

Módulo de Correlación y Detección de Banda Ancha y Banda Q en Guía de Onda

Ana R. Pérez⁽¹⁾, Juan L. Cano⁽¹⁾, Enrique Villa⁽¹⁾, Ángel Mediavilla⁽¹⁾, Eduardo Artal⁽¹⁾

perezar@unican.es, canojl@unican.es, villae@unican.es, angel.mediavilla@unican.es, artale@unican.es

⁽¹⁾ Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Edif. Ing. Telecomunicación, Plaza de la Ciencia s/n, 39005, Santander.

Abstract- This contribution presents the design and characterization of a WR22 waveguide correlation and detection module for polarimetry applications in radioastronomy covering the frequency band 35-47 GHz (30%). The module includes the design of a 3-dB 90° hybrid coupler, a 90° phase shifter, a waveguide termination and a Schottky diode detector. The 3-dB 90° hybrid coupler, tested separately, shows an input matching better than 20 dB and accurate phase and amplitude balances. The module itself provides the I , Q and U Stokes parameters simultaneously with good isolation and leakage values. Differences between expected and actual values are found to be due to mechanical tolerances.

I. INTRODUCCIÓN

El Fondo Cósmico de Microondas (CMB) es una radiación electromagnética en el rango de las microondas que llena por completo el Universo y es considerada una herramienta fundamental para comprender las propiedades cosmológicas del mismo. Una de las tareas más difíciles en su caracterización es la separación de la emisión debida al propio CMB del resto de fuentes astrofísicas que emiten en el rango de las microondas.

El experimento QUIJOTE tiene como objetivo la caracterización de la polarización del CMB y otros procesos de emisión galáctica y extra-galáctica en el rango 10 – 47 GHz desde el Observatorio de Izaña en Tenerife [1]. Se realizará mediante la obtención de los parámetros de Stokes Q , U e I que definen la polarización de una onda, suponiendo $V=0$ ya que el CMB no presenta polarización circular. La primera fase de este proyecto, actualmente en proceso de adquisición de datos, contempló la puesta en servicio de un instrumento dotado de 5 receptores en el rango de 10 a 30 GHz. El segundo instrumento, en proceso de fabricación, constará de 31 receptores operando en la banda Ka (26 – 36 GHz) que aumentará la sensibilidad necesaria para la detección de la componente de ondas gravitacionales. La segunda fase de QUIJOTE, llamada Exploring the Physics of the Inflation (EPI) y dentro de la cual se encuentra enmarcado el presente trabajo, contempla la construcción de un tercer instrumento dotado de 31 detectores en la banda Q (35 – 47 GHz) que permitirá incrementar el rango actual del experimento QUIJOTE y su sensibilidad.

La correcta obtención de los parámetros de Stokes requiere un buen equilibrio en la respuesta en amplitud y fase de cada rama, siendo esta característica un factor clave para el funcionamiento óptimo del receptor que permita obtener un buen aislamiento entre los parámetros de Stokes. Los resultados experimentales del instrumento implementado a

31 GHz muestran aislamientos en el rango 10 – 15 dB que podrían ser mejorados si se modifica el esquema del módulo de correlación. Por este motivo se ha buscado el diseño de una nueva configuración de módulo correlador y detector que mejore estos resultados. La Fig. 1 muestra el esquema del nuevo módulo a 41 GHz basado en la estructura implementada en el instrumento a 31 GHz. Como diferencia principal, se emplean cuatro acopladores híbridos 3 dB en guía de onda que sustituyen a los dos divisores de potencia en guía de onda y los dos híbridos 180° en tecnología microstrip utilizados en QUIJOTE. Con ello se pretende mejorar las prestaciones en cuanto a pérdidas y aislamientos así como la obtención de un mayor equilibrio entre las ramas, tanto en amplitud como en fase, gracias a las mejoras que introduce la tecnología en guía de onda frente a la tecnología microstrip. Además de los acopladores híbridos, el módulo incluye un desfaseador 90° fijo en guía de onda, cuatro detectores a diodo Schottky y amplificación diferencial de la señal de vídeo detectada.

Este artículo presenta el diseño y caracterización experimental de los diferentes elementos que componen el nuevo módulo de correlación y detección en tecnología guiada así como las mejoras introducidas con respecto al esquema empleado en QUIJOTE.

