

Tarea 1

Antenas Dipolos y Patrones de Radiación

Integrantes: Diego Sanz
José Vargas
Profesor: Ricargo Finger
Auxiliar: Gonzalo Maureira J.
Juan Torrejon H.
Fecha de entrega: 29 de agosto de 2023
Santiago de Chile

Índice de Contenidos

1. Pregunta 1	1
1.1. (a)	1
1.2. (b)	5
1.3. (c)	7
1.4. (d)	7
1.5. (e)	8
2. Pregunta 2	10
2.1. (a)	10
2.2. (b)	13
2.3. (c)	16
3. Pregunta 3	20
3.1. (a)	20
3.2. (b)	20
3.3. (c)	21

Índice de Figuras

1. Modelo HFSS de la antena dipolo de 15 cm.	1
2. Patrón de radiación 3D para 250 MHz.	2
3. Corte 2D del patrón de radiación para 250 MHz.	2
4. Patrón de radiación 3D para 1 GHz.	3
5. Corte 2D del patrón de radiación para 1 GHz.	3
6. Patrón de radiación 3D para 2 GHz.	4
7. Corte 2D del patrón de radiación para 2 GHz.	4
8. Patrón de radiación 3D para 3 GHz.	5
9. Corte 2D del patrón de radiación para 3 GHz.	5
10. Patrón de radiación	6
11. Reflexión de entrada del barrido de frecuencias sobre el Dipolo.	7
12. Reflexión de entrada para distintos largos del Dipolo.	8
13. Impedancia real (en rojo) e imaginaria (en azul) en función de la frecuencia del Dipolo optimizado para 1.3 GHz.	9
14. Gráfico 3D del patrón de radiación de $F(\theta, \phi) = F_0 \sin(\theta)$	10
15. Gráfico 2D de un corte del patrón $F(\theta, \phi) = F_0 \sin(\theta)$	11
16. HPBW para $\sin(\theta)$	12
17. Gráfico 3D del patrón de radiación de $F(\theta, \phi) = F_0 \sin^3(\theta)$	13
18. Gráfico 2D de un corte del patrón $F(\theta, \phi) = F_0 \sin(\theta)$	14
19. HPBW para $\sin^3(\theta)$	15
20. Gráfico 3D del patrón de radiación de $F(\theta, \phi) = \frac{2J_1(\beta a \sin(\theta))}{\beta a \sin(\theta)}$	16
21. Gráfico 2D de un corte del patrón $F(\theta, \phi) = \frac{2J_1(\beta a \sin(\theta))}{\beta a \sin(\theta)}$ en el plano XY	17
22. Gráfico 2D de un corte del patrón $F(\theta, \phi) = \frac{2J_1(\beta a \sin(\theta))}{\beta a \sin(\theta)}$ en el plano XZ	18

23.	HPBW para $F(\theta, \phi) = \frac{2J_1(\beta\alpha\sin(\theta))}{\beta\alpha\sin(\theta)}$	19
-----	---	----

1. Pregunta 1

1.1. (a)

Utilizando HFSS se diseña una antena dipolo de 15 cm de largo, con un radio de 5 mm y un gap 2 mm entre ambos brazos de la antena, donde se agrega un *lumped port* con una impedancia de $50\ \Omega$. Esta antena se puede ver en la figura 1, además adjunto a la tarea se entregan los modelos de HFSS.

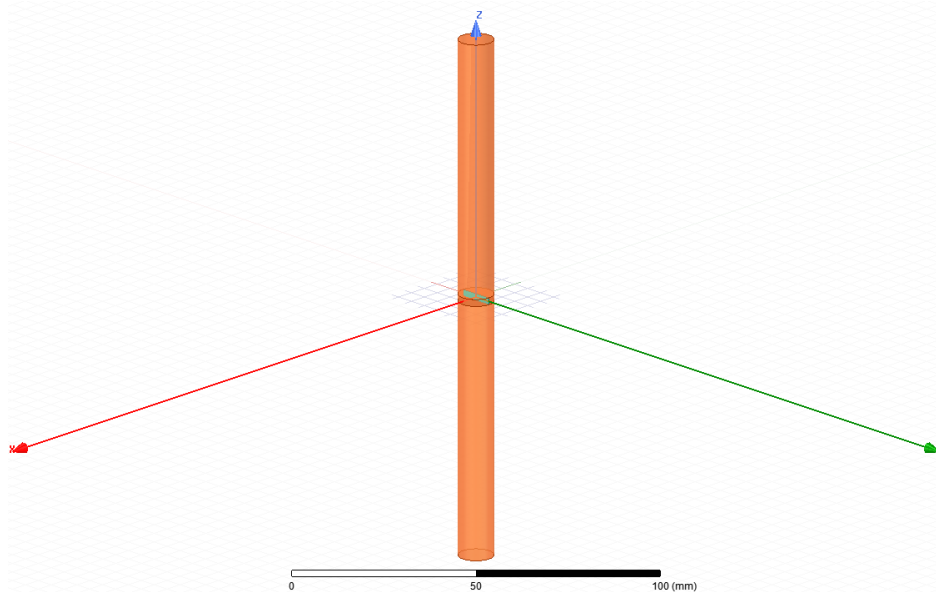


Figura 1: Modelo HFSS de la antena dipolo de 15 cm.

Con lo anterior, se analiza el comportamiento de esta antena para las frecuencias 250 MHz, 1 GHz, 2 GHz y 3 GHz, obteniendo los patrones de radiación en 3D junto a un corte 2D que se presentan en las siguientes figuras.

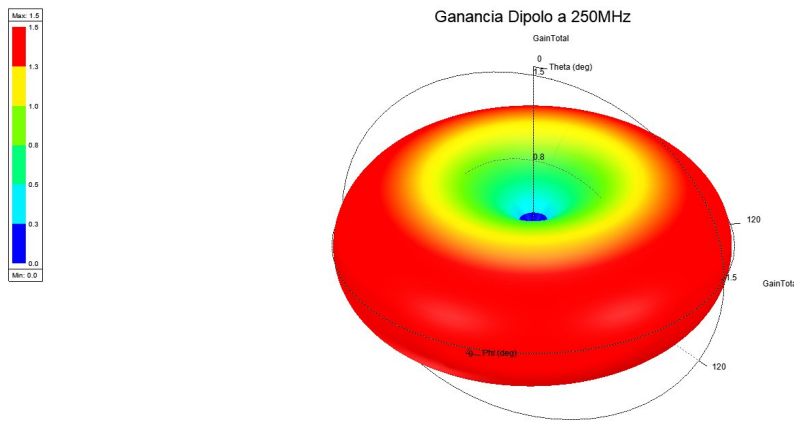


Figura 2: Patrón de radiación 3D para 250 MHz.

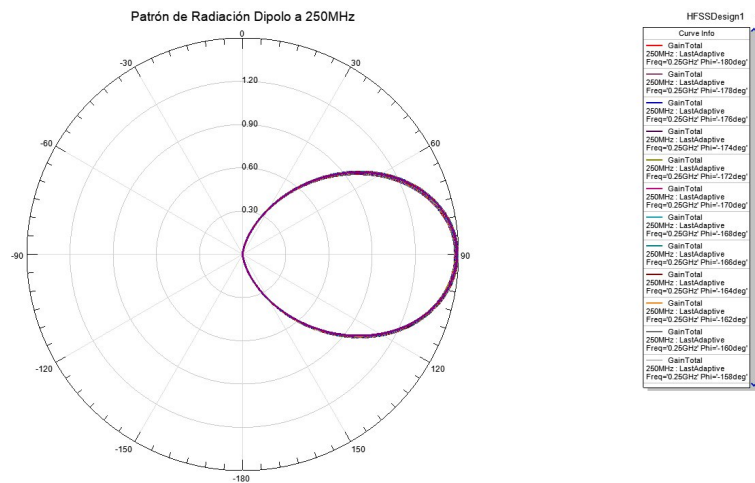


Figura 3: Corte 2D del patrón de radiación para 250 MHz.

