
Diseño y Medición de un Arreglo de Antenas Para la Detección de FRBs Galácticos

Reporte EL7850

Autor
Diego Gallardo

2 de octubre de 2023

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Requerimientos de la Antena	2
1.2.1. Forma del Patrón de Radiación y HPBW	3
1.2.2. Doble Polarización	5
1.2.3. Capacidad de Formación en Arreglo de "L": Tamaño de la Antena Individual	5
2. Diseño y Simulación de la Antena	12
2.1. Método de Diseño	12
2.2. Sobre Polarización y el Diseño Esperado de la Antena	13
2.3. Diseño inicial de la Antena Individual	16
2.4. Miniaturización de la Antena Individual	17
2.5. Forma final y Simulaciones de la Antena Individual	19
2.6. Formación de los CHOPAN	23
3. Construcción y Mediciones	25
3.1. Construcción	25
3.2. Medición de una antena individual	26
3.3. Medición del Arreglo	26

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Las ráfagas de radio rápidas (o FRBs por sus siglas en inglés) son eventos astronómicos con características extraordinarias. Según lo que se ha observado hasta la fecha, las FRBs corresponden a ondas de radio (100-8000 MHz) con una corta duración (de a lo más unos cuantos milisegundos), pero que presentan tanta energía como la expelida por el sol en 3 minutos.

Hasta el día de hoy, la gran mayoría de las FRBs detectadas han sido de origen extragaláctico (más específicamente, solo una ha sido de origen galáctico). Debido a la inmensa distancia que nos separa del origen de estos eventos, la potencia que llega a la Tierra es minúscula. Por esta razón, se han requerido radiotelescopios de gran envergadura para detectar FRBs, tales como CHIME y FAST. Sin embargo, si una FRB ocurriera en la vía láctea, se estima que esta podría ser detectada con radiotelescopios mucho más pequeños. Bajo este contexto nace el proyecto ARTE (*Astronomical Radio Transients Experiment*): un radiotelescopio que se encuentra en desarrollo en el laboratorio de ondas milimétricas, y que tiene como objetivo detectar FRBs provenientes de la vía láctea.

Considerando el poco conocimiento que se tiene de las FRBs, y su relevancia para la comunidad científica, el lector puede inferir que el objetivo de ARTE es altamente atractivo y ambicioso por si solo. No obstante, otra característica muy valiosa de ARTE es que se trata de un radiotelescopio de *bajo costo* (al menos en comparación con otros radiotelescopios capaces de detectar FRBs, tales como CHIME, ASKAP o FAST). En efecto, uno de los componentes más simples de ARTE en cuanto a costo y ensamblaje es su antena, que presenta un costo menor a 250 USD y un tamaño total menor a $80 \times 25 \times 6$ cm³. Ahora bien, el diseño de la antena es todo menos simple (a juicio del autor), y su creación requirió de un proceso exhaustivo e innovador.

En este informe se muestra el diseño, la implementación y las mediciones preliminares de la antena de ARTE. Para esto, el informe se divide en tres capítulos. En lo que queda de este capítulo se muestran los requerimientos que debe cumplir la antena de ARTE, junto con algunas ideas básicas que fueron discutidas desde el inicio del proyecto. Posteriormente, en el Capítulo 2 se muestra el diseño de la antena, la explicación de todas las partes que la conforman, y sus simulaciones. Finalmente, en el Capítulo 3 se muestra la construcción de la antena junto con las mediciones preliminares realizadas en la cámara anecoica del laboratorio de ondas milimétricas.

1.2. Requerimientos de la Antena

En esta sección se muestran y explican los requerimientos que debe cumplir la antena de ARTE. Para esto, en primer lugar se listan los requerimientos, y luego se explican aquellos que no son tan convencionales (a juicio del autor).

Antes que nada, cabe mencionar que ARTE busca operar en el rango de frecuencias de 1200-1800 MHz (equivalente a un ancho de banda porcentual de 40%). Por lo tanto, es de esperar que todos los requerimientos mencionados a continuación deban cumplirse en este rango de frecuencias. Sin más preámbulos, los requerimientos para la antena de ARTE son:

- 1) $S_{11} < -10$ dB.
- 2) Eficiencia **simulada** mayor a 90 %.
- 3) Patrón de Radiación elongado que se adapte a la forma de la vía láctea. Esto implica un *ancho de haz a media potencia* (o HPBW por sus siglas en inglés) de por lo menos 80° en el eje x y de a lo más 15° en el eje y (ver Figura 1.1 (a)).
- 4) Doble polarización.
- 5) Relación *delante-atrás* (o FBR por sus siglas en inglés¹) mayor a 10 dB.
- 6) Capacidad para formar un arreglo con forma de "L" para la localización de fuentes. Como se puede ver en la Figura 1.1 (a), esto implica que se deben tener tres sub-antenas (las llamaremos así por ahora... sub-antenas).

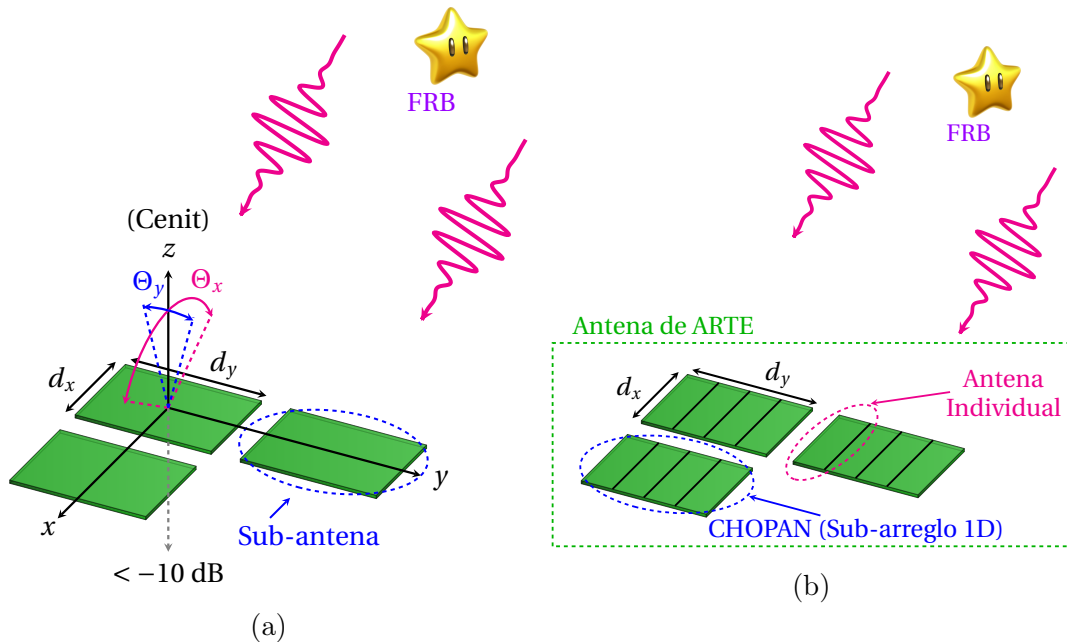


Figura 1.1: Diagrama para explicar los requerimientos de la antena de ARTE. (a) La antena debe estar conformada por tres sub-antenas para poder localizar las FRBs. Además, el HPBW en el eje x (Θ_x) debe ser mucho mayor al HPBW en el eje y (Θ_y). La ganancia en el lóbulo trasero debe ser por lo menos 10 dB menor a la ganancia en el cenit. (b) Deducción inicial de las partes que deben conformar la antena de ARTE.

¹Front to back ratio, no confundir con FRB o *Fast Radio Burst*.

1.2.1. Forma del Patrón de Radiación y HPBW

Como se mencionó en la sección 1.1, el proyecto ARTE tiene como finalidad observar FRBs provenientes de la vía láctea. Por ende, la antena de ARTE debe observar **solamente** la vía láctea (idealmente). Así, podemos tener una intuición inicial de cómo debería verse el patrón de radiación de cada sub-antena. Si se observa la proyección del patrón de radiación en el plano galáctico, se debería ver algo como lo mostrado en el panel (a) de la Figura 1.2, y si se considera el patrón completo en su forma 3D, se debería tener algo como lo mostrado en el panel (b).

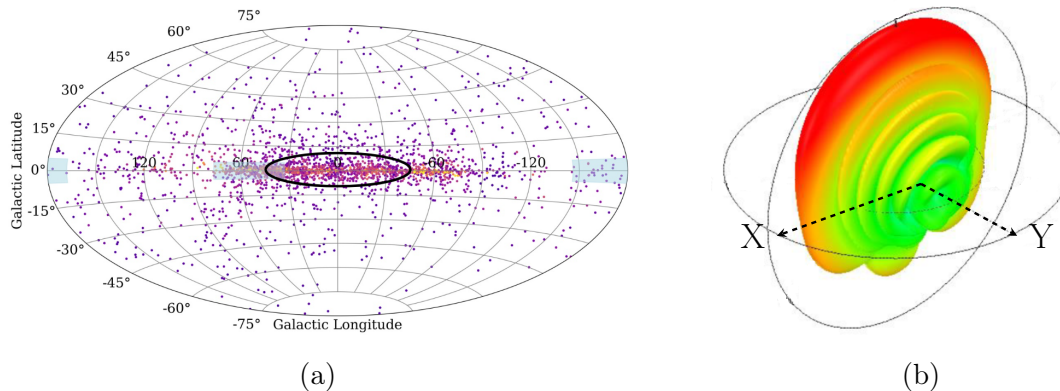


Figura 1.2: Forma esperada del patrón de radiación de cada sub-antena. (a) Proyección en el plano galáctico. (b) Patrón de radiación 3D.

Teniendo esto en cuenta, Ricardo, David y yo tuvimos una idea inicial sobre cómo deberían ser las sub-antenas que forman la "L" de ARTE: Deben ser arreglos en una dimensión (ver Figura 1.1 (b)), ya que la forma del patrón de radiación de la Figura 1.2 (b) es típica de los arreglos 1D (en efecto, se sintetiza un haz delgado solo en la dirección del arreglo, mientras que el corte ortogonal se mantiene inalterado). Para evitar confusiones en el resto del informe, diferenciaremos las antenas de la siguiente forma: A la antena más pequeña que conforma las sub-antenas la llamaremos *antena individual*. A las sub-antenas las llamaremos *CHOPAN* (por la sigla recursiva un poco -pero ni tan- forzada **Chopan is a Half-space Orthogonal Printed ANntena**²). Finalmente, al conjunto completo con forma de "L" lo llamaremos *antena de ARTE*. Nótese que todo lo que se ha descrito hasta ahora son solo ideas iniciales (algo así como el primer bosquejo sobre cómo debe ser la antena). La descripción detallada del desarrollo de la antena se muestra en el Capítulo 2.

Por último, cabe mencionar una última propuesta inicial relacionada con el patrón de radiación de la antena. Si sabemos que los HPBWs deben ser de $80^\circ \times 15^\circ$ aproximadamente, y que el corte de 15° se logra con un arreglo 1D, podemos usar como antena individual una que tenga HPBWs de $80^\circ \times 80^\circ$. Con esto, podemos concluir que el arreglo 1D se debe componer de 8 elementos. ¿Cómo concluimos esto? Nuevamente, esto fue solo una idea inicial que hablamos con Ricardo y David (que evidentemente fue verificada posteriormente con simulaciones), y que se basa en aproximaciones que se pueden hacer con la teoría de arreglos de antenas. Las aproximaciones son las siguientes: En un arreglo de antenas, cada vez que se duplica el número de elementos, la ganancia aumenta en 3 dB y el HPBW se reduce a la mitad (recordar, son solo aproximaciones!). Con esto, se deduce

²*Half-space* ya que la antena es de semi-espacio (FBR > 10 dB), *Orthogonal* por la doble polarización y *Printed* porque es impresa, como se ve en el Capítulo 2.

que un arreglo de 2 elementos reduciría el HPBW de 80° a 40° . Con 4 elementos el HPBW se reduciría a 20° , y con 8 se obtendrían 10° .

Para optimizar el uso de recursos, podemos formar cada *CHOPAN* con 4 antenas solamente (y no 8). En efecto, se necesitan 3 *CHOPAN* para **localizar** FRBs en el cielo (un par de *CHOPAN* en el eje x y otro par en el eje y , usando un *CHOPAN* en común, como se ve en la Figura 1.1 (b)). Esto es para **localizar** las FRBs; proceso que evidentemente ocurre después de la **detección**. La detección es la parte más difícil en lo que respecta a sensibilidad, y por lo tanto es solo esta parte la que necesita un patrón de radiación totalmente adaptado a la vía láctea. En otras palabras, solo la detección necesita 8 elementos. Por lo tanto, podemos juntar dos *CHOPAN* de 4 elementos para realizar la detección, y de forma paralela podemos usar separados esos mismos *CHOPAN* para realizar la localización. Así, concluimos que la antena de ARTE debe tener la forma genérica de la Figura 1.3.

