

# Analizadores de antena para UHF y el maravilloso Puente de Wheatstone

Por Jim Tregellas VK5JST

endsodds@internode.on.net - http://www.users.on.net/~endsodds

Traducido por Jon Iza, EA2SN

Publicado en Amateur Radio (Junio 2006), boletín de la Wireless Institution of Australia (WIA)

## Introducción

Desde el día en que mi diseño de un analizador de antenas para HF apareció publicado en Amateur Radio (mayo de 2005) muchos colegas me han pedido detalles para construir un equipo para VHF/UHF. (N. del T.: Dicho equipo utilizaba un oscilador cubriendo toda la HF y un detector similar al que ahora se presenta unido a un medidor basado en PIC). Para satisfacer sus peticiones me puse al tajo y he aprendido bastante y me he divertido aun más, consiguiendo finalmente un diseño que es muy sencillo pero que, al mismo tiempo, funciona muy bien. Si tiene un cajón de componentes razonable, posiblemente tenga ya la mayoría de los componentes que hacen falta.

Cualquiera que haya estudiado un curso de electrónica estará familiarizado con el Puente de Wheatstone. Normalmente el esquema que se suele estudiar a principio de curso está compuesto por un puente con cuatro resistencias, una de ellas la incógnita, y un galvanómetro sensible que nos sirve para conseguir el "balance" del puente. Utilizando ecuaciones matemáticas se demuestra su funcionamiento y, una vez conseguido, se olvida rápidamente para utilizar otras técnicas de medida de resistencias mucho más fáciles de realizar. La conclusión que se saca de esto es que, quitada alguna aplicación muy especial del puente, esta técnica de medida basada en corriente continua pertenece al siglo XIX y debe, por ello, olvidarse.

Pero nada más lejos de la realidad. Cuando se aplica corriente alterna al puente y se utiliza un análisis matemático algo más complicado (cosa que el autor no ha visto todavía en ningún libro de texto), el puente se puede utilizar para analizar la Relación de Ondas Estacionarias (ROE, SWR en inglés) con gran precisión y en un rango muy amplio de frecuencias, sin que se observen ninguno de los problemas asociados a la frecuen-

cia o a la sensibilidad a la potencia de otros diseños de puentes de ROE existentes. Además, lo que es muy interesante para nosotros, se utilizan solamente componentes fácilmente obtenibles.

## La teoría

En el circuito que se muestra en la figura 1, imagínese que la carga es una resistencia pura de 50 W. El voltaje de corriente alterna que aparecería en los puntos A y B ( $V_A$  y  $V_B$ ) sería  $0.5 V_{RMS}$ . Si hiciéramos una rectificación de media onda,  $V_A$  se convierte en  $V_1 = 707$  mV cc. De igual forma,  $V_B$  se convierte en  $V_2 = 707$  mV cc, suponiendo que ambos diodos se com-

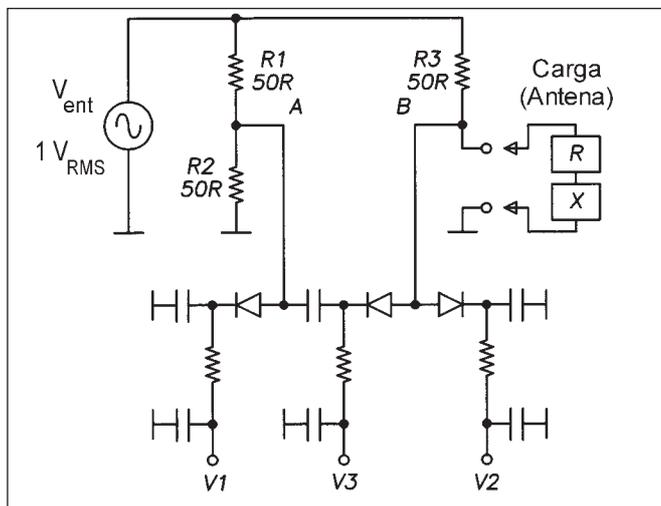


Gráfico 1 - El puente de Wheatstone para corriente alterna.

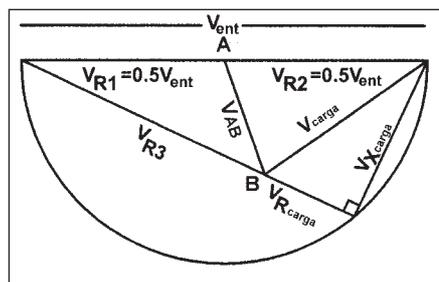


Gráfico 2 - Diagrama vectorial - caso general.

