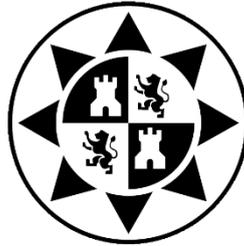


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



Trabajo Fin de Máster

Caracterización teórico-experimental de la atenuación por propagación producida por un árbol aislado en las bandas de UHF y milimétricas



AUTOR: Santiago Roca Conesa
DIRECTORES: Leandro Juan Llácer
José Víctor Rodríguez Rodríguez

OCTUBRE / 2020

Autor:	Santiago Roca
E-mail del Autor:	santirc12@gmail.com
Directores:	Leandro Juan Llácer José Víctor Rodríguez Rodríguez
E-mail de los Directores:	leandro.juan@upct.es jvictor.rodriguez@upct.es
Título del TFG:	Caracterización teórico-experimental de la atenuación por propagación producida por un árbol aislado en las bandas de UHF y milimétricas
Resumen:	<p>En la planificación de un sistema de radiocomunicaciones juega un papel fundamental el cálculo de cobertura radioeléctrica. Dicha estimación se realiza mediante herramientas de planificación que incorporan modelos de propagación electromagnéticos para estimar las pérdidas de señal, la dispersión temporal y espacial de la señal, etc. Estos modelos (experimentales y/o teóricos) están basados en teorías electromagnéticas y se diseñan para caracterizar el canal en una banda de frecuencias y en un entorno concreto (rural, suburbano, urbano, interiores).</p> <p>El desarrollo de la Agricultura 4.0 está llevando a la sensorización masiva de cultivos, la aparición de maquinaria y vehículos sin conductor, etc. y, por tanto, a la necesidad de desplegar sistemas de radiocomunicaciones que operan en diversas bandas de frecuencia en este tipo de entornos. En este sentido, se hace necesario desarrollar nuevos modelos de propagación para este tipo de entornos en las bandas de frecuencias de los sistemas de nueva generación como 5G.</p> <p>El objetivo principal del proyecto es caracterizar de forma teórica, mediante teorías electromagnéticas, y experimental, mediante una campaña de medidas, las pérdidas de propagación producidas por un árbol (cítrico) aislado.</p>
Titulación:	Máster en Ingeniería de Telecomunicación
Departamento:	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Fecha de Presentación:	

Agradecimientos

Realizar este Trabajo Final de Máster (TFM) supone para mí, el cierre a una etapa de mi vida, en la que me he encontrado a muchos buenos amigos, que me ha permitido conocer muy buenos profesores y en la que he tenido la suerte de estar arropado por mucha gente que me quiere y me ayuda.

Es por esto que me gustaría dedicarle unas palabras todos lo que me ha brindado su apoyo y ayuda para sacar adelante este trabajo.

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor, Leandro Juan Llácer, por su predisposición y ayuda a lo largo del desarrollo de todo este proyecto, estando siempre dispuesto a resolver mis dudas de una forma excelente, permitiéndome aprender una gran cantidad de conocimientos y expandir algunos de lo ya vistos a lo largo de mis años de estudio. Y junto a él, quiero agradecer a José Víctor Rodríguez, por sus enseñanzas en mis años de carrera, las cuales me han sido muy útiles para la elaboración de este trabajo.

En segundo lugar, dar las gracias a mis padres y hermana, que me han apoyado con cada decisión que he tomado a lo largo de mi vida, en cualquiera de los ámbitos de mi vida profesional, personal y vocacional. A pesar de las circunstancias tan extrañas que nos ha tocado vivir a lo largo de este año.

Por ultimo quiero agradecerle de todo corazón su apoyo y amor a Marta, que me ha animado a continuar cuando más perdido y hundido me he llegado a encontrar en el desarrollo de este trabajo, dándome los empujones necesarios para sacarlo adelante.

Índice

CONTENIDO

1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	9
1.1.- Introducción.....	9
1.2. Objetivos	10
1.3. Fases del proyecto.....	10
1.4 Estructura	11
2. DIFRACCIÓN SIMPLE EN UNA ARISTA	12
2.1. Contribuciones: Rayo directo y rayo difractado.....	12
2.3. Pérdidas por propagación	16
2.3. Ejemplos	17
3. DIFRACCIÓN DOBLE EN ARISTAS	21
3.1. Contribuciones: Rayo directo, rayos difractados y rayo doblemente difractado	21
3.2. Pérdidas por propagación (Atenuación en el espacio libre)	23
3.3. Ejemplos	23
4. RESULTADOS PARA UN ÁRBOL AISLADO.....	26
4.1. Entorno de propagación y medidas	26
4.1.1 Analizador de redes.....	27
4.1.2 Antenas	27
4.1.3 Conversores ópticos	28
4.2.- Modelado de un árbol aislado mediante difracción simple	30
4.2.1. Medidas a 28 GHz.....	31
4.3. Modelado de un árbol aislado mediante difracción doble	32
4.3.1. Medidas a 28 GHz.....	33
5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS	34
5.1.- Conclusiones	34

5.2. Futuras líneas	34
BIBLIOGRAFÍA.....	35
ANEXO A. COEFICIENTE DE DIFRACCIÓN UTD PARA UNA ARISTA	36
ANEXO B: PROGRAMAS EN MATLAB.....	37

Índice de Tablas

Tabla 1. Regiones frontera de la difracción y las contribuciones asociadas a cada una de ellas.

..... 14

Índice de figuras

Figura 1. Árbol de cítricos bajo estudio, ubicado en la Finca Tomás Ferro.....	10
Figura 2. Geometría para un problema de difracción simple	12
Figura 3.Regiones de transición y sistema de coordenadas para la cuña.....	14
Figura 4. Incidencia oblicua sobre una cuña de paredes conductoras [3].....	15
Figura 5. Representación del módulo de la Función de Transferencia de Fresnel	18
Figura 6. Representación de la fase de la Función de Transferencia de Fresnel	18
Figura 7. Pérdidas por propagación debidas a los efectos de la difracción simple.....	20
Figura 8. Geometría para un problema de difracción doble con obstáculos a la misma altura .	21
Figura 9. Geometría para un problema de difracción doble con obstáculos a distintas alturas	22
Figura 10. Factor de propagación debido a la difracción doble con obstáculos a la misma altura	24
Figura 11. Factor de propagación debido a la difracción doble con obstáculos a diferentes alturas	25
Figura 12. Diagrama de los equipos para la toma de medidas	26
Figura 13. Analizador de redes vectoriales	27
Figura 14. Antena de bocina QSH-SL-26-40-K-20.....	27
Figura 15. Especificaciones de la antena de bocina QSH-SL-26-40-K-20	28
Figura 16. Conversor electróptico.....	28
Figura 17. Conversor electróptico transmisor.....	29
Figura 18. Conversor electróptico receptor	29
Figura 19. Montaje en trípode de la antena transmisora	30
Figura 20. Geometría de estudio tomando el árbol como una arista aislada.....	30
Figura 21. Comparativa de valores medidos con un modelo de difracción simple a 28 GHz.....	31
Figura 22. Geometría de estudio tomando el árbol como dos aristas separadas	32
Figura 23. Comparativa de valores medidos con un modelo de difracción doble a 28 GHz	33

1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.- Introducción

En la planificación de un sistema de radiocomunicaciones juega un papel fundamental el cálculo de cobertura radioeléctrica [1]. Dicha estimación se realiza mediante herramientas de planificación que incorporan modelos de propagación electromagnéticos para estimar las pérdidas de señal, la dispersión temporal y espacial de la señal, etc. Estos modelos (experimentales y/o teóricos) están basados en teorías electromagnéticas y se diseñan para caracterizar el canal en una banda de frecuencias y en un entorno concreto (rural, suburbano, urbano, interiores).

El desarrollo de la Agricultura 4.0 [2] está llevando a la sensorización masiva de cultivos, la aparición de maquinaria y vehículos sin conductor, etc. y, por tanto, a la necesidad de desplegar sistemas de radiocomunicaciones que operan en diversas bandas de frecuencia en este tipo de entornos. En este sentido, se hace necesario desarrollar nuevos modelos de propagación para este tipo de entornos en las bandas de frecuencias de los sistemas de nueva generación como 5G.

Si bien conocemos una amplia variedad de mecanismos de propagación, entre los que se encuentran, la reflexión, la absorción, el “*scattering*”, ... El mecanismo principal en el que centraremos el desarrollo de este estudio será la difracción.

Esto se debe a varias razones, entre las que podemos destacar el uso de altas frecuencias por parte de las nuevas tecnologías que se están desarrollando actualmente, ya que la presencia de las mismas nos permite estudiar el efecto de la difracción en un punto, y su efecto dependerá de la geometría del obstáculo, además de la amplitud, fase y polarización de la onda electromagnética emitida.

La ventaja que nos brinda el estudio de la difracción se debe a la amplia variedad de fórmulas matemáticas que permiten obtener modelados de sus efectos con buenos resultados, en comparación con otras soluciones, además de permitir la combinación con otros métodos.

A la hora de realizar nuevos modelos que se ajusten a estos entornos agrícolas, se acordó estudiar los efectos en la difracción debidos a un árbol cítrico ubicado en la Finca Tomás Ferro (Fig. 1), el cual nos sirve como obstáculo para caracterizar su comportamiento frente a este fenómeno, ya que según [3], podemos considerar las pérdidas de difracción debidas al mismo como las obtenidas si se tratase como dos antenas aisladas, siempre que se trabaje en frecuencias superiores a 1 GHz. Por ello, como se desarrolla a continuación, se trabajó en un

modelo que nos permitiera caracterizar un árbol de cítricos como un obstáculo aislado, permitiéndonos evaluar los efectos de la difracción simple, y como dos aristas, separadas la anchura del árbol, para comprobar el comportamiento del mismo bajo los efectos de la difracción doble.



Figura 1. Árbol de cítricos bajo estudio, ubicado en la Finca Tomás Ferro.

1.2. Objetivos

El objetivo principal del proyecto es caracterizar de forma teórica, mediante teorías electromagnéticas, y experimental, a través de una campaña de medidas, las pérdidas de propagación producidas por un árbol (cítrico) aislado.

1.3. Fases del proyecto

Las fases a seguir en este trabajo son:

1. Estado del arte de modelos de propagación para estimar las pérdidas de propagación producidas por un árbol aislado.
2. Programar dichos modelos en MATLAB.

3. Estudiar un sistema de medidas basado en un analizador de espectros portátil del que dispone el grupo de investigación de Sistemas de Comunicaciones Móviles (SiCoMo)
4. Realizar una campaña de medidas en una plantación de cítricos en la banda de frecuencia de 26 GHz.
5. Analizar las medidas y compararlas con los modelos de propagación programados.
6. Redacción de la memoria.

1.4 Estructura

A lo largo del primer capítulo se describirán las expresiones y la geometría de nuestro estudio, tomando al obstáculo como una arista aislada. Para ello, se programarán en MATLAB las funciones necesarias para calcular el efecto de la difracción en función de la frecuencia de estudio, comparando los resultados con los expuestos en diferentes publicaciones.

En el segundo capítulo, se abordará una descripción similar al anterior, pero caracterizando el obstáculo como dos aristas aisladas, señalando las diferencias a la hora de calcular el efecto de los rayos difractados generados en el escenario a caracterizar, del mismo modo que ocurría en el capítulo anterior se compararán los resultados con otros publicados en artículos relacionados a este estudio.

En el capítulo siguiente, se compararán las medidas obtenidas empleando un árbol real como sujeto de estudio con los resultados teóricos obtenidos empleando los programas anteriormente desarrollados con medidas realizadas en un entorno real.

