado, definir de antemano algunas características permite reducir los grados de libertad del modelo, logrando disminuir la complejidad del estudio del mismo.

Un diagrama simple del escenario se presenta en la Figura 3.1, en el cual se observan cinco elementos fundamentales: vehículo con arreglo receptor, trayecto a recorrer, distancia transmisor-trayecto, ángulo del haz y arreglo transmisor. El modelo supone que ambos arreglos de antenas se posicionan de forma perpendicular al plano del escenario y a la trayectoria de las ondas.

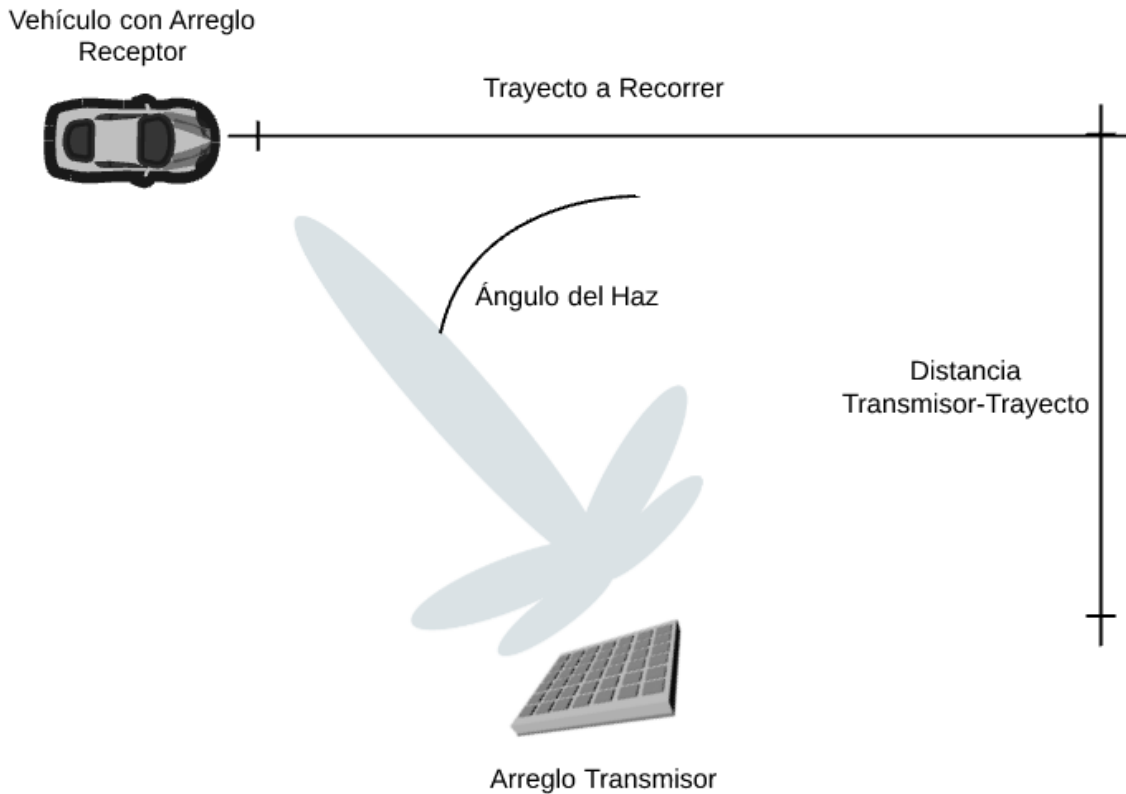


Figura 3.1: Escenario de trabajo.

El vehículo con arreglo receptor mantendrá una velocidad constante durante el tiempo en que se transfiere la energía, manteniendo un trayecto a recorrer en línea recta, el que se fija en 120 m . Se supone que se está en un escenario urbano, en el que no se puede superar los 60 km/h . El tamaño del arreglo receptor está restringido al espacio disponible en el techo del automóvil, el cual se estima en un 1 m^2 .

El arreglo transmisor se ubica a una distancia de 10 m del camino, la que se denomina distancia transmisor-trayecto. Este arreglo no tiene restricciones físicas para su tamaño y a través de Beamforming adaptativo la energía se direcciona hasta la posición del vehículo, direccionamiento medible por medio del ángulo del haz, el cual se restringe de 10 a 170 grados, debido a que en los ángulos extremos se apunta de forma perpendicular al trayecto del automóvil.

En una primera instancia, el diseño consideraba que un gran número de arreglos transmisores estaban colocados directamente bajo el vehículo, a lo largo del trayecto a recorrer. Esto se modificó pensando en que en esta situación, el tiempo de transferencia de cada arreglo es muy pequeño, debido a que el automóvil cambia su valor angular muy rápidamente. Si se considera que la distancia entre el camino y el vehículo es de $0,4\text{ m}$, considerando el recorrido angular desde 10 a 170 grados, se logra en un trayecto de $4,8\text{ m}$ de largo, el cual el automóvil recorre en aproximadamente $0,29$ segundos.

Con el modelo actual, que considera que el arreglo transmisor está ubicado a una distancia de 10 m del trayecto, se aumenta el valor del tiempo de transferencia. El vehículo recorre la distancia angular que va desde 10 a 170 grados en 114 m , valor aproximado al que se había fijado con anterioridad. El automóvil atraviesa este trayecto en $6,83$ segundos, en lugar de $0,29$ segundos, lo que incrementa el tiempo en que la energía se transfiere en un 2355% .

3.2. Interferencia de ondas

3.2.1. Simulación base

Se crea una simulación de interferencia de ondas, aplicando conocimientos adquiridos del diseño de antenas y de modelamiento de ondas. Esta simulación sirve como base para comprender el comportamiento de los campos electromagnéticos producidos por un arreglo lineal de antenas, además de permitir estudiar de manera simple los conceptos de transferencia inalámbrica de energía y beamforming.

Para realizar la simulación, se calcula el campo electromagnético producido por una antena en todo el espacio, la cual se comporta como una onda sinusoidal, con pérdidas que aumentan de forma proporcional a la distancia a la fuente. Este campo corresponde al creado por una antena omnidireccional, por lo que si se desea obtener el campo producido por otro tipo de antena, el campo omnidireccional se debe multiplicar por un factor que modele el patrón de esa antena. Para un dipolo, la forma del patrón equivale a $\text{sen}^2(\theta)$, donde θ es el valor del ángulo del punto del espacio en coordenadas polares, mientras que para un micrófono o una antena microstrip se aproxima a una cardioide de forma $1 + \text{sen}(\theta)$.

Para obtener el campo producido por N antenas en un arreglo lineal, el valor del campo calculado para una antena se multiplica por el factor de arreglo, dependiente del ángulo a direccionar el haz, de acuerdo con la ecuación 2.5. Una vez obtenido el campo total en el espacio, se multiplica por su componente temporal, lo que permite realizar una animación del mismo. Se debe destacar que este patrón es válido para campo lejano, por lo que se muestra el valor del límite entre campo cercano y lejano para cada simulación.

La simulación se realiza mediante la creación de un gráfico de superficie, el cual permite visualizar el campo electromagnético en un espacio cuadrado de 40 longitudes de onda por lado. Se efectúa un nuevo gráfico en cada instante de tiempo, lo que consigue animar la simulación. El campo graficado se mide en decibelios, lo que facilita observar de mejor manera el decrecimiento del campo en un factor cuadrático.

3.2.2. Patrón de radiación

Además de la simulación del campo eléctrico, se incluye un gráfico en coordenadas polares del patrón de radiación del arreglo. Para calcular este patrón se multiplica el factor de arreglo por la forma del patrón de una antena, sin considerar ni el comportamiento espacial ni el temporal del campo. Luego, el gráfico se normaliza para que el rango de valores varíe linealmente entre cero y uno.

El patrón de radiación resulta útil para visualizar la forma del campo eléctrico, y por lo tanto, que tan directivo es el arreglo en cuestión. Además, es posible incorporar en un mismo gráfico distintos patrones, lo que permite comprender mejor los cambios producidos al variar, por ejemplo, el número de elementos o la distancia entre las antenas.

El programa posee cuatro variables, las que se ingresan a través de la ventana de comandos. La primera variable es el número de puntos o antenas del arreglo. La segunda es la distancia entre las antenas, la cual se mide en longitudes de onda. El tercer parámetro es el ángulo al cual se desea apuntar el arreglo, modificable entre 0 y 180 grados. La última variable es el tipo de antena, pudiendo ser omnidireccional, dipolo horizontal, dipolo vertical o cardioide (microstrip).

3.3. Parámetros de diseño

El estudio de la simulación descrita anteriormente, junto a los conocimientos adquiridos de la investigación previa, permiten definir algunos parámetros de la implementación del sistema. Estos corresponden a la frecuencia de trabajo y a distintas características de las antenas, entre las que se encuentran el tipo, la distancia entre los elementos y el número de antenas.

3.3.1. Frecuencia de trabajo

Previo a definir la frecuencia de trabajo, es necesario estudiar el rango de distancias en el que se transmitirán las señales. El automóvil recorre 100 metros y se encontrará a 10 metros del arreglo transmisor a la mitad del trayecto, formando un ángulo recto entre el camino y la recta entre los arreglos. Por el teorema de Pitágoras, es posible asumir que la distancia máxima entre los arreglos (al inicio y al final del recorrido) no superará los 52 metros.

Se realizan mediciones de las ganancias del arreglo según la ecuación 2.13, en las distintas bandas ISM, para el rango de distancia entre 10 y 60 metros. Estas medidas se producen teniendo en cuenta que el área efectiva no debe sobrepasar una región de un metro cuadrado, correspondiente al espacio disponible en el vehículo receptor. Se grafican las mediciones obtenidas para las diferentes frecuencias en una misma figura, facilitando la comparación y el análisis.

Se utiliza información recogida de Digikey, distribuidora de componentes electrónicos, para crear una recta que simula la potencia máxima entregable (P_{1db} , punto en que un incremento de 2 db en la potencia de entrada resulta en un aumento de 1 db en la potencia de salida), por los amplificadores disponibles en el mercado para las bandas ISM. Se espera una recta con pendiente negativa, debido a las restricciones tecnológicas existentes para altas frecuencias.

Se emplea nuevamente la fórmula de Friis para calcular la ganancia obtenible en un arreglo de antenas de un metro cuadrado de área, a 60 metros de distancia del mismo, para las distintas bandas ISM. Se grafican las mediciones obtenidas y la información de Digikey en la misma figura de potencia versus frecuencia. Se agrega una curva correspondiente a la suma de ambas rectas, con el objetivo de encontrar la banda óptima en la que la potencia registrada recepción sea mayor, la que será asumida como frecuencia de trabajo del sistema.

3.3.2. Características de las antenas

Para definir el tipo de antena, se utiliza la simulación descrita en la sección 3.2. Se observan las diferencias registradas en los patrones de radiación para distintos tipos de antenas, buscando obtener un patrón de alta directividad. Se estudian las siguientes antenas: omnidireccional, dipolo horizontal, dipolo vertical y cardioide. Se analiza tanto el patrón de radiación de una antena, como de un arreglo de dos elementos.

Para fijar la distancia entre los elementos, se observa nuevamente la simulación realizada. Se varía la separación entre $\lambda/4$ y 4λ , buscando comprender el comportamiento del arreglo en cuanto a su direccionalidad a medida que se modifica esta variable. Se realizan simulaciones para ángulos de direccionamiento de 90 y 30 grados, pudiendo analizar la efectividad del beamforming al modificar la distancia entre las antenas.

Se utiliza una vez más la simulación para definir el número de antenas. Se estudian las diferencias en los patrones a medida que se aumenta la cantidad de elementos de un arreglo lineal, en un rango de dos a diez, lo que se traduce en un arreglo cuadrático de hasta cien elementos en el escenario original. Se realizan simulaciones para ángulos de direccionamiento de 90 y 30 grados, analizando así la efectividad del beamforming.

3.3.3. Análisis de potencia

Se realiza un análisis de la potencia transmisible a un vehículo eléctrico, en comparación con la potencia consumida. Este estudio se efectúa para comprender si la transferencia inalámbrica puede cargar el automóvil, o solo desacelera la tasa de descarga de las baterías.

Se utilizan los datos de potencia de recepción obtenidos previamente, para antenas de 1 metro cuadrado y una distancia de transmisión de 60 metros, en la banda ISM que permite una mayor eficiencia. Se recogen datos de la eficiencia que poseen los vehículos eléctricos presentes en el mercado automotriz actual. A partir de la eficiencia de los automóviles en un escenario urbano, se calcula la potencia consumida.

3.4. Pruebas de concepto

3.4.1. Parámetros del sistema conceptual

Debido a la alta complejidad que supondría crear un prototipo en el escenario original, se implementa un escenario de prueba en el que las antenas son reemplazadas por equipos de sonido y las ondas de radio por ondas de sonido. Este escenario sustituto ayuda a comprender el comportamiento de los conceptos estudiados, pero no son válidos como implementación exacta de la transferencia energética a un vehículo en movimiento.

Como reemplazo del arreglo transmisor de ondas, se utiliza un arreglo lineal de parlantes, mientras que para sustituir el arreglo receptor se ocupa un único micrófono SAMSON, modelo R21S. El arreglo transmisor consiste en un home cinema 5.1 de la marca Samsung, modelo HT-4500K, lo que permite tener un máximo de seis canales distintos, en los seis parlantes del equipo.

El equipo se conecta a través de un cable óptico a una tarjeta de sonido Sound Blaster Zx con salida óptica. Esta salida utiliza el protocolo Sony/Philips Digital Interface Format (S/PDIF), el cual solo posee 2 canales de audio. Para emitir audio por los 6 canales del home cinema de manera diferenciada, se debe codificar el sonido en formato Dolby Digital, lo que se logra utilizando la herramienta de edición Audacity.

Para estudiar beamforming, se genera la misma señal por los cuatro parlantes laterales, pero desfasada en un ángulo tal que permite direccionar el haz, según la ecuación 2.7. El parlante central se deja en silencio, puesto que posee diferentes dimensiones a los otros cuatro, que son idénticos. El subwoofer tampoco emite sonido, debido a que su rango en frecuencia es más bajo que en los demás elementos.

Para crear el sonido se crean seis archivos WAVE form audio file format (WAV), correspondiente a las cuatro señales sinusoidales de igual frecuencia, a emitir por los cuatro parlantes laterales, y a dos arreglos de ceros, los que se traducen en silencio para el parlante central y el subwoofer. Luego, los archivos se introducen a Audacity, donde se codifican en un archivo comprimido Dolby Digital que permite la existencia de 6 canales en la señal óptica. Posteriormente, El sonido se reproduce mediante el programa VLC media player, configurado para emitir por la tarjeta con salida óptica.