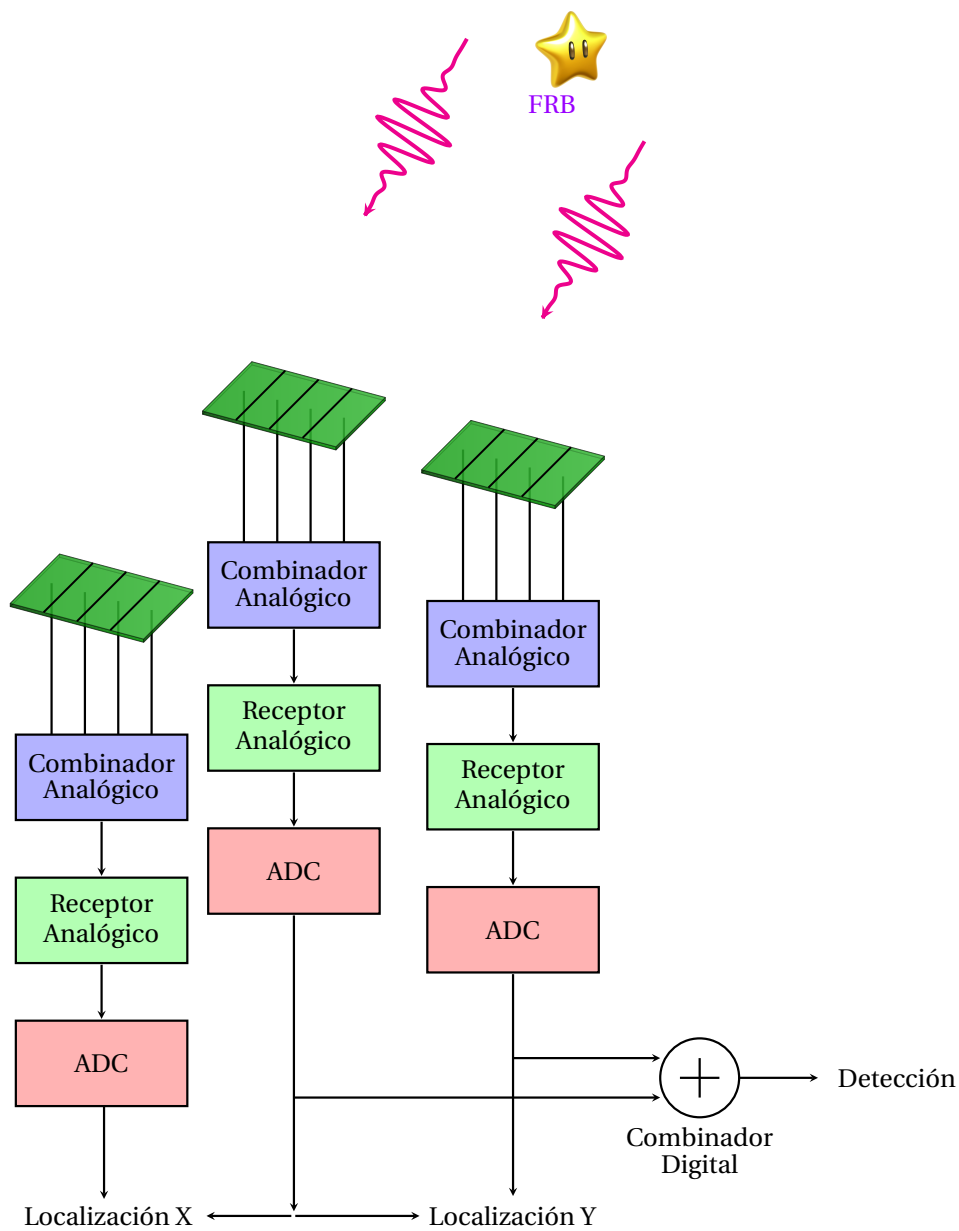


Figura 1.3: Forma genérica deducida de la antena de ARTE.

1.2.2. Doble Polarización

Acorde a lo documentado en [1], los FRBs pueden o no estar polarizados. Por ende, si se busca la mayor probabilidad de detección posible, se requiere una antena de doble polarización (o *dual-pol*). Esto implica que cada *CHOPAN* debe tener 2 salidas, una para cada polarización ortogonal. Además, cabe destacar que las antenas individuales deben ser simétricas, ya que las características radiativas deben ser idénticas en ambas polarizaciones.

1.2.3. Capacidad de Formación en Arreglo de "L": Tamaño de la Antena Individual

En general, formar un arreglo de antenas es simple: Basta con tomar muchas antenas iguales y colocarlas separadas unas de otras en el espacio. Diseñar un arreglo de antenas para que tenga un patrón de radiación específico, **sin ambigüedades de fase**, es, en cambio, una tarea que requiere cautela. En particular, una de las variables de diseño con mayor importancia para la formación de arreglos es el tamaño de las antenas individuales. Para poder entender **bien** esto, a continuación veremos un pequeño repaso sobre arreglos de antenas.

Repaso sobre arreglos de antenas

Como bien dice su nombre, un arreglo de antenas corresponde a un conjunto de dos o más antenas ubicadas en posiciones específicas del espacio. En estricto rigor, un conjunto de antenas se considera como arreglo solo si sus patrones de radiación se superponen en campo lejano. Si bien las antenas pueden ser diferentes y sus posiciones pueden ser arbitrarias, lo usual es usar la misma antena ubicada en una grilla planar con posiciones equidistantes y fijas, tal como se muestra en la Figura 1.4.

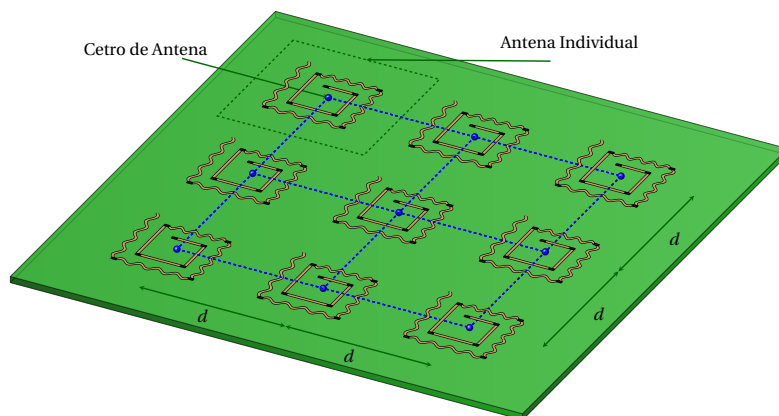


Figura 1.4: Ejemplo de un arreglo de 3×3 antenas. Todas las antenas son iguales y sus centros se ubican en una grilla planar (línea punteada azul) con espaciamiento uniforme d . Nótese que d corresponde a la distancia centro-centro entre antenas. Por ende, d siempre es mayor o igual al tamaño de la antena.

Los arreglos de antenas son útiles ya que permiten obtener una ganancia elevada y además permiten cambiar electrónicamente la dirección de máxima radiación. De esta forma, un arreglo de antenas da mayores libertades para moldear el patrón de radiación

de una antena a gusto. En este sentido, un arreglo de antenas es ideal para cumplir los requerimientos de ARTE, ya que, si bien es difícil diseñar una antena individual de doble polarización con un patrón de radiación elíptico, es fácil tomar una antena de doble polarización común y disponerla en un arreglo para moldear el patrón de radiación deseado (tal como se menciona en la sub-sección 1.2.1).

Para entender cómo funciona un arreglo de antenas, conviene estudiar primero el caso más simple posible, que consiste de dos antenas separadas por una distancia d , cuyas salidas son sumadas con un combinador, tal como se muestra en la Figura 1.5.

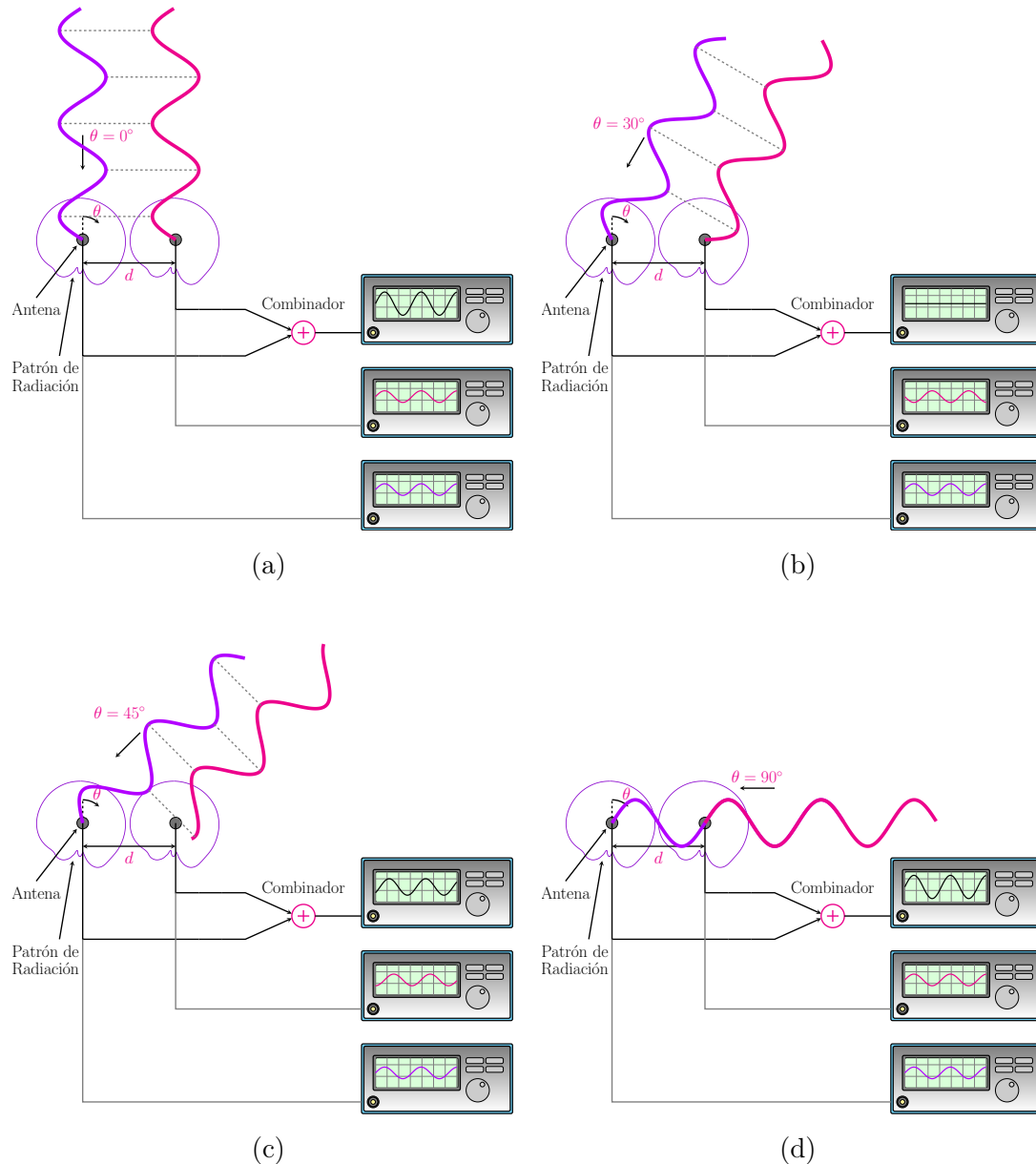


Figura 1.5: Ejemplo de un arreglo de dos antenas considerando distintos ángulos de incidencia.

En esta ilustración, las antenas (que se consideran idénticas) se simbolizan con círculos grises y sus patrones de radiación se muestran en función del ángulo θ . Como se puede ver de la figura, toda la teoría se reduce a la interferencia de ondas. La onda que incide en el arreglo llega desfasada a las antenas, dependiendo del ángulo de incidencia. Por

ejemplo, en el panel (a) se puede ver como la onda llega en fase a ambas antenas, y por lo tanto la interferencia es constructiva. En el panel (b), en cambio, la onda llega primero a la antena derecha, y exactamente media longitud de onda después, llega a la antena izquierda. Tras sumar ambas ondas desfasadas, se obtiene interferencia destructiva y, por ende, en ese ángulo no hay recepción. En el panel (c), las ondas no interfieren de manera totalmente destructiva, pero también están desfasadas, y por ende no se obtiene el máximo que se tiene para $\theta = 0^\circ$. Finalmente, en el panel (d) se puede notar que nuevamente hay interferencia constructiva, ya que la distancia d de separación entre antenas alcanza a albergar una longitud de onda completa.

En resumen, podemos ver que la recepción total de potencia en el arreglo se debe a dos factores: (1) el factor de interferencia, que se produce debido a que la onda llega desfasada a las antenas, y (2) el patrón de radiación del elemento individual (en efecto, la potencia recibida por cada antena es por definición proporcional al patrón de radiación). En teoría de arreglos, a estos factores se les conoce como *factor de arreglo* y *factor de elemento*, respectivamente. Así, si graficamos la potencia recibida en función de θ , obtenemos el gráfico de la Figura 1.6. Este corresponde al patrón de radiación total del arreglo, también conocido como *haz sintetizado*, y se obtiene tras ponderar el factor de elemento con el factor de arreglo (FA de ahora en adelante).

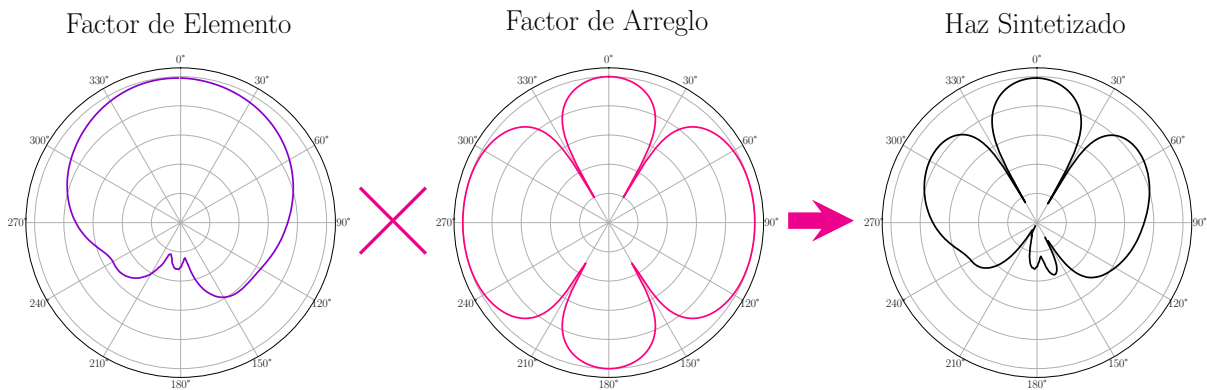


Figura 1.6: Patrones de Radiación (factor de elemento, factor de arreglo y haz sintetizado) del ejemplo de la Figura 1.5.