Para finalizar, se exponen las principales conclusiones obtenidas tras la comparativa ya mencionada, para entender los efectos de un árbol cítrico en la difracción sufrida por una onda electromagnética, así como las líneas futuras de estudio a realizar.

2. DIFRACCIÓN SIMPLE EN UNA ARISTA

Como se menciona en el capítulo anterior, nuestro estudio se basa en la caracterización de la difracción debida al impacto de las ondas electromagnéticas sobre un árbol. Para conseguir unos resultados correctos, se deben obtener unos modelos teóricos válidos, por lo que, a lo largo de este capítulo, definiremos las expresiones y la geometría empleada, definiendo el obstáculo como una arista aislada.

2.1. Contribuciones: Rayo directo y rayo difractado

Según la definición, la difracción ocurre cuando la trayectoria entre dos antenas, emisora y receptora, queda obstaculizada. A pesar de esta situación, la recepción de la señal es posible, ya que en las zonas de difracción los campos recibidos no son nulos, pero sí se encuentran atenuados frente al nivel de recepción que se obtendría en el caso en el que el obstáculo no se encontrara en la trayectoria.

Para la caracterización teórica de este fenómeno se recurrió a las expresiones contempladas dentro de la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD), ya que ésta supera las limitaciones que encontramos en la Teoría Geométrica de la Difracción (GTD) para aplicarse en la vecindad de las regiones de transición. La geometría del estudio queda reflejada en la Fig. 2.

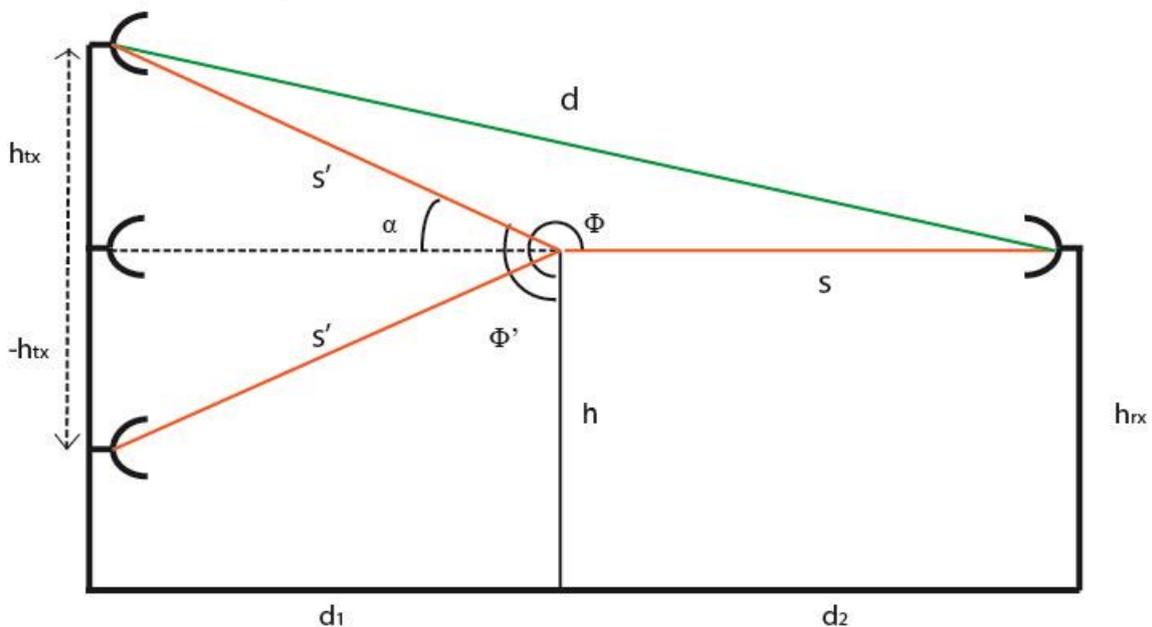


Figura 2. Geometría para un problema de difracción simple

Como podemos observar en el anterior esquema, para nuestro modelo tendremos una antena transmisora, la cual variará de altura, en nuestro caso de $-h_{tx}$ hasta h_{tx} , por otra parte, s' es la distancia entre el transmisor hasta el punto de difracción, mientras que s es una distancia fija

igual a d_2 correspondiente a la distancia existente entre el elemento difractor y el receptor. Por último, la distancia d corresponde a la recorrida por el rayo directo que llega del transmisor hasta el receptor.

Estas distancias mencionadas responden a las siguientes expresiones:

$$d = \sqrt{(d_1 + d_2)^2 + (h_{tx} - h_{rx})^2} \quad (1)$$

$$s' = \frac{d_1}{\cos \alpha} \quad (2)$$

Siendo α , igual al ángulo de incidencia (ver Fig. 1), el cual se calcula de la siguiente forma:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h_{tx} - h_{rx}}{d_1}\right) \quad (3)$$

Para poder obtener un modelo teórico válido es necesario obtener las pérdidas debidas a la difracción. En primer lugar debemos obtener el valor del campo total en el punto de recepción (E_{TOTAL}), que es la suma del campo debido al rayo directo y del rayo difractado, siempre y cuando se cumplan las condiciones de visión necesarias para recibir el rayo directo, en caso contrario solo se recibiría el rayo difractado.

Se debe destacar que en la situación de estudio se trabajará con ondas esféricas, ya que el transmisor se asume situado a una distancia relativamente pequeña del obstáculo y, por tanto, no puede llevarse a cabo una asunción de onda plana.

Las expresiones de estas dos contribuciones son las siguientes:

$$E_{directo} = \frac{E_0}{d} e^{-jkd} \quad (4)$$

$$E_{difractado} = \frac{E_0}{s'} e^{-jks'} D(L, \phi, \phi', \beta_0) A(s', s) e^{-jks} \quad (5)$$

Donde $A(s', s)$ indica la variación de la intensidad del campo eléctrico del campo en la trayectoria del rayo difractado

$$A(s', s) = \sqrt{\frac{s'}{s(s + s')}} \quad (6)$$

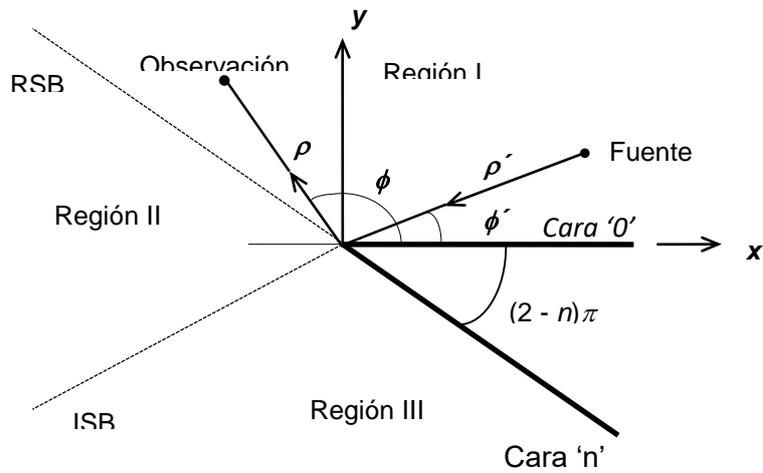


Figura 3.Regiones de transición y sistema de coordenadas para la cuña.

Como puede apreciarse en las Figs. 3 y 4, la frontera entre las regiones I y II se conoce como *Reflected Shadow Boundary (RSB)* y a la frontera entre las regiones II y III como *Incident Shadow Boundary (ISB)*. Las contribuciones que han de considerarse para calcular el campo total en cada una de las regiones se muestran en la Tabla 1.

Región I	Región II	Región III
$0 < \phi < \pi - \phi'$	$\pi - \phi' < \phi < \pi + \phi'$	$\pi + \phi' < \phi < n\pi$
directo reflejado difractado	directo difractado	difractado

Tabla 1. Regiones frontera de la difracción simple y las contribuciones asociadas a cada una de ellas.

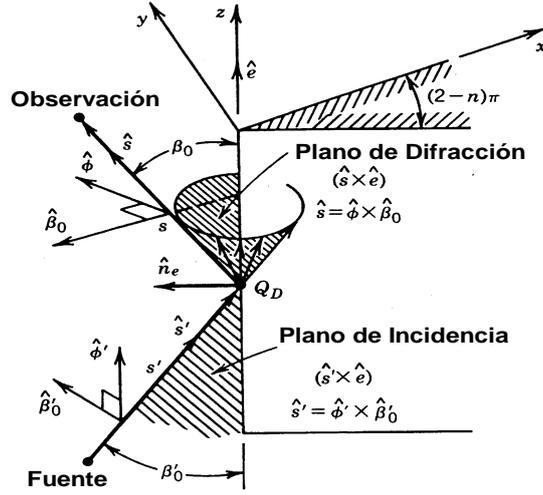


Figura 4. Incidencia oblicua sobre una cuña de paredes conductoras [3]

Debemos tener en cuenta a la hora de definir el coeficiente de difracción, el uso de una polarización *soft* (vector campo eléctrico perpendicular al plano de incidencia), donde usaríamos la expresión D_s , mientras que para una polarización *hard* (vector campo eléctrico contenido en el plano de incidencia) emplearíamos D_h , quedando dichas expresiones de la siguiente forma:

$$\begin{cases} D_s = D^i - D^r \\ D_h = D^i + D^r \end{cases} \quad (7)$$

Siendo D^i y D^r , los coeficientes de difracción si se imponen las condiciones de continuidad para el campo si nos encontramos en la frontera de transición *Reflected Shadow Boundary (RSB)* o *Incident Shadow Boundary (ISB)*.

$$D^i = \frac{-\exp(-j\frac{\pi}{4}) F[kLa(\phi - \phi')]}{2\sqrt{2\pi K} \sin \beta_0 \cos[(\phi - \phi')/2]} \quad (8)$$

$$D^r = \frac{-\exp(-j\frac{\pi}{4}) F[kLa(\phi + \phi')]}{2\sqrt{2\pi K} \sin \beta_0 \cos[(\phi + \phi')/2]} \quad (9)$$

Cabe destacar que para el caso específico en el que ϕ sea igual a $3\pi/2$ y ϕ' igual a $\pi/2$, el valor tanto de D_s como de D_h serán igual a:

$$D_s = D_h = \frac{\sqrt{L}}{2} \quad (10)$$

En las anteriores expresiones L es un parámetro de distancia que, para encontrarse, se debe satisfacer una condición de campo, siendo esta que el campo total sea continuo en el recorrido desde la ISB y de la RSB , siendo su expresión para una onda esférica la siguiente:

$$L = \frac{s's \operatorname{sen}^2 \beta_0}{s' + s} \quad (11)$$

Definimos la función $F(x)$, Función de Transición de Fresnel, la cual se expresa en términos de una integral de Fresnel, pudiendo calcularse mediante las integrales del seno y del coseno $S(x)$ y $C(x)$.

$$F(x) = 2j\sqrt{x} \exp(jx) \int_{\sqrt{x}}^{\infty} \exp(-j\tau^2) d\tau \quad (12)$$

$$= j\sqrt{2\pi}\sqrt{x} \exp(jx) \left\{ \left[\frac{1}{2} - C \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \sqrt{x} \right) \right] - j \left[\frac{1}{2} - S \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \sqrt{x} \right) \right] \right\}$$

$$S(x) = \int_0^x \operatorname{sen} \left(\frac{\pi}{2} \tau^2 \right) d\tau \quad (13)$$

$$C(x) = \int_0^x \operatorname{cos} \left(\frac{\pi}{2} \tau^2 \right) d\tau \quad (14)$$

Por último, definimos la expresión $a(\chi)$ de la siguiente forma:

$$a(\chi) = 2\cos^2 \left(\frac{\chi}{2} \right), \quad \chi = \phi \pm \phi' \quad (15)$$

donde, debido a nuestra geometría ϕ siempre tendrá un valor igual a $3\pi/2$ y ϕ' igual a $\pi/2 + \alpha$.