La Figura 3.2 ilustra un diagrama sencillo del escenario de pruebas, junto a sus principales medidas fijas: la separación entre los parlantes ($d = 10 \text{ cm}$), la distancia entre el centro del arreglo de parlantes y el micrófono ($R = 30 \text{ cm}$), y la separación angular de las medidas tomadas (5°).

La frecuencia del sonido se escoge para permitir que los parlantes estén espaciados en una distancia de 10 cm , la que se mantiene fija en todas las simulaciones. Considerando que la velocidad del sonido en el aire es de 340 m/s , se logran separaciones de $\lambda/4$ a 850 Hz , $\lambda/2$ a 1700 Hz , λ a 3400 Hz , 2λ a 6800 Hz y 4λ a 13600 Hz .

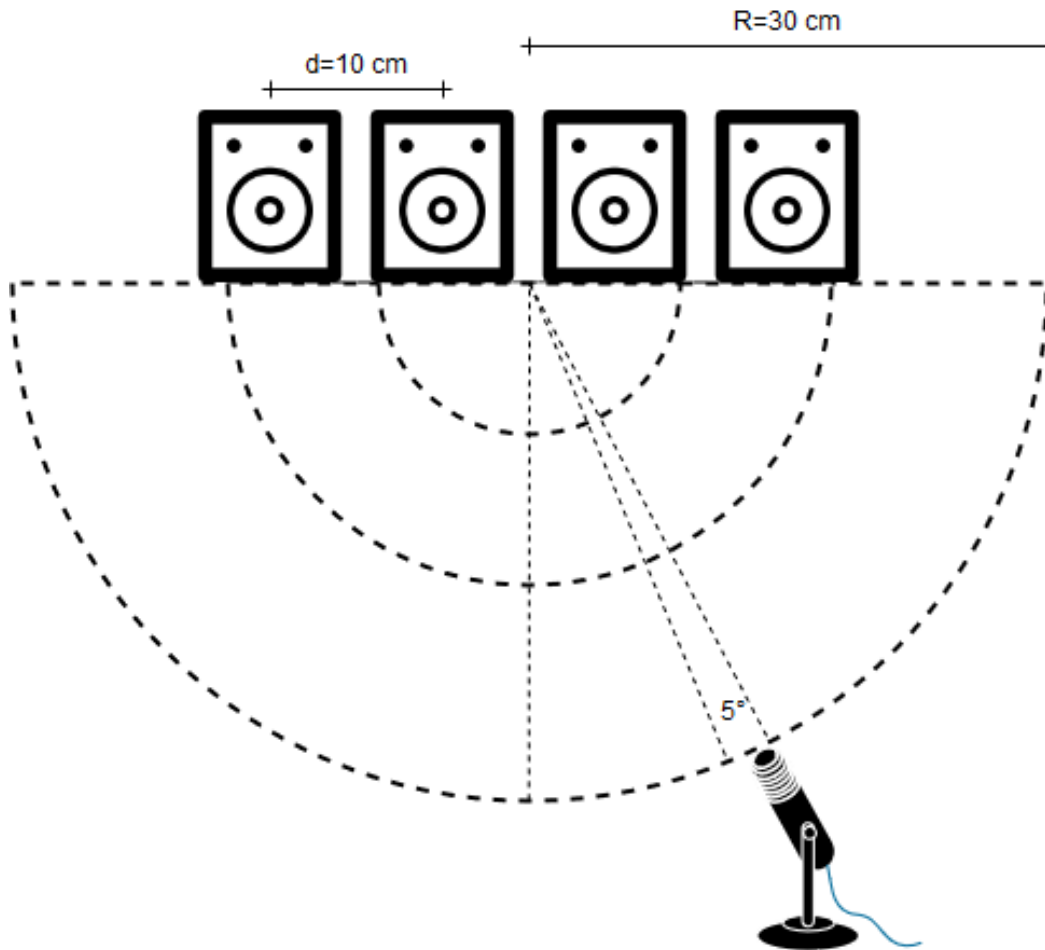


Figura 3.2: Diagrama del escenario de pruebas.

Se mide la señal recibida por el micrófono cada 5 grados, en el rango entre 0 y 360 grados con respecto a la disposición lineal de los parlantes, teniendo especial cuidado en ubicar las mediciones a una distancia que permita estar en el campo lejano. Considerando este campo como el dado por la ecuación 2.11, los valores de este corresponden a 80 *cm* para 850 *Hz*, 40 *cm* para 1700 *Hz*, 20 *cm* para 3400 *Hz*, 10 *cm* para 6800 *Hz* y 5 *cm* para 13600 *Hz*.

Se filtra la señal recibida en la banda de frecuencia del sonido emitido, para luego medir el valor cuadrático medio de potencia de la señal filtrada, lo que permite graficar el patrón de radiación del sistema. El filtrado se realiza para emular un escenario real, donde las antenas de recepción tienen angostos anchos de banda, y para distinguir la señal recibida de los parlantes, de ruidos que puedan interferir a la hora de realizar las pruebas.

La Figura 3.3 corresponde a una fotografía del escenario de prueba, el cual posee una tabla de coordenadas que posibilita realizar las mediciones con exactitud. El origen del sistema se ubica en el punto central del arreglo de parlantes, lo que permite trazar líneas que representan los ángulos de medición, entre 0 y 180 grados. Para medidas entre 180 y 360 grados, se coloca la tabla de forma inversa, como se observa en la Figura 3.4. Se tiene especial cuidado que cada medición se efectúe a la misma distancia del origen de las coordenadas.



Figura 3.3: Escenario de pruebas de concepto para mediciones frontales.

Se realizan pruebas modificando el número de parlantes del arreglo, de dos a cuatro. Para tener una referencia del funcionamiento de un parlante, se efectúa previamente una medición de su patrón individual. Luego se miden los patrones de los arreglos, manteniendo constante el volumen del equipo y la distancia al origen del sistema.

Se ejecutan pruebas en las que se modifica la distancia entre los parlantes, en el rango de $\lambda/2$ a 2λ . El escenario posee limitaciones físicas, ya que los parlantes no son puntuales, siendo imposible colocarlos a distancias menores a 10 cm , y debido a que posicionarlos a distancias de más de 25 cm crea un arreglo que supera el metro de largo, lo que resulta poco práctico a la hora de realizar pruebas. Se decide entonces fijar la distancia en 10 cm , modificando el valor de frecuencia en el rango $1700 - 6800\text{ Hz}$, lo que permite indirectamente modificar la distancia con respecto al valor de la longitud de onda.

Se realiza un gráfico comparativo entre el patrón de radiación de un parlante y el patrón de radiación del arreglo de cuatro elementos direccionado en 90 grados. Se utiliza el ancho del haz de media potencia (HPBW), para medir la reducción del ancho del haz lograda mediante la utilización de beamforming, en comparación con un patrón cercano al omnidireccional.

Para demostrar el correcto funcionamiento del beamforming, se mide el patrón de radiación de un arreglo de parlantes direccionado en ángulos de 30, 60 y 90 grados, mediante el desfase de los sonidos emitidos. Se utiliza el número de elementos y la frecuencia de trabajo que permitieron visualizar haces más directivos en las pruebas realizadas anteriormente.

3.4.2. Pruebas con direccionamiento variable

Debido a que las pruebas diseñadas hasta ahora solo permiten visualizar el haz apuntado en una solo sentido, se decide crear una prueba adicional que construye un sonido cuya dirección se modifica con el tiempo. Este nuevo escenario ayuda a comprender el funcionamiento de beamforming en tiempo real, en que un vehículo en movimiento pasa frente al arreglo transmisor a una velocidad considerable, lo que provoca que el haz principal varíe su dirección angular rápidamente.



Figura 3.4: Escenario de pruebas de concepto para mediciones posteriores.

Las pruebas se realizan creando cuatro sonidos cuya fase varía a medida que avanza el tiempo. Se construyen los archivos de tal forma que su duración sea de 10 segundos, tiempo suficiente para permitir a un ser humano oír la variación de sonido. El ángulo de direccionamiento comienza en 0 grados a los 0 segundos, aumentando linealmente hasta alcanzar los 180 grados en 10 segundos, pasando por los 90 grados a los 5 segundos. Al inicio de cada señal se agrega un barrido de frecuencia que permite luego la sincronización de todas las mediciones tomadas en distintas posiciones angulares.

Se mide el sonido con el micrófono cada 5 grados, logrando capturar la variación de la señal mediante una grabación de 15 segundos. Este tiempo de grabación es mayor a la duración del sonido, lo que asegura que efectivamente se medirá todo el audio y no habrán sectores no registrados.

Para la sincronización de todas las mediciones efectuadas, se identifican los barridos de frecuencia ubicados al inicio de cada señal. Se seccionan las mediciones para tomar solo los 10 segundos registrados en el momento en que el barrido termina, logrando obtener 72 audios de 10 segundos, que simbolizan los 360 grados de recorrido angular alrededor del arreglo. Las señales medidas se grafican para generar una animación que muestra la variación angular de la señal registrada.

Se procede finalmente a trazar el patrón de radiación variable, por lo que se calcula la media cuadrática de las 72 mediciones en una pequeñas fracciones de tiempo. Se grafican de forma inmediata los valores obtenidos en coordenadas polares. Luego, al modificar el tiempo en que se realiza la medición, se registran nuevos patrones, que varían su dirección angular de 0 a 180 grados.

Capítulo 4

Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados producidos tras la implementación de las simulaciones y pruebas descritas en la sección anterior. Se comienza mostrando las animaciones de interferencia de ondas que constituyen la simulación base de la memoria. Se continúa describiendo los resultados que permiten definir los parámetros de diseño del escenario original de transferencia mediante radiofrecuencias. Se finaliza con el detalle de los logros obtenidos al implementar pruebas de concepto con ondas de sonido.

4.1. Interferencia de ondas

La versión definitiva del programa de interferencia de ondas consiste en una animación que permite observar la variación, en distancia y tiempo, de N oscilaciones en un plano. La simulación está normalizada para una longitud de onda de 1 m , equivalente a una frecuencia de 300 MHz en ondas de luz y a una frecuencia de 340 Hz en sonido, mientras que el plano X-Y se ubica entre -20 m y 20 m . Las antenas se disponen como un arreglo lineal sobre el eje X, en $Y = -8\text{ m}$, lo que posibilita visualizar mejor la interferencia en la zona superior.

Como muestra la Figura 4.1, las zonas donde el campo eléctrico (medido en decibelios) es más intenso, se corresponden con el color amarillo, mientras que las de baja intensidad lo hacen con el color azul. La Figura también despliega los valores que dan forma a esta simulación, correspondientes al número de elementos (N), la distancia entre los elementos (d), el ángulo del haz (θ) y el tipo de antena.

La Figura incluye el límite del campo lejano, calculado según la ecuación 2.10, medido en metros y dependiente de la longitud de onda. Este valor indica la distancia desde la cual el modelo es válido, debido a que antes de este término, el campo electromagnético es predominantemente reactivo, por lo que su comportamiento es complejo y no se refleja en un patrón de radiación directivo. Es necesario entonces, tener en consideración cual es el límite del campo lejano para una determinada longitud de onda, ya que no será posible transferir energía si los arreglos están a una distancia menor a este valor.

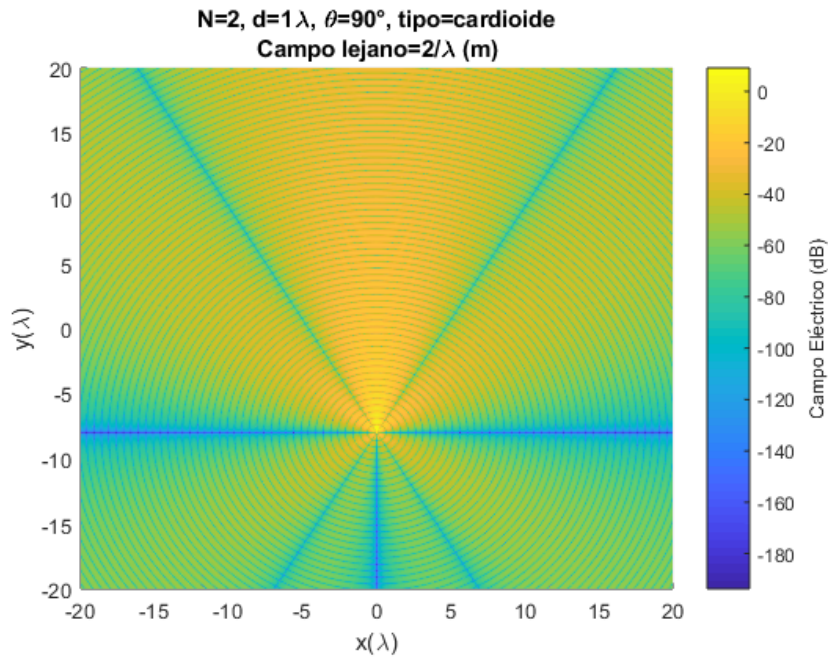


Figura 4.1: Interferencia de ondas de dos antenas.

Es posible modificar las variables de la simulación para lograr distintos resultados. Por ejemplo, la Figura 4.2a difiere de la Figura 4.1 en que se aumenta el número de elementos de 2 a 4, produciendo un haz más directivo, debido a que el haz es más angosto. La Figura 4.2b varía con respecto a la Figura 4.1 en que el haz es direccionado en un ángulo de 60 grados en relación al eje donde se despliegan las antenas, lo que se logra desfasando las señales.