El lector puede notar que, en el ejemplo visto, el FA tiene cuatro lóbulos con máxima ganancia ($\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$). A dos de ellos se les denomina "lóbulos principales" (a los que están en $\theta = 0^\circ, 180^\circ$), mientras que a los otros se les denomina "lóbulos de enrejado". Recordando que el FA se debe puramente a la interferencia de ondas, se puede notar que los lóbulos con máxima ganancia solo se obtienen en los ángulos θ donde hay interferencia constructiva (o equivalentemente, cuando las ondas recibidas por ambas antenas difieren en múltiplos de la longitud de onda). Ahora bien, nótese que si la distancia d fuera menor a la longitud de onda ($d < \lambda$), entonces no habría interferencia constructiva en $\theta = 90^\circ, 270^\circ$, y por ende no existirían los lóbulos de enrejado. El lector puede empezar a inferir, entonces, que la distancia d es fundamental en el diseño de arreglos. Además de esto, el lector puede inferir que si en el ejemplo ocurre un desfase de 0° para dos ángulos ($\theta = 0^\circ$ y $\theta = 90^\circ$), entonces también debería ocurrir un desfase de 10° para dos ángulos, y un desfase de 20° para dos ángulos, y en general cualquier desfase debería ocurrir en dos ángulos. Este fenómeno se muestra en la Figura 1.7 y se denomina **ambigüedad de fase**, ya que existe más de un ángulo θ para el cual la diferencia de fase entre las antenas es

la misma. Nótese que los fenómenos de lóbulos de enrejado y de ambigüedad de fase son equivalentes: ambos se deben puramente a la interferencia de ondas dada la distribución geométrica de las antenas en el arreglo y, por ende, ambos se deben a la distancia d .

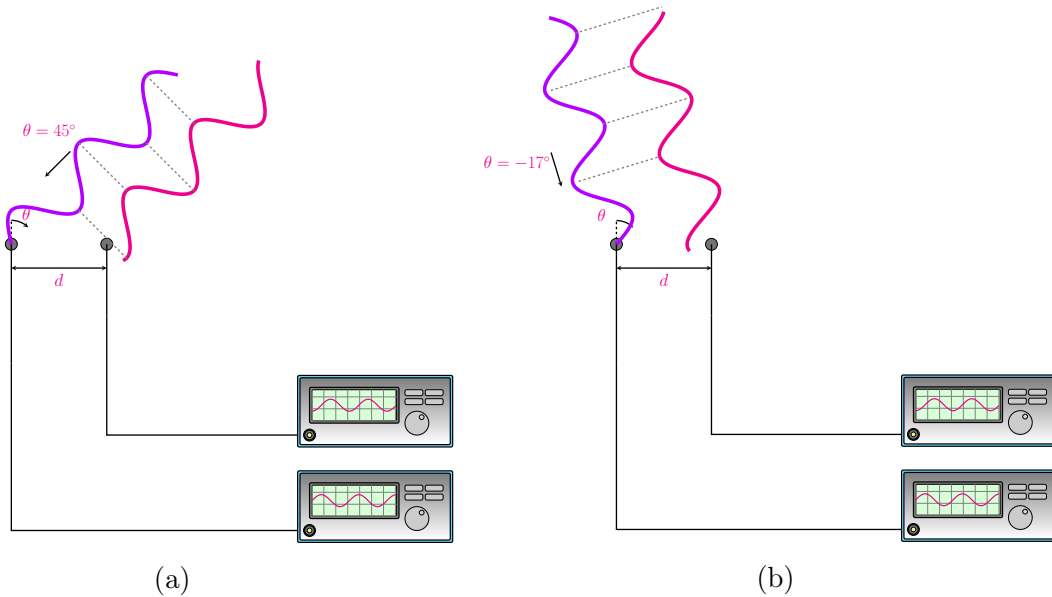


Figura 1.7: Ejemplo de ambigüedad de fase. En ambos paneles se tiene que la antena izquierda recibe un seno, mientras que la antena derecha recibe un coseno negativo. En otras palabras, en ambos casos se tiene un desfase de 90° entre antenas, pero los ángulos de incidencia son distintos ($\theta = 45^\circ$ en (a) y $\theta = -17^\circ$ en (b)).

¿En qué nos afecta la existencia de estos fenómenos? Si queremos localizar fuentes usando un arreglo de antenas, tenemos dos opciones: (1) Escanear el espacio completo mediante el movimiento electrónico del haz sintetizado, y buscar los lugares con mayor recepción de potencia³, o (2) medir la diferencia de fase entre las ondas recibidas por las antenas y posteriormente estimar el ángulo de incidencia (es decir, la localización). El primer método no es usado en ARTE ya que requiere mucho tiempo (se debe recordar que las FRBs tienen una duración del orden de milisegundos, y escanear el espacio completo toma tiempo) y además tiene poca precisión. Para usar el segundo método, necesitamos que la relación ángulo-fase sea única, lo que evidentemente no se cumple si hay ambigüedad de fase. Por ejemplo, si nos referimos al caso de la Figura 1.7, vemos que tras medir un desfase de 90° en las antenas, no tenemos cómo saber si la fuente proviene de $\theta = 45^\circ$ o de $\theta = -17^\circ$. Por lo tanto, el lector puede inferir que se debe escoger cuidadosamente la distancia d entre antenas para poder localizar fuentes.

Para inferir el valor de d , considérese la Figura 1.8. Como se puede observar, si hay ambigüedad de fase en cualquier par de ángulos θ_1 y θ_2 , necesariamente es porque se cumple la relación mostrada en (1.1).

³Este es un método muy común, pero, como no es usado en ARTE, no es explicado con mayor profundidad. El lector interesado puede ver [2-4].

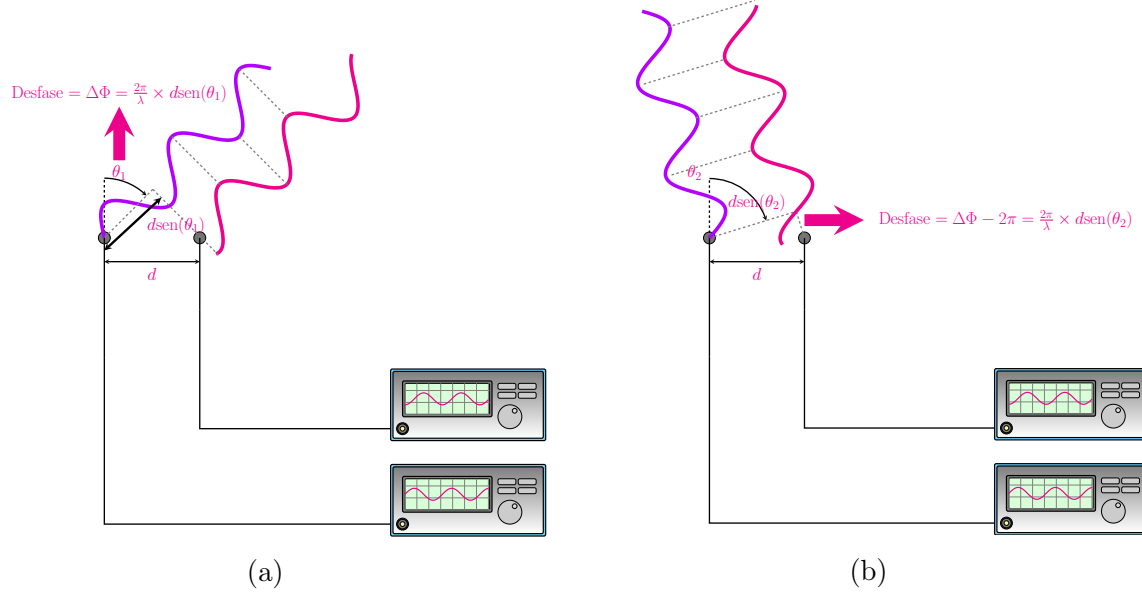


Figura 1.8: Generalización de los casos de ambigüedad de fase para ángulos arbitrarios θ_1 y θ_2 .

$$\begin{aligned} \frac{2\pi d}{\lambda} \text{sen}(\theta_1) &= \Delta\Phi \\ \frac{2\pi d}{\lambda} \text{sen}(\theta_2) &= \Delta\Phi \pm 2\pi, \end{aligned} \quad (1.1)$$

siendo $\Delta\Phi$ la diferencia de fase medida entre antenas. Equivalentemente, se tiene

$$\begin{aligned} \frac{2\pi d}{\lambda} \text{sen}(\theta_1) - \frac{2\pi d}{\lambda} \text{sen}(\theta_2) &= \pm 2\pi \\ \Leftrightarrow \frac{d}{\lambda} (\text{sen}(\theta_1) - \text{sen}(\theta_2)) &= \pm 1. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Por lo tanto, si **no queremos** que haya ambigüedad de fase, necesitamos que la diferencia entre $\frac{2\pi d}{\lambda} \text{sen}(\theta_1)$ y $\frac{2\pi d}{\lambda} \text{sen}(\theta_2)$ sea menor a 2π (en palabras: no se puede medir la misma diferencia de fase en dos ángulos distintos). En consecuencia, se debe cumplir

$$\Leftrightarrow \frac{d}{\lambda} (\text{sen}(\theta_1) - \text{sen}(\theta_2)) < \pm 1. \quad (1.3)$$

Si θ_1 y θ_2 pueden tomar cualquier valor (si se busca que no haya ambigüedad de fase en todo el espacio), entonces lo más extremo es tomar $\theta_1 = 90^\circ$ y $\theta_2 = -90^\circ$, y se concluye de (1.3) que $d < \lambda/2$. Este es el criterio más riguroso, y es muy usado en la literatura de antenas [2]. Desafortunadamente, es un criterio muy estricto, ya que, como d es siempre mayor o igual al tamaño de las antenas que conforman el arreglo, se concluye que solo se pueden usar antenas relativamente pequeñas (con tamaños menores a $\lambda/2$).

Para concluir, veamos otro caso importante. Supongamos que el factor de elemento de las antenas que conforman el arreglo es nulo para todo θ fuera del rango $(-\Theta_0, \Theta_0)$,

siendo $\Theta_0 < 90^\circ$ (este es un caso hipotético que no se puede lograr en la realidad, pero que necesitamos para formar la última conclusión de esta sección). En tal caso, como θ_1 y θ_2 solo se pueden encontrar en $(-\Theta_0, \Theta_0)$ (cualquier señal de otra procedencia simplemente no sería recibida por las antenas individuales), se tiene que el caso más extremo de (1.3) se da para $\theta_1 = \Theta_0$ y $\theta_2 = -\Theta_0$, obteniendo

$$d < \frac{\lambda}{2 \operatorname{sen}(\Theta_0)}. \quad (1.4)$$

Entonces, si tuviésemos un arreglo formado por antenas hipotéticas con $\Theta_0 = 30^\circ$, por ejemplo (ver Figura 1.9), veríamos que solo sería necesario cumplir $d < \lambda$, siendo este un criterio mucho menos estricto que $d < \lambda/2$!. Desafortunadamente, no es posible crear antenas con un patrón como el mostrado en la Figura 1.9. Por lo tanto, el criterio (1.4) no es muy riguroso, pero sí da una buena intuición para el diseñador de arreglos, siempre y cuando este conozca el factor de elemento de la antena individual (y en particular sus HPBW y FNBW⁴).

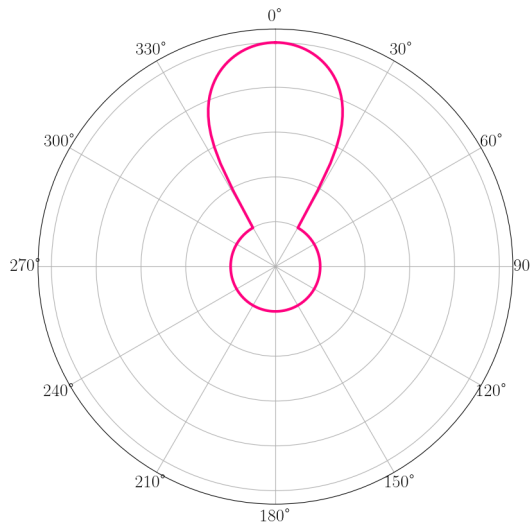


Figura 1.9: Patrón de radiación hipotético con un valor muy cercano a 0 para cualquier ángulo fuera del rango $(-30^\circ, 30^\circ)$.

Sobre el tamaño de la antena individual

Como se menciona en la subsección anterior, es sabido que para formar un arreglo sin ninguna ambigüedad de fase, es necesario que las antenas estén separadas por una distancia d (distancia centro-centro) de a lo más $\lambda/2 = c/(2f)$, siendo λ la longitud de onda a la frecuencia de operación f , y c la velocidad de la luz. Si la antena opera en un rango $f_{\min} - f_{\max}$ (frecuencias mínima y máxima, respectivamente), entonces el criterio $d < c/(2f)$ se debe cumplir en todo el rango de frecuencias, y por lo tanto se debe cumplir

⁴First null beam width.

$$d < \frac{c}{2f_{\text{máx}}} \left(< \frac{c}{2f}, \quad \forall f \in (f_{\text{mín}}, f_{\text{máx}}) \right). \quad (1.5)$$

En el caso de ARTE, como $f_{\text{máx}} = 1.8 \text{ GHz}$, se debe cumplir

$$d < 8.32 \text{ cm}. \quad (1.6)$$

Ahora bien, recordemos que el criterio $d < c/(2f)$ solo debe ser cumplido si no queremos ambigüedades de fase **en todo el espacio**. A su vez, al menos para nuestra aplicación en ARTE, la razón por la que no queremos ambigüedades de fase es para localizar las FRBs. Por ende, como la localización de fuentes se hace por medio de los 3 *CHOPAN*, estas son las antenas en las que nos tenemos que fijar como *antenas que forman el arreglo* (que es el arreglo en forma de "L"). Si revisamos la Figura 1.1, vemos que cada *CHOPAN* tiene un tamaño d_x, d_y en los ejes x e y , respectivamente. Si la brecha entre cada *CHOPAN* es nula (es decir, si acercamos los *CHOPAN* lo más posible sin que se solapen), tenemos que la distancia entre antenas del arreglo "L" es d_x, d_y . Como en el eje x el campo de visión del arreglo es amplio, queremos que en ese eje no haya ambigüedades de fase en todo el espacio. Es decir, en tal caso se debe cumplir (1.6). Por otro lado, como en el eje y se espera un campo de visión delgado, podemos relajarnos más con el criterio de tamaño (y, de hecho, eso es lo esperable, ya que como cada *CHOPAN* se compone de 4 antenas individuales en el eje y , en tal dirección los *CHOPAN* son más grandes). En tal caso, podemos usar (1.4) considerando $\Theta_0 = 15^\circ$, con lo que obtenemos

$$d_y < \frac{\lambda}{2 \text{sen}(\Theta_0)} = \frac{c}{2f \text{sen}(\Theta_0)} \quad \forall f \in (f_{\text{mín}}, f_{\text{máx}}) \Leftrightarrow d_y < \frac{c}{2f_{\text{máx}} \text{sen}(\Theta_0)} = 32.18 \text{ cm}$$

Como cada *CHOPAN* se compone de 4 antenas individuales, y a su vez $8.32 \text{ cm} \times 4 \approx 32.18 \text{ cm}$, concluimos que la antena individual de ARTE debe tener un tamaño menor a 8.32 cm.

