

# Desarrollo de un prototipo de conmutador TR de radar de 800 kW

Fernando Villanueva, Otto Castillo, IGP

# 1. Ubicación del proyecto :

## 1.1 Radio Observatorio de Jicamarca



## 1.2 Ubicación en el sistema de radar principal

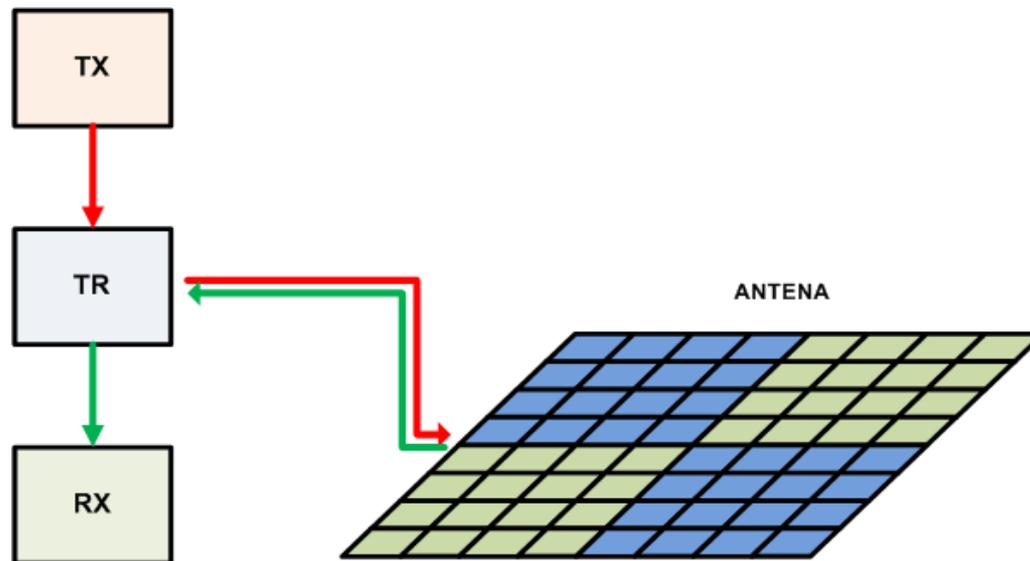


Fig. 1. Ubicación del proyecto

## 2. Objetivo

Construcción de un prototipo de conmutador T/R (transmisor- receptor, Figura 2) de estado sólido, de 800 kW pico a 49.920 MHz.

Esto permitirá reemplazar el conmutador TR eléctrico actual (Figura 3), basado en el accionamiento de electrodos por arco.

Se logrará de esta manera el mejoramiento de la performance de recepción de señales del radar principal del Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ).



Fig. 2 Prototipo del nuevo TR



Fig. 3 TR actuales en el ROJ

### 3. Ventajas principales en relación al TR actual

- Alta fiabilidad
- Mejoramiento del tiempo de conmutación (del actual 180ns al estimado 6ns)
- Mejoramiento del tiempo de almacenamiento (actual: 2us, esperado: 0.2us)
- Aislamiento satisfactorio del receptor respecto al transmisor (60 dB)
- Ausencia de ajuste mecánico para mantener la regularidad de funcionamiento (actual desgaste de los electrodos y necesidad periódica de su ajuste y consiguiente reemplazo).

## 4. Consideraciones de diseño

El diseño del circuito de radiofrecuencia está basado en **el principio de adaptación de impedancias**, para la máxima transferencia de energía, tanto cuando la señal va hacia la antena, como también cuando viene de ella en forma de eco.

Otro aspecto a tenerse en consideración es la **potencia** que manejará la unidad TR. El sistema original de radar tiene capacidad para 4 transmisores (TX) de **1.5 Mw pico cada uno**. Entonces, teniendo en cuenta que la antena está dividida en cuatro cuartos y existen dos polarizaciones de antena en ellos, la potencia que va a cada polarización y cada cuarto de antena será de 0.75 Mw. Es así que **el TR a diseñar será de 800 kW**.

Están presentes niveles altos de corriente y de tensión dentro de la línea coaxial, donde se encuentra alojado el TR, lo cual ha sido tomado en cuenta en el diseño.

