

## Estudio y comparación en sistemas WTP basados en SCRM

### Study and comparison in WTP systems based on SCMR

**Pablo Emilio Rozo García<sup>1</sup>; Nicolás Andrés Rozo Cruz<sup>2</sup>; Carlos Andrés Cáceres Ramírez<sup>3</sup>; Jhoyner Esteban Martínez Hernández<sup>4</sup>**

**Para citar este artículo:** P. E. Rozo-García; N. A. Rozo-Cruz; C. A. Cáceres-Ramírez; J. E. Martínez-Hernández “Estudio y comparación en sistemas WTP basados en SCRM”. *Revista Vínculos*, vol. 16, no. 2, julio-diciembre de 2019, pp. XX-XX. DOI: <https://doi.org/10.14483/2322939X.15463>

#### Resumen

La transmisión inalámbrica de energía eléctrica es un tema que tiene una amplia aplicación en la ciencia, así que es necesario identificar cuál de sus diversos modelos se acoplan mejor de acuerdo con un requerimiento. Por tanto, este estudio pretende comparar diferentes modelos SCMR y presentar sus ventajas y desventajas, dicha comparación se realizó a partir de una simulación en el software COMSOL Multiphysics diseñando las diferentes antenas con sus valores respectivos de frecuencia de resonancia, después se realizó la implementación y se corroboró los comportamientos esperados. Luego de realizar diversas pruebas se identificaron los beneficios de cada sistema SCMR propuesto, y se analizó que los sistemas de transmisión inalámbrica SCMR se pueden adaptar a cualquier aplicación, solo que es

---

<sup>1</sup> Magister en Ciencias de la Información y las Comunicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, Bogotá. Afiliación institucional: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Correo electrónico: [perozog@udistrital.edu.co](mailto:perozog@udistrital.edu.co), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2587-8130>

<sup>2</sup> Ingeniero Electrónico, Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia, Bogotá. Afiliación institucional: Universidad ECCI, Colombia. Correo electrónico: [nicolas.rozoc@ecc.edu.co](mailto:nicolas.rozoc@ecc.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7005-6208>

<sup>3</sup> Ingeniero Electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, Bogotá. Afiliación institucional: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Correo electrónico: [caacaceresr@correo.udistrital.edu.co](mailto:caacaceresr@correo.udistrital.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2870-1290>

<sup>4</sup> Ingeniero Electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, Bogotá. Afiliación institucional: Procalidad S.A, Colombia. Correo electrónico: [estebanud-76puj@javeriana.edu.co](mailto:estebanud-76puj@javeriana.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3168-480X>

necesario identificar cuál de sus variaciones de parámetros es la adecuada. El mayor desempeño se presenta cuando resuenan en la frecuencia donde los componentes presentan su mayor factor de calidad.

**Palabras clave:** Conformal, Convencional, Misalignment, SCMR.

## **Abstract**

The wireless transmission of electric energy is a subject that has a wide application in science, so it is necessary to identify which of its various models are best suited according to a requirement, in this study we intend to compare different SCMR models and present their advantages and disadvantages. The comparison was made from a simulation in the COMSOL Multiphysics software, designing the different antennas with their respective resonance frequency values, then the implementation was carried out and the expected behaviors were corroborated. After performing various tests, the benefits of each proposed SCMR system were identified. It was possible to analyze that SCMR wireless transmission systems can be adapted to any application, only that it is necessary to identify which of its parameter variations is appropriate. The highest performance occurs when they resonate at the frequency where the components have their highest quality factor.

**Keywords:** Conformal, Conventional, Misalignment, SCMR

## **1. Introducción**

La tecnología de transmisión de energía inalámbrica (WTP, por sus siglas en inglés) ha tenido un gran desarrollo desde el año 2007, donde el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT, por sus siglas en inglés) propuso un modelo de transmisión basado en acople magnético (Witricity) del cual surgen diversas variaciones donde se destaca aquella en la que se hace uso de sistemas por Resonancia

Magnética Fuertemente Acoplada (SCMR, por sus siglas en inglés). Dichos sistemas tienen la característica de operar en rangos de media distancia (desde decenas de centímetros hasta unidades de metros) por medio de la aplicación de la teoría de campo cercano, con los cuales se obtiene una eficiencia de transmisión de energía razonable cercana al 40% a una distancia de 2m [1].