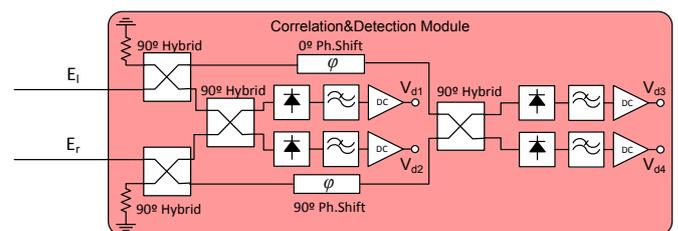


Fig. 1. Módulo detector en la banda 35 – 47 GHz

II. DISEÑO

El diseño de la estructura se basa principalmente en el uso de guía de onda por lo que todos los elementos que lo permiten han sido diseñados en esta tecnología. Los dispositivos que componen el nuevo módulo han sido diseñados y caracterizados de manera individual, en los casos en que ha sido posible.

A. Principio de Operación. Parámetros de Stokes

La medida de la polarización del CMB se realiza a través de los cuatro Parámetros de Stokes (I , Q , U y V), relacionados con las amplitudes de las dos componentes

ortogonales de campo eléctrico, normales a la dirección de propagación. Vienen definidos en componentes circulares por la expresión (1), siendo E_t y E_r las componentes de campo eléctrico en coordenadas circulares. El parámetro I es una medida de la intensidad total de la onda. Los parámetros Q y U miden la polarización lineal y el parámetro V la polarización circular. Se sabe que la polarización del CMB no tiene componente de polarización circular por lo que $V=0$.

Los parámetros de Stokes presentan la ventaja de que pueden ser obtenidos experimentalmente como suma y diferencia de potencias medibles en un receptor. De esta manera, operando adecuadamente con las cuatro salidas detectadas del esquema de la Fig. 1 se obtienen las expresiones de los parámetros I , Q y U (1).

$$I = |E_t|^2 + |E_r|^2 = Vd_1 + Vd_2 = Vd_3 + Vd_4$$

$$Q = 2 \operatorname{Re}(E_t * E_r) = Vd_3 - Vd_4 \quad (1)$$

$$U = -2 \operatorname{Im}(E_t * E_r) = Vd_1 - Vd_2$$

B. Acoplador 3 dB 90° en WR-22

Analizando aspectos eléctricos y mecánicos, y teniendo en cuenta la necesidad de una estructura en plano E que permita la integración de los distintos elementos, se optó por un diseño en estructura multi-rama cuya fabricación es más sencilla que otras configuraciones estudiadas, además de presentar comportamientos adecuados en anchos de banda elevados en frecuencias de hasta cientos de GHz. Está basado en la estructura de un híbrido en cuadratura de tipo branch-line [2]. La Fig. 2 muestra el esquema del diseño realizado y la Tabla 1 las dimensiones del mismo.

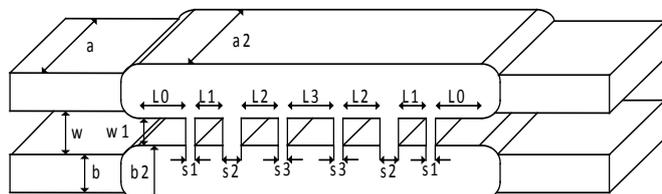


Fig. 2. Acoplador 3 dB, 90° en banda-Q

Dim.	a	$a2$	b	$b2$	$L0$	$L1$	$L2$
Valor	5.7	7.5	2.85	3.14	3.4	1.52	1.66
Dim.	$L3$	$s1$	$s2$	$s3$	w	$w1$	
Valor	1.84	0.8	1.14	1	1.57	1.28	

Tabla 1. Dimensiones en mm del acoplador 3 dB 90° en banda-Q.

Los resultados de simulación electromagnética, realizadas con el simulador 3D CST Microwave Studio®, muestran 25 dB de adaptación y aislamiento en toda la banda (Fig. 3). Ambos parámetros coinciden debido a que en un híbrido con cargas ideales en sus puertos la adaptación y el aislamiento son iguales. El error de fase obtenido en simulación es de $\pm 0.5^\circ$.

Cuando se utiliza el acoplador como divisor de potencia, es necesario colocar en el puerto aislado una carga adaptada que absorba la energía que reciba sin provocar reflexiones. Por ello se diseñó una carga de material absorbente (ECCOSORB MF124) de variación suave en forma de cuña que presenta en simulación una adaptación mejor de 30 dB en la banda de 36 a 49 GHz.