Se nota que el patrón de radiación 3D de la figura 2 tiene forma de dona, cómo se vio en clases para el dipolo ideal. De la misma forma, la figura 3 es similar a una función seno, que es la parametrización del dipolo ideal visto en clases. Cabe notar que la longitud de onda para 250 MHz tiene una longitud de onda de 120 cm, siendo 8 veces mayor a los 15 cm de largo de la antena dipolo diseñada, por lo que las aproximaciones de $\Delta z \ll \lambda$ se cumplen relativamente bien y la forma teórica vista en las cátedras se mantiene.

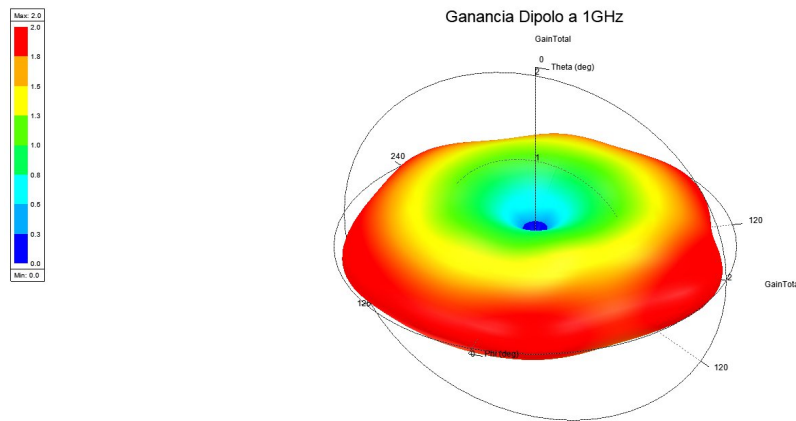


Figura 4: Patrón de radiación 3D para 1 GHz.

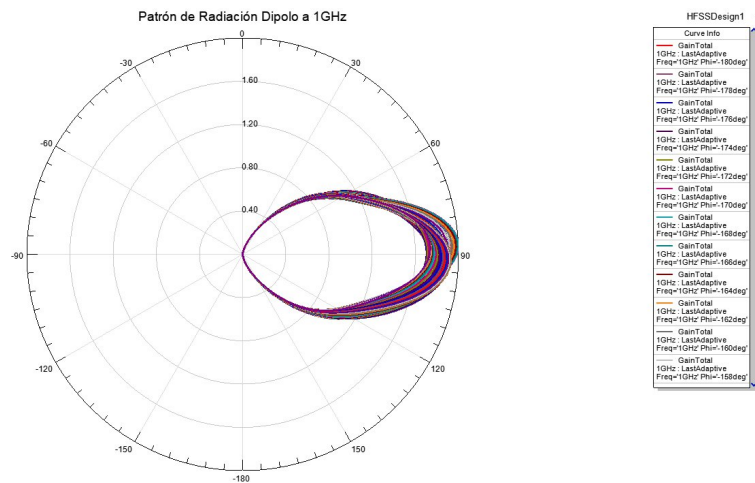


Figura 5: Corte 2D del patrón de radiación para 1 GHz.

Para la frecuencia de 1 GHz se nota que la forma del patrón de radiación 3D en la figura 4 comienza a deformarse levemente, esto es más evidente en el corte 2D en 5 donde se observan variaciones en la forma circular a medida que cambia el ángulo ϕ . En este caso se tiene que la longitud de onda es de 30 cm, es decir, solamente 2 veces el largo de la antena. Lo anterior puede explicar la deformación del patrón de radiación respecto al visto en clases, dado que se deja de cumplir el supuesto de $\Delta z \ll \lambda$.

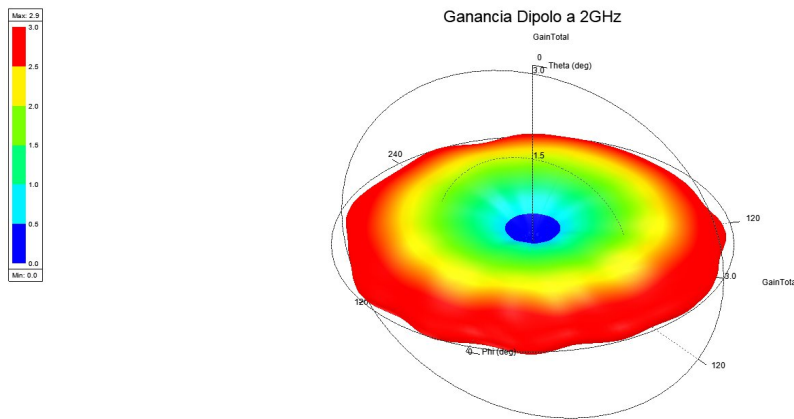


Figura 6: Patrón de radiación 3D para 2 GHz.

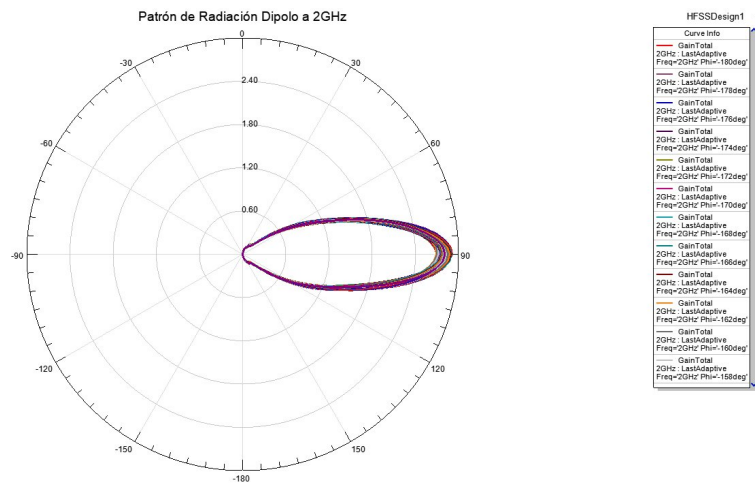


Figura 7: Corte 2D del patrón de radiación para 2 GHz.

Para la frecuencia de 2 GHz el patrón de radiación de la figura 6 sigue deformado, aunque con una forma más plana que en para las frecuencias anteriores, esto es más evidente del corte 2D de la figura 7. Para este caso se trabaja con una longitud de onda de 15 cm, igual al tamaño del dipolo.

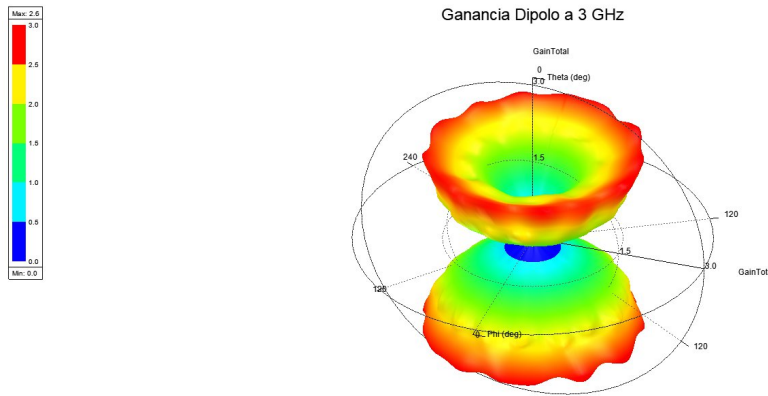


Figura 8: Patrón de radiación 3D para 3 GHz.

