

Línea de transmisión cuasi-óptica con modos gaussianos de orden superior para sistemas basados en gyrotrones tecnológicos para aplicaciones cerámicas.

Carlos del Río†‡, Ramón Gonzalo†, Arnold Möbius‡, Mario Sorolla† y Manfred Thumm‡

(†) DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA

CAMPUS ARROSADIA S/N, 31006 PAMPLONA

Correo electrónico: carlos@upna.es

(‡) FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

INSTITUT FÜR TECHNISCHE PHYSIK

POSTFACH 3640, D-76021 KARLSRUHE, ALEMANIA

Abstract:

In this paper, a description of a new compact microwave oven system based on a technological gyrotron for material processing applications is presented. The whole system has been designed by the Institute of Applied Physics in Nizhny Novgorod (Russia) and nowadays is installed in the Forschungszentrum (Karlsruhe, Germany). It consists of a technological gyrotron working at 30 GHz giving 10 Kw CW in the TE_{02} circular waveguide mode, a quasi-optical transmission line (optimized in this work) and the final very oversized cavity or applicator.

The original transmission line had a transmission efficiency of about 70%, by using a Vlasov launcher to generate a fundamental gaussian beam from the TE_{02} mode. The power was driven through a total of three mirrors. The improved design presented here increases the transmission efficiency up to 91%, by using a higher order gaussian beam mode, azimuthally polarized and conical profile, by using only two ellipsoidal mirrors.

1. Introducción

Hasta hoy en día, las aplicaciones de microondas con cierto nivel de potencia estaban limitadas a aplicaciones relacionadas con el calentamiento de plasmas, radar, comunicaciones, ya sean espaciales o terrestres, o con los hornos de cocina a 2.45 GHz., ya casi convencionales. Actualmente, se están realizando muchos estudios para poder aplicar las microondas a materiales cerámicos, consiguiendo unas mejores condiciones de acabado, tiempos de secado menores, “sinterización” de nuevos materiales, etc.

En concreto, la aplicación que se presenta en esta comunicación es la de un prototipo de horno de microondas de mediana potencia, 10 kW CW a 30 GHz., con el que se pretende “sinterizar” materiales cerámicos mediante una distribución de campo uniforme en la cavidad o aplicador final. Con esta distribución uniforme del campo, conseguimos un secado uniforme de las piezas, evitando así posibles grietas debidas a gradientes de temperatura en el proceso de secado. Controlando, como es posible hacerlo modulando el generador, la curva de temperatura, se pueden llegar a conseguir unos tamaños de grano muy pequeños, consiguiendo materiales mucho más duros, en unos tiempos realmente cortos.

El sistema completo ha sido diseñado por el Instituto de Física Aplicada de Nizhny Novgorod (Rusia), y se encuentra en la actualidad instalado en el Forschungszentrum Karlsruhe (Alemania).

Sin embargo, en esta comunicación nos queremos centrar en el diseño de la línea de transmisión empleada. El diseño original incluía una línea de transmisión con unas pérdidas del 30% de la potencia. La utilización de modos gaussianos de orden superior para el transporte de la potencia a través de una línea cuasi-óptica, ha permitido el poder diseñar una nueva línea de transmisión, disminuyendo las pérdidas hasta un 9% [1].

2. Línea cuasi-óptica

En este tipo de sistemas de calentamiento, la distribución de la potencia a la entrada de la cavidad final no tiene ninguna relevancia. Lo único que se pretende es introducir la mayor cantidad de potencia posible en el aplicador. Una vez allí, y con la ayuda de un dispositivo metálico rotatorio, se procederá a la aleatorización de los campos, buscando una distribución uniforme de la densidad de potencia.

A este respecto, se deberán tener en cuenta varios factores. El más importante, es el tamaño de la cavidad que deberá ser realmente grande en relación con la longitud de onda de trabajo, con tal de permitir la presencia de un número muy grande de modos. De hecho, debido a este problema, el método empleado en la actualidad para calcular estas cavidades tan sobredimensionadas, son los basados en un trazado de rayos. Hoy en día, gracias a los estudios realizados en el Forschungszentrum de Karlsruhe, se ha podido llegar a un diseño sistemático de las paredes de estas cavidades, así como a la manera óptima de introducir la potencia en la cavidad, asegurando una distribución uniforme.

