

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS ELECTRÓNICOS**

**TEMA:
DISEÑO DE UN ARREGLO DE ANTENAS MICROSTRIP PARA BANDA DE ONDA
MILIMÉTRICA**

**AUTORES:
XAVIER HERNÁN PAUCAR TIPÁN
MÓNICA ALEXANDRA QUISPE SÁNCHEZ**

**TUTOR:
LENIN WLADIMIR AUCATOMA GUAMÁN**

Quito, septiembre del 2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Xavier Hernán Paucar Tipán y Mónica Alexandra Quispe Sánchez, con documentos de identificación N° 1722077953 y N° 1724393671 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: “DISEÑO DE UN ARREGLO DE ANTENAS MICROSTRIP PARA BANDA DE ONDA MILIMÉTRICA”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Xavier Hernán Paucar Tipán
CI: 1722077953

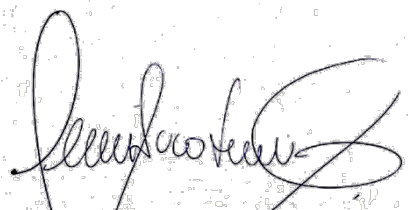
Mónica Alexandra Quispe Sánchez
CI: 1724393671

Quito, septiembre del 2020

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el artículo académico, “DISEÑO DE UN ARREGLO DE ANTENAS MICROSTRIP PARA BANDA DE ONDA MILIMÉTRICA” realizado por Xavier Hernán Paucar Tipán y Mónica Alexandra Quispe Sánchez, obteniendo un producto que cumple con todos los estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, septiembre de 2020



Lenin Wladimir Aucatoma Guamán

CI: 171798583-0

DISEÑO DE UN ARREGLO DE ANTENAS MICROSTRIP PARA BANDA DE ONDA MILIMÉTRICA

Aucatoma Guamán Lenin
Wladimir
Ingeniería Electrónica
Docente Universidad Politécnica
Salesiana
Quito, Ecuador
laucatoma@ups.edu.ec

Paucar Tipán Xavier
Hernán
Ingeniería Electrónica
Universidad Politécnica
Salesiana
Quito, Ecuador
xpaucart@est.ups.edu.ec

Quispe Sánchez Mónica
Alexandra
Ingeniería Electrónica
Universidad Politécnica
Salesiana
Quito, Ecuador
mquispes@est.ups.edu.ec

Resumen— En este artículo, se detalla el funcionamiento y la disposición geométrica de un arreglo de antenas microstrip de parche rectangular, diseñado para operar en la banda de onda milimétrica, a una frecuencia de 60 GHz. El análisis de resultados, obtenidos a partir de varias simulaciones realizadas en el software ANSYS HFSS, permitió seleccionar cinco tipos de arreglos que cumplen con los objetivos de esta investigación, de los cuales se destaca el diseño con los mejores resultados de coeficiente de reflexión S_{11} igual a -24.17 dB, un VSWR de 1.07 dB y un patrón de radiación semidirectivo con una ganancia máxima de 9 dB, con una frecuencia de operación de 60.04 GHz, con lo cual se realizó un análisis comparativo entre cada diseño y los resultados ya mencionados.

Palabras Clave: Arreglo de antenas, Coeficiente de reflexión, Microstrip, Onda milimétrica, Patrón de radiación.

Abstract— This article details the operation and geometric arrangement of a rectangular patch microstrip antenna array, designed to operate in the millimeter wave band, at a frequency of 60 GHz. The analysis of results, obtained from various simulations carried out in the ANSYS HFSS software, allowed the selection of five types of arrangements that meet the objectives of the investigation, of which the design with the best results of reflection coefficient of S_{11} equal to -24.17 dB, a VSWR of 1.07 dB stands out. and a semi-directive radiation pattern with a maximum gain of 9 dB, with an operating frequency of 60.04 GHz, with

which a comparative analysis was carried out between each design and the aforementioned results.

Keywords: Antenna arrangement, Reflection coefficient, Microstrip, Millimeter wave, Radiation pattern.

1. INTRODUCCIÓN

Debido al constante aumento del número de dispositivos conectados a las redes existentes (2G, 3G y 4G), el volumen de tráfico de datos consumidos crece de manera exponencial, para cubrir esta demanda tecnológica, las comunicaciones inalámbricas deben basar su funcionamiento en el uso de redes de nueva generación (5G) [1]. El espectro de frecuencias que abarca esta tecnología es un recurso limitado, el cual no es aprovechado totalmente, un ejemplo de esto, son las pocas aplicaciones existentes en la banda de onda milimétrica (mmW), cuyo rango comprende de 30 GHz a 300 GHz [1][2].

La UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), define un rango de operación de 60 a 61 GHz también conocida como banda de 60 GHz para fines de uso investigativo y aplicaciones para comunicaciones inalámbricas no licenciadas. [3] En el caso de pérdidas atmosféricas, para aplicaciones que utilizan la banda 60 GHz, se toman en consideración, las pérdidas por moléculas de oxígeno, vapor de agua y otros gases característicos, presentes en la atmósfera terrestre. [4] Con lo cual, las aplicaciones de comunicaciones inalámbricas, en este rango de frecuencias, presentan mejores resultados, para enlaces punto a punto y punto a multipunto dentro de lugares

pequeños o en regiones geográficas con áreas reducidas. [5]

Las antenas microstrip, pueden ser utilizadas en el rango de frecuencias antes mencionado, pero debido a que las dimensiones de las antenas dependen de la longitud de onda de la frecuencia utilizada, dichas longitudes son muy reducidas llegando al orden de los milímetros (mm), lo cual produce la miniaturización de los elementos que componen la antena [6]. Este tipo de antenas presentan gran variedad de formas para su diseño y posterior implementación, como es el caso de los parches cuadrados, triangulares, circulares y rectangulares los cuales actúan como un elemento radiante, cuya estructura se complementa con un sustrato dieléctrico y un plano de masa que actúa como tierra [7][8].

