

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**DOBLE TITULACIÓN
CONVENIO DE INTERCAMBIO DE ESTUDIANTES
PUCP-UPC de Barcelona**



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**UN TAG RETRO-DIRECTIVO UHF RFID EN
UN SUSTRATO DE PAPEL**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero de las Telecomunicaciones**, que presenta:

Javier Robinson Céspedes Pacheco

ASESOR: Apóstolos Georgiadis

Lima, Octubre del 2017

AGRADECIMIENTOS

A mi familia: a mi madre por su incondicional apoyo, a mi padre, que su recuerdo me ha dado la fuerza para continuar y lograr mis metas; a mi hermana, por su experiencia e inquietud, siempre preocupándose por mi bienestar.

A los amigos que gané en el transcurso de las horas de clase y estudio: Alfredo, Diego, Juan Carlos, Manuel, César y Andrew por compartir experiencias e inspirarme confianza en mis capacidades; a los que vinieron a experimentar ésta aventura conmigo: Renzo, Bruce, Jesús, Oscar, Omar y Hugo, sé que fue difícil estar tan lejos de nuestras familias y de nuestra tierra, pero manteniéndonos unidos pudimos superar todas las adversidades.

De ésta etapa en Barcelona, de grandes cambios en lo personal y académico, también tengo muchas personas a las que agradecer. En especial a Cécile y Hans, grandes amigos, que a pesar de conocerlos por poco tiempo siempre han estado ahí para mí apoyándome. Cristian y Clémence, gracias por “darme caña” y mostrar esa preocupación por mí.

A las buenas personas que conocí en el CTTC, a Francesco, por tu ayuda y paciencia conmigo. Y en especial a mi director de proyecto, Apostolos, porque al trabajo más importante de mi carrera le puse tantas ganas gracias a él, a sus ganas de trabajar y sobre todo de ayudar.

Debo agradecer también a mi director ponente Juan M. Rius, por su gran amabilidad.

¡Gracias!

RESUMEN DEL PROYECTO

En la Tesis presentada, nos enfocamos en la implementación de topologías de tags RFID con el uso de un sustrato de papel para obtener dispositivos fáciles de fabricar, flexibles y de bajo coste.

Para un mejor entendimiento del proyecto, el trabajo realizado se divide en cinco capítulos, los cuales son detallados a continuación:

- i) En el Capítulo 1 se realiza una introducción a la situación actual de los sistemas de RFID, características, ventajas y aplicaciones.
- ii) En el Capítulo 2 se explica el Estado del Arte de los arrays de antenas retro-directivas. Además, se explican los principales elementos de los tags RFID.
- iii) En el Capítulo 3 se detalla la primera estructura, la cuál consiste en una configuración de dipolo con un anillo inductivo que garantiza la adaptación de impedancia deseada entre los resonadores y el chip RFID.
- iv) En el Capítulo 4 se propone un array de dos dipolos en una configuración retro-directiva.
- v) En el Capítulo 5 se desarrollan las conclusiones generales y se explica las líneas futuras del proyecto.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	
RESUMEN DEL PROYECTO	
ÍNDICE GENERAL	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 SISTEMAS DE IDENTIFICACIÓN AUTOMÁTICA (AUTO ID).....	2
1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS RIFD	3
1.3 VENTAJAS Y APLICACIONES DE LOS SISTEMAS RFID	5
SISTEMA ELEMENTAL:	6
SISTEMA RETRO-DIRECTIVO.....	7
2. ESTADO DEL ARTE	9
2.1 ARRAYS RETRO-DIRECTIVOS.....	9
CONCEPTO GENERAL.....	9
TÉCNICAS EMPLEADAS PARA CONSEGUIR RETRO-DIRECTIVIDAD.	12
CARACTERIZACIÓN DE UN ARRAY RETRO-DIRECTIVO	15
2.2 FUNDAMENTOS Y PRINCIPIOS DE OPERACIÓN PARA RFID.....	19
COMPONENTES DE LOS TAGS RFID	19
TIPOS DE TAGS RFID	20
2.3 OTROS PUNTOS A TENER EN CUENTA.....	22
3. TAG DE UN ELEMENTO	25
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL CHIP RFID	25
3.2 DISEÑO	27
3.3 MEDIDAS	32
4. TAG RETRO-DIRECTIVO DE DOS ELEMENTOS	35
4.1 DISEÑO	35
4.2 MEDIDAS	40
5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	42
6. BIBLIOGRAFÍA	43

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años de nuestra historia se han conocido más avances que en todos los siglos anteriores, y estos avances en distintos campos se han apoyado unos en otros para poder progresar a un ritmo tan trepidante, avanzando de manera paralela. Así, por ejemplo, no se puede entender una disminución en el tiempo de los viajes ni una mejora de vehículos, y no se puede entender una mejora de las prestaciones del vehículo sin una mejora de la tecnología que lleva su proceso de fabricación. Como se ve, los avances tecnológicos no surgen fruto de la casualidad, sino que son motivados por necesidades de la industria y de la sociedad de consumo, principalmente, en la continua búsqueda de una mayor comodidad, de una mejora de las prestaciones, de un ahorro de tiempo y de mayores beneficios económicos, etc.

En la sociedad actual donde se aspira a tener el mayor control posible sobre todas las cosas, los sistemas de identificación juegan un papel crucial en este tema. Nos permiten controlar la disponibilidad de cierto producto, o de una materia prima; el estado en el que se encuentra un sistema, si tiene averías o no, si su temperatura es la adecuada, si está rindiendo apropiadamente, etc.; también nos permiten controlar si una persona tiene acceso autorizado o no a una instalación, hacer un recuento de ganado en una granja o incluso saber si el avión que está penetrando nuestro espacio aéreo es amigo o enemigo. Tradicionalmente los sistemas de identificación han requerido el contacto físico o proximidad entre el interrogador y el objeto o cosa a ser interrogado, lo cual presenta inconvenientes obvios, como la necesidad de cercanía o el aumento en el tiempo empleado en la identificación. Aquí es donde entran en el juego los sistemas de identificación por radio frecuencia o RFID, que vienen a proporcionar mejoras en las prestaciones de esos sistemas de identificación y poder hacerlo a distancia así como la tendencia a hacer esto de un modo automatizado.

1.1 SISTEMAS DE IDENTIFICACIÓN AUTOMÁTICA (AUTO ID).

Los sistemas de identificación por radiofrecuencia [1 - 2] se enmarcan dentro de los sistemas de identificación automática o Auto ID, que en los últimos años se han hecho muy populares en muchas industrias de servicios de manufacturación, de compra y distribución logística. Los sistemas de identificación automática sirven para proporcionar información sobre la gente, animales, objetos y productos en tránsito.

La tecnología Auto ID hace referencia a la entrada directa de información en un sistema de una forma automática ante la presencia de la misma. El término Auto ID sirve como nombre colectivo para multitud de tecnologías, las cuales se usan en uno u otro entorno para resolver de manera adecuada la recogida de la información. Estas tecnologías pueden ser descritas de muchas maneras, pero se puede hacer una clasificación en cuatro categorías, que son dispositivos ópticos, magnéticos, electromagnéticos y biométricos.

Los dispositivos ópticos tienen sus ejemplos más claros en los sistemas de códigos de barras, además de en el reconocimiento óptico de caracteres (OCR) y en sistemas de procesado de imagen. Los magnéticos tienen su mayor exponente en las tarjetas de banda magnética, como las tarjetas de crédito. Los dispositivos biométricos de identificación comprenden desde los que identifican rasgos físicos de una persona como su huella dactilar o su retina, hasta los que reconocen la voz.

Es en los dispositivos electromagnéticos donde se ubican los sistemas RFID. En general, la tecnología RFID puede verse como un interfaz remoto e indirecto que no requiere línea de vista entre el medio físico y el manejo de datos. El funcionamiento de este interfaz puede ser a través de censado, identificación o transporte de datos.

Hasta hace poco la principal aplicación de estos sistemas de identificación automática la habían constituido los sistemas que combinen la posibilidad de almacenar información y que además sean capaces de hacer una transferencia de la

misma a distancia sin contacto físico, e incluso con transferencia a distancia de la energía para realizar dicha operación. Así es como surgieron los sistemas de identificación por radiofrecuencia.

1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS RFID

Los sistemas RFID se componen siempre de dos elementos: el transpondedor, que está colocado en el objeto a ser identificado; y el interrogador, que, dependiendo del diseño y tecnología usados, puede ser un dispositivo de lectura o de lectura/escritura.

El interrogador típicamente contiene un módulo de radiofrecuencia (transmisor y receptor), una unidad de control y un elemento de acoplo con el transpondedor. El transpondedor, que es el que lleva el dispositivo de almacenamiento de información del sistema de RFID, normalmente consiste en un dispositivo de acoplo y de un microchip electrónico. Puede llevar o no alimentación propia, es decir, ser activos o pasivos. En el caso de pasivo se evitan problemas de autonomía, se ahorra espacio y peso, y se minimizan costes (normalmente será un interrogador y varios transpondedores). Pero se obtiene un mayor rango de funcionamiento con los activos.

Para conseguir comunicación inalámbrica a distancia, los sistemas RFID se pueden valer de uno de estos tres métodos, bien mediante acoplo inductivo, bien mediante retro-esparcimiento de radiación electromagnética o bien vía transmisión radio.

- El acoplo por inducción se basa en la interacción entre los campos magnéticos del interrogador y del transpondedor. El transpondedor recibe su energía del campo magnético que emite el interrogador a través de una bobina. Una vez que el transpondedor se carga, puede transmitir su identificación cuando el campo que emite el interrogador se interrumpe para permitir al transpondedor que se descargue.
- La comunicación mediante retro-esparcimiento de radiación electromagnética se basa en la emisión de una señal electromagnética por el interrogador que es a su vez recogida y reflejada por el transpondedor. El transpondedor modifica

la radiación electromagnética transmitida por el interrogador que recibe en su antena para devolverle una respuesta, pero él no genera esa señal, solamente la modula reflejándola hacia el interrogador en un patrón que contiene su identificación u otra información.

- En la comunicación radio, tanto el interrogador como el transpondedor basa la comunicación en la emisión de señales de radio. Se trata de una comunicación mediante propagación de radio electromagnética transmitida por ambos extremos. El transpondedor suele estar alimentado con una batería, y funciona como un radio-transceptor. Dado que no hay necesidad de extraer energía para su funcionamiento de la señal emitida por el interrogador, el acoplo del sistema se realiza sólo a través de la propagación de señales de comunicación.

De manera general en los sistemas RFID se pueden distinguir tres tipos de tecnologías principales: de protección antirrobo (más conocidos como sistemas EAS, de Electronic Article Surveillance), generando un pulso que pueda activar una alarma; de identificación de objetos, en la que se genera un código de identificación; y de transporte de datos, almacenando gran cantidad de información en una memoria integrada.

El rango de alcance que se puede obtener en los sistemas RFID está limitado por la potencia que se recibe tanto en el transpondedor como en el interrogador al ser respondido, que será fuertemente dependiente de las condiciones del canal de propagación, de la distancia y de la frecuencia. El rango de alcance, por tanto, no podrá ser ilimitado ya que las potencias que se pueden transmitir tienen limitaciones tecnológicas y limitaciones impuestas por los niveles máximos permitidos por las normativas.

Los planes de frecuencias para los distintos sistemas RFID no coinciden en todas las partes del mundo, pero de manera general se pueden apreciar en [2].

1.3 VENTAJAS Y APLICACIONES DE LOS SISTEMAS RFID

Debido a la vasta extensión en la que los sistemas de RFID encuentran aplicación, es difícil reunir las ventajas que su uso proporciona, ya que según cada aplicación las ventajas serán unas u otras; pero de manera general podemos extraer las siguientes, que son comunes a todos, como pueden ser comodidad (ahorro de tiempo y espacio), la posibilidad de funcionamiento en ambientes extremos, posibilidad de reutilización de estos sistemas, funcionamiento sencillo (en la mayoría de los casos), no necesitan contacto físico ni condiciones de línea de vista, etc.

Entre las distintas aplicaciones de los sistemas de RFID [1] podemos encontrar de manera muy extendida a las tarjetas inteligentes sin contacto aplicadas a distintos servicios, como pueden ser para transporte público, para tickets de aeropuerto y de estaciones de esquí o para control de acceso a instalaciones y de peajes de autopista. Otras aplicaciones de los sistemas RFID incluyen sistemas de transporte (trenes, contenedores), identificación de animales, inmovilización electrónica (por ejemplo en automóviles), identificación de contenedores (bombonas de gas y contenedores químicos, contenedores de basura), identificación en sitios de acceso difícil o peligroso y control de participantes en encuentros deportivos. También se encuentran muchas aplicaciones en los sistemas automáticos industriales, que obtienen grandes beneficios al apoyarse en esta tecnología. Se muestra un ejemplo de una aplicación en la Figura 1.1.



Figura 1.1 Sistema de acceso a instalaciones de esquí con tarjeta inteligente sin contacto [3].

Todos los factores socio-económicos parecen indicar que la tendencia que ya están siguiendo los aparatos cotidianos y sistemas de comunicación a evolucionar hacia soluciones inalámbricas no se va a detener, sino que va a seguir avanzando a un ritmo elevado. Por ello, los sistemas RFID que ya tienen una amplia presencia en la sociedad actual, no van a hacer sino seguir encontrando nuevas formas de aplicación y tendrán una mayor penetración que la actual. Sus aplicaciones futuras principalmente serán las de sustituir sistemas convencionales de identificación que ya están presentes desde hace mucho tiempo y que, aprovechándose de este impulso tecnológico, seguirán mejorado en prestaciones.