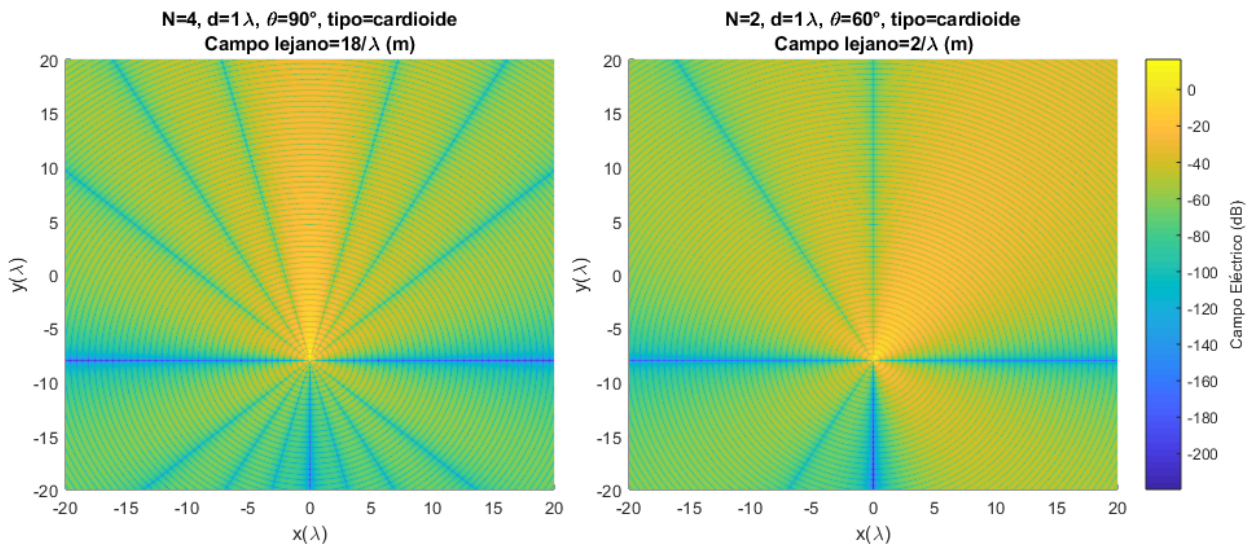


Figura 4.2: Ejemplos de interferencias: (a) 4 elementos, (b) 60 grados.

La animación es completamente funcional, pudiendo ser utilizada para comprender de forma simple la interferencia de ondas producida por múltiples antenas en el campo lejano. Sin embargo, resulta poco práctica a la hora de definir los parámetros de diseño, debido a que no es posible comparar más de una forma en una sola figura.

4.2. Parámetros de diseño

Se presentan los resultados de las simulaciones y estudios relacionados con la definición de parámetros de diseño. En primer lugar, se presentan los resultados del estudio que permite definir la frecuencia de trabajo del sistema de transferencia de energía. Luego, se analizan las simulaciones en que se modifica el tipo de antena, la distancia entre los elementos y el número de los mismos para escoger la configuración óptima del modelo.

4.2.1. Frecuencia de trabajo

La Figura 4.3 muestra la potencia recibida para distancias que van de 10 a 60 metros, para las distintas bandas ISM, de acuerdo a la ecuación 2.13, para áreas efectivas de 1 metro cuadrado. Se utiliza una escala de decibeles para la potencia, debido a que permite observar de mejor manera la disminución de los valores para las distintas bandas en un mismo gráfico. Cada una de las curvas de la figura corresponde a una banda ISM de segundo tipo, tal como enuncia la leyenda adjunta.

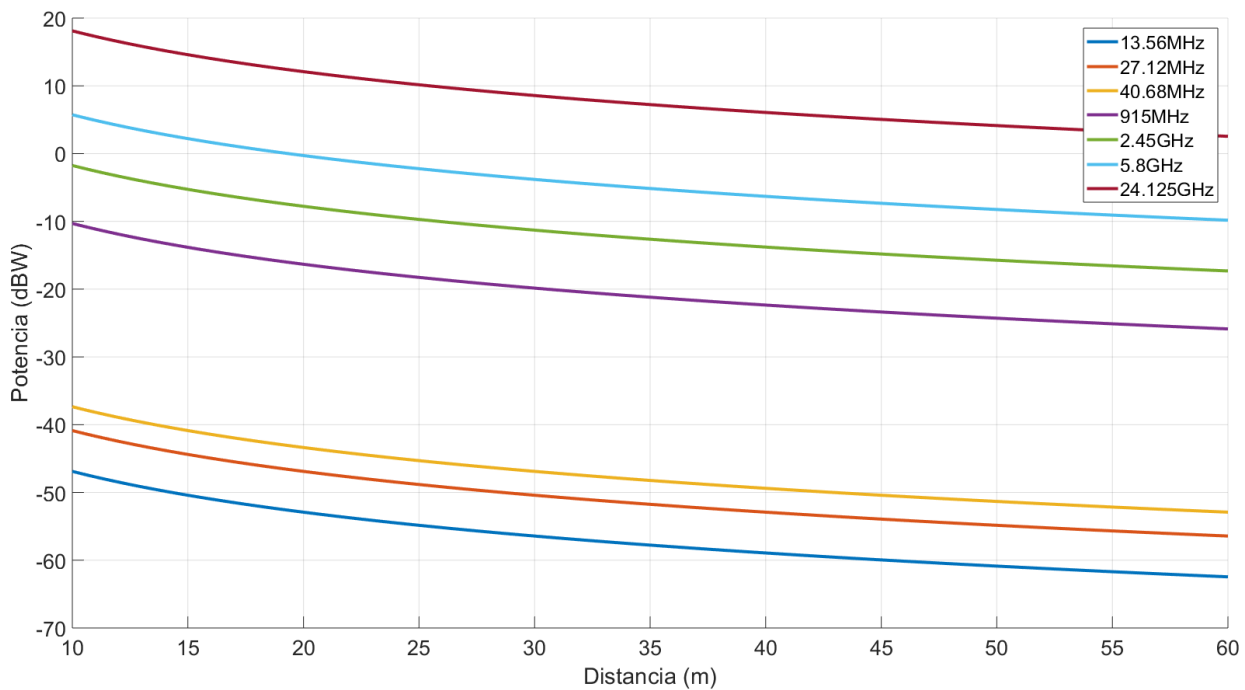


Figura 4.3: Potencia recibida en el rango de 10 a 60 metros para las bandas ISM.

Se observa como la potencia simulada en recepción decrece a medida que aumenta la distancia. Este fenómeno se produce debido a las pérdidas que posee el espacio libre entre transmisor y receptor. Cada una de las curvas registra el mismo decrecimiento en la potencia, proporcional al cuadrado de la distancia al arreglo de transmisión.

Es relevante percatarse que la potencia disponible es superior en las bandas ISM de mayor frecuencia, en comparación con aquellas de mayor longitud de onda. Esto sucede debido a que en la ecuación de Friis (2.12), las pérdidas son menores en antenas de mayor ganancia. Este parámetro está dado por la ecuación 2.3, por lo que al dejar fija el área del arreglo en un metro, la ganancia es inversamente proporcional a la longitud de onda, o lo que es lo mismo, aumenta al incrementar la frecuencia de trabajo.

El gráfico de la Figura 4.3 podría llevar a la apresurada conclusión de que se debe utilizar la banda de 24.125 GHz para la transferencia de energía. Sin embargo, es relevante analizar la capacidad de amplificación que se tiene en las distintas bandas, lo que restringiría la cantidad de energía transferible por el arreglo transmisor.

En la Figura 4.4 se observan tres curvas de potencia versus frecuencia, en las distintas bandas ISM de segundo tipo. La curva azul corresponde a las pérdidas de transmisión a una distancia de 60 metros de la antena. La curva roja indica la potencia máxima que los amplificadores registrados en Digikey permiten para las diferentes frecuencias. Finalmente, la curva amarilla corresponde a la suma de las dos curvas anteriores, lo que ilustra la potencia transferida al incorporar tanto la fase de amplificación como las pérdidas de transmisión.

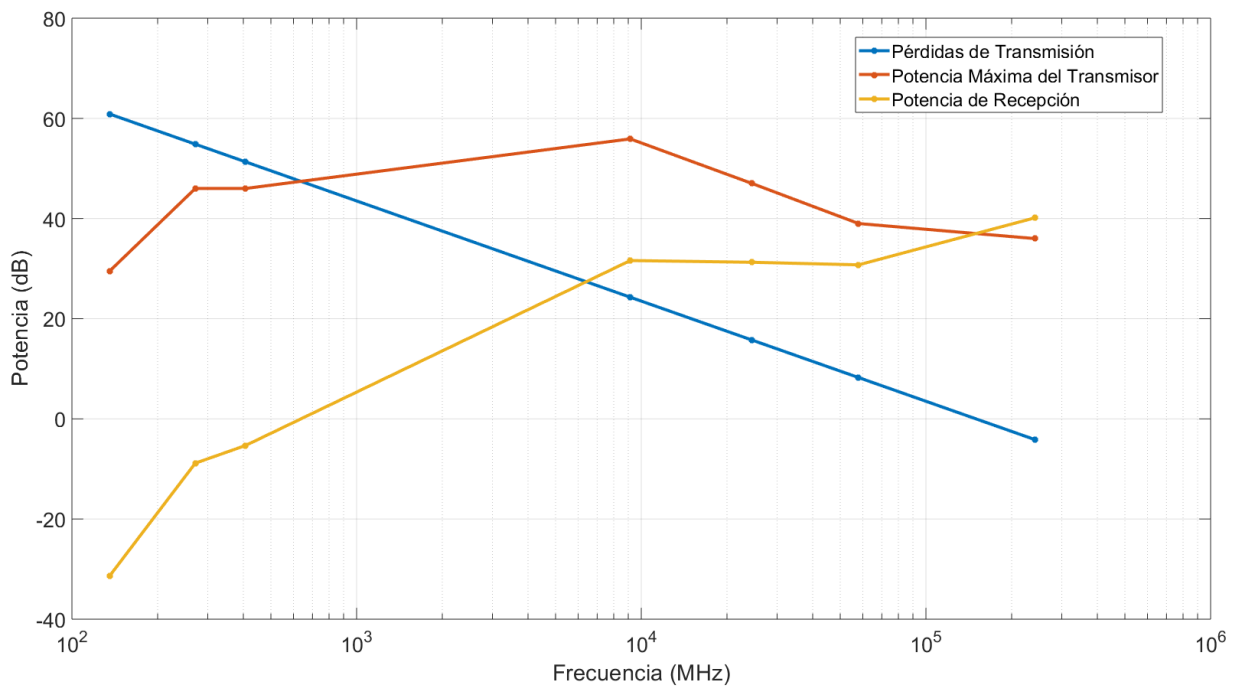


Figura 4.4: Potencia transferible por banda ISM.

Los valores registrados en el gráfico también están representados en las Tablas 4.1 y 4.2. La primera tabla muestra los registros de las primeras bandas, mientras que la segunda lo hace para las bandas de alta frecuencia. Se observa claramente que las pérdidas de transmisión aumentan al reducir la frecuencia de trabajo, tal como indica el gráfico de potencia versus distancia. El comportamiento lineal proviene de que ambos ejes poseen una escala logarítmica, tanto la potencia (debido a los decibeles) como la frecuencia (gracias a la escala en sí).

En cuanto a las potencias máximas de los amplificadores, se comprueba que existe una reducción de los valores para las bandas de alta frecuencia. Se registra un máximo de 55,9 dBm para la banda de 915 MHz . Desde esta banda, las potencias decrecen tanto al aumentar como al reducir la frecuencia de trabajo.

Tabla 4.1: Potencia transferible en bandas ISM de baja frecuencia.

Frecuencia de banda ISM	13.56 MHz	27.12 MHz	40.68 MHz	915 MHz
Pérdidas de transmisión (dB)	60.87	54.85	51.33	24.29
Potencia máx. del transmisor (dBm)	29.5	46	46	55.9
Potencia de recepción (dBm)	-31.37	-8.85	-5.33	31.61

A pesar de que las ganancias decrecen con la frecuencia a a partir de los 915 MHz , esto no es suficiente para contrarrestar las bajas pérdidas que se registran en bandas de menor longitud de onda. Es por esto que, reafirmando lo observado en el gráfico 4.3, se decide utilizar la banda de 24.125 GHz como frecuencia de trabajo del sistema de transferencia de energía.

Tabla 4.2: Potencia transferible en bandas ISM de alta frecuencia.

Frecuencia de banda ISM	2.45 GHz	5.8 GHz	24.125 GHz
Pérdidas de transmisión (dB)	15.73	8.25	-4.13
Potencia máx. del transmisor (dBm)	47	39	36
Potencia de recepción (dBm)	31.27	30.75	40.13

4.2.2. Tipo de antena

Se desea escoger el tipo de antena, de tal forma que su patrón de radiación sea directivo a la vez que lo suficientemente isotrópico para cubrir el recorrido angular necesario. La Figura 4.5 muestra los patrones individuales para 4 tipos distintos de antenas: omnidireccional, dipolo horizontal, dipolo vertical y cardioide. Los cuatro patrones están normalizados para alcanzar un valor máximo de 1 dB en su dirección de mayor directividad.

El arreglo lineal se despliega en el origen del sistema de coordenadas, en dirección horizontal, mientras que el haz debiera apuntar en un ángulo de entre 0 y 180 grados con respecto al eje del arreglo. Teniendo en consideración lo anterior, el mejor candidato es una antena de patrón cardioide, puesto que ya presenta una directividad que las otras antenas no tienen. Además, es posible observar que el patrón de un dipolo vertical posee un nulo en el ángulo de 90 grados, lo que restringe su eficiencia en esta dirección.

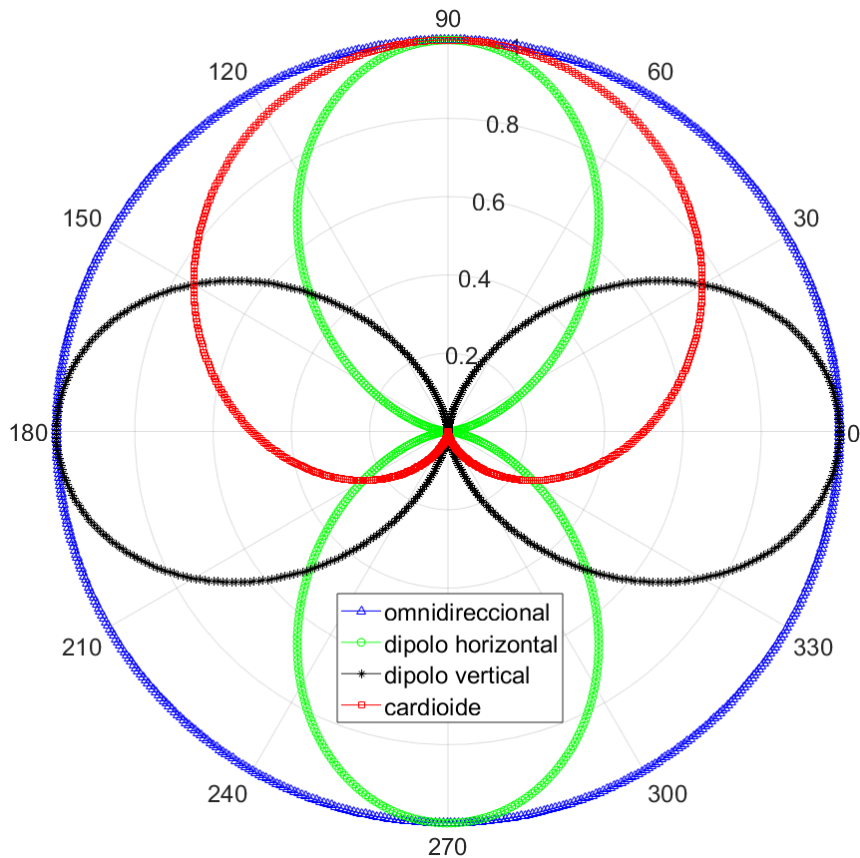


Figura 4.5: Patrones individuales de distintos tipos de antenas.