## 5. Circuito propuesto

El circuito TR emplea un diodo simple de alta velocidad, como dispositivo de conmutación, lo que tiene la ventaja de no necesitar una señal de control externa para su funcionamiento (Figura 4).

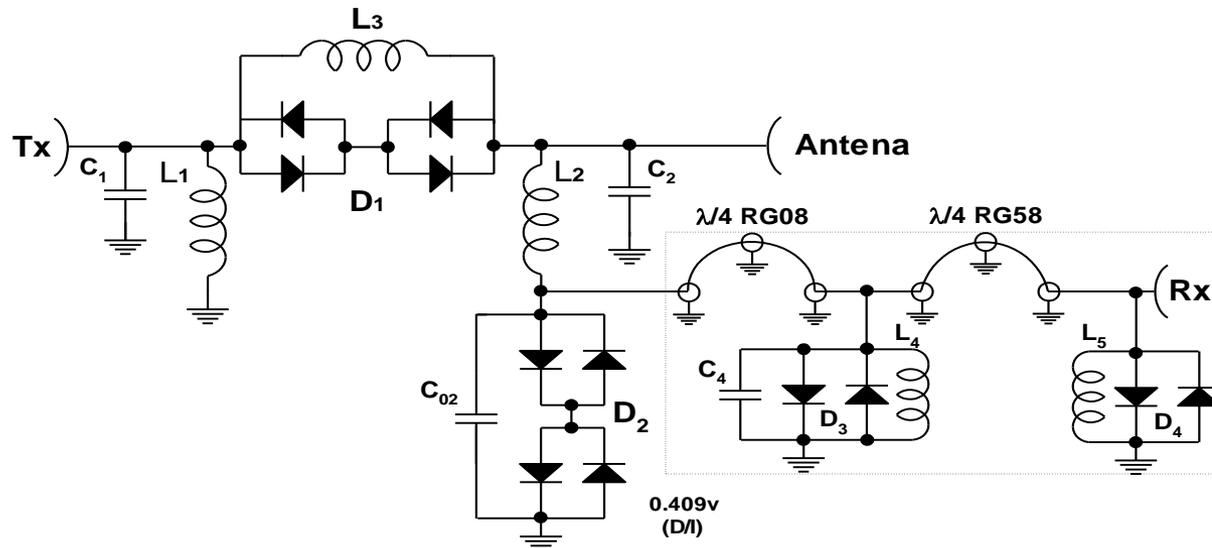
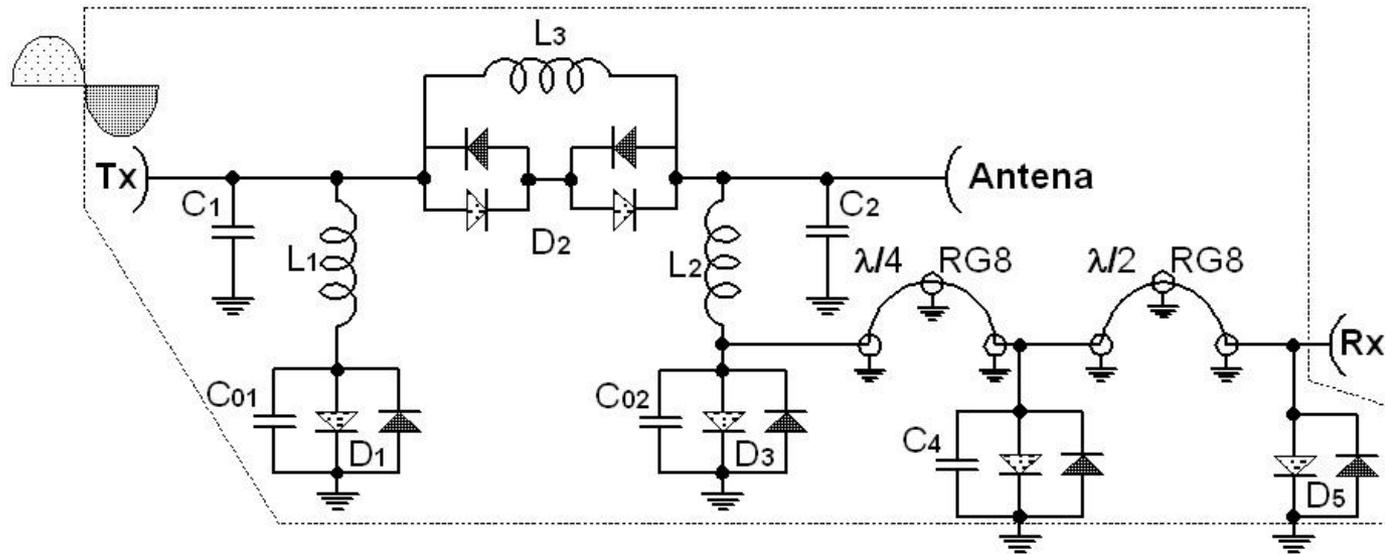


