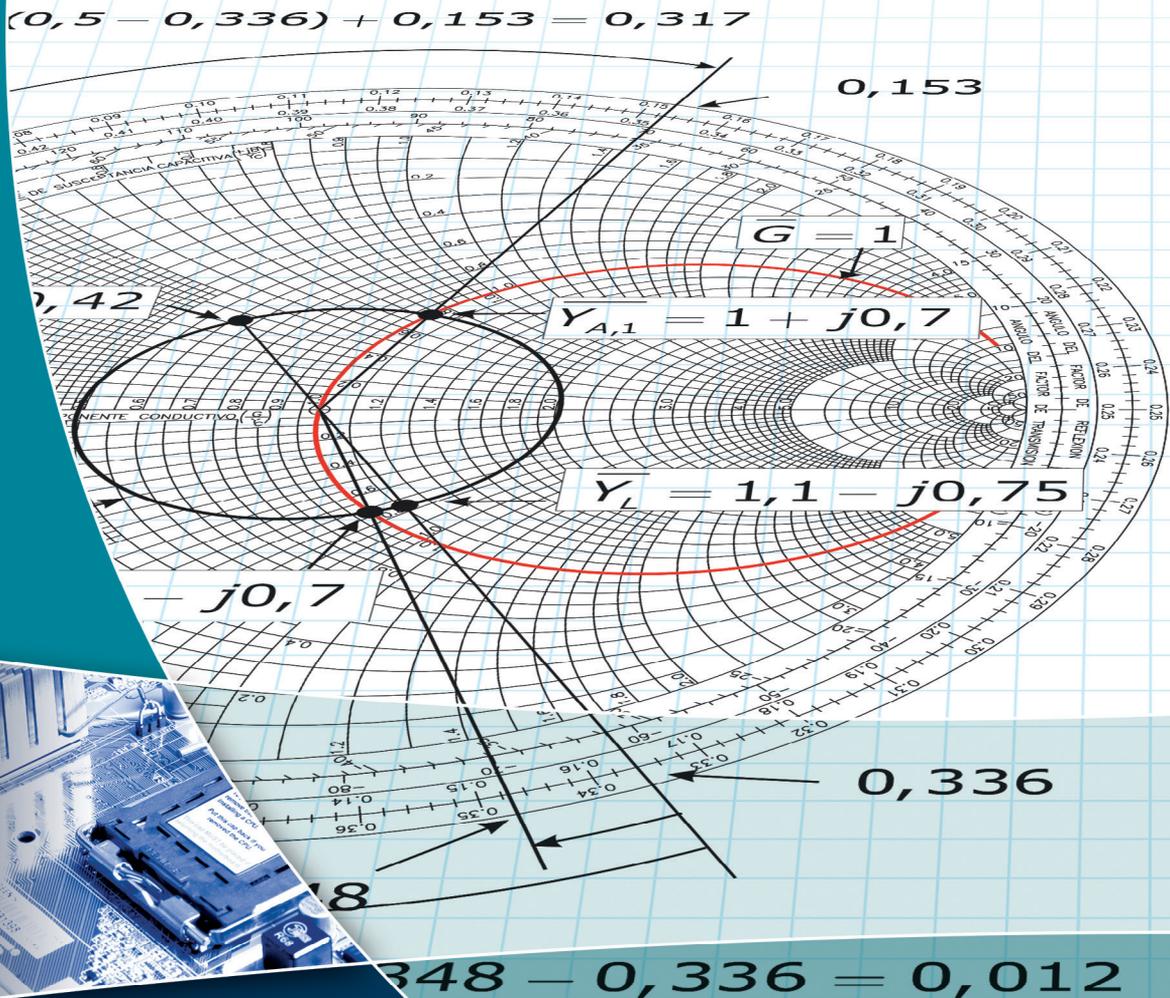


Problemas de propagación de ondas

Eva Antonino Daviu, José Vicente Morro Ros, Pablo Soto Pacheco,
Daniel Sánchez Escuderos, Felipe Vico Bondía



Eva Antonino Daviu
José Vicente Morro Ros
Pablo Soto Pacheco
Daniel Sánchez Escuderos
Felipe Vico Bondia

PROBLEMAS DE PROPAGACIÓN DE ONDAS

**EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

Colección Académica

Los contenidos de esta publicación han sido revisados por el Departamento de Comunicaciones de la Universitat Politècnica de València

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita:

Antonino Daviu, Eva; Morro Ros, José Vicente; Soto Pacheco, Pablo; Sánchez Escuderos, Daniel; Vico Bondia, Felipe (2017). *Problemas de propagación de ondas*. Valencia: Universitat Politècnica de València

© Eva Antonino Daviu
José Vicente Morro Ros
Pablo Soto Pacheco
Daniel Sánchez Escuderos
Felipe Vico Bondia

© 2017, Editorial Universitat Politècnica de València

distribución: Telf.: 963 877 012 / www.lalibreria.upv.es / Ref.: 0476_04_01_01

Imprime: Byprint Percom, sl

ISBN: 978-84-9048-492-0

Impreso bajo demanda

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo edicion@editorial.upv.es.

Impreso en España

Índice

Presentación	5
Capítulo 1. Fundamentos de antenas.....	7
Problema 1.1	7
Problema 1.2	8
Problema 1.3	8
Problema 1.4	9
Problema 1.5	11
Problema 1.6	12
Problema 1.7	13
Problema 1.8	14
Problema 1.9	16
Problema 1.10	17
RESOLUCIONES DE LOS PROBLEMAS	19
Problema 1.1	19
Problema 1.2	19
Problema 1.3	20
Problema 1.4	22

Problema 1.5.....	24
Problema 1.6.....	26
Problema 1.7.....	28
Problema 1.8.....	31
Problema 1.9.....	33
Problema 1.10.....	35
Capítulo 2. Mecanismos de radiopropagación.....	39
Problema 2.1.....	39
Problema 2.2.....	40
Problema 2.3.....	42
Problema 2.4.....	44
Problema 2.5.....	46
Problema 2.6.....	49
Problema 2.7.....	52
Problema 2.8.....	54
RESOLUCIONES DE LOS PROBLEMAS	56
Problema 2.1.....	56
Problema 2.2.....	58
Problema 2.3.....	62
Problema 2.4.....	68
Problema 2.5.....	71
Problema 2.6.....	77
Problema 2.7.....	82
Problema 2.8.....	85
Capítulo 3. La línea de transmisión ideal en régimen permanente sinusoidal.....	91
Problema 3.1.....	91
Problema 3.2.....	93
Problema 3.3.....	95
Problema 3.4.....	96
Problema 3.5.....	97