2.3. Pérdidas por propagación

El objetivo de esta caracterización es la obtención de las pérdidas por propagación debidas a la variación de la altura de la antena transmisora en nuestro caso, por lo que una vez obtenido el valor del campo total su cálculo es sencillo:

$$L(dB) = -20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \frac{|\vec{E}_{TOTAL}|}{|E_0|} \right) \quad (16)$$

2.3. Ejemplos

Una vez definida la geometría y las expresiones del escenario a modelar, desarrollamos un programa en lenguaje MATLAB para comprobar la validez de nuestro modelo teórico de forma previa a comparar los resultados reales.

Para ello era necesario crear dos funciones programadas, que permitieran el uso de la Función de Transición de Fresnel, y el cálculo del coeficiente de difracción, pudiendo comparar la primera de ellas con los resultados expuestos en [4].

```
function [ funcion ] = transicion_fresnel( x )
z=sqrt(2/pi)*sqrt(x);

A=(0.5-fresnelc(z))-1i*(0.5-fresnels(z));

funcion=(i.*sqrt(2*pi*x).*exp(i*x)).*A;

end
```

Obteniendo de la comprobación del siguiente programa, las Figs. 5 y 6 que se muestran a continuación.

```
%% Modulo y fase de la funcion de transicion de Fresnel
%Comprobacion de la funcion de transicion de Fresnel con la funcion creada
%en MATLAB
%close all;
clear all;
%Iniciamos la variable
x=linspace(0.001,10,10000);
F=transicion_fresnel(x);

F_abs=abs(F);
F_fase=angle(F);

x_log=log10(x);
figure(2)
semilogx(x,F_abs)
title('\fontsize{16} Función de Transición de Fresnel (Módulo)')
xlabel('x')
ylabel('Modulo de F(x)')

figure(3)
semilogx(x,(F_fase*180)/pi)
title('\fontsize{16} Función de Transición de Fresnel (Fase)')
xlabel('x')
ylabel('Fase de F(x)')
```

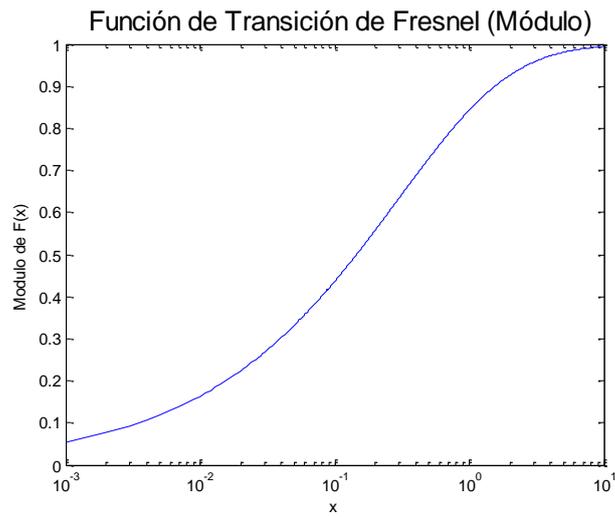


Figura 5. Representación del módulo de la Función de Transferencia de Fresnel

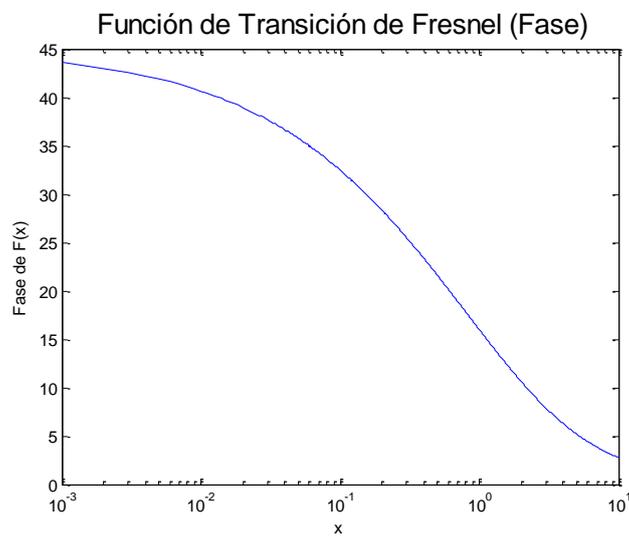


Figura 6. Representación de la fase de la Función de Transferencia de Fresnel

Por otra parte, el programa que define el coeficiente de difracción es el siguiente:

```
function [ D ] = dispersion_ISB(soft, beta, frec, fi, fi_pr, s,
s_pr)
%Funcion que nos permite calcular la Dispersion con la condicion de
campos
%en la ISB

%Generamos la constante k
lambda= 3e8/frec;
k=(2*pi)/lambda;

%Generamos el parámetro L de distancia,
%en este caso para una onda esférica
L=(s_pr*s*(sin(beta).^2))/(s_pr+s);

%Generamos el parametro a
if soft==1
    a=2*(cos((fi-fi_pr)/2).^2);
else
    a=2*(cos((fi+fi_pr)/2).^2);
end

x=k*L*a;

F=transicion_fresnel(x);

    F1=-exp(-1i*pi/4);
    F2=2*sqrt(2*pi*k)*sin(beta);
    F3=F/(cos((fi-fi_pr)/2));
    D_i=(F1/F2)*F3;

    F1=-exp(-1i*pi/4);
    F2=2*sqrt(2*pi*k)*sin(beta);
    F3=F/(cos((fi+fi_pr)/2));
    D_r=(F1/F2)*F3;

if soft==1
    D=D_i-D_r;
else
    D=D_i+D_r;
end

if fi-fi_pr==pi
    D=-sqrt(L)/2;
end

end
```

Finalmente comparamos los resultados de una simulación programada con los mostrados en [4], empleando un obstáculo igual a una arista tipo cuchillo, donde las características geométricas son las siguientes:

- $d_1=d_2=2500\text{m}$

- h_{tx} de 0 a 200m
- $h_{rx}=10m$
- $h=50m$

Donde las comprobaciones se realizan para distintas frecuencias (100 MHz, 1 GHz, 10 GHz), y tomando β_0 igual a $\pi/2$ y una polarización de tipo *soft*. Siendo el resultado el siguiente (Fig. 7):

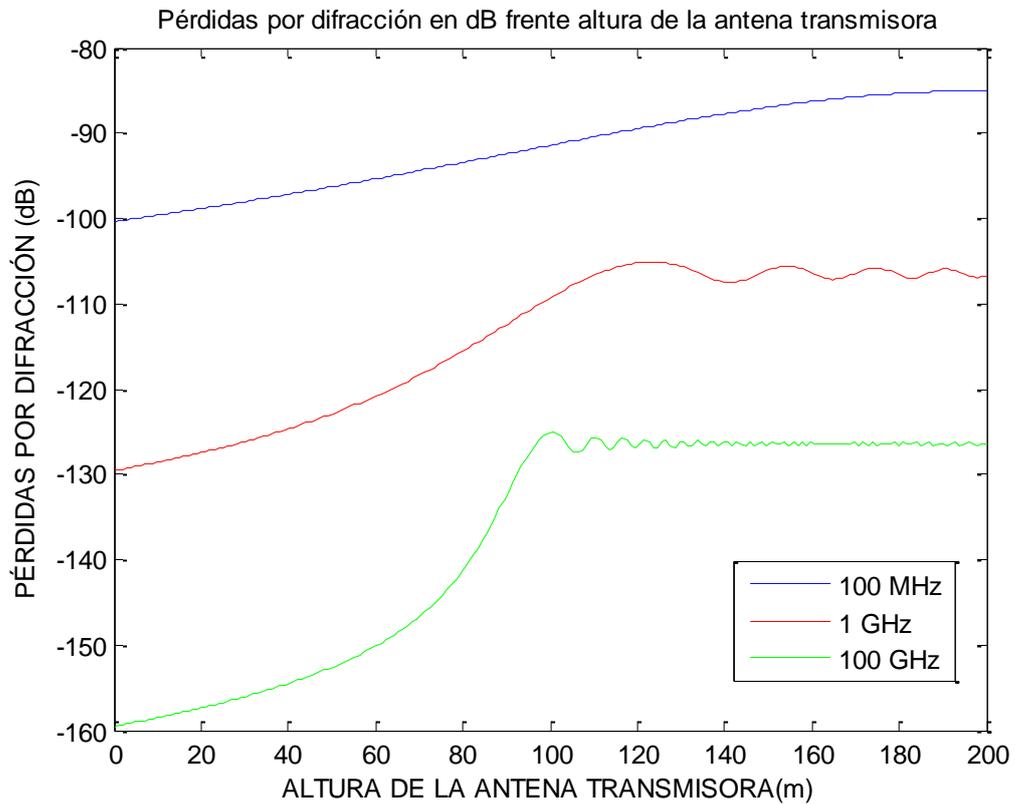


Figura 7. Pérdidas por propagación debidas a los efectos de la difracción simple

Tras compararlo con el resultado mostrado en la Fig. 3 de [5], comprobamos que los programas desarrollados ofrecen unos resultados correctos para el modelado de la difracción simple.

3. DIFRACCIÓN DOBLE EN ARISTAS

Continuando con la caracterización de nuestro objeto de estudio, el siguiente paso era obtener un modelo más ajustado con el obstáculo real (un árbol de cítricos), el cual era caracterizar el dicho obstáculo como dos aristas, que indican el ancho del árbol en nuestro caso.

Por ello se desarrolló otro modelo que permitiera observar los efectos de la difracción doble en nuestro escenario, siguiendo los pasos dados en el capítulo anterior de forma similar.

3.1. Contribuciones: Rayo directo, rayos difractados y rayo doblemente difractado

Con la aparición de la nueva arista, la geometría del problema aumenta en complejidad, es por esto que para obtener un modelo teórico correcto se propuso la modelización en dos escenarios, el primero de ellos en el que los obstáculos se encontraban a la misma altura, y el segundo en el que las alturas eran distintas, quedando el escenario como lo muestran las Figs. 8 y 9.