El uso de antenas microstrip, en aplicaciones 5G, generan desventajas como es el caso de una baja potencia de radiación y bajos niveles de ganancia, con el fin de mejorar esto, surge los arreglos de antenas microstrip [9], cuyo objetivo principal es ajustar la potencia de la señal en la dirección requerida y de esta forma mejorar las pérdidas por propagación.

Un arreglo de antenas está formado por varios elementos radiantes de iguales o distintas dimensiones, ordenados de forma regular, que conjuntamente, funcionan como una sola antena con particularidades propias [10]. La característica principal de los arreglos de antenas es que se puede modificar el patrón de radiación de acuerdo a la aplicación y necesidad para la que se esté diseñando [11].

Entre las ventajas principales que presentan los arreglos de antenas son el aumento de la ganancia, el perfeccionamiento del patrón de radiación y alta directividad, del mismo modo se pueden especificar sus principales inconvenientes que son la complejidad de la red de alimentación y las limitaciones de ancho de banda [11] [12].

Para el diseño de un arreglo o array de antenas, es importante tomar en cuenta varios aspectos, como el tipo de arreglo que se va a utilizar, para la distribución de cada uno de los elementos individuales, entre los cuales se pueden tomar en cuenta el array lineal, en el cual se puede definir como un array conformado por un número N de antenas individuales, todas separadas por una distancia distinta, es decir que todas las antenas

estarán a lo largo de un único eje. El segundo tipo de array que se puede mencionar es el bidimensional, el cual es un array conformado de $M \times N$ antenas individuales colocadas en un mismo plano separadas por diferentes distancias. Una vez definido el tipo de arreglo que se va a utilizar se debe definir el tipo de alimentación que tendrá el mismo, ya que puede ser de dos tipos: una alimentación en serie en la cual cada antena está conectada una con otra de forma contigua a través de varias de líneas de transmisión, o una alimentación en paralelo, en la cual cada una de las antenas del arreglo tiene una línea de alimentación individual [10].

2. DISEÑO

Cada diseño propuesto, consta de los siguientes elementos principales: parches, líneas de transmisión, sustrato dieléctrico y un plano de tierra, cuyas dimensiones fueron diseñadas para operar a una frecuencia de 60 GHz y con una impedancia de entrada de 50Ω . Los diseños 1 y 2 tienen una configuración en serie, mientras que los diseños 3 y 4 tienen una configuración en paralelo y en el caso del diseño 5, es una combinación de los dos tipos de configuraciones ya mencionadas. Debido a la disposición geométrica de un arreglo en paralelo, es necesario agregar dos nuevos elementos, una adaptación T la cual es la división en dos ramas distintas de una línea de transmisión y una adaptación de una longitud de cuarto de onda, la cual debido a sus dimensiones, actúa como un adaptador de impedancias diseñado para garantizar la máxima transferencia de potencia y un acople perfecto entre la adaptación T y una nueva línea de transmisión, para la alimentación de uno o más parches que operen a una determinada frecuencia [13]. En la figura 1, se muestran todos los elementos que conforman los arreglos tanto en serie como en paralelo.

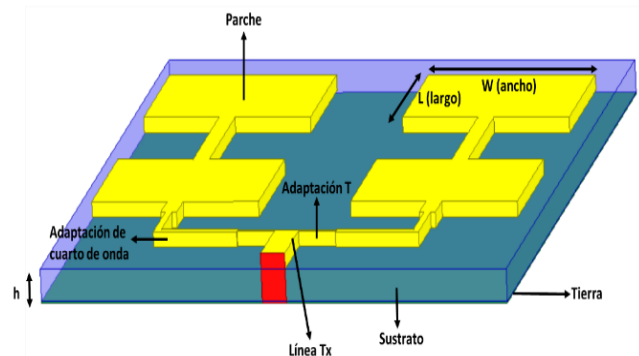


Figura 1. Estructura del arreglo de antenas microstrip tipo patch con línea de transmisión

La optimización, de las dimensiones de los elementos de cada arreglo, se lograron mediante varias simulaciones realizadas en el software ANSYS HFSS, de esta manera para todos los diseños, se establece la altura de los parches y cada elemento del arreglo en 0.1 mm, la altura del sustrato dieléctrico en 0.21 mm y la altura del plano de tierra en 0.01 mm. Cabe mencionar que aquellos diseños con una configuración en paralelo, presentan una simetría, en las dimensiones de los elementos que conforman este tipo de arreglos, por el contrario dicha simetría es inexistente en los arreglos en serie. El material para el sustrato dieléctrico corresponde al dieléctrico FR4_epoxy, cuya permitividad relativa es $\epsilon_r = 4.4$ y su desempeño en aplicaciones de altas frecuencias mantiene una estabilidad constante del coeficiente de reflexión reduciendo las pérdidas de ganancia [14] [15].

La comparación simultánea de los parámetros de S (1,1), VSWR, ganancia y forma de patrón de radiación, de cada diseño, estableció que los resultados del diseño 5, son los que más se acercan a los objetivos de desempeño de la investigación. La tabla 1 muestra las medidas de cada elemento del diseño 5, en donde todos los parches tienen las mismas dimensiones. En la figura 1 se muestra una vista 3D, de dicho diseño.

Tabla 1. Medidas de los elementos del diseño 5

Diseño 5			
Arreglo 2x2			
Elementos	Ancho (mm)	Largo (mm)	Material
Línea Tx (1)	0.22	0.57	Hierro
Línea Tx (2)	0.146	0.27	
Línea Tx (3)	0.146	1.08	
Adaptación T	0.9	0.02	
Adaptación de $\lambda/4$	1.25	0.06	
Parches	1.52	1.07	
Sustrato Dieléctrico	4.25	5.29	FR4_EPOXY
Plano de Tierra	4.25	5.29	Cobre

En la tabla 2 se detalla, la permitividad relativa (ϵ_r), de cada uno de los materiales utilizados, para cada diseño propuesto.

