

# **PRACTICA SOBRE LA FORMACION DE ONDAS EN LINEAS DE TRANSMISION CON EXCITACIÓN SENOIDAL**

## **HOJAS DE RESULTADOS**

**Nombre de los alumnos:** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Grupo:** \_\_\_\_\_.

**Curso:** \_\_\_\_\_.

**Fecha:** \_\_\_\_\_.

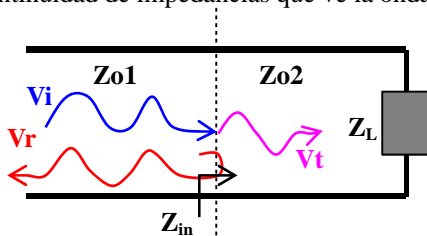
## **CAPÍTULO I- REPASO DE CONOCIMIENTOS TEÓRICOS SOBRE PROPAGACIÓN DE ONDAS**

1.1- Escriba la **ecuación de la línea de transmisión** (ecuación del telegrafista o de Helmholtz) usando **notación temporal** (dominio del tiempo) y los **equivalentes circuitales** de la línea de transmisión **sin pérdidas**. Dibujar también un esquema del equivalente circuital de la sección elemental de la línea de transmisión y las corrientes y tensiones que se manejan para escribir las ecuaciones. Partir de las ecuaciones de Kirchoff del equivalente de línea de transmisión para llegar a la ecuación de la línea de transmisión:

1.2-Escriba la solución de dicha ecuación (**solución de onda de D'Alambert**) para las ondas de tensión y corriente, y explique el significado físico de los conceptos de ondas progresivas y regresivas, velocidad de propagación ( $v_p$ ) e impedancia característica ( $Z_0$ ). Exprese estos dos últimos ( $v_p$  y  $Z_0$ ) mediante los parámetros circuitales equivalentes de la línea de transmisión.

1.3-Escriba de nuevo la ecuación de onda, pero ahora en el **dominio fasorial**, es decir, suponiendo que estamos en **régimen sinusoidal**. Así mismo, escribir la solución de onda en forma de **fasores**. Relacione las ondas espacio-temporales con los fasores espaciales (un fasor lleva implícita la variación temporal, por eso nunca depende de la variable  $t$ ), y describir la frecuencia  $f$  y la pulsación temporal  $\omega$ , así como la constante de propagación  $\beta$  y la longitud de onda  $\lambda$ . Describir el periodo espacial y temporal de una **onda senoidal que se propaga por el espacio**, y la relación entre ambos.

1.4-Explique qué se entiende por **coeficiente de reflexión y de transmisión** de una **onda de tensión** que llega a una discontinuidad en una línea de transmisión como la representada en el esquema de abajo. Relacione dichos coeficientes con la discontinuidad de impedancias que ve la onda, distinguiendo entre el **caso transitorio** y el caso de **régimen permanente**.



1.5-Explique cómo se define la **onda de potencia eléctrica** a partir de las ondas de tensión y corriente. Distinga entre **potencia instantánea** con cualquier tipo de ondas y **potencia media** en régimen senoidal.

1.6-Defina **impedancia característica** de una onda de tensión o corriente que se propaga por una línea e **impedancia** (en general) de una onda. En un medio (como una línea de transmisión), ¿son idénticos estos dos conceptos?. Cuándo es la impedancia igual a la impedancia característica. Expresar la impedancia a partir de la impedancia característica y el coeficiente de reflexión. Usando el concepto de **impedancia compleja para régimen senoidal** (expresando dicha impedancia con su módulo y con su fase), formule la onda de **potencia media** que se propaga por un medio con una determinada impedancia. ¿Qué pasa si esta impedancia tiene una parte imaginaria, es decir, su fase es distinta de 0 ó 180 grados?.

1.7-Por último, exprese la potencia que transporta una onda, pero ahora expresándola a partir de las ondas de tensión y de corriente progresivas y regresivas y el **coeficiente de reflexión** del medio.

## CAPÍTULO II- ADAPTACIÓN PERFECTA ENTRE SISTEMAS DE MICROONDAS

2.1- Rellenar los parámetros de entrada del simulador, obteniendo los diferentes datos que hay que introducir en las casillas del simulador. Escribir la fórmula y el desarrollo que se ha usado para obtener la **amplitud de pico** que debe tener la primera onda de tensión para que la **potencia media disponible** sea de **1 Watio**.