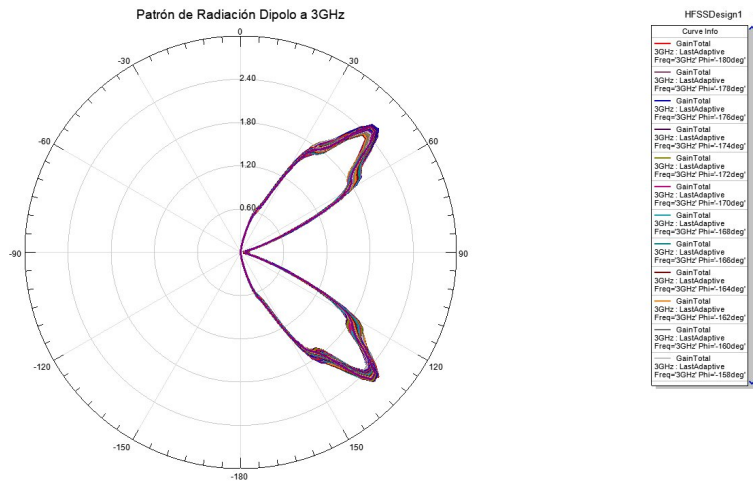


Figura 9: Corte 2D del patrón de radiación para 3 GHz.

En el caso de la última frecuencia de 3 GHz se tiene una forma completamente diferente en el patrón de radiación 3D de la figura 8 respecto a las frecuencias anteriores, para esta frecuencia el patrón es parecido al de un *diábolo*. El corte 2D de la figura 9 muestra claramente la forma de los lóbulos que se forman hacia arriba y hacia abajo del eje del dipolo. Para 3 GHz se trabaja con una longitud de onda de 10 cm, siendo λ menor al tamaño de la antena, por lo que ya dejamos atrás los supuestos con los que se trabajaba en clases, lo que se evidencia en este resultado con una forma inesperada.

1.2. (b)

En las clases se vio que el campo lejano para el dipolo ideal sigue la siguiente ecuación:

$$E = \frac{I\Delta z}{4\pi} j\omega\mu \frac{e^{-j\beta r}}{r} \sin(\theta)\hat{\theta} \quad (1)$$

Luego, su patrón de radiación estará dado por la ecuación 2.

$$F(\theta, \phi) = \frac{E_\theta}{E_{\theta(max)}} \quad (2)$$

Donde se nota que $\sin(\theta)$ tiene su máximo igual a 1 para $\theta = \pi/2$ en la ecuación del campo lejano del dipolo ideal 1. Es así como el patrón de radiación del dipolo ideal para campos lejanos estará dado por la ecuación 3, cabe resaltar que este resultado es independiente del tamaño de la antena y la frecuencia (equivalentemente, su longitud de onda).

$$F(\theta, \phi) = \sin(\theta) \quad (3)$$

Utilizando MATLAB se graficó el patrón de radiación de $\sin(\theta)$ y se tiene el gráfico de la Figura 10.

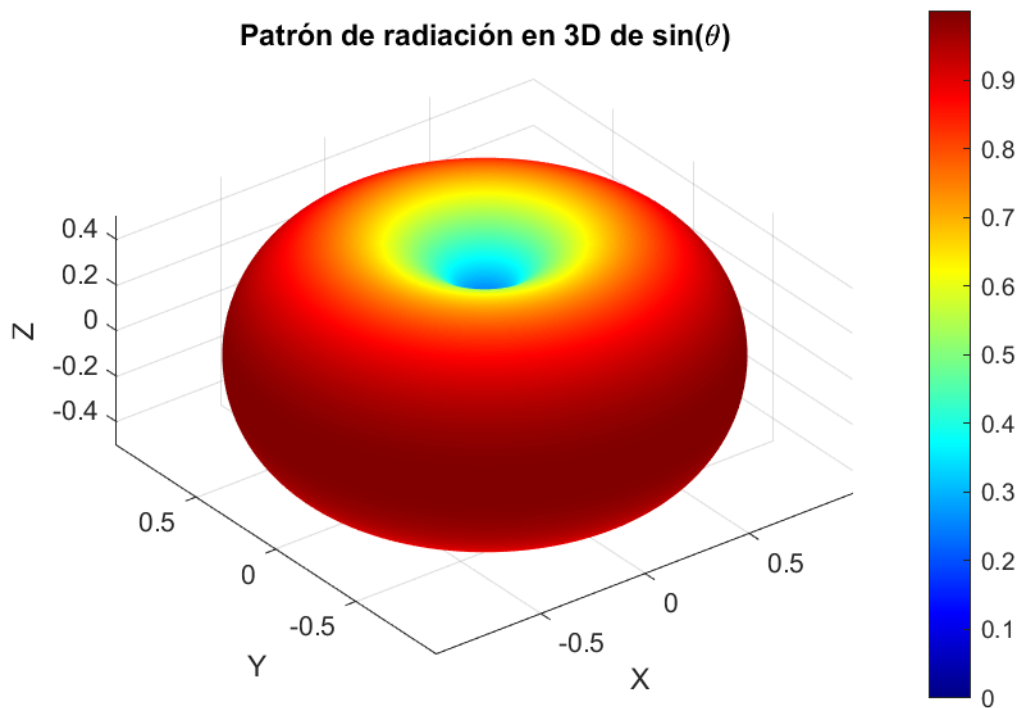


Figura 10: Patrón de radiación

Se puede apreciar que para el primer caso donde la frecuencia es 250 MHz (Figura 2), los gráficos son similares ya que compartiendo una forma de dona, cuya potencia aumenta en valores cercanos a $\theta = \pi/2$. Sin embargo, a medida que se aumenta la frecuencia, la aproximación difiere de los demás patrones obtenidos para frecuencias más altas. Por ejemplo en las Figuras 4 y 6 donde en ambas curvas parecen un toroide más deformado y aplastado. Finalmente, en la Figura 8 el patrón deja de parecer un toroide y se asemeja más a un diábolo.

Una explicación a este resultado es que el supuesto para campos lejanos también debe cumplir que $\Delta z \ll \lambda$. Por lo tanto, mientras vaya aumentando la frecuencia, la longitud de onda irá disminuyendo, dejando de cumplirse la aproximación utilizada, finalmente difiriendo con la curva obtenida en la Figura 10.

1.3. (c)

A continuación se hace un barrido de frecuencias sobre la antena dipolo diseñada desde 200 MHz hasta 2 GHz. La figura 11 muestra la reflexión de entrada de la antena resultante del barrido de frecuencias. De este gráfico se nota que el mínimo de la reflexión de entrada se encuentra en los 0.872 GHz, siendo esta la frecuencia a la que mejor se comporta la antena, pues refleja en menor cantidad los campos incidentes.

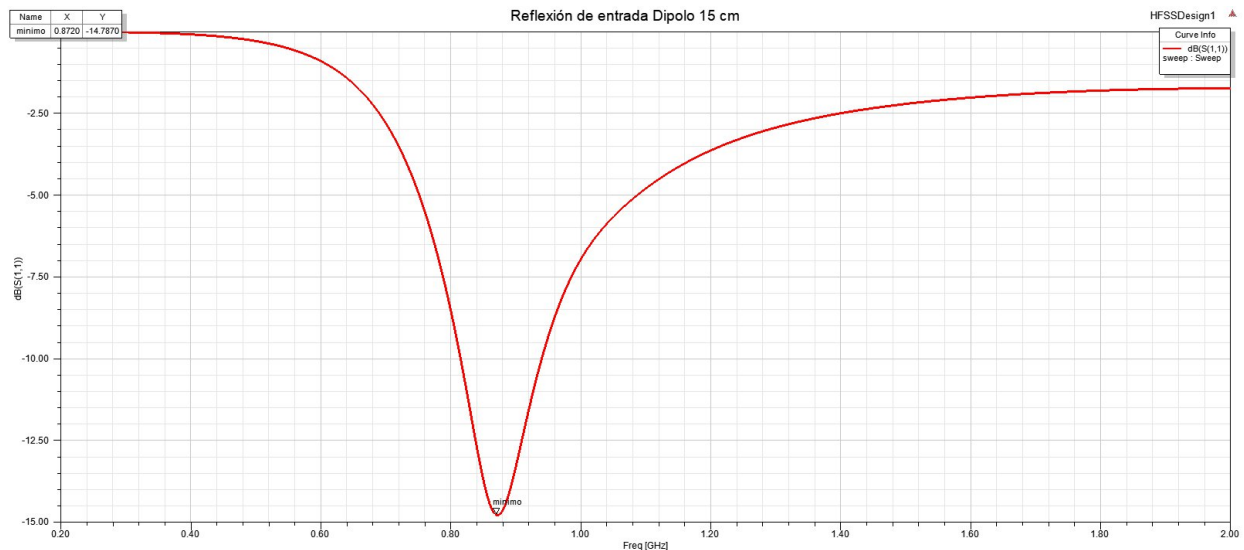


Figura 11: Reflexión de entrada del barrido de frecuencias sobre el Dipolo.