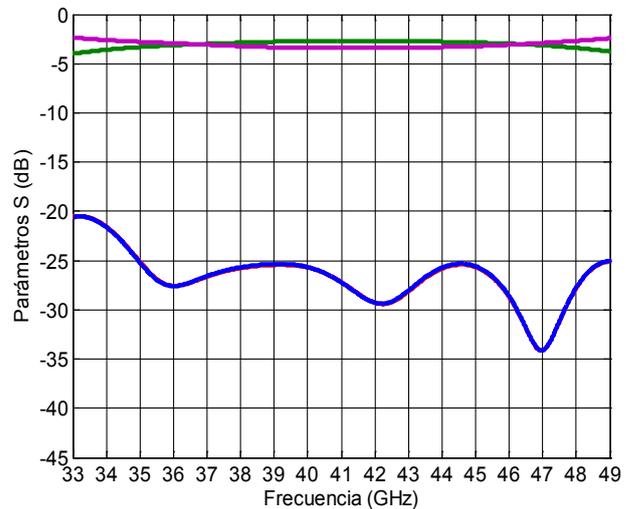


Fig. 3. Resultados de simulación electromagnética 3D del acoplador; adaptación en azul; aislamiento en rojo; acoplamiento en verde; transmisión en morado.

C. Desfasador 90° en WR-22

La obtención de los parámetros de Stokes requiere diferentes correlaciones entre las señales de entrada del sistema. Si analizamos la configuración implementada de la Fig. 1, es necesario que una de las ramas introduzca un desfase adicional de 90° a través de un desfasador.

Teniendo en cuenta que el desfasador basado en corrugaciones utilizado en el instrumento a 31 GHz de QUIJOTE proporcionó muy buenas prestaciones, se optó por utilizar una versión escalada de este tipo de estructura.

La Fig. 4 muestra una de las mitades del esquema del desfasador (la otra mitad es simétrica). Fue necesaria la realización de varias iteraciones con el fin de obtener dimensiones que no limitaran en exceso el mecanizado, obteniéndose las mostradas en la Tabla 2

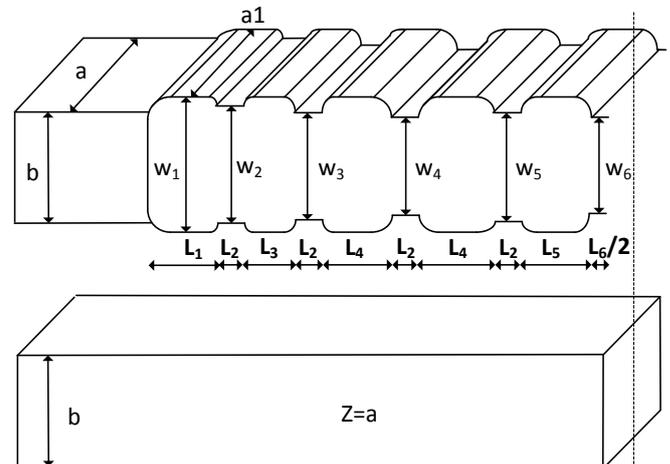


Fig. 4. Mitad simétrica del esquema del desfasador 90° en Banda-Q

Dim.	a	$a1$	b	$L1$	$L2$	$L3$	$L4$	$L5$
Valor	5.7	6.5	2.85	0.61	0.44	0.25	0.24	0.24
Dim.	$L6$	$W1$	$W2$	$W3$	$W4$	$W5$	$W6$	
Valor	0.19	2.85	2.58	1.96	1.72	1.8	1.7	

Tabla 2. Dimensiones en mm del desfasador en banda-Q.

Los resultados de simulación muestran una adaptación mejor de 30 dB en toda la banda para la rama desfasadora. Asimismo el error de fase que se obtuvo, respecto a una guía

recta de igual longitud, fue de $\pm 2^\circ$ lo que satisface los requerimientos de diseño.

D. Detectores

Los receptores utilizan a su salida detectores basados en diodos Schottky que realizan la conversión mediante rectificación de la señal de potencia de radiofrecuencia recibida a una señal de tensión de baja frecuencia. El detector utilizado es el presentado anteriormente en [3] que presenta pérdidas de retorno mejores de 12 dB en la banda de interés así como una sensibilidad media de 1100 ± 120 mV/mW.

E. Amplificadores de continua

Tras la conversión es necesario amplificar la tensión detectada en DC hasta los niveles de tensión requeridos por el sistema de adquisición de datos. Esta amplificación, en configuración diferencial, se realiza mediante el circuito integrado OPA4227 [4].