}

Vp (Volt pico) =

}

Potencia media disponible (W) =

Zgen (Ω) =

(Ω) + j

(Ω)

εr =

→

vp (Km/seg) =

f(MHz) =

→ λ (m) =

→

L (m) =

=

\* λ

Zload (Ω) =

(Ω) + j

(Ω)

2.2- Con una resolución de 20 puntos/longitud de onda visualizar el transitorio de la onda que se genera en la línea de transmisión y responder a las preguntas que se formulan.

2.2.1- Para el paso 1 de la simulación, y visualizando en la línea las ondas de tensión X 10, corriente y potencia, rellenar los valores de amplitudes de pico que tiene la **primera onda progresiva**. NOTA: Tener en cuenta que al usar la sonda de tensión X 10, la medida de la tensión está falseada, siendo diez veces mayor de su valor real. Usar los **markers** para medir las amplitudes.

- Amplitud onda tensión (Voltios pico) =
- Amplitud onda corriente (mAmperios pico) =
- Amplitud onda potencia (mWattios pico) =

2.2.2- Obtener la **impedancia** que ve esa primera onda progresiva. Recuerde que la impedancia es la relación entre la tensión total y la corriente total que hay en la línea de transmisión. Cuál es la relación entre esa impedancia y la **impedancia característica** de la línea. ¿Por qué?.

2.2.3- Obtener la **potencia electromagnética media** que propaga esa primera onda progresiva a partir de la **potencia de pico** de la onda. Cuál es la relación entre esa potencia y la potencia disponible del generador. ¿Por qué?.

2.2.4- Seguir simulando la propagación de la onda hasta que llegue al final de la línea y otro paso más (step # 3). ¿Se ha producido alguna reflexión en algún punto, como la unión generador-línea o la unión línea-antena?.

2.3- Una vez observada la onda que se ha formado en **régimen permanente** (es decir, una **onda total** que es estable, cuando no hay más contribuciones significativas de **ondas locales**), responder a las siguientes preguntas:

2.3.1- Cuánto tarda en producirse el régimen permanente, o lo que es lo mismo, cuánto tarda la onda en recorrer la línea de salida del generador y la línea de transmisión, para llegar a la antena. Escribir ese tiempo como cociente entre el espacio recorrido y la velocidad de propagación. Recordar que la longitud de la línea de salida del generador es  $\frac{1}{4}$  de la longitud de la línea de transmisión.

2.3.2- Visualizar la distribución en la línea de la **onda de tensión, corriente y potencia total**. Medir la impedancia que tiene la onda en diferentes puntos de la línea, según la tabla siguiente, a partir de las amplitudes de la onda de tensión y de corriente:

Longitud	Volts	mAmps	Z (Ohmios)
0.895 m			
0.7425 m			
0.7125 m			
0.6825 m			
0.6375 m			

¿Varía la **impedancia de la onda total** a lo largo de la **línea**?. Demuestre, a partir de la fórmula de la impedancia de una línea:

$$Z_{in} = Z_o \frac{Z_L + j * Z_o * \tan(\beta L)}{Z_o + j * Z_L * \tan(\beta L)}$$

que si  $Z_L=Z_o$ , la impedancia  $Z_{in}$  en cualquier punto de la línea es uniforme y de valor  $Z_{in}=Z_o$ .

2.3.3- Observando la **onda de potencia total** encontrar el valor de la **potencia media** que se propaga por la línea de transmisión desde el generador a la antena. Establezca el balance de potencias que existe en el sistema, partiendo de la potencia que entrega el generador y calculando la potencia que de alguna manera se refleja y la potencia que se absorbe por la carga. Físicamente, qué pasa con esa potencia que "absorbe" la carga (recuerde qué sistema real es representado por la carga en este caso).

2.4- La situación analizada es la de **adaptación perfecta** entre los tres subsistemas básicos que forman el sistema transmisor. Explique qué significa que estén adaptados estos tres sistemas respondiendo a estas dos preguntas. ¿Existen reflexiones de ondas?. ¿Se aprovecha toda la potencia disponible del generador?. Por lo tanto, ¿es deseable esta situación?.