SISTEMA ELEMENTAL:

En el sistema elemental para una solución RFID, la señal de interrogación es emitida omnidireccionalmente, o al menos en un rango amplio de direcciones, para poder encontrar el objeto a ser identificado. En este sistema elemental, el dispositivo

transpondedor no está preparado para conocer la posición desde la cual le transmite el interrogador, por lo cual envía una respuesta también omnidireccionalmente para que pueda llegar de vuelta al interrogador. Este sistema se representa en la Figura 1.2.

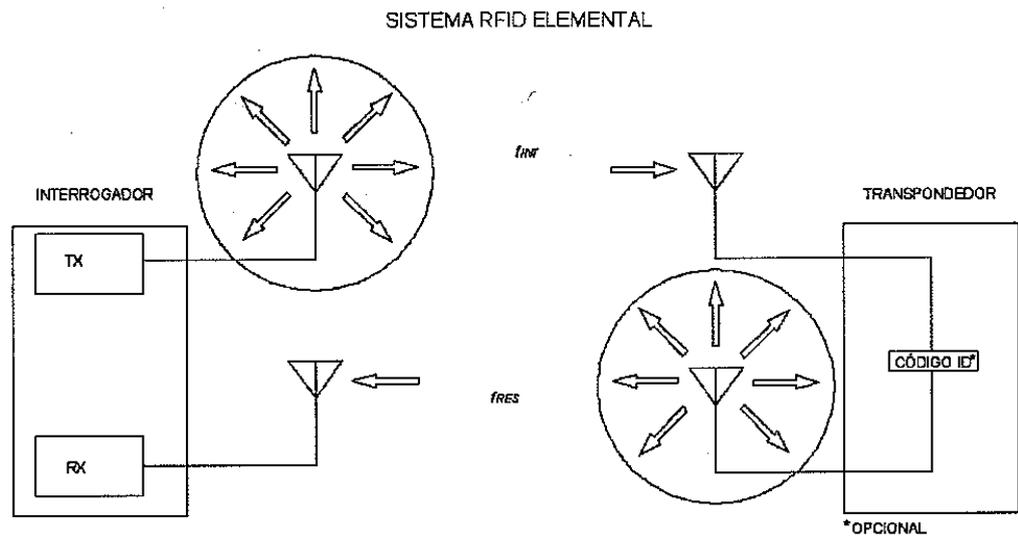


Fig. 1.2 Esquema de un sistema RFID elemental.

SISTEMA RETRO-DIRECTIVO

El sistema retro-directivo tiene la propiedad adicional de que la transmisión del transpondedor al interrogador se hace sólo en la dirección en la que este se encuentra, debido a que en este caso el transpondedor sí es capaz de averiguar la posición del interrogador mediante el análisis de la señal de interrogación que llega. A consecuencia de esto, se hace evidente que el transpondedor es más eficiente en el uso de la potencia radiada, con lo cual se aumenta el rango de funcionamiento y/o la autonomía del sistema. Además, se mejora la seguridad al evitar que la señal de respuesta se reciba en otros sitios que no sean donde se emplaza el interrogador. El sistema retro-directivo se representa en la Figura 1.3.

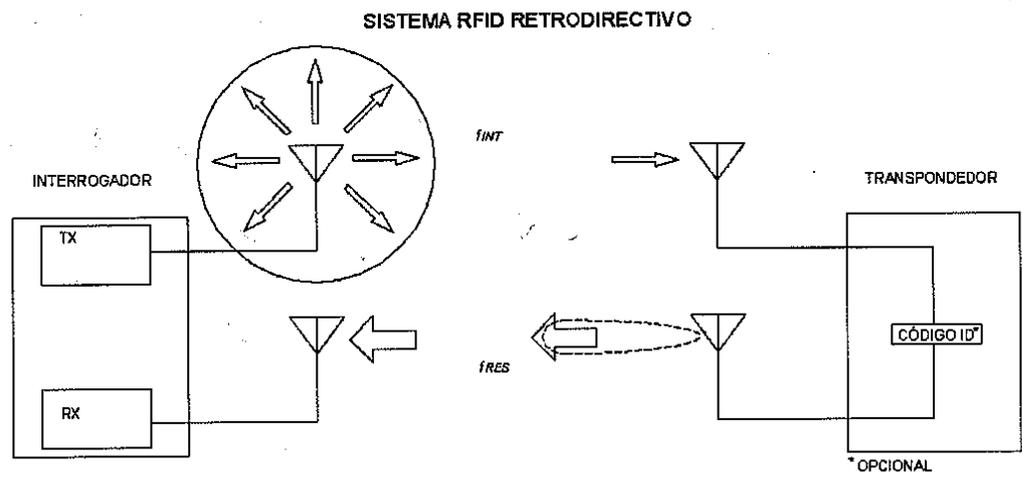
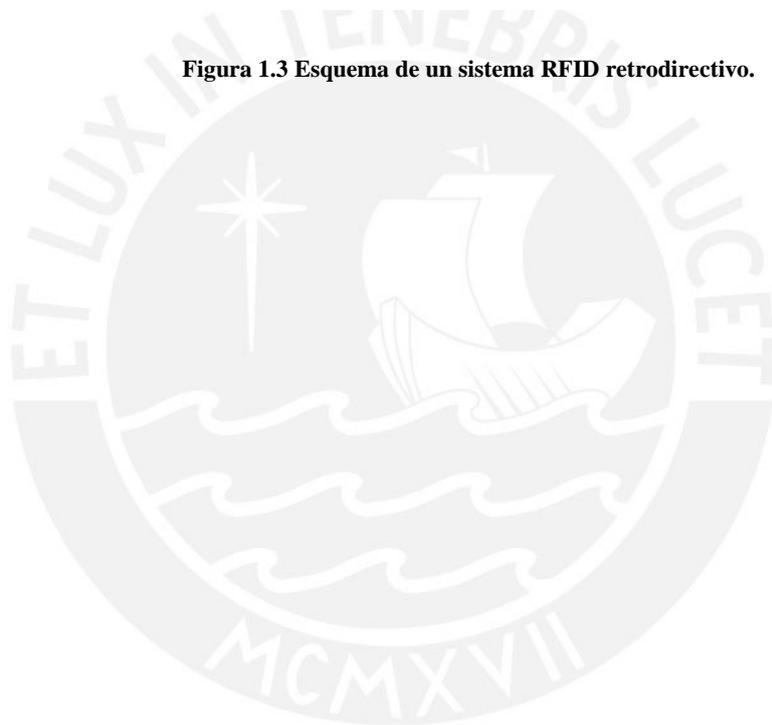


Figura 1.3 Esquema de un sistema RFID retrodirectivo.



2. ESTADO DEL ARTE

2.1 ARRAYS RETRO-DIRECTIVOS

CONCEPTO GENERAL.

Un array retro-directivo [1-2] es un arreglo de antenas que tiene la propiedad de transmitir la señal que le llega del dispositivo interrogador de vuelta a su posición sin ningún conocimiento previo de la posición en la que este se encuentra, esto es, sin conocer el ángulo de incidencia por el cual le va a llegar la señal de interrogación. Además, tanto el interrogador como el array retro-directivo pueden estar en movimiento, ya que el array retro-directivo está continuamente corrigiendo su dirección de apuntamiento según vaya variando el frente de ondas recibido, usando la información de fase del frente de ondas para determinar la posición relativa del interrogador. Es capaz de realizar la operación sin depender de ningún complejo algoritmo de procesamiento digital de señal, realizándola de manera totalmente analógica.

La propiedad de retro-directividad se consigue en un array de antenas haciendo que la señal retransmitida por cada antena individual esté conjugada respecto a la incidente en esa misma antena, haciéndolo de manera relativa a una referencia de fase global. De este modo la señal retransmitida lo será, no en la dirección especular, sino en la misma dirección incidente. El efecto combinado de todas las antenas del array dará como resultado un haz directivo en la misma dirección del interrogador y sentido contrario, de ahí el nombre retro-directivo.

Los arrays retro-directivos son aplicables en cualquier caso en el que la naturaleza del frente de onda incidente no sea completamente conocido a priori, y donde se necesiten establecer comunicaciones en doble sentido. Un array retro-directivo individual puede ser usado como un transpondedor, por ejemplo, como en los sistemas radar o de RFID donde una señal de interrogación es recibida y decodificada o una señal de telemetría es transmitida en respuesta. La retro-

directividad permite al transpondedor recibir señales omnidireccionalmente a la vez que dirigir la respuesta eficientemente hacia el interrogador. Además de un incremento en el rango, esto ofrece mayor seguridad ya que las señales codificadas son enviadas solo en la dirección requerida, incluso cuando el transpondedor está en movimiento como en el caso de una aeronave. Un array retro-directivo también puede ser usado sin modulación para simplemente reflejar la energía incidente de vuelta a un sistema radar, para hacer el blanco más visible o fácil de seguir. Mejorando el Corte Transversal de Radar (RCS en inglés) de este modo también puede permitir a un vehículo que sea blanco conmutar entre modos visible e invisible (“stealth”) usando solo controles electrónicos. En un sistema de comunicaciones punto a punto, los arrays retro-directivos pueden ser usados en cada extremo para formar un enlace radio auto-alineante, donde se transmiten tonos piloto para permitir a los arrays fijar adecuadamente la dirección del apuntamiento de uno con el otro. Esto es adecuado tanto para comunicaciones en el espacio con satélites en movimiento como para sistemas terrestres en los cuales las antenas estén expuestas a fuertes vientos. Con la suficiente amplificación, es incluso posible dejar que dos arrays retro-directivos se alineen uno con el otro de manera espontánea a partir de la creación de una señal de oscilación a partir del ruido mutuamente reflejado. Esquemas similares han sido también propuestos para transmisión inalámbrica de potencia con grandes arrays auto-apuntables, incluyendo radiación de potencia desde colectores espaciales de energía solar hacia la tierra y alimentación en potencia de aeronaves a gran altitud por un rayo de microondas.

Los sistemas de arrays ajustados en fase tienen muchas aplicaciones tanto en sistemas militares como de comunicación comercial. Entre ellos, el array retro-directivo ha sido de particular interés debido a su efectividad y su capacidad para hacerse de forma compacta. En los últimos años, muchos diseñadores en microondas y ondas milimétricas han comenzado a prestar atención a este array auto-ajustable en fase, dándose cuenta de que el array retro-directivo puede ser un atractivo candidato para sistemas móviles de comunicación avanzada donde se desea una gran ganancia de enlace y un seguimiento de haz automático. Los arrays retro-directivos pueden ser usados eficientemente en sistemas de comunicación móviles, tal como de una estación terrena a vehículos en movimiento, aviones o satélites. Sus posibilidades

están aún por descubrir y explotar. Algunos ejemplos de aplicaciones concretas pueden ser:

- Telemetría.
- IFF en banda L (Identificación Friend or Foe, Identificación de Amigo Enemigo).
- Seguimiento de misiles.
- Seguimiento de satélites.
- Balizas Radar para control de tráfico aéreo.
- Control de Vehículos.
- Radioenlaces.

En la siguiente tabla se resumen las principales ventajas de los arrays retro-directivos:

Principales ventajas de los arrays retro-directivos:
○ Directividad
➤ Seguridad (baja interceptación)
➤ Eficiencia en potencia
○ Seguimiento automático de haz
○ Prescinde de procesado digital de señal -> Simplicidad, respuesta de alta velocidad
○ Diseño compacto (integración)

TÉCNICAS EMPLEADAS PARA CONSEGUIR RETRO-DIRECTIVIDAD.

El elemento retro-directivo más básico es el *reflector ortogonal o de esquina*. Los reflectores ortogonales consisten en dos o tres planos conductores perpendiculares entre sí que se encuentran en un vértice, con los extremos del reflector generalmente cuadrados o triangulares. Los rayos incidentes son reflejados en sentido inverso en la dirección de llegada a través de la acción de múltiples reflexiones, de manera que la reflexión en una pared sirve para invertir la componente del vector de propagación normal a dicha pared. Así, un reflector ortogonal diédrico es retro-directivo en dos dimensiones y un reflector triédrico lo es en tres dimensiones (Figura 2.1). Racimos de reflectores triédricos compartiendo un vértice común se usan también para cobertura omnidireccional completa, como son los arrays para sección radar incrementada. Aunque son simples y adecuados para tareas como incrementar la reflectividad de un blanco o proporcionar un indicador radar, los reflectores ortogonales se ven limitados por el gran volumen que requieren (muchas longitudes de ondas cúbicas), por la alta precisión requerida en el alineamiento de las paredes y por la dificultad de modular la señal reflejada para aplicaciones de transpondedor.

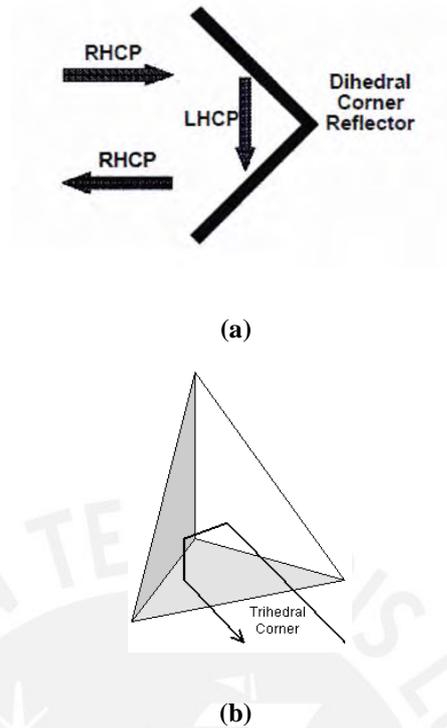


Figura 2.1 Reflector ortogonal (a) diédrico y (b) triédrico

Otra manera de conseguir retro-directividad es el *array de Van Atta* [4]. El array de Van Atta consiste en un conjunto de antenas con conexiones de igual longitud entre pares de antenas que son equidistantes del centro del array. Debido a que no requiere oscilador local, el array de Van Atta realiza retro-directividad con una gran anchura de banda que está limitada simplemente por el ancho de banda de una antena de las que lo integran. Sin embargo, tiene la desventaja de que la onda que se recibe debe ser una onda plana. Su esquema original se puede ver en la Figura 2.2.