La Figura 4.6 posee los patrones de radiación de los 4 tipos de antenas mencionados anteriormente, pero en un arreglo lineal de 2 elementos, separados por una distancia de una longitud de onda y direccionados de forma perpendicular al plano del arreglo. Se observa que tanto para antenas omnidireccionales como para dipolos horizontales se logra direccionar el haz de manera considerable en comparación con los patrones originales. Se confirma además que el patrón del arreglo de dipolos verticales es nulo en el ángulo de direccionamiento, lo que descarta completamente este tipo de antenas para transferir energía.

El patrón de radiación de una cardioide es el que contribuye a una mayor eficiencia en la dirección de transferencia, debido a que el campo no se proyecta hacia el ángulo opuesto, de 270 grados, como en el resto de los tipos de antenas. El ejemplo más concreto de una cardioide es una antena de parche o microstrip.

El escenario real de transferencia de energía requiere de un arreglo planar, para asegurar una mayor directividad del haz en un espacio tridimensional. Si se utilizan dipolos, un arreglo planar corresponde a un arreglo de dipolos horizontales si se observa desde el eje x, pero verticales si se observa desde el eje y, perjudicando la directividad en ese último eje.

Un arreglo planar de antenas microstrip permite lograr mayor uniformidad, debido a que el patrón es una cardioide en ambos ejes del arreglo. Esto posibilita enunciar a este tipo de antena como la que asegura una mayor eficiencia en una implementación real, y por lo tanto, la escogida para las demás simulaciones del presente trabajo.

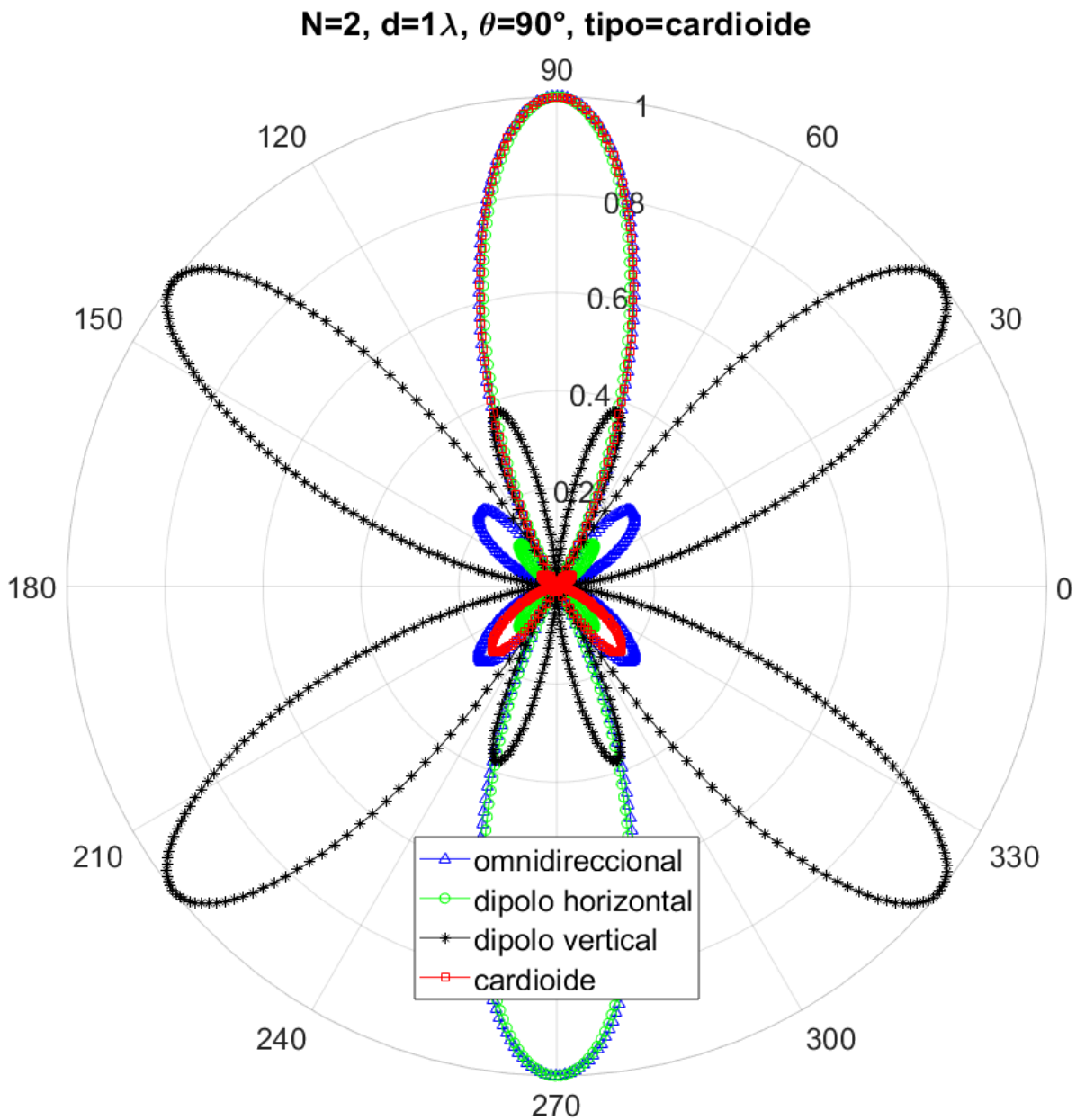


Figura 4.6: Patrones de radiación según tipo de antenas de un arreglo.

4.2.3. Distancia entre antenas

Se escoge la distancia entre los elementos del arreglo, tal que provoquen la mayor directividad posible. Se utilizan los valores de $1/4$, $1/2$, 1 , 2 y 4 longitudes de onda como posibles distancias del sistema a implementar.

La Figura 4.7 muestra los patrones de un arreglo lineal de cuatro antenas, de forma cardioide, direccionado en 90 grados, al variar la distancia entre los elementos. Se observa que a medida que se aumenta la separación, el haz principal se vuelve más angosto, lo que favorece la transferencia de energía. Sin embargo, también es posible observar como surgen lóbulos secundarios y traseros, lo que significa que se generan ondas en direcciones indeseadas.

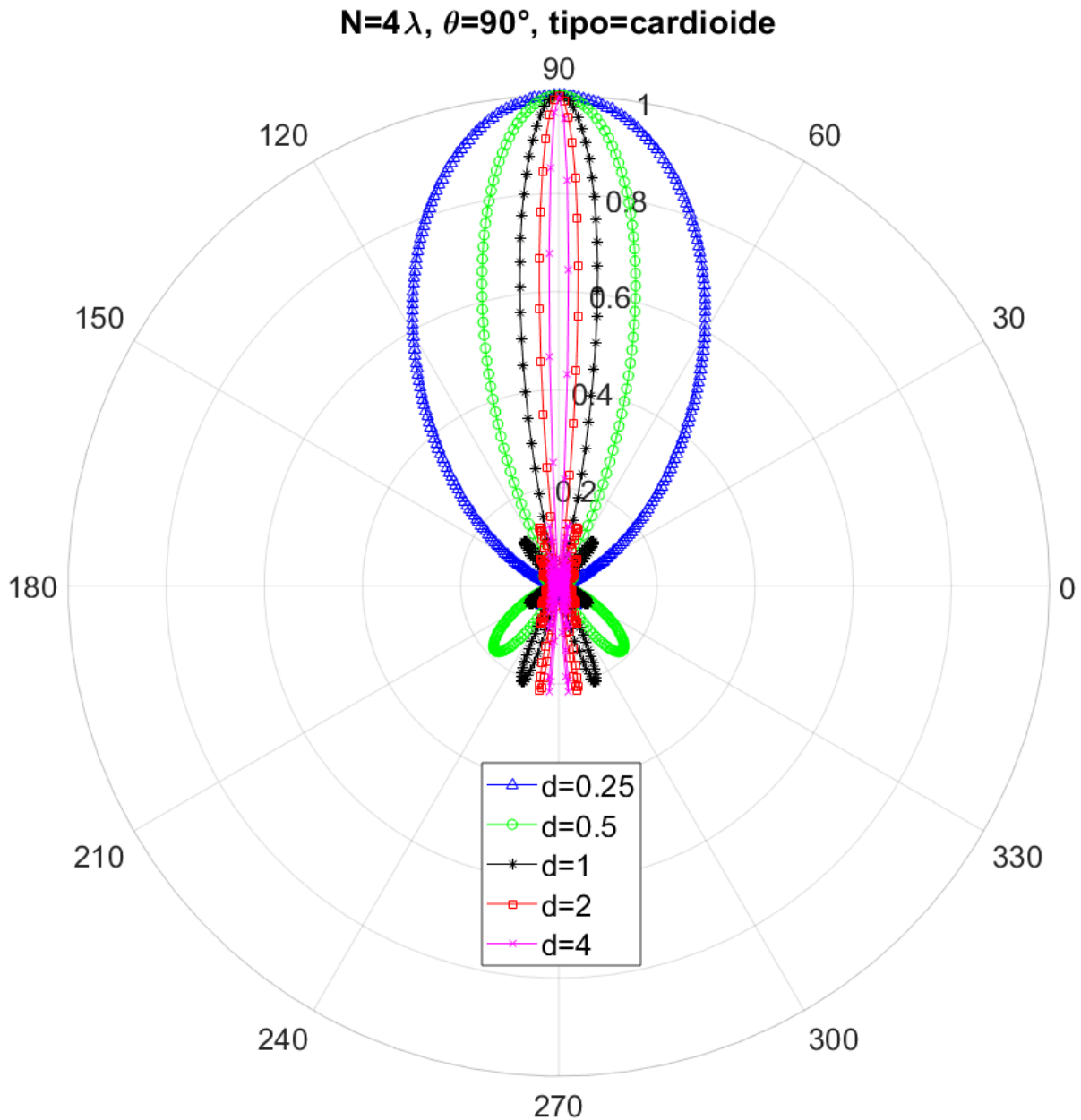


Figura 4.7: Patrones de radiación a 90 grados, modificando distancia entre elementos.

La Figura 4.8 muestra los patrones de radiación de un arreglo de cuatro antenas cardioides, direccionado en 30 grados con respecto al eje del arreglo. Nuevamente, se observa que al aumentar la distancia, se disminuye el ancho del haz principal, a la vez que surgen lóbulos secundarios.

Las separaciones bajo una longitud de onda no permiten la directividad necesaria para transferir energía en una sola dirección. Es más, para direccionar el haz en 30 grados, el haz a estas distancias no está centrado en el ángulo deseado. Para distancias mayores a una longitud de onda, no existe este problema y el haz aparenta ser más directivo cada vez.

Un análisis inicial parece indicar que es necesario utilizar la mayor separación posible. Sin embargo, esto no tiene en consideración que al aumentar la distancia, el arreglo crece considerablemente en tamaño. Por ejemplo, a $2,4\text{ GHz}$ la longitud de onda es de $0,125\text{ m}$, por lo que un arreglo planar de diez elementos por lado, separados a cuatro longitudes de onda, tendría un ancho de cinco metros, el cual es muy grande para colocarse en el techo del vehículo. No obstante, como la frecuencia de trabajo escogida es $24,125\text{ GHz}$, este problema no debiera ser relevante.

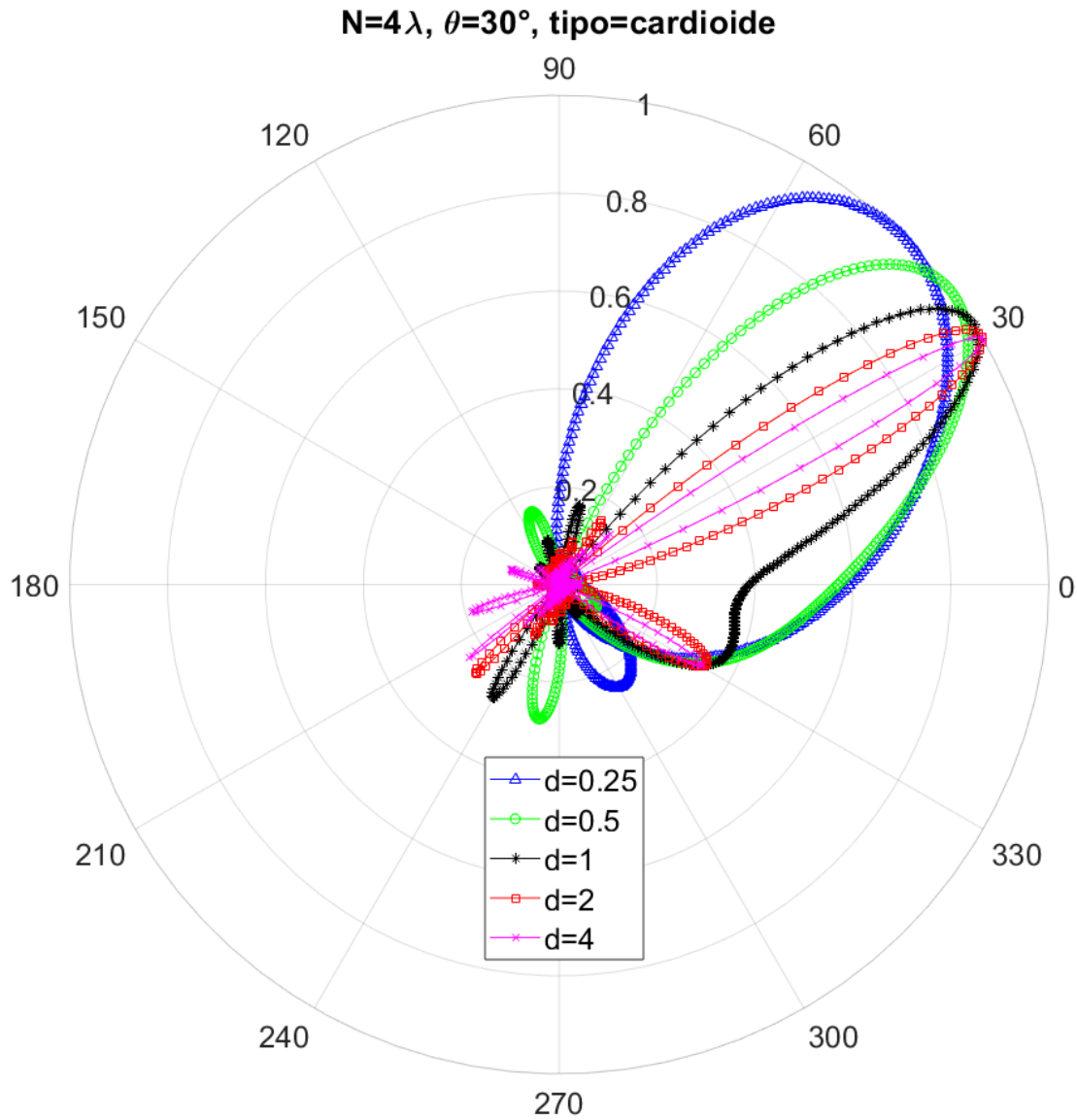


Figura 4.8: Patrones de radiación a 30 grados, modificando distancia entre elementos.