Los sistemas SCMR consisten en un sistema de cuatro inductancias, dos hacen de fuente y carga, y otras dos de resonadores, los cuales al entrar en resonancia refuerzan el campo magnético y a través de este realizan la transmisión de energía [1]. Al ser un modelo nuevo presenta varias desventajas en diversos aspectos, por lo que las investigaciones realizadas se han enfocado en mejorar dichas falencias, entre ellas se tiene el caso del efecto de la alineación de las antenas, solucionado con sistemas SCMR Misalignment [2], de igual forma el ancho de banda las cuales se han mejorado con sistemas SCMR Conformal [3] y otras más. Una de las grandes ventajas de los sistemas SCMR es que la eficiencia no se ve afectada por elementos que interfieran en la línea de vista de sus componentes, esto se debe a que el receptor solo percibe la energía que se encuentre a su frecuencia de resonancia, ya para que se presenten pérdidas significativas el objeto que interfiera deberá estar a una frecuencia muy cercana a la de resonancia de transmisión [4].

En este documento se realizará una comparación entre la implementación de algunos de estos sistemas con el objetivo de realizar un análisis de beneficios y desventajas de cada uno, y así dar una base de conocimiento en futuros trabajos a la hora de hacer la selección de un sistema SCMR.

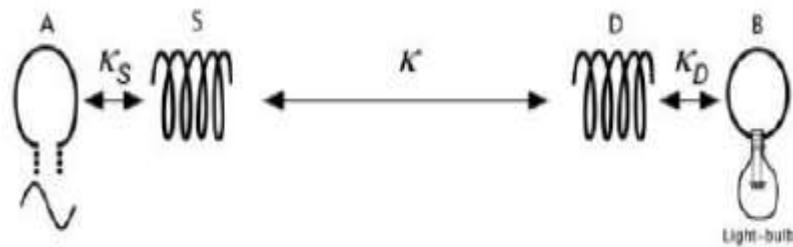
## **2. Análisis, simulación e implementación**

### **2.1. Análisis**

Como se ha mencionado, los sistemas de transmisión de energía inalámbrica SCMR presentan un amplio rango de aplicación, es por esto que nace la idea de realizar una comparación entre diversos modelos del sistema, lo cual permite realizar un estudio rápido y eficiente del sistema a utilizar. Los modelos que se

estudiaran es este artículo son los sistemas SCMR Convencional, Conformal y Misalignment, cada uno presenta características diferentes por lo que son óptimos en diversas aplicaciones.

Es viable realizar una breve descripción de los sistemas SCMR (Strongly Coupled Magnetic Resonance), ya que estos se destacan de los otros métodos de transmisión por su alcance de media distancia y la eficiencia obtenida. El modelo que se plantea consiste en cuatro elementos, el primero se conecta directamente a la fuente; el segundo se acopla a este inductivamente y opera a su frecuencia de resonancia; y lo mismo sucede con los dos elementos restantes al lado de la carga. El hecho de que el sistema opere a su frecuencia de resonancia hace que se genere un acople magnético fuerte haciendo viable la transmisión de energía sin correr el riesgo de generar arcos eléctricos ya que el componente eléctrico es nulo [1]. En la Figura 1 se muestra en resumen el modelo de los sistemas SCMR.

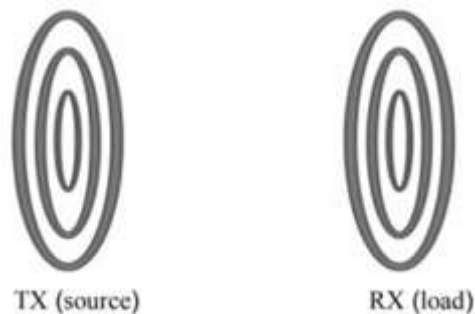


**Figura 1.** Modelo WTP planteado por el MIT [1].

El sistema anteriormente descrito será nombrado en este artículo como sistema SCMR Convencional y será la base de comparación de los demás sistemas ya que fue el primero en desarrollarse. Este sistema se caracteriza por tener un ancho de banda moderado y porque es muy vulnerable al desalineamiento de sus antenas. Serán estos dos parámetros los que se analizarán en este artículo, donde las soluciones estarán dadas por los sistemas SCMR Conformal y Misalignment respectivamente.