Tabla 2. Permitividad Relativa

Permitividad Relativa de los materiales	
Material	Permitividad (ϵ_r)
Hierro	1
FR4_EPOXY	4.4
Cobre	1

3. SIMULACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las simulaciones del funcionamiento de cada diseño, fueron realizadas a una frecuencia de 60 GHz, numerosos intentos, permitieron optimizar las medidas de los elementos de cada uno de ellos, y así, obtener los cinco mejores resultados, dentro de un rango específico, para cada uno de los siguientes parámetros: valores de coeficiente de reflexión (S11) menores a -20 dB, una relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR), comprendida entre 1 dB a 1.5 dB y un patrón de radiación con valores por encima de -3 dB.

Para un análisis de resultados, tanto a nivel de simulación y una posible implementación práctica de los diseños, se utiliza como medio de dispersión, el aire cuya permitividad relativa es de $\epsilon_r = 1$, además, se establece una ventana de análisis, de 30 GHz hasta 90 GHz, para observar, la variación de cada parámetro, a partir del límite inferior de frecuencia que comprende la banda de onda milimétrica (30 GHz), así como la posibilidad de identificar posibles armónicos de operación, en un rango simétrico de frecuencias.

En la tabla 3 se detallan las dimensiones de los elementos de aquellos diseños que tienen una configuración en serie, de la misma manera, en la tabla 4 se detallan las medidas y la cantidad de elementos en los diseños configurados en paralelo. Cada diseño mostrado, presentaron los mejores resultados, dentro de los objetivos de estudio

Tabla 3. Medidas de los elementos de diseños en serie

Diseño 1			
Arreglo 2x1			
Elemento	Ancho (mm)	Largo (mm)	Material
Línea Tx 1	0.146	0.27	Hierro
Línea Tx 2	0.146	1.165	
Parche 1	1.52	1.07	
Parche 2	1.52	1.15	
Sustrato Dieléctrico	2.1	4.255	FR4_epoxy
Plano de Tierra	2.1	4.255	Cobre
Diseño 2			
Arreglo 4x1			
Elemento	Ancho (mm)	Largo (mm)	Material
Línea Tx 1	0.146	0.27	Hierro
Línea Tx 2	0.1	1.15	

Línea Tx 3	0.1	1.25	
Línea Tx 4	0.1	1.05	
Parche 1	1.52	1.07	
Parche 2	1.52	1.17	
Parche 3	1.465	1.115	
Parche 4	1.72	1.27	
Sustrato Dieléctrico	2.88	8.605	FR4_epoxy
Plano de Tierra	2.88	8.605	Cobre

Adaptación de $\lambda/4$	1.25	0.06	2	
Parches	1.52	1.07	4	
Sustrato Dieléctrico	4.25	5.29	1	FR4_epoxy
Plano de Tierra	4.25	5.29	1	Cobre

3.1 Coeficiente de Reflexión (S1,1)

Para el desarrollo de cada tipo de arreglo, se estableció un valor inicial de S (1,1) de -20 dB, correspondiente a una relación de potencia reflejada y potencia transmitida (P_R/P_T), equivalente a 1/100, el cual se considera como un valor aceptable para el funcionamiento de un arreglo de antenas [12]. Además, se fija como objetivo llegar a una frecuencia de operación de 60 GHz para cada diseño. De esta manera se logró descartar, varios diseños, que a pesar cumplir con la frecuencia de operación deseada, sus valores de S (1,1), estaban por encima del valor inicial establecido.

En la figura 2, se muestran las gráficas de S (1,1), de cada uno de los diseños propuestos:

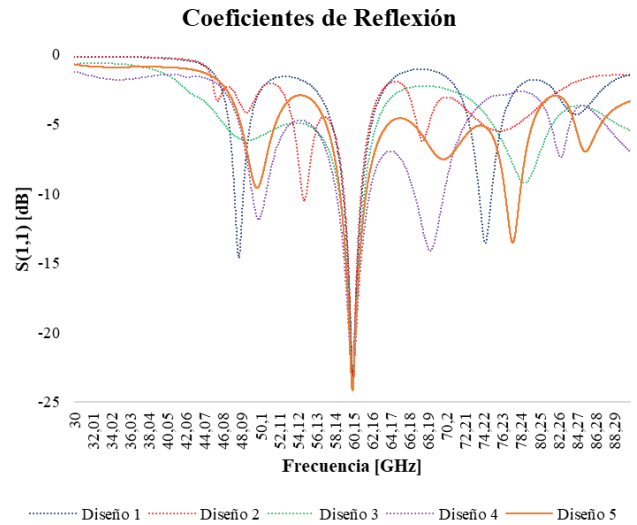


Figura 2. Coeficientes de reflexión de cada diseño propuesto

En la tabla 5, se muestran los valores de S (1,1), de cada uno de los diseños, los cuales se encuentran por debajo del límite de -20 dB, destacando así, los resultados del diseño 5, que presenta los valores más pequeños de coeficiente de reflexión y desfase de frecuencia.

Tabla 4. Medidas y cantidad de elementos de diseños en paralelo

Diseño 3 Arreglo 1x2				
Elemento	Ancho (mm)	Largo (mm)	Cantidad	Material
Línea Tx	0.22	0.57	1	Hierro
Línea Tx	0.146	0.27	2	
Parches	1.52	1.07	2	
Adaptación T	2.67	0.02	1	
Adaptación de $\lambda/4$	1.25	0.06	2	
Sustrato Dieléctrico	6.12	3.05	1	FR4_epoxy
Plano de Tierra	6.12	3.05	1	Cobre
Diseño 4 Arreglo 1x4				
Elementos	Ancho (mm)	Largo (mm)	Cantidad	Material
Línea Tx	0.22	0.57	3	Hierro
Línea Tx	0.146	0.27	4	
Adaptación T	2.14	0.02	1	
Adaptación T	0.8	0.02	2	
Adaptación de $\lambda/4$	1.25	0.06	6	
Parches	1.52	1.07	4	
Sustrato Dieléctrico	8.86	3.75	1	FR4_epoxy
Plano de Tierra	8.86	3.75	1	Cobre
Diseño 5 Arreglo 2x2				
Elementos	Ancho (mm)	Largo (mm)	Cantidad	Material
Línea Tx	0.22	0.57	1	Hierro
Línea Tx	0.146	0.27	2	
Línea Tx	0.146	1.08	2	
Adaptación T	0.9	0.02	1	