Para continuar con las simulaciones de este trabajo, se escoge la distancia de cuatro longitudes de onda, pues alcanza una mayor directividad. Como se escogió una frecuencia de $24,125\text{ GHz}$, la longitud de onda es de $1,24\text{ cm}$, por lo que los elementos estarán distanciados por $4,96\text{ cm}$. Entonces, es posible crear un arreglo de hasta veinte antenas, en el espacio de un metro cuadrado del techo del vehículo.

4.2.4. Número de antenas

Se analizan los patrones de radiación, modificando el número de antenas parche, para lograr una mayor directividad. Se fija la distancia en una longitud de onda, debido que a cuatro, se crean patrones demasiado angostos para ser visualizados. Sin embargo, se debe recordar que se la separación escogida para el sistema es 4λ . Se mide el patrón para ángulos de direccionamiento de 90 y 30 grados.

La Figura 4.9 muestra los patrones de radiación a medida que se varía el número de elementos, para un ángulo de 90 grados. Se observa que a medida al aumentar el número, el ancho del haz principal disminuye, logrando mayor directividad en la transferencia. Se puede visualizar que para dos antenas, el ancho del haz es bastante considerable, y que a partir de 6 elementos, la reducción del ancho es cada vez más leve.

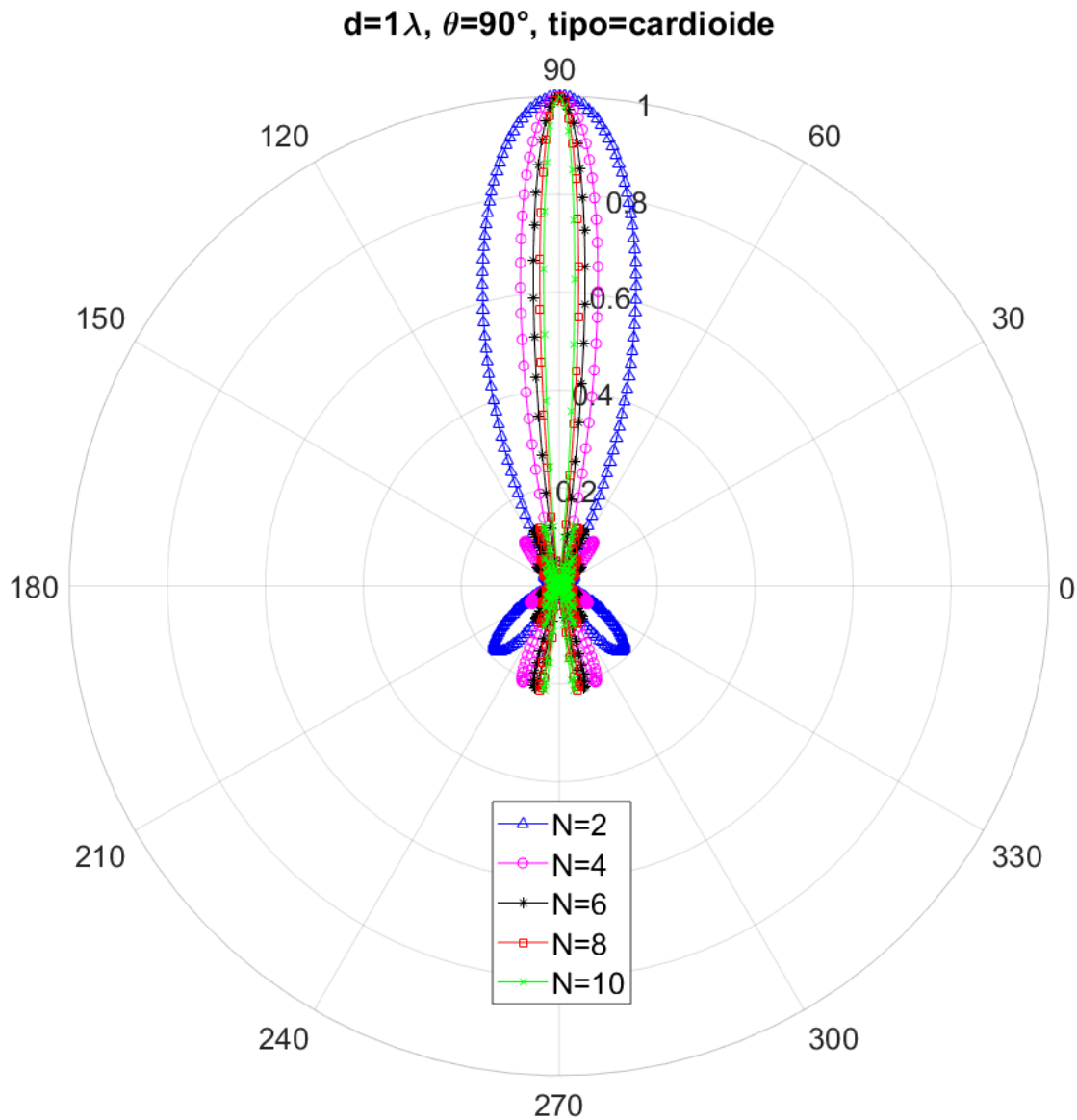


Figura 4.9: Patrones de radiación a 90 grados, modificando número de elementos.

La Figura 4.10 muestra los patrones de radiación en ángulo de treinta grados. Se ve que al aumentar el número de elementos del arreglo, el ancho del haz principal disminuye, logrando una mayor directividad. Se observa que para un arreglo de dos antenas el haz no está centrado en el ángulo deseado, además de poseer una extensión considerable. En el paso de ocho a diez elementos, la reducción del ancho es relativamente menor que para arreglos de menos antenas.

Como a medida que se aumenta el número de elementos, parece que la mejor opción es utilizar el mayor número de antenas posible. Sin embargo, existen limitaciones espaciales. Por ejemplo, para una frecuencia de $2,4\text{ GHz}$, un arreglo de diez elementos distanciados por distancia equivalente a cuatro longitudes de onda, posee un largo de $2,5\text{ m}$, lo que dificulta su colocación en el automóvil. Ya que se escogió la frecuencia de $24,125\text{ GHz}$, esta consideración no es tan relevante.

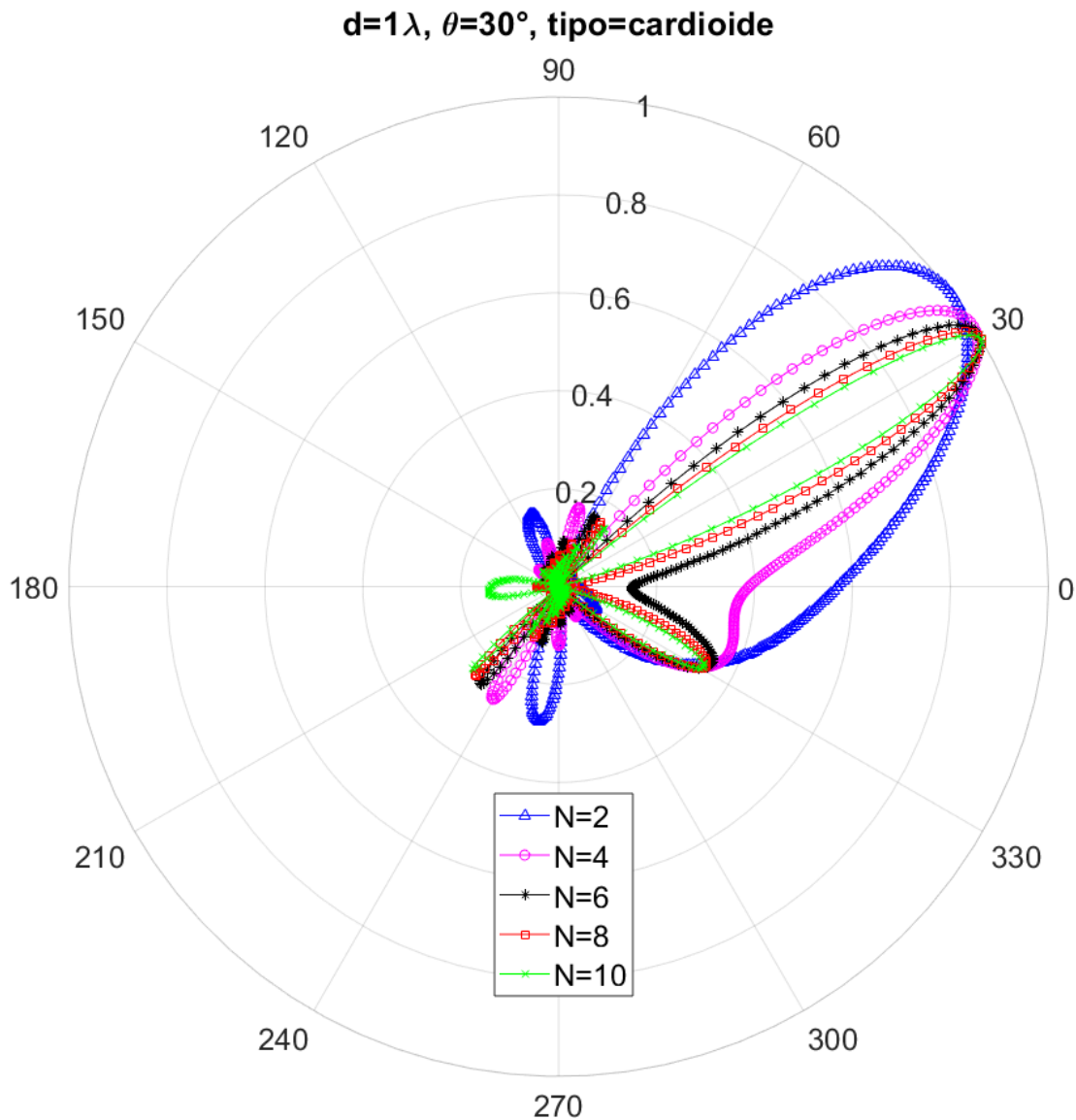


Figura 4.10: Patrones de radiación a 30 grados, modificando número de elementos.

Se fija el valor del número de elementos en diez para un arreglo lineal, lo que produce un arreglo planar de cien elementos. Con diez antenas por lado, se logra suficiente directividad sin la necesidad de crear un arreglo de grandes dimensiones. Como la frecuencia es $24,125\text{ GHz}$, la separación es 5 cm aproximadamente. Esto provoca que un arreglo de 10 elementos por lado solo mida 50 cm por eje, distancia menor a la disponible en el automóvil.

4.2.5. Análisis de consumo

Del análisis de frecuencia realizado en la subsección 4.2.1, se determina que la banda ISM que presenta una mayor potencia de recepción es la banda de $24,125\text{ GHz}$. Tal como se observa en la Tabla 4.2, la potencia de recepción para 60 metros y un arreglo de antenas de un metro cuadrado de área (aproximadamente 20 antenas por lado), es $40,13\text{ dBm}$, correspondientes a $10,3\text{ W}$.

Se utiliza información recogida por Pedro Lima, para analizar la eficiencia de los modelos más utilizados de vehículos eléctricos en Estados Unidos [24]. Se observa que en escenarios urbanos, el modelo más competente es el Hyundai IONIQ Electric, puesto que alcanza una eficiencia de $13,96\text{ kWh}/100\text{ km}$. Por otro lado, el vehículo más ineficiente es el Tesla Model S 60D, con $20,73\text{ kWh}/100\text{ km}$.

Considerando que el trayecto a recorrer durante la transferencia es de 114 metros, se calcula una cantidad de energía emitida para esta distancia de $15,91\text{ Wh}$ para el vehículo Hyundai, y de $23,63\text{ Wh}$ para el Tesla. Teniendo en cuenta que previamente se calculó el tiempo de transferencia en 6.83 segundos, se estima la potencia consumida en 8356 W para el Hyundai IONIQ Electric y 12455 W para el Tesla Model S 60D.

La potencia consumida por los vehículos es del orden de 100 veces mayor a la potencia recibida por las antenas. Esto indica que la tecnología implementada no es suficiente para alimentar a un vehículo mientras éste se encuentra en funcionamiento, por lo que se debe aumentar considerablemente las ganancias de las antenas o la potencia transmitible por los amplificadores, a la vez que reducir la distancia de transferencia.

4.3. Pruebas de concepto

Se presentan los resultados derivados de las pruebas de concepto realizados con equipos de sonido. Se analiza el comportamiento del patrón de radiación producido ante cambios en el número de elementos y la distancia relativa entre los mismos. A continuación, se observa la efectividad del direccionamiento de haces creado al desfasar los sonidos emitidos. Finalmente, se estudia la aplicación de beamforming en tiempo real.

4.3.1. Número de parlantes

La Figura 4.11 muestra el patrón de radiación de un parlante, colocado en el origen del sistema de coordenadas del escenario, apuntando en un ángulo de 90 grados con respecto al eje de los parlantes. Se utiliza una frecuencia de 3400 Hz y se configura el equipo con volumen igual a 10.