### CAPÍTULO III- UN METEORITO DAÑA LA ANTENA

3.1- Con el nuevo parámetro de impedancia de carga de  $0.1 \Omega$ , responder a las siguientes preguntas.

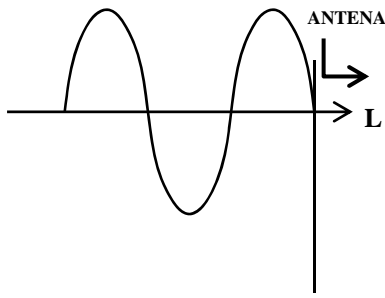
3.1.1- Observando la onda de tensión, ¿qué pasa cuando llega a la antena?, ¿cuánto vale el coeficiente de reflexión complejo de la antena?, ¿cuánto vale el módulo de la onda de tensión reflejada?, ¿cuánto vale el desfase de la onda de tensión reflejada?.

3.1.2- Esta onda reflejada se forma debido a las condiciones de contorno que presenta **la antena en su conector de entrada**, es decir, a la **impedancia de carga de  $0.1 \Omega$** . ¿Cuánto vale la tensión en la entrada de la antena, que es un cortocircuito?. ¿Y la corriente?.

3.1.3- Ahora, el **régimen permanente** no se alcanza cuando la onda progresiva llega a la antena (paso #2), sino que además la onda reflejada debe llegar al conector del generador. ¿Cuánto tiempo pasa hasta que se produce esta situación (final del paso #3)?. Calcúlelo de nuevo usando la velocidad de propagación y la distancia que recorre la onda hasta llegar al **régimen permanente en la línea de transmisión**.

3.1.4- ¿Qué pasa con la energía electromagnética cuando llega la onda reflejada de la antena al conector de salida del generador?. Este efecto, ¿puede ser perjudicial para el amplificador del generador de microondas?, ¿por qué?.

3.1.5- Usando los **markers**, rellene la figura siguiente donde se muestra en trazo continuo la **onda de tensión** una vez llegado al **régimen permanente**. Debe dibujar la **onda de corriente** que corresponde a esta onda de tensión y debe marcar las distancias que se indican, y que hay entre los nulos y los máximos de la **onda estacionaria** que se ha formado. ¿Por qué se llama onda estacionaria?. En los puntos donde la tensión se hace máxima, ¿qué pasa con la corriente?. Y en los que se hace la tensión nula, ¿qué pasa con la corriente?. Convierta las distancias a fracciones de longitud de onda.



D1= Distancia de nulo de corriente a carga:  
 D2= Distancia entre nulos (o máximos) de tensión (o de corriente):  
 D3= Distancia entre un nulo y un máximo de tensión (o de corriente):


3.2- Se define como **R.O.E.** (Relación o coeficiente de Onda Estacionaria) (**SWVR** Standing Wave Voltage Ratio en inglés), como el cociente entre la máxima y la mínima **tensión de pico (tensión máxima en la variación temporal)** que existe en una línea de transmisión. Dicho coeficiente tiene una relación muy estrecha con el coeficiente de reflexión que existe en una línea de transmisión sin pérdidas, y por lo tanto, es una buena medida de la desadaptación que existe en el sistema de microondas. Esta es la relación que existe entre el ROE y el coeficiente de reflexión:

$$R.O.E. = \frac{|V_{\text{máx}}|}{|V_{\text{mín}}|} = \frac{|V^+ + V^-|}{|V^+ - V^-|} = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}$$

Responder a las siguientes preguntas para entender mejor este concepto y cómo mide el grado de desadaptación.

3.2.1- Rellenar la tabla siguiente, donde para diferentes casos de cargas, y siempre respecto a la impedancia característica de la línea,  $Z_0$ , debe hallar la relación entre el coeficiente de reflexión y el R.O.E. ¿Qué valores puede tomar un coeficiente de reflexión de un circuito pasivo?. ¿Entre qué valores estará comprendido el R.O.E. entonces?. ¿Qué valores nos interesarán para que **la carga esté adaptada a la línea de transmisión?**

$Z_L$	$\rho_L$	R.O.E.
Cortocircuito $Z_L=0$		
Circuito abierto $Z_L=\infty$		
Adaptación perfecta $Z_L=Z_0$		
$Z_L=2*Z_0$		
$Z_L=Z_0/2$		