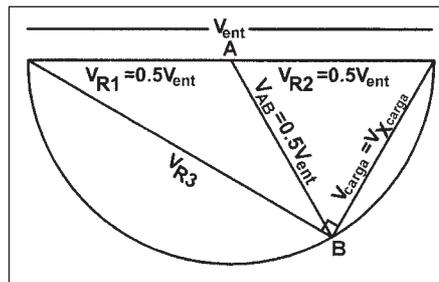


Gráfico 3 - Diagrama vectorial - carga inductiva o capacitiva pura.

porten como rectificadores perfectos (sin voltaje de caída en directa).  $V_3$  es la versión rectificada de la diferencia de voltajes entre A y B y, como  $V_A$  y  $V_B$  están en fase y son de igual magnitud,  $V_3 = 0$ .

Ahora hagamos que la carga sea un circuito abierto.  $V_A$  seguirá siendo  $0.5 V_{RMS}$  y  $V_1$  707 mV cc.  $V_B$  será  $1 V_{RMS}$  y, por tanto,  $V_2$  será 1414 mV cc.  $V_3$  será entonces 707 mV cc porque la diferencia en-

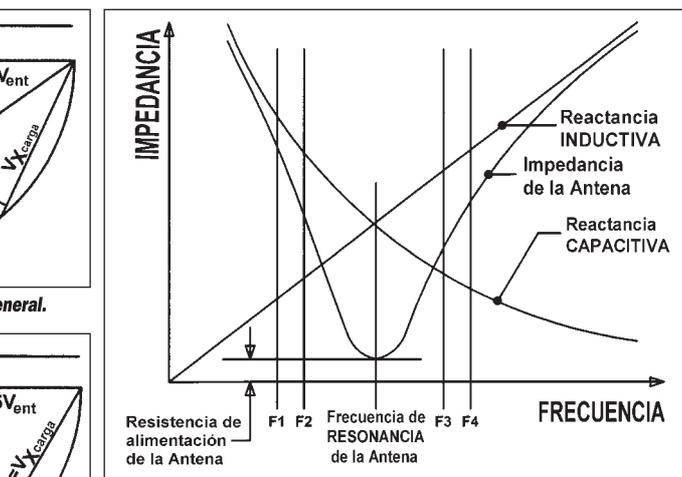


Gráfico 4 - Impedancia, reactancia y gráfico de resonancia.

tre  $V_A$  y  $V_B$  es ahora de  $0.5 V_{RMS}$ .

Por último, cortocircuitemos los terminales de la carga.  $V_1$  seguirá siendo 707 mV cc.  $V_B$  será cero, al igual que  $V_2$ , y  $V_3$  será 707 mV cc porque la diferencia entre  $V_A$  y  $V_B$  vuelve a ser de  $0.5 V_{RMS}$ .

Resumiendo, el voltaje en el punto A y, por tanto, el de  $V_1$  no cambia aunque cambie la carga. El voltaje en B (y, por tanto, el de  $V_2$ ), en cambio, sube desde 0 a 1414 mV según varía la carga desde 0 W (cortocircuito) hasta infinito (circuit-

to abierto). El voltaje  $V_3$  cae desde 707 mV (cortocircuito - ROE infinita) hasta 0 (ROE = 1:1, carga de 50 W) y, luego, vuelve a subir hasta 707 mV con una carga en circuito abierto (ROE infinita).

Lo que hemos descrito es cómo funciona un medidor de ROE.  $V_1$  representa la potencia directa,  $V_2$  la potencia reflejada y  $V_3$  representa la diferencia entre las dos, o la ROE. Llevando un poco más adelante el desarrollo es fácil ver que, para un valor conocido del voltaje de entrada,  $V_2$  puede utilizarse para construir una escala de resistencia en un medidor, mien-

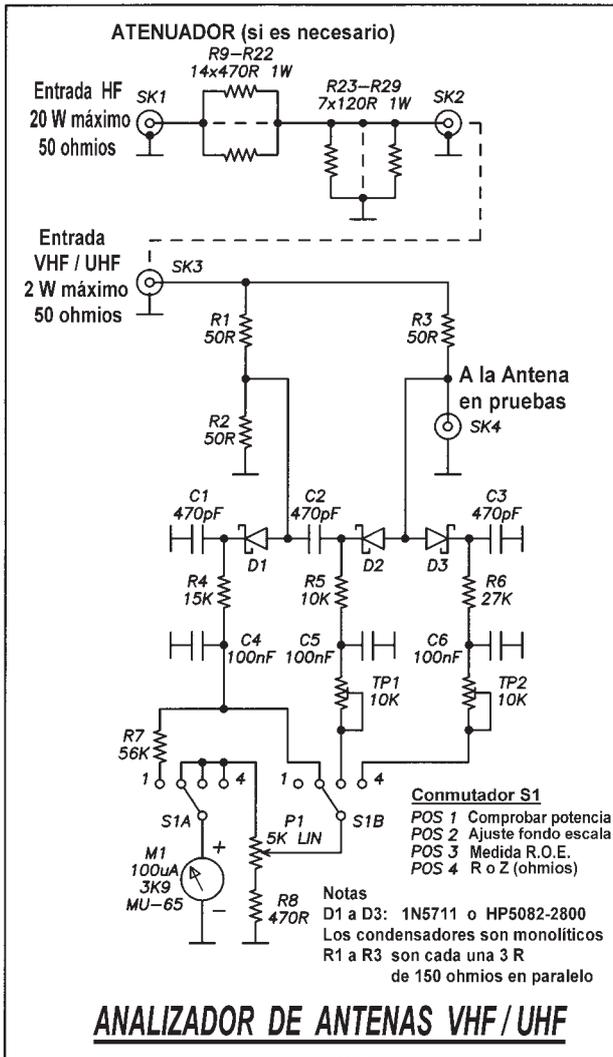


Gráfico 5 - Esquema del analizador de antenas.