Problema 3.6	99
Problema 3.7	101
Problema 3.8	102
Problema 3.9	104
Problema 3.10	105
Problema 3.11	107
Problema 3.12	108
RESOLUCIONES DE LOS PROBLEMAS	110
Problema 3.1	110
Problema 3.2	116
Problema 3.3	126
Problema 3.4	133
Problema 3.5	137
Problema 3.6	145
Problema 3.7	149
Problema 3.8	156
Problema 3.9	162
Problema 3.10	167
Problema 3.11	174
Problema 3.12	182
Capítulo 4 . La línea de transmisión real.....	189
Problema 4.1	189
Problema 4.2	191
Problema 4.3	192
Problema 4.4	194
Problema 4.5	196
Problema 4.6	197
Problema 4.7	199
Problema 4.8	201
Problema 4.9	202

Problema 4.10.....	204
Problema 4.11.....	206
Problema 4.12.....	208
RESOLUCIONES DE LOS PROBLEMAS	210
Problema 4.1.....	210
Problema 4.2.....	214
Problema 4.3.....	217
Problema 4.4.....	224
Problema 4.5.....	228
Problema 4.6.....	232
Problema 4.7.....	236
Problema 4.8.....	241
Problema 4.9.....	243
Problema 4.10.....	247
Problema 4.11.....	253
Problema 4.12.....	260
ANEXO: Gráficas y tablas	267
Bibliografía	277

Presentación

Con este libro se pretende presentar una amplia recopilación de problemas, todos ellos resueltos, que cubran los fundamentos de la propagación de ondas en los sistemas de telecomunicación.

A nivel de contenidos, el libro está dividido en cuatro capítulos. Los problemas de los dos primeros capítulos se centran en la propagación de ondas en el espacio libre (radio-propagación), tratando aspectos como los fundamentos de antenas, la ecuación de transmisión y los principales mecanismos de radiopropagación. Los dos capítulos finales recogen problemas relacionados con la propagación de ondas en medios guiados (líneas de transmisión), tratando aspectos como el manejo de la Carta de Smith, el diseño de redes de adaptación de impedancias, el diseño de líneas de transmisión reales o el cálculo de la atenuación en líneas de transmisión reales.

Con el objeto de facilitar la tarea de estudio y aprendizaje, cada capítulo se encuentra organizado en dos partes distintas. En la primera parte se recogen los enunciados de los problemas planteados y se proporciona la solución numérica de cada apartado. La segunda parte del capítulo incluye las resoluciones detalladas de cada uno de los problemas. Los autores recomiendan a los lectores que en primer lugar intenten resolver los problemas sólo a partir de los enunciados, y que utilicen la solución numérica proporcionada para comprobar si el resultado obtenido es el correcto. El apartado de resoluciones que concluye cada tema es útil para que el lector pueda comprobar, incluso habiendo obtenido el resultado correcto, el procedimiento de resolución propuesto por los

autores y las distintas interpretaciones que se pueden ir extrayendo de los resultados que se obtienen durante la resolución de los ejercicios.

Asimismo, al final del tomo se incluye un anexo que incorpora todas las tablas y gráficas necesarias para resolver los problemas planteados a lo largo del libro.

Los autores.

Capítulo 1

Fundamentos de

antenas

El presente capítulo presenta una recopilación de problemas relacionados con los fundamentos básicos de las antenas, elemento fundamental en cualquier sistema de telecomunicaciones inalámbrico. La misión de las antenas en estos sistemas es transmitir y recibir ondas electromagnéticas en el espacio libre.

Los problemas planteados en este capítulo tratan aspectos tales como el manejo de parámetros básicos asociados a las antenas, la ecuación de transmisión, el cálculo del balance de potencias en un enlace radio, y el uso de antenas básicas utilizadas en muchos sistemas de telecomunicación.

Problema 1.1

Calcular la potencia máxima que debería radiar una estación base de telefonía móvil para que un usuario situado a una distancia de 20 m reciba una radiación menor de 0,1 mW/cm². La directividad de la estación base en la dirección del usuario es de 8 dB.

Solución:

$$W_{rad} \approx 29 \text{ dBW}$$

Problema 1.2

Un enlace de comunicaciones está formado por una antena parabólica transmisora de 3 dB de directividad y una antena receptora formada por un dipolo resonante de $\lambda/2$, separadas 15 km. El equipo transmisor entrega una potencia de 30 dBW y opera a una frecuencia de 470 MHz. Calcular la potencia entregada por la antena al sistema receptor, si éste presenta una impedancia de entrada de 50Ω .

Solución:

$$W_{rec} = -44,41 \text{ dBm}$$

Problema 1.3

Se pretende estudiar, para su instalación y puesta en funcionamiento, un radioenlace a 15 GHz cuyo perfil aparece en la Figura 1.1. La estación transmisora estaría formada por un transmisor que entrega una potencia de 10 W a una antena de directividad 20 dB, con una resistencia de radiación de 75Ω y una resistencia de pérdidas óhmicas de 5Ω . La antena transmisora apuntaría perfectamente en la dirección de la antena receptora.