3.2.2- Calcular el **R.O.E.** del sistema de comunicaciones con la **antena estropeada**. Para ello vamos a medir la **tensión de pico máxima** y la **tensión de pico mínima** usando el modo de animación por teclado (**Pause=-1**) y los **markers**. Básicamente lo que usted debe hacer es parar en el instante en que se da la tensión máxima en la línea y medir **VpicoMáx**. Análogamente, medirá la máxima tensión que hay presente en la línea en el instante en que se da la tensión mínima, y esto será **VpicoMín**. Por último, calculará un valor práctico del **R.O.E.=VpicoMáx/VpicoMín**. Obtenga el valor teórico a partir del módulo del coeficiente de reflexión  $|\rho_L|$  que calculó en el apartado 3.1.1. Ambos valores puede que difieran mucho debido a la resolución temporal elegida para simular, esto es, que el programa no realice la simulación del instante exacto en que la amplitud de la onda estacionaria se haga mínima.

VpicoMax =	<input type="text"/>	$ \rho_{\text{antena}} $ =	<input type="text"/>
VpicoMin =	<input type="text"/>	R.O.E. =	<input type="text"/>
R.O.E. =	<input type="text"/>		

3.3- Por último, visualizar la evolución de la **onda de potencia** que se propaga por la línea. Cuando la potencia disponible del generador llega a la antena, ¿qué pasa con esa potencia?, ¿qué cantidad es absorbida y radiada por la antena y qué cantidad se refleja? (para verlo mejor seleccionar el botón de **Show New Waves** de manera que se pueda observar la onda de **potencia reflejada**). Explicar cuánto vale la **potencia media neta** que viaja por la línea de transmisión **hacia la antena en régimen estacionario**. ¿Cómo se le llamaba a este tipo de potencia que resulta de la reflexión? (En el apartado del examen de teoría para ingresar en la tripulación lo vimos).

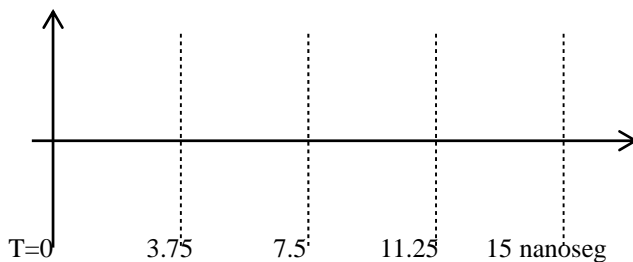
Pot. disponible =	<input type="text"/>	Pot. reflejada =	<input type="text"/>	Pot. radiada =	<input type="text"/>
-------------------	----------------------	------------------	----------------------	----------------	----------------------



## CAPÍTULO IV- LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN COMO ADAPTADOR DE IMPEDANCIAS EN LAMBDA CUARTOS

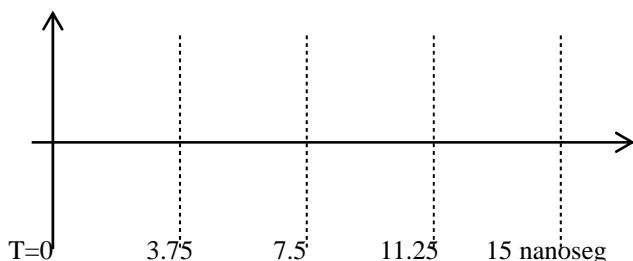
4.1- En este apartado va a estudiar el **comportamiento de la impedancia a lo largo de una línea de transmisión**. Como hemos visto por la fórmula de la impedancia de entrada de una línea, la impedancia que se ve en un extremo de la línea,  $Z_{in}$ , no tiene por qué ser la que hay en el otro extremo,  $Z_L$ . Responda a las siguientes preguntas para entender mejor este fenómeno tan importante en electrónica de microondas.

4.1.1- Con la impedancia de carga de **20  $\Omega$** , ponga la sonda del osciloscopio en el punto  **$L=0.9825$  m**, que es el punto más cercano a la entrada de la antena que nos deja el programa. Active el osciloscopio pulsando la pestaña de **Oscilloscope** y seleccione la visualización de la **onda de tensión X 10** y la de **corriente**. La simulación se habrá reseteado; lance de nuevo la onda del generador y continúe simulando hasta que se llegue al régimen permanente, digamos hasta que la simulación llegue al final del paso #5, en el  **$T=13.9$  nanosegundos**. Dibuje las ondas de tensión y de corriente que ha obtenido en el osciloscopio. ¿Están en fase?. ¿Cuál debe ser la relación entre sus amplitudes de pico  $|V/I|$ , es decir, el módulo de la **impedancia de entrada a la antena**?.