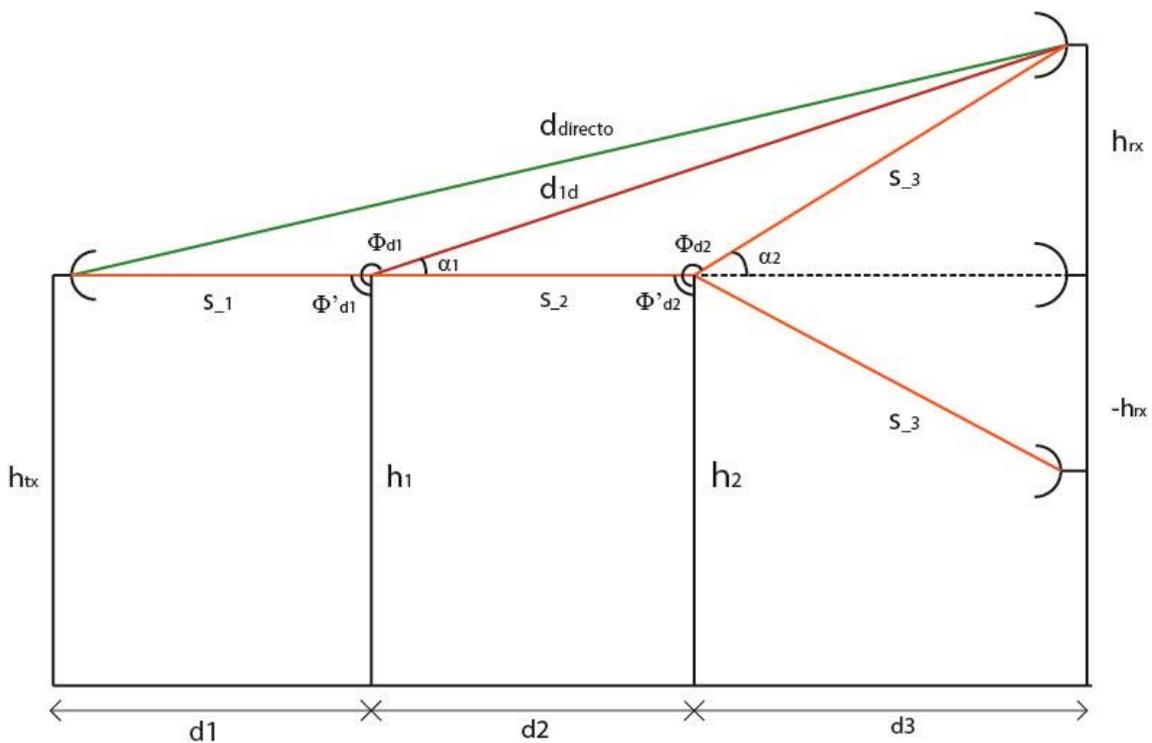


Figura 8. Geometría para un problema de difracción doble con obstáculos a la misma altura

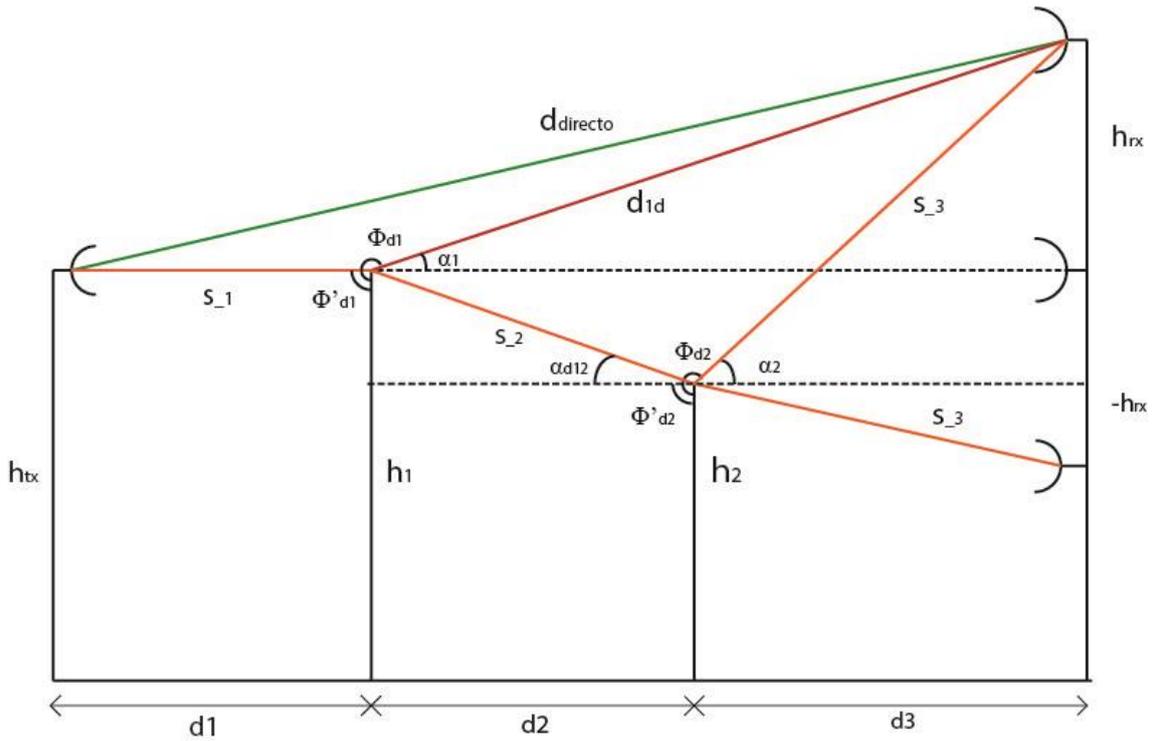


Figura 9. Geometría para un problema de difracción doble con obstáculos a distintas alturas

El hecho de estudiar el efecto de la difracción en estos dos escenarios, es debido a la diferencia de aportaciones debido a este fenómeno que tenemos en cada uno de los escenarios. Apareciendo en ambos casos una nueva contribución debida a la difracción doble que responde a la siguiente expresión:

$$E_{dd} = \frac{E_1}{s_1} A(s_1, s_2) D_1 e^{-jks_2} A_{dd}(s_1, s_2, s_3) D_2 e^{-jks_3} \quad (17)$$

Donde E_1 corresponde al rayo incidente en la primera arista

$$E_1 = \frac{E_0}{s_1} e^{-jks_1} \quad (18)$$

Y $A_{dd}(s_1, s_2, s_3)$ es un factor de propagación de los rayos debido a la difracción doble generada por las dos aristas que tiene la siguiente expresión:

$$A_{dd}(s_1, s_2, s_3) = \sqrt{\frac{s_1 + s_2}{s_3(s_1 + s_2 + s_3)}} \quad (19)$$

Del mismo modo que ocurría en el capítulo anterior, es necesario calcular el campo total que obtendremos en el receptor, el cual variará en función de la altura de la antena receptora y del escenario en el que nos encontremos.

Por lo tanto, si nos encontramos ante dos obstáculos a la misma altura, como en el primero de los casos, el campo total será igual al campo debido a la difracción doble hasta que la altura de la antena sobrepase la altura de los obstáculos, donde deberemos sumar a esta aportación la debida al rayo directo ($d_{directo}$) y la debida al rayo difractado en la primera arista (d_{1d}), la cual se obtiene simplificando el escenario a un solo obstáculo, para calcular el efecto de la difracción simple debido al mismo.

En el caso en el que las aristas tengan distinta altura, existiría una zona de transición en la que las aportaciones al campo total estarían debidas al rayo causado por la difracción doble y el rayo debido a la difracción simple de la primera arista, sin contar con la aportación del rayo directo.

3.2. Pérdidas respecto a espacio libre

Para obtener los resultados válidos para realizar nuestras comprobaciones, en cuanto al modelado de la difracción doble, en lugar de calcular las pérdidas por propagación, como ocurría en el anterior capítulo, decidimos calcular las pérdidas respecto al campo existente en espacio libre (en ausencia de cualquier obstáculo). Para ello definimos el valor del campo total como la suma del campo debido al rayo directo, del campo difractado debido a la primera arista (siguiendo la misma expresión empleada en 5) y al campo debido a la difracción doble (17):

$$E_{d1} = \frac{E_0}{s'} e^{-jks'} D(L, \phi, \phi', \beta_0) A(s', d_{1d}) e^{-jkd_{1d}} \quad (20)$$

$$|\vec{E}_{TOTAL}| = \frac{E_0}{d_{directo}} e^{-jkd_{directo}} + E_{d1} + E_{dd} \quad (21)$$

$$A(dB) = -20 \log_{10} \left(\frac{|\vec{E}_{TOTAL}|}{|\vec{E}_{espacio_libre}|} \right) \quad (22)$$

donde

$$E_{espacio_libre} = \frac{E_0}{d_{directo}} e^{-jkd_{directo}} \quad (23)$$

3.3. Ejemplos

Al igual que en el capítulo anterior, nuestros resultados debían comprobarse con publicaciones que verificasen la validez del modelo para el cálculo de la difracción doble. Para ello, se comprobó su efecto en dos escenarios, con una geometría igual a la descrita anteriormente.

Estas comprobaciones se realizaron siguiendo la geometría de las dos primeras configuraciones incluidas en la evaluación numérica de [5], siendo los datos siguientes según el escenario:

- Escenario 1
 - $d_1=8000$ m
 - $d_2=2000$ m
 - $d_3=10000$ m
 - $h_{tx}=h_1=h_2=50$ m
 - h_{rx} entre -500 y 500 m

- Escenario 2
 - $d_1=8000$ m
 - $d_2=2000$ m
 - $d_3=10000$ m
 - $h_{tx}=h_1=50$ m
 - $h_2=0$ m
 - h_{rx} entre -500 y 500 m

Analizando los primeros resultados, se comprobó que la respuesta cuando ambos obstáculos poseían la misma altura, no coincidía con la incluida en el artículo mencionado, por lo que se optó por emplear los datos que aparecen en [7] , donde se incrementa ligeramente la altura del primer obstáculo, confirmando la validez de los cálculos para esta configuración como muestra la Fig. 10.

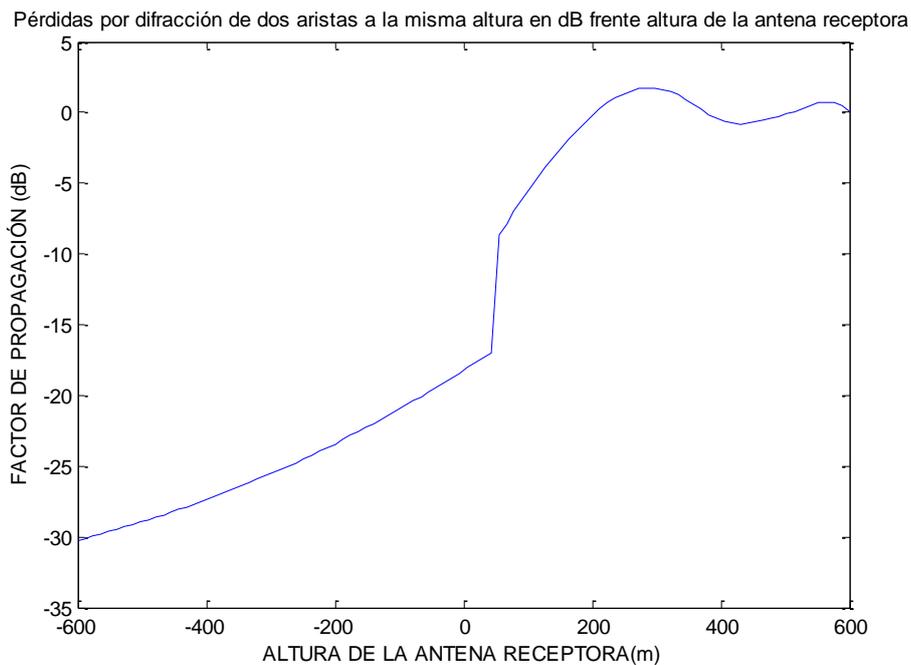


Figura 10. Factor de propagación debido a la difracción doble con obstáculos a la misma altura

Finalmente, con los datos empleados para el segundo escenario, los resultados eran correctos, según lo mostrado en el artículo [6], como se muestra en la Fig. 11.