Tabla 5. Valores del coeficiente de reflexión y desfase de frecuencia de cada uno de los diseños propuestos

	Frecuencia [GHz]	Desfase de Frecuencia [GHz]	S (1,1) [dB]
Diseño 1	60.06	0.06	-24.15
Diseño 2	60.06	0.06	-23.39
Diseño 3	60.08	0.08	-23.76
Diseño 4	60.05	0.05	-23.13
Diseño 5	60.04	0.04	-24.17

En la figura 3, se muestra la gráfica de coeficiente de reflexión del diseño 5, correspondiente a un valor de -24.17 dB

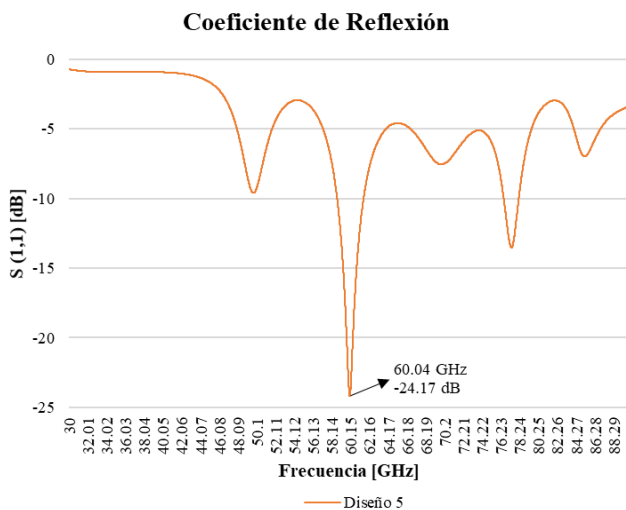


Figura 3. Coeficientes de reflexión del diseño 5

Los valores de coeficiente de reflexión a frecuencias cercanas a los 60 GHz de los cuatro primeros diseños, mostrados en la tabla 4 aumentan (empeoran), conforme el número de parches se incrementa. Esto se debe a que cada parche en cada tipo de diseño, está reflejando una parte de la potencia que recibe de su línea de transmisión a frecuencias distintas de 60 GHz, tal y como se muestra en la figura 2. Estos nuevos valores de coeficientes de reflexión a pesar de estar por encima del límite de -20 dB, equivalen a una disminución de la potencia y la intensidad de campo eléctrico que recibe cada parche, al momento de operar a una frecuencia de 60 GHz. En el caso de los diseños en serie (diseños 1 y 2), esta disminución es progresiva, ya que cada línea de transmisión y cada parche están conectados uno a continuación de otro. Para los diseños en paralelo (diseños 3 y 4) debido a su geometría, esta disminución, es igual a una división equitativa tanto en

potencia como intensidad de campo eléctrico para cada parche [16].

El diseño 5, al ser una combinación de arreglos en serie y paralelo, presenta el mejor valor de coeficiente de reflexión, que es de -24.17 dB, logrando, además, el menor desfase respecto a la frecuencia de operación, a pesar de tener 4 parches, ya que al ser un arreglo simétrico de 2x2, aprovecha la división equitativa de potencia y campo eléctrico para cada parche conectado en paralelo, evitando en gran medida la disminución progresiva de estas magnitudes al combinarla con una conexión en serie [17]. A pesar de seguir la misma lógica de diseño, un arreglo de 3x3, no generó mejores resultados de coeficiente reflexión, a los ya expuestos, ya que la división de potencia e intensidad de campo eléctrica, es igual a un tercio, para cada parche, añadiendo además una reducción de dichas magnitudes por conexión en serie, lo cual generó un valor de S (1,1) por encima de -20 dB a pesar de tener una frecuencia de trabajo, cercana a 60 GHz.

Debido a la acumulación de líneas de campo eléctrico en el sustrato, como resultado de trabajar a altas frecuencias (60 GHz), el hacer uso de FR4_epoxy ($\epsilon_r = 4.4$) como material dieléctrico, cuya estructura se basa en fibra de vidrio entretejida con resina epoxica, la misma facilita el flujo y la velocidad de propagación de campo eléctrico, logrando un efecto de borde similar en cada parche que compone cada arreglo, independientemente de su configuración (serie o paralelo), reduciendo al mínimo el desfase de frecuencia de cada arreglo, tal y como se muestra en la tabla 4 [15].

3.2 Relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR)

Como meta de estudio, se establece un rango de valores entre 1 dB a 2 dB de VSWR, para cada uno de los arreglos. Un valor igual a 1 dB significa un acople perfecto entre la línea de transmisión y todos los elementos que conforman el arreglo, un valor de 2 dB al encontrarse en el límite del rango de estudio puede ser considerado como un acople adecuado de los elementos del arreglo, pero en el caso de sistemas de transmisión modernos, se establece como límite un valor de 1.5 dB para VSWR. [12] A continuación en la figura 4 se muestra las gráficas de VSWR obtenidas de cada uno de los diseños:

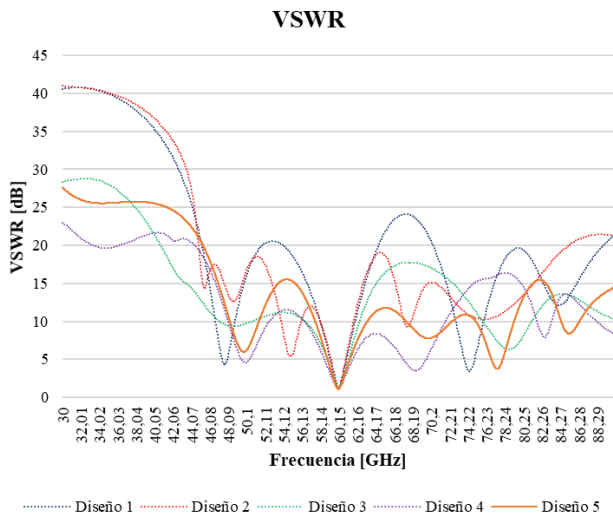


Figura 4. VSWR de cada diseño propuesto

En la tabla 6, se detallan los valores de VSWR, de cada diseño propuesto, como se puede apreciar, cada valor se encuentra por debajo del límite de 1.5 dB establecido como meta de estudio, de los cuales el diseño 5, presenta el valor más cercano de VSWR para un acople perfecto.