4.1.2- Ahora vamos a estudiar la impedancia que hay a la entrada de la línea de transmisión. Si estuviéramos en **baja frecuencia** (por ejemplo, en continua, o en 50 Hz), diríamos que la impedancia que existe en ese punto es de **20  $\Omega$** , pero como veremos, no es así para señales de alta frecuencia, ya que ha sufrido una **transformación de impedancias** dada por la fórmula ya presentada en 2.3.2. Use esa fórmula para predecir el valor de la **impedancia compleja** que se debe ver a la **entrada de la línea**. Interprete la información que da el **módulo** y la **fase** de esta impedancia compleja para relacionar las ondas de tensión y de corriente en ese lugar (a la entrada de la línea).

4.1.3- Compruebe que las ondas de tensión y corrientes totales a la entrada de la línea se relacionan según la impedancia compleja que ha calculado. Para ello proceda como en el apartado anterior, activando el **osciloscopio** y la visualización de las ondas de tensión y corriente, pero ahora colocando **la sonda en el punto  $L=0.00375$  m**, que es el punto más cercano a  $L=0$  que ha calculado el programa con la resolución usada, y simulando de nuevo hasta  **$T=13.9$  nanosegundos**. Dibuje las ondas de tensión y de corriente que ha obtenido en el osciloscopio y de manera cualitativa compruebe que la impedancia ha variado como predecía la fórmula **observando sus módulos y sus fases**. Explique el **proceso transitorio** que observa, indicando el **instante de cambio de impedancias**.



4.1.4- Para acabar, mida el **R.O.E.** procediendo de la misma manera que en el apartado 3.2.2. Calcule también el **coeficiente de reflexión** que presenta la **antena de impedancia 20Ω** a la línea de transmisión de **50Ω**. Comparar la medida práctica del R.O.E. con el valor teórico obtenido a partir del módulo del coeficiente de reflexión.

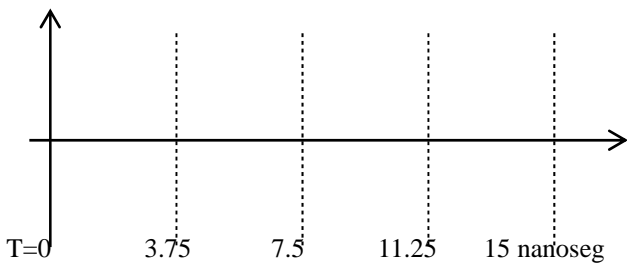
VpicoMax =	<input type="text"/>	$ \rho_{antena} $ =	<input type="text"/>
VpicoMin =	<input type="text"/>	R.O.E. =	<input type="text"/>
R.O.E. =	<input type="text"/>		

4.2-Con la fórmula de la impedancia de entrada en una línea de transmisión, desarrollar la expresión de la impedancia cuando  $L=\lambda/4+n*\lambda/2$ , con  $n=0,1,2,3...$

4.3-Utilizando la expresión anterior, si la antena dañada presenta una impedancia de  $Z_L=20 \Omega$  y queremos una impedancia de entrada de  $Z_{in}=50 \Omega$ , calcular la impedancia característica que debe tener una línea adaptadora en  $\lambda/4$  (de longitud  $L=3.25\lambda$ , es decir,  $n=6$  en la expresión del apartado 4.1), para conseguirlo.

4.4- Simular la situación del apartado 4.2, usando una línea de longitud  $L=3.25\lambda$  e **impedancia característica  $Z_0$**  la calculada en el apartado anterior.