Oct. 6, 1959 L. C. VAN ATTA 2,908,002
 ELECTROMAGNETIC REFLECTOR
 Filed June 8, 1955 3 Sheets-Sheet 1

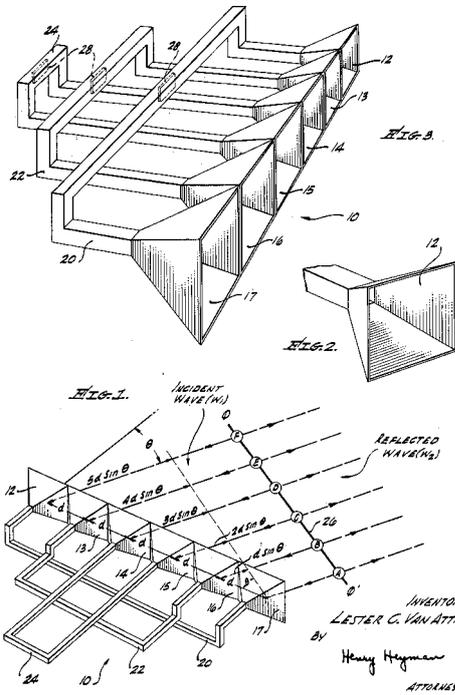


Figura 2.2 Esquema del array Van Atta. Diseño original de 1959 [4].

El array de Van Atta ilustra el fundamental requerimiento para los arrays retro-directivos, conocido como el principio de la conjugación de fase, que establece que la fase de la señal transmitida por cada elemento en un array retro-directivo debe tener una relación de conjugación con la fase de la señal recibida por ese elemento, relativo a una señal de referencia común. Esto permite que el camino de fase total del generador de señal hacia el array y posterior de vuelta al origen sea constante para todos los elementos en el array, de modo que cada señal reenviada llegue en fase de vuelta al origen. Así, un elemento que recibe una señal desfasada de manera relativa a otro elemento la retransmitirá con su correspondiente avance en fase. La fase, e incluso la frecuencia, de la señal de referencia es arbitraria y puede elegirse que sea la señal recibida por un determinado elemento del array, o una señal de referencia generada localmente en el array. Una importante consecuencia de este principio es

que un array de elementos transmitiendo señales conjugadas en fase será retro-directivo cualquiera que sea la disposición de los elementos individuales o la uniformidad del frente de ondas. De este modo, pueden ser usadas configuraciones de elementos irregularmente espaciados y no planares, incluyendo arrays conformables diseñados para ajustarse a una superficie curva como por ejemplo el fuselaje de una aeronave o la carrocería de un automóvil.

Una de las limitaciones del array de Van Atta es que los desfases para obtener conjugación se obtienen gracias a su simetría, lo cual requiere que tanto el array como el frente de onda incidente sean planos. Una manera más de conseguir retro-directividad es el *array adaptativo*, en el que la fase y la amplitud se controlan independientemente para cada elemento. Un array así tiene la capacidad de dar forma al frente de onda transmitido para producir cualquier efecto deseado, incluyendo retro-directividad, redirección de haz incidente hacia cualquier ángulo, y focalización de haz con un frente curvo.

CARACTERIZACIÓN DE UN ARRAY RETRO-DIRECTIVO

El rendimiento de la auto-dirección de una antena retro-directiva es caracterizada por los RCS biestático y monoestático, las dos medidas estándares son ilustradas en la Figura 2.3. Cuando una señal interrogante (entrante) afecta al array bajo prueba, la señal retro-direccionada se transmite de vuelta a la antena receptora, idealmente en la misma dirección en la que se originó.

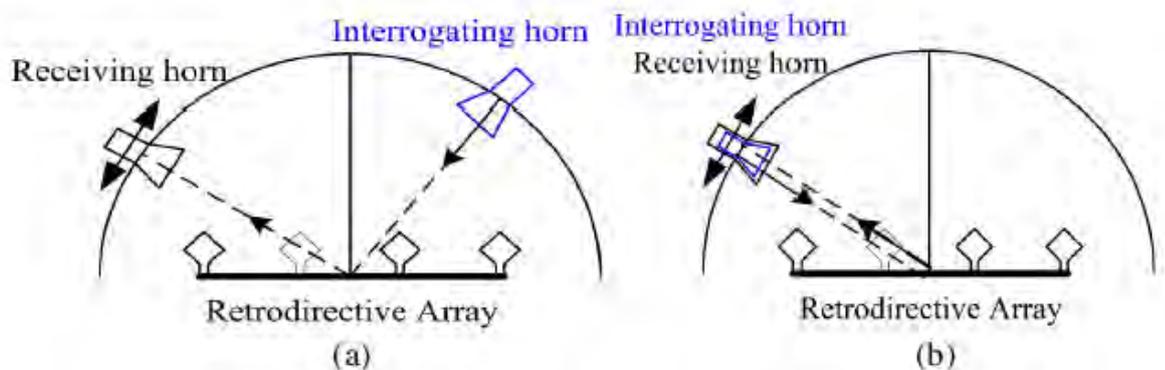


Figura 2.3 El rendimiento de un array retro-directivo es caracterizado por mediciones de (a) RCS biestático y (b) RCS monoestático.

En el caso biestático, la antena interrogante permanece estacionaria mientras que la antena receptora escanea sobre un rango azimutal, recoge ésta señal retro-direccionada. La medición resultante en el patrón muestra un lóbulo principal en la dirección de la fuente, con nulos o lóbulos laterales esperados que ocurren como resultado de la directividad del array. El teórico RCS biestático es dado por

$$\sigma_{bistatic}(\theta, \theta_0, \varphi, \varphi_0) = \frac{\lambda_0^2}{4\pi} G_c D_e(\theta_0, \varphi_0) D_e(\theta, \varphi) D_a(\theta, \theta_0, \varphi, \varphi_0)$$

Donde

θ_0, φ_0 son los ángulos de la fuente RF,

G_c es la ganancia del circuito,

D_e es la directividad de la antena elemento,

D_a es la directividad del arreglo, dado por

$$D_a(\theta, \theta_0, \varphi, \varphi_0) = \frac{4\pi |AF(\theta, \theta_0, \varphi, \varphi_0)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi |AF(\theta', \theta_0, \varphi', \varphi_0)|^2 \sin \theta' d\theta' \varphi'}$$

Donde $AF(\theta, \theta_0, \varphi, \varphi_0)$ es el factor del array.

En la medición del RCS biestático, el patrón de radiación del array de antenas retro-directivas es fijo ya que la posición de la fuente de interrogación (θ_0, φ_0) es fija. Por lo tanto, la directividad del array depende simplemente del ángulo (θ, φ) , que es la posición de la antena receptora. Dado que el factor de array es máximo en

el ángulo de la señal RF entrante, el lóbulo principal del patrón RCS biestático debe apuntar en la dirección de la fuente.

En el caso monoestático, tanto la antena de interrogación como la de recepción están colocadas y escaneadas simultáneamente. Dado que la señal de interrogación y la señal redireccionada están en la misma dirección, el pico de la radiación del array estará siempre en la dirección de la antena receptora y, por lo tanto, el patrón monoestático exhibirá un patrón relativamente plano sin valores nulos. El teórico RCS monoestático es dado por

$$\sigma_{monostatic}(\theta, \varphi) = \frac{\lambda_0}{4\pi} G_c D_e^2(\theta, \varphi) D_a(\theta, \varphi)$$

Debido a la naturaleza retro-directiva del array, el pico del factor de array siempre estará en la dirección de la fuente. Por lo tanto, el patrón del RCS monoestático de un array retro-directivo es simplemente dado usando el cuadrado de su directividad elemental multiplicado por la directividad del array en la dirección de la fuente. Tener en cuenta que la directividad del array se multiplica solo una vez. Esto se debe a que la señal recibida es procesada en cada elemento separadamente sin ser combinadas. El factor de array está implicado sólo cuando la señal conjugada-en-fase de cada elemento se combina espacialmente tras la transmisión.

El RCS monoestático es útil en la evaluación de la cobertura gran angular de un array retro-directivo. El RCS biestático es útil para evaluar la capacidad anti-interceptora (niveles bajos de potencia de los lóbulos laterales) y las limitaciones del ángulo de exploración. Un patrón de RCS biestático y monoestático típico es mostrado en Figura 2.4.

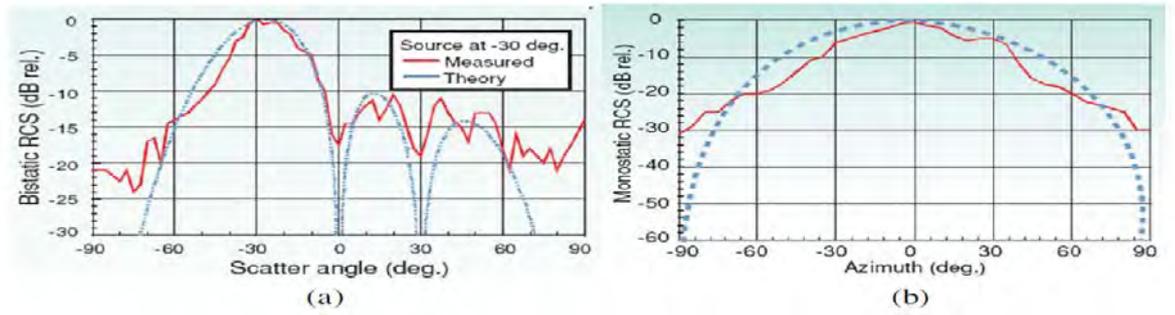


Figura 2.4 Patrón RCS típico de un array retro-directivo de antenas, (a) RCS biestático, (b) RCS monoestático.



2.2 FUNDAMENTOS Y PRINCIPIOS DE OPERACIÓN PARA RFID

Un sistema RFID consiste en un tag RFID, un lector RFID, y middleware (lógica de intercambio de información entre aplicaciones) [5].

COMPONENTES DE LOS TAGS RFID

Mientras que los tags RFID vienen en diferentes formas, dimensiones y tienen diferentes capacidades, todos los tags RFID tienen los siguientes componentes esenciales:

- Antena del tag;
- Circuito integrado;
- Substrato.

Cabe resaltar que los tags activos contienen más de los tres componentes esenciales mencionados. Sin embargo, nosotros nos centraremos en los tags RFID pasivos.

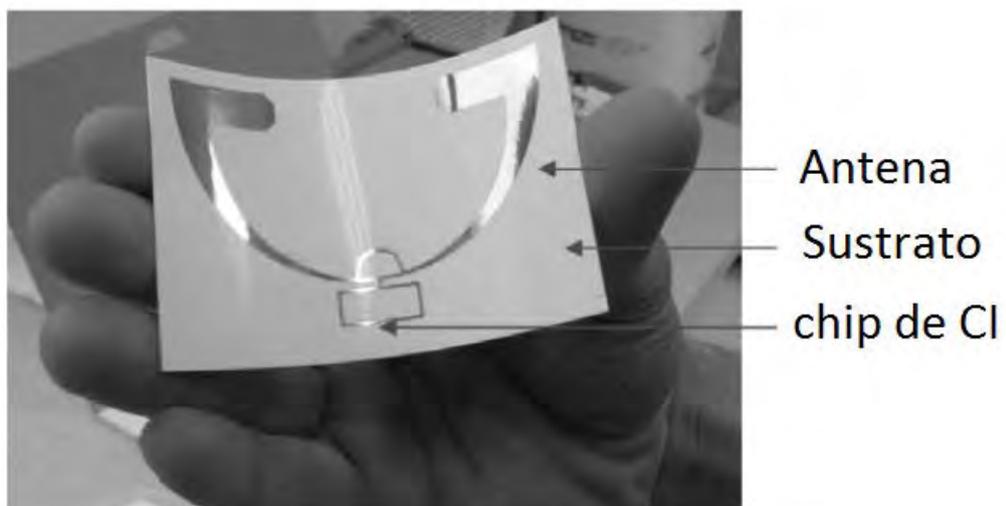


Fig. 2.5 Los componentes de un tag RFID.

La antena del tag es fabricada en un sustrato orgánico, con el circuito integrado (CI) montado en el centro de la traza de metal. Estos tres componentes esenciales hacen que el tag RFID sea funcional.

TIPOS DE TAGS RFID

Existen dos clasificaciones generales para los tags RFID: activos y pasivos. Los tags pasivos son utilizados básicamente por su bajo coste y su facilidad de implementación concorde a las normas establecidas. Los tags activos resultan extremadamente flexibles en términos de funcionalidad. Esto se debe a su batería integrada, que extiende su rango de lectura. Para nuestra solución propuesta nos enfocaremos en los tags pasivos.