Un avance importante fue el derivado del sistema SCMR, pero con antenas tipo conformal (planas o de superficie), llamado CSCMR (Conformal Strongly Coupled Magnetic Resonance). Este método consiste en empotrar la fuente dentro del transmisor y la carga dentro del receptor, con el fin de reducir medidas y

así utilizarlo en aplicaciones como implantes médicos (Figura 2). Una de las principales características que diferencia a los sistemas CSCMR es su mayor ancho de banda, puesto que en el año 2014 se realizó una comparación de la respuesta en frecuencia de dichos sistemas donde se observó que al ubicar más de un resonador en las placas del sistema CSCMR, el ancho de banda aumentaba considerablemente, el único inconveniente es que la separación entre cada uno de los resonadores debe ser por lo menos dos veces el radio del resonador interno que le sigue, limitando la cantidad de resonadores que se pueden implementar por cuestiones de espacio necesario. El aumento en ancho de banda alcanzado fue de tres veces el ancho de banda SCMR con un conjunto de dos resonadores en el sistema CSMR [4].



**Figura 2.** Modelo de sistema SCMR Conformal (CSCMR) [5].

Otra de las principales limitantes de los sistemas WTP (Wireless Power Transfer) son las pérdidas generadas por no tener línea de vista entre los dispositivos Tx y Rx. Existen tres tipos de desalineamiento de los dispositivos: desalineamiento angular en elevación, desalineamiento angular en azimut y desalineamiento rotacional. Todos estos afectan la eficiencia de transmisión del sistema, por tal motivo un grupo de investigadores miembros del IEEE en el 2013 realizaron un estudio de la eficiencia de transmisión cuando el sistema se somete a unos de estos tres fenómenos. Para eliminar los efectos de estos desalineamientos plantean el uso de antenas en estructura de tres vueltas (3D-Lopps), con las que se disminuye considerablemente los efectos de dichos desalineamientos, obteniendo eficiencias de transmisión entre el 60% y 70% al ser sometidas a variaciones de hasta 90° en cada uno de los

desalineamientos. En la Figura 3 se presenta el modelo implementado con antenas 3D-Loops con el que se realizaron las pruebas mencionadas [3].



**Figura 3.** Implementación de sistema con antenas 3D-Loop [3].

## 2.2 Simulación

Para este estudio, la simulación hace parte fundamental del diseño, ya que a partir de esta se obtienen algunos de los parámetros necesarios para la optimización del sistema SCMR. Esta se utiliza para hallar el máximo factor de calidad del loop (Factor Q) y con esto el valor de la frecuencia de resonancia máxima (Fmax). Estos valores se obtienen desde un modelo inicial al cual se le irán haciendo modificaciones basado en los estudios ya realizados para dichas variaciones de parámetros hasta llegar a un resultado que se aproxime a lo esperado.

En los modelos planteados se utilizará el software de simulación COMSOL Multiphysics el cual permite obtener resultados aproximados a la realidad sin necesidad de conocer los valores reales de las antenas, lo que implica no tener que fabricar modelos reales de los que no se tiene ninguna certeza de su funcionamiento ni condiciones de transmisión. Asimismo, COMSOL brinda la posibilidad de simular ambientes semejantes a la realidad en términos del ambiente en el que se desarrolla la transmisión,

materiales de los componentes y antenas, además que permite simular fenómenos físicos relacionados con los campos eléctricos y magnéticos.

Los parámetros que se buscarán en el diseño de los diversos sistemas SCMR será que la frecuencia donde se presente el mayor factor de calidad  $Q$  se encuentre en las frecuencias más bajas posibles, esto con el propósito de hacer uso de los instrumentos disponibles en el laboratorio y que los efectos de conectores y conexiones no sean tan considerables. De esta manera, se procede a implementar las diferentes geometrías en el software COMSOL y de a poco se realizarán variaciones en sus dimensiones hasta obtener los parámetros deseados.