tras que  $V_3$  puede utilizarse para construir una escala de ROE.

Pero hasta ahora solamente hemos hablado de cargas resistivas puras. ¿Qué ocurre cuando la carga es una mezcla compleja de resistencia y capacidad, resistencia e inductancia, capacidad pura o inductancia pura? La respuesta a esta pregunta requiere utilizar matemáticas avanzadas y francamente está fuera de lugar en este artículo.

Pero baste decir que las matemáticas indican claramente que, sean las cargas complejas o resistivas puras, el valor de ROE indicado será el correcto, y que para construir la escala de ROE pueden utilizarse los cálculos que podemos hacer con resistencias puras.

Para aquellos que quieran hacer esta demostración personalmente he incluido dos diagramas vectoriales que pueden servir para realizar la demostración matemática.

En la figura 2 puede verse el caso general de una carga compleja, mientras que el caso de la figura 3 es para el caso especial de una carga capacitiva pura o inductiva pura. Estos diagramas se construyen de la siguiente forma: como el voltaje de entrada es siempre la hipotenusa y el voltaje que cae en las componentes resistivas y reactivas deben estar siempre con una relación de fase de 90 grados, usando trigonometría simple la intersección entre los vectores resistivo y reactivo debe estar siempre en el semicírculo de radio  $V_{ent}/2$ . En el caso de una carga reactiva pura, esto conduce a la importante conclusión de que la diferencia de voltaje VAB es constante e igual a  $V_{ent}/2$  (sin que influya para nada el valor de la capacidad o la inductancia). Esto es correcto, porque el valor de ROE de una carga reactiva pura siempre será infi-

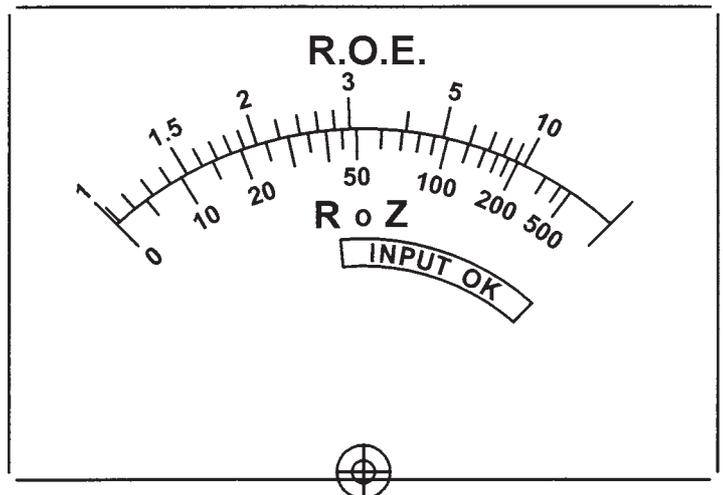


Gráfico 6 - Escala del medidor (tamaño exacto).

nito, lo que representa este valor de  $V_{ent}/2$ .

No ha de sorprender, sin embargo, que la escala del medidor de resistencia producida a partir de los valores de  $V_2$  no sea precisa cuando se usa con cargas complejas. Pero también debe quedar claro que, para cualquier carga compleja que tenga una resistencia de valor conocido en serie con una inductancia, el voltaje indicado para esa carga será siempre mayor que el obtenido para una resistencia sola del mismo valor, porque la impedancia global de la carga es mayor. Visto de otra forma, el voltaje indicado será siempre mínimo cuando la antena esté en resonancia y, por tanto, se comporta como puramente resistiva: en ese punto, la medida de resistencia en la escala es correcta. Por encima y por debajo del punto de resonancia el voltaje subirá, porque se introduce el término reactivo de la carga. Esto puede utilizarse de forma práctica observando qué ocurre con el valor de la resistencia según vamos variando la frecuencia, aunque esto lo vamos a explicar en detalle más adelante.