Tags Pasivos

Los tags RFID pasivos son los más implementados debido a su bajo coste, su tamaño miniaturizado, perfil bajo, y arquitectura simple. No incluyen ninguna batería integrada, por eso el nombre de pasivos, lo que lleva a un tag RFID muy delgado y de perfil bajo que puede ser fabricado por técnicas rápidas y simples.

Los tags pasivos utilizan el *backscattering* para alimentar su CI. Esto significa que la energía irradiada desde la antena del lector se transforma en unos de los factores más importantes que determina el rango de operación. Desafortunadamente, debido a la complejidad de la propagación de las ondas electromagnéticas, fórmulas simples como la de Friis no son suficientes para explicar el rango de operación de un enlace de comunicación RFID (lector-tag-lector) pero podemos utilizarla como punto de referencia:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r (1 - |\rho|^2) |\hat{\rho}_t \cdot \hat{\rho}_r|^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

(2.1)

Donde:

P_r : la potencia recibida desde la antena receptora,

P_t : la potencia irradiada desde la antena transmisora,

G_r : la ganancia de la antena del lector,

G_t : la ganancia de la antena del tag,

ρ : el coeficiente de reflexión complejo en la entrada de la antena transmisora,

$\hat{\rho}_t$: vector de unidad de polarización de la antena transmisora,

$\hat{\rho}_r$: vector de unidad de polarización de la antena receptora,

λ : longitud de onda a la frecuencia de transmisión en espacio libre,

d : rango de lectura del sistema RFID (distancia lector-tag).

La fórmula de Friis también se puede escribir en forma de decibelios, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_m - L_p - 20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) - 20\log_{10}(d) \quad (2.2)$$

El desajuste de polarización está dado por $|\hat{\rho}_t \cdot \hat{\rho}_r|^2$ y es igual a la pérdida por desajuste L_p en decibelios entre la polarización del lector y el tag. $(1 - |\rho|^2)$ o L_m representa la pérdida por desajuste de impedancia entre el CI y la antena de cualquier tag RFID.

Estos términos representan la propagación o la pérdida de trayectoria, lo cual depende de la longitud de onda (por tanto la frecuencia) de operación y la distancia recorrida. De (2.2) se puede observar que el rango de lectura es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la potencia recibida en el tag procedente del lector.

Es útil e importante tratar con decibelios (dB) cuando se habla de sistemas de comunicación incluyendo los RFID. Otro parámetro muy importante para los tags RFID y lectores es la sensibilidad. La sensibilidad de un dispositivo electrónico, en nuestro caso un tag RFID, define la magnitud mínima de la señal de entrada

requerida para producir una señal de salida específica con una relación señal/ruido dada. Este número se presenta en dBm por los fabricantes.

2.3 OTROS PUNTOS A TENER EN CUENTA

En cuanto al material de fabricación, el uso de sustratos flexibles como el Teleftalato de Polietileno (PET), papel [6] y textiles [7] están recibiendo mucho interés, debido a que satisfacen los requerimientos de bajo coste y un gran volumen de fabricación, además de permitir propiedades mecánicas de conformación.

Un desafío fundamental para los sistemas RFID pasivos consiste en maximizar el rango de lectura de los tags. Una manera de realizar esto es mediante el uso de técnicas de cosechamiento de energía. Como un ejemplo, en la Figura 2.6 se muestra un tag con una antena solar [8], en donde la luz solar es inicialmente convertida a electricidad DC mediante el uso de paneles solares, y subsecuentemente un oscilador de gran eficiencia es usado para convertir la potencia DC a RF la cuál es usada para potenciar un tag RFID comercial pasivo y así extender su rango de lectura.

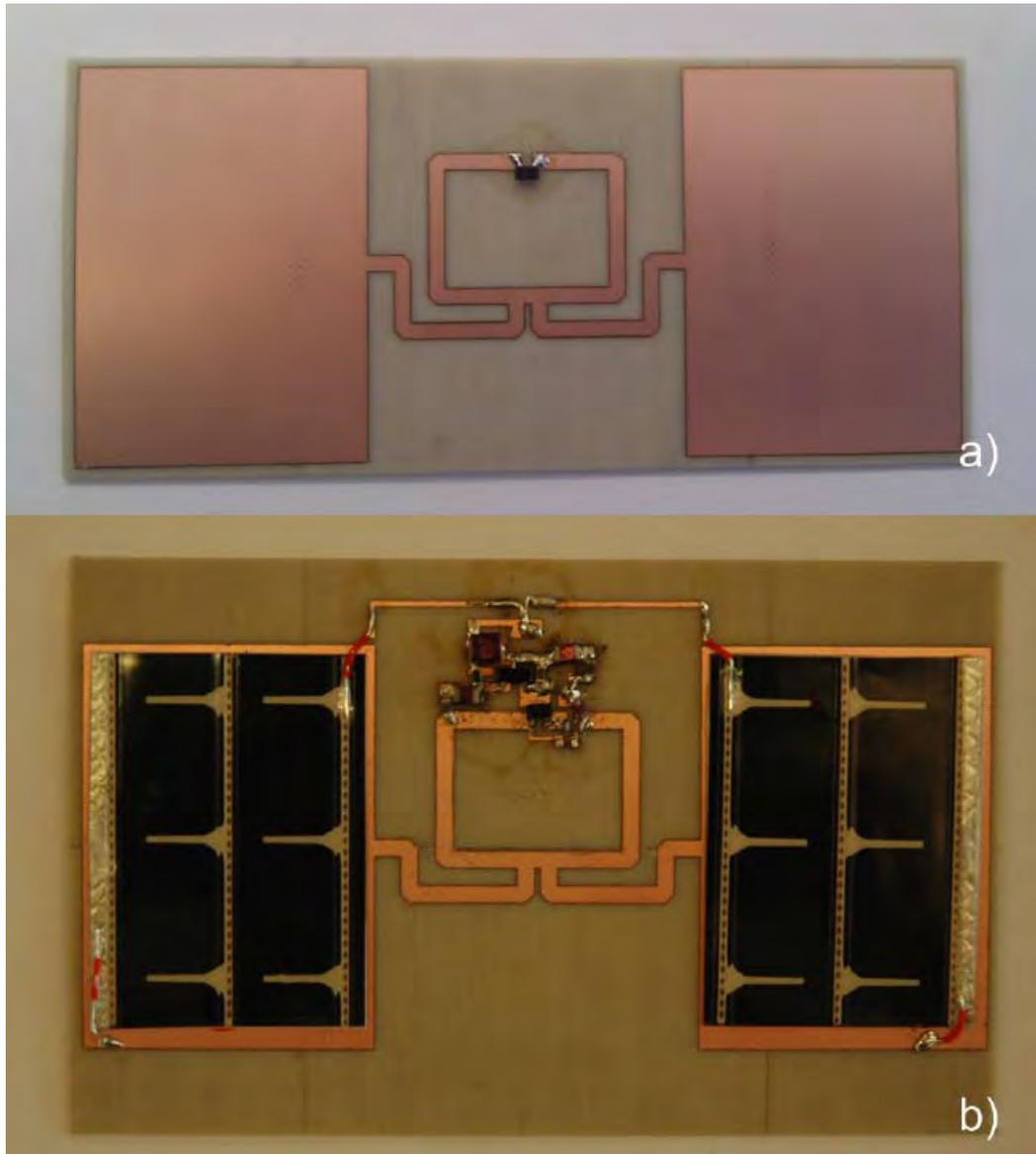


Figura 2.6. Método para extender el rango a) tag original, b) tag modificado con celdas solares y un circuito oscilador.

Como ya vimos antes, un array retro-directivo permite re-irradiar una señal incidente hacia su fuente. En nuestra solución se propone el uso de una antena retro-directiva Van-Atta para extender el rango de las etiquetas RFID. El array de Van-Atta se compone de un conjunto de antenas, con conexiones de igual longitud entre pares de antenas que son equidistantes del centro de la matriz. En el caso de un array de dos elementos, la señal recibida por una antena es transmitida a la otra con una fase adecuada; de hecho, la línea de transmisión entre los dos elementos se utiliza para invertir la fase de la onda incidente y luego dirigir el haz principal hacia la

dirección en la que se recibe la señal incidente. Ésta operación no requiere de un oscilador local (LO), con lo que el concepto de la antena Van-Atta realiza retro-directividad con un ancho de banda amplio únicamente limitado por el ancho de banda de sus elementos [9,10].



3. TAG DE UN ELEMENTO

Este capítulo describe el diseño y los resultados de la simulación de tag de un elemento. La realización del prototipo es simple y rápida, ya que el diseño de la estructura es impresa en papel utilizando una tinta conductora basada en plata. En la siguiente sección, el desarrollo preliminar de un tag RFID basado en una tipología de dipolo con un anillo inductivo central es propuesto y caracterizado. El prototipo ha sido puesto a prueba usando un **lector de fuente** cuya señal transmitida fue entregada al tag utilizando diferentes ángulos de incidencia, para así poder medir su rango de lectura. A medida que la dirección de la onda entrante se mueve de la dirección ortogonal, el rendimiento de radiación debería mostrar una degradación.

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL CHIP RFID

El primer paso para el diseño de la antena del tag fue hallar la impedancia de entrada del chip que vamos a utilizar. Para esto utilizamos un analizador espectral Agilent.

Para realizar la caracterización realizamos los siguientes pasos:

- Primero se realiza una calibración estándar SOLT (Short, Open, Load, Thru)
- Caracterizar los conectores. Realizar la calibración con:
 - Carga de 50Ω (Guardar en memoria)
 - Short (Corto circuito), calcular el Delay
 - Open (Circuito abierto), calcular el Delay y la Capacitancia
- Definir el nuevo Kit de Calibración con los nuevos parámetros calculados
- Utilizamos el analizador calibrado para hallar la impedancia de entrada del chip RFID.

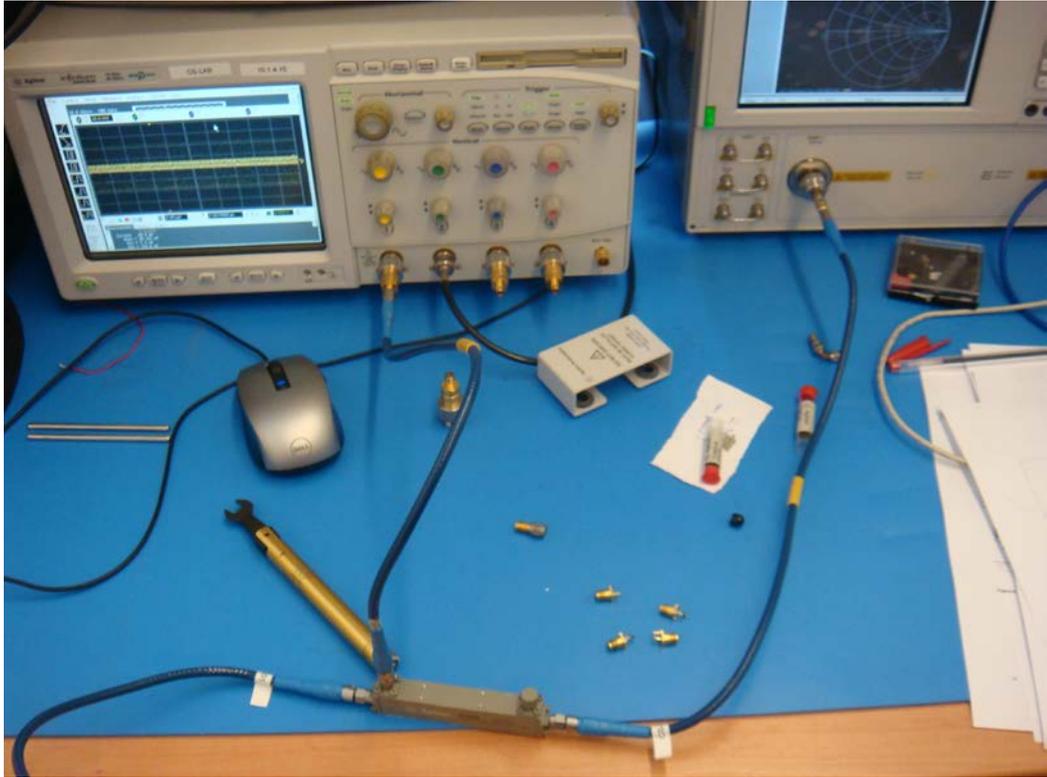


Figura 3.1: Proceso de calibración y medida

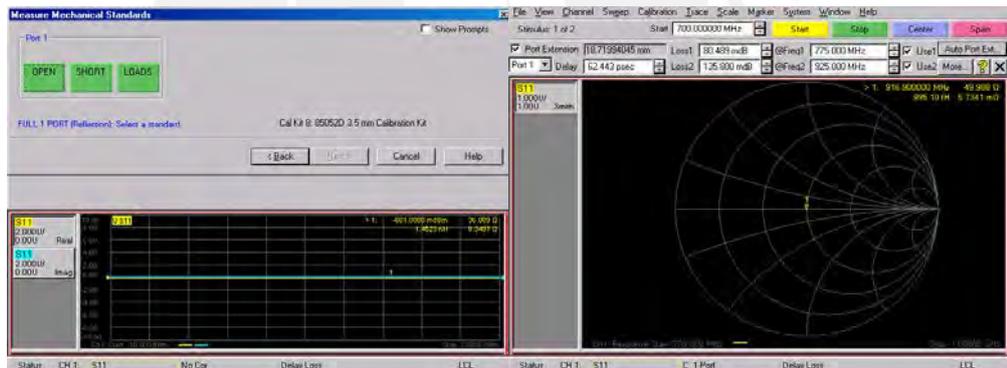


Figura 3.2 Capturas del proceso de calibración

La impedancia conjugada resultante es $\cong 20 - j200\Omega$.