Tabla 6. Valores de VSWR de cada diseño

	Frecuencia [GHz]	VSWR [dB]
Diseño 1	60.06	1.09
Diseño 2	60.06	1.17
Diseño 3	60.08	1.12
Diseño 4	60.05	1.21
Diseño 5	60.04	1.07

En la figura 5, se muestra la gráfica de VSWR del diseño 5, correspondiente a un valor de 1.07 dB

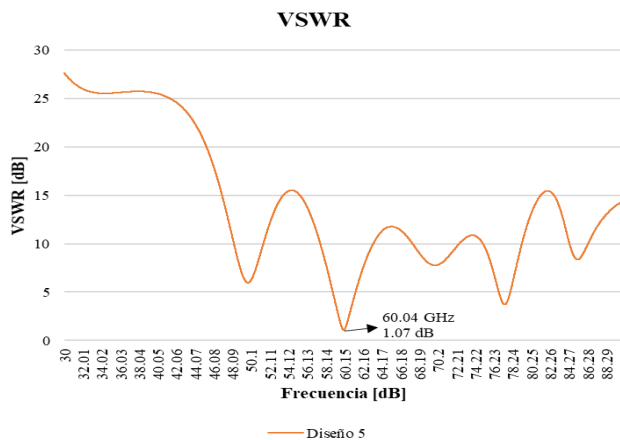


Figura 5. VSWR del diseño 5

Conforme aumentan el número de líneas de transmisión con su respectiva carga (parche), se genera una discontinuidad de impedancias, en la red de alimentación de un arreglo. Dicha discontinuidad, reduce la intensidad de flujo de campo eléctrico en los bordes de cada parche, aumentando el valor de VSRW, tal y como se muestra en la tabla 5. En el caso de los diseños en serie, para minimizar los efectos de esta discontinuidad, es necesario variar las dimensiones de los parches y aumentar su distancia de separación, con lo cual, el efecto de borde en los parches se compensa a pesar de recibir una menor cantidad de flujo eléctrico. Estas variaciones, producen que el arreglo tenga un diseño asimétrico, en donde la transmisión de flujo eléctrico es diferente para cada sección del arreglo, generando una cantidad de energía irradiada irregular, desde la matriz del arreglo hacia el medio dispersivo (aire) [18]. Para aquellos diseños en paralelo, el uso de dos tipos de adaptaciones (adaptación T y de longitud de cuarto de onda), con un ancho menor a la línea de transmisión principal, reduce las pérdidas del flujo de campo eléctrico hacia los parches, permitiendo que los mismos, tengan iguales dimensiones, convirtiendo a estos arreglos en diseños simétricos.

El diseño 5 presenta el mejor valor de acople de la línea de trasmisión con sus respectivas cargas (1.07 dB), debido a que se hace uso de un sistema simétrico horizontal y vertical en una matriz de 2x2, lo cual aumenta la intensidad de campo eléctrico, en los bordes de cada parche y reduce significativamente el valor de VSWR aumentando la estabilidad de la curva a frecuencias cercanas a los 60 GHz [18] [19].

3.3 Patrón de Radiación

El patrón de radiación se define como una representación gráfica de las variables de radiación de una antena. Y permite establecer la máxima ganancia de la antena, cuyo propósito principal de los arreglos diseñados es aumentar la ganancia y la eficiencia del sistema conforme se agregan parches al arreglo, entregando resultados óptimos con respecto a antenas compuestas por un solo elemento.

Como se observa en la figura 6, se verifica los patrones de radiación obtenidos de los cinco diseños propuestos con un corte de $\phi = 90^\circ$, y se verifica que el diseño 1 (arreglo 2x1 en serie) y diseño 2 (arreglo 4x1 en serie) generan un patrón de radiación similar, con ganancias de 6.4995 dB y 8.9681 dB respectivamente, estos arreglos cuentan con anchos de

haz amplios de 88° y 84° , es decir, no son directivos, son omnidireccionales. Mientras que en el diseño 3 (arreglo 1x2 en paralelo) se identifica un lóbulo principal con una ganancia máxima de 7.1603 dB, dos lóbulos laterales fuertes, cuatro nulos y un lóbulo posterior considerable, con un ancho de haz reducido de 36° , debido a la forma que presenta no se considera directivo. Por otro lado, el diseño 4 (arreglo 1x4 en paralelo) produce un patrón de radiación donde se identifica claramente el lóbulo principal con una ganancia de 9.5088 dB, dos lóbulos secundarios mínimos y un lóbulo posterior grande, cuatro entradas de nulos: dos fuertes y dos nulos reducidos y posee una apertura angular de 32° , es decir es directivo. Sin embargo, el diseño 5 (arreglo 2x2 en serie-paralelo) genera un patrón de radiación con una ganancia máxima de 9.0037 dB en su lóbulo principal, adicional a ello se produce un lóbulo posterior muy reducido, carece de lóbulos laterales, tiene dos nulos mínimos y presenta un ancho de haz de 56° , considerado como semidirectivo.

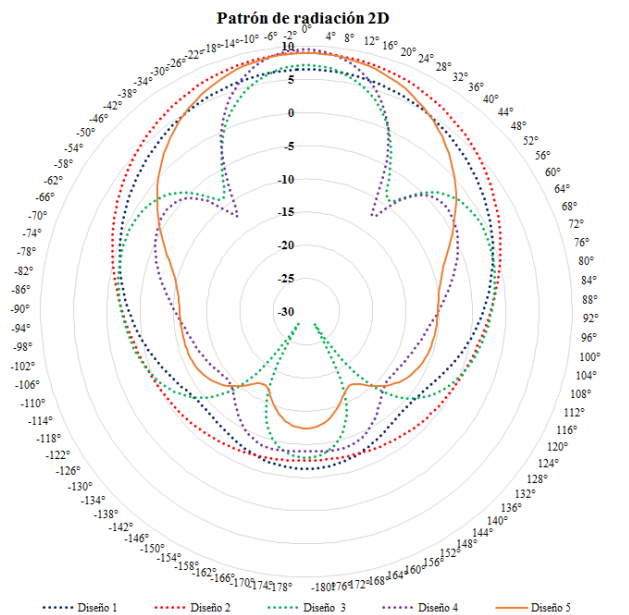


Figura. 6. Patrón de radiación 2D de cada diseño propuesto con un corte $\phi = 90$