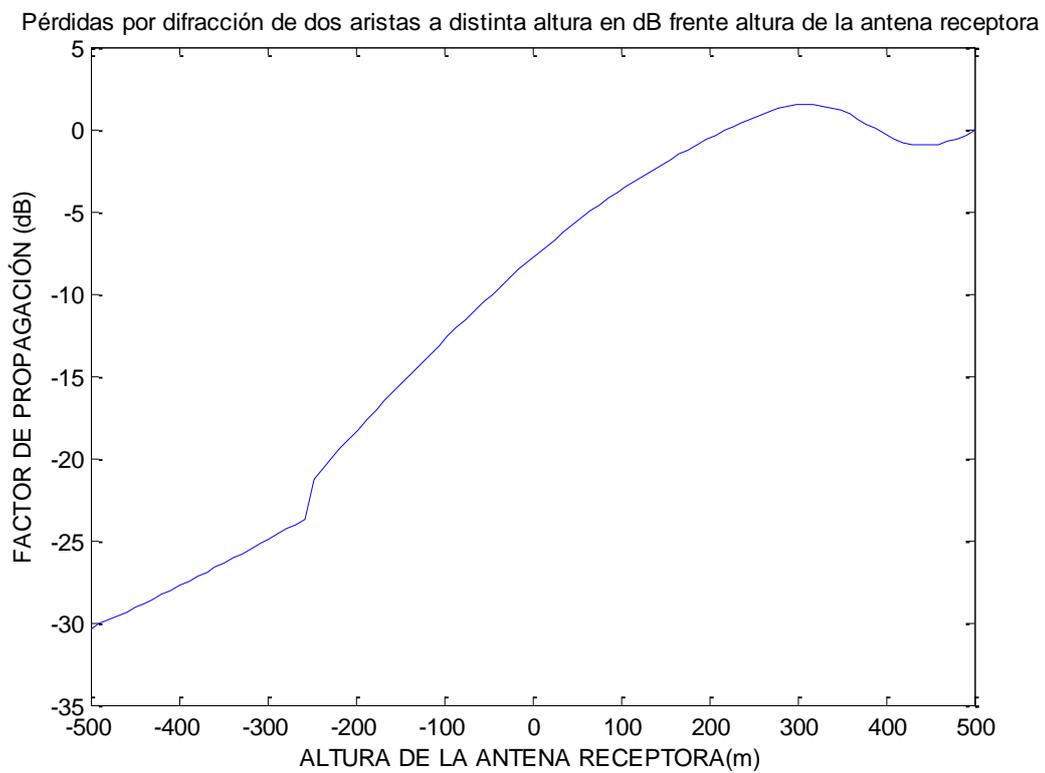


Figura 11. Factor de propagación debido a la difracción doble con obstáculos a diferentes alturas

4. RESULTADOS PARA UN ÁRBOL AISLADO

El siguiente paso a seguir era obtener unos valores reales de pérdidas generados por un árbol, y comparar esos resultados con nuestros modelos teóricos presentados con anterioridad. Para ello se realizaron medidas sobre un árbol de cítricos ubicado en la Finca Tomás Ferro de la Universidad Politécnica de Cartagena. A continuación, se mostrará el entorno de medida y los resultados finales.

4.1. Entorno de propagación y medidas

A la hora de concluir el estudio, se empleó una geometría similar a la vista en los anteriores capítulos, donde se comparan las medidas tomadas en la finca con los modelos de difracción simple y difracción doble, sustituyendo a las aristas por el árbol en cuestión.

Para la obtención de dichas medidas, se midió la respuesta en frecuencia del entorno, extrayendo de la misma las pérdidas por propagación generadas por el árbol en el radioenlace. Los equipos empleados para la realización de dichas medidas siguen el esquema básico de un radioenlace, donde tenemos dos antenas, una transmisora y otra receptora, conectadas a un analizador de redes vectorial (VNA), en los puertos 1 y 2, usando para la conexión dos conversores electro-ópticos y fibra óptica (Fig. 12).

Por otra parte, se han empleado tres tipos de antenas (bicónica, omnidireccional y directiva) a distintas frecuencias para caracterizar el comportamiento del obstáculo según el canal a utilizar.

A continuación, se indican e ilustran con fotografías los elementos empleados en la toma de medidas experimentales (Figs. 14 a 18).

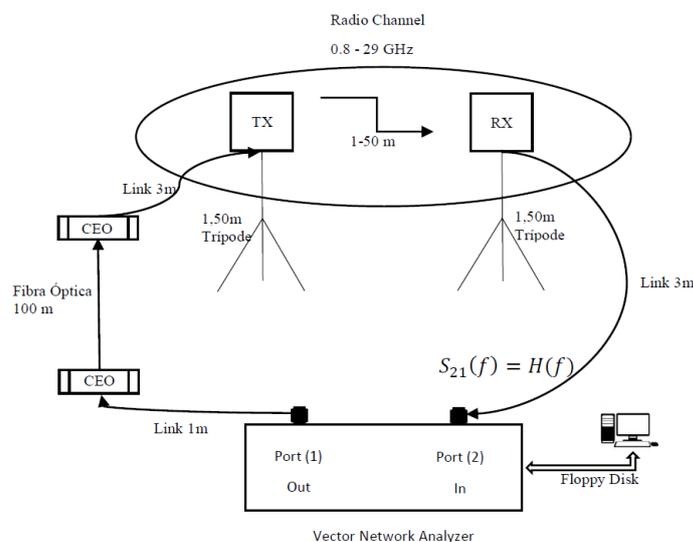


Figura 12. Diagrama de los equipos para la toma de medidas

4.1.1 Analizador de redes



Figura 13. Analizador de redes vectoriales

4.1.2 Antenas

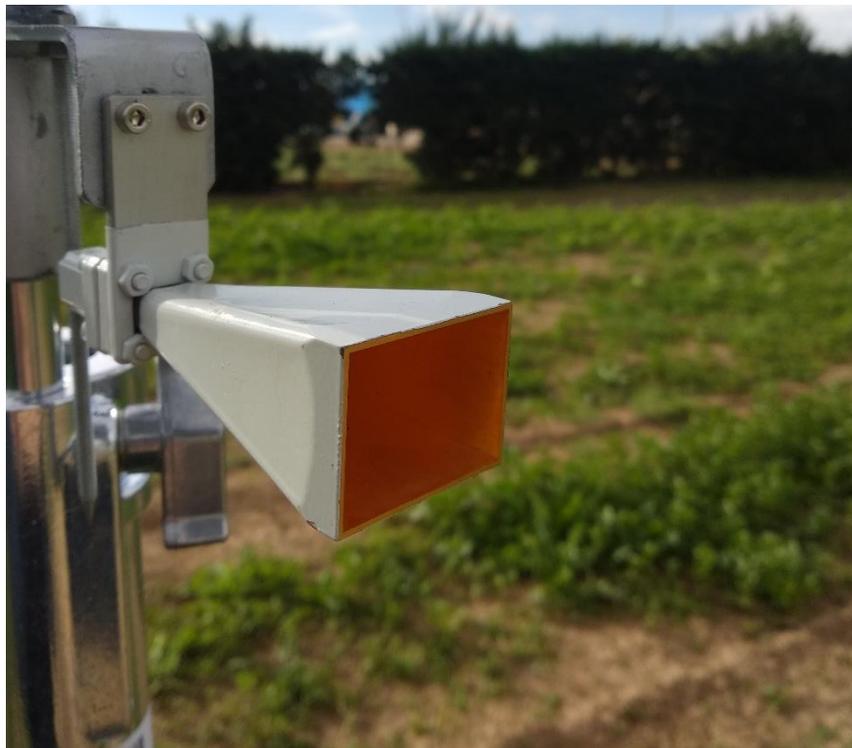


Figura 14. Antena de bocina QSH-SL-26-40-K-20

Frequency	26.5 to 40 GHz
Connector type	K type jack
Power Handling	20 Watt c.w.
VSWR	Typically < 1.3:1
Gain	17.7 to 20.9 dBi
Antenna Factor	41 to 41.4 dB/m
3dB Beamwidth	14.5 to 22.5 degrees
10dB Beamwidth	26.3 to 41.7 degrees
Weight	146 g nominal
Size- max.	36 mm x 28 mm external aperture x 100 mm long
Mounting	Mounting bracket with 2 holes, diameter 3.1 mm, on 12 mm centres.
Construction	Electroformed copper with anodised aluminium mounting bracket.

Figura 15. Especificaciones de la antena de bocina QSH-SL-26-40-K-20

4.1.3 Conversores ópticos



Figura 16. Conversor electro-óptico



Figura 17. Conversor electro-óptico transmisor

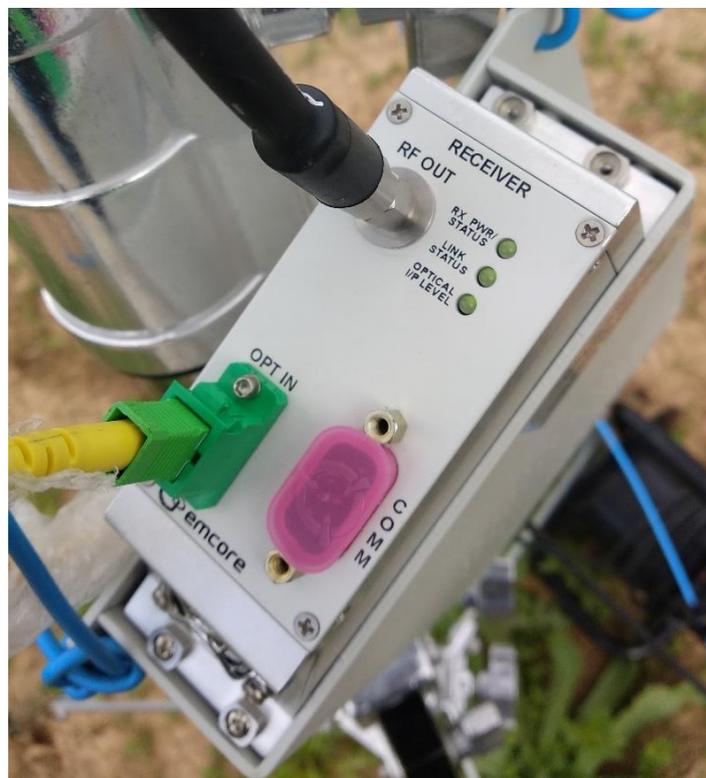


Figura 18. Conversor electro-óptico receptor

4.2.- Modelado de un árbol aislado mediante difracción simple

En primer lugar, se procedió a instalar las diversas antenas en trípodes como el mostrado en la Fig. 19 para configurar nuestro escenario:



Figura 19. Montaje en trípode de la antena transmisora

Donde las medidas obtenidas se compararían con las obtenidas de forma teórica para un modelo de difracción simple, siguiendo un esquema similar al mostrado en el segundo capítulo (Fig. 20):