La elección de la tecnología cuasi-óptica para la transmisión de la potencia hasta la cavidad, se debió básicamente a la idea de aislar al máximo el dispositivo generador, gyrotron, de las posibles reflexiones que pudieran generarse en la cavidad. A estas frecuencias, no tenemos la posibilidad de utilizar dispositivos tipo ferritas para aislar, así que debemos buscar otro tipo de sistema de aislamiento.

Cualquier tipo de transmisión que utilizara una línea de transmisión basada en una estructura cerrada de guía de onda, dejaba el camino totalmente abierto a las posibles reflexiones, poniendo en grave peligro el dispositivo generador, en este caso, el gyrotron. Como es conocido, este dispositivo, se basa en la radiación generada en el interior de una cavidad sobredimensionada, por un haz de electrones inyectados a velocidades relativistas y sometidos a un fuerte campo magnético transversal. Cualquier campo residual que pudiera llegar en sentido contrario, fruto de reflexiones producidas fuera del gyrotron, podrían alterar el correcto funcionamiento, dañando irreparablemente el generador. Normalmente los precios de este tipo de sistemas generadores no suelen ser en absoluto baratos, por lo que muchas veces el correcto aislamiento del generador a las reflexiones resulta un tema de importancia capital.

2.1. Filtrado longitudinal

En este sentido, las líneas de transmisión cuasi-ópticas, poseen una característica intrínseca a la misma filosofía de funcionamiento que las hace especialmente atractivas: el filtrado longitudinal. Este filtrado, consigue que un modo gaussiano que pudiera existir o generarse en sentido contrario, debería tener unas características muy concretas para poder atravesar la línea completa en sentido contrario.

Simplificando el problema a un solo reflector elíptico Fig. 1.a, éste focalizará en un punto concreto F2, aquellos rayos que le lleguen del foco generador F1. El carácter recíproco de este sistema pasivo, existirá, única y exclusivamente cuando se generen rayos, exactamente desde el punto destino F2, que serán focalizados en el punto origen F1. Si cambian las características del haz reflejado, el punto focal del haz reflejado se desplaza, por ejemplo, alejándose del reflector F2', Fig. 1.b, se producirán dos efectos de pérdidas por difracción: en la posición del reflector, y en el punto origen F1. Si por el contrario, el punto focal del haz reflejado se acerca al reflector F2'' Fig. 1.c, no habría pérdidas en el reflector por difracción, pero sí las habría y bastante considerables, en el punto de generación, pues el nuevo foco, F1'', se alejaría del reflector, teniendo una distribución mucho más ancha en la posición F1.

Además, sabemos que un reflector elíptico introduce cierta distorsión, aún en el caso de utilizar los focos correctos. Esta distorsión será todavía más acusada, cuanto mayor sea la variación de la posición de los nuevos focos. Este efecto intrínseco de distorsión de los reflectores, se intenta compensar utilizando configuraciones adecuadas de los reflectores, con tal de corregir estas aberraciones. Lógicamente esta corrección vuelve a ser únicamente para los rayos procedentes de los focos correctos, solo en estos casos, estas distorsiones se podrán corregir. Para los haces reflejados con focos erróneos, esta distorsión se puede ir acumulando.

Este efecto de filtrado longitudinal, será tanto más acusado conforme se aumenta el número de reflectores utilizados en la línea, ya que los efectos de difracción se van acumulando de un reflector al siguiente.