El sistema Convencional consta de cuatro loops de igual dimensión, luego de modificar las dimensiones planteadas inicialmente, se obtiene como resultado el presentado en la Tabla 1.

PARÁMETRO	VALOR
# Vueltas	3
Radio	0.05 m
Calibre de Alambre	8

**Tabla 1.** Dimensiones de Antenas, Sistema SCMR Convencional.

**Fuente:** elaboración propia.

Al igual que con el sistema Convencional, se realiza el mismo procedimiento para los sistemas Conformal y Misalignment, cuyos resultados se muestran en la Tablas 2 y Tabla 3.

	PARCHE INTERNO	PARCHE EXTERNO
Substrato	FR4	FR4
Radio Interno	0.05 m	0.11 m
Radio Externo	0.1 m	0.14 m

**Tabla 2.** Dimensiones de Antenas, Sistema SCMR Conformal.

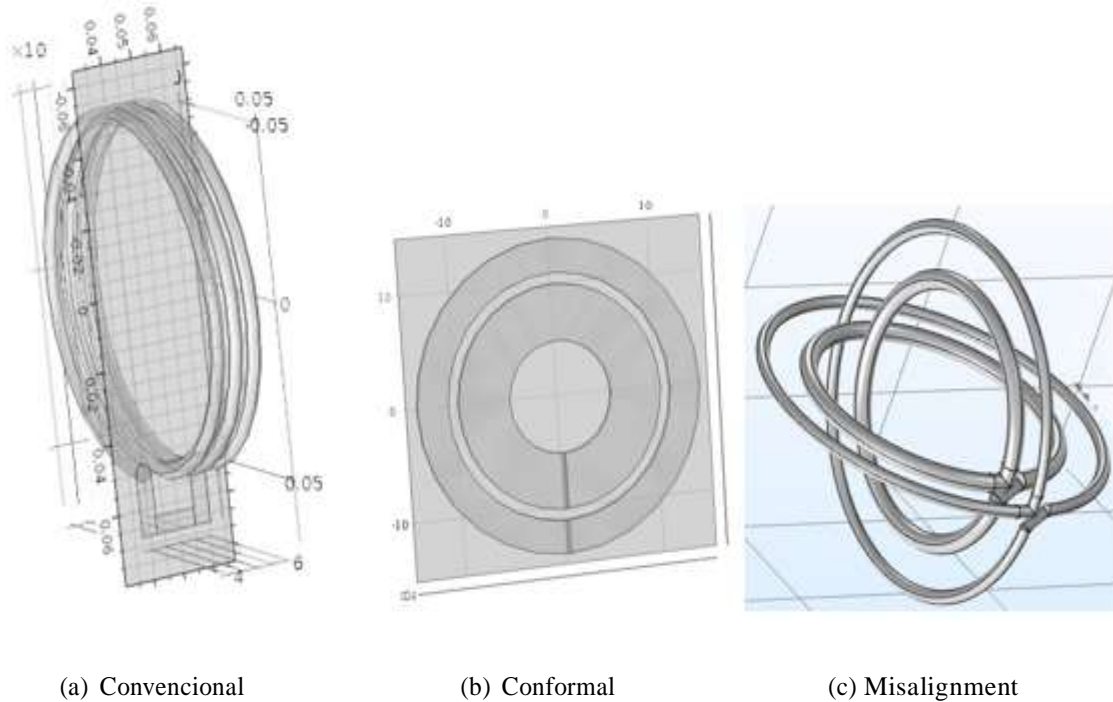
**Fuente:** elaboración propia.

PARÁMETRO	RESONADOR INTERNO	RESONADOR INTERNO
Radio interno	0.06 m	0.075 m
Radio externo	0.064 m	0.079 m
Calibre de Alambre	9	8

**Tabla 3.** Dimensiones de Antenas, Sistema SCMR Misalignment

**Fuente:** elaboración propia.

Con estas medidas se logra obtener valores de resonancia bajas y las dimensiones son construibles. De modo que se implementarán únicamente los sistemas Convencional y Misalignment. En la Figura 4 se muestran los modelos implementados en el software COMSOL.