1.4. (d)

Para ajustar el tamaño del dipolo buscando optimizar su respuesta para una frecuencia de 1.3 GHz se hace sweep sobre la variable del largo de la antena desde 10 cm hasta 20 cm con un paso de 0.5 cm, para cada largo se realiza un barrido de frecuencia entre 200 MHz y 2 GHz con el objetivo de evaluar su desempeño con la reflexión de entrada, buscando minimizarla en los 1.3 GHz. La figura 12 muestra la reflexión de entrada para algunos de largos de la antena en función de la frecuencia.

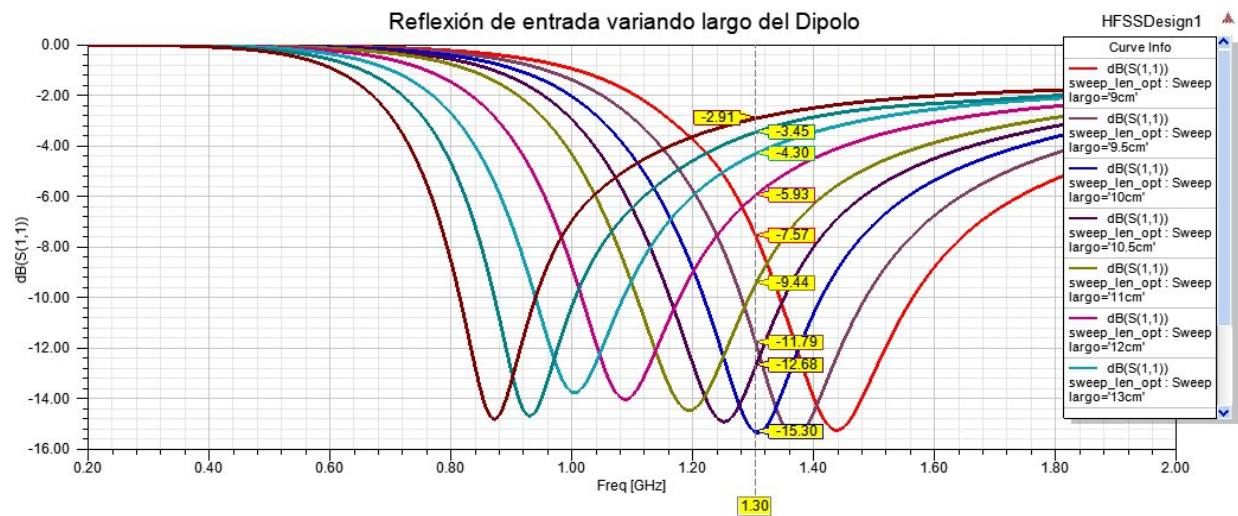


Figura 12: Reflexión de entrada para distintos largos del Dipolo.

Del gráfico anterior se tiene que la curva azul para un largo del dipolo de 10 cm minimiza su reflexión de entrada con un valor de -15.30 dB en 1.3 GHz, siendo este el tamaño óptimo de la antenna para esta frecuencia. Cabe notar que también se realizaron variaciones del largo del dipolo alrededor de 10 cm con paso de 0.1 cm para ajustar de manera más fina el tamaño (estos no se incluyen en el gráfico para que sea más legible), sin embargo, 10 cm seguía siendo el largo con menor reflexión de entrada para una frecuencia de 1.3 GHz.

1.5. (e)

Utilizando el largo óptimo de 10 cm para que la antenna opere a 1.3 GHz se realiza un barrido en frecuencia para estudiar el comportamiento de la impedancia real e imaginaria del Dipolo. La figura 13 muestra el comportamiento de ambas componentes de la impedancia en función de la frecuencia.

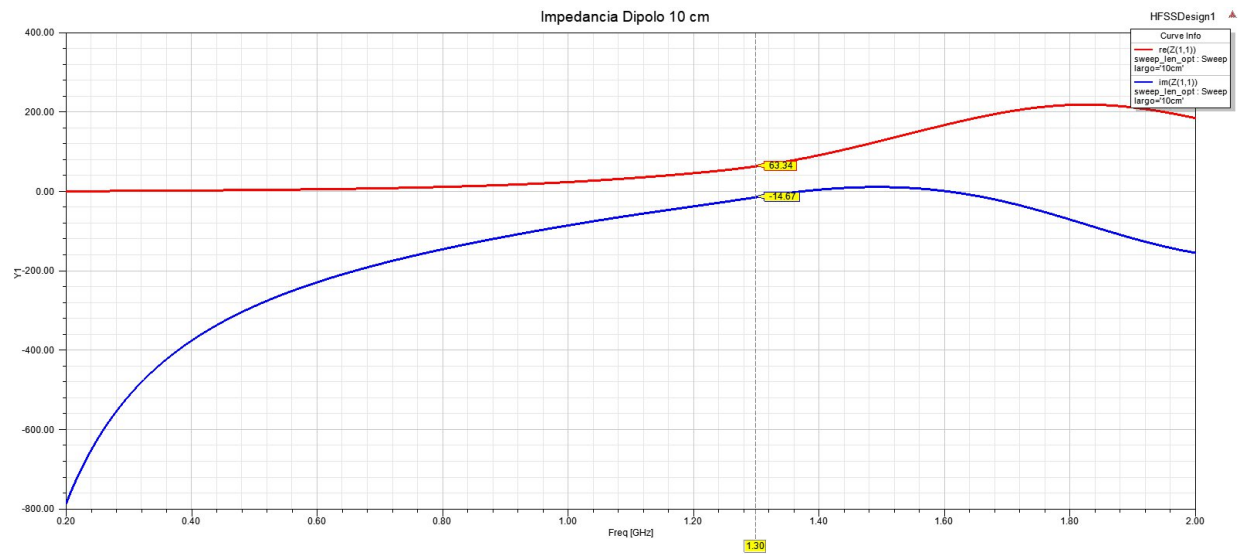


Figura 13: Impedancia real (en rojo) e imaginaria (en azul) en función de la frecuencia del Dipolo optimizado para 1.3 GHz.

De la figura se tiene que la impedancia imaginaria o reactancia del dipolo para 1.3 GHz es de -14.67Ω , esto significa que la antena presenta una reactancia de tipo capacitiva. Este efecto parásito se puede deber al gap presente entre ambos brazos del dipolo, y podría solucionarse hacer matching con una inductancia en serie para 1.3 GHz con el objetivo de cancelar esta reactancia y maximizar la potencia transmitida por la antena.

2. Pregunta 2

Para esta sección se desarrolló un código con MATLAB para realizar los gráficos y los cálculos pedidos.

2.1. (a)

Para simplificar el problema se usará $F_0 = 1$, por lo que el primer patrón de radiación queda como $F(\theta, \phi) = \sin(\theta)$. Graficando se tienen la Figura 14 con el gráfico en 3D, y la Figura 15 con el corte 2D en el plano XY.