Fig. 4 Circuito TR de 800 kW

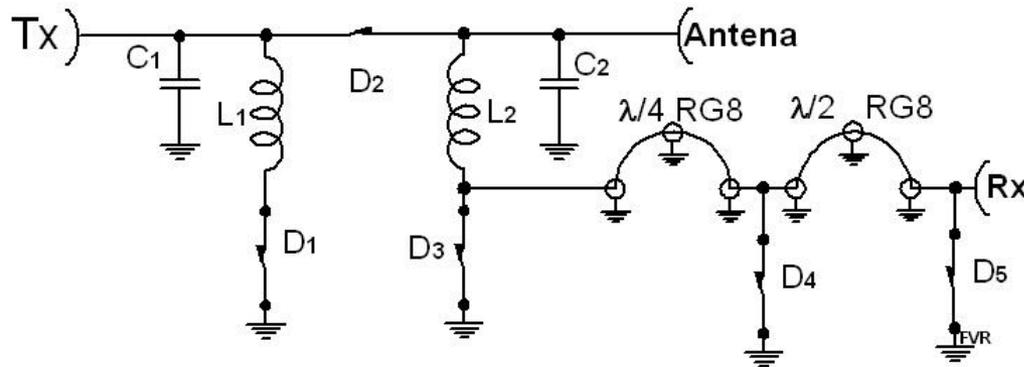
### 5.1 Análisis del circuito en modo de transmisión

En la Figura 5 se muestra el funcionamiento del circuito TR. Cuando los diodos conducen, son un corto circuito, lo cual permite simplificar el análisis, y el consiguiente cálculo de los diversos componentes del circuito.



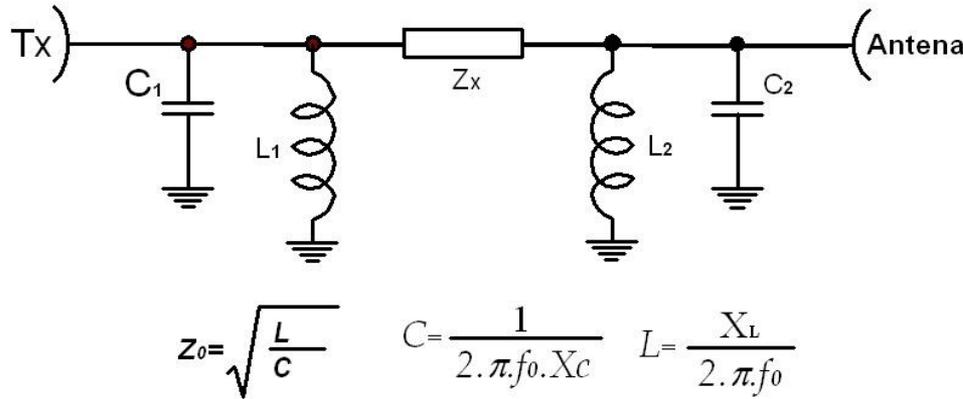
**Fig. 5 Comportamiento de los diodos cuando el transmisor está activo. Se usa el sombreado correspondiente para cada ciclo de conducción, de acuerdo a la forma de onda mostrada**

Así, en la Figura 6, los diodos se han reemplazado por un contacto (diodo ideal). Puede apreciarse en el circuito que la salida hacia el receptor está puesta a tierra, lo que representa un aislamiento ideal del receptor respecto al transmisor.



**Fig. 6 Presenta el circuito con los diodos como llaves cerradas (diodos en conducción en el modo de transmisión)**

Luego obtenemos el circuito equivalente que se muestra en la Figura 7, que permite calcular  $C_1$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  y  $C_2$ , para lo cual se toma en consideración la frecuencia de operación (49.920 MHz) y la impedancia característica (50  $\Omega$ ).