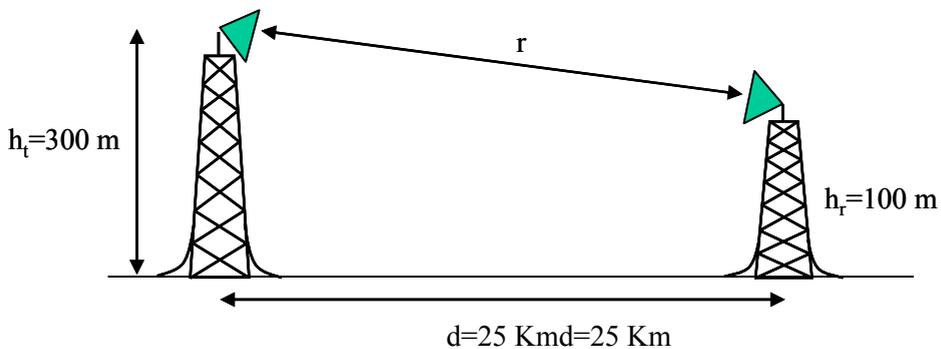


Figura 1.1. Esquema del radioenlace bajo estudio

La antena receptora consistiría en un reflector parabólico de 0,5 m de diámetro, con una eficiencia de iluminación de 0,9 y una eficiencia de desbordamiento de 0,8 que apuntaría en la dirección de la estación transmisora.

Si la temperatura ambiente es de 20° C y el ancho de banda del sistema receptor es de 6 MHz, se pide:

- a) Calcular la potencia que entrega la antena receptora al sistema receptor.
- b) Si la antena receptora tiene un ángulo de elevación de 10° sobre el horizonte, calcular la potencia de ruido a la salida de la antena. Hacer uso de la gráfica de la temperatura de brillo atmosférico proporcionada por la recomendación UIT-R PI.372-6.
- c) Si a la entrada del receptor se requiere un nivel de potencia mínimo de -66,61 dBm, ¿cuál será la distancia máxima a la que se podrán situar las estaciones transmisora y receptora? Considerar que el ángulo de elevación sobre el horizonte de la antena receptora no cambia.

Solución:

a) $W_{rec} = -77,73 \text{ dBW}$

b) $W_N = -116,05 \text{ dBm}$

c) $r_{max} = 219,8 \text{ km}$

Problema 1.4

Un radioenlace a 12 GHz utiliza un repetidor de radio a mitad del trayecto. El repetidor está formado por un amplificador de 30 dB. El transmisor emite con polarización horizontal y entrega a la antena transmisora una tensión eficaz de 148 dBμV, mientras que el repetidor emite con polarización vertical. El esquema del sistema es el que se muestra en la Figura 1.2, donde se puede observar la posible interferencia del transmisor sobre el receptor. Todos los sistemas del radioenlace están adaptados a una impedancia de 50 Ω.

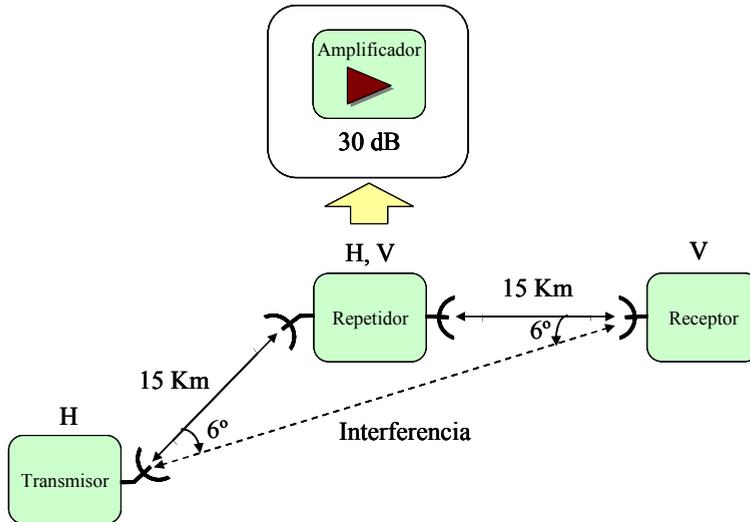


Figura 1.2. Esquema del radioenlace bajo estudio

Teniendo en cuenta que tanto la antena transmisora como receptora tienen su máximo de radiación en la dirección del repetidor, y que la función ganancia de todas las antenas, incluidas las del repetidor, es:

$$G(\theta) = \left| 50 \cdot \frac{\sin(50\pi \sin \theta)}{50\pi \sin \theta} \right|^2$$

siendo θ el ángulo medido a partir de la dirección de apuntamiento de la antena, se pide:

- Calcular la potencia recibida por el repetidor desde el transmisor.
- Calcular la potencia recibida por el receptor desde el repetidor.
- Calcular el coeficiente de polarización máximo que ha de existir en el radioenlace para asegurar una relación señal interferencia en el receptor de 32 dB.
- Considerando el coeficiente de polarización máximo obtenido en el apartado anterior, ¿aumentará la relación señal a interferencia en el receptor si llueve sobre todo el radioenlace con una intensidad de 10 mm/h? Razone la respuesta.

Solución:

a) $W_{rec}^{REP} = -28,58 \text{ dBm}$

b) $W_{rec}^{RX} \text{ (dBm)} = -68,167 \text{ dBm}$

c) $C_p \text{ (dB)} \leq -9,594 \text{ dB}$

Problema 1.5

Un operador de telecomunicaciones quiere dar servicio de banda ancha a una zona rural aprovechando la facilidad de instalación que proporciona una red WiMAX que opera a una frecuencia de 3,5 GHz.

La Estación Base (E.B) se sitúa en una colina, a 15 km de la zona rural y emite una potencia de 1,5 W (ver Figura 1.3). La antena transmisora es una antena parabólica de 2 m de diámetro y eficiencias de iluminación y desbordamiento de $\eta_{il} = 0,9$ y $\eta_s = 0,94$, respectivamente.

Para la recepción, los usuarios emplean una antena con un diagrama de tipo pincel, orientada en la dirección de la E.B, y 8 dB de directividad, con una resistencia de radiación de 100Ω y unas pérdidas óhmicas de 11Ω . La antena no está perfectamente adaptada al sistema receptor, existiendo unas pérdidas por desadaptación de impedancias de 0,85 dB. Tanto la antena transmisora como la receptora trabajan con polarización vertical y el sistema receptor posee un ancho de banda de 30 MHz.