Como comentario final, nótese que la deducción del tamaño en el eje y no es del todo riguroso debido a la incertidumbre en (1.4) (que solo es válida para patrones de radiación como los mostrados en la Figura 1.9). Por ende, una vez obtenidos los resultados de la antena (simulados y medidos), como diseñadores debemos volver a revisar que no hayan problemas de ambigüedad de fase.

Capítulo 2

Diseño y Simulación de la Antena

En el capítulo anterior se mostró la motivación y los objetivos de este trabajo, junto con algunas ideas iniciales de cómo debe ser la antena de ARTE. En este capítulo se muestran los pasos específicos y las decisiones tomadas en el diseño de la antena, además de las simulaciones que la validan para el posterior proceso de construcción.

2.1. Método de Diseño

Generalmente, cuando alguien pide una antena con muchos requerimientos, lo usual (y más lógico) es empezar usando una antena existente que cumpla la mayor cantidad de requerimientos posibles (en realidad, lo más sensato es buscar una antena que cumpla **todos** los requerimientos, pero en nuestro caso, no se encontró ninguna antena en la literatura que cumpliera con los requerimientos específicos de ARTE). Teniendo esto en consideración, se optó por comenzar con el diseño propuesto en [5] (mostrado en la Figura 2.1), que cumple con los puntos (1), (2), (4) y (5) del Capítulo 1. Teniendo esta antena como punto de partida, solo faltaría ajustar el modelo para que funcione en el rango de interés de 1200-1800 MHz, (i) miniaturizar la antena para que sea factible para la formación en arreglo (punto 6), (ii) formar el sub-arreglo *CHOPAN* para moldear el patrón de radiación y lograr un haz que se adapte a la vía láctea (punto 3), y finalmente (iii) ajustar la distancia del plano de tierra para lograr una operación óptima en la banda de 1200-1800 MHz (optimización del punto 5). Cada uno de estos puntos (i-iii) se muestra de forma detallada en las secciones que siguen en este capítulo.



Figura 2.1: Antena propuesta en [5].

2.2. Sobre Polarización y el Diseño Esperado de la Antena

Para poder entender la forma que tiene la antena individual, debemos primero hacer una pequeña revisión sobre las antenas *dual-pol*. En esta sección se da un resumen de porqué son necesarias las antenas *dual-pol*, y se concluye sobre la forma genérica que debe tener la antena individual de ARTE.

Todas las antenas que tienen una sola salida (o entrada, dependiendo de si se ven como receptoras o transmisoras) tienen polarización, sin importar qué tan complejas sean. Dicho de otra forma, cualquier antena de un solo puerto es sensible a una polarización (la que se denomina *copol*), mientras que es inútil o ciega a la polarización ortogonal (que se denomina *crosspol*). Ejemplos de esto se muestran en la Figura 2.2. En el panel (a) se pueden observar dos dipolos ortogonales. El dipolo 1 solo puede recibir el campo eléctrico que varía en el eje x , mientras que el dipolo 2 solo puede recibir aquel que varía en el eje y . El lector podría pensar entonces que si se sumaran las salidas de ambos dipolos, se podría crear una antena sensible a cualquier polarización, tal como se muestra en el panel (b) de la figura. Desafortunadamente, esto no es lo que ocurre, ya que a fin de cuentas se sintetiza una nueva polarización (diagonal en este caso), y sigue existiendo una componente ortogonal que no es recibida. Lo mismo ocurriría si se sumasen las salidas desfasadas de los dipolos, tal como se muestra en los paneles (c) y (d). En efecto, la antena resultante tiene polarización circular izquierda (LHCP por sus siglas en inglés) y puede recibir cualquier polarización lineal (como se muestra en el panel (c)), sin importar la orientación que tenga (a costa de recibir solo la mitad de la potencia). Sin embargo, ahora la antena no es sensible a la polarización circular derecha (RHCP por sus siglas en inglés), y por ende habrían casos en los que la antena sería ciega (como se muestra en el panel (d)). En resumen, no existe ninguna antena de un solo puerto que sea sensible a cualquier polarización. Siempre se necesitan dos puertos, tal como se muestra en la Figura 2.3. En otras palabras, siempre que se busque sensibilidad a cualquier tipo de polarización (*dual-pol*), es necesario tener dos puertos.

Ahora que hemos concordado en que una antena *dual-pol* requiere dos puertos, veamos los casos de la Figura 2.3. Nótese que en ambos casos se tienen las dos polarizaciones ortogonales, y por lo tanto ambos casos podrían ser usados en ARTE. Sin embargo, el caso del panel (a) es preferible, ya que se ahorra espacio al poder colocar ambos dipolos en el mismo centro, como se muestra en el panel (c).

Ahora bien, nótese que usar dipolos tiene un pequeño inconveniente para nuestra aplicación. Recordando lo que discutimos en el Capítulo 1, cada *CHOPAN* está compuesto por 4 antenas pequeñas, y sintetiza un haz delgado en la dirección que contiene al arreglo (ver Figura 2.4 (a)). Como los dipolos presentan diferencias en los planos X e Y del patrón de radiación, se puede notar que las antenas resultantes tendrán patrones de radiación diferentes para cada polarización tras la formación del arreglo, tal como se muestra de forma separada en la Figura 2.4 (b). Esto no ocurriría si las antenas individuales presentaran cortes idénticos en ambos ejes.

La solución a esta problemática es sencilla: Los dipolos se deben disponer tal como se muestra en la Figura 2.5 (a). De esta forma, los planos X e Y son idénticos (dada la simetría de la configuración), y por ende la formación del arreglo afecta de la misma forma a ambas polarizaciones (ver Figura 2.5 (b)).

Como conclusión de esta sección, ahora sabemos que forma debe tener la antena individual: Debe estar formada por dos dipolos ortogonales entre sí, y debe estar ubicada en forma diagonal con respecto al eje de formación del sub-arreglo *CHOPAN*.

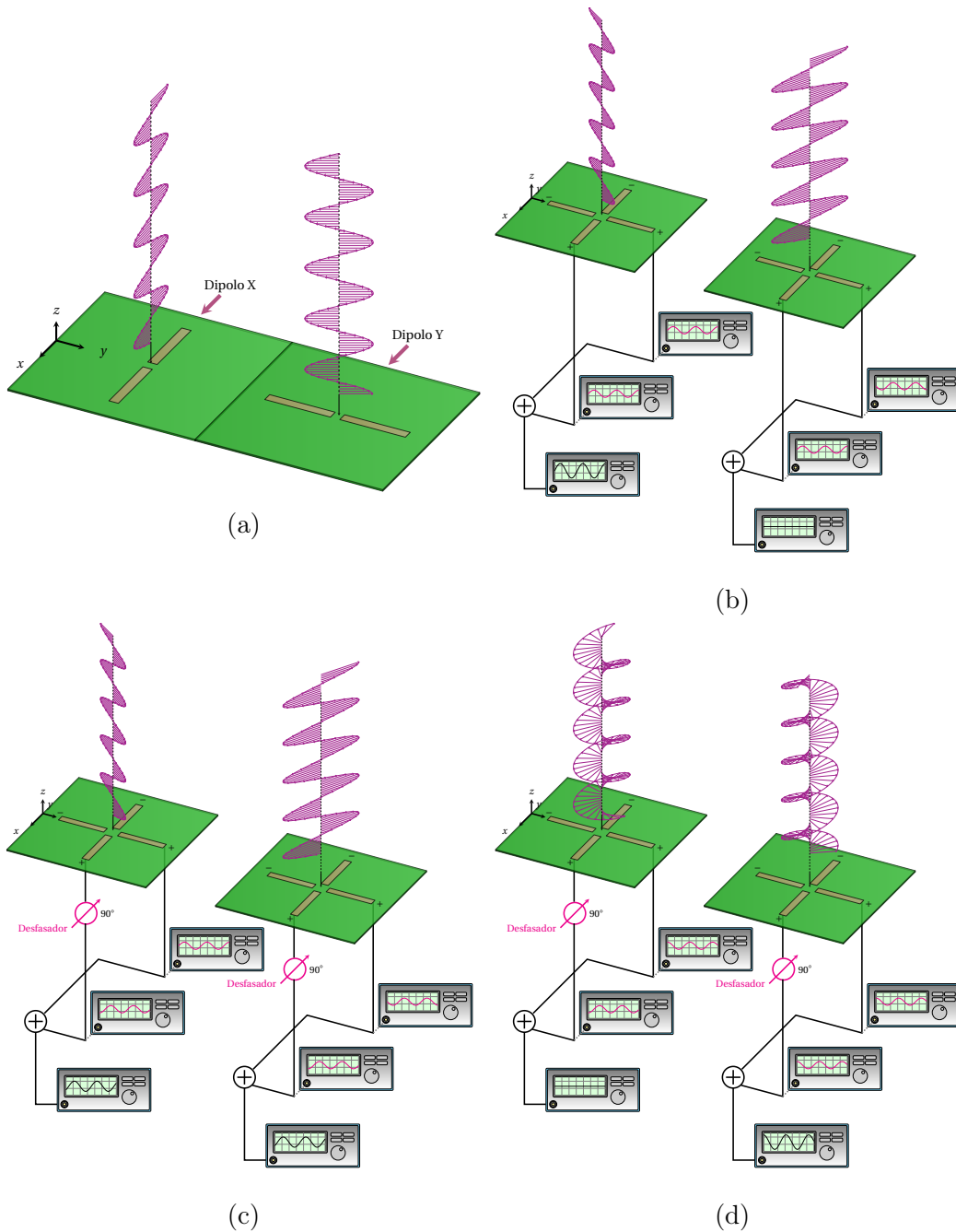


Figura 2.2: Ejemplos de recepción en antenas de un solo puerto. (a) Antenas dipolo vistas por separado. (b) Unión de dipolos ortogonales. Nótese que las salidas de los dipolos en X e Y son sumadas, formando un solo puerto. A la izquierda se muestra la recepción de una onda con polarización *copol*, mientras que a la derecha se muestra la recepción con polarización *crosspol*. (c) Mismo caso que en el panel (b) pero considerando un desfasador de 90° en el dipolo X. Como se puede notar (no es fácil; el lector debe usar energía mental para seguir esta figura), la antena resultante puede recibir cualquier polarización lineal, pero a costa de recibir menos potencia. (d) Mismo caso que en (c) pero ahora considerando la recepción de ondas con polarización circular derecha e izquierda.

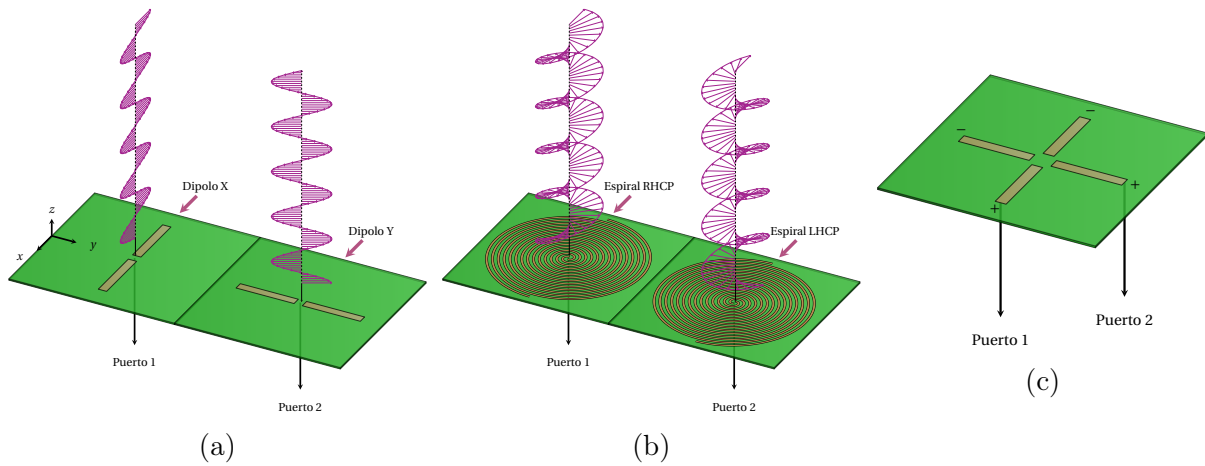


Figura 2.3: Ejemplos de antenas *dual-pol* que podrían ser usadas en ARTE. (a) Dos dipolos cruzados. (b) Espirales Arquimedianas con distinto sentido de giro. (c) Dipolos cruzados con mismo centro (se ahorra espacio).