En base a los resultados expuestos, se determina que el mejor diseño propuesto en cuanto al patrón de radiación es el diseño 5 correspondiente al arreglo 2x2 con una configuración serie-paralelo tal como se puede apreciar en la figura 6 y que se representa con el color anaranjado, mismo que produce una ganancia máxima de 9.0037 dB en su lóbulo principal, y carece de lóbulos

laterales, con un lóbulo posterior mínimo en relación a los demás diseños propuestos, y adicional en este diseño se implementa adaptaciones en T y de $\lambda/4$ los cuales permiten un acople de impedancias entre la línea de alimentación y la antena, garantizando la mínima cantidad de ondas reflejadas y la máxima transferencia de potencia lo que significa que se aprovecha de mejor manera la energía radiada [20].

Sin embargo, se debe tener en cuenta la disposición de cada elemento que constituyen el arreglo, en el diseño 4 el cual tiene una configuración paralela (arreglo 4x1) presenta mayor ganancia con un valor de 9.5088 dB en su lóbulo principal, pero su patrón de radiación no es óptimo ya que muestra lóbulos laterales fuertes, varios nulos y un lóbulo posterior considerable. Al compararse con el arreglo del diseño 5, mismo que está constituido por 4 antenas, pero con una configuración serie-paralelo indica una ganancia menor al diseño 4 con un valor de 9.0037 dB en su lóbulo principal, pero su patrón de radiación no presenta lóbulos laterales, y el lóbulo posterior es mínimo, los cuales no reducen el desempeño de la antena en comparación con los demás diseños. En figura 7 se observa el patrón de radiación con mejor resultado al realizar un corte vertical ($\phi = 90$).

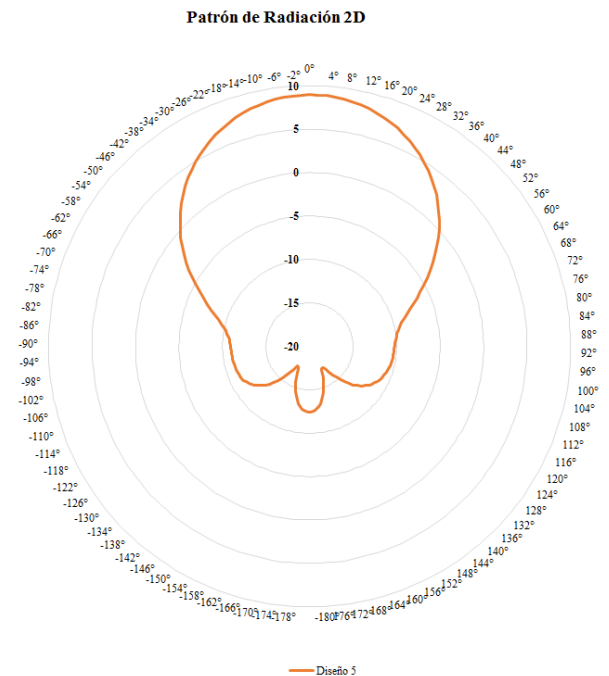


Figura. 7. Patrón de radiación 2D del diseño 5 con un corte $\phi = 90$

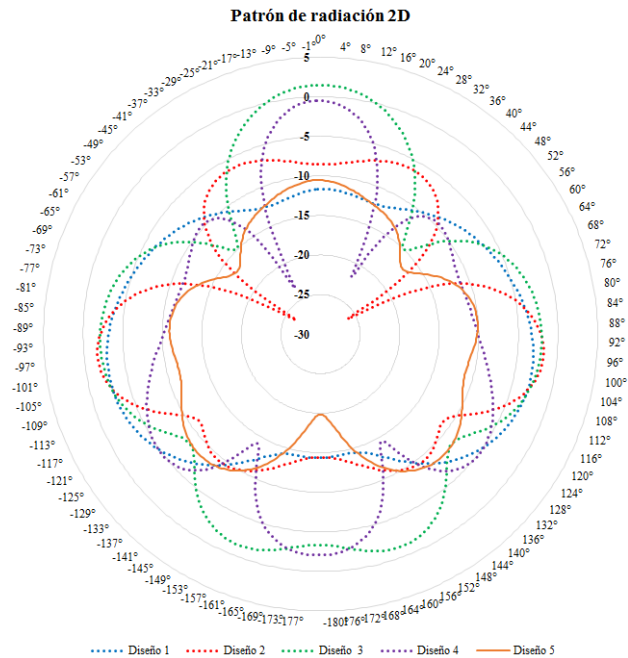


Figura 8. Patrón de radiación 2D de cada diseño propuesto con un corte horizontal

En figura 9 se observa el patrón de radiación con mejor resultado al realizar un corte horizontal

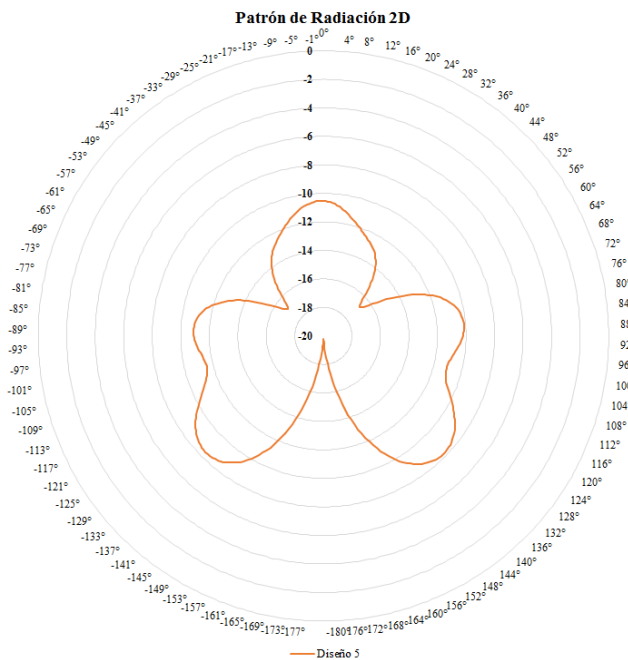


Figura 9. Patrón de radiación 2D del diseño 5 con un corte horizontal

En la tabla 7 se muestran todos los valores de ganancia máxima obtenidos de cada uno de los arreglos:

Tabla 7. Ganancias máximas obtenidas del patrón de radiación de cada uno de los arreglos

Diseños Propuestos	Ganancia Máxima 2D [dB]
Diseño 1	6.4995
Diseño 2	8.9681
Diseño 3	7.1603
Diseño 4	9.5088
Diseño 5	9.0037

En la tecnología microstrip las ganancias que se pueden obtener en antenas conformadas por un solo elemento son aproximadamente de 6 dB [17], lo que se busca en un diseño de matrices de elementos radiantes es ampliar este valor. Con los arreglos simulados se logró obtener ganancias mayores a 6 dB, como se indica en la tabla 7. Al comparar las formas de los diagramas de radiación y las ganancias de todos los arreglos propuestos, es destacable el diseño 5 (matriz 2x2), ya que presenta una de las ganancias más altas y un patrón de radiación adecuado, como se muestra en la figura 6.

En la tabla 8 se indica el ancho de haz de media potencia a partir del diagrama de radiación con un corte vertical ($\phi = 90^\circ$).

Tabla 8. Resultados del ancho de haz de media potencia

	Apertura antihoraria ($^\circ$)	Apertura horaria ($^\circ$)	Apertura total ($^\circ$)
Diseño 1	-44	44	88
Diseño 2	-42	42	84
Diseño 3	-18	18	36
Diseño 4	-16	16	32
Diseño 5	-28	28	56

En la tabla 9 se indica el ancho de haz de media potencia a partir del diagrama de radiación con un corte horizontal

Tabla 9. Resultados del ancho de haz de media potencia

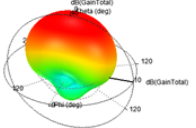
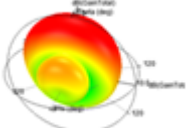
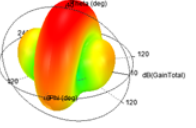
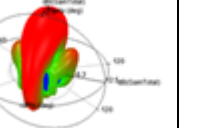
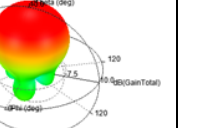
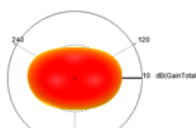
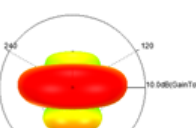
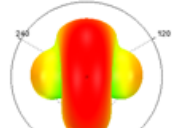
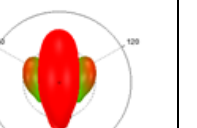
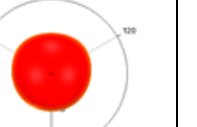
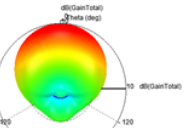
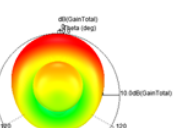
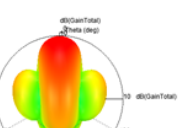
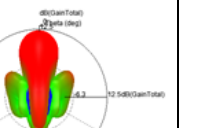
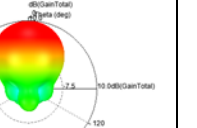
Diseños Propuestos		Apertura horaria ($^\circ$)	Apertura total ($^\circ$)
Diseño 1	Lóbulo principal 1	-69	64
		-133	

	Lóbulo principal 2	67	62
		129	
Diseño 2	Lóbulo principal 1	-83	29
		-112	
	Lóbulo principal 2	80	30
	110		
Diseño 3	Lóbulo principal 1	38	38
Diseño 4	Lóbulo principal 1	27	27
Diseño 5		-115	43

	Lóbulo principal 1	-158	44
	Lóbulo principal 2	108	
		152	

En la tabla 10, se indican los esquemas tridimensionales de los patrones de radiación de los 5 diseños propuestos, los cuales están formados por lóbulos posteriores, lóbulos laterales y nulos

Tabla 10. Patrones de Radiación 3D de los cinco diseños propuestos

Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3	Diseño 4	Diseño 5
<i>Vista General</i>	<i>Vista General</i>	<i>Vista General</i>	<i>Vista General</i>	<i>Vista General</i>
				
<i>Vista Superior</i>	<i>Vista Superior</i>	<i>Vista Superior</i>	<i>Vista Superior</i>	<i>Vista Superior</i>
				
<i>Vista Frontal</i>	<i>Vista Frontal</i>	<i>Vista Frontal</i>	<i>Vista Frontal</i>	<i>Vista Frontal</i>
				

Los arreglos lineales ($n \times 1$ o $1 \times n$) se pueden alimentar de dos formas independientes que son: alimentación en serie o alimentación en paralelo. En el tipo de alimentación en serie, cada antena que compone el arreglo lineal es alimentado con la excitación proveniente del elemento anterior, por lo tanto, si se producen errores en el diseño del arreglo, el rendimiento de este disminuirá. En este tipo de alimentación se obtienen diagramas de radiaciones omnidireccionales [21].

Mientras que, en el método de alimentación en paralelo, cada antena parche que conforma el arreglo lineal tiene una línea de excitación propia, siendo independiente de las demás líneas de excitación [10]. Y forma un diagrama de radiación poco directivo, constituido por un lóbulo principal, con presencia de lóbulos laterales muy radiantes y un lóbulo posterior considerable. El diseño de los arreglos lineales es más sencillo y compacto.

Un arreglo cuadrado (2x2) se puede excitar con una combinación de alimentación serie y paralelo. Entonces se obtiene un patrón de radiación más directivo, sin presencia de lóbulos laterales y un lóbulo posterior imperceptible. Por estas razones este tipo de arreglo cuadrado se considera como el mejor diseño propuesto. Un arreglo cuadrado tiene la ventaja de formar haces más angostos, haciéndolos más versátiles en relación a los arreglos lineales.