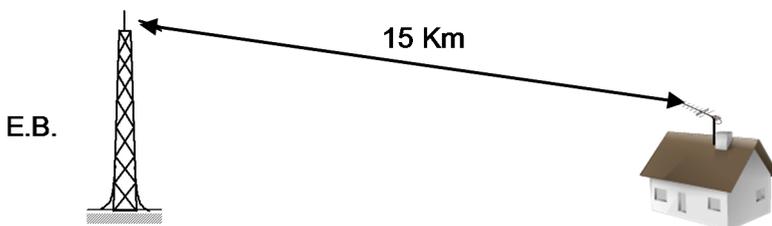


Figura 1.3. Sistema bajo estudio

Si la antena receptora está elevada 20° sobre el horizonte y la temperatura ambiente es de 25° C , se pide:

- a) Calcular la potencia de señal útil recibida por la antena receptora.

- b) Calcular la relación señal a ruido a la salida de la antena receptora considerando condiciones de espacio libre.

Solución:

a) $W_{rec}^{RX} = -51,8 \text{ dBm}$

b) $\frac{S}{N} = 56,56 \text{ dB}$

Problema 1.6

Se pretende emplear un satélite de telecomunicaciones operando en banda Ku (12,5 GHz) para transmitir la señal de televisión a una zona muy amplia, tal y como se muestra en la Figura 1.4. El satélite se encuentra localizado en una órbita geoestacionaria, situándose a una distancia de 36000 km de la tierra, y emplea una antena transmisora con una resistencia de radiación de 75Ω y una resistencia de pérdidas óhmicas de 6Ω .



Figura 1.4. Transmisión de señal vía satélite

Para la recepción de la señal sobre la superficie terrestre, se emplea un reflector parabólico de 80 cm de diámetro, con una eficiencia de iluminación de 0,7 y una eficiencia de desbordamiento de 0,8, que presenta un ancho de haz a -3 dB de 3° y una relación delante-atrás de 0,6. La antena está conectada a un sistema receptor, pero no está perfectamente adaptada al mismo, existiendo unas pérdidas por desadaptación de impedancias de 0,95 dB. El sistema receptor trabaja con una impedancia de 75Ω .

Se pide:

- a) Considerando que el reflector parabólico no está apuntando perfectamente en la dirección del satélite, sino que existe un desapuntamiento de $1,5^\circ$ y considerando que a la entrada del sistema receptor se requiere un nivel mínimo de tensión eficaz de $26 \text{ dB}\mu\text{V}$ para la señal de televisión, determinar la PIRE mínima que ha de radiar la antena del satélite para que exista una correcta recepción de señal.
- b) Considerando que el satélite emite con la PIRE mínima y que la antena receptora está elevada 5° sobre el horizonte, determinar la relación señal a ruido a la entrada del receptor. Si la relación señal a ruido a la entrada del receptor ha de ser mayor de 25 dB , ¿funcionará correctamente el sistema?

NOTA: Puede emplear la gráfica sobre la temperatura de brillo atmosférico.

Solución:

$$a) \quad PIRE = 88,82 \text{ dBm}$$

$$b) \quad \left(\frac{S}{N} \right)_{\text{antena}}^{\text{out}} = 35,06 \text{ dB}$$

Problema 1.7

La llegada de la Televisión Digital Terrestre (TDT) a una determinada zona rural provoca que algunos de sus habitantes dejen de recibir correctamente la señal de ciertos canales de televisión. En concreto, el canal 67 ($f_{\text{central}}=842 \text{ MHz}$) y el canal 69 ($f_{\text{central}}=858 \text{ MHz}$) no son recibidos satisfactoriamente por un usuario situado a 50 km del repetidor de televisión. El repetidor emite con una PIRE de 15 kW .

Para solucionar el problema el usuario decide comprar una nueva antena receptora, que consiste en una antena Yagi, con una resistencia de radiación de 45Ω y una resistencia de pérdidas óhmicas de 6Ω . La antena se conectará a través de un cable coaxial de 10 m de longitud y de 75Ω de impedancia característica al decodificador de TDT (en casa del usuario), tal y como se muestra en la Figura 1.5. El decodificador trabaja también bajo una impedancia de 75Ω . La antena se coloca perfectamente orientada en la dirección del repetidor, y tanto la antena transmisora como la receptora trabajan con polarización horizontal.

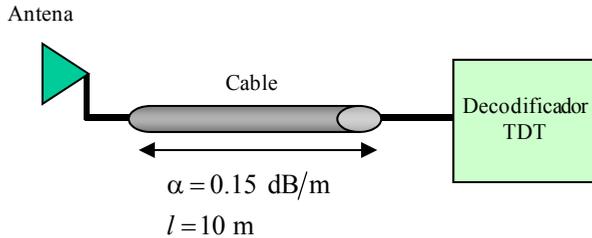


Figura 1.5. Esquema de conexión al decodificador de TDT

Si la temperatura ambiente es de 25 °C, se pide:

- Determinar qué ganancia ha de tener la antena Yagi para que a la entrada del decodificador se tenga, para todos los canales, un nivel mínimo de tensión eficaz de señal útil de 65 dB μ V, en condiciones de espacio libre.
- Considerando que en el rango de frecuencias de trabajo la temperatura de ruido de la antena es de 20 K, que el ancho de banda del decodificador es de 8 MHz y que el nivel mínimo de señal a la entrada del decodificador es el indicado en el apartado a), determinar la relación señal a ruido a la salida de la antena.

Solución:

a) $G_{RX} = 11,24 \text{ dB}$

b) $\left(\frac{S}{N}\right)_{out}^{ant} = 70,05 \text{ dB}$

Problema 1.8

Para dar conexión a internet al edificio CRAI (Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación) de la EPSG, se pretende establecer un radioenlace a una frecuencia de 2.4 GHz con el edificio B del campus de Gandia. El sistema emplearía una estación transmisora en el edificio B, utilizando una antena direccional que emitiría una PIRE de 2 W. La antena receptora, situada en la azotea del CRAI, consistiría en una antena tipo Yagi, resonante a la frecuencia de trabajo, con una resistencia de radiación de 48 Ω y sin pérdidas óhmicas. Esta antena apuntaría perfectamente en la dirección de la antena transmisora y las dos antenas tendrían polarización vertical. Dichas antenas estarían separadas una distancia de 25 m, como muestra la Figura 1.6.