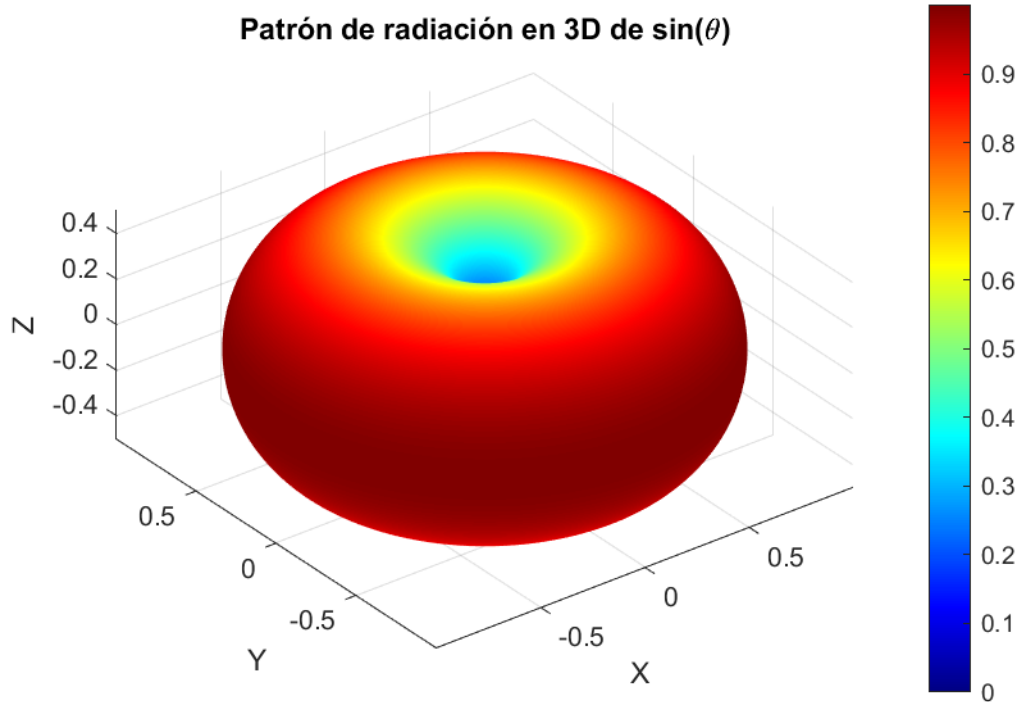


Figura 14: Gráfico 3D del patrón de radiación de $F(\theta, \phi) = F_0 \sin(\theta)$

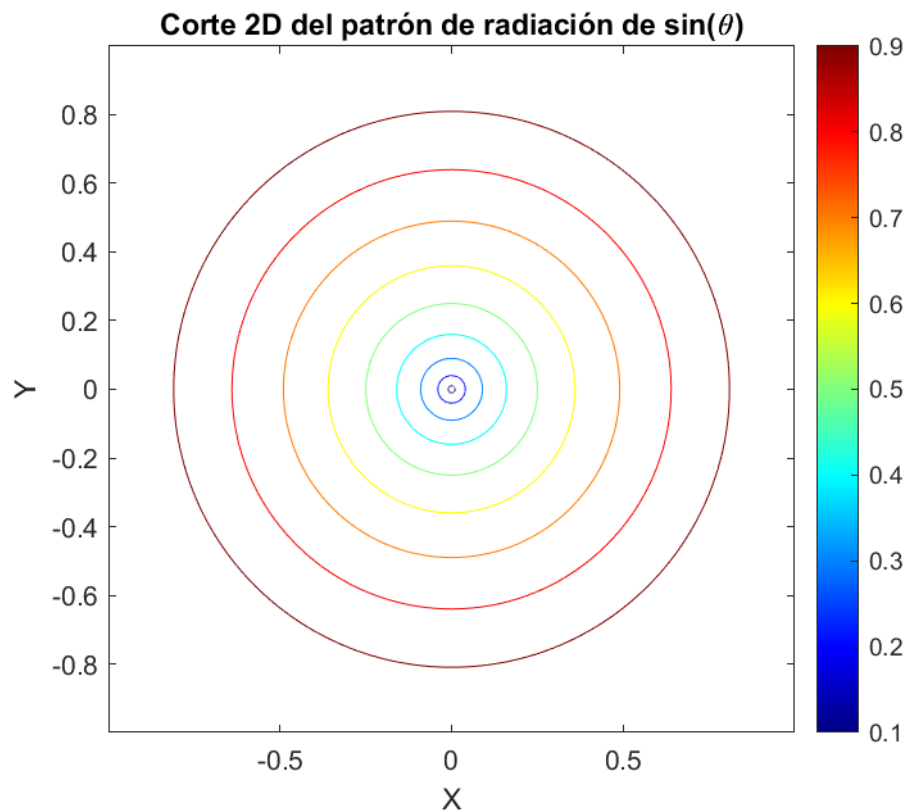
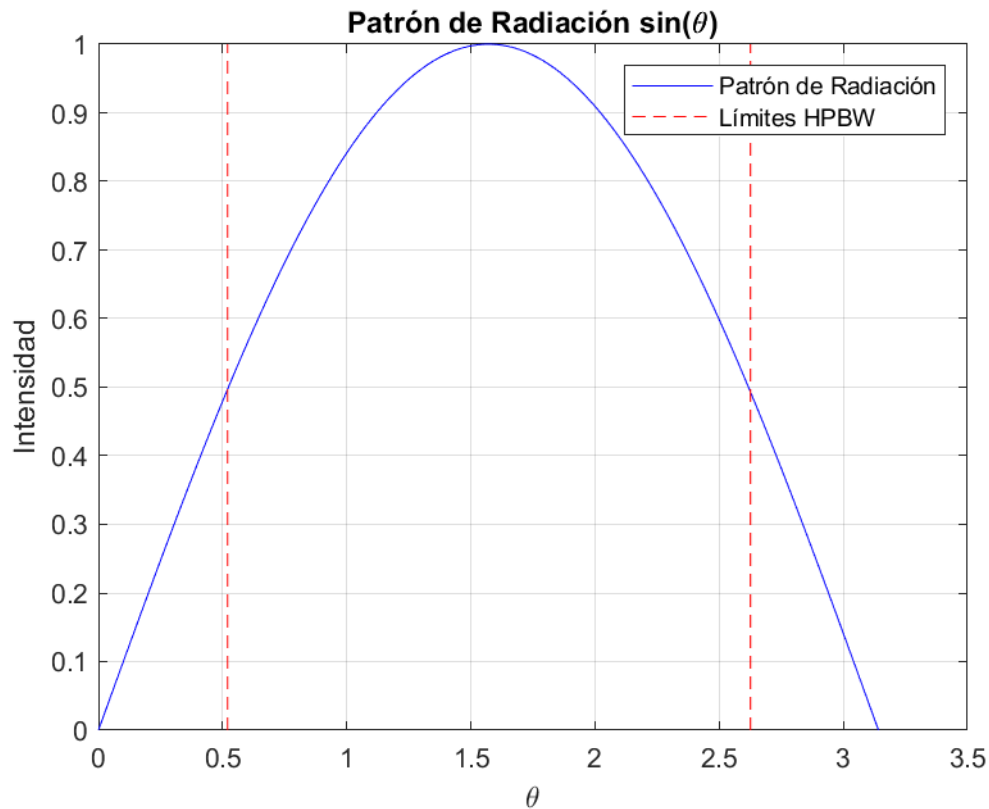


Figura 15: Gráfico 2D de un corte del patrón $F(\theta, \phi) = F_0 \sin(\theta)$

Para calcular el HPBW se busca el punto en el que el patrón es máximo. Luego, se buscan los puntos donde la potencia es igual a la mitad del máximo. La diferencia angular entre estos puntos es el valor del HPBW. Para $F(\theta, \phi) = \sin(\theta)$, $\text{HPBW} = 2.106$ [rad] (o 120.665°). En la Figura 16, se puede apreciar de manera más clara el ancho encontrado.

Figura 16: HPBW para $\sin(\theta)$

La máxima directividad D se calcula de la siguiente forma

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A}$$

donde Ω_A es el ángulo sólido del patrón de radiación, el cual se obtiene con

$$\Omega_A = \iint_{\text{sphere}} |F(\theta, \phi)|^2 d\Omega$$

Para $F(\theta, \phi) = \sin(\theta)$,

$$\Omega_A = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin^2(\theta) \cdot \sin(\theta) d\theta d\phi = 8.377580$$

Finalmente, se obtiene $D=1.5$ como máxima directividad. Dado que la directividad es 1.5, significa que la antena concentra un 50 % más de energía en su dirección de máxima radiación que lo que haría una antena isotrópica. Se sabe que el patrón de radiación corresponde a un dipolo simple, y analizando los patrones graficados, se puede apreciar que en $\theta = \pi/2$ la radiación es máxima y mantiene al menos la mitad de su potencia dentro de un rango de diferencia angular de $\pm 60^\circ$ aproximadamente. La antena está diseñada para irradiar perpendicularmente al dipolo, con un enfoque ligeramente más direccional que una antena isotrópica.