3.2 DISEÑO

La estructura utilizada como base para nuestro prototipo de antena es similar a la que se presentó en la Figura 2.6. En este caso, una característica importante de nuestro diseño es la elección de un sustrato flexible de bajo coste como el papel (290 g/m² papel liso por Ilford).

El material presenta:

- 3,28 de permitividad eléctrica (ϵ_r),
- 0,06 de tangente de pérdida ($\tan \delta$),
- 290 μm de espesor,

y parece ser un candidato muy prometedor para la implementación de tags para aplicaciones RFID. Además de eso, el diseño de la estructura puede ser simplemente impreso o pintado en el sustrato de papel, mediante el uso de una pintura de plata conductiva (Electrolube) hecha de una combinación de plata, estaño y cobre, que proporciona la metalización necesaria. En la Figura 3.3 se muestra el diseño de la antena del tag propuesta para un chip RFID (Alien Higgs 3 ALC-360-FS-AL) que trabaja a una frecuencia de 868 MHz.

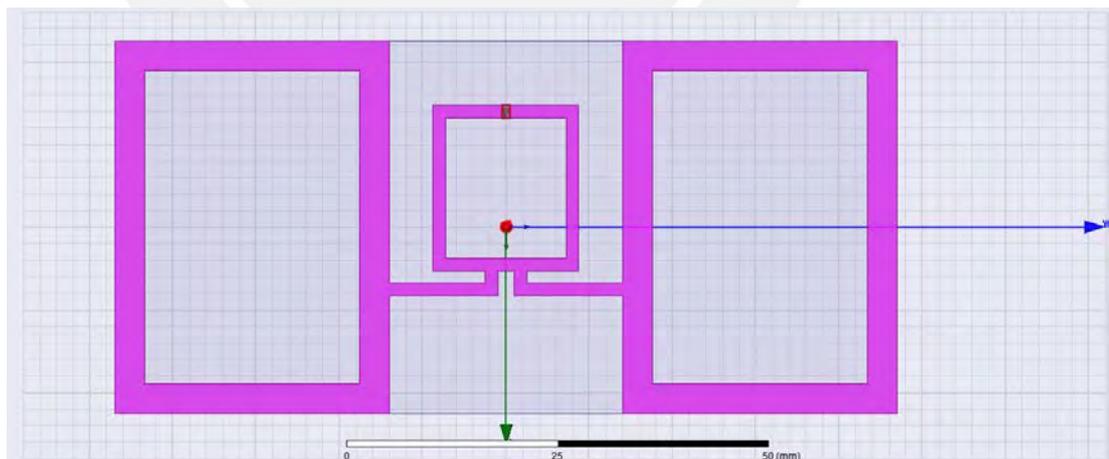


Figura 3.3 Diseño del tag RFID de un elemento propuesto.

La estructura se dimensionó mediante el uso de un software basado en el Método de Elementos Finitos (Ansys HFSS). Los elementos resonantes del tag consisten en

dos bucles rectangulares con un ancho de 3,6 mm. La elección de los bucles en lugar de rectángulos rellenos (como en [8]) fue tomada con el fin de minimizar la cantidad de tinta necesaria para imprimir el circuito, reduciendo aún más el coste del dispositivo.

El dipolo obtenido también cuenta con un bucle inductivo central en donde es soldado el chip transpondedor. Su función es garantizar la adaptación de impedancia necesaria entre la estructura resonante y el chip RFID comercial para ser leído, cuyo valor de impedancia conjugado es $20 - j200 \Omega$.

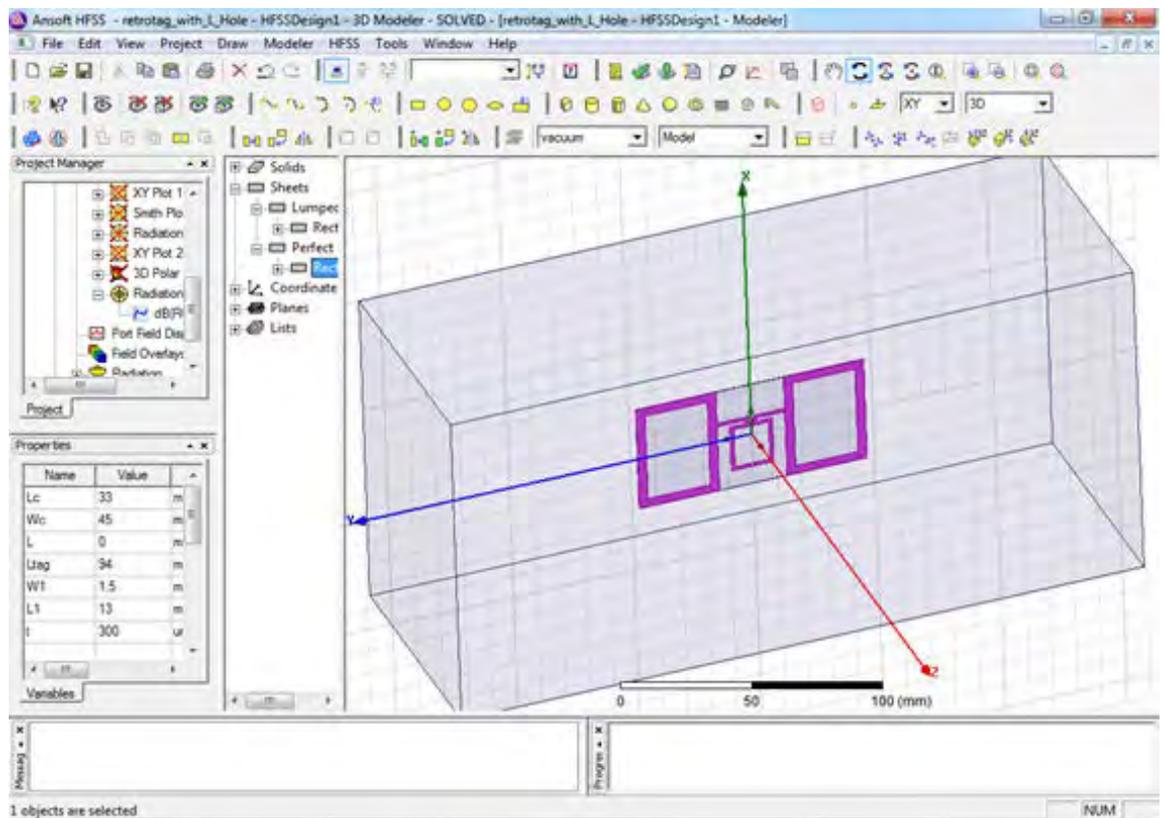


Figura 3.4 Diseño del tag RFID de un elemento propuesto.

De esta manera, la potencia transferida al chip se maximiza, y por lo tanto la respuesta del dispositivo. El acople deseado a 868 MHz de frecuencia se obtuvo mediante una simulación de onda completa, en la que el chip se modeló como un “Lumped Port” con la impedancia deseada. Las dimensiones finales elegidas para la antena están en la Tabla I, y el tamaño total del tag es 78 mm por 35 mm. En la

Figura 3.4, se muestra el diseño de la antena del tag propuesta, junto con los parámetros geométricos utilizados en la fase de optimización.

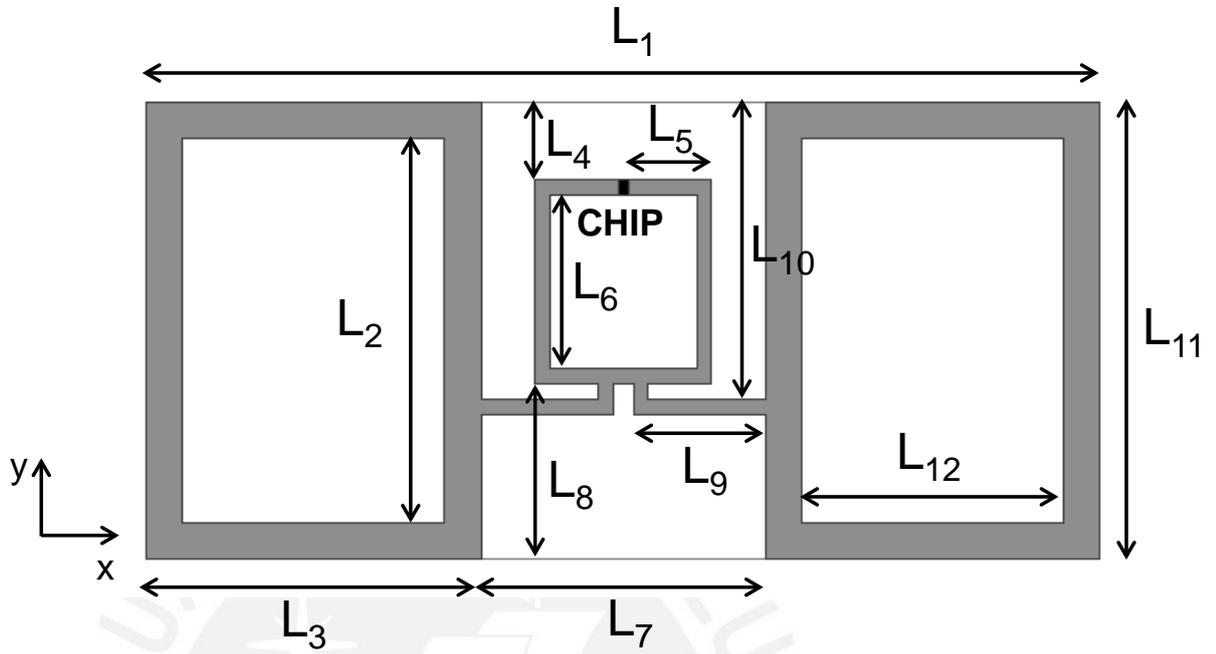


Figura 3.5 Estructura del tag RFID de un elemento propuesto.

TABLA I
DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DEL TAG DE UN ELEMENTO

PARÁMETRO	DIMENSIÓN (MM)	PARÁMETRO	DIMENSIÓN (MM)
L ₁	78	L ₇	28
L ₂	27.8	L ₈	12.25
L ₃	25	L ₁₀	24.25
L ₄	6.75	L ₁₁	35
L ₅	8.25	L ₁₂	17.8
L ₆	13		

Después de eso, reemplazamos el “Lumped Port” por una carga “Lumped RLC” con resistencia muy pequeña (0.1 ohm), esto lo hacemos para simular el estado activo del tag. Excitamos la estructura por medio de una onda incidente plana, y el rendimiento de radiación de la estructura fue evaluado para diferentes ángulos de incidencia que van desde -90° a 90° con 45° paso. En la Figura 3.5, se presenta la RCS simulada de la etiqueta en el plano yz.

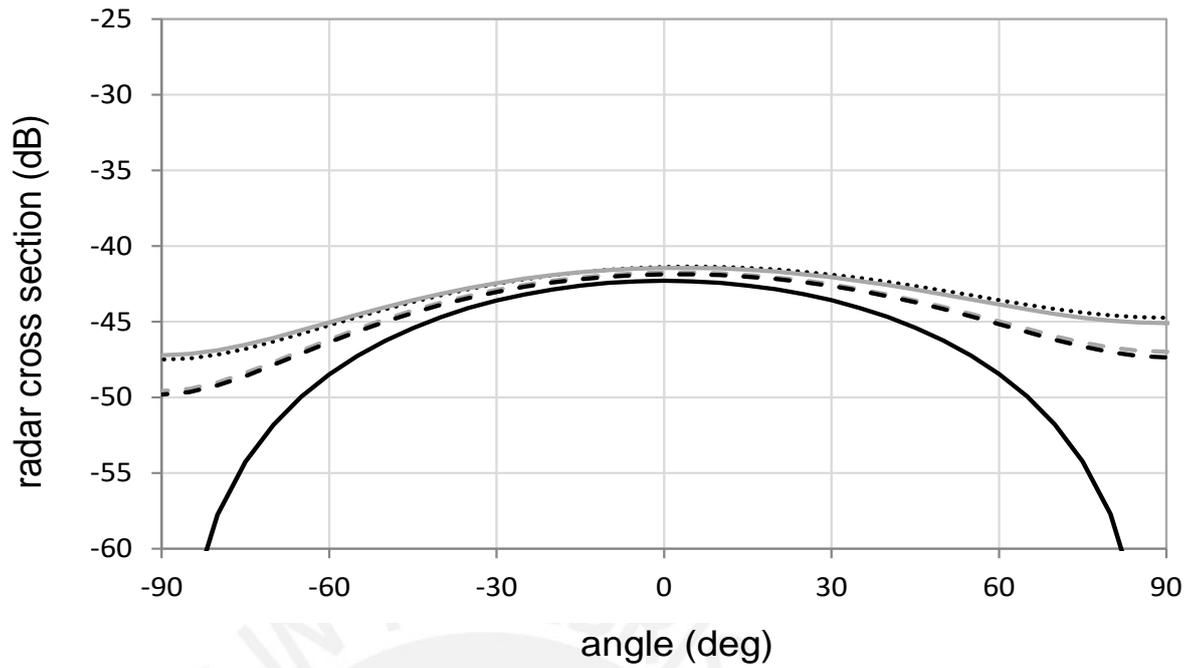


Figura 3.6 Imagen del RCS simulado para el tag de un elemento en el plano xz: 0° (negro continuo), -45° (negro discontinuo), -90° (gris continuo), 90° (negro punteado), y 45° (gris discontinuo) de ángulo de incidencia.