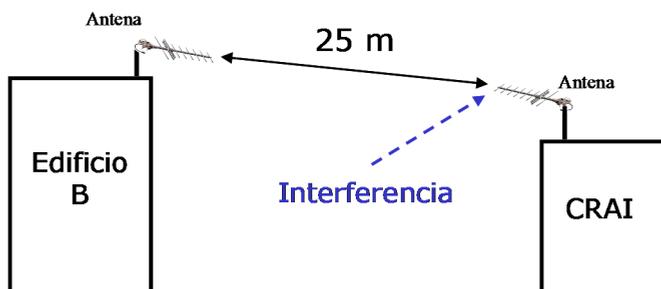


Figura 1.6. Esquema del radioenlace bajo estudio

La antena receptora estaría conectada a un sistema receptor, formado por un cable coaxial de 7 metros y un conjunto de equipos receptores. Todos los equipos del sistema receptor trabajarían sobre una impedancia de 100Ω . Además, en las proximidades del sistema bajo estudio se observa que existe una fuerte interferencia de -50 dBm procedente de otro sistema, que opera en polarización horizontal. Para el sistema receptor las interferencias recibidas por la antena pueden considerarse como un ruido blanco aditivo.

Si la temperatura ambiente es de $21 \text{ }^\circ\text{C}$ y la temperatura de brillo es 40000 K :

- ¿Cuál es la directividad que tendría que tener la antena receptora para obtener un nivel de tensión eficaz a la salida de la antena de $90 \text{ dB}\mu\text{V}$?
- Calcular la relación señal a ruido a la salida de la antena receptora, teniendo en cuenta la presencia de la interferencia. Considerar que el ancho de banda del sistema receptor al que se conecta la antena es de 20 MHz .

Solución:

a) $D_{RX} = 15,56 \text{ dB}$

b) $\left(\frac{S}{N}\right)_{out}^{ant} = 59,57 \text{ dB}$

Problema 1.9

Se pretende dar cobertura de señal de televisión (banda de 470 MHz a 862 MHz) a una población situada en una zona de sombra. Para ello se sitúa un repetidor de televisión en la cima de una montaña, tal y como se muestra en la Figura 1.7. Como se observa, el repetidor recibe la señal de otra estación transmisora situada a 30 km de distancia, que emite un nivel de señal de 10 kW mediante una antena directiva de 31 dB de ganancia, en polarización vertical.

El repetidor situado en la cima de la montaña dispone de dos antenas: una para recibir la señal de la estación transmisora, de 15 dB de ganancia, con una relación delante-atrás de 20 dB y polarización vertical, y otra antena para transmitir la señal a la población, de 5 dB de directividad, sin pérdidas óhmicas y con polarización horizontal. Los usuarios de la población reciben la señal a través de una antena Yagi con polarización horizontal, de 9 dB de directividad y que disipa una potencia por pérdidas óhmicas igual al 10 % de la potencia total.

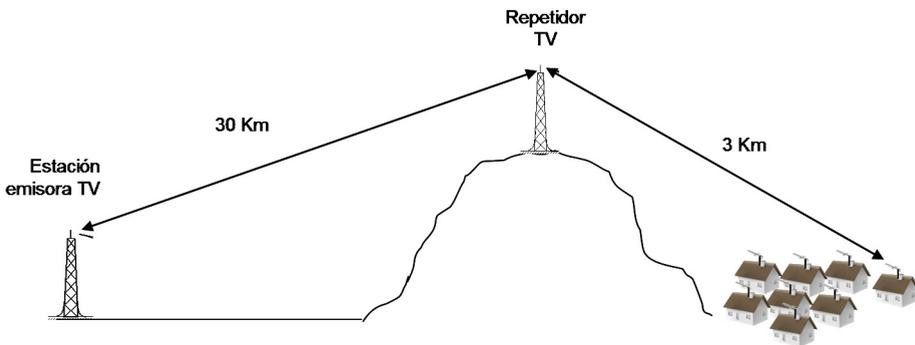


Figura 1.7. Montaje para dar cobertura de señal de televisión a una población

En casa del usuario más alejado del repetidor, la antena Yagi se conecta a través de un cable coaxial de 8 m de longitud, constante de atenuación de 0,3 dB/m y de 75 Ω de impedancia característica, a un decodificador de TDT, que trabaja bajo el mismo valor de impedancia (75 Ω). La antena está adaptada al cable coaxial y se coloca perfectamente orientada en la dirección del repetidor.

Para una correcta recepción de señal, se ha de garantizar que el nivel de señal mínimo a la entrada del decodificador sea de $-55 \text{ dB}\mu\text{V}$, siendo la temperatura ambiente de 24 $^{\circ}\text{C}$. El usuario más alejado del repetidor está situado a una distancia de 3 km y la temperatura de brillo captada por su antena receptora es de 40 K. El ancho de banda del sistema receptor es de 8 MHz.

Se pide:

- Calcular la potencia mínima de señal recibida a la salida de la antena Yagi situada en casa del usuario, suponiendo condiciones de espacio libre.
- Calcular la potencia de ruido a la salida de la antena Yagi situada en casa del usuario.
- Calcular el nivel de señal útil a la entrada del decodificador en $\text{dB}\mu\text{V}$. ¿Funcionará correctamente el sistema?

Solución:

$$\text{a) } S_{\text{out}}^{\text{antena}} = -91,85 \text{ dBm}$$

$$\text{b) } N_{\text{out}}^{\text{antena}} = -111,39 \text{ dBm}$$

$$\text{c) } V_{\text{ef}} = -105,5 \text{ dB}\mu\text{V}$$

Problema 1.10

Un sistema de radiocomunicaciones está compuesto por un equipo transmisor que opera a una frecuencia de 500 MHz y entrega una potencia de 5 W a la antena transmisora. La antena tiene una directividad de 20 dB con una eficiencia de pérdidas óhmicas del 95%, y presenta el mismo ancho de haz a -3 dB en los dos planos perpendiculares principales de radiación (es decir, en plano E y en plano H).