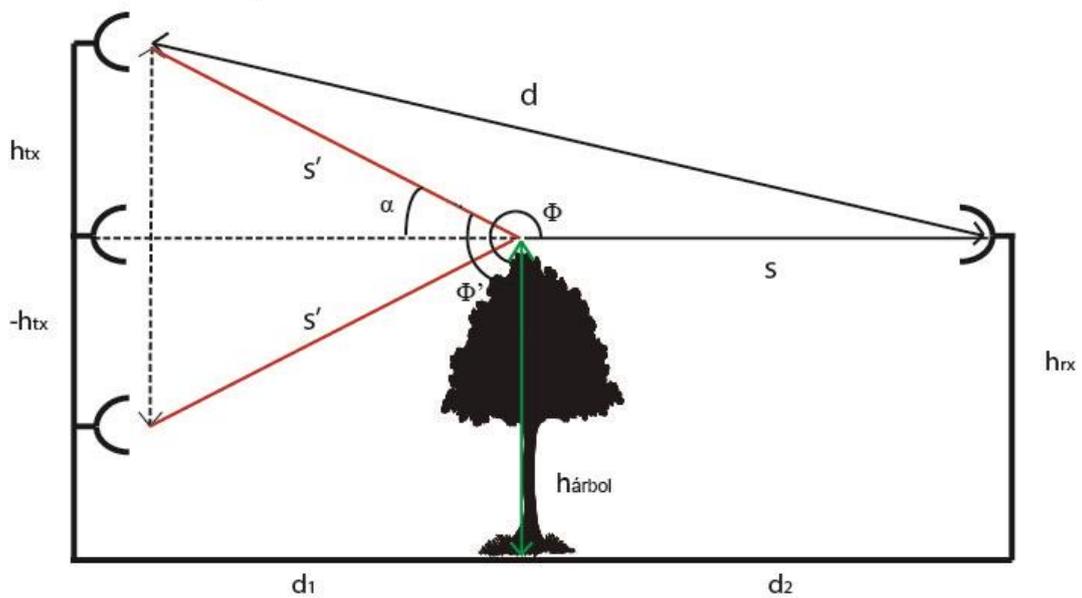


Figura 20. Geometría de estudio tomando el árbol como una arista aislada

Donde los parámetros geométricos son los siguientes:

- Altura del transmisor (h_{tx}) → De 1.8 a 3.6 metros
- Altura del receptor (h_{rx}) → 2.6 metros
- Altura del obstáculo ($h_{\text{árbol}}$) → 2.6 metros
- Distancia del transmisor a la arista (d_1) → 7 metros
- Distancia del receptor a la arista (d_2) → 7 metros

Para la toma de medidas se varió la altura de la antena transmisora cada 5 centímetros para tomar la muestra necesaria, realizando este proceso con la antena direccional a una frecuencia de 28 GHz, cuya ganancia inicial es de 25 dB.

El cálculo de las pérdidas a partir de las medidas obtenidas se realizó según (16), para los valores teóricos, calculados sobre la geometría anteriormente descrita. Por otra parte, cada medida individual obtenida a cada altura se procesó mediante transformadas de Fourier, para obtener la potencia recibida según la posición del transmisor, que se comparará con los valores teóricos.

A continuación, se muestra la comparativa de las medidas obtenidas, en color verde, frente al modelo teórico de difracción simple (azul) (Fig. 21).

4.2.1. Medidas a 28 GHz

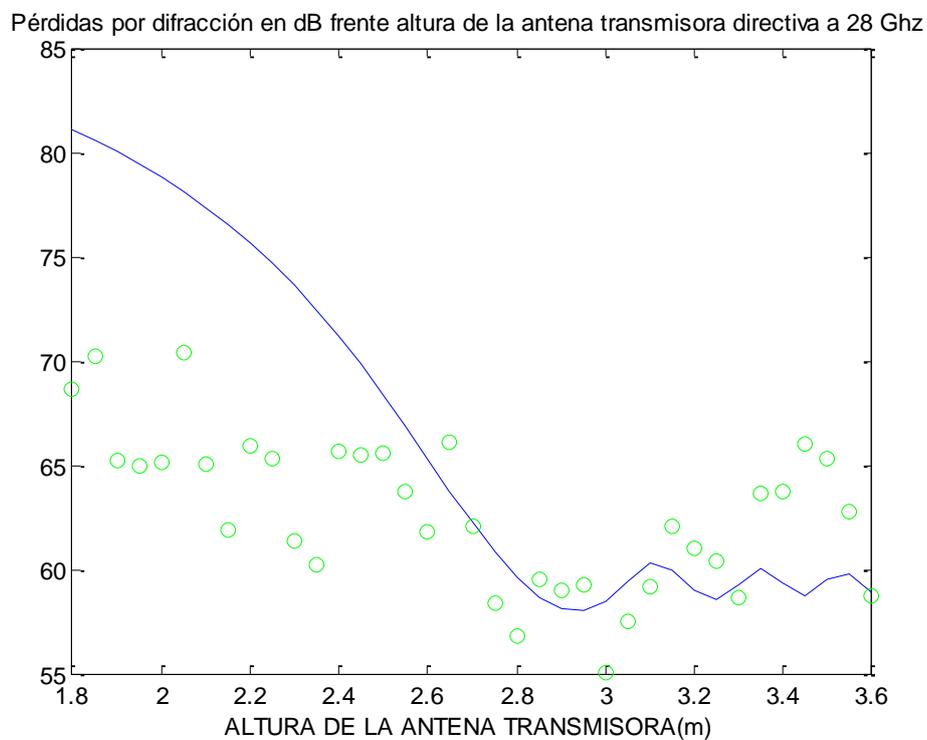


Figura 21. Comparativa de valores medidos con un modelo de difracción simple a 28 GHz

Como podemos observar, en el tramo inicial de la gráfica cuando la altura de la antena transmisora es menor a la altura del árbol, los valores teóricos de pérdidas son mayores a los obtenidos según las medidas, esto puede deberse a contribuciones de energía, tales como los rayos difractados generados en los laterales del árbol, o aquellas que atraviesen al mismo, mientras que estos valores son más cercanos al superar la altura del árbol, presentando desviaciones debidas a la saturación sufrida por la antena direccional a esta frecuencia.

4.3. Modelado de un árbol aislado mediante difracción doble

El siguiente paso era comparar las medidas realizadas en la finca con las obtenidas según el modelo de difracción doble, siendo la geometría del caso de estudio similar a la mostrada en el capítulo tercero (Fig. 22):

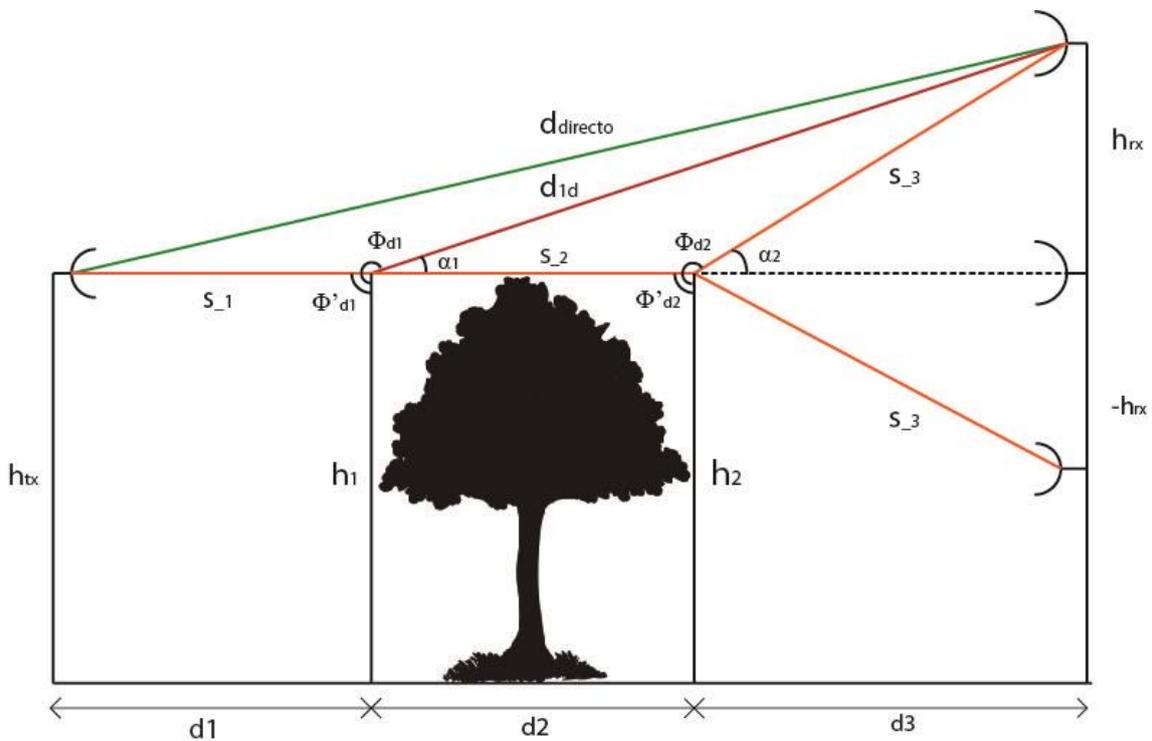


Figura 22. Geometría de estudio tomando el árbol como dos aristas separadas

Donde los valores de los parámetros geométricos son los siguientes:

- Altura del transmisor (h_{tx}) → De 1.8 a 3.6 metros
- Altura del receptor (h_{rx}) → 2.6 metros
- Altura del obstáculo (h_1) → 2.601 metros
- Altura del obstáculo (h_2) → 2.6 metros
- Distancia del transmisor a la primera arista (d_1) → 4.3 metros
- Distancia de la primera arista a la segunda (d_2) → 5.2 metros

- Distancia de la segunda arista al receptor (d_3) \rightarrow 4.5 metros

Del mismo modo que en el caso anterior, en la Fig. 23, se compara el modelo teórico a una frecuencia de 28 GHz, con las antenas anteriormente mencionadas.

4.3.1. Medidas a 28 GHz

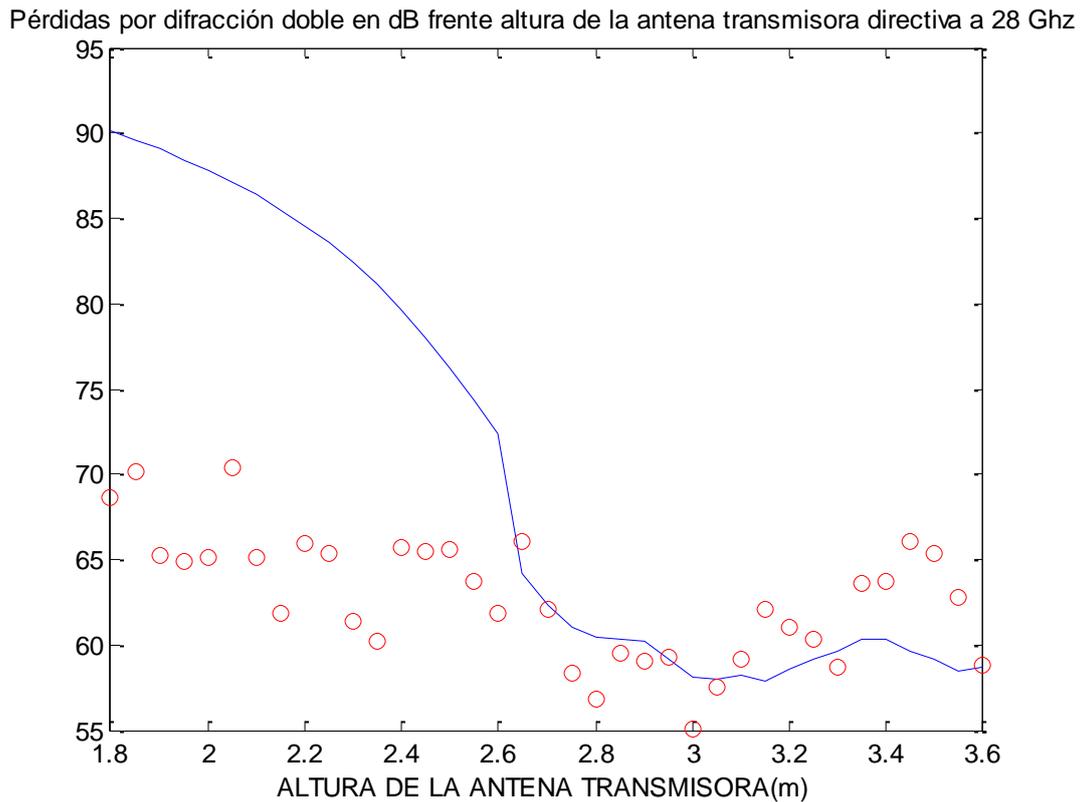


Figura 23. Comparativa de valores medidos con un modelo de difracción doble a 28 GHz

Al igual que ocurre en el caso de la representación de los valores para la difracción simple, las medidas obtenidas a una altura menor a la altura del árbol, difieren bastante en valor con las pérdidas que se obtienen una vez superada dicha altura. Cabe destacar que en alturas cercanas a la del árbol los valores parecen coincidir, dispersándose al aumentar la altura del transmisor.