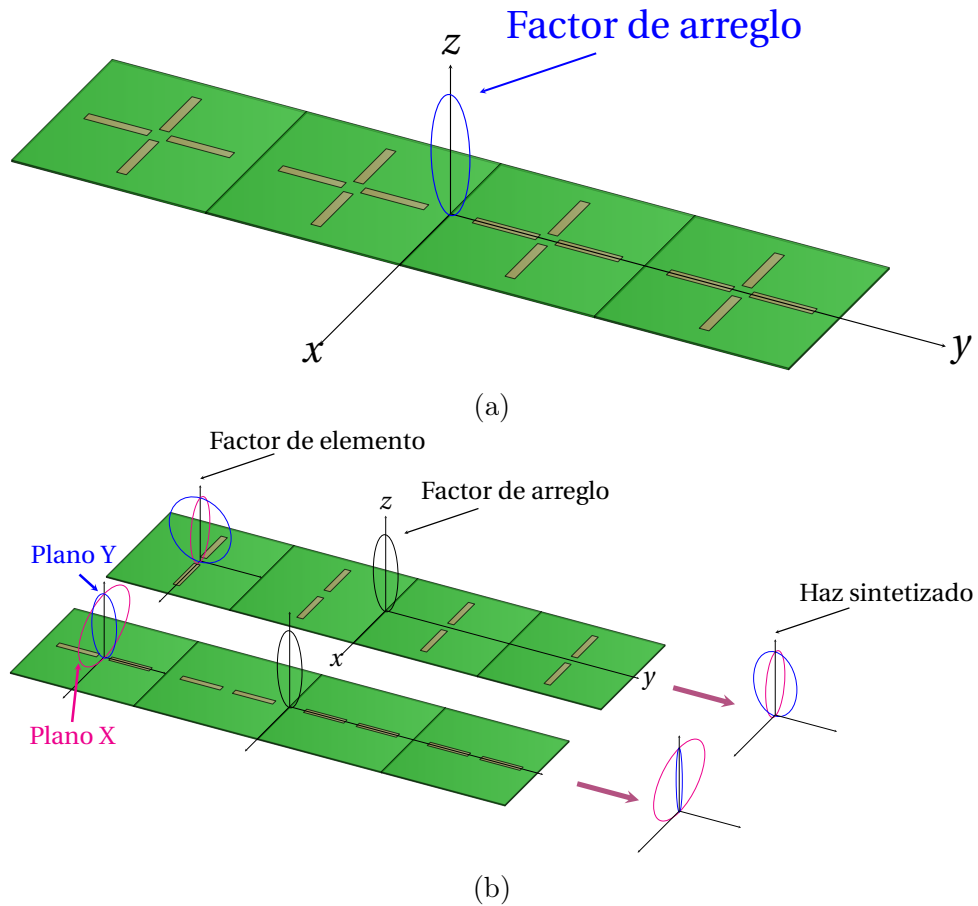


Figura 2.4: Formación de un *CHOPAN* considerando dipolos cruzados como antenas individuales. Los cortes del patrón de radiación son solo bosquejos, e ignoran la parte inferior ($z < 0$) debido a la futura presencia del plano de tierra. Lo importante es notar la diferencia entre los cortes de los planos X e Y (el lector debe recordar que los dipolos son omnidireccionales, y presentan un corte ancho en el plano H y otro delgado con forma de "8" en el plano E.)

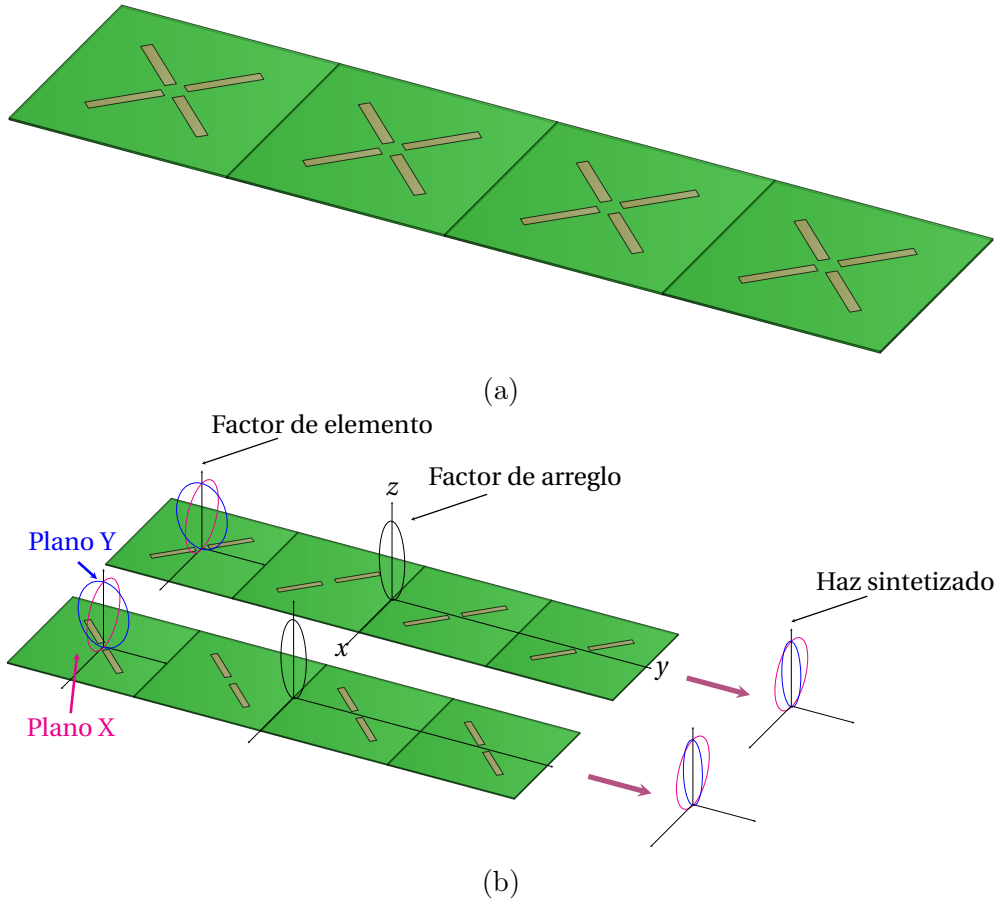


Figura 2.5: Mismo caso que en la Figura 2.4, pero ahora usando dipolos diagonales al eje de formación del arreglo.

De esta manera, concluimos que la antena individual debe estar constituida por dos dipolos cruzados y orientados de forma diagonal con respecto al eje de formación del arreglo.

2.3. Diseño inicial de la Antena Individual

Como ya se mencionó, el diseño inicial de la antena es aquel propuesto en [5] (Figura 2.1). Ahora bien, es necesario entender este diseño para hacerle modificaciones. Por esta razón, en esta sección se explica el diseño usado como punto de partida, que fue dibujado en HFSS y se muestra en la Figura 2.6.

En primer lugar, podemos observar que la antena consta de 4 dipolos y dos líneas de alimentación, una para cada polarización. Los dipolos 1 y 2 (panel (b) de la figura) son paralelos entre sí, y por lo tanto se asocian a la misma polarización (nombrémosla *polarización 1*). Los dipolos 3 y 4 son paralelos entre sí, y a su vez son ortogonales a los dipolos 1 y 2, y por lo tanto corresponden a la polarización ortogonal (nombrémosla *polarización 2*).

En este momento, el lector podría cuestionar por qué es necesario usar 4 dipolos en lugar de dos (por ejemplo, los dipolos 1 y 3, que ya cumplen con el requerimiento de *dual-pol*). De forma resumida, la respuesta es la siguiente: Individualmente, los dipolos

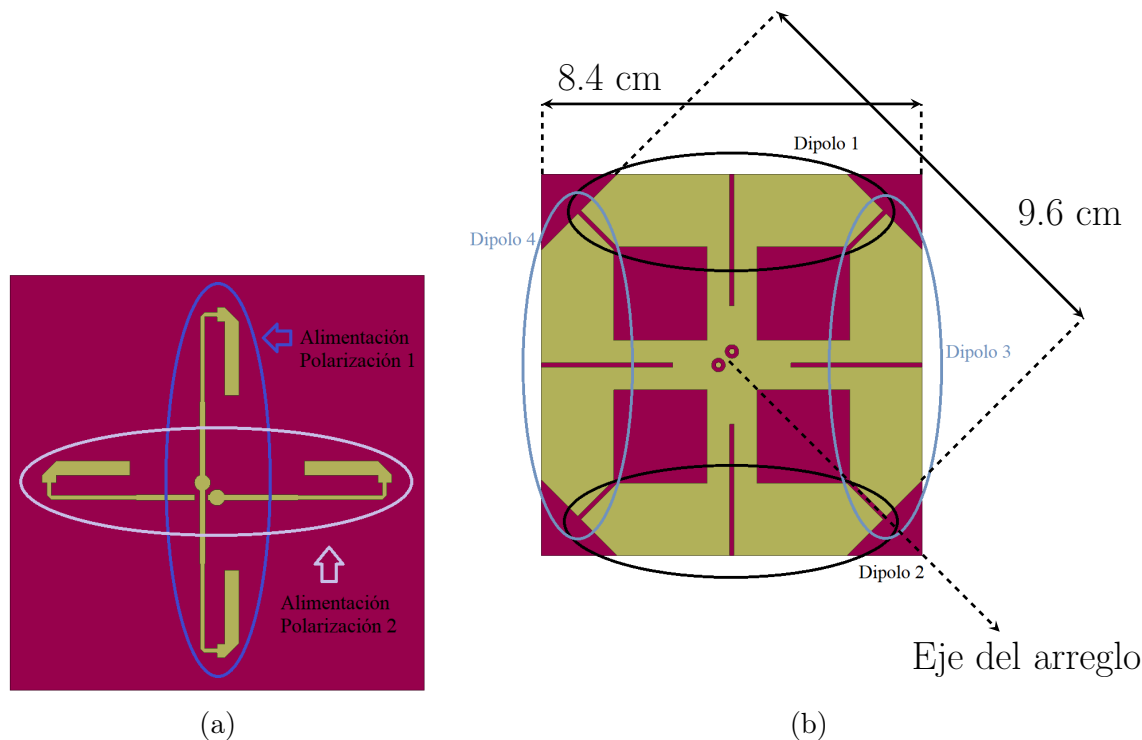


Figura 2.6: Dibujo de la antena inicial en HFSS. La antena es impresa en un sustrato RO4003C con 1.5 mm de espesor y tiene un tamaño de $8.4 \times 8.4 \text{ cm}^2$. (a) Cara Superior. (b) Cara inferior.

tienen altas reactancias y un ancho de banda reducido. Para eliminar tales reactancias, y aumentar el ancho de banda para que sea factible para ARTE, se usan las exóticas líneas de adaptación mostradas en la Figura 2.6 (a) [5]. La adaptación logra eliminar los altos valores reactivos, pero a costa de elevar el valor real de la impedancia por encima de los 100Ω . Como cada dipolo individual queda con una impedancia de 100Ω , es necesario colocar dos dipolos en paralelo para formar una impedancia equivalente de 50Ω en cada puerto de entrada.

2.4. Miniaturización de la Antena Individual

Si usamos la antena propuesta en [5] y escalamos sus parámetros para que funcione en el rango de operación de ARTE (1200-1800 MHz), obtenemos una antena con un tamaño de 9.6 cm en la dirección que nos interesa para formar el arreglo (esta antena es, de hecho, la que se muestra en la Figura 2.6). Según lo visto en el Capítulo 1, esto es inaceptable, ya que requerimos un tamaño menor a 8.32 cm. Por lo tanto, debemos proceder a miniaturizar la antena.

Ahora que entendemos cómo funciona la antena que se usó como punto de partida, sabemos qué partes hay que modificar para lograr miniaturizarla. Específicamente, se deben modificar las secciones longitudinales de los dipolos, tal como se muestra en la Figura 2.7 (a). Evidentemente, todos los dipolos deben ser alterados de la misma forma (los dipolos paralelos ya que no queremos asimetrías que puedan distorsionar el patrón de radiación, y los dipolos cruzados ya que ambas polarizaciones deben cumplir los mismos requerimientos).

¿Cómo se realiza la miniaturización? Claramente, no podemos simplemente escalar las dimensiones de los dipolos, ya que esto alteraría la frecuencia de operación de la antena. Para miniaturizar efectivamente un dipolo (es decir, variar su dimensión física sin alterar su frecuencia de operación), debemos disminuir el largo físico sin alterar el largo eléctrico. Dicho de otra forma, la corriente que viaja a través de los dipolos debe recorrer la misma variación de fase pero en una distancia física menor. Esto se puede hacer en estructuras longitudinales tras torcerlas, como se muestra en la Figura 2.8. Así, obtenemos la miniaturización de la Figura 2.7 (b). Notando la disminución de tamaño de 9.6 cm a 8 cm, concluimos que la antena individual es factible para la formación de los arreglos.