2.2. (b)

También se usó como supuesto $F_0 = 1$, por lo que el patrón de radiación queda como $F(\theta, \phi) = \sin^3(\theta)$. Graficando se tienen la Figura 17 con el gráfico en 3D, y la Figura 22 con el corte 2D en el plano XY.

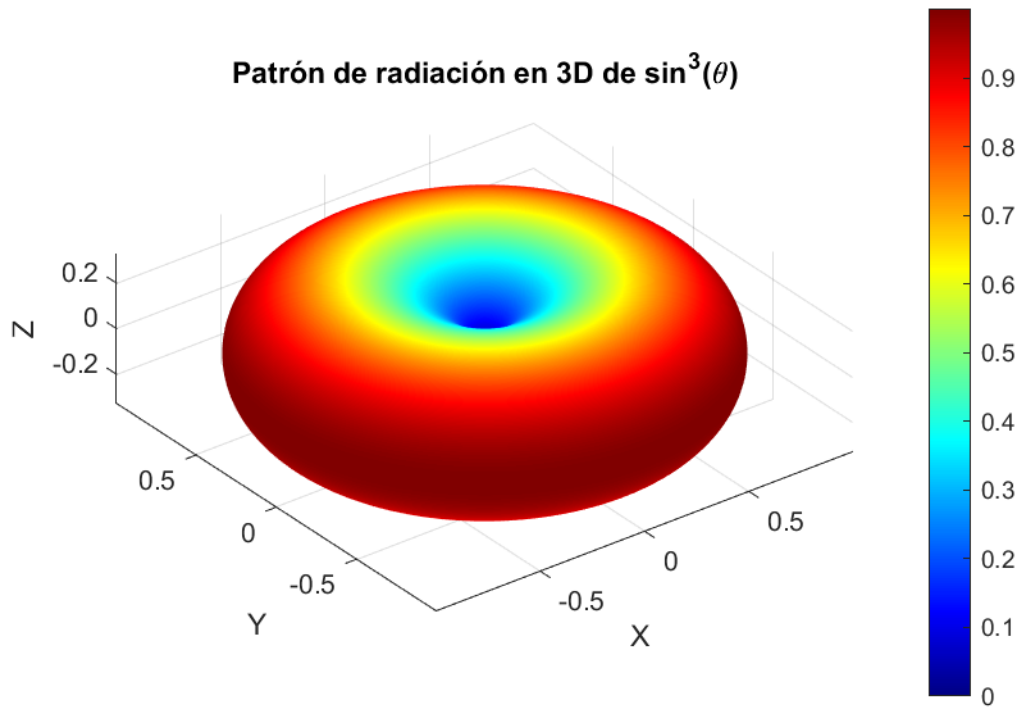


Figura 17: Gráfico 3D del patrón de radiación de $F(\theta, \phi) = F_0 \sin^3(\theta)$

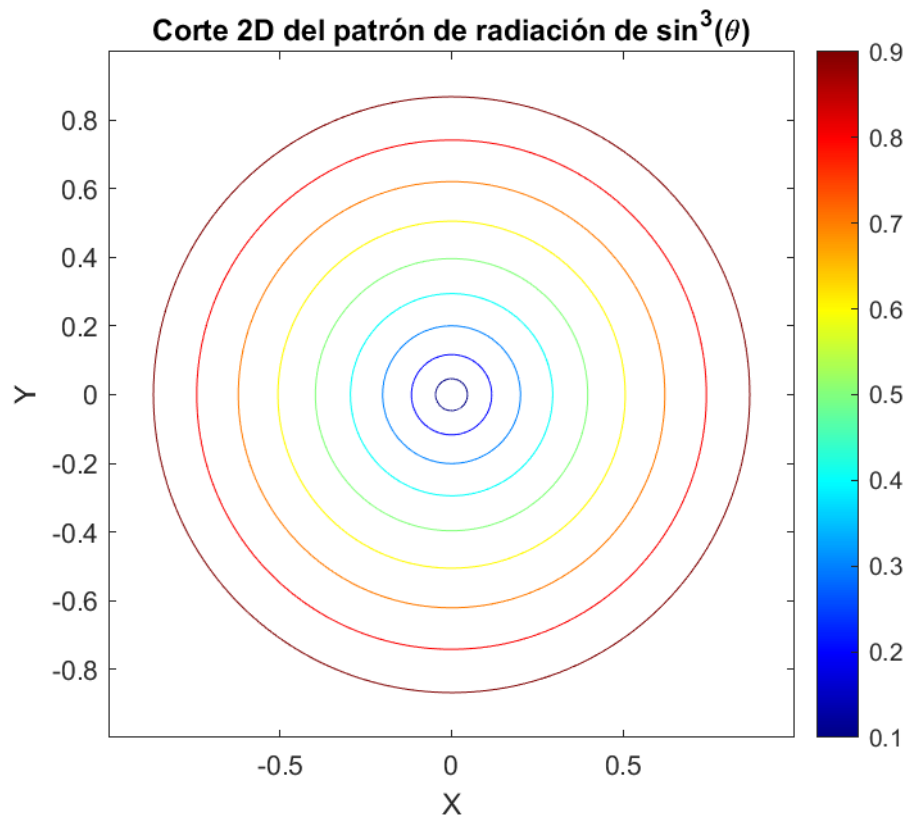
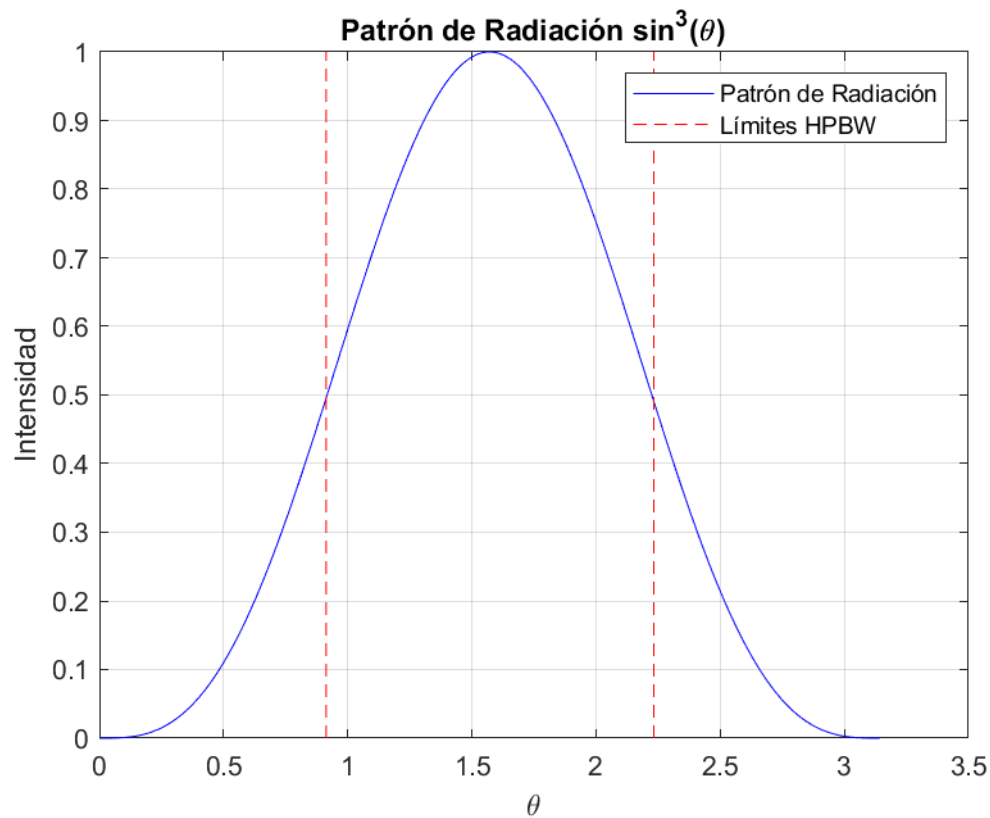


Figura 18: Gráfico 2D de un corte del patrón $F(\theta, \phi) = F_0 \sin(\theta)$

En este caso, se tiene HBPW=1.3196 [rad] (o 75.607°). En la Figura 19 se puede apreciar gráficamente la zona encontrada.