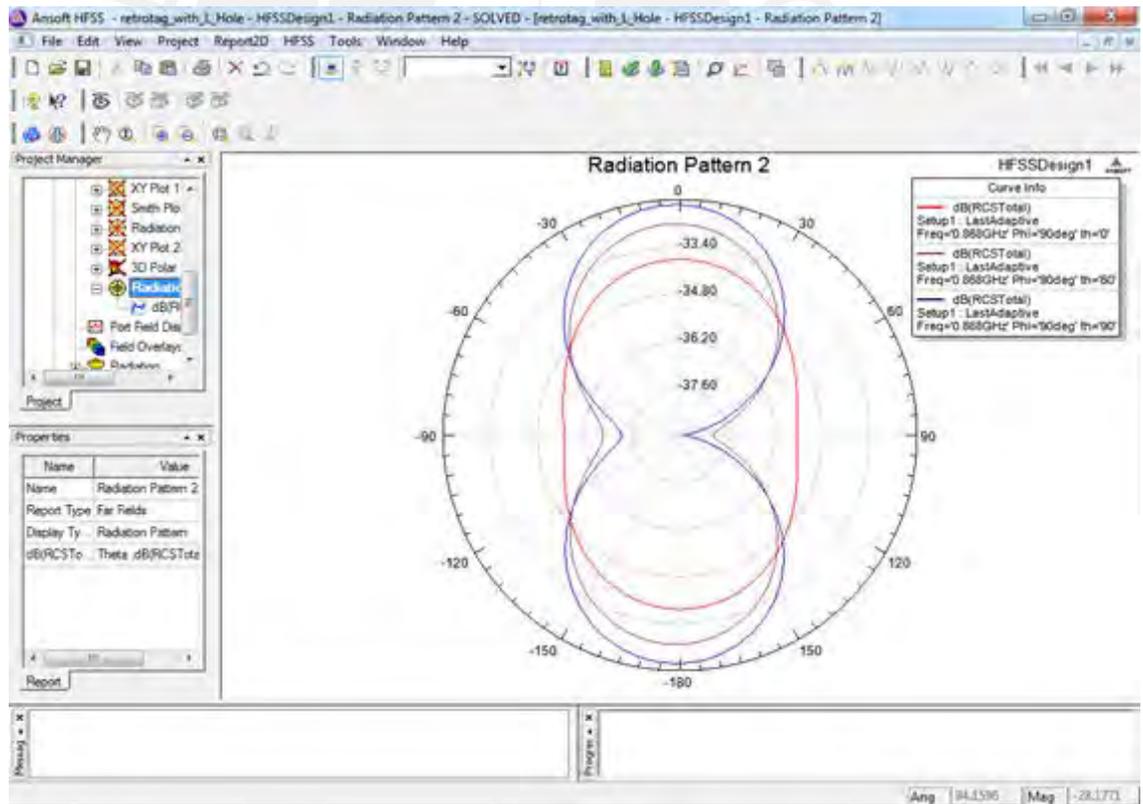


Figura 3.7 Patrón de radiación para diferentes ángulos θ .

Como se puede ver, independientemente de la dirección en la que la onda plana está excitando al tag, la respuesta sigue mostrando un máximo a 0° . Esto por supuesto puede causar degradación en el rendimiento del dispositivo en aplicaciones prácticas.

3.3 MEDIDAS

En la Figura 3.8, se muestra el prototipo implementado en papel del tag RFID propuesto. Su rendimiento se puso a prueba mediante el uso de un lector RFID UHF Impinj Speedway Resolution R420.

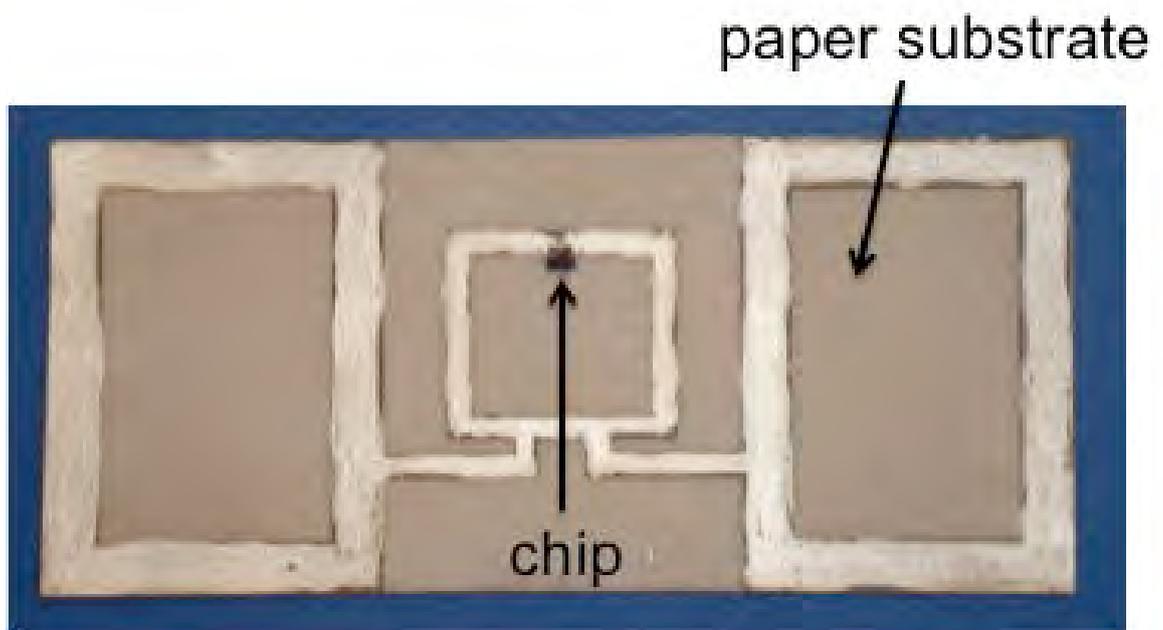


Figura 3.8 Fotografía del tag de un elemento implementado.

La configuración de la medición se ilustra en la Figura 3.9. El lector y el tag (montado en un soporte de papel) se colocaron uno en frente del otro a 90cm de distancia. Se pusieron paneles con material de absorción alrededor con el fin de evitar la creación de multicaminos para la señal transmitida por el tag.

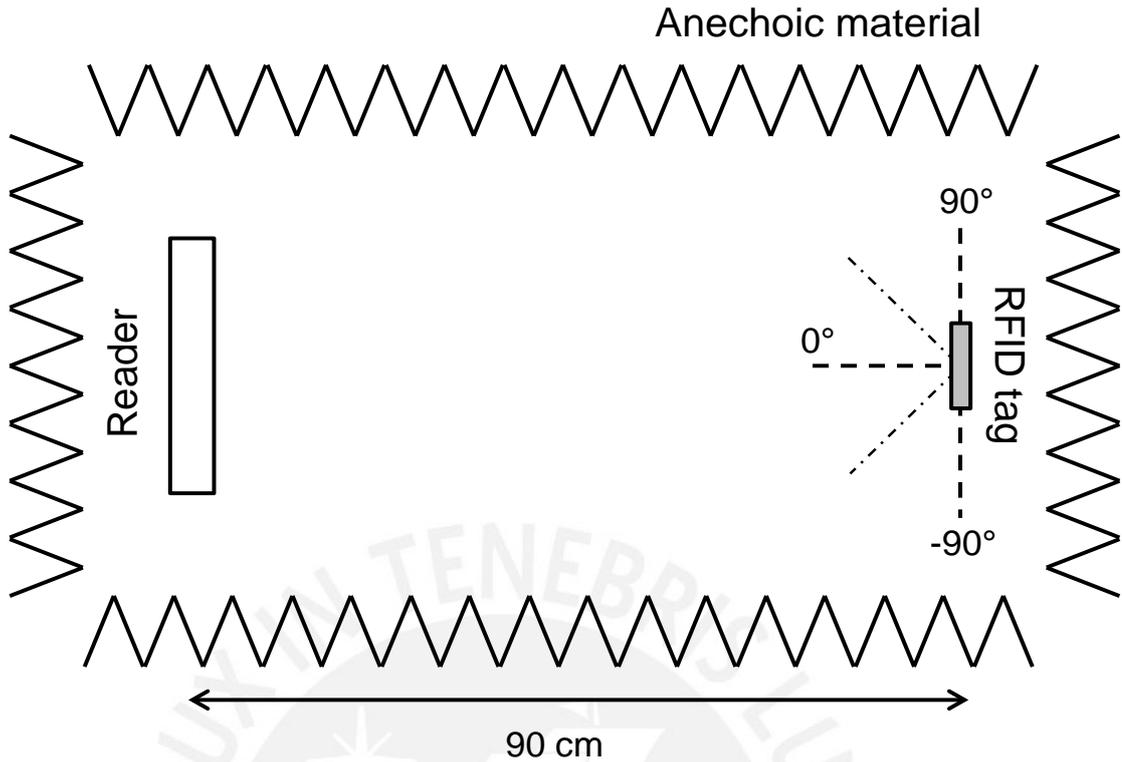


Figura 3.9 Esquema de la configuración de medición usado para evaluar el rendimiento del tag.

El lector fue puesto en modo “inventario”, con 31.5 dBm de potencia de transmisión. Luego, la señal recibida por el lector se midió para diferentes orientaciones del tag, que van desde -90° a 90° (véase Figura 3.9). De esta manera, el tag lleva a cabo una rotación de 180 grados, lo que corresponde a la recepción de la potencia transmitida desde el lector con un ángulo que varía en un rango de 180° ; esto nos permite apreciar la capacidad del tag para operar sobre diferentes ángulos de incidencia.

La exploración se realiza tanto para el plano yz (ver Figura 3.6), y los resultados de esta operación se representan en la Figura 3.10. Como se puede ver, la máxima potencia recibida es -55 dBm, a 0° de ángulo de incidencia. Después de eso, el nivel de señal disminuye a la mitad del máximo a -45 y 40 grados de ángulo de incidencia. Para ángulos de incidencia en los 70 - 90 grados, la etiqueta no se puede leer. La asimetría en el comportamiento de la radiación podría ser debido a la flexibilidad del sustrato, lo que puede introducir fácilmente cierta desalineación en la configuración de la medición.

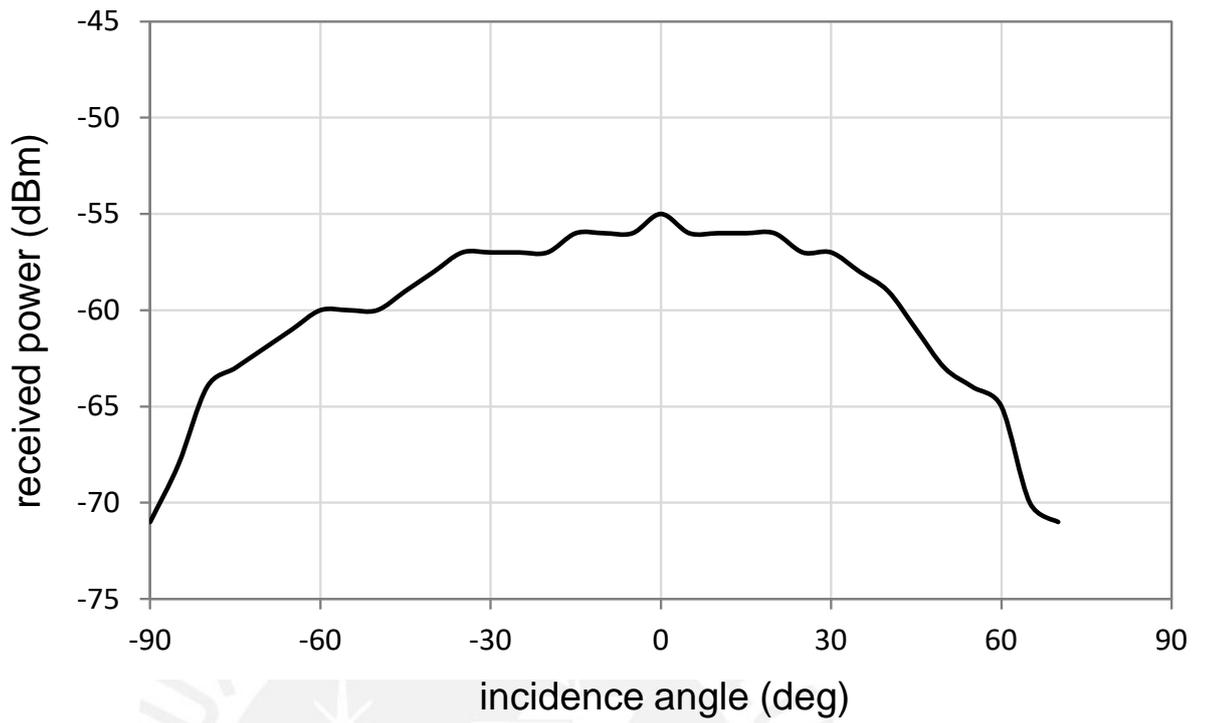
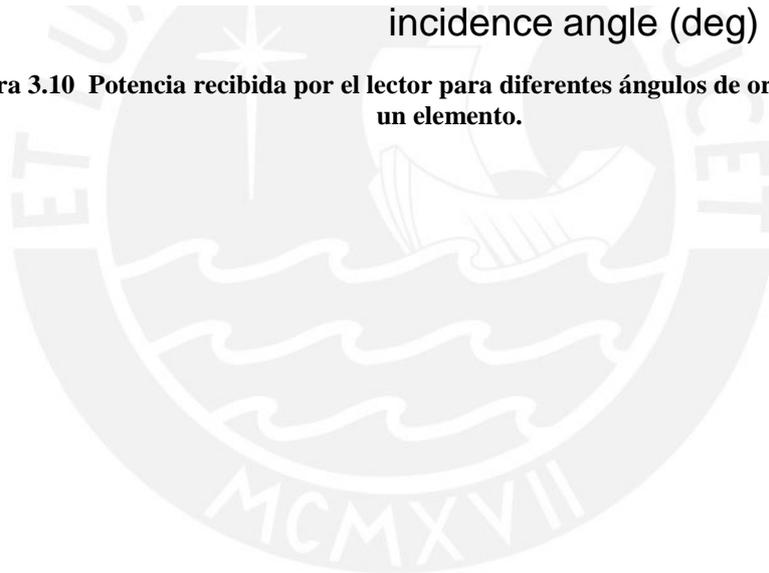


Figura 3.10 Potencia recibida por el lector para diferentes ángulos de orientación del tag de un elemento.