**Fig. 7 Circuito equivalente del TR en modo de transmisión**

De acuerdo a las expresiones anteriores:

$$X_L = X_C = 50\Omega$$

y

$$f_0 = 49.92\text{MHz}$$

de donde obtenemos:

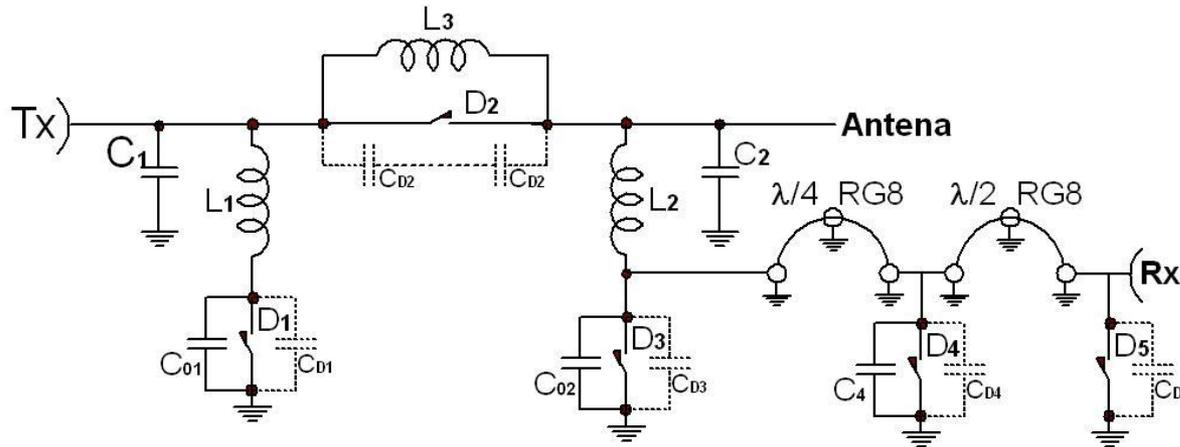
$$C_1 = C_2 = 63.7\text{pF}$$

y

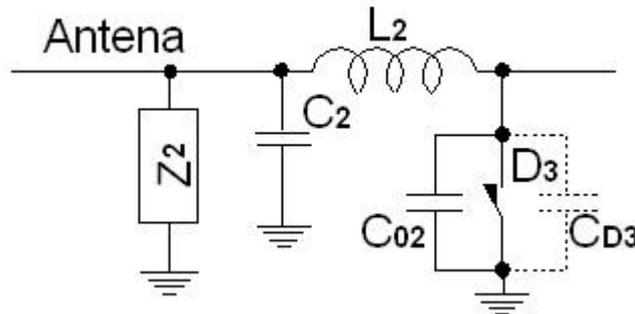
$$L_1 = L_2 = 0.159\mu\text{H}$$

## 5.2 Análisis en modo de recepción

En la figura 8, se presenta el circuito TR en el modo de recepción. Siguiendo la señal que viene de la antena, se encuentra que  $L_2$  está en serie con el paralelo de  $C_{02}$  y la capacidad parásita  $C_{D3}$  del diodo, formando con  $C_2$  una red sintonizada a  $f_0$ . Por otro lado  $L_3$  y  $C_{D2}$ , que están en paralelo, dan una alta impedancia  $Z_2$  (Figura 6) hacia el transmisor, lo que permite direccionar efectivamente la señal que viene de la antena hacia el receptor. En la figura 9, se muestra el circuito equivalente resultante, que corresponde a un circuito Pi.



**Fig. 8 Circuito en el modo de recepción, con la capacidad equivalente de los diodos en líneas punteadas**



**Fig. 9 Circuito equivalente en el modo de recepción**

El circuito que va conectado a continuación (salida RX del TR), es en realidad un circuito auxiliar, cuyo propósito es proporcionar aislamiento y protección adicional al receptor.