4.4.1- Repetir el apartado 4.1.3, situando la sonda del osciloscopio en  $L=-0.00375$  m y simulando hasta  $T=13.9$  **nanosegundos** y dibuje el resultado del osciloscopio. Observe el valor de la **impedancia que hay a la entrada de la línea**. ¿Cómo varía **cuantitativamente** la impedancia -en **módulo y fase**- en los diferentes instantes de la simulación?. Rellene la tabla siguiente para tomar valores cuantitativos reales y medir el **proceso de adaptación de impedancias**. Explique el **régimen transitorio** que se ha formado y las onda involucradas así como lo que ha ocurrido para que el valor de la impedancia de entrada sea diferente a la estudiada en el punto 4.1.3.



Tiempo t	V(t,L=-0.00375 m)	I(t,L=-0.00375 m)	Z=V/I (Ω)
1.6 nanoseg			
4 nanoseg			
10.45 nanoseg			
13.7 nanoseg			

## CAPÍTULO V- CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA REACTIVA A PARTIR DE LA DISTRIBUCIÓN DE ONDA ESTACIONARIA

5.1- La última prueba con la que se enfrenta en esta misión espacial es la de averiguar el coeficiente de reflexión que presenta la antena al sistema de radiocomunicaciones, debido a los gases ionizados de la atmósfera de Marte. Para ello debe simular la situación en que se encuentra el equipo de comunicaciones, usando una longitud de la línea de  $L=3.25\lambda$ , como en el ejercicio anterior, pero ahora cambiando la **impedancia de carga de la antena** de  $20\Omega$  a  $Z_{LOAD}=20 + j 50 \Omega$ .

Simule la **onda de tensión total**, y una vez llegado al **régimen permanente** estudie la distribución de la onda estacionaria generada y responda a las siguientes cuestiones:

5.1.1- Calcule la longitud **Lpico** que existe entre el máximo de tensión más cercano a la carga y la carga, usando de nuevo los **markers** y el modo **Pause=-1**.

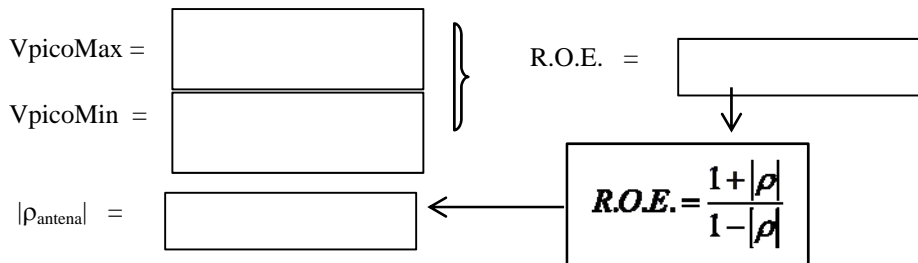
$$L_{pico}(m) = \boxed{\phantom{000000}}$$

5.1.2- A partir de **Lpico** y la longitud de onda  $\lambda$ , calcule la **fase del coeficiente de reflexión  $\varphi$**  según la siguiente fórmula:

$$\varphi = 4\pi * \frac{L_{pico}}{\lambda} (rad) = 360 * 2 * \frac{L_{pico}}{\lambda} (deg)$$

$$\varphi \text{ (grados)} = \boxed{\phantom{000000}}$$

5.1.3- Ahora calcule el **R.O.E.** experimentalmente a partir de los valores de la tensión de pico máxima **VpicoMax** y la tensión de pico mínima, **VpicoMin**. Halle el **módulo de  $\rho$**  a partir de la fórmula teórica.



5.1.4- Comparar el  $\rho$  medido con el  $\rho$  real que nos da el programa, y a partir del  $\rho$  medido calcular la **impedancia reactiva** que presenta la antena en su conector de entrada, y compararla con la impedancia que pusimos en la simulación. Recuerde la

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + \rho}{1 - \rho}$$

fórmula que nos da la impedancia a partir del coeficiente de reflexión:

$$\rho_{antena} \text{ PROGRAM} = \boxed{\phantom{000}} e^{+j \boxed{\phantom{000}}} \text{ (grados)}$$

$$Z_{antena} \text{ PROG} = \boxed{\phantom{000}} + j \boxed{\phantom{000}} \text{ (\Omega)}$$

$$\rho_{antena} \text{ MEDIDO} = \boxed{\phantom{000}} e^{+j \boxed{\phantom{000}}} \text{ (grados)}$$

$$Z_{antena} \text{ MEDIDO} = \boxed{\phantom{000}} + j \boxed{\phantom{000}} \text{ (\Omega)}$$