F. Transición WR22-microstrip

Permite conectar los detectores (con entrada en línea microstrip) con los puertos de salida de los acopladores (guía de onda). El diseño se basa en una transición de campo E longitudinal [5]. Este diseño se adecua y optimiza para trabajar en la banda de interés y se lleva a cabo una caracterización en configuración back-to-back obteniéndose una adaptación mejor de 20 dB en la banda de 35 a 47 GHz. Por tanto, la adaptación de una transición sola será mejor de 25 dB.

III. INTEGRACIÓN

A fin de interconectar los distintos elementos con las mínimas pérdidas posibles, se diseñó una estructura acodada adaptada multi-paso de esquinas redondeadas [6] con pérdidas de retorno mejores de 50 dB en la banda de interés. La Fig. 5 muestra una imagen del módulo correlador. La parte anterior de la base alberga los acopladores, el desfaseador, los detectores y las transiciones WR22-microstrip. La parte posterior contiene el PCB con los amplificadores de DC.

La simulación de la estructura final mostró adaptaciones de entrada y aislamientos mejores de 20 dB y 25 dB respectivamente. Asimismo, las pérdidas entre cada una de las entradas y las respectivas salidas (antes de la detección) fueron $6 \text{ dB} \pm 0.5 \text{ dB}$, lo que concuerda con el valor esperado.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para la caracterización del módulo de detección es necesario colocar en la entrada un acoplador híbrido 3 dB que nos permita proporcionar a la entrada del módulo diseñado dos señales de igual amplitud y desfasadas 90° , emulando las componentes que tendríamos si el sistema recibiera una señal con polarización lineal. Por este motivo se fabricó un híbrido que nos permitió caracterizarlo individualmente. La medida de los parámetros de Scattering en la banda de 33 a 49 GHz se realizó con el analizador de redes vectorial E8364A de Agilent Technologies. Se obtuvieron adaptaciones y aislamientos mejores de 20 dB. La Fig. 6 muestra la comparación entre la simulación y la medida de la diferencia de fase entre las salidas del acoplador híbrido. Se puede apreciar un desplazamiento en la fase de

2.5° con respecto a la simulación, el cual se atribuye a los errores de mecanización del dispositivo. Por su parte, el desfaseador no fue fabricado como elemento individual por lo que no ha podido ser caracterizado.

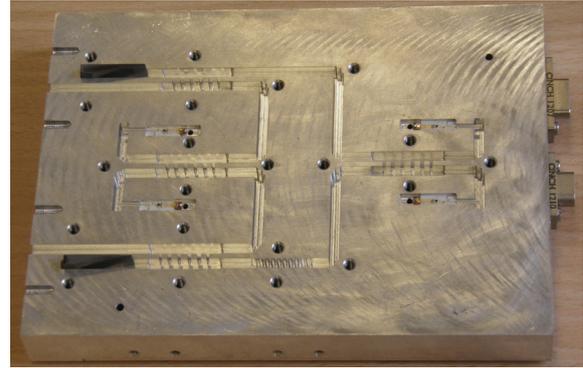


Fig. 5. Vista superior del módulo en aluminio. Dim.: $145 \times 100 \times 30$ mm³.

La obtención de los niveles de señal detectados en las cuatro salidas del módulo de correlación y detección se realizó mediante un barrido en frecuencia de 33 a 50 GHz con una potencia de entrada de -21 dBm obteniendo los resultados mostrados en la Fig. 7. En comparación con la estructura a 31 GHz del proyecto QUIJOTE, se ha conseguido menor rizado debido al diseño en guía de onda y mayor nivel de señal detectada a consecuencia de las menores pérdidas de los diferentes subsistemas y de la mayor sensibilidad que presenta el detector de EPI ($S_{EPI} = 1100 \text{ mV/mW}$) en comparación con el usado en QUIJOTE ($S_{QUI} = 1000 \text{ mV/mW}$). La señal V_{d1} (Fig. 1) ha de tomar un valor cercano a 0, V_{d2} un valor máximo de amplitud, que en este caso es de 3.7 V, y las salidas V_{d3} y V_{d4} deben ser iguales y de valor la mitad del valor máximo. Sin embargo estas dos señales no son iguales debido a los errores de mecanizado detectados en el desfaseador, que no proporciona los 90° deseados provocando que el último acoplador no funcione correctamente. Simulaciones en ADS (Advanced Design System de Agilent Technologies) han demostrado que un error de 12° en el desfaseador conllevaría resultados muy próximos a los obtenidos experimentalmente. Las dimensiones del desfaseador han sido medidas con un microscopio de alta resolución, mostrando errores entre 80 - 100 μm . Esta estructura desfaseadora ha sido simulada de nuevo incluyendo estos errores de mecanizado y los resultados muestran una desviación de 7° con respecto al diseño inicial (Fig. 8), muy próxima al cálculo teórico. El resto de diferencias se atribuye a los errores de mecanizado en el resto de componentes, principalmente al error de fase de los acopladores híbridos.