Otras conclusiones que pueden extraerse de este circuito son las siguientes:

a) El generador de RF nunca está sometido a una ROE superior a 2:1 (con una carga abierta), por lo que no hay riesgo de dañarlo aún analizando cargas de ROE elevada.

b) Este instrumento de medida no es un medidor de ROE al uso, porque 3/4 partes de la potencia utilizada se pierden en la red de

medida en lugar de ser radiadas por la antena. Además, como es preciso utilizar resistencias no inductivas de poca potencia, es un equipo de baja potencia (máximo 2 vatios) y no puede ser dejado conectado permanentemente entre el equipo y la antena como un monitor de una línea de transmisión.

c) Para conseguir que la caída de voltaje en los diodos sea despreciable, deben utilizarse voltajes relativamente elevados. Además, si se quiere que el puente funcione correctamente en 70 cm, únicamente pueden utilizarse diodos de barrera Schottky por su gran rapidez de conmutación y su baja caída de voltaje directa (200 mV aproximadamente). De hecho, en las escalas del medidor (ver figura 6) se han incluido los efectos de caída de voltaje de los diodos.

### El analizador en la práctica

Aquellos constructores que montaron el analizador de HF publicado previamente quedaron tan contentos con su rendimiento que pronto comenzaron a solicitar un instrumento que cubriera los 50 MHz y los 2 metros y, si fuera posible, también los 70 cm. ¡Y también tenía que ser barato y fácil de construir! Esta última condición era muy difícil de conseguir. Después de una investigación muy amplia dos fueron las conclusiones iniciales: la primera era que los circuitos de pre-scaler que llegan hasta 500 MHz (para medir la frecuencia) eran difíciles de conseguir a no ser que alguien se animara a pedir como mínimo 1000

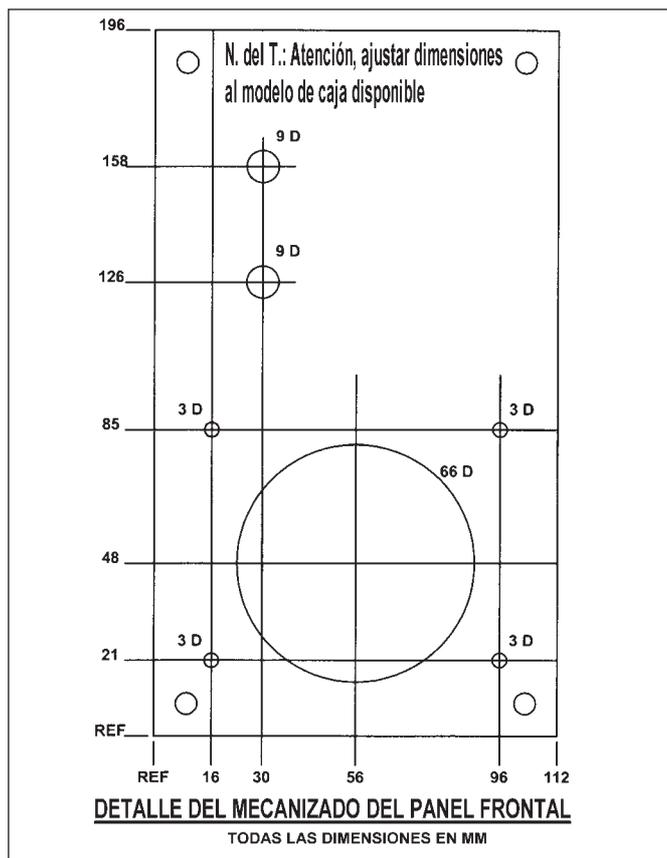


Gráfico 7 - Diagrama de mecanizado del panel frontal.

unidades, por lo que la idea de utilizar un frecuencímetro LCD basado en un microprocesador quedaba descartada; y, en segundo lugar, el diseño y construcción de un generador de radiofrecuencia de potencia razonablemente "plano" (digamos 1 vatio entre 30 y 500 MHz) iba a ser una pesadilla muy cara y también con un consumo elevado de batería (una tercera conclusión).

¿Cómo superar estos tres obstáculos? Muy simple: utilizar un equipo portátil de aficionado (con su frecuencímetro) como generador de RF para alimentar el puente. El resultado es un instrumento simple y económico que no usa baterías y que hace todas aquellas medidas que necesita el aficionado para el diseño y la sintonía de sistemas de antenas resonantes.

La última parte de este trabajo fue diseñar una red puramente resistiva, lo cual no es nada sencillo porque las resistencias modernas tienen una inductancia inherente a su ajuste, que se realiza mediante un laser, "quemando" un surco en forma espiral en el material resistivo hasta que el valor entra dentro de la tolerancia.

Para ello se hicieron medidas

muy cuidadosas con resistencias estándar de película metálica de  $\frac{1}{4}$  de vatio prácticamente sin patillas, para comprobar si su auto-inductancia en frecuencias de 432 MHz era despreciable. Lamentablemente no es el caso e, incluso, poniendo tres resistencias en paralelo para reducir su inductancia efectiva por un factor de 3 (y, de paso, aumentar su potencia tolerable) no se consiguieron resultados satisfactorios. Pero esta técnica funciona bien en 2 metros, por lo que se han construido dos versiones del analizador.