Figura 19: HPBW para $\sin^3(\theta)$

La integral para el ángulo sólido de este caso está dada por

$$\Omega_A = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin^6(\theta) \cdot \sin(\theta) d\theta d\phi = 5.744627$$

De este modo, la máxima directividad es $D=2.1875$, por lo que la antena concentra un 118.75 % más de energía en su dirección de máxima radiación que lo que haría una antena isotrópica. El patrón de radiación es similar al visto en el punto anterior, similar a un dipolo, donde en $\theta = \pi/2$ la radiación es máxima perpendicularmente al dipolo. La diferencia está en el ancho HPBW, donde el rango es menor, teniendo $\pm 37.8^\circ$. Esta antena tiene un enfoque más direccional que el caso anterior, por lo que concentra más energía en ciertas direcciones y menos en otras.

2.3. (c)

Para el patrón de radiación de $F(\theta, \phi) = \frac{2J_1(\beta \alpha \sin(\theta))}{\beta \alpha \sin(\theta)}$ se utilizó $\alpha = 1.0$ y $\beta = 10.0$. En la Figura 20 se tiene el gráfico del patrón de radiación tridimensional.

Patrón de radiación en 3D de $2 * J_1(\beta \alpha \sin(\theta)) / (\beta \alpha \sin(\theta))$

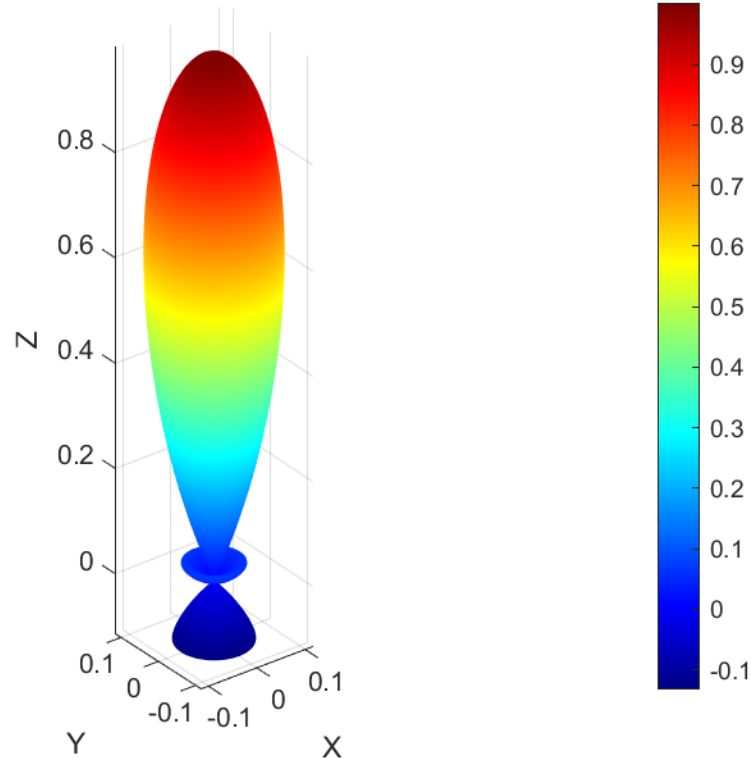


Figura 20: Gráfico 3D del patrón de radiación de $F(\theta, \phi) = \frac{2J_1(\beta \alpha \sin(\theta))}{\beta \alpha \sin(\theta)}$

Para el gráfico en 2D se hicieron dos cortes, uno en el plano XY y otro en el plano XZ, ya que en el primero no se apreciaba muy claramente el patrón de radiación. En las Figuras están ambos gráficos bidimensionales.

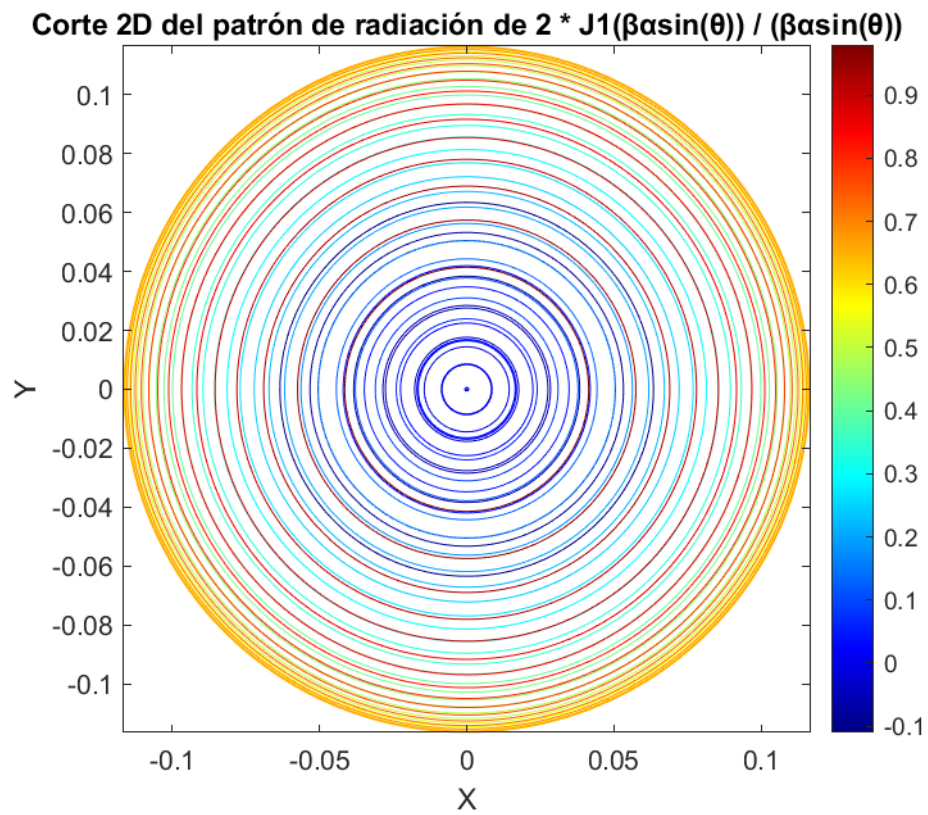


Figura 21: Gráfico 2D de un corte del patrón $F(\theta, \phi) = \frac{2J_1(\beta \alpha \sin(\theta))}{\beta \alpha \sin(\theta)}$ en el plano XY

Corte 2D del patrón de radiación de $2 * J_1(\beta \sin(\theta)) / (\beta \sin(\theta))$

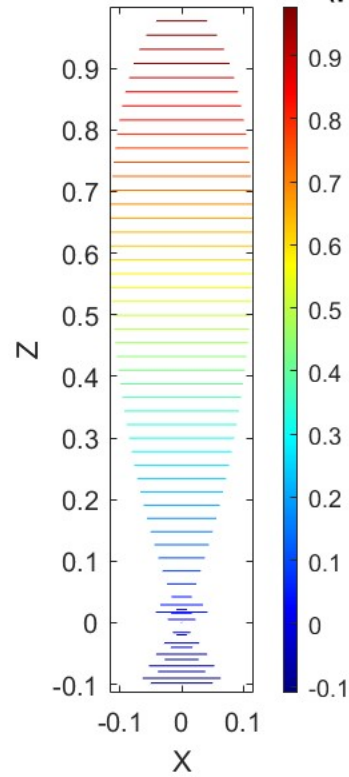


Figura 22: Gráfico 2D de un corte del patrón $F(\theta, \phi) = \frac{2J_1(\beta \sin(\theta))}{\beta \sin(\theta)}$ en el plano XZ

Finalmente, para este caso se tiene HBPW=0.45442 [rad] (o 26.036°). En la Figura 23 se puede apreciar gráficamente la zona encontrada.