La caracterización en Scattering, presentada en la Fig. 9, muestra una mejora en la adaptación, obteniendo 20 dB frente a los 10 dB conseguidos con la estructura de QUIJOTE, lo que es debido de nuevo a las mejores prestaciones de la tecnología guiada. Sin embargo el aislamiento es peor, en torno a 12 dB frente a los 15 dB de QUIJOTE. Esto es debido a la pobre adaptación, en torno a 11 dB, del detector empleado cuyo diseño ha estado encaminado a proporcionar alta sensibilidad a costa de tener menor adaptación. Estos resultados ya se predecían en simulaciones realizadas, las cuales mostraban aislamientos en torno a 12-13 dB cuando se cargaban los puertos de los acopladores híbridos con cargas desiguales y no ideales que proporcionan unos 11 dB de adaptación.

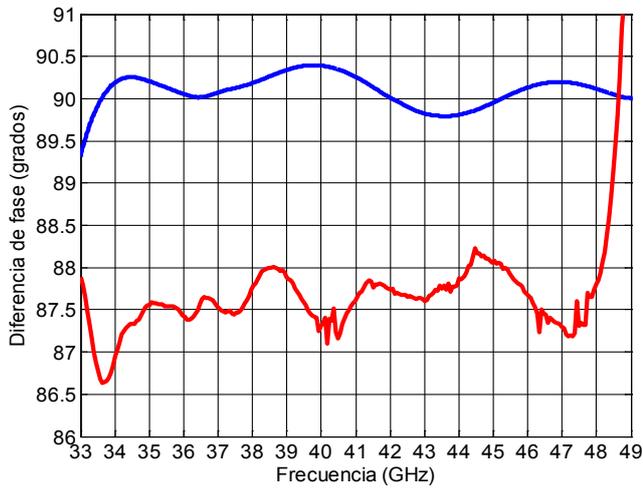


Fig. 6. Diferencia de fase del acoplador en Banda-Q; simulación en azul; medida en rojo

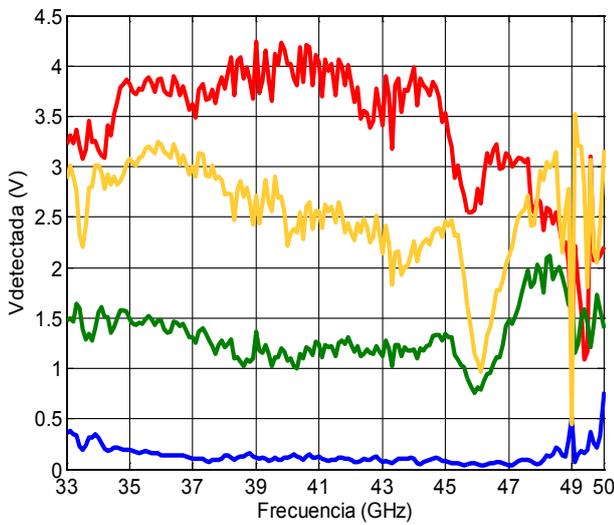


Fig. 7. Tensiones detectadas; V_{d1} en azul; V_{d2} en rojo; V_{d3} en verde; V_{d4} en amarillo.

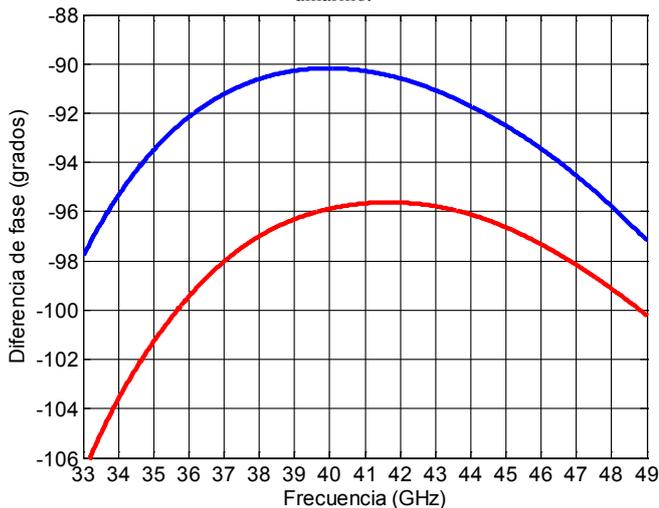


Fig. 8. Diferencia de fase del desfasador de Banda-Q; dimensiones originales en azul; dimensiones de fabricación en rojo.