La 1ª versión funciona correctamente hasta frecuencias de 150 MHz, y usa resistencias de película metálica estándar de  $\frac{1}{4}$  de vatio. Es la recomendada para aquellos constructores que no se sientan con confianza suficiente como para utilizar componentes de montaje superficial. La 2ª versión utiliza resistencias de montaje superficial de  $\frac{1}{4}$  de vatio de tipo 1206 en el puente, y trabaja correctamente hasta frecuencias de 500 MHz.

Si se va a construir el analizador para uso en UHF, se debe utilizar un conector de tipo N. Los conectores del tipo SO239-PL259 tienen

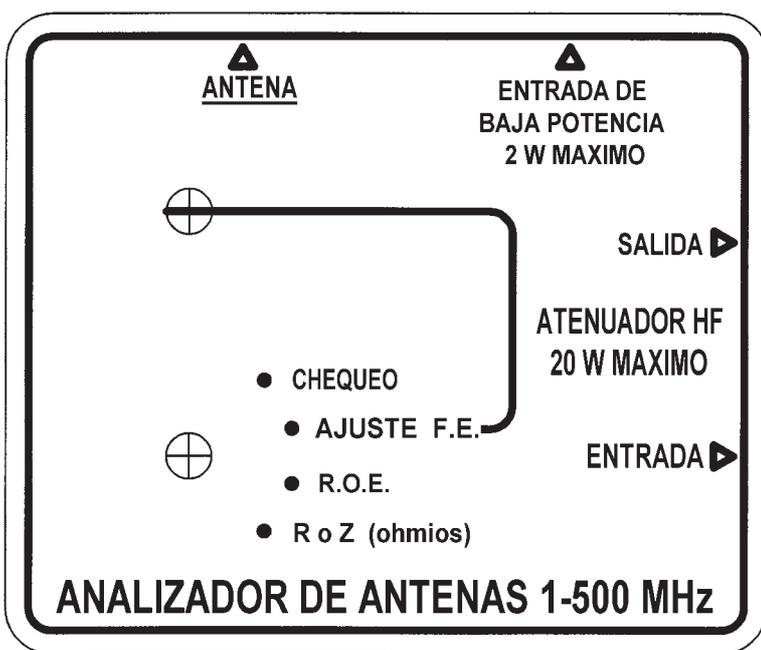


Gráfico 8 - Etiqueta del panel frontal (tamaño exacto).

altas pérdidas dieléctricas, elevada capacidad y un mal acoplamiento de impedancias a 450 MHz, causando errores significativos en la escala de resistencia (del orden del 15%) aunque no se ponga carga alguna en el circuito. Incluso la mucho menor capacidad a causar un ligero error a fondo de escala en la escala de resistencias en 70 cm, pero esta capacidad queda tamponada con el trocito de línea de 50 W cuando se conecta una carga al analizador. Las pérdidas y el desajuste que llegarían a causar conectores del tipo SO239/PL259 ¡no se compensarían de ninguna forma! En caso de tener que usar obligatoriamente un conector SO239, ¡busque uno que tenga aislamiento plástico claro, no los que usan aisladores de baquelita de color marrón claro!

La última parte del diseño fue el atenuador de potencia, de tal forma que si alguien quiere utilizar el puente para medidas en HF pueda utilizar un transceptor HF estándar ajustado a baja potencia como generador de RF. Si el constructor ya dispone de un analizador para HF (N. T.: o si utiliza un equipo HF QRP), puede omitirse este atenuador.

### Construcción

Prepare primero el circuito impreso. El método de la plancha de vapor y el papel couché que describo en mi página web

([www.users.on.net/~endsodds](http://www.users.on.net/~endsodds)) funciona bien. Se han incluido en el artículo detalles del circuito impreso donde van los conectores (gráfico 11), las versiones 1 y 2 del circuito principal (gráficos 12 o 13) y, si fuera necesario, la de los conectores del atenuador (gráfico 10). Perfore todos los agujeros y cubra con una capa de estaño ligera las superficies de cobre de los circuitos impresos utilizando para ello fundente en pasta neutro y su soldador. Limpie las placas con alcohol.

Haga el mecanizado de la caja. Para montar los circuitos impresos, en algunos casos se deben eliminar los ribetes de refuerzo plásticos, lo que puede hacerse bien con un formón ancho (N.T.: El autor hace referencia al modelo de caja descrito en la lista de componentes. Retex tiene modelos casi idénticos -por ejemplo la Polibox 33040204 o la Gibox- y habría que hacer la misma operación). Los detalles de perforado del panel frontal figuran en la gráfica 7. Utilice el circuito impreso (gráfica 11) como patrón para marcar la posición de los agujeros de los conectores en la parte superior de la caja, y los del atenuador en el lateral de la caja, si es que se va a colocar, tal como indica la gráfica 10.