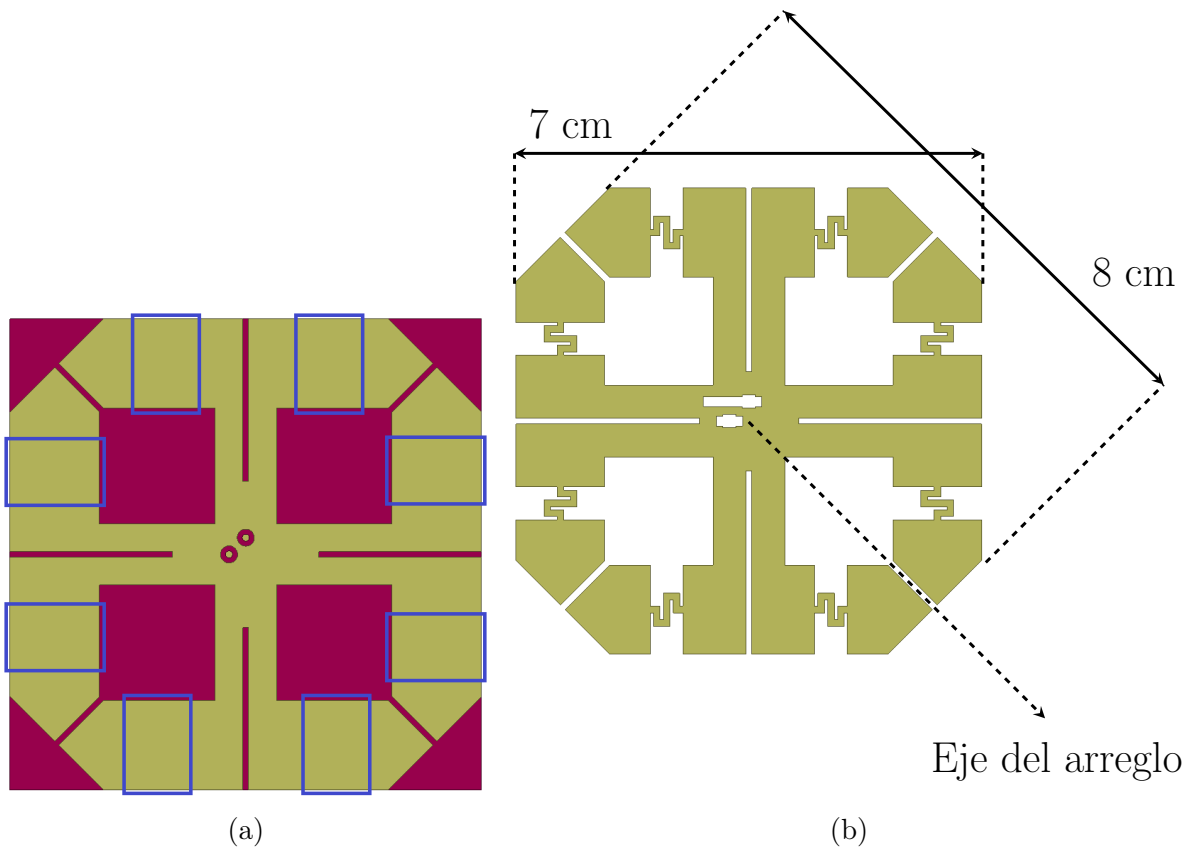


Figura 2.7: Miniaturización de la antena. (a) Forma original. En rectángulos azules se muestran las secciones que se deben modificar para lograr la miniaturización. (b) Forma miniaturizada.

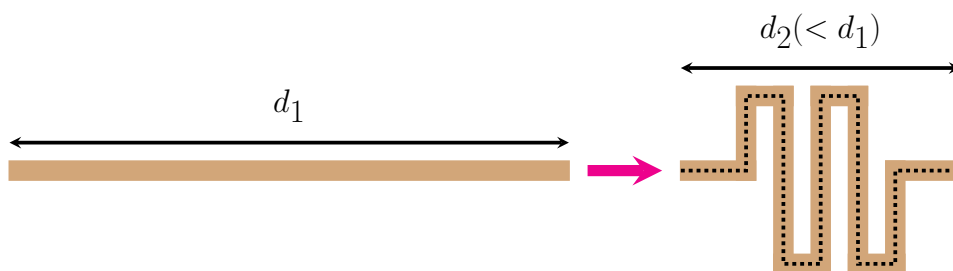


Figura 2.8: Miniaturización de un segmento longitudinal.

2.5. Forma final y Simulaciones de la Antena Individual

Tras modificar la antena propuesta en [5] para adaptarla al rango de 1200-1800 MHz, y tras miniaturizarla para que sea factible para la formación en arreglo, se obtiene el diseño de la Figura 2.9 (el sustrato usado es RO4003C de 1.5 mm de espesor). Las dimensiones relevantes se muestran en la Tabla 2.1

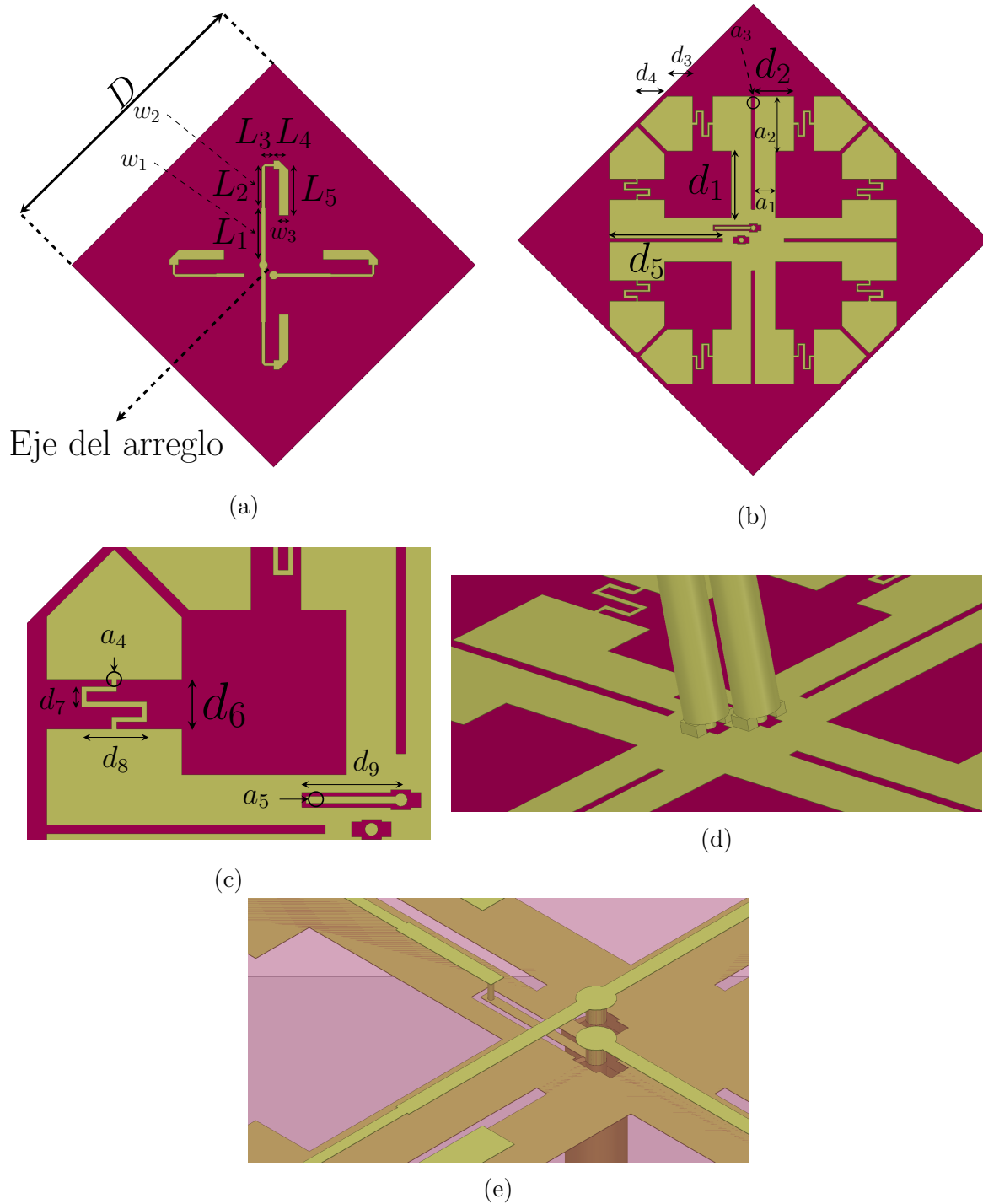


Figura 2.9: Diseño final de la antena individual.

Cuadro 2.1: Parámetros geométricos de la antena individual.

Vista Superior		Vista inferior	
Parámetro	Valor (mm)	Parámetro	Valor (mm)
D	8.2	d_1	16.46
L_1	16.48	d_2	9.55
L_2	12.19	d_3	6.2
L_3	2.95	d_4	6.75
L_4	2.95	d_5	27.85
L_5	14.45	d_6	5
w_1	1.1	d_7	2
w_2	0.8	d_8	6.5
w_3	2.7	d_9	9.5
-	-	a_1	5
-	-	a_2	13.5
-	-	a_3	0.9
-	-	a_4	0.5
-	-	a_5	0.7

El diseño final de la antena impresa consta de 4 dipolos y dos líneas de alimentación, una para cada polarización. Tales líneas de alimentación son a su vez alimentadas por cables coaxiales, tal como se muestra en la Figura 2.9 (d). Nótese que, idealmente, la alimentación de ambas polarizaciones debiese estar en el centro de la antena. Esto es evidentemente imposible, ya que se solaparían los cables coaxiales. Para solucionar esto, los puntos de alimentación se desplazaron lo mínimo posible, y se recurrió al uso de conectores IPEX en lugar de SMA (los primeros son mucho más pequeños). Además de esto, el lector puede observar que, debido a la ortogonalidad de ambas polarizaciones, hay un cruce entre las líneas de alimentación de la capa superior (Figura 2.9 (a)). Para solucionar este cruce sin que las líneas se toquen, se usó el cambio de nivel mostrado en la Figura 2.9 (e).

Finalmente, como recordará el lector del Capítulo 1, ARTE necesita un FBR mayor a 10 dB, y como se mencionó al comienzo de este capítulo, la antena propuesta en [5] ya cumple este criterio. La forma en la que la antena cumple el criterio es bastante estándar: se usa un plano reflector en la parte trasera de la antena. Evidentemente, la distancia entre la antena y el plano reflector es relevante, y es sabido que lo ideal es colocar el reflector a una distancia de $\lambda_c/4$, siendo λ_c la longitud de onda de la frecuencia central de operación [6]. Como ARTE opera entre 1200 y 1800 MHz, la frecuencia central es 1500 MHz, y por ende se concluye que el plano reflector debe posicionarse a una distancia de 5 cm de la antena, tal como se muestra en la Figura 2.10. Cabe destacar que todos los parámetros de la antena, mostrados en la Tabla 2.1, fueron optimizados considerando la presencia del plano reflector.

Con esta última incorporación, la antena individual es finalizada. Las simulaciones de los parámetros S de ambas polarizaciones, la eficiencia y el patrón de radiación en las frecuencias 1200, 1500 y 1800 MHz, se muestran en las Figuras 2.11, 2.12 y 2.13, respectivamente. Con respecto a los patrones de radiación, usamos la Figura 2.5 como referencia para los ejes x e y . Además, valores relevantes como la ganancia máxima y el HPBW se muestran en el título de cada gráfico, mientras que el criterio de FBR > 10 dB es cumplido con creces.

2.5. FORMA FINAL Y SIMULACIONES DE LA ANTENA INDIVIDUAL

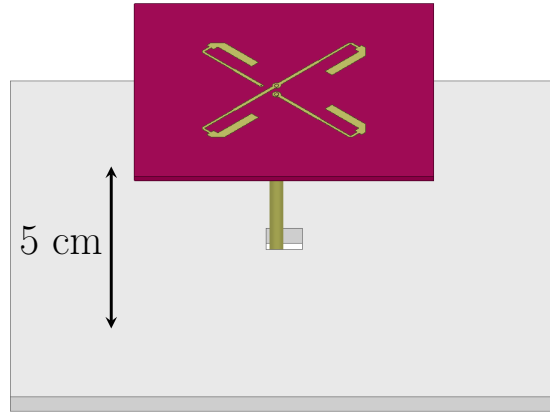


Figura 2.10: Dibujo completo en HFSS de la antena individual.

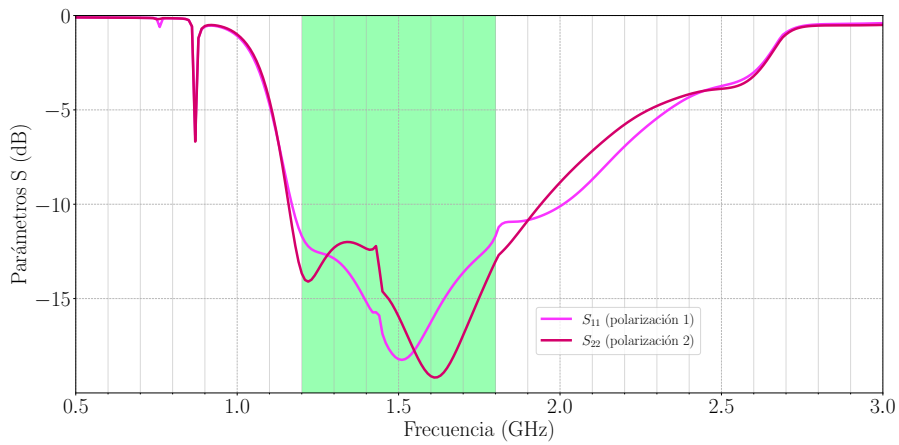


Figura 2.11: Simulación de las reflexiones de ambas polarizaciones. El puerto 1 (S_{11}) es el que está asociado a la polarización que **no** tiene cambio de nivel. El puerto 2 (S_{22}) está asociado a la polarización ortogonal.

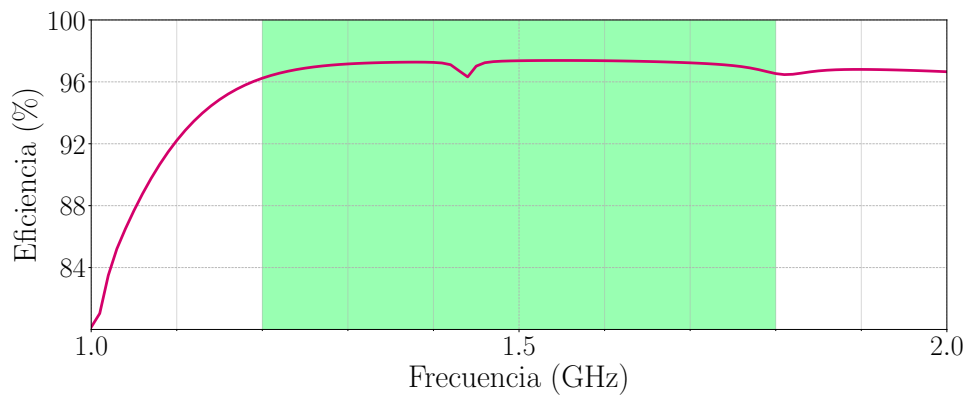


Figura 2.12: Simulación de la eficiencia de la antena individual.