**Figura 4.** Modelos implementados en el software de simulación

**Fuente:** elaboración propia (Software COMSOL).

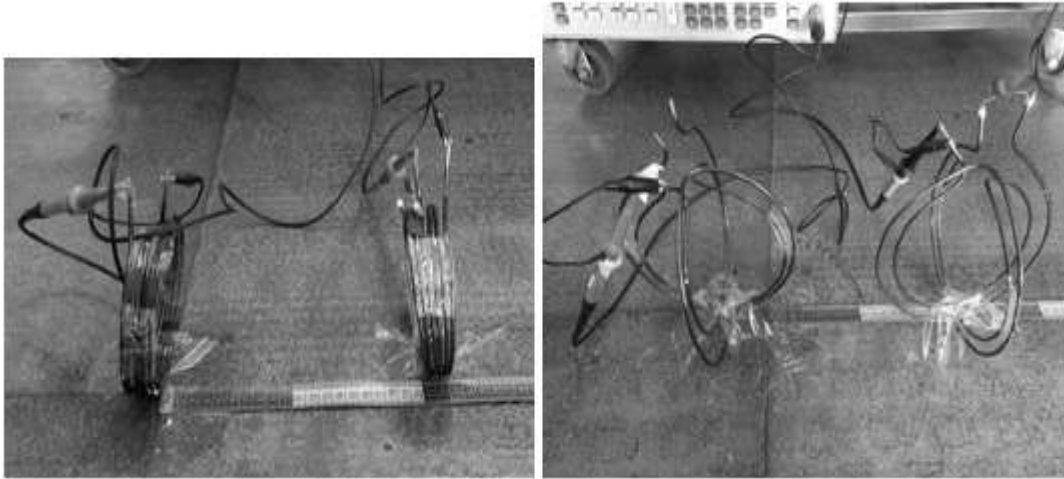
Las frecuencias de resonancia a las que se realizaran las diferentes pruebas para los sistemas SCMR Convencional, Conformal y Misalignment son 55MHz, 150MHz y 150MHz respectivamente.

### 2.3 Implementación

Se procede a realizar la construcción de los sistemas Convencional y Misalignment, implementándolos en cobre de calibre 8 y 9 ya que su radio es el más cercano al obtenido en la simulación, tal y como se observa en la Figura 5. Al ponerlos a prueba presentan resonancia a 55MHz y 250MHz respectivamente, la variación respecto a las frecuencias obtenidas en simulación se atribuye principalmente a la fabricación



de las antenas y la tolerancia de los materiales con que se implementaron, además en la simulación no se consideraron las líneas de conexión que fueron utilizadas.



**Figura 5.** Modelos SCMR convencional y Misalignment implementados.

**Fuente:** elaboración propia.

Como ya se presentaron las ventajas de cada sistema, las mediciones que se realizarán serán tales que permitan corroborar dichos comportamientos, por tanto se realizará un estudio en distancia de transmisión y otro acerca del efecto de la alineación de las antenas de cada sistema. Los sistemas se alimentarán con un generador RF HP 8656B y como instrumento de medida se utilizará el VNA ANRITSU MS2036A.

Las capturas de mediciones consistirán primero en la variación de la separación entre las antenas transmisora y receptora con pasos de 1cm mientras estas se encuentran alineadas. Lo anterior con el objetivo de analizar el efecto de la separación en cada uno de los sistemas. Luego se seleccionará una separación entre antenas que se mantendrá fija y se empezará a variar el ángulo en azimut de la antena receptora, dicha variación se realizará en el rango de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  con el fin de extrapolar y poder obtener un diagrama de radiación de cada uno de los sistemas puestos a prueba.