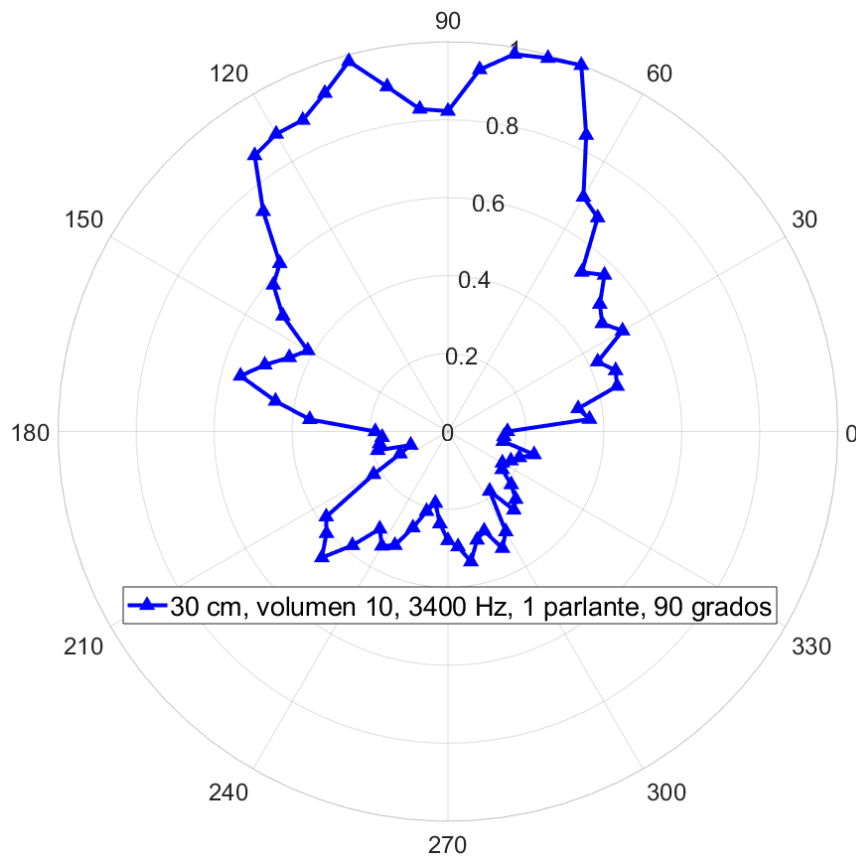


Figura 4.11: Patrón de radiación de un parlante.

Se observa que la forma del patrón es similar a una cardioide, pero más angosta que la utilizada en las simulaciones anteriores, la que se puede observar en la Figura 4.5. Además, es posible identificar que el máximo no se encuentra exactamente en 90 grados y que para ángulos mayores a 180, en vez de que exista energía nula, se aprecia un patrón con potencia bastante considerable.

Las irregularidades en el patrón de un parlante tienen diferentes orígenes. Hay que considerar que las pruebas se realizan en un escenario realista, por lo que existen múltiples fuentes de ruido, además de que el sonido rebota en los distintos objetos de la sala. Por otro lado, los parlantes no son puntuales, por lo que asumir que su patrón es una cardioide perfecta solo funciona como aproximación teórica. Por último, el micrófono que captura el sonido posee un patrón propio, lo que reduce la intensidad de la señal medida si no se apunta directamente al origen del sistema. Estos problemas se verán reflejados en todas las mediciones de audio presentes en este informe.

La Figura 4.12 muestra los patrones de radiación para arreglos de dos, tres y cuatro elementos. Los parlantes se ubican de tal forma que el centro del arreglo coincide con el origen del sistema de coordenadas. Se utiliza nuevamente una frecuencia de 3400 Hz y se fija el volumen en 10, a la vez que no se introduce desfase entre las antenas, para poder direccionar el haz en 90 grados. Se tiene especial cuidado en tomar las medidas de los tres patrones en igualdad de condiciones de ruido y disposición espacial de los elementos, para asegurar que estos sean comparables en cuanto a su forma.

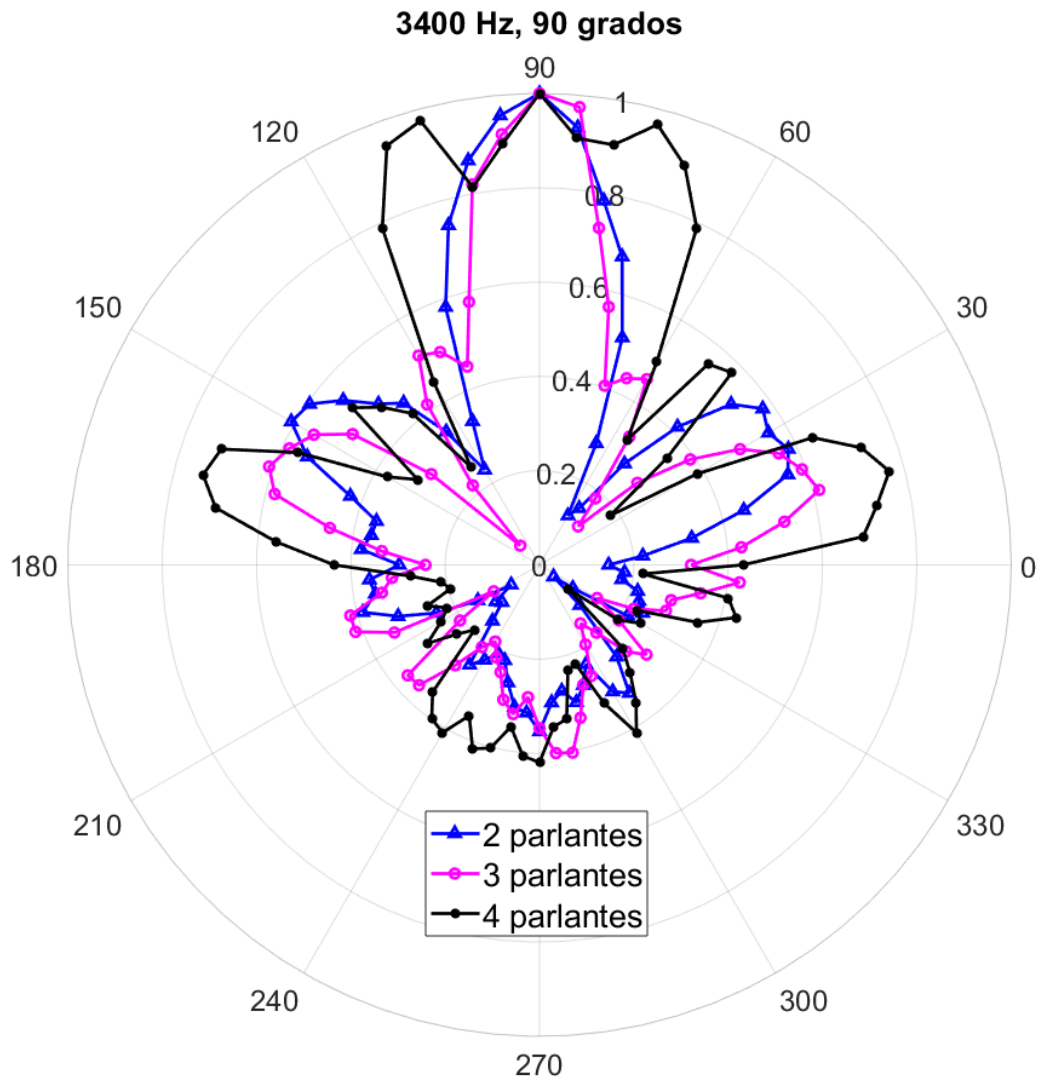


Figura 4.12: Patrones de radiación de dos, tres y cuatro parlantes.

El patrón de radiación de dos parlantes (azul) es bastante regular, con un máximo claro a 90 grados y mínimos pronunciados en 60 y 120, además de los nulos de 0 y 180 grados. De esta forma, al lóbulo principal le acompañan dos lóbulos secundarios con máxima potencia en 30 y 150 grados. También se observa un lóbulo trasero de gran tamaño en 270 grados, así como dos lóbulos menores en 195 y 345.

Los patrones de radiación de tres y cuatro parlantes son más irregulares, debido a que se presentan más lóbulos secundarios al aumentar el número de elementos. Además, a medida que se aumenta el número de elementos se incrementa la entropía del sistema, ya que es mucho más probable cometer errores humanos en las medidas y la interferencia de ondas se vuelve más caótica debido a que los parlantes poseen dimensiones considerables y a otros obstáculos en el escenario. Esto último puede explicar también, porque el patrón de cuatro elementos no posee un máximo pronunciado en los 90 grados.

Si se compara cualquiera de los tres patrones con el de la Figura 4.12, se puede observar que se consigue un haz más directivo. Sin embargo, a medida que se aumenta la cantidad de elementos también incrementa la importancia de los lóbulos laterales, disminuyendo la eficiencia de una posible transferencia de energía. Por ejemplo, para el arreglo de cuatro parlantes, los valores de amplitud alcanzados a los 15 y 165 grados corresponden casi a un 80 % del conseguido en los 90 grados.

A pesar de que no se consigue un patrón más directivo con los cuatro parlantes, se utiliza este número de elementos para las siguientes pruebas. Esto se realiza debido a que un mayor número de elementos permitirá controlar de mejor manera el direccionamiento de haces. Además, modificar la distancia relativa entre los parlantes puede permitir lograr haces más directivos con cuatro elementos, pruebas cuyos resultados se muestran en la siguiente subsección.

4.3.2. Distancia entre parlantes

En la Figura 4.13 se observan tres patrones de radiación, para las frecuencias de 850, 1700 y 3400 Hz. Se escogen estas frecuencias debido a que permiten que la distancia fija de 10 cm entre los parlantes se traduzca en una separación entre elementos de un cuarto, media y una longitud de onda respectivamente.

Se visualiza que a 850 Hz, con una distancia de un cuarto de longitud de onda, el arreglo de 4 parlantes consigue direccionar el haz en 90 grados. Sin embargo, el haz es bastante ancho, llegando a capturarse un 50 % del voltaje máximo a 45 grados. Los lóbulos laterales no tienen demasiada importancia a esta frecuencia, a pesar de que se observa mayor intensidad en la parte derecha, debido a la presencia cercana de una pared, que refleja las señales en ese sector.

En la frecuencia de 1700 Hz, con una distancia relativa de media longitud de onda, se observa un haz más directivo que para la frecuencia anterior. En este caso, el 50 % se alcanza a los 60 grados. Los lóbulos laterales son más relevantes que en a 850 Hz, observando nuevamente una mayor intensidad en el sector derecho.

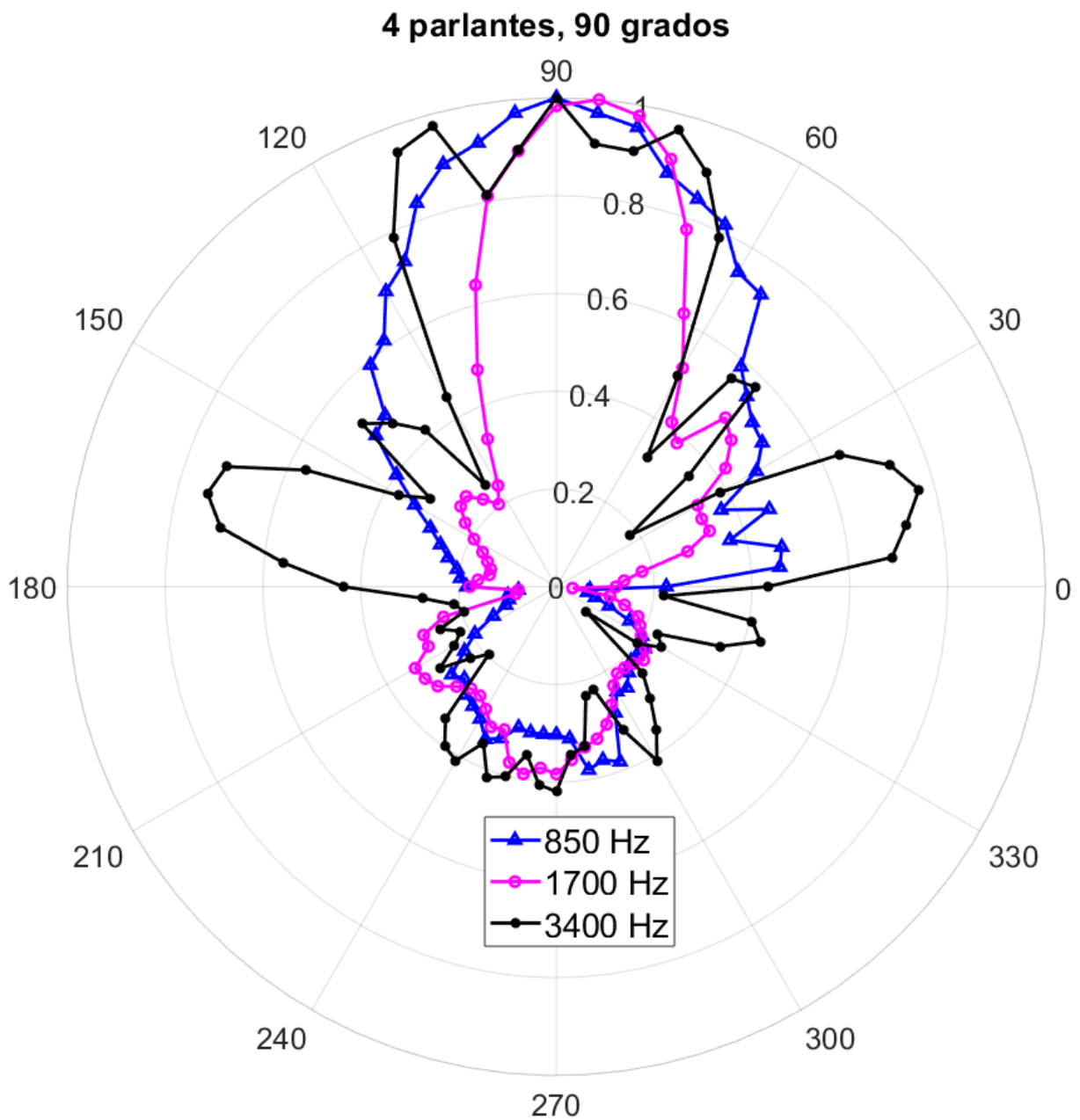


Figura 4.13: Patrones de radiación a 850, 1700 y 3400 Hz.

A una distancia de una longitud de onda, en la frecuencia de 3400 Hz, la directividad disminuye considerablemente. En primer lugar, el haz principal es más irregular, no teniendo un claro máximo a los 90 grados. Además, los haces secundarios son notorios y pronunciados, limitando la visualización de un posible beamforming.

Se decide entonces, realizar las pruebas de beamforming en la frecuencia de 1700 Hz. Esto debido a que es la frecuencia que entrega un patrón más definido y direccional, lo que es extremadamente relevante tanto para beamforming como para una posible transferencia de energía.

4.3.3. Reducción de ancho de banda

La imagen 4.14 muestra los patrones de radiación, tanto para un parlante, como para un arreglo de cuatro elementos, el cual está direccionado en 90 grados. Se observa que el patrón de un parlante es bastante regular, pudiendo considerarse prácticamente omnidireccional, debido a que la potencia recibida solo es menor al 50 % entre 265 y 270 grados, por lo que el ancho de haz de media potencia corresponde a 350 grados.