2.5. FORMA FINAL Y SIMULACIONES DE LA ANTENA INDIVIDUAL

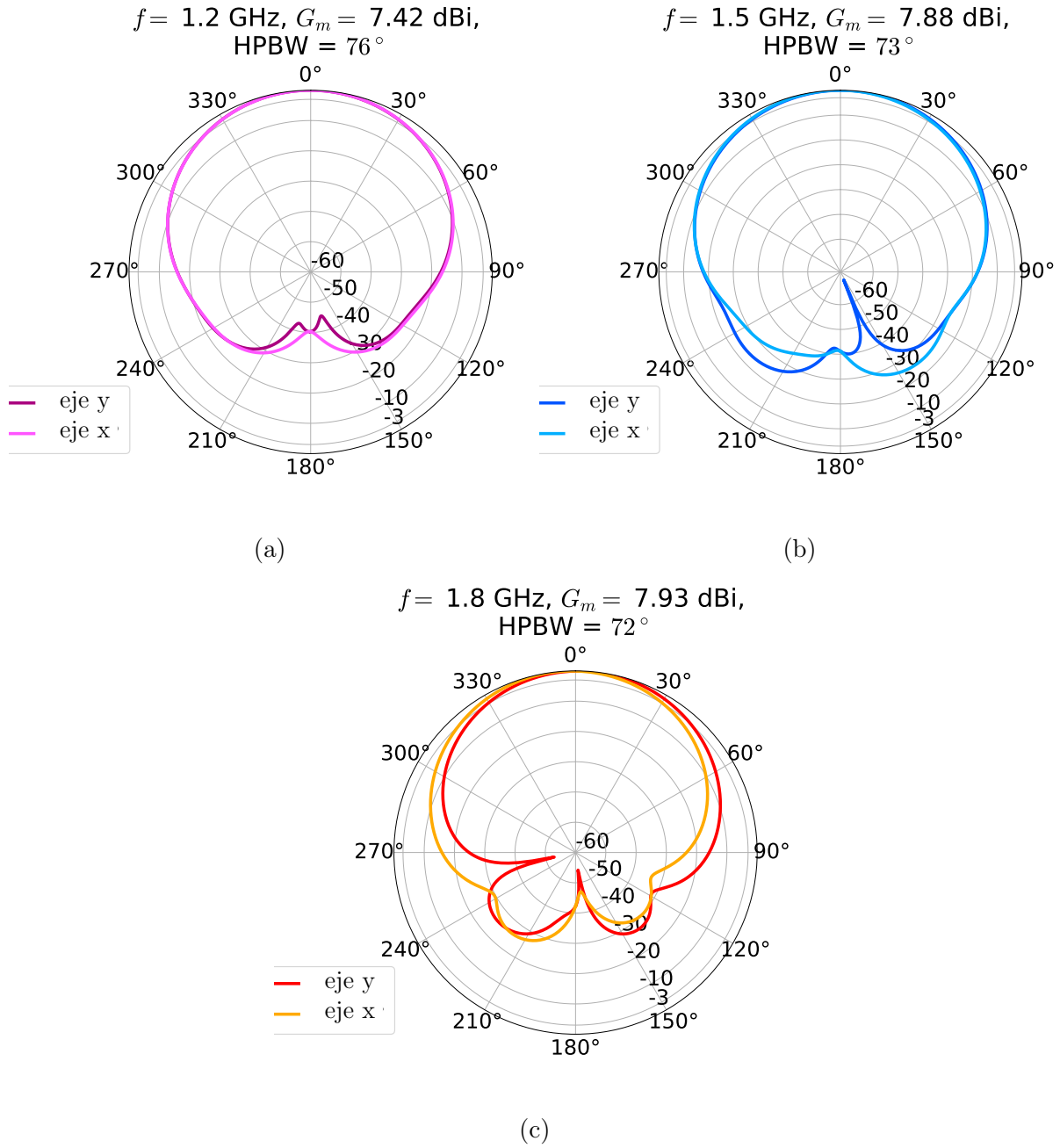


Figura 2.13: Simulación de los patrones de radiación de la antena individual en sus dos cortes principales. Se muestran tres frecuencias relevantes (principio: 1200 MHz, medio: 1500 MHz y fin: 1800 MHz).

2.6. Formación de los CHOPAN

Para formar cada *CHOPAN*, debemos usar el procedimiento mostrado en la Figura 2.5. Es decir, debemos tomar la antena individual, y formar el arreglo de manera tal que los dipolos queden dispuestos diagonalmente al eje de formación del arreglo. Con esto, obtenemos el diseño dibujado en HFSS de la Figura 2.14.

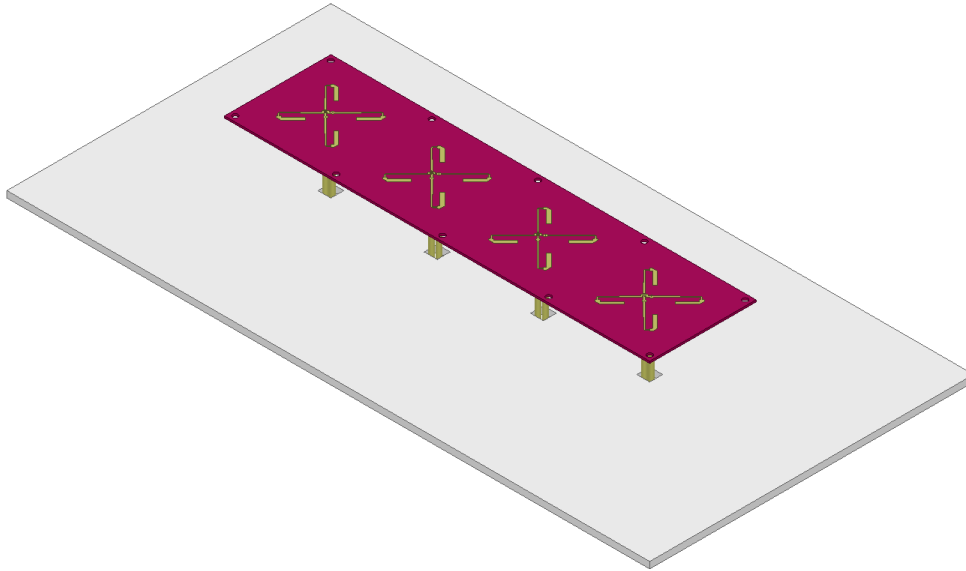


Figura 2.14: Dibujo de un *CHOPAN* en HFSS.

La simulación de los parámetros S de ambas polarizaciones y el patrón de radiación en las frecuencias 1200, 1500 y 1800 MHz, se muestran en las Figuras 2.15 y 2.16, respectivamente.

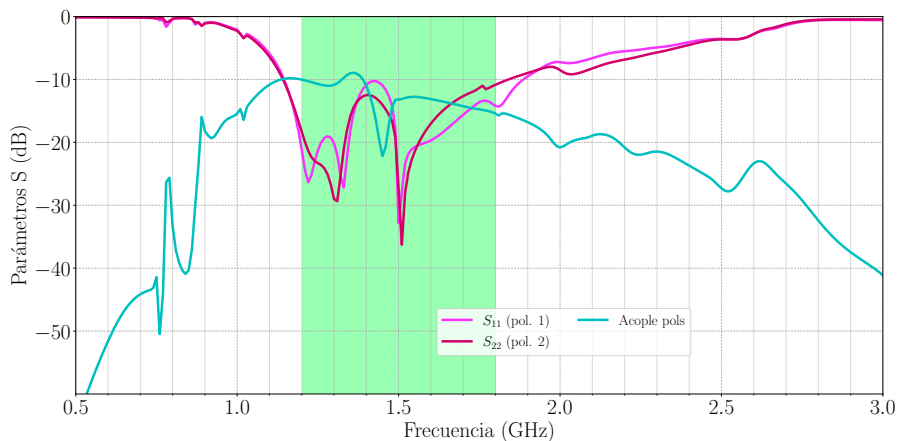


Figura 2.15: Simulación de las reflexiones de un *CHOPAN* en ambas polarizaciones. La nomenclatura es la misma que la usada en la Figura 2.11. Además de esto, se muestra el acople entre polarizaciones.

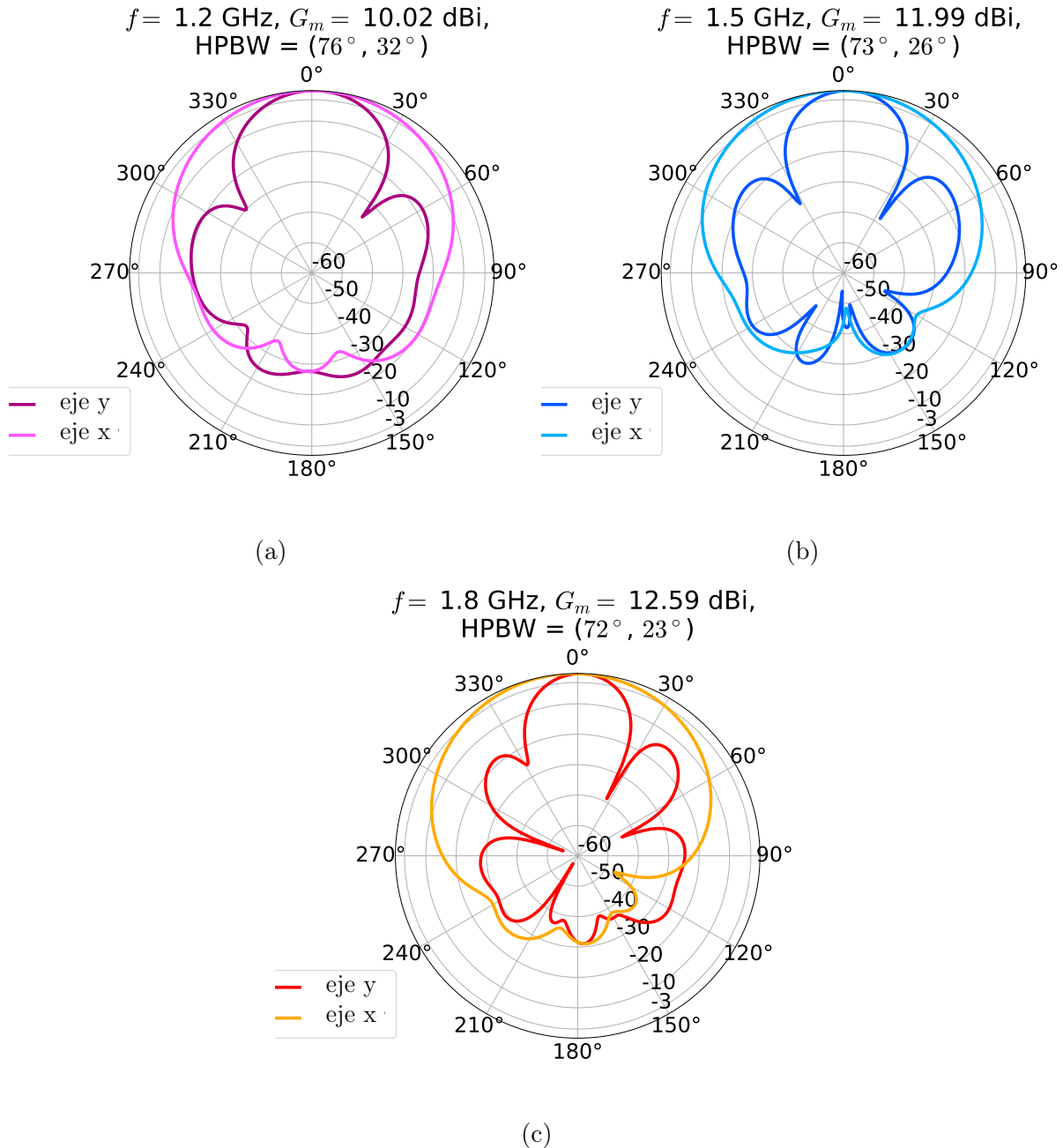


Figura 2.16: Simulación de los patrones de radiación de un *CHOPAN* en sus dos cortes principales. Se muestran tres frecuencias relevantes (principio: 1200 MHz, medio: 1500 MHz y fin: 1800 MHz).

Nótese que, al menos en lo que respecta a simulaciones, la antena individual y los *CHOPAN* cumplen con todos los requerimientos del Capítulo 1, salvo por el tamaño de los HPBW. De todos modos, el autor considera que dadas todas las restricciones, y la dificultad de cumplir todos los requerimientos en simultáneo, el resultado obtenido es excelente para una primera puesta en marcha del proyecto ARTE. De todos modos, se pueden dejar mejoras para un trabajo futuro. Por ejemplo, para aumentar el HPBW en el eje x (y llevarlo por sobre los 80°), podríamos miniaturizar más aun los dipolos, y para disminuir el HPBW en el eje y , podríamos considerar el uso de 8 antenas en cada *CHOPAN* (y por ende 16 antenas para la síntesis digital del haz completo).

Capítulo 3

Construcción y Mediciones

Tras haber simulado las partes principales que componen la antena de ARTE, se procedió con su construcción y medición. Los resultados asociados a parámetros S y patrones de radiación se muestran en este capítulo.

3.1. Construcción

La construcción de las antenas se divide en dos partes: (1) impresión de las antenas impresas en RO4003C, y (2) ensamblaje de los conectores IPEX e incorporación del plano reflector. La impresión de las antenas, mostradas en la Figura 3.1 (a), se encargó a PCBcart ¹. El ensamblaje de los conectores IPEX y la incorporación del plano reflector se realizaron en el laboratorio de ondas milimétricas. El resultado final se muestra en la Figura 3.1 (b).