Complete los circuitos impresos. Si se van a utilizar componentes de montaje superficial, instale primero las resistencias que

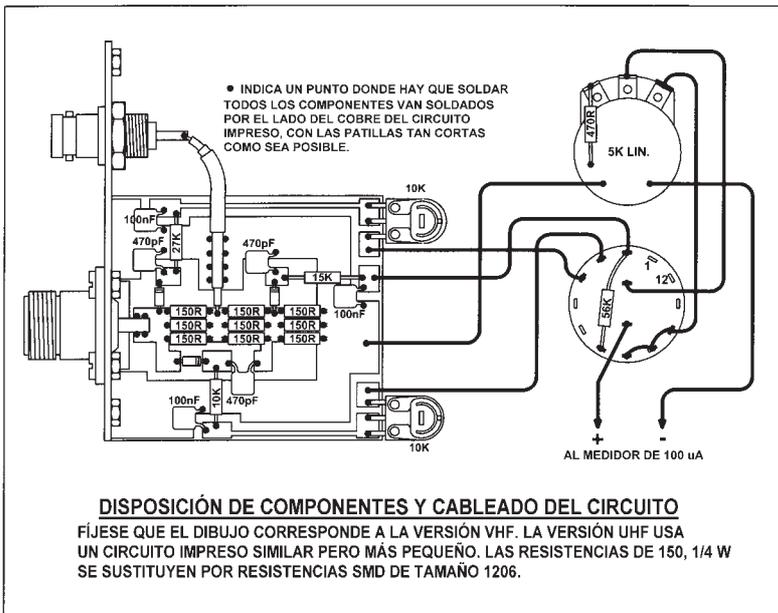


Gráfico 9 - Disposición de los componentes y cableado de la versión VHF.

componen el puente. Cubra ligeramente el área donde van colocadas las resistencias con pasta neutra y coloque la primera de las resistencias entre las pistas utilizando para ello unas pinzas. Una vez colocada en posición, fjela en esa posición con una pequeña cantidad de estaño por uno de sus extremos. Repita la operación para las 9 resistencias. Suelde entonces los otros extremos de las resistencias, deje que se enfríen y repita la soldadura por el otro extremo, que ha-

bía quedado fijado en el paso anterior. Utilice alcohol para eliminar los restos de fundente y seque el circuito impreso con aire caliente (los secadores de pelo son fantásticos para eso). Después, siguiendo el esquema (gráfico 5) y el diagrama de colocación de componentes (gráfico 9) coloque el resto de componentes. Ve, ¿no ha sido tan difícil!

Suelde las tuercas de latón al circuito impreso de los conectores sujetándolas temporalmente con tornillos de acero inoxidable en su posición final. Monte todos los conectores y suelde las placas de los conectores y la de los componentes en ángulo recto entre sí. El montaje completo se puede ver en el gráfico 9. Utilice suficiente soldadura como para hacer una buena conexión

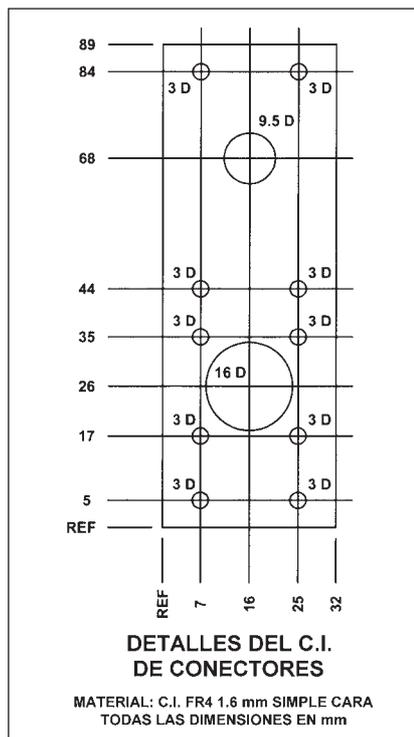


Gráfico 11 - Detalle del circuito impreso de los conectores.

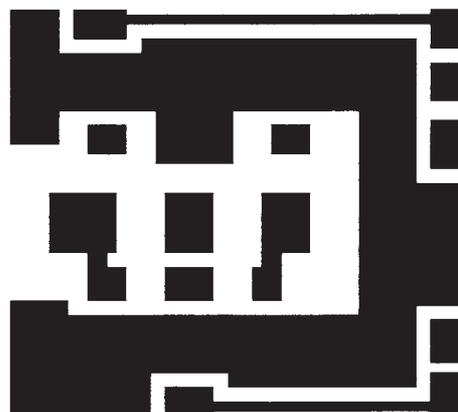


Gráfico 12 - Circuito impreso para la versión VHF.