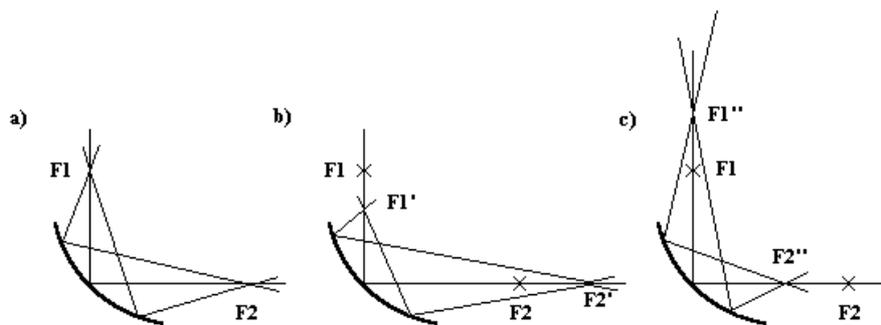


Fig. 1.- Demostración gráfica del efecto de filtrado longitudinal de un reflector elíptico.

3. Modos gaussianos de orden superior

Como se justificará más adelante, se van a utilizar modos gaussianos de orden superior en la

línea de transmisión, así que vamos a presentar sus características mas importantes.

Las fórmulas básicas de los modos gaussianos (1) se pueden obtener en varias referencias [2], pero lo más significativo para un correcto diseño de los reflectores, es el conocimiento exacto de los frentes de fase. A partir de las fórmulas generales, podemos apreciar como existe únicamente un término de fase que depende de los índices del modo gaussiano en cuestión, y resulta, casi siempre que se trabaje en zona paraxial, despreciable frente al resto de factores. Así, en conclusión de este rápido estudio de las fórmulas gaussianas, podemos concluir que los frentes de fase serán practicamente iguales para todos los modos gaussianos, siempre que trabajemos dentro de los límites de la paraxialidad, definidos en la referencia [3]. Por tanto, podremos seguir utilizando los mismos reflectores elípsoidales definidos según la óptica geométrica a través de dos puntos focales, que se han venido utilizando hasta hoy en día con el modo gaussiano fundamental.

4. Diseño de la línea cuasi-óptica

Como ya hemos comentado previamente, en este tipo de aplicaciones, la distribución de entrada de la potencia en la cavidad no tiene mayor relevancia, puesto que en el interior lo que se pretende es crear un “caos” controlado, para poder obtener la deseada distribución uniforme de la densidad de potencia.

En nuestro caso concreto, debido a que la excitación que obtenemos del gyrotrón es un modo TE_{02} , nos resultará especialmente fácil excitar la familia de modos gaussianos cónicos. Así pues, y debido a las restricciones geométricas a las que nos vemos sometidos (por ser un sistema propiedad de GYCOM, en el centro de investigación, FZK, de Karlsruhe no querían hacer cambios estructurales muy grandes), nos vemos obligados a utilizar un modo de orden menor al que hubieramos podido generar directamente a partir del modo TE_{02} , y convertir este modo a una mezcla de TE_{01} y TE_{02} , para posteriormente generar el modo gaussiano cónico de primer orden.

El diseño final de la línea consiste en una bocina con simetría de revolución con dos partes bien diferenciadas: una primera en la que se consigue convertir el modo TE_{02} de entrada en una mezcla de modos TE_{02} y TE_{01} , con un solo anillo de potencia, y una segunda parte, en la que

$$\Psi_a^{b,\varphi_0}(r, \varphi, z) = \frac{1}{\sqrt{1+\xi^2}} \left(\frac{\sqrt{2}r}{\varpi_0 \sqrt{1+\xi^2}} \right)^b \cos(b\varphi - \varphi_0) L_a^{(b)} \left(\frac{2r^2}{\varpi_0^2(1+\xi^2)} \right) e^{j(b+2a+1)\text{tg}^{-1}(\xi)} \cdot e^{-\frac{r^2}{\varpi_0^2(1-j\xi)}} \quad (1)$$

“gaussianizamos” este anillo, disminuyendo los campos en los extremos, generando un modo gaussiano cónico de primer orden, Ψ_0 , con una pureza de un 97.74%. En la Fig. 2, se puede observar la forma final de la antena.

A la salida de esta antena, podemos conocer el valor exacto del “beam waist” o cintura del haz, ϖ_0 , así como su posición, determinando absolutamente el radio de curvatura equivalente en la posición del primer reflector, mediante la fórmula:

$$R(z) = z \left(1 + \left(\