A 10 km en la dirección de máxima radiación de la antena transmisora se encuentra un equipo receptor compuesto por un dipolo resonante en $\lambda/2$ de impedancia $Z_a = 73 \Omega$ y un receptor de impedancia de entrada 50Ω y con una sensibilidad de $1,82 \cdot 10^{-4} \text{ V}$ (tensión eficaz). Debido a diferencias entre ambas antenas, las pérdidas de polarización se estiman igual a 3 dB.

- Calcular la potencia isotrópica radiada equivalente de la estación transmisora y el ancho de haz aproximado a -3 dB de la antena en sus planos principales.
- Obtener la potencia entregada al receptor.
- Deducir la distancia máxima a la que podría colocarse el receptor del equipo transmisor para una recepción correcta.

Solución:

a) $PIRE = 475 \text{ W}; \Delta\theta_{-3dB} = \Delta\phi_{-3dB} = 0,3545$

b) $W_r = 8,59 \text{ nW}$

c) $r \approx 36 \text{ km}$

RESOLUCIONES DE LOS PROBLEMAS

Problema 1.1

La densidad de potencia recibida por un usuario puede calcularse como

$$P^i = \frac{W_{rad}}{4\pi r^2} D_T$$

Como ha de cumplirse que $P^i < 0,1 \text{ mW/cm}^2 = 1 \text{ W/m}^2$, entonces se obtiene un valor máximo de potencia radiada de:

$$W_{rad} = \frac{P^i 4\pi r^2}{D_T} = \frac{1 \cdot 4\pi \cdot 20^2}{10^{0,8}} = 796,65 \text{ W} \approx 29 \text{ dBW}$$

Problema 1.2

Para calcular la potencia entregada al sistema receptor tenemos que aplicar la ecuación de transmisión:

$$\frac{W_{rec}}{W_{ent}} = \frac{G_T G_R}{\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2} C_a C_p C_m$$

donde

$$W_{ent} = 30 \text{ dBW} = 1000 \text{ W}$$

$$G_T = D_T = 3 \text{ dB} = 10^{3/10}$$

$$G_R = D_R = \{\text{dipolo resonante en } \lambda/2\} = 1,64$$

$$r = 15 \text{ Km}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{470 \cdot 10^6} = 0,638 \text{ m}$$

$$C_p = C_m = 1$$

Además, teniendo en cuenta que para el dipolo en $\lambda/2$ es $R_a = 73 \Omega$ y que la impedancia de entrada del sistema receptor es $R_L = 50 \Omega$, el coeficiente de adaptación será:

$$C_a = \frac{4R_a R_L}{(R_a + R_L)^2 + (X_a + X_L)^2} = \frac{4 \cdot 73 \cdot 50}{(73 + 50)^2} = 0,965$$

Por tanto, la potencia entregada al sistema receptor será:

$$W_{rec} = W_{ent} \frac{G_T G_R}{\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2} C_a C_p C_m = 1000 \cdot \frac{10^{0,3} \cdot 1,64}{\left(\frac{4\pi 15 \cdot 10^3}{0,638}\right)^2} \cdot 0,965 =$$

$$= 36,17 \text{ nW} = -44,41 \text{ dBm}$$

Problema 1.3

- a) Para calcular la potencia que entrega la antena receptora al sistema receptor deberemos aplicar la ecuación de transmisión:

$$\frac{W_{rec}}{W_{ent}} = \frac{G_T G_R}{\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2} C_a C_p C_m$$

donde la ganancia de antena transmisora es:

$$G_T = D_T \cdot \eta_t = D_T \cdot \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_\Omega} = 100 \cdot \frac{75}{75 + 5} = 93,75 = 19,71 \text{ dB}$$

Y la ganancia de la antena receptora:

$$G_R = D_R = \left(\frac{\pi D_\phi}{\lambda}\right)^2 \eta_{ii} \eta_s = \left(\frac{\pi D_\phi}{c/f}\right)^2 \eta_{ii} \eta_s = \left(\frac{\pi \cdot 0,5}{0,02}\right)^2 0,9 \cdot 0,8 =$$

$$= 4441,322 = 36,47 \text{ dB}$$

Puesto que no existe desacoplo de polarización, tenemos que $C_p = 1$. Además, el enunciado dice que la antena receptora está adaptada al cable, por lo que $C_a = 1$. Igualmente, puesto que no se indica lo contrario, asumimos que $C_m = 1$. Por tanto, la ecuación de transmisión queda como sigue:

$$\frac{W_{rec}}{W_{ent}} = \frac{93,5 \cdot 4441,322}{\left(\frac{4\pi \cdot 25 \cdot 10^3}{0,02}\right)^2} = 1,683 \cdot 10^{-9}$$

Y, por tanto, la potencia entregada al sistema receptor es:

$$\begin{aligned} W_{rec} &= 1,683 \cdot 10^{-9} \cdot W_{ent} = 1,683 \cdot 10^{-9} \cdot 10 = 16,83 \text{ nW} = \\ &= -47,73 \text{ dBm} = -77,73 \text{ dBW} \end{aligned}$$

- b) La potencia de ruido a la salida de la antena ($N_{salida\ antena}$) vendrá dada por la siguiente expresión:

$$N_{salida\ antena} = W_N = kT_a B \eta_r + kT_{amb} B (1 - \eta_r)$$

Y teniendo en cuenta que el reflector parabólico no presenta pérdidas óhmicas ($\eta_r = 1$), entonces la expresión se simplifica:

$$N_{salida\ antena} = W_N = kT_a B$$

Puesto que la antena receptora es muy directiva, la temperatura de antena la podemos aproximar por la temperatura de brillo atmosférico, cuyo valor extraemos de la recomendación UIT-R PI.372-6:

$$T_a \approx T_{fr} (\theta = 10^\circ, f = 15 \text{ GHz}) = 30 \text{ K}$$

Por tanto,

$$\begin{aligned} N_{salida\ antena} &= W_N = kT_a B = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 30 \cdot 6 \cdot 10^6 = 2,484 \cdot 10^{-15} \text{ W} = \\ &= -116,05 \text{ dBm} \end{aligned}$$