### **3. Resultados**

El primer parámetro para evaluar es la distancia entre el Tx y Rx, la Tabla 4 muestra el comportamiento en el sistema Convencional y la Tabla 5 el comportamiento en el sistema Misalignment. En la Figura 6 se presenta la respuesta de cada uno de los sistemas, donde se evidencia que ambos son fuertemente afectados por la separación entre sus antenas de transmisión y recepción. Es de resaltar la pendiente con la que decae el sistema Convencional, ya que esta es más pronunciada y, a diferencia del sistema Misalignment, sus componentes se encuentran estrictamente alineados por lo que la señal que recibe debe provenir de forma directa, mientras que en el Misalignment al tener el receptor apuntando a dos direcciones perpendiculares, percibe la parte de la señal radiada que se expande más allá de la línea de vista. No obstante, se puede apreciar como en el SCMR Convencional la transmisión en distancias muy cortas tiene menores pérdidas.

DISTANCIA [cm]	NIVEL DE SEÑAL [dBm]	DISTANCIA [cm]	NIVEL DE SEÑAL [dBm]
2	-27,44	17	-57,75
3	-29,21	18	-59,47
4	-31,15	19	-61,05
5	-33,23	20	-62,11
6	-36,37	21	-63,00
7	-38,01	22	-63,99
8	-40,01	23	-64,42
9	-42,76	24	-65,87
10	-44,60	25	-65,98
11	-46,67	26	-66,52
12	-48,50	27	-67,32
13	-51,44	28	-70,80
14	-52,96	29	-71,22
15	-55,00	30	-73,45
16	-56,31		

**Tabla 4.** Respuesta a variaciones de distancia del Sistema Convencional

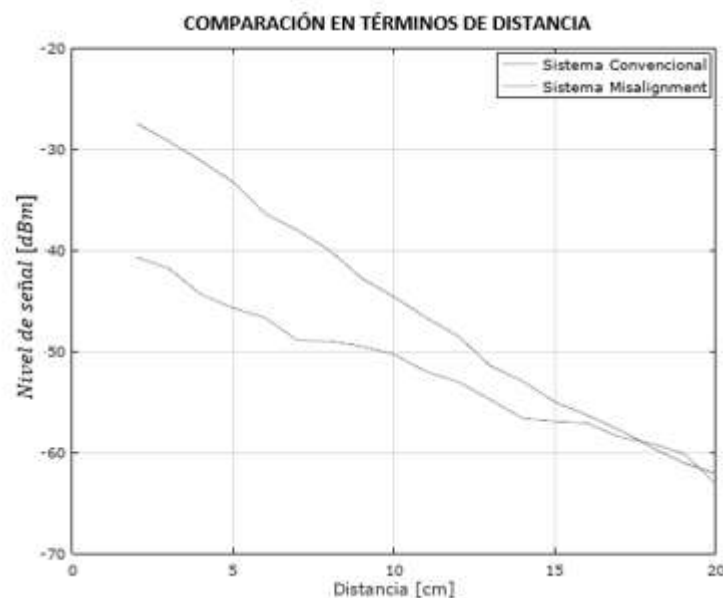
**Fuente:** elaboración propia.

DISTANCIA [cm]	NIVEL DE SEÑAL [dBm]	DISTANCIA [cm]	NIVEL DE SEÑAL [dBm]
2	-40,7	12	-53,01
3	-41,78	13	-54,79

4	-44,33	14	-56,62
5	-45,72	15	-56,93
6	-46,67	16	-57,11
7	-48,91	17	-58,45
8	-48,97	18	-59,12
9	-49,51	19	-60,10
10	-50,30	20	-63,10
11	-52,02		

**Tabla 5.** Respuesta a variaciones de distancia del Sistema Misalignment

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 6.** Comparación en distancia de sistemas SCMR Convencional y Misalignment

**Fuente:** elaboración propia.

El estudio del efecto del alineamiento de las antenas se realiza con base en la forma de los diagramas de radiación alimentadas de la Tabla 6 y Tabla 7, la cual se muestra en la Figura 7, donde es notable el cambio de los diagramas en cada modelo. En el sistema Convencional se tiene un diagrama de radiación directivo en el eje propagación, por lo que es un sistema apropiado para aplicaciones directivas donde las antenas no cambian de posición, ya que la potencia recibida es mayor para este sistema.