Esto puede deberse, al efecto de dispersión que generan las hojas ubicadas en la copa del árbol, provocando que la energía se disperse en todas direcciones, lo que conlleva a un aumento en las pérdidas de la onda recibida, ya que la difracción producida por el árbol no es puntual, tal y como se ocurre en el modelo teórico, donde se asumen que el transmisor y el receptor se encuentran en el mismo plano que las aristas.

5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS

5.1.- Conclusiones

A lo largo de este trabajo, se han presentado, en primer lugar, las expresiones y la geometría básica para caracterizar un escenario básico con el que comprobar los efectos de la difracción simple ante un obstáculo de tipo arista aislada o cuchillo, donde se consiguió un programa en MATLAB que permite la caracterización de dicho fenómeno.

En el siguiente capítulo, el objetivo era obtener un programa capaz de simular un escenario, en este caso, que nos permitiese estudiar los efectos de la difracción doble frente a dos aristas de tipo cuchillo, similar al desarrollado en el anterior capítulo.

Por último, el objetivo final era enfrentar las medidas tomadas en una situación real, sustituyendo el obstáculo por un árbol de cítricos, y comparar esas medidas con las obtenidas de forma teórica. Las medidas reales obtenidas a 28 GHz, nos brindan unos resultados más o menos coherentes, aunque las medidas tomadas en la finca poseen cierta dispersión en los valores cuando la altura del transmisor se aleja a la altura del árbol, debido quizás a la saturación sufrida por las antenas, lo que causa una variación de las medidas un tanto errática.

5.2. Futuras líneas

Como posibles líneas futuras de investigación, se pueden enumerar las siguientes:

- Creación de nuevos programas para automatizar el cálculo y representación del efecto de la difracción, simple y doble, para diferentes obstáculos.
- Estudiar el efecto de otro tipo de árboles cítricos y obstáculos agrícolas, a la misma o distintas frecuencias.
- Estudiar el efecto que provoca este obstáculo en otro tipo de fenómenos como la dispersión.
- Servir de base para nuevos proyectos, como Trabajos Fin de Estudios o Tesis Doctorales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M Hernando Rábanos, 'Transmisión por radio', Ed. Centro de estudios Ramón Areces, Tercera edición, 1998.
- [2] Digital Farming: What does it really mean? CEMA, Disponible en: <http://www.cema-agri.org/page/digital-farming-what-does-it-really-mean>. Acceso 21/6/2018.
- [3] UTI-R P.833-9 Attenuation in vegetation
- [4] C. A. Balanis, "Advance Engineering Electromagnetics", New York, 1989.
- [5] Luebbers, R. J. "Finite conductivity uniform GTD versus knife edge diffraction in prediction of propagation path loss," IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 32, no. 1, pp. 70-76, January 1984.
- [6] Luebbers, R. J. "A General,Uniform Double Wedge Diffraction Coefficient", IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 39, no. 1, pp. 8-14, January 1991.
- [7] Holm, P. D. "UTD-Difraction Coefficients for Higher Order Wedge Diffracted Fields", IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 44, no. 6, pp. 879-888, January 1996.

ANEXO A. COEFICIENTE DE DIFRACCIÓN UTD PARA UNA ARISTA

```
function [ D ] = dispersion_ISB(soft, beta, frec, fi, fi_pr, s,
s_pr)
%Funcion que nos permite calcular la Dispersion con la condicion de
campos
%en la ISB

%Generamos la constante k
lambda= 3e8/frec;
k=(2*pi)/lambda;

%Generamos el parámetro L de distancia,
%en este caso para una onda esférica
L=(s_pr*s*(sin(beta).^2))/(s_pr+s);

%Generamos el parametro a
if soft==1
    a=2*(cos((fi-fi_pr)/2).^2);
else
    a=2*(cos((fi+fi_pr)/2).^2);
end

x=k*L*a;

F=transicion_fresnel(x);

    F1=-exp(-1i*pi/4);
    F2=2*sqrt(2*pi*k)*sin(beta);
    F3=F/(cos((fi-fi_pr)/2));
    D_i=(F1/F2)*F3;

    F1=-exp(-1i*pi/4);
    F2=2*sqrt(2*pi*k)*sin(beta);
    F3=F/(cos((fi+fi_pr)/2));
    D_r=(F1/F2)*F3;

if soft==1
    D=D_i-D_r;
else
    D=D_i+D_r;
end

if fi-fi_pr==pi
    D=-sqrt(L)/2;
end

end
```

ANEXO B: PROGRAMAS EN MATLAB

```
% Comprobación de la función de Difracción GTD a distintas
frecuencias
close all;
clear all;
%Iniciamos las variables
h_tx=linspace(0,200,200);
h_rx=10;
h_arbol=50;

d1=2500;
d2=2500;

s=sqrt(d2^2+(h_arbol-h_rx)^2);
n=size(h_tx);

f1=100e6;
f2=1e9;
f3=10e9;

E0=1;
beta=pi/2;
soft=0;

lambda1= 3e8/f1;
lambda2= 3e8/f2;
lambda3= 3e8/f3;

k1=(2*pi)/lambda1;
k2=(2*pi)/lambda2;
k3=(2*pi)/lambda3;

%Calculo de los ángulos en función de la altura de la antena
for j=1:n(2)
    alfa_rad(j)= atan((h_tx(j)-h_arbol)/d2);

    d(j)=sqrt((d1+d2)^2+(h_tx(j)-h_rx)^2);
    s_pr(j)=d1/cos(alfa_rad(j));

    fi=(3*pi)/2+acos(d2/s);
    fi_pr(j)=(pi/2)+alfa_rad(j);
end

%Cálculo de las pérdidas a distintas frecuencias
for j=1:n(2)
    D_1(j)=dispersion_ISB(soft,beta,f1,fi,fi_pr(j),s,s_pr(j));
    if h_tx(j)<=90
        E1_1(j)=(E0/s_pr(j))*exp(-
1i*k1*s_pr(j))*sqrt(s_pr(j)/(s*(s+s_pr(j))))*D_1(j)*exp(-1i*k1*s);
    else
        E1_1(j)=(E0/d(j))*exp(-1i*k1*d(j))+(E0/s_pr(j))*exp(-
1i*k1*s_pr(j))*sqrt(s_pr(j)/(s*(s+s_pr(j))))*D_1(j)*exp(-1i*k1*s);
    end

    Ls1(j)=20*log10((lambda1/(4*pi))*abs(E1_1(j)));
end
```

```

for j=1:n(2)
    D_2(j)=dispersion_ISB(soft,beta,f2,fi,fi_pr(j),s,s_pr(j));
    if h_tx(j)<=90
        E1_2(j)=(E0/s_pr(j))*exp(-
1i*k2*s_pr(j))*sqrt(s_pr(j)/(s*(s+s_pr(j))))*D_2(j)*exp(-1i*k2*s);
    else
        E1_2(j)=(E0/d(j))*exp(-1i*k2*d(j))+(E0/s_pr(j))*exp(-
1i*k2*s_pr(j))*sqrt(s_pr(j)/(s*(s+s_pr(j))))*.D_2(j).*exp(-1i*k2*s);
    end

    Ls2(j)=20*log10((lambda2/(4*pi))*abs(E1_2(j)));
end

for j=1:n(2)
    D_3(j)=dispersion_ISB(soft,beta,f3,fi,fi_pr(j),s,s_pr(j));
    if h_tx(j)<=90
        E1_3(j)=(E0/s_pr(j))*exp(-
1i*k3*s_pr(j))*sqrt(s_pr(j)/(s*(s+s_pr(j))))*D_3(j)*exp(-1i*k3*s);
    else
        E1_3(j)=(E0/d(j))*exp(-1i*k3*d(j))+(E0/s_pr(j))*exp(-
1i*k3*s_pr(j))*sqrt(s_pr(j)/(s*(s+s_pr(j))))*.D_3(j).*exp(-1i*k3*s);
    end

    Ls3(j)=20*log10((lambda3/(4*pi))*abs(E1_3(j)));
end

figure(4)

plot(h_tx,Ls1)
hold on
plot(h_tx,Ls2,'r')
plot(h_tx,Ls3,'g')
title('Pérdidas por difracción en dB frente altura de la antena
transmisora')
xlabel('ALTURA DE LA ANTENA TRANSMISORA(m)')
ylabel('PÉRDIDAS POR DIFRACCIÓN (dB)')
legend('100 MHz','1 GHz','100 GHz')

%% Comprobación de la Difraccion doble (ARTICULO HOLM)
%%Mismas alturas con una minima diferencia

clear all
%close all

h_tx=50;
h_rx=linspace(-600,600,100);
h_1=50.001;
h_2=50;

d1=8000;
d2=2000;
d3=10000;

n=size(h_rx);
lambda= 3;
f=3e8/lambda;
k1=(2*pi)/lambda;
beta=pi/2;
E0=1;

```

```

soft=0;

s_primera=d1; s_segunda=d2;

for j=1:n(2)
    %%Rayo directo
    d(j)=sqrt((d1+d2+d3)^2+(h_tx-h_rx(j))^2);
    E_i(j)=(E0/d(j))*exp(-1i*k1*d(j));

    %%Para primera difraccion simple
    alfa_1(j)=atan((h_1-h_rx(j))/(d2+d3));
    s_D1(j)=(d2+d3)/cos(alfa_1(j));
    fi_d1(j)=((3*pi)/2)+alfa_1(j);
    fi_pr_d1=pi/2;

D_1(j)=dispersion_ISB(soft,beta,f,fi_d1(j),fi_pr_d1,s_D1(j),s_primera)
;
    E_D1(j)=(E0/s_primera)*exp(-
1i*k1*s_primera)*sqrt(s_primera/(s_D1(j).*(s_primera+s_D1(j))))*.D_1(j)
).*exp(-1i*k1*s_D1(j));

    %%Para la segunda difraccion simple
    alfa_2(j)=atan((h_2-h_rx(j))/d3);
    s(j)=(d3)/cos(alfa_2(j));
    fi_d2(j)=((3*pi)/2)+alfa_2(j);
    fi_pr_d1=pi/2;
    s_D2=d1+d2;
    D_2(j)=dispersion_ISB(soft,beta,f,fi_d2(j),fi_pr_d1,s(j),s_D2);
    E_D2(j)=(E0/s_D2)*exp(-
1i*k1*s_D2)*sqrt(s_D2/(s(j).*(s(j)+s_D2))).*D_2(j).*exp(-1i*k1*s(j));

    %%Para difraccion doble
    alfa_d12=atan((h_1-h_2)/d2);
    fi_d12=((3*pi)/2)+alfa_d12;
    fi_pr_d1=pi/2;

    alfa_2(j)=atan((h_2-h_rx(j))/d3);
    fi_d2(j)=((3*pi)/2)+alfa_2(j);
    fi_pr_d2=pi/2+alfa_d12;

A_dd(j)=sqrt((s_primera+s_segunda)/(s(j)*(s_primera+s_segunda+s(j))));

    E_i1=(E0/s_primera)*exp(-1i*k1*s_primera);

D_D1(j)=dispersion_ISB(soft,beta,f,fi_d12,fi_pr_d1,s_segunda,s_primera)
;

D_D2(j)=dispersion_ISB(soft,beta,f,fi_d2(j),fi_pr_d2,s(j),s_segunda);

E_DD(j)=E_i1*D_D1(j)*sqrt(s_primera/(s_segunda*(s_primera+s_segunda)))
*exp(-1i*k1*s_segunda)*D_D2(j)*A_dd(j)*exp(-1i*k1*s(j));

    if h_rx(j)<=50
        E(j)=E_DD(j);
    else
        E(j)=E_i(j)+E_D1(j)+E_DD(j);
    end
end