Gráfico 13 - Circuito impreso para la versión UHF.

eléctrica y mecánica entre las placas. Haga la conexión final entre la placa de componentes y el conector BNC utilizando cable coaxial miniatura de 50 W con aislamiento de teflón. Si se va a incluir el atenuador de HF en el instrumento, móntelo tal como muestra la gráfica 10. Instale todo en la caja y complete el cableado tal como indican la gráfica 9 y la foto 2. (N. T.: El autor utiliza un potenciómetro de panel con la trasera metálica, y la aprovecha para hacer varias conexiones de masa. Si se usa un potenciómetro plástico esta unión habrá que

hacerla aprovechando el extremo libre de la resistencia de 470 W que va unida al potenciómetro.)

A continuación modifique el medidor. En una zona de trabajo muy limpia quite el protector plástico frontal y los tornillos que sujetan la escala metálica. Dé la vuelta a la escala y cubra cuidadosamente la superficie posterior con cinta adhesiva de doble capa fina. Haga una fotocopia de la escala del medidor (gráfica 6) en papel fotográfico brillante y corte cuidadosamente alrededor de la escala del medidor con una cuchilla de bricolaje afilada. Pegue esta escala en la trasera de la escala metálica, recorte si hay algún sobrante y vuel-

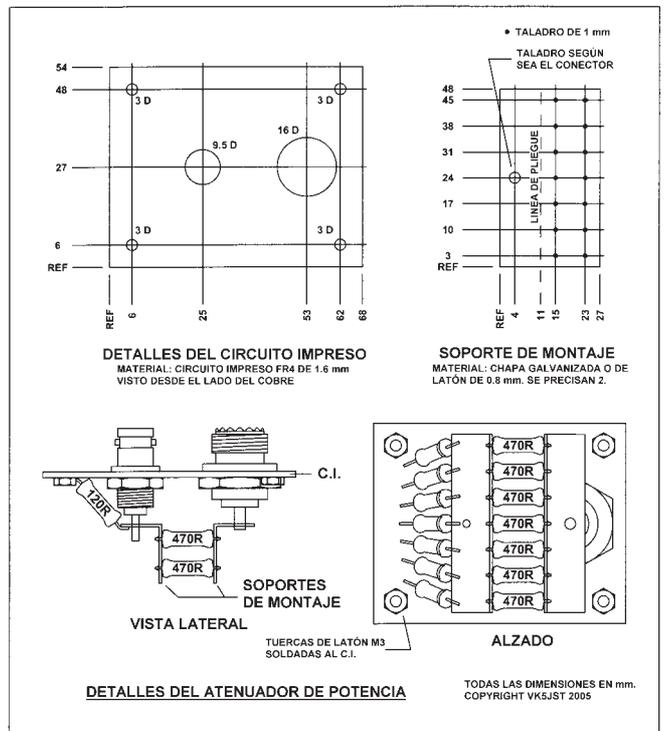


Gráfico 10 - Detalles del atenuador de potencia.



Foto 1 - El analizador y el transceptor usado como generador de señal.

va a montar el medidor.

La última tarea es instalar en el panel frontal la etiqueta que figura en la gráfica 8. Para ello siga el mismo procedimiento que con la escala del medidor.

### Ajuste

Ponga el conmutador en la posición "CHEQUEO" para comprobar la señal de entrada. Usando una frecuencia en el rango 5-30 MHz, aumente gradualmente la potencia hasta que llegue al puente aproximadamente 1 vatio (en el medio del tramo marcado como "INPUT OK" de la escala). Cambie entonces a "AJUSTE F.E." (ajuste a fondo de escala) y, usando el potenciómetro del panel frontal, ajuste hasta conseguir que la aguja del medidor vaya a fondo de escala. Después sucesivamente cambie a las posiciones "ROE" y "R o Z", utilizando para ello los potenciómetros de ajuste correspondientes del circuito impreso -TP1 y TP2, respectivamente-, ajuste a fondo de escala. Con esto queda ajustado el equipo. (La frecuencia entre 5 y 30 MHz se ha elegido para que los efectos de la capacidad del conector sean despreciables en la escala de resistencia. Para la versión de UHF el ajuste puede hacerse a 144 MHz).

Si tiene una carga artificial de 50 W realmente buena, úsela para comprobar si su instrumento marca una ROE de 1:1 y una resistencia de 50 W sobre el rango de frecuencias especificado para la car-

ga. Lamentablemente muchas cargas artificiales fallan miserablemente cuando se hace esta comprobación ya que una carga que opere correctamente en el rango de VHF y UHF (con una ROE menor de 1.05:1) es muy difícil de construir. El diseño del Analizador fue cuidadosamente comprobado utilizando una carga de precisión de 50 W tanto en 2 metros como en 70 cm (gracias, VK5ZBQ). Con el puente de resistencias de montaje superficial se consiguió medir una ROE menor de 1.05:1 a 470 MHz.

La versión 1, utilizando resistencias estándar de película metálica de ¼ de vatio en el puente, dio como resultado una medida de ROE a 470 MHz de 1.3:1 y de 1.03:1 a 146 MHz. También indicó incorrectamente la resistencia como de 70 W a 470 MHz.