SEPARACIÓN 8cm		SEPARACIÓN 12 cm	
DESALINEAMIENTO	NIVEL DE	DESALINEAMIENTO	NIVEL DE

O [Grados]	SEÑAL [dBm]	O [Grados]	SEÑAL [dBm]
0	-41,5	0	-48,8
10	-42	10	-49,94
20	-42,32	20	-50,27
30	-43,32	30	-50,74
40	-45,4	40	-51,87
50	-45,7	50	-52,81
60	-45,7	60	-53,81
70	-45,94	70	-54,5
80	-47,55	80	-57,18
90	-59	90	-63,12

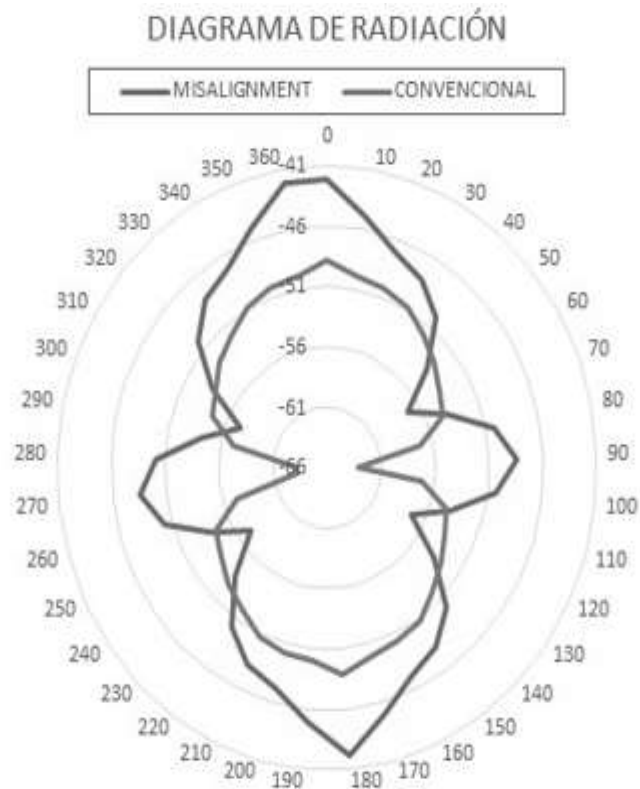
**Tabla 6.** Respuesta a variaciones en el alineamiento del Sistema Convencional

**Fuente:** elaboración propia.

SEPARACIÓ N 2cm		SEPARACIÓ N 6 cm	
DESALINEAMIENT O [Grados]	NIVEL DE SEÑAL [dBm]	DESALINEAMIENT O [Grados]	NIVEL DE SEÑAL [dBm]
0	-42,2	0	-46
10	-45	10	-47
20	-47,1	20	-50
30	-48,14	30	-52
40	-50,1	40	-57
50	-51,18	50	-55
60	-53,6	60	-54
70	-54,1	70	-51
80	-57,3	80	-50
90	-48,5	90	-46

**Tabla 7.** Respuesta a variaciones en el alineamiento del Sistema Misalignment

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 7.** Comparación en alineación de sistemas SCMR Convencional y Misalignment.

**Fuente:** elaboración propia.

El diagrama del sistema Misalignment permite identificar que es menos vulnerable a cambios en la alineación de las antenas, ya que presenta unos lóbulos laterales generados por el resonador que se encuentra perpendicular al eje de propagación, en este orden de ideas, se deduce que a medida que se ubiquen más resonadores apuntando en distintas direcciones perpendiculares se puede cubrir los valores mínimos en el diagrama de radiación y obtener un nuevo diagrama casi omnidireccional. Este hecho tiene algunas implicaciones en el tamaño de las antenas, debido que al estar la fuente inmersa dentro de la antena transmisora y del mismo modo la carga inmersa en la antena de recepción, al añadir un loop perpendicular el espacio interno y externo debe aumentar. Así, en cuestión de alineamiento, el sistema Misalignment es ideal para aplicaciones donde no se tiene certeza de la ubicación del receptor por ejemplo, en la carga de dispositivos móviles.