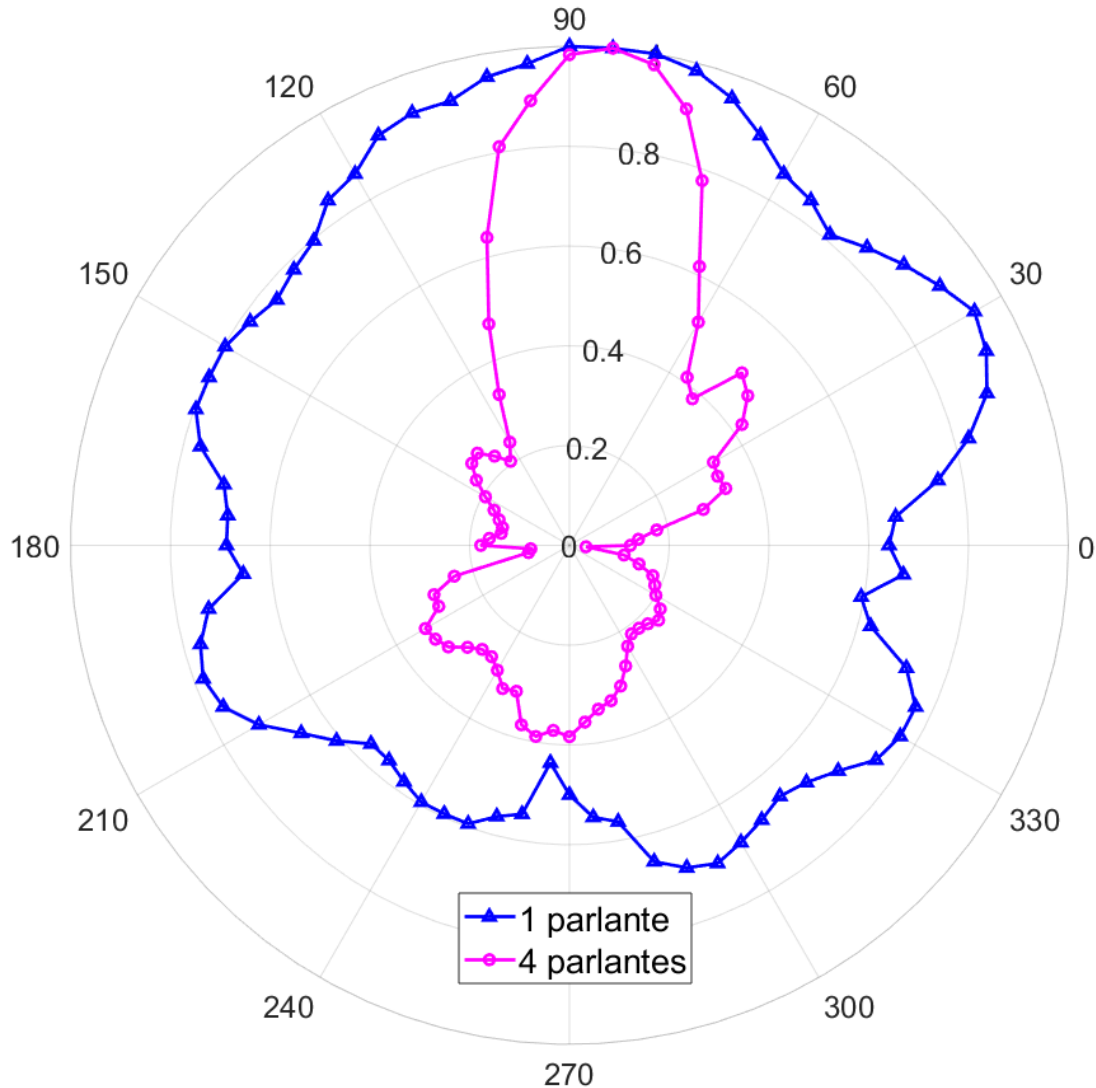


Figura 4.14: Patrones de radiación de 1 y 4 elementos.

Para el patrón de radiación de cuatro parlantes, se observa que el 50 % de la potencia máxima se alcanza a los 60 y 110 grados, lo que se traduce en un ancho de haz de media potencia equivalente a 50 grados. La reducción del ancho del haz principal producida por beamforming corresponde entonces a un 86 %, lo que permite a la vez aumentar considerablemente la eficiencia de la transferencia de energía.

4.3.4. Direccionamiento de haces

En la Figura 4.15 se observan tres patrones de radiación medidos a una frecuencia de 1700 Hz, con el uso de cuatro parlantes. La diferencia entre los patrones es el direccionamiento del haz, de 90, 60 y 30 grados respectivamente.

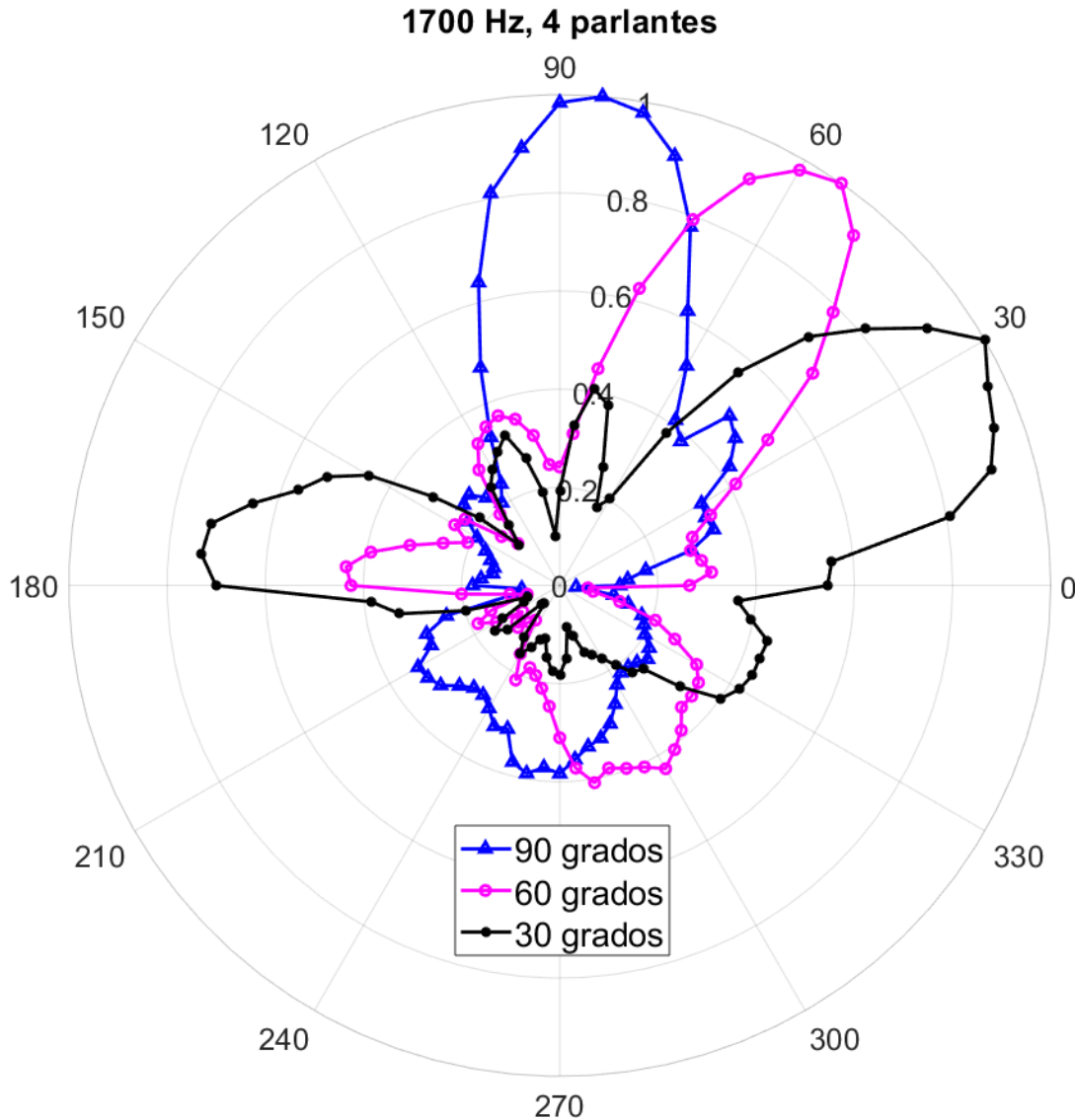


Figura 4.15: Patrones de radiación direccionados en 90, 60 y 30 grados.

El patrón de radiación direccionado en 90 grados es producido por señales sin desfase. El patrón es direccional, aunque no alcanza el máximo exactamente en 90 grados. Esto se debe a errores en la disposición de los equipos al momento de realizar las mediciones.

El patrón direccionado en 60 grados es producido por un desfase relativo de -45 grados, calculado según la ecuación 2.7. Se observa un haz bastante directivo, aunque nuevamente el máximo no se alcanza exactamente en la dirección deseada. Cobran importancia una vez más los lóbulos secundarios, tal como el generado a los 180 grados y el trasero, a 300 grados, debido a que poseen una mayor intensidad si se compara con el patrón anterior.

El tercer patrón, logrado con un desfase relativo de -77 grados, produce exitosamente un haz directivo, con potencia máxima en los 30 grados. Sin embargo, se observa como el lóbulo ubicado a los 180 grados adquiere mayor intensidad.

4.3.5. Beamforming en tiempo real

Se crean cuatro señales con fase variable, para demostrar el correcto funcionamiento del direccionamiento de haces en una aplicación en tiempo real. Estas señales tienen una duración de diez segundos y permiten registrar un sonido de amplitud variable en los distintos puntos del escenario de pruebas.

La Figura 4.16 muestra la grabación de sonido realizada por el micrófono a los 0 grados. Se puede observar como la amplitud comienza en su valor máximo cuando el ángulo de direccionamiento es en esta dirección angular. Se visualiza como la señal decrece relativamente, hasta alcanzar un mínimo aproximadamente a los cinco segundos, en el momento en que el haz apunta en 90 grados. Finalmente, se identifica que la señal vuelve a adquirir intensidad, cuando la señal se direcciona en 180 grados.

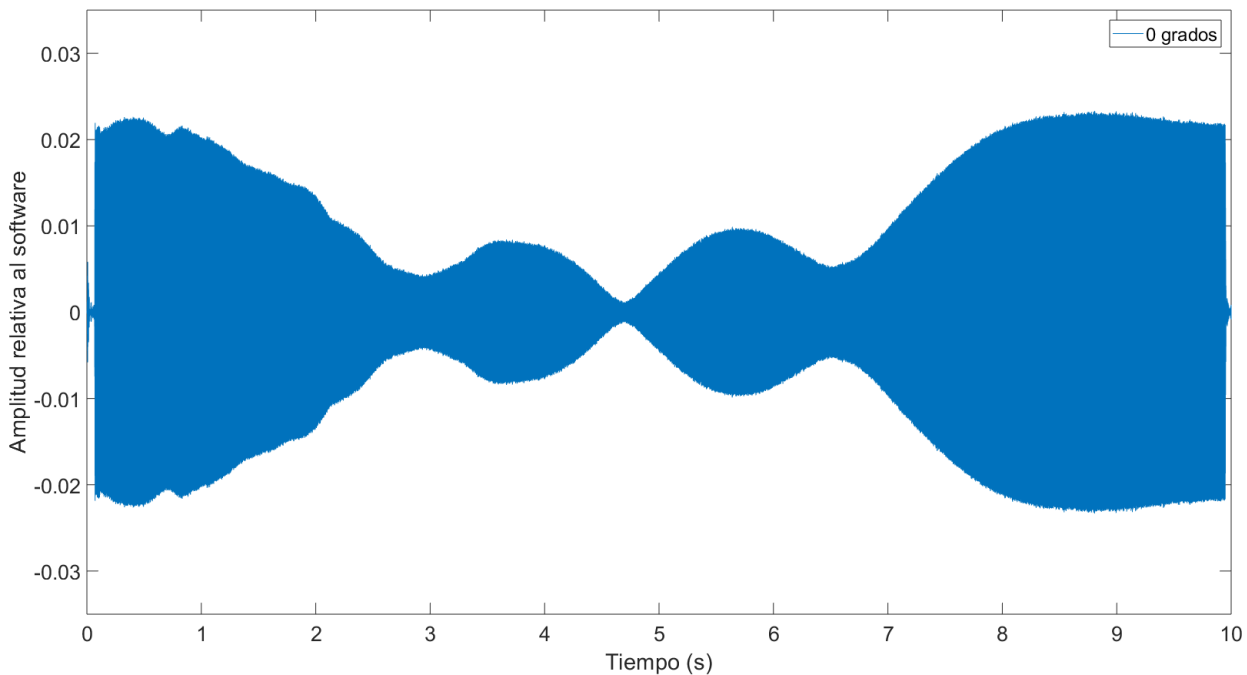


Figura 4.16: Sonido grabado en un ángulo de 0 grados.

La Figura 4.17 muestra la grabación de audio efectuada a los 90 grados. Se puede observar que la amplitud tiene en un valor mínimo al inicio, cuando el ángulo de direccionamiento es de 0 grados, y al final, cuando es de 180 grados. Se visualiza como la señal alcanza su máximo aproximadamente a los cinco segundos, en el momento en que el haz apunta en esta dirección.