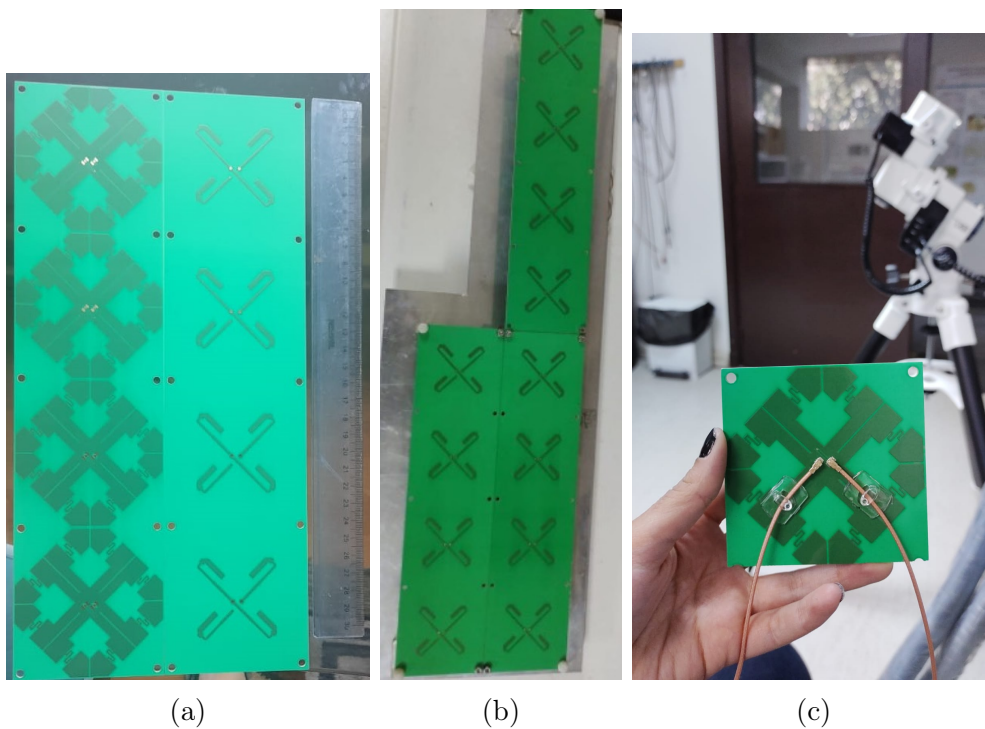


Figura 3.1: Construcción de la antena de ARTE.

¹<https://www.pcbcart.com/>

Cabe destacar que la antena de ARTE debe estar en constante rotación para seguir el centro galáctico. Por ende, la antena debe ser puesta en una montura de rotación. Debido a esto, se construyó un plano reflector con las menores dimensiones posibles (nótese que este, al igual que el arreglo, tiene forma de "L"), para así disminuir el peso y por ende el trabajo ejercido por la montura. Finalmente, debido a este mismo movimiento, se usaron ganchos plásticos para sujetar los cables y evitar que se desconectaran con los constantes torques de rotación (ver Figura 3.1 (c)).

3.2. Medición de una antena individual

En lo que respecta a los parámetros S, conviene efectuar la medición en una antena individual (luego, la extrapolación a un *CHOPAN* se puede realizar considerando los parámetros S del combinador que sea usado para combinar la salida de las 4 antenas que conforman al *CHOPAN*). La medición de las reflexiones en ambas polarizaciones se muestra en la Figura 3.2. Además, para cerciorarnos de que el efecto de los ganchos fuese insignificante, se midió una sola polarización con y sin gancho. Como se puede ver en la figura, el efecto del gancho es efectivamente insignificante.

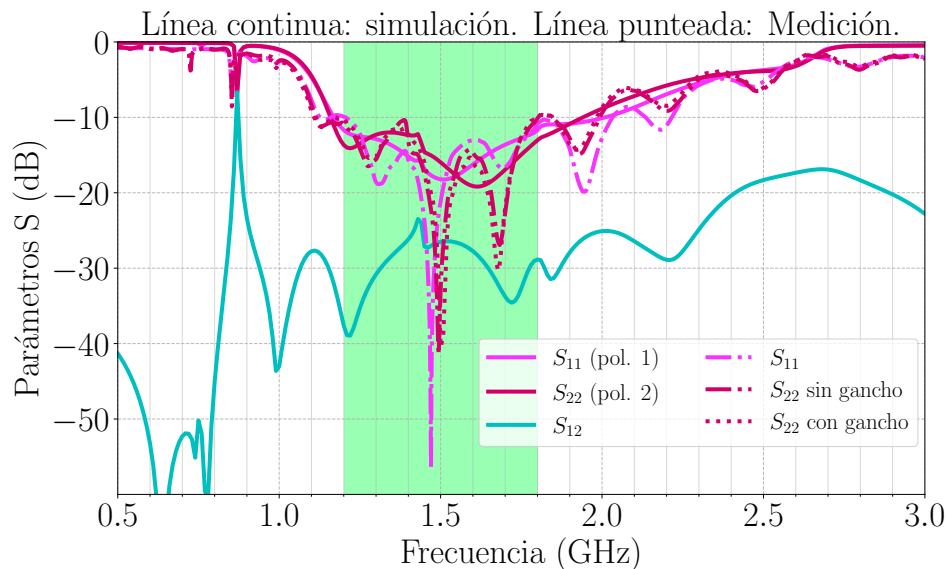


Figura 3.2: Parámetros S de la antena individual. S_{11} y S_{22} son las reflexiones de cada polarización, mientras que S_{12} es el acople entre los puertos de cada polarización (misma nomenclatura que la usada en la Figura 2.11).

3.3. Medición del Arreglo

Finalmente, en lo que consta a la medición del patrón de radiación, nos interesa principalmente la medición del arreglo de 8 antenas (es decir, dos *CHOPAN* en conjunto). Esto ya que es este patrón el que se usa para detectar los FRBs y, más aun, es este el patrón que debe cumplir los requerimientos de HPBW (15° y 80°). Para comparar con la simulación, se utilizó el diseño en HFSS mostrado en la Figura 3.3.

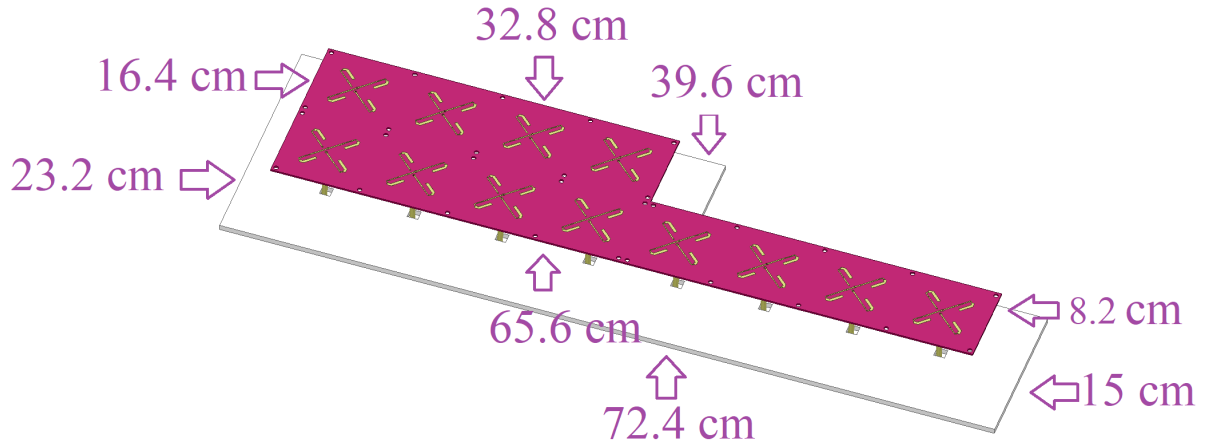


Figura 3.3: Antena de ARTE (es decir, arreglo en "L" constituido por 3 *CHOPAN*) en HFSS. Además, en esta figura se muestran las dimensiones de la antena completa (que son las mismas que las de la antena construida mostrada en la Figura 3.1 (b)).

Las mediciones del patrón de radiación, efectuadas en la cámara anecoica del laboratorio de ondas milimétricas, se muestran junto a las simulaciones en la Figura 3.4. Cabe destacar, nuevamente, que la antena cumple con todos los requerimientos del Capítulo 1, salvo por el criterio de HPBW. De todos modos, la forma genérica del patrón de radiación es la esperada (es decir, se adapta a la forma de la vía láctea). A juicio del autor, considerando lo ambiciosos que eran los requerimientos de la antena de ARTE, los resultados obtenidos son muy buenos para una primera implementación. Sin embargo, se debe destacar que el nivel de los lóbulos laterales en el corte del eje y son más alto de lo esperado (con respecto tanto a la teoría como a las simulaciones). En teoría, los lóbulos laterales de un arreglo deberían tener un nivel del orden de 13 dB por debajo del lóbulo principal [2]. Además, si se considera el factor de elemento, este nivel debería ser inclusive menor. Por ende, lo mejor es repetir estas mediciones tras mejorar el montaje de medición, ya que existe la posibilidad de que estos altos niveles se deban a reflexiones en la cámara anecoica.

3.3. MEDICIÓN DEL ARREGLO

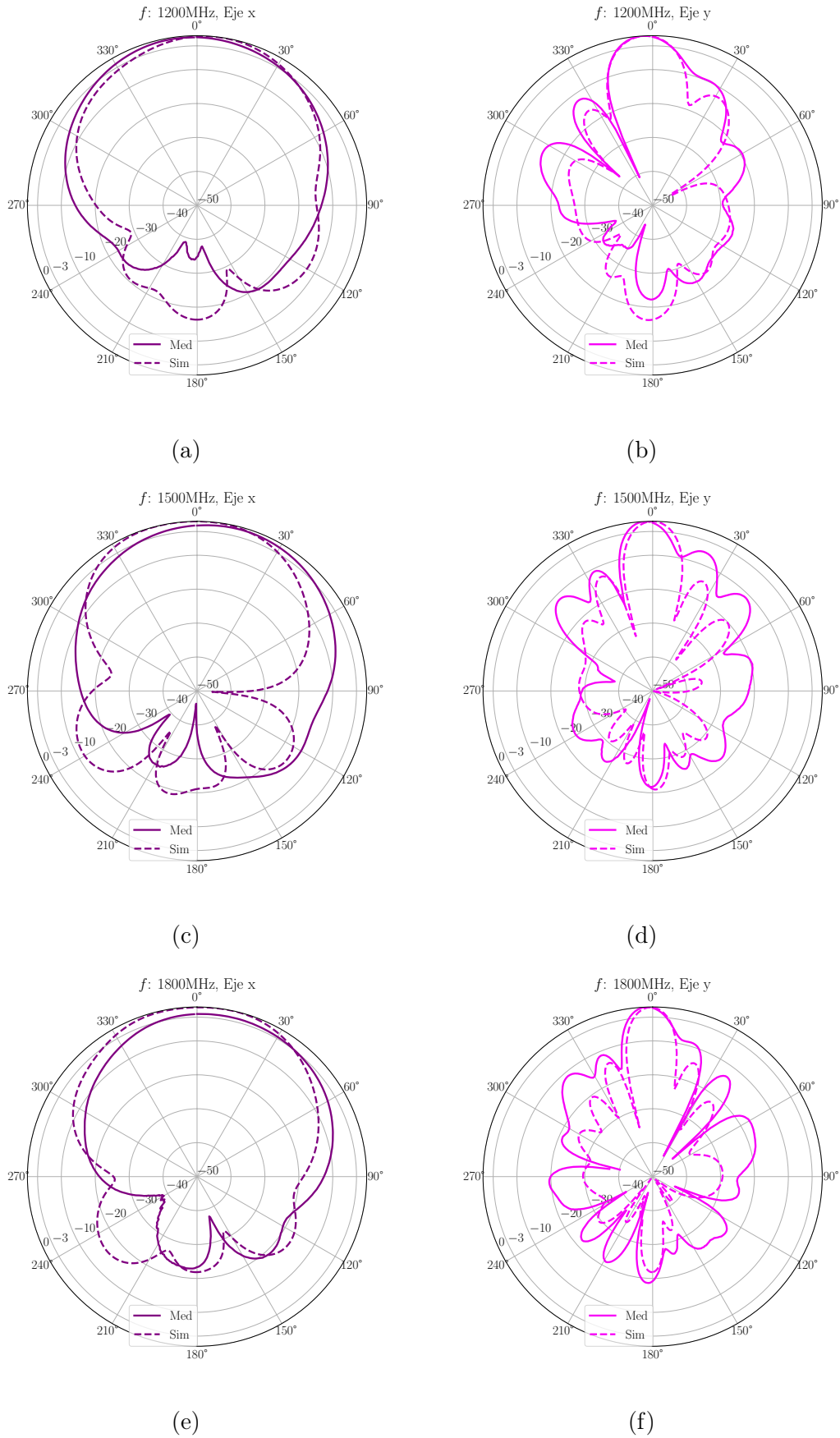


Figura 3.4: Patrones de radiación normalizados. Las ganancias máximas son (a) y (b): 11.28 dBi, (c) y (d): 12.57 dBi, (e) y (f): 12.71 dBi. Los HPBW medidos son (a): 77° , (b): 21° , (c): 71° , (d): 14° , (e): 58° , (f): 14° .

Bibliografía

- [1] <http://ned.ipac.caltech.edu/level5/March19/Petroff/Petroff6.html>
- [2] Stutzman W. and Thiele G., *Antenna Theory and Design*, third edition, USA, John Wiley & Sons, 2013.
- [3] F. Casado. *Un sintetizador de múltiples haces, basado en FPGA, para arreglos de antenas en fase, con aplicaciones en Radioastronomía y Telecomunicaciones*. Memoria para optar al título de ingeniero civil eléctrico, Universidad de Chile, 2018.
- [4] C. Muñoz. *Diseño, implementación y pruebas de un arreglo de antenas por fase para la detección de la emisión electromagnética de teléfonos celulares*. Memoria para optar al título de ingeniero civil eléctrico, Universidad de Chile, 2017.
- [5] H. Sun, H. Zhu, C. Ding and Y. J. Guo, *Wideband Planarized Dual-Linearly-Polarized Dipole Antenna and Its Integration for Dual-Circularly-Polarized Radiation*, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 17, no. 12, pp. 2289-2293, 2018, doi: 10.1109/LAWP.2018.2873117.
- [6] D. Gallardo, *Diseño, construcción y caracterización de un arreglo de antenas de banda ancha basado en metamateriales*. Memoria para optar al título de ingeniero civil eléctrico, Universidad de Chile, 2020.