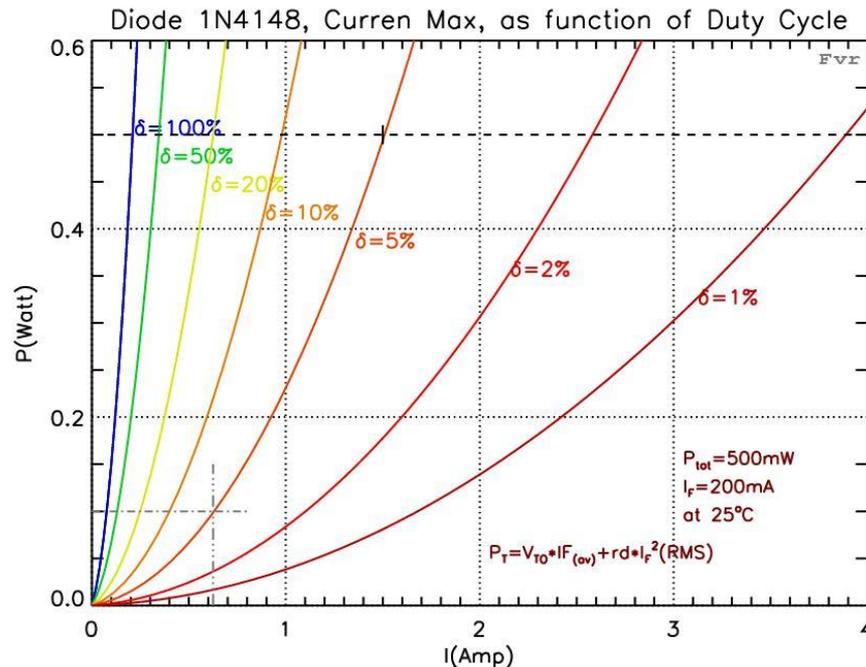
## 6. Disipación de potencia del diodo

Los diodos usados en el circuito TR, como es de esperarse, generan pérdidas. Estas se deben, por un lado a la existencia de una resistencia interna del diodo. Otro factor de pérdidas en el diodo, es la tensión generada en su juntura interna.

Para las pruebas de funcionamiento del prototipo TR, se ha usado en primer lugar un **ciclo de servicio** bajo (1 %) y deberá llegarse finalmente a **5 o 6 %**. Se ha previsto usar circulación de aire forzado para los valores altos de ciclo de servicio. Las primeras pruebas indican que efectivamente es una solución satisfactoria.

## Disipación de potencia del diodo (continuación)

La figura 10, presenta el comportamiento de potencia disipada por un diodo de señal (1N4148), similar al empleado en la presente aplicación (1N914). La familia de curvas tiene como parámetro el ciclo de servicio para una aplicación de señal pulsada.



**Fig. 10 Disipación de potencia en el diodo en función de corriente y ciclo de servicio pulsado**

## 7. Diseño mecánico

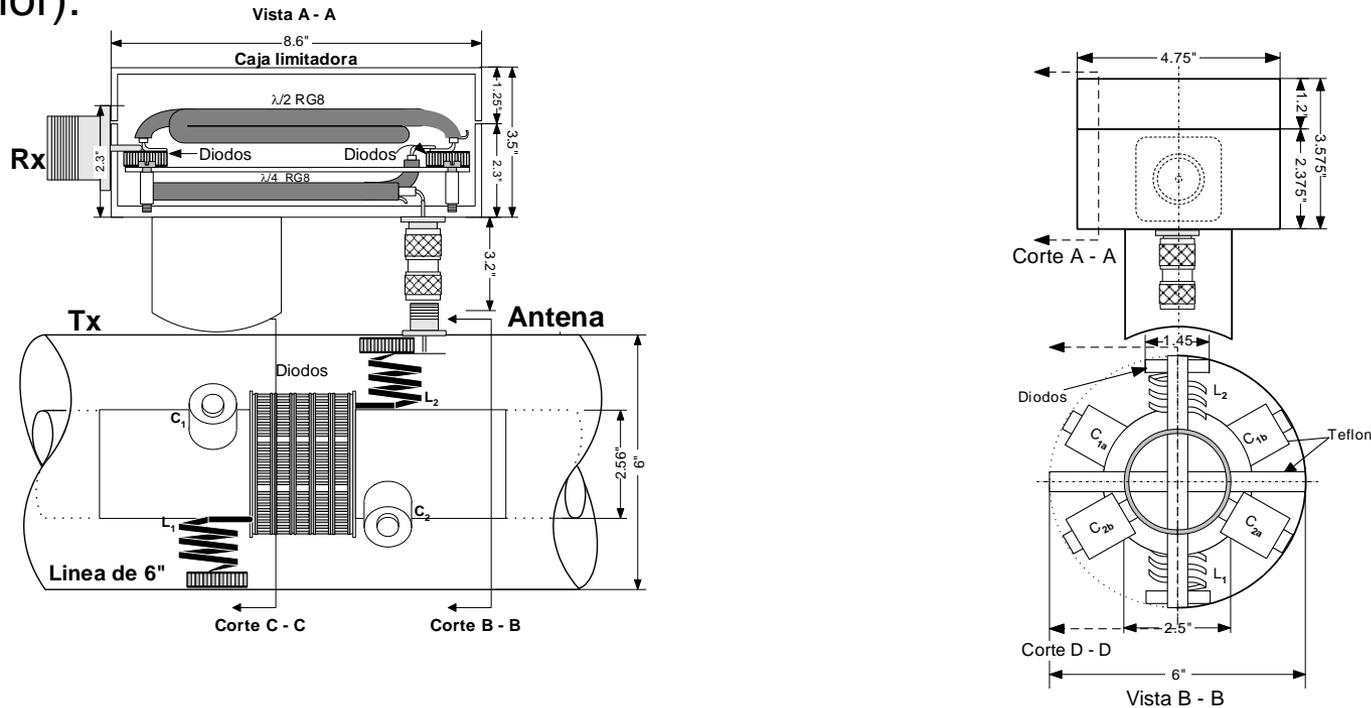
El diseño mecánico de montaje de los componentes forma parte importante del diseño de la unidad TR, debido a que se trata de un circuito de radiofrecuencia.