- c) La distancia máxima a la que se podrán situar la antena transmisora y receptora la podemos hallar a partir de la ecuación de transmisión, teniendo en cuenta que hemos de garantizar una potencia mínima a la salida de la antena receptora de $-66,61 \text{ dBm} = 0,2183 \text{ nW}$:

$$W_{rec_{min}} = W_{ent} \cdot \frac{G_T G_R}{\left(\frac{4\pi r_{max}}{\lambda}\right)^2} C_a C_p C_m \rightarrow r_{max} = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right) \cdot \sqrt{\frac{W_{ent} G_T G_R}{W_{rec_{min}}} C_a C_p C_m}$$

Y sustituyendo valores obtenemos una distancia máxima de:

$$r_{max} = \left(\frac{0,02}{4\pi}\right) \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot 93,75 \cdot 4441,322}{0,2183 \cdot 10^{-9}}} = 219,8 \text{ km}$$

Problema 1.4

- a) Para calcular la potencia de la señal útil recibida por el repetidor desde el transmisor aplicaremos la ecuación de transmisión:

$$W_{rec}^{REP} = \frac{W_{ent}^{TX}}{\left(\frac{4\pi r_1}{\lambda}\right)^2} \cdot G_{TX}(\theta = 0^\circ) \cdot G_{REP}(\theta = 0^\circ)$$

siendo r_1 la distancia entre el transmisor y el repetidor, G_{TX} la ganancia de la antena transmisora y G_{REP} la ganancia de la antena del repetidor. Puesto que en este caso las dos antenas envían y reciben por su máximo de radiación o dirección de apuntamiento ($\theta = 0^\circ$), la ganancia será:

$$G_{TX}(\theta = 0^\circ) = G_{REP}(\theta = 0^\circ) = \left| 50 \cdot \frac{\sin(50\pi \sin 0)}{50\pi \sin 0} \right|^2 = 50^2 = 2500 = 33,98 dB$$

Si trabajamos con unidades logarítmicas, la potencia de señal útil recibida por el receptor será:

$$W_{rec}^{REP} (dBm) = W_{ent}^{TX} (dBm) + G_{TX}(\theta = 0^\circ)(dB) + G_{REP}(\theta = 0^\circ)(dB) - 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi r_1}{\lambda} \right)$$

El enunciado nos dice que a la antena transmisora se le entregan 148 dBμV de tensión eficaz, por lo que la potencia entregada será:

$$W_{ent}^{TX} = \frac{(10^{148/20} \cdot 10^{-6})^2}{50} = 12,62 = 11,01 dBW = 41,01 dBm$$

Sustituyendo datos, la potencia de señal útil recibida será:

$$W_{rec}^{REP} (dBm) = 41,01 + 33,98 + 33,98 - 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi \cdot 15 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8 / 12 \cdot 10^9} \right) = -28,58 dBm$$

- b) La señal útil recibida por el repetidor es amplificada 30 dB y radiada de nuevo hacia el receptor, por lo que la potencia de señal útil recibida por el receptor será:

$$W_{rec}^{RX} = \frac{W_{rec}^{REP} \cdot G_{REP}^{amplificador}}{\left(\frac{4\pi r_2}{\lambda}\right)^2} \cdot G_{REP}(\theta = 0^\circ) \cdot G_{RX}(\theta = 0^\circ)$$

donde r_2 es la distancia entre el repetidor y el receptor, y $G_{REP}^{amplificador}$ representa la ganancia del amplificador del repetidor (30 dB).

Por tanto, en unidades logarítmicas la potencia de señal útil recibida por el receptor será:

$$W_{rec}^{RX} (dBm) = W_{rec}^{REP} (dBm) + G_{REP}^{amplificador} (dB) + G_{REP}(\theta = 0^\circ)(dB) + G_{RX}(\theta = 0^\circ)(dB) - 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{4\pi r_2}{\lambda}\right)$$

Sustituyendo datos, la potencia de señal útil recibida por el receptor será:

$$W_{rec}^{RX} (dBm) = -28,58 + 30 + 33,98 + 33,98 - 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{4\pi \cdot 15 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8 / 12 \cdot 10^9}\right) = -68,167 \text{ dBm}$$

c) La relación señal interferencia en el receptor viene dada por el cociente entre la potencia de señal útil y la potencia de señal interferente que llegan al receptor:

$$\frac{S}{I} = \frac{S_{\text{útil}}}{I}$$

La potencia de señal útil la hemos calculado en el apartado anterior. A continuación, por tanto, calcularemos la potencia de la señal interferente que llega al receptor, la cual proviene directamente del transmisor.

Esta señal es emitida con polarización horizontal, mientras que la antena del receptor recibe con polarización vertical, por lo que existirá un desacoplo por polarización entre señal transmitida y recibida (C_p). Además, puesto que la antena transmisora apunta en la dirección del repetidor, existirá un desapuntamiento entre la antena transmisora y la receptora de 6° , como se observa en la Figura 1.2.

La potencia recibida de la señal interferente será pues:

$$I = \frac{W_{ent}^{TX}}{\left(\frac{4\pi r_3}{\lambda}\right)^2} \cdot G_{TX}(\theta = 6^\circ) \cdot G_{RX}(\theta = 6^\circ) \cdot C_p$$

siendo r_3 la distancia entre el transmisor y el receptor, y que viene dada por:

$$r_3 = r_1 \cdot \cos 6^\circ + r_2 \cdot \cos 6^\circ = 30 \cdot \cos 6^\circ = 29,836 \text{ km}$$

En unidades logarítmicas la potencia de la señal interferente será:

$$I \text{ (dBm)} = W_{ent}^{TX} \text{ (dBm)} + G_{TX}(\theta = 6^\circ) \text{ (dB)} + G_{RX}(\theta = 6^\circ) \text{ (dB)} + C_p \text{ (dB)} - 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi r_3}{\lambda} \right)$$

Teniendo en cuenta que:

$$G_{TX}(\theta = 6^\circ) = G_{RX}(\theta = 6^\circ) = \left| 50 \cdot \frac{\sin(50\pi \sin 6^\circ)}{50\pi \sin 6^\circ} \right|^2 = 3,95 = 5,968 \text{ dB}$$

entonces la potencia de señal interferente en el receptor será:

$$I \text{ (dBm)} = 41,01 + 5,968 + 5,968 + C_p \text{ (dB)} - 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi \cdot 29,836 \cdot 10^3}{0,025} \right) = -90,57 \text{ (dBm)} + C_p \text{ (dB)}$$