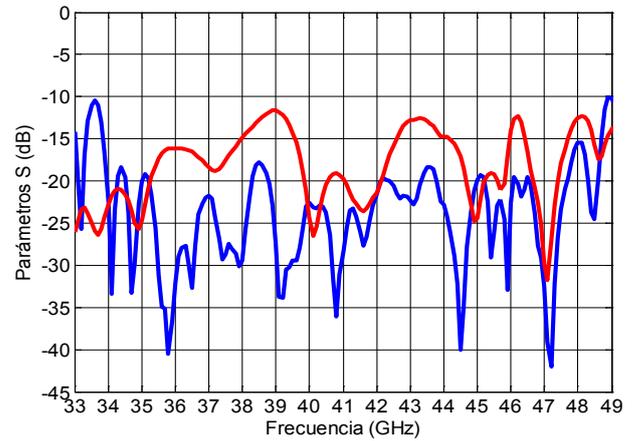


Fig. 9. Parámetros de Scattering del módulo correlador; adaptación en azul; aislamiento en rojo.

V. CONCLUSIONES

Se ha presentado el diseño de un módulo de correlación en guía de onda que formará parte del módulo posterior de un receptor para detección de polarización a 41 GHz enmarcado dentro del proyecto EPI (35 – 47 GHz). El nuevo esquema de receptor planteado presenta varias mejoras con respecto al anterior esquema utilizado en el proyecto QUIJOTE.

La caracterización experimental del acoplador 3 dB 90° valida las simulaciones lo que nos permite concluir que el comportamiento eléctrico del mismo es satisfactorio y adecuado. Las pequeñas desviaciones de los resultados obtenidos respecto a los esperados son debidas principalmente a las tolerancias de mecanizado del proceso de fabricación. Asimismo, el nuevo módulo correlador y detector reproduce las simulaciones realizadas considerando los errores de mecanizado y la baja adaptación de los detectores. Se concluye que la estructura opera correctamente y aporta mejoras con respecto al módulo a 31 GHz.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad la financiación para la realización de estos trabajos a través del programa CONSOLIDER-INGENIO 2010 de referencia CSD2010-00064.

REFERENCIAS

- [1] J.A. Rubiño-Martin *et al.*, "The Quijote CMB Experiment", *Proc. VIII Scientific Meeting of the Spanish Astronomical Society*, 7-11 Julio 2008, Santander., arXiv:0810.3141v1.
- [2] J. W. Kooi, A. Kovacs, B. Bumble, G. Chattopadhyay, M. L. Edgar, S. Kaye, R. LeDuc, J. Zmuidzinas, and T. G. Phillips, "Heterodyne Instrumentation Upgrade at the Caltech Submillimeter Observatory", *Millimeter and Submillimeter Detectors for Astronomy*. Proceedings of the SPIE, Volume 4855, pp. 265-278, 2003.
- [3] E. Villa, B. Aja, L. de la Fuente, E. Artal., "Detector basado en diodo Schottky en la banda de 35 a 47 GHz", XXVII Simposium Nacional de la Unión Científica de la Radio (URSI'12), Elche, septiembre de 2012.
- [4] J.L. Cano, E. Villa, J. Cagigas, L. de la Fuente, B. Aja, E. Artal, A. Mediavilla, "Diseño de un nuevo módulo posterior para el experimento QUIJOTE (Fase II)", XXVI Simposium Nacional de la Unión Científica de la Radio (URSI'11), Madrid, septiembre de 2011.
- [5] X. Ma, R. Xu, "A Broadband W-band E-plan Waveguide-to-Microstrip Probe Transition" *Microwave Conference APMC 2008*, Macao, China, 16-20 Dec. 2008.
- [6] A. Casanueva, A. Mediavilla, J.A. Pereda "Optimum compact H and E plane corners in rectangular waveguide", *Microwave and Optical Technology Letters*. Volume 42, 2004, pp 494-497.