Así se ha visto por conveniente, montar el circuito dentro de la **línea coaxial de 6" de 50  $\Omega$** , que es usada en la conexión principal de la antena. En este caso, el espacio disponible presenta ciertas **limitaciones**, relacionadas con la dimensión física de los componentes (condensadores de cerámica, bobinas y bancos de diodos).

Sin embargo, **la ventaja principal** de esta **configuración estándar** es que, al estar en el interior de la línea coaxial indicada, su conexión es compatible mecánica y eléctricamente.

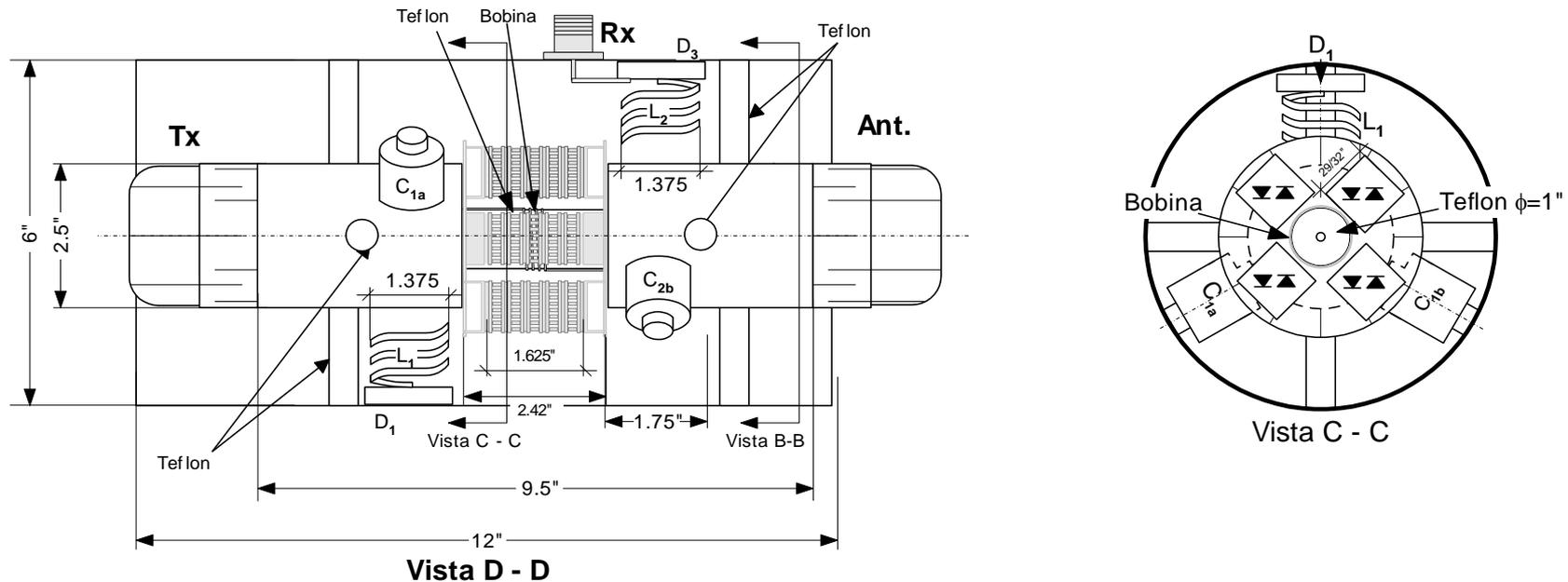
## 7.1 Montaje del TR

El plano de montaje aparece en la Figura 11, donde puede apreciarse dos partes bien definidas. La primera parte está dentro de una porción de línea coaxial de 6", y conecta el transmisor con la antena. La segunda, está ubicada dentro de una caja de aluminio, y da protección adicional a la entrada del receptor (caja limitadora, superior).



**Fig. 11 Configuración del montaje del TR de 800 KW**

La figura 12 a) detalla la instalación de los componentes dentro de la línea de 6". Allí aparecen los bloques de diodos (5 x 4 unidades). Asimismo, en la figura 12 b), se muestra la barra de teflón de 1" de diámetro, ubicada axialmente al interior del arreglo de diodos, y que soporta la bobina o inductancia, que va conectada en paralelo con dicho arreglo de diodos (circuito TR de la Figura 4). También da rigidez a las dos secciones del conductor central, donde va conectado el arreglo de diodos.



**Fig. 12 : a) Vista axial del TR montado en una porción de línea coaxial de 6"**

**b) Vista transversal del TR**



**Fig. 13 Vista exterior del módulo TR**



**Fig. 14 Vista interior del módulo TR: a) Vista desde la entrada TX, b) Vista desde la conexión hacia antena. También se aprecia la salida RX (inferior)**