```

```

end

Ls(j)=20*log10(abs(E(j)./E_i(j)));
end

figure(5)

plot(h_rx,Ls)
title('Pérdidas por difracción de dos aristas a la misma altura en dB
frente altura de la antena receptora')
xlabel('ALTURA DE LA ANTENA RECEPTORA(m)')
ylabel('FACTOR DE PROPAGACIÓN (dB)')

%% Comprobación de la Difraccion doble a distintas alturas
clear all;
%close all;
h_tx=50;
h_rx=linspace(-500,500,100);
h_1=50;
h_2=0;

d1=8000;
d2=2000;
d3=10000;

n=size(h_rx);
lambda= 3;
f=3e8/lambda;
k1=(2*pi)/lambda;
beta=pi/2;
E0=1;
soft=1;

s_primera=d1; s_segunda=sqrt((h_1-h_2)^2+d2^2);

for j=1:n(2)
    %%Rayo directo
    d(j)=sqrt((d1+d2+d3)^2+(h_tx-h_rx(j))^2);
    E_i(j)=(E0/d(j))*exp(-1i*k1*d(j));

    %%Para primera difraccion simple
    alfa_1(j)=atan((h_1-h_rx(j))/(d2+d3));
    s_D1(j)=(d2+d3)/cos(alfa_1(j));
    fi_d1(j)=((3*pi)/2)+alfa_1(j);
    fi_pr_d1=pi/2;

    D_1(j)=dispersion_ISB(soft,beta,f,fi_d1(j),fi_pr_d1,s_D1(j),s_primera)
;
    E_D1(j)=(E0/s_primera)*exp(-
1i*k1*s_primera)*sqrt(s_primera/(s_D1(j).*(s_primera+s_D1(j))))).*D_1(j)
).*exp(-1i*k1*s_D1(j));

    %%Para difraccion doble
    % ángulos coeficiente difracción simple primera arista a segunda
arista
    alfa_d12=atan((h_1-h_2)/d2);
    fi_d12=((3*pi)/2)+alfa_d12;

```

```

fi_pr_d1=pi/2;
%ángulos coeficiente difracción simple segunda arista a receptor
alfa_2(j)= atan((h_2-h_rx(j))/d3);
fi_d2(j)=((3*pi)/2)+alfa_2(j);
fi_pr_d2=pi/2+alfa_d12;

s_D3(j)=d3/cos(alfa_2(j));

%factor de atenuación difracción doble

A_dd(j)=sqrt((s_primera+s_segunda)/(s_D3(j)*(s_primera+s_segunda+s_D3(
j)))));

E_i1=(E0/s_primera)*exp(-1i*k1*s_primera);

D_D1(j)=dispersion_ISB(soft,beta,f,fi_d12,fi_pr_d1,s_segunda,s_primera
);

D_D2(j)=dispersion_ISB(soft,beta,f,fi_d2(j),fi_pr_d2,s_D3(j),s_segunda
);

E_DD(j)=E_i1*D_D1(j)*sqrt(s_primera/(s_segunda*(s_primera+s_segunda)))
*exp(-1i*k1*s_segunda)*D_D2(j)*A_dd(j)*exp(-1i*k1*s_D3(j));

if h_rx(j)<-250
    E(j)=E_DD(j);
elseif h_rx(j)<50 && h_rx(j)>=-250
    E(j)=E_D1(j)+E_DD(j);
elseif h_rx(j)>=50
    E(j)=E_i(j)+E_D1(j)+E_DD(j);
end

Ls(j)=20*log10(abs(E(j)./E_i(j)));
end

figure(6)

plot(h_rx,Ls)
title('Pérdidas por difracción de dos aristas a distinta altura en dB
frente altura de la antena receptora')
xlabel('ALTURA DE LA ANTENA RECEPTORA(m)')
ylabel('FACTOR DE PROPAGACIÓN (dB)')

% Representacion de perdidas frente a potencia recibida por ANTENA
DIRECTIVA A 28 GHz
%DIFRACCION SIMPLE

%close all
clear all
p=1;
for n=150.0:5.0:420.0
a=strcat('DM28_',num2str(n),'.ASC'); %Intenta automatizarlo utilizando
% esta expresión
medida=load(a);
f=medida(:,1);
H=medida(:,2)+1i*medida(:,3);

```

```

h=(ifft(H));

potencia(p)=0.0;
for j=1:length(medida)
    potencia(p)=potencia(p)+abs(h(j)^2);
end
Potencia_dBW(p)=10*log10(potencia(p));
p=p+1;

end

h_tx=(150:5:420).*0.01;
% load('PotenciaDirect28GHz.mat');
% At_prac=transpose(MatrizMaxPDP(:,2));
% h_tx=transpose(MatrizMaxPDP(:,1)).*0.01;
h_arbol=2.6;
h_rx=2.6;
d1=7;
d2=7;
s=d2;
n=size(h_tx);

f=28e9;
E0=1;
beta=pi/2;
lambda= 3e8/f;
k=(2*pi)/lambda;
soft=0;

for j=1:n(2)
    alfa_rad(j)= atan((h_tx(j)-h_arbol)/d2);

    d(j)=sqrt((d1+d2)^2+(h_tx(j)-h_rx)^2);
    s_pr(j)=d1/cos(alfa_rad(j));

    fi=(3*pi)/2+acos(d2/s);
    fi_pr(j)=(pi/2)+alfa_rad(j);
end

for j=1:n(2)
    D(j)=dispersion_ISB(soft,beta,f,fi,fi_pr(j),s,s_pr(j));
    if alfa_rad(j)<=0
        E1(j)=(E0/s_pr(j))*exp(-
1i*k*s_pr(j))*sqrt(s_pr(j)/(s*(s+s_pr(j))))*D(j)*exp(-1i*k*s);
    else
        E1(j)=(E0/d(j))*exp(-1i*k*d(j))+(E0/s_pr(j))*exp(-
1i*k*s_pr(j))*sqrt(s_pr(j)/(s*(s+s_pr(j)))).*D(j).*exp(-1i*k*s);
    end

    Ls(j)=20*log10((lambda/(4*pi))*abs(E1(j)));
end

figure(9)
plot(h_tx,-Ls-25)
hold on
scatter(h_tx,-Potencia_dBW,'g')
%scatter(h_tx,At_prac,'r')

```

```

title('Pérdidas por difracción en dB frente altura de la antena
transmisora directiva a 28 Ghz')
xlabel('ALTURA DE LA ANTENA TRANSMISORA(m)')
xlim([1.8 3.6 ])

% Representacion de perdidas por difraccion doble frente a potencia
recibida por ANTENA DIRECTIVA A 28 GHZ
%DIFRACCION DOBLE
%close all
clear all
p=1;
for n=150.0:5.0:420.0
a=strcat('DM28_',num2str(n),'.ASC'); %Intenta automatizarlo utilizando
% esta expresión
medida=load(a);
f=medida(:,1);
H=medida(:,2)+1i*medida(:,3);
h=(ifft(H));

potencia(p)=0.0;
    for j=1:length(medida)
        potencia(p)=potencia(p)+abs(h(j)^2);
    end
Potencia_dBW(p)=10*log10(potencia(p));
p=p+1;

end

h_rx=(150:5:420).*0.01;
% load('PotenciaBiconica700MHz.mat');
% At_prac=transpose(MatrizMaxPDPBIC700(:,2));
% h_rx=transpose(MatrizMaxPDPBIC700(:,1)).*0.01;
h_1=2.601;
h_2=2.6;
h_tx=2.6;

d1=4.3;
d2=5.2;
d3=4.5;

n=size(h_rx);
f= 28e9;
lambda=3e8/f;
k1=(2*pi)/lambda;
beta=pi/2;
E0=1;
soft=0;

s_segunda=d1; s_primera=d2;

for j=1:n(2)
    %%Rayo directo
    d(j)=sqrt((d1+d2+d3)^2+(h_tx-h_rx(j))^2);
    E_i(j)=(E0/d(j))*exp(-1i*k1*d(j));

    %%Para primera difraccion simple
    alfa_1(j)=atan((h_1-h_rx(j))/(d2+d3));
    s_D1(j)=(d2+d3)/cos(alfa_1(j));
    fi_d1(j)=((3*pi)/2)+alfa_1(j);
    fi_pr_d1=pi/2;

```

```

D_1(j)=dispersion_ISB(soft,beta,f,fi_d1(j),fi_pr_d1,s_D1(j),s_segunda)
;
E_D1(j)=(E0/s_segunda)*exp(-
1i*k1*s_segunda)*sqrt(s_segunda/(s_D1(j).*(s_D1(j)+s_segunda))).*D_1(j)
).*exp(-1i*k1*s_D1(j));

%%Para la segunda difraccion simple
alfa_2(j)=atan((h_2-h_rx(j))/d3);
s(j)=(d3)/cos(alfa_2(j));
fi_d2(j)=((3*pi)/2)+alfa_2(j);
fi_pr_d1=pi/2;
s_D2=d1+d2;
D_2(j)=dispersion_ISB(soft,beta,f,fi_d2(j),fi_pr_d1,s(j),s_D2);
E_D2(j)=(E0/s_D2)*exp(-
1i*k1*s_D2)*sqrt(s_D2/(s(j).*(s(j)+s_D2))).*D_2(j).*exp(-1i*k1*s(j));

%%Para difraccion doble
%
A_dd(j)=sqrt((s_segunda+s_primera)/(s(j)*(s(j)+s_segunda+s_primera)));
A_dd(j)=sqrt(s_segunda/((s(j)*s_primera)*(s(j)+s_primera+s_segunda)));
E_i1=(E0/d1)*exp(-1i*k1*d1);

D_D1(j)=dispersion_ISB(soft,beta,f,(3*pi)/2,fi_pr_d1,s_primera,s_segunda);

D_D2(j)=dispersion_ISB(soft,beta,f,fi_d2(j),fi_pr_d1,s(j),s_primera);
E_DD(j)=E_i1*D_D1(j)*D_D2(j)*A_dd(j)*exp(-1i*k1*s(j));

if h_rx(j)<=2.6
E(j)=E_DD(j);

else
E(j)=E_i(j)+E_D1(j)+E_DD(j); %Elimino la segunda difraccion

end

%Ls(j)=20*log10(abs(E(j)./E_i(j)));
Ls(j)=-20*log10((lambda/(4*pi))*abs(E(j)));
end

figure(10)

plot(h_rx,Ls-25)
hold on
scatter(h_rx,-Potencia_dBW,'r')
hold off
title('Pérdidas por difracción doble en dB frente altura de la antena
transmisora directiva a 28 Ghz')
xlabel('ALTURA DE LA ANTENA TRANSMISORA(m)')
xlim([1.8 3.6 ])

```