4. TAG RETRO-DIRECTIVO DE DOS ELEMENTOS

La topología del tag propuesto en la sección anterior fue modificada y usada como base para el desarrollo de una estructura de dos elementos. Este nuevo diseño permite maximizar la transmisión de energía a través de una mayor gama de ángulos de incidencia.

4.1 DISEÑO

La topología adoptada para el prototipo de dos elementos es mostrada en Figura 4.1. Como se puede ver, dos estructuras de tag similares a la presentada en la sección anterior se unen con el fin de hacer un dispositivo de dos elementos. En el array de Van Atta, uno de los dipolos sirve como receptor, mientras que el otro actúa como el transmisor (y viceversa) y dirige el haz principal de la matriz hacia la fuente de alimentación, como se describe en [11].

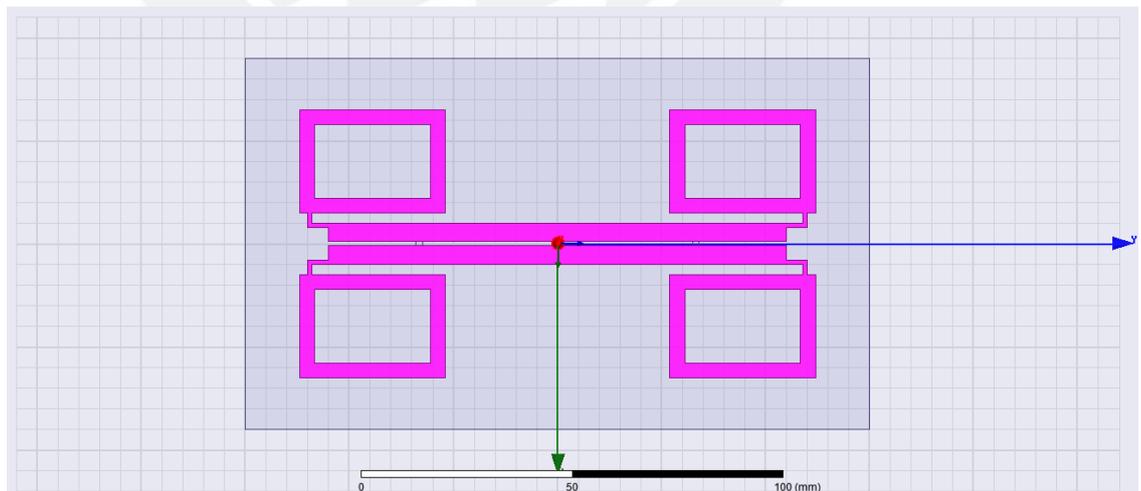


Figura 4.1 Estructura del tag retro-directivo RFID de dos elementos propuesto.

En este caso no se han utilizado bucles de inducción para obtener el acoplamiento deseado, en su defecto, se realizó la optimización actuando en las líneas de transmisión que conectan los cuatro resonadores. Para simplificar la estructura, hallamos la impedancia de entrada en el punto de unión entre la línea de transmisión y los resonadores (Figura 4.2). Esto nos ayudará a realizar las simulaciones con mayor facilidad.

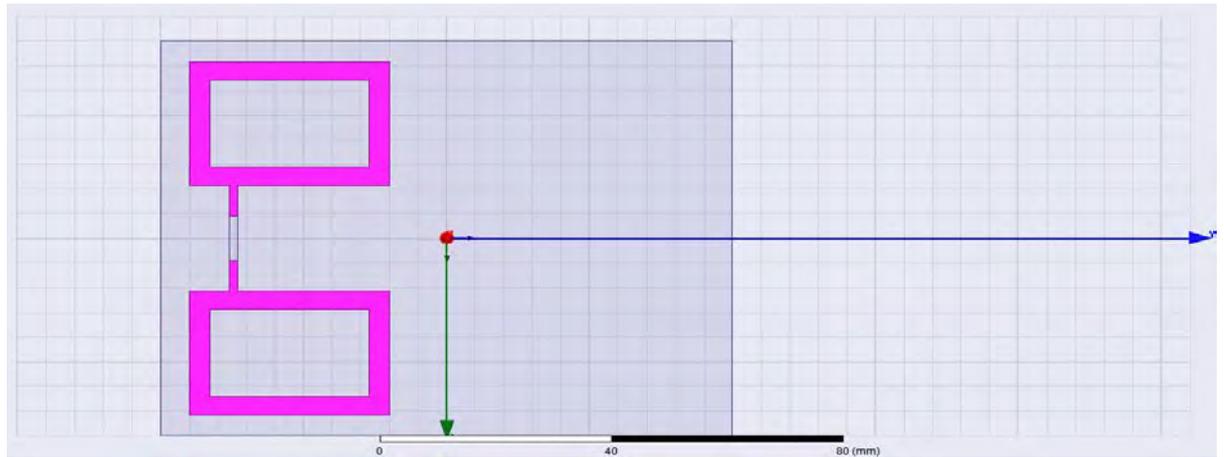


Figura 4.2 Estructura 1.

Luego de hallar la impedancia en ese punto, diseñamos la línea de transmisión. Los parámetros a tener en cuenta en éste caso son el largo y el ancho de la línea.



Figura 4.3 Estructura 2.

Como se puede ver en el esquema de la Figura 4.4, dos condensadores iguales, de 2.2 pF cada uno, se insertan de forma simétrica a ambos lados del chip. El objetivo

final es obtener valores de $S_{11}, S_{22} \sim -11\text{dB}$ y $S_{31}, S_{21} \sim 3\text{dB}$; o dicho de otra manera, asegurar que la potencia recibida por una de las dos antenas se divide en partes iguales entre el otro elemento y el chip.

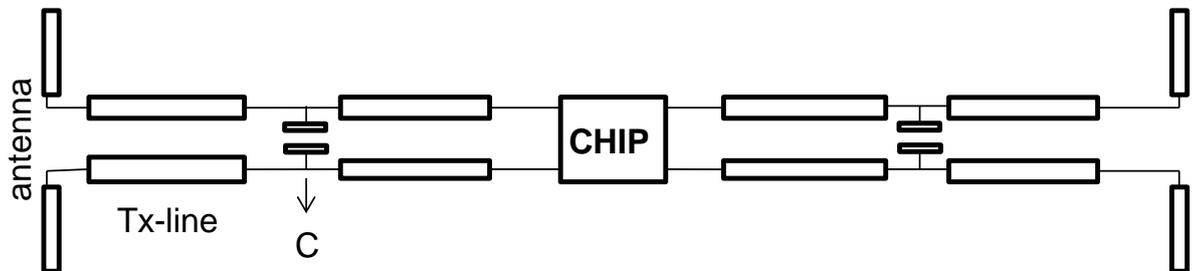


Figura 4.4 Esquema del tag RFID retro-directivo de dos elementos propuesto mostrando la conexión entre antenas de la estructura del array de Van-Atta.

Las dimensiones finales de la estructura se enumeran en la Tabla II, mientras que la Figura 4.5 presenta la RCS biestático simulada del tag de dos elementos en el plano xz para diferentes ángulos de incidencia de la onda plana de excitación, de manera similar a lo que se llevaba a cabo en la sección anterior. Se puede observar que en este caso la estructura presenta su máxima sección transversal del radar exactamente en la dirección de incidencia (-90° , -45° , 0° , 45° , 90°). Ésta característica es muy útil con el fin de maximizar la respuesta del tag al lector a través de una amplia gama de ángulos de incidencia, que es esencial en aplicaciones prácticas. Además de eso, la RCS de este diseño muestra una mejora de 15 dB a 0° , eso se debe a al tamaño más grande de la estructura y el uso de una configuración de array compuesta de dos elementos.

Un tag retro-directivo UHF RFID en un sustrato de papel

TABLA II
DIMENSIONES GEOMÉTRICAS PARA EL TAG DE DOS ELEMENTOS

PARÁMETRO	DIMENSIÓN (MM)	PARÁMETRO	DIMENSIÓN (MM)
L1	27.8	L7	3.5
L2	15	L8	25
L3	35	L10	8
L4	5	L11	31.7
L5	118	L12	3.5
L6	4.5	L12	7.8

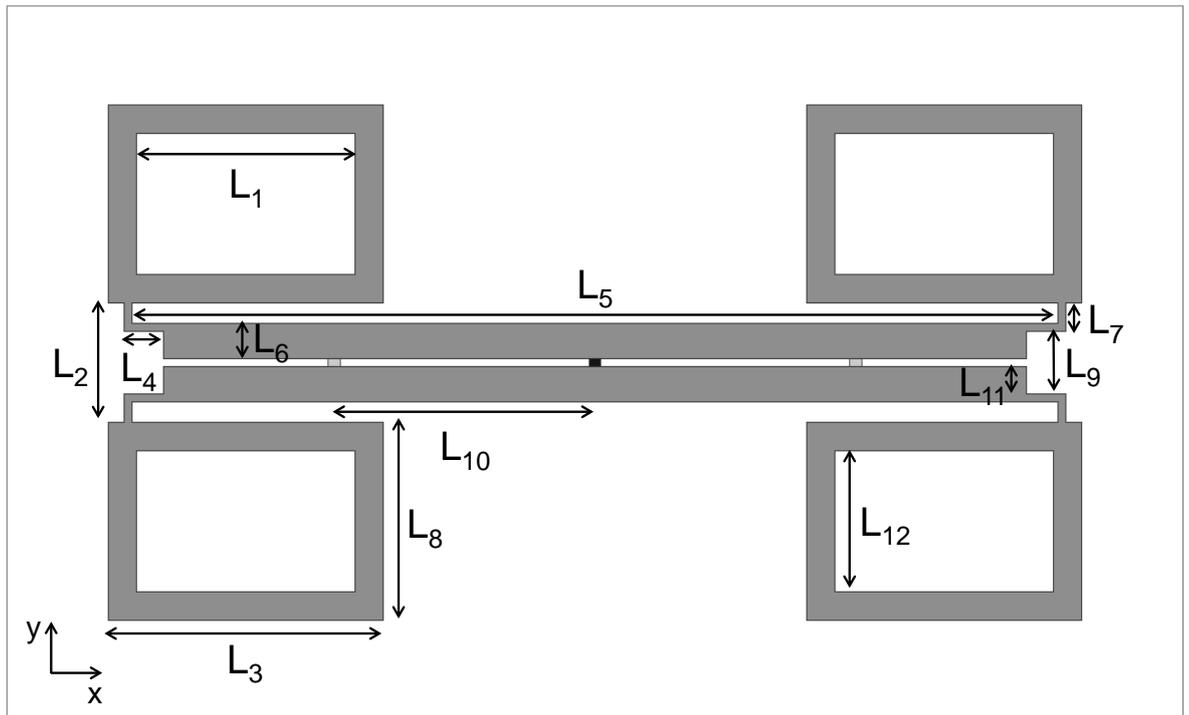


Figura 4.5 Estructura del tag RFID retro-directivo de dos elementos propuesto.

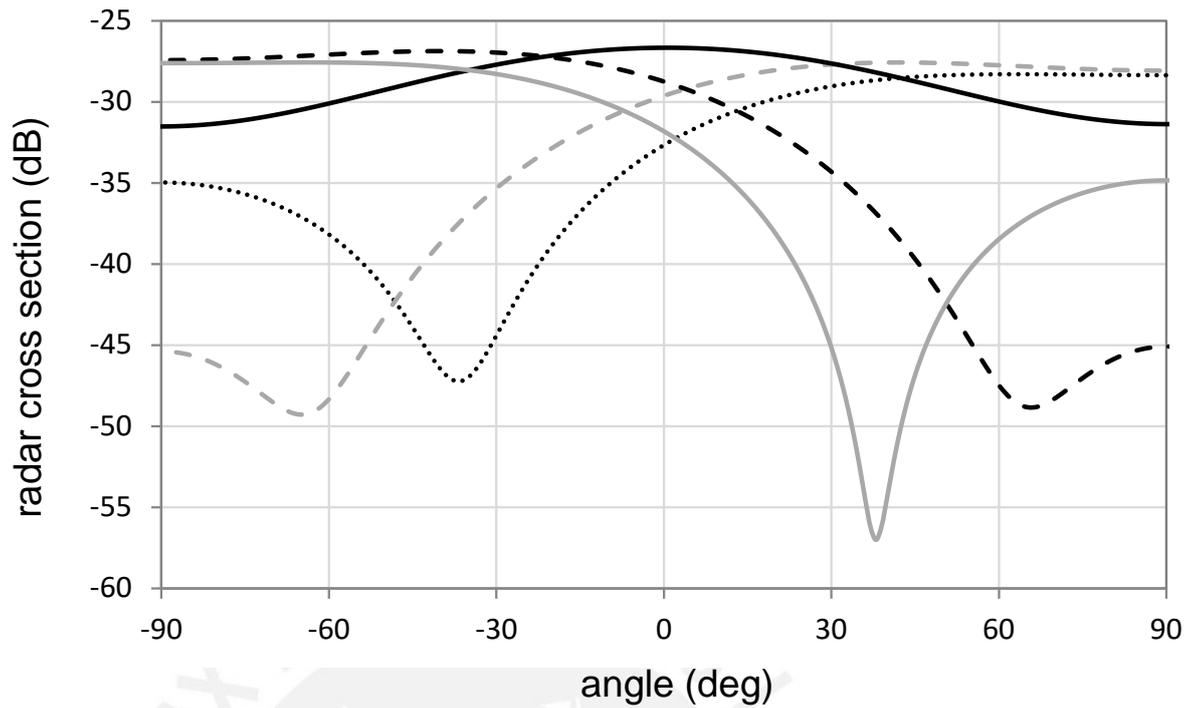


Figura 4.6 Imagen del RCS simulado para el tag retro-directivo de dos elementos en el plano xz: 0° (negro continuo), -45°(negro discontinuo), -90°(gris continuo), 90° (negro punteado), y 45° (gris discontinuo) de ángulo de incidencia.