## 8. Instrumentos de laboratorio

Durante proceso de diseño de la unidad TR, se ha contado con ayuda de instrumentos de laboratorio, principalmente de un analizador de espectro, para el chequeo de su respuesta en frecuencia en el modo de recepción, que permite evaluar su performance de ancho de banda y pérdida de inserción.

También, en el modo de transmisión, simulando externamente una apropiada polarización de los diodos, es posible evaluar en el laboratorio su performance de pérdida de inserción y respuesta en frecuencia.

## 9. Pruebas en el campo y primeros resultados

Consiste en poner a prueba la unidad, en condiciones reales de funcionamiento. Esto es, a la máxima potencia pico de operación del TX. Primero con ciclo de servicio bajo, del orden de 1 %; luego a máxima potencia promedio, esto es un ciclo de servicio de 5 %.

Las **primeras pruebas** permitieron comprobar el buen funcionamiento de la unidad a niveles iniciales de potencia (**70 kW pico**, usando la etapa previa del TX, y luego **400 kW pico**, con la etapa de salida TX, veáse cuadros más adelante).

Al realizar las pruebas con niveles superiores a 400 kW pico, pudo comprobarse que debía mejorarse la disipación de potencia de los diodos principales (en serie en el circuito TR). La primera medida ha sido poner disipadores en los extremos de los bancos de diodos correspondientes, sin embargo se ha visto que es necesario usar adicionalmente enfriamiento por flujo forzado de aire, particularmente para operación a valores de ciclo de servicio mayores a 1 % de las pruebas iniciales.

## Resultados (continuación)

### **SWR**

Se ha usado los datos de medición de potencia incidente y reflejada a la salida del transmisor. Los resultados de SWR, se muestran en los cuadros 1, 2 y 3. Los cuales se consideran satisfactorios.