Luego para la relación señal interferencia en el receptor, en unidades logarítmicas, tendremos:

$$\frac{S}{I} = S_{\text{útil}} \text{ (dBm)} - I \text{ (dBm)} = -68,164 \text{ dBm} + 90,57 \text{ (dBm)} - C_p \text{ (dB)} \geq 32 \text{ dB}$$

Por tanto:

$$C_p \text{ (dB)} \leq -9,594 \text{ dB}$$

Problema 1.5

a) Para calcular la potencia de la señal útil recibida por la antena receptora aplicaremos la ecuación de transmisión:

$$S_{ant} = W_{rec}^{RX} = W_{ent}^{TX} \cdot \frac{D_{TX} \cdot D_{RX}}{\left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2} \cdot \eta_{TX} \cdot \eta_{RX} \cdot C_a \cdot C_p \cdot C_m$$

Puesto que estamos en condiciones de espacio libre, tendremos que $C_m = 1$. Igualmente, como la antena transmisora y receptora tienen la misma polarización será $C_p = 1$.

Por otro lado, tendremos que calcular la directividad de la antena transmisora (reflector parabólico) mediante los datos proporcionados por el enunciado:

$$D_{TX} = \left(\frac{\pi \cdot \text{diametro}}{\lambda} \right)^2 \cdot \eta_{il} \cdot \eta_s = \left(\frac{\pi \cdot 2}{3 \cdot 10^8 / 3,5 \cdot 10^9} \right)^2 \cdot 0,9 \cdot 0,94 =$$

$$= 4,546 \cdot 10^3 = 36,57 \text{ dB}$$

Puesto que se trata de un reflector parabólico, tendremos que la eficiencia de pérdidas óhmicas en el transmisor es $\eta_{TX} = 1$.

Asimismo, la eficiencia en el receptor será:

$$\eta_{RX} = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{\Omega}} = \frac{100}{111} = 0,9$$

Teniendo en cuenta que las pérdidas por desadaptación de impedancias en el receptor hacen que $C_a = -0,85 \text{ dB}$ (en lineal, $C_a = 0,822$), tenemos que la potencia entregada por la antena receptora al sistema receptor es:

$$W_{rec}^{RX} = 1,5 \cdot \frac{10^{36,57/10} \cdot 10^{8/10}}{\left(\frac{4\pi 15 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8 / 3,5 \cdot 10^9} \right)^2} \cdot 0,9 \cdot 0,822 = 6,59 \text{ nW} = -51,8 \text{ dBm}$$

b) Nos piden calcular la relación señal a ruido a la salida de la antena receptora:

$$\left(\frac{S}{N} \right)_{ant} = \frac{S_{ant}}{N_{ant}}$$

La potencia de señal útil recibida S_{ant} la hemos calculado en el apartado anterior. En cuanto a la potencia de ruido a la salida de la antena receptora, ésta será:

$$N_{ant} = k \cdot T_a \cdot B_N \cdot \eta_r + k \cdot T_{amb} \cdot B_N \cdot (1 - \eta_r)$$

ya que la antena receptora presenta pérdidas óhmicas (η_r). En esta expresión, T_a es la temperatura de brillo atmosférico que capta la antena receptora, y cuyo valor para un ángulo de elevación de 20° es:

$$T_a(f = 3,5 \text{ GHz}, \theta = 20^\circ) = 6 \text{ K}$$

Considerando que el sistema receptor al que está conectada la antena receptora tiene un ancho de banda (B_N) de 30 MHz, entonces:

$$N_{ant} = k \cdot T_a \cdot B_N \cdot \eta_r + k \cdot T_{amb} \cdot B_N \cdot (1 - \eta_r) = (1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 6 \cdot 30 \cdot 10^6 \cdot 0,9) + (1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 298 \cdot 30 \cdot 10^6 \cdot 0,1) = 1,457 \cdot 10^{-14} \text{ W} = -108,36 \text{ dBm}$$

Por tanto, la relación señal a ruido a la salida de la antena será:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{ant} [\text{dB}] = S_{ant} [\text{dBm}] - N_{ant} [\text{dBm}] = -51,8 - (-108,36) = 56,56 \text{ dB}$$

Problema 1.6

- a) Para determinar la PIRE mínima de la antena del satélite para que en el sistema receptor exista un nivel mínimo de tensión eficaz de 26 dBμV emplearemos la ecuación de transmisión:

$$W_{rec}^{RX} = W_{ent}^{TX} \cdot \frac{D_{TX} \cdot D_{RX}}{\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2} \cdot \eta_{TX} \cdot \eta_{RX} \cdot C_a \cdot C_p \cdot C_m$$

Teniendo en cuenta que la PIRE es:

$$PIRE^{TX} = W_{ent}^{TX} \cdot G_{TX} = W_{ent}^{TX} \cdot D_{TX} \cdot \eta_{TX}$$

podemos despejar este parámetro a partir de la ecuación de transmisión, de la siguiente forma:

$$PIRE^{TX} = W_{ent}^{TX} \cdot D_{TX} \cdot \eta_{TX} = \frac{W_{rec}^{RX} \cdot \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2}{D_{RX} \cdot \eta_{RX} \cdot C_a \cdot C_p \cdot C_m}$$

El enunciado indica que calculemos el nivel de PIRE necesario para tener un nivel mínimo de tensión eficaz a la entrada del sistema receptor de 26 dBμV. Teniendo en cuenta que el sistema trabaja con una impedancia de 75 Ω, este nivel de tensión se traduce en un nivel de potencia a la entrada del sistema receptor de:

$$W_{rec}^{RX} = \frac{V_{ef}^2}{Z_{in}} = \frac{(10^{26/20} \cdot 10^{-6})^2}{75} = 5,31 \text{ pW} = -112,75 \text{ dBW}$$

Para seguir leyendo haga click aquí