Otro aspecto importante es que, conforme se vaya aumentando el número de antenas en una matriz se logra conseguir resultados importantes en parámetros de ganancia y patrón de radiación, esto se cumple debido a que los campos radiados por cada antena que conforman el arreglo, se aumentan en unas direcciones y se disminuyen en otras. Lo que significa que la energía radiada por los lóbulos laterales se va cancelando por algunas trayectorias y va sumándose a la del lóbulo principal. Así entonces el arreglo de antenas se vuelve más directiva por lo tanto se extiende su ganancia [20].

4. CONCLUSIONES

El diseño 5 que opera a una frecuencia de 60.04 GHz, presenta los mejores resultados de coeficiente de reflexión (-24.16 dB) equivalente a una mejora del 20.8 %, respecto al valor establecido como meta de estudio y un VSWR (1.07 dB) con una desviación del 0.07 % respecto a un acople perfecto de impedancias, esto se debe al uso de un arreglo con un sistema de alimentación combinado (serie-paralelo) y una estructura simétrica con geometría cuadrada, lo cual al mantener iguales las dimensiones de cada parche, mejora el coeficiente de reflexión, el VSWR y disminuye el desfase de la frecuencia.

A través de las simulaciones presentadas se verifica que los arreglos lineales son sencillos en su diseño, pero sus diagramas de radiaciones no son óptimos ya que son omnidireccionales, otros con forma irregular y que además están formados por lóbulos secundarios de gran radiación, nulos fuertes y lóbulos posteriores grandes produciendo una ganancia máxima de 9.50088 dB. En cambio, un arreglo cuadrado presenta un diseño más complejo, pero con resultados más eficientes en torno

al patrón de radiación, mismo que es semidirectivo, sin presencia de nulos, ni de lóbulos secundarios y un lóbulo posterior imperceptible, con una ganancia de 9.0037dB que en relación a la ganancia obtenida en una agrupación lineal es menor, cuya diferencia es mínima y es igual a 0.5051 dB, lo cual no afecta en la eficacia de la antena. Se establece entonces que las configuraciones y modos de arreglos de antenas son diversos y de acuerdo a la posición donde se coloque cada elemento radiante tendrá una influencia importante para su funcionalidad.

5. REFERENCIAS

- [1] T. Varum, A. Ramos, and J. Matos, "Planar microstrip series-fed array for 5G applications", 2018.
- [2] Y. P. Souto, "Análisis y diseño de un radioenlace para la evaluación de la despolarización de ondas milimétricas provocada por la lluvia", 2018.
- [3] C. J. Sánchez, "Caracterización de las ondas milimétricas para determinar su posible aplicación en la Quinta generación de comunicaciones inalámbricas". Ecuador: Guayaquil, pp. 38-39, 2018.
- [4] M. Agiwal, A. Roy, y N. Saxena, "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey", IEEE Communications Surveys & Tutorials, pp. 1617–1619, 2016.
- [5] L. J. Bravo, y B. D. Casanova, "La comunicación inalámbrica a través de la banda de los 60GHz". Revista Universidad y Sociedad [seriada en línea], pp. 89-96, 2016.
- [6] A. G. Domínguez, Cálculo de antenas: Antenas de última generación para tecnología digital y métodos de medición, Barcelona: MARCOMBO, S.A., pp. 120-121, 2016.
- [7] J. Gómez Rojas, L. L. Camargo Ariza, y Y. T. Beltrán Gómez, Radiocomunicaciones. Teoría y principios. Santa Marta: Unimagdalena, pp.95-96, 2019.
- [8] C. M. Flores, y S. K. Espinoza, "Diseño e implementación de un sistema radiante para mejorar el alcance en una red Zigbee en un sistema de monitoreo". Ecuador: Riobamba, 2018.
- [9] T. Wayne, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. México: PEARSON EDUCACIÓN, pp.375-376, 2003.

- [10] J. M. Nieto Escribano, “Diseño de un array de antenas parche con alimentación en serie a 60 GHz”, pp. 26-37, 2018.
- [11] I. O. Taño, “Diseño de un arreglo de antenas para la Quinta Generación de las comunicaciones en la banda de 73 GHz”. Santa Clara, 2016.
- [12] A. A. Toral, “DISEÑO DE ARREGLOS DE ANTENAS DE MICROCINTA PARA SISTEMAS INALÁMBRICOS EN LA BANDA DE 2.4GHZ”. Ecuador: Guayaquil, 2019.
- [13] A. L. Ibáñez, “Diseño de adaptadores de impedancias en tecnología coaxial para divisores radiales de potencia”, pp. 16-17, 2015.
- [14] T.T., León Castillo, “DISEÑO DE UNA ANTENA MICROSTRIP PARA ONDA MILIMÉTRICA”, 2020.
- [15] N. Nachabe, C. Luxey, D. Titz, J. R. Costa, S. A. Matos, F. Ganesello, and C. A. Fernandes, “Low-Cost Wide-Band V-Band Patch Antenna on FR4 PCB”, 2018.
- [16] P. Kokila, T. Saranya and S. Vanitha, “Analysis and Design of Rectangular Microstrip Patch Antenna using HFSS”, Journal of Network Communications and Emerging Technologies, 2016.
- [17] K.N. Olan, “Diseño, Modelado y Caracterización de Arreglo de Antenas Microstrip para Aplicaciones del Internet de las Cosas”, pp. 42-47, 2019.
- [18] B. A. Barrios, “Desarrollo de un arreglo de antenas en la banda de 38 GHz para la 5G”, pp. 40-50, 2016.
- [19] J. A. García, “DISEÑO DE ANTENA DE PARCHE MONOPULSO A 2.45 GHZ”, pp. 18-24, 2018.
- [20] M. V. Chanja, “Arreglo de antenas de parche apilados para la banda de 2.4 GHz”, pp. 23-28, 2018.
- [21] J.M. Manzano, “Análisis y diseño de un array de Antenas en Tecnología Microstrip”. España: Alicante, 2020.