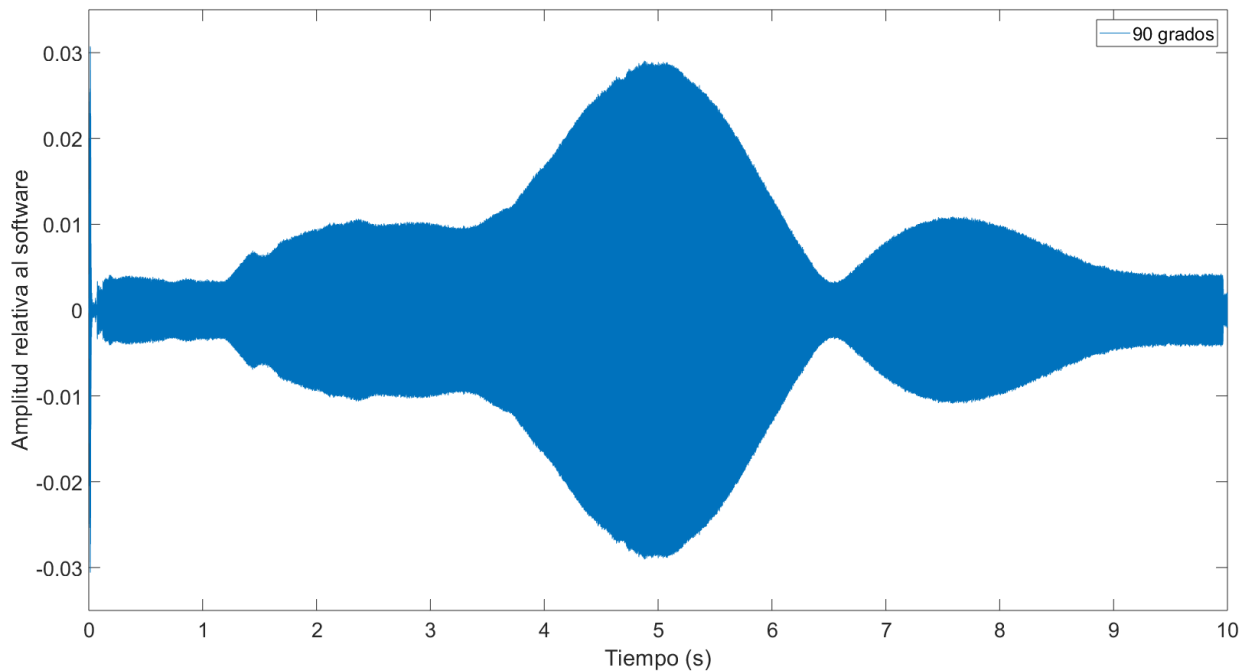


Figura 4.17: Sonido grabado en un ángulo de 90 grados.

Con los sonidos registrados en los 72 puntos de medición, se realiza un esquema del patrón de radiación del sistema con direccionamiento móvil. La Figura 4.18 visualiza el patrón móvil, que modifica su dirección de 0 a 180 grados en un tiempo de 10 segundos. La Figura 4.19 muestra el patrón de radiación para el rango entre 0 y 90 grados, permitiendo observar con más detalle el momento en que los elementos se direccionan en este último ángulo.

Se observa en las Figuras mencionadas como el patrón de radiación se mueve en la dirección angular seleccionada, logrando el fenómeno de Beamforming. Se visualiza que para ángulos menores a 30 y mayores a 150 grados, el patrón no es máximo en la dirección deseada, además de generar un lóbulo trasero de igual tamaño que el principal. Se recomienda entonces que el rango para realizar el direccionamiento de haces sea de 30 a 150 grados.

La Figura 4.18 también posee una curva, de color rojo, que funciona como un estimado de la eficiencia de la transferencia. Se observa como la mayor eficiencia se alcanza para valores cercanos a los 90 grados, mientras que en valores cercanos a los 30 y 150 grados, esta es de menor valor.

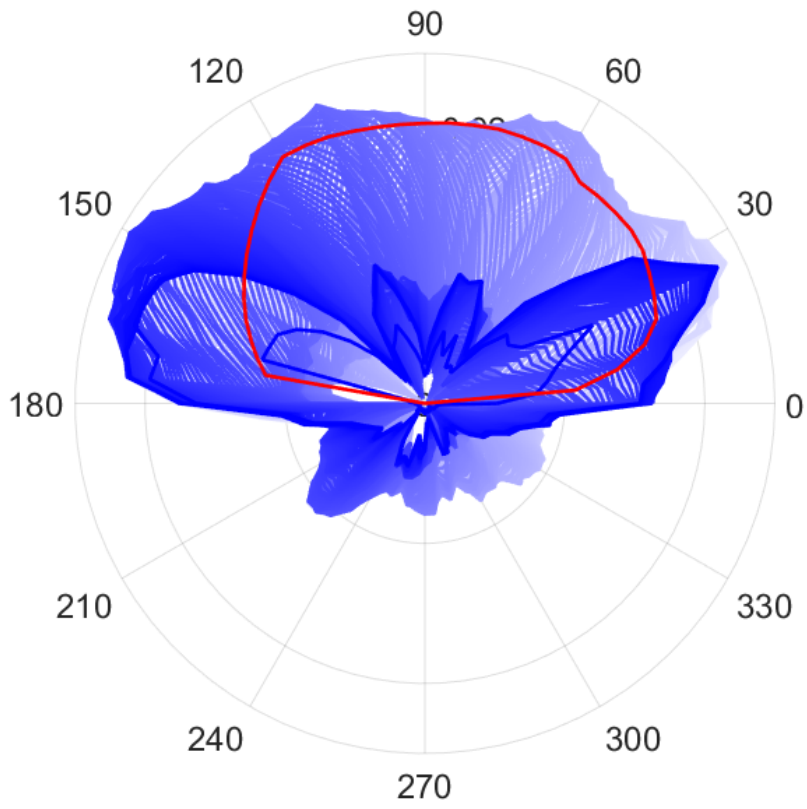


Figura 4.18: Beamforming de 0 a 180 grados.

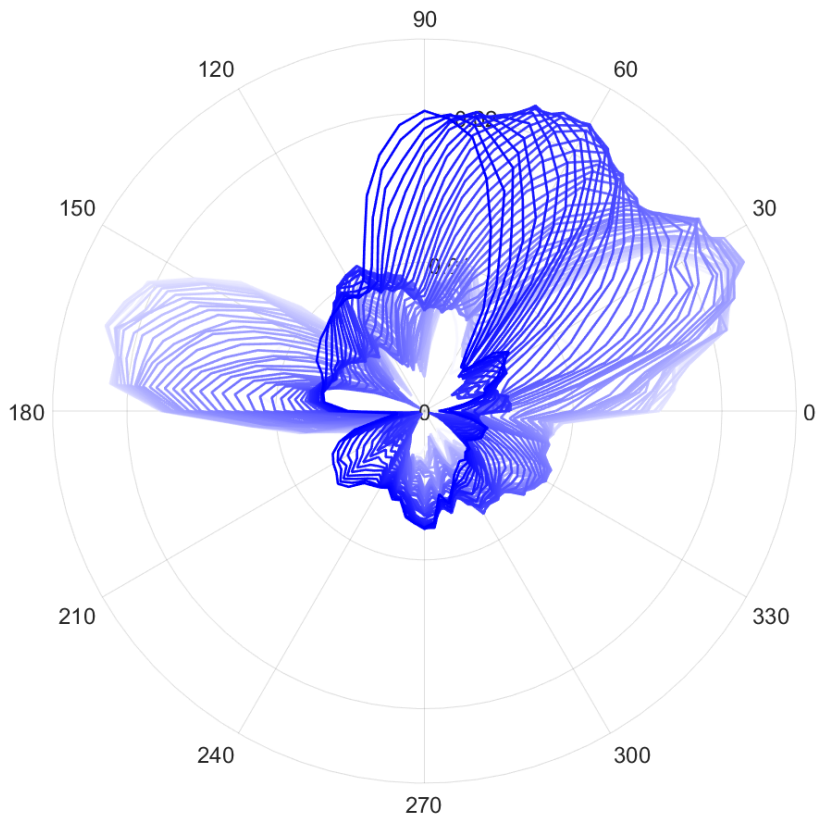


Figura 4.19: Beamforming de 0 a 90 grados.

Capítulo 5

Conclusiones

La presente memoria logra analizar una primera aproximación de un sistema de transferencia de energía para alimentar a un vehículo eléctrico mediante el uso de beamforming. La descripción del escenario del sistema permite aterrizar el trabajo a un contexto realista y concreto, reduciendo la cantidad de variables del modelo. La definición de los parámetros de diseño significa también una concreción del escenario, pues permite que trabajos futuros tomen estos parámetros para realizar prototipos y estudios.

El modelo de interferencia de ondas concebido resulta útil a la hora de comprender el funcionamiento en el tiempo y el espacio de un arreglo lineal de antenas. Específicamente, la simulación es clave para visualizar la presencia de puntos de máxima y mínima energía. Además, permite observar los cambios producidos al modificar variables como el número de elementos y el ángulo de direccionamiento.

Como se mencionó anteriormente, los parámetros de diseño permiten definir de manera más concreta el escenario de trabajo. En particular, el análisis de frecuencia resulta clave debido a que permite demostrar que el comportamiento de las pérdidas en el espacio y las ganancias de los amplificaron difieren al modificar la frecuencia, teniendo menores pérdidas, pero también menores ganancias en las bandas ISM superiores. Se establece la frecuencia de trabajo en 24.125 GHz, ya que alcanza la mayor ganancia total.

La definición de los otros parámetros significa un primer acercamiento al diseño de antenas. Se demuestra que la cardioide es el tipo de antena que permite una mayor directividad. Se observa que al aumentar tanto el número de elementos como la distancia entre ellos, se logra una mayor directividad del haz. Se define entonces el uso de un arreglo planar de diez elementos por lado, separados por una distancia de 4 longitudes de onda.

El análisis del consumo de potencia permite revisar la validez del modelo para alimentar en tiempo real un vehículo eléctrico. Se determina que la potencia transferida es insuficiente para alimentar el vehículo, debiendo incrementar la eficiencia por medio del aumento del tamaño de los arreglos utilizados, reduciendo la distancia de transferencia, o incrementando la potencia transferible por los amplificadores.

Las pruebas de concepto con sonido se convierten en una excelente forma de estudiar el fenómeno de interferencia de ondas y de su aplicación más concreta, el beamforming. Los equipos de medición utilizados permiten obtener resultados válidos, que se acercan a los indicados por la teoría de antenas. Se logra construir un sonido direccionado a partir del desfase de los audios de los elementos del arreglo.

Modificar los parámetros del sistema con sonido posibilita conseguir una forma más definida y direccional del patrón de radiación del arreglo de los parámetros. Esto permite observar el correcto funcionamiento del beamforming, en un arreglo de cuatro elementos con una frecuencia de 1700 Hz .

Se crea un sonido a partir de cuatro señales con fase variable, lo que permite registrar la ejecución de direccionamiento de haces en tiempo real. Se determina que el beamforming de sonido es más apropiado para ángulos entre 30 y 150 grados, debido a que cerca de 0 y 180 grados surgen lóbulos traseros de gran tamaño.

5.1. Trabajo Futuro

En su rol de trabajo de investigación, esta memoria permite aterrizar dos conceptos que posiblemente serán utilizados en los dispositivos eléctricos en el futuro cercano, los cuales son beamforming y transferencia inalámbrica de energía. Esto constituye el principal alcance de este trabajo, servir como puente para futuros trabajos e investigaciones de ambas tecnologías en dos escenarios: ondas de radio y ondas de sonido.

En cuanto al primer escenario, el estudio actúa como la primera fase de un proyecto de aplicación real de las tecnologías de beamforming y transferencia inalámbrica de energía. De este modo, es posible seguir desarrollando el sistema, creando las antenas a partir de los parámetros ya definidos en el presente informe. Luego del diseño de las antenas, será posible realizar pruebas que busquen validar los criterios utilizados en esta memoria, además de estudiar las reflexiones de ondas generadas en un ambiente real.

Con respecto al escenario de ondas de sonido, la memoria abre la posibilidad de investigar más conceptos y tecnologías del área de telecomunicaciones, aplicadas a dispositivos de audio. Como beamforming es utilizado en redes móviles, es posible emplear los equipos y códigos empleados en este trabajo como base para crear sistemas de comunicación con sonido en futuras memorias y experiencias de laboratorio del área de telecomunicaciones.

Bibliografía

- [1] D. L. Dr. P. Sivachandran and M. Kalichamy, “A state - of – the art review of electric and hybrid electric vehicle technology with recent developments in the globe,” 2014.
- [2] N. Tesla, “Experiments with alternate currents of very high frequency and their application to methods of artificial illumination,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 8, pp. 266–319, January 1891.
- [3] N. Tesla, “The transmission of electrical energy without wires,” *Electrical World and Engineer*, March 5 1904.
- [4] C. Jeremiah and A. Chukwuemeka, “Wireless power transmission: As an emerging technology,” 2017.
- [5] A. Banerji and S. Biswas, “Wireless transfer of power: Status and challenges,” *International Conference on Intelligent Control Power and Instrumentation (ICICPI)*, 2016.
- [6] LG, “File:inductive charging of lg smartphone (2).jpg - wikimedia commons.” [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inductive_charging_of_LG_smartphone_\(2\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inductive_charging_of_LG_smartphone_(2).jpg), 2012.
- [7] “Radio regulations: Articles,” 2016.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis Design*, ch. 1. fourth ed., 2016.
- [9] ZyMOS, “File:antenna-folded-dipole-diagram.png.” <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Antenna-folded-dipole-diagram.png>, 2006.
- [10] AB2013, “File:antenne patch.jpg.” https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Antenne_patch.jpg, 2013.
- [11] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis Design*, ch. 2. fourth ed., 2016.
- [12] T. Truckle, “File:sidelobes en.svg.” https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sidelobes_en.svg, 2008.
- [13] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis Design*, ch. 6. fourth ed., 2016.
- [14] S. Nueffer, “File:antenne patch 2.4 ghz.jpg.” https://commons.wikimedia.org/wiki/File:antenne_patch_2.4_ghz.jpg

File:Antenne_patch_2.4_GHz.JPG, 2004.

- [15] Davidmack, "File:phased array beam.jpg." https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phased_array_beam.jpg, 2006.
- [16] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis Design*, ch. 16. fourth ed., 2016.
- [17] H. F. C. Ahn, T. Kamio and K. Haeiwa, "Prototype of 5.8 ghz wireless power transmission system for electric vehicle system," *2nd International Conference on Environmental Science and Technology IPCBEE*, 2011.
- [18] C. Ahn, "Wireless power transmission with rough beamforming method," *2nd National Foundation for Science and Technology Development Conference on Information and Computer Science*, 2015.
- [19] X. W. P. Yedavalli, T. Riihonen and J. Rabaey, "Far-field rf wireless power transfer with blind adaptive beamforming for internet of things devices," *IEEE Access*, 2017.
- [20] A. D. J. F. G. Ahmed, H. Hassan and S. Lisa, "Generation of usable electric power from available random sound energy," *International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*, 2013.
- [21] A. D. J. F. G. Ahmed, H. Hassan and S. Lisa, "A novel battery charger operated from random sound charges or air pressure," *International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*, 2014.
- [22] C. C. S.M. Kim and H. Kim, "Multi-channel audio recording based on superdirective beamforming for portable multimedia recording devices," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2014.
- [23] "Galaxy s5 explained: Audio." <https://news.samsung.com/global/galaxy-s5-explained-audio>, 2014.
- [24] P. Lima, "Electric cars: range and efficiency comparison." <https://pushevs.com/2016/11/23/electric-cars-range-efficiency-comparison>, 2016.