### Uso del analizador

Seleccione una frecuencia de ensayo en su transceptor (véase foto 1), y ajuste la potencia de salida a 1 vatio aproximadamente (o utilice el atenuador incorporado, que acepta potencias de hasta 20 vatios para proporcionar la señal requerida, entre 0.4 y 1 vatio. Cambie el conmutador a "AJUSTE F.E." y ajuste con el potenciómetro a fondo de escala. Conmute a "ROE" y compruebe el valor. Conmute ahora a "R o Z" y lea el valor de la impedancia aparente (Z) en la escala R o Z. Mueva ahora la frecuencia en el transceptor a un valor ligeramente superior, recalibre el instrumento y tome nota de los cambios en ROE y en impedancia. Si la impedancia disminuye, es señal de que la antena es muy corta y necesita ser extendida. Si la impedancia aumenta, entonces está Vd. midiendo por encima de la frecuencia de resonancia de la antena y necesita ser recortada. Fijese que el cambio en frecuencia debe ser pequeño (del orden de 1-2%), porque si usa saltos más grandes es muy probable que se salte la frecuencia de resonancia de la antena (digamos un salto desde F2 a F3 en la gráfica 4) y se haga un lío Vd. mismo. Esto es muy frecuente

cuando se usa el instrumento con antenas Yagi con muchos elementos de pequeño diámetro, ya que el ancho de banda puede ser muy pequeño.

Una vez que Vd. esté cerca de la resonancia, puede ir probando si el extender o recortar la antena, añadir capacidad o inductancia en el acoplador, o utilizar un balun o un tipo diferente de cable le puede ayudar en conseguir un mejor ajuste entre el

transmisor y el complejo radiante (acoplador, cables, antenas). Y, posiblemente, en el proceso Vd.

termine aprendiendo realmente algo sobre el místico tema de las antenas. ¡Que lo disfrute!

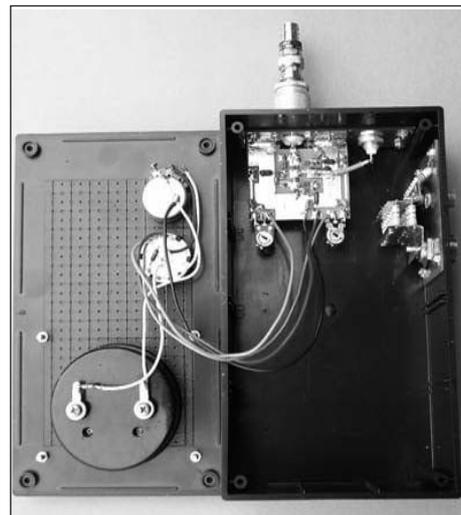


Foto 2 - Detalles constructivos con la caja abierta.

### Lista de componentes

- 9 150 W resistencia de película metálica de 0.25 W
- 9 150 W resistencia de montaje superficial de 0.25 W, tamaño 1206
- 7 120 W resistencia de película metálica de 1 W
- 1 470 W resistencia de película metálica de 0.25 W
- 14 470 W resistencia de película metálica de 1 W
- 1 10 kW resistencia de película metálica de 0.25 W
- 1 15 kW resistencia de película metálica de 0.25 W
- 1 27 kW resistencia de película metálica de 0.25 W
- 1 56 kW resistencia de película metálica de 0.25 W
- 2 10 kW potenciómetros ajustables (Jaycar RT4016)
- 1 5 kW potenciómetro lineal
- 3 470 pF condensadores monolíticos NPO de 50 V
- 3 100 nF condensadores monolíticos de 50 V
- 3 1N5711 (HP 5082-2800) diodos Schottky (DSE Z3231)
- 2 conectores BNC (Altronics P0516)
- 1 conector SO239 (Altronics P0510)
- 1 conector tipo N (DSE P2410)
- 3 circuitos impresos -ver texto
- 1 conmutador rotativo de 2 polos 6 posiciones (Jaycar SR1212)
- 2 botones
- 1 medidor de 100 µA fondo escala, tipo MU-65 (Altronics Q0550)
- 1 caja Jiffy 197 x 113 x 63mm (Jaycar HB6012)
- 14 tuercas de latón M3
- 14 tornillos M3 de cabeza avellanada

(N. del T.: Atención, ésta es la lista con todas las opciones. Revise el texto antes de decidir cuáles son los componentes requeridos para cada versión (resistencias estándar de ¼ W o resistencias SMD, resistencias para el atenuador de potencia, conectores...). Entre paréntesis se han incluido los nombres y códigos originales de los distribuidores australianos, por si alguien quiere buscar equivalencias exactas. El conmutador rotativo es de Lorlin, Retex tiene una caja casi idéntica a la usada, la Polibox 33040304, aunque también se podría usar la Gibox, y el microamperímetro mide 100x82 mm y tiene una resistencia interna de 3.9 kW. Para otros tamaños de instrumento habrá que adaptar la escala de la gráfica 6, que puede hacerse con programas como Photoshop).