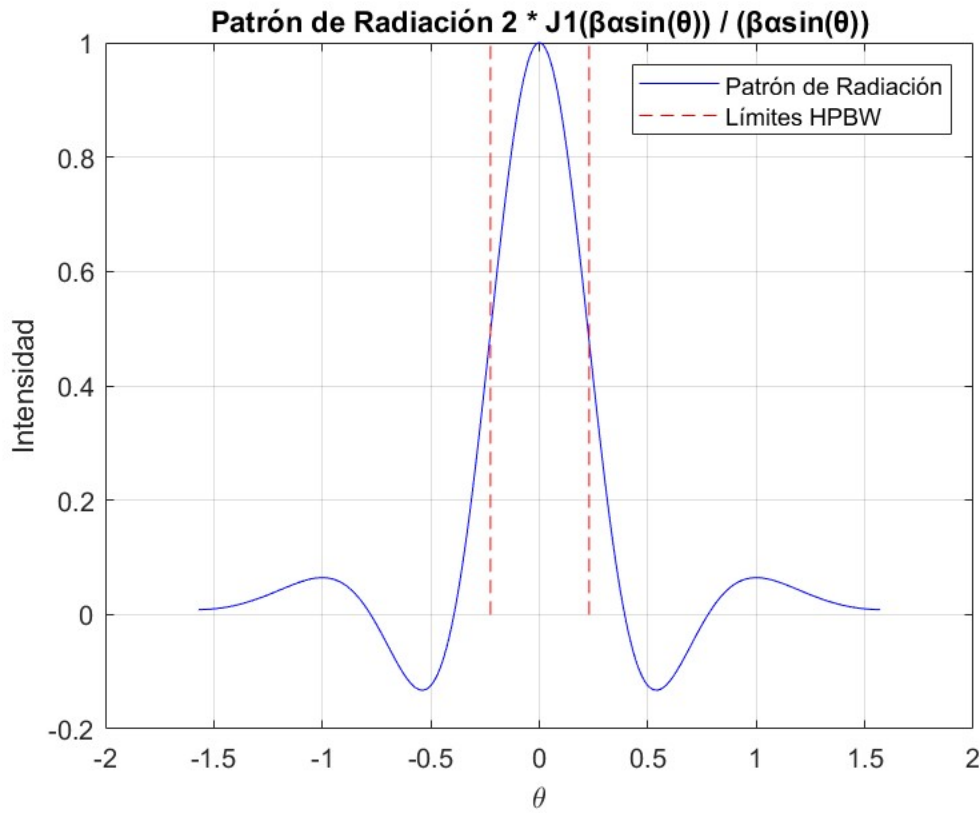


Figura 23: HPBW para $F(\theta, \phi) = \frac{2J_1(\beta\alpha\sin(\theta))}{\beta\alpha\sin(\theta)}$

La integral del ángulo sólido resultante está calculada a continuación

$$\Omega_A = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi = \frac{2J_1(\beta\alpha\sin(\theta))}{\beta\alpha\sin(\theta)} \cdot \sin(\theta) d\theta d\phi = 2.740764$$

De este modo, la máxima directividad para este patrón de radiación es $D=4.584989$, por lo que la antena concentra un 358.49% más de energía en su dirección de máxima radiación en comparación a lo que haría una antena isotrópica. El ancho HPBW es más pequeño aún, sin embargo esta antena es la que tiene la potencia más elevada posible, al estar concentrada en una dirección específica, en este caso cercano para $\theta = 0$

3. Pregunta 3

3.1. (a)

De la clase se tiene que los campos eléctricos y magnéticos en campos cercanos a un dipolo ideal siguen las ecuaciones 4 y 5, respectivamente.

$$\mathbf{E} = \frac{I\Delta z}{4\pi} j\omega\mu \left(1 + \frac{1}{j\beta r} - j\frac{1}{(\beta r)^2}\right) \frac{e^{-j\beta r}}{r} \sin\theta \hat{\boldsymbol{\theta}} + \frac{I\Delta z}{2\pi} \eta \left(\frac{1}{r} - j\frac{1}{\beta r^2}\right) \frac{e^{-j\beta r}}{r} \cos\theta \hat{\mathbf{r}} \quad (4)$$

$$\mathbf{H} = \frac{I\Delta z}{4\pi} j\beta \left(1 + \frac{1}{j\beta r}\right) \frac{e^{-j\beta r}}{r} \sin\theta \hat{\boldsymbol{\phi}} \quad (5)$$

Luego el vector de poynting está dado por la ecuación 6.

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \quad (6)$$

Con lo anterior se puede obtener el vector de poynting para campos cercanos al dipolo ideal usando los campos de 4 y 5 en la ecuación 6. La ecuación 7 es el resultado de este calculo.

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \left(\frac{(I\Delta z)^2}{16\pi^2} \omega\mu\beta \frac{\sin^2\theta}{r^2} \left(1 + \frac{1}{j(\beta r)^3}\right) \hat{\mathbf{r}} + \frac{(I\Delta z)^2}{8\pi^2} j\beta\eta \frac{\sin\theta\cos\theta}{r^2} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{\beta^2 r^3}\right) \hat{\boldsymbol{\theta}} \right) \quad (7)$$

Cabe notar que el vector de poynting resultante tiene una componente real en el eje radial y componentes imaginarias tanto radial como tangencialmente. Las componentes imaginarias corresponden a potencias reactivas que no sirven para transmitir energía o trabajo, si no que quedan atrapadas en torno a la antena.

3.2. (b)

Para calcular la potencia total irradiada consideramos la ecuación 8 que considera la parte activa del vector de poynting en una superficie, siendo esta la que efectivamente transmite energía.

$$P = \iint \text{Re}(\mathbf{S}) \cdot d\mathbf{S} \quad (8)$$

En este caso se utiliza el resultado del vector de poynting de la parte anterior 7 considerando una esfera de radio arbitrario r , así el diferencial de superficie dS estará dado por $dS = r^2 \cdot \sin\theta d\theta d\phi \hat{\mathbf{r}}$. Así tenemos el siguiente desarrollo:

$$P = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{1}{2} \frac{(I\Delta z)^2}{16\pi^2} \omega\mu\beta \frac{\sin^2\theta}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \cdot r^2 \sin\theta d\theta d\phi \hat{\mathbf{r}} \quad (9)$$

$$P = \frac{(I\Delta z)^2}{32\pi^2} \omega\mu\beta \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi \sin^3\theta d\theta \quad (10)$$

$$P = \frac{(I\Delta z)^2}{32\pi^2} \omega\mu\beta 2\pi \frac{4}{3} \quad (11)$$

$$P = \frac{(I\Delta z)^2}{12\pi} \omega\mu\beta \quad (12)$$

Es así como se llega a la potencia total irradiada del dipolo ideal en la ecuación 12.

3.3. (c)

Cuando se toma el supuesto de $r \gg \lambda$, las ecuaciones para los campos quedan de la siguiente manera.

$$\mathbf{E} = \frac{I\Delta z}{4\pi} j\omega\mu \frac{e^{-j\beta r}}{r} \sin\theta \hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (13)$$

$$\mathbf{H} = \frac{I\Delta z}{4\pi} j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{r} \sin\theta \hat{\boldsymbol{\phi}} \quad (14)$$

Luego, calculando el vector de Poynting se tiene como resultado la Ecuación 15:

$$\mathbf{S} = \frac{(I\Delta z)^2}{32\pi^2} \omega\mu\beta \frac{\sin^2\theta}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (15)$$

Notar que la potencia del vector \mathbf{S} tiene dirección radial y no presenta parte imaginaria, por lo que la potencia reactiva es nula.