#### **4. Conclusiones**

Analizados los parámetros que se trabajan para obtener un mejor desempeño en los sistemas SCMR, como lo son: el tipo de acople y la cantidad de antenas con el fin ampliar la distancia de transmisión, la estructura de las antenas para mejorar el rango de propagación de esta y la ubicación de las antenas con el objetivo de aumentar el ancho de banda del sistema, se realizó una comparación entre los beneficios y desventajas que algunos de estos presentan. Con base en los estudios realizados se seleccionó un grupo de tres sistemas, los cuales presentan características importantes como lo son amplio ancho de banda (Sistema SCMR Conformal) y baja sensibilidad a cambios de alineación (Sistema SCMR Misalignment), para que junto con el sistema SCMR Convencional se sometan a un estudio y simulación, y con ellos realizar una comparación de sistemas que evidencien el comportamiento esperado de cada uno.

Se realizó el respectivo diseño y simulación de los sistemas con el software COMSOL Multiphysics, para lo cual se planteó que el único requerimiento fuera que cada sistema trabajará en la frecuencia donde sus componentes operan con su mayor factor de calidad Q para obtener una transmisión más eficiente. Así, se llevó a cabo la construcción de las antenas de cada sistema y se procedió a tomar las respectivas mediciones que permitieran identificar las características del sistema. En términos de distancia ambos sistemas presentan pérdidas considerables a medida que sus antenas se separan una de la otra, logrando obtener parte de la señal hasta 20cm en el sistema Misalignment y 30cm en el sistema Convencional.

Al efectuar el estudio del efecto de la alineación de las antenas en la transmisión de energía, se encontró que el sistema Misalignment presenta un mejor comportamiento que el sistema Convencional al someterse a pruebas, donde se infiere que a mayor cantidad de resonadores ubicados en ejes perpendiculares a la antena de alimentación, mayor será la cobertura en espacio de la radiación de la

señal. En cambio, el sistema Convencional al ser un sistema completamente directivo se ve altamente afectado en el nivel de señal recibida con cualquier cambio en la alineación de sus antenas.

Por último, el sistema SCMR Convencional es un sistema rústico de grandes dimensiones que debe tener línea de vista directa para que su transmisión sea eficiente, pero es un modelo fácil de implementar y el diseño de las estructuras de sus antenas ha sido ampliamente estudiado. Respecto al sistema SCMR Conformal, de acuerdo con las simulaciones, se puede deducir que es el modelo con más aplicaciones en la demanda cotidiana, ya que es un sistema compacto, eficiente y el cual con su amplio ancho de banda permite ser acoplado en muchas ramas de la ciencia. Por último y no más importante el sistema SCMR Misalignment muestra el mejor desempeño en términos de alineación, por lo que a diferencia de los otros dos modelos es una buena opción para aplicaciones en las que no se tiene certeza donde se encuentra en receptor.

### **Reconocimientos**

Este trabajo fue posible gracias al apoyo de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá, Colombia) a través del Proyecto Curricular de Ingeniería Electrónica y del grupo de Investigación LIFAE (Laboratorio de Investigación de Fuentes Alternativas de Energía).

### **Referencias**

- [1] A. Kurs. et al, “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, julio 2007. <https://doi.org/10.1126/science.1143254>
- [2] O. Jonah, et al, “Orientation insensitive power transfer by magnetic resonance for mobile devices,” IEEE Conference Wireless Power Transfer (WPT), 2013. IEEE ExploreDigital Library. Julio 2013. <https://doi.org/10.1109/wpt.2013.6556868>

- [3] H. Hu and S. V. Georgakopoulos, "Design of optimal and broadband conformal scmr systems," in *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 2014 IEEE, pp. 1345–1346, IEEE, 2014. <https://doi.org/10.1109/aps.2014.6904998>
- [4] A. S. M. Sayem and H. Afrin, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonance," *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM)*, Vol. 2, Issue-1, Enero 2015.
- [5] H. Hu and S. V. Georgakopoulos, "Analysis and design of broadband wireless power transmission system via conformal strongly coupled magnetic resonance," in *Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), 2014 IEEE 15th Annual*, pp. 1–4, IEEE, 2014. <https://doi.org/10.1109/wamicon.2014.6857760>