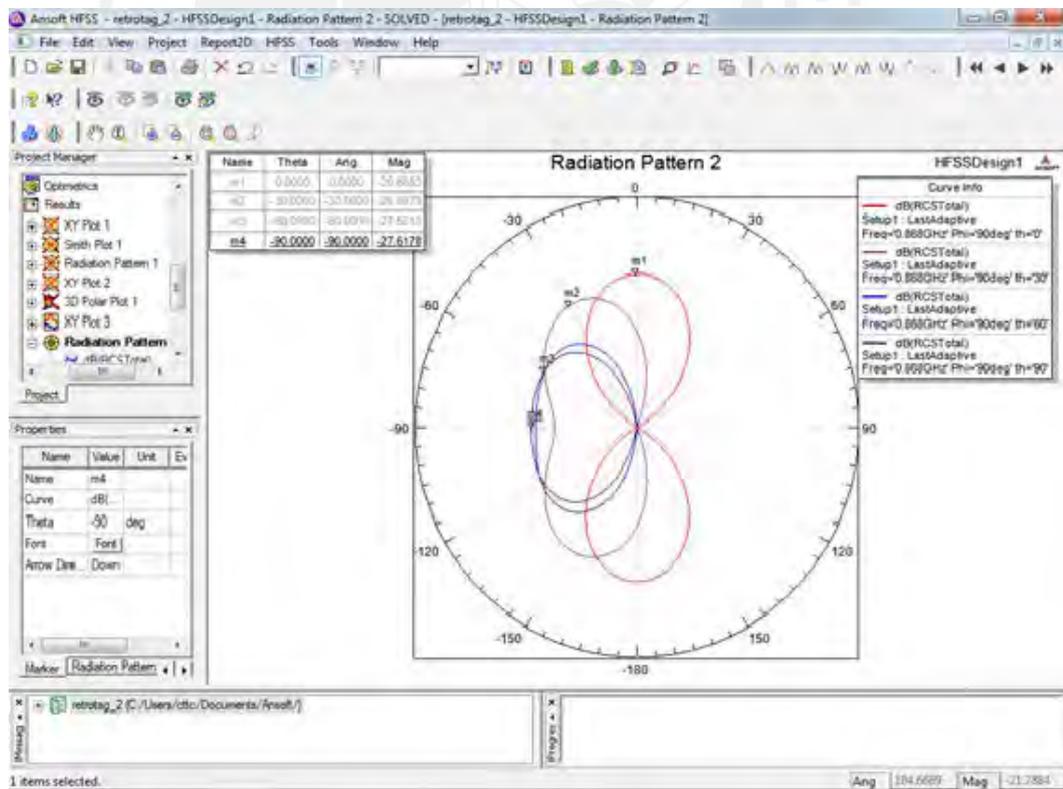


Figura 4.7 Patrón de radiación del tag retro-directivo de dos elementos.

4.2 MEDIDAS

La configuración utilizada para la caracterización de este segundo prototipo es el mismo de la Figura 3.9. En este caso, se encontró que la tasa de lectura era igual a 0.4 lecturas por segundo, con el lector transmitiendo 31.5dBm de potencia.

La Figura 4.8 muestra la estructura empleada, cuyo rendimiento de radiación se representa en la Figura 4.9 para el plano xz. La disminución de la potencia suministrada al lector respecto al valor máximo de -47 dBm es de alrededor de 5 dBm en todo el rango de incidencia, mientras que en el caso del tag de elemento único se apreció una caída de 16 dBm.

Por tanto, se puede concluir que usar un tag RFID de dos elementos nos permite maximizar el rango de ángulos de incidencia en los cuales el dispositivo puede operar apropiadamente. Por otra parte, la potencia recibida por el lector experimenta una mejora de 8dBm. La asimetría del gráfico de la Figura 4.8 puede ser debida a alguna desalineación en la configuración de la medición, así como condiciones de acoplamiento ligeramente diferentes en los dos lados del chip, que hacen que el reparto de la potencia recibida sea de forma desigual.

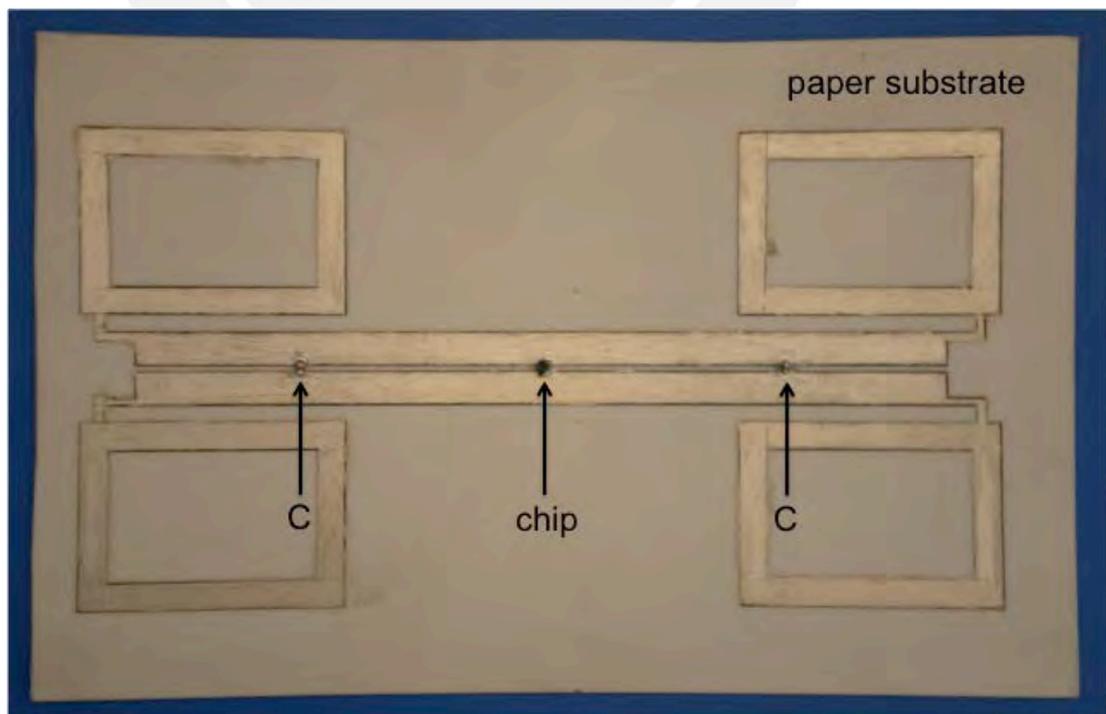


Figura 4.8 Fotografía del tag retro-directivo RFID de dos elementos implementado.

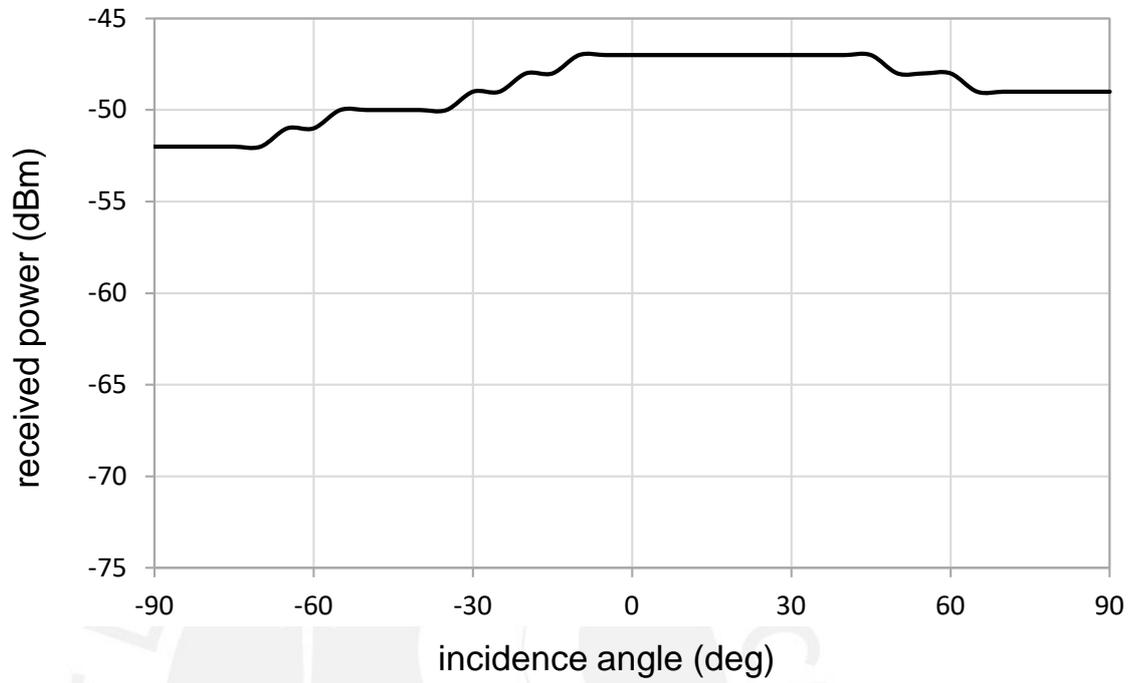


Figura 4.9 Potencia recibida por el lector para diferentes ángulos de orientación del tag de dos elemento.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Como conclusión a este trabajo hay dos aspectos importantes a mencionar. Primero, el trabajo nos muestra el éxito en el diseño, desarrollo e implementación en un sustrato de papel flexible y barato de un tag RFID, que trabaja en una frecuencia de 868 MHz, de un solo elemento y un array de dos elementos en una configuración retro-directiva. Segundo, después de evaluar su capacidad de reflejar la potencia procedente de un lector, se demostró que la estructura de dos elementos puede activar y responder en una gama mucho más amplia de ángulos de incidencia de la señal procedente de la fuente. Esta característica es muy útil en entornos de operación prácticos y, sumados a la facilidad de fabricación y su bajo coste, hacen de este tag retro-directivo adecuado para su uso masivo en una variedad de operaciones.

En líneas futuras es posible considerar modificar el diseño para poder tener un ancho de banda más grande. Así mismo, para cuestiones más prácticas, se puede modificar el tamaño de la antena y su respuesta en frecuencia debería permanecer igual si el ϵ_r del sustrato aumentara (cambiar de material). Otra posible ruta de desarrollo puede consistir en probar el diseño a frecuencias más altas y ver su rendimiento ante múltiples señales de entrada.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Klaus Finkenzeller, "RFID Handbook", Wiley 1999.
- [2] www.aimglobal.org/technologies/rfid , web de la asociación: The Association for Automatic Identification and Data Capture Technologies.
- [3] www.teamaxess.com, web de Axess AG, fabricante de soluciones RFID.
- [4] L.G. Van Atta, "Electromagnetic Reflector", U.S. Patent 2,908,002 , Oct. 6, 1959.
- [5] Amin Rida, Li Yang and Manos Tentzeris, RFID-Enabled Sensor Design and Applications, Artech House, 2010.
- [6] L. Yang, A. Rida, R. Vyas, M.M. Tentzeris, "RFID Tag and RF Structures on a Paper Substrate Using Inkjet-Printing Technology," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.55, no.12, pp.2894-2901, Dec. 2007.
- [7] E. Koski, K. Koski, T. Bjorninen, A. Ali Babar, L. Sydanheimo, and L. Ukkonen, "Fabrication of Embroidered UHF RFID Tags," in Proc. IEEE AP-S 2012, Chicago, 8-15 July 2012.
- [8] A. Georgiadis and A. Collado, "Improving Range of Passive RFID Tags Utilizing Energy Harvesting and High Efficiency Class-E Oscillators," in Proc. EuCAP 2012, Prague, 26-30 March 2012.
- [9] R.Y. Miyamoto, T. Itoh, "Retrodirective arrays for wireless communications," IEEE Microwave Magazine, vol.3, no.1, pp.71-79, Mar 2002.
- [10] Y.-J. Ren, Kai Chang "New 5.8-GHz circularly polarized retrodirective rectenna arrays for wireless power transmission," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.54, no.7, pp. 2970- 2976, July 2006.
- [11] Y.-J. Ren, Kai Chang " Bow-tie retrodirective rectenna," IET Electronic Letters, vol.4, no.4, pp. 191- 2, Feb. 2006.