### ***Pérdida de inserción***

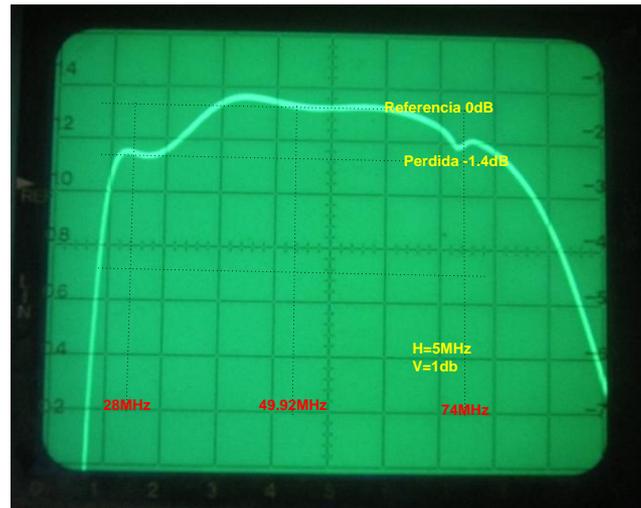
- a) En transmisión. Según mediciones de laboratorio, se obtuvo 0.3 dB.
- b) En recepción. La medición en laboratorio dio como resultado 1.2 dB.

### ***Aislamiento del receptor respecto al transmisor***

Según las pruebas en laboratorio, se ha logrado un aislamiento del receptor-transmisor de 60 dB.

### ***Respuesta en frecuencia***

En cuanto a la respuesta de frecuencia antena – receptor, en la Figura 15 se presenta el gráfico correspondiente. Fue obtenido usando un analizador de espectro.



**Fig. 15 Respuesta en frecuencia antena-RX de la nueva unidad**

**Tabla 1**  
**Pruebas de potencia usando la etapa previa driver – valor de SWR**  
**Caso A): Carga solo de antena**

<b>Caso A) Conexión directa hacia la antena, sin TR</b>			
PW	312	us	13,0103 dB
IPP	6240	us	
Duty cycle	5	%	
TX	Etapa previa driver		
Carga	Solo antena		
<b>SWR y potencia de salida en función de tensión de pantalla</b>			
V. Screen Driver (V)	Potencia Incidente pico (KW)	Coefficiente de reflexión ( $\Gamma$ )	SWR
300	22,9631	0,0653	1,1398
400	35,5656	0,0624	1,1330
500	51,4079	0,0624	1,1330
600	63,2456	0,0610	1,1298
700	69,3474	0,0646	1,1380

**Tabla 2**  
**Pruebas de potencia usando la etapa de potencia driver – valor SWR**  
**Caso B): Carga de antena + TR**

<b>Caso B) TR conectado</b>			
<b>Carga</b>	<b>TR-&gt;Antena</b>		
<b>SWR y potencia de salida en función de tensión de pantalla</b>			
<b>V. Screen Driver (V)</b>	<b>Potencia Incidente pico (KW)</b>	<b>Coefficiente de reflexión (<math>\Gamma</math>)</b>	<b>SWR</b>
300	25,1785	0,0367	1,0763
400	38,9969	0,0351	1,0727
500	56,3677	0,0327	1,0677
600	66,2262	0,0376	1,0781
700	67,7688	0,0479	1,1005

Por comparación de los casos A) y B), puede apreciarse una adaptación de impedancias satisfactoria ( $50 \Omega$ ) al insertar el TR en la línea de transmisión que va hacia la antena.

**Tabla 3**

**Pruebas usando la etapa de final de potencia TX**

PW	50	us	16,9897 dB	
IPP	2500	us		
Duty cycle	2	%		
TX	DR1+PA1			
Carga	TR->Antena			
<p><b>SWR y potencia de salida en función de tensión de pantalla de la etapa previa driver</b></p>				
V. Pantalla Driver (V)	Temperatura (°C)	Potencia Incidente pico (KW)	Coeficiente de Reflexión ( $\Gamma$ )	SWR
300	65	415,8819	0,0589	1,1251
400	70	659,1284	0,0646	1,1380

**Al presente, se ha completado pruebas hasta los valores de potencia mostrados en el cuadro. Para mayor potencia deberá corregirse el problema presentado en el banco de diodos en serie con la bobina del circuito resonante LC de salida del TR. Por los resultados, se estima que se debe a capacidad insuficiente de corriente del banco actual de diodos, lo que deberá ampliarse.**

## 10. Plan en perspectiva

La siguiente fase comprenderá la fabricación de un total de **ocho unidades** TR, similares al prototipo. Lo que será posible una vez que se haya completado las pruebas de alta potencia del prototipo TR, que se encuentra actualmente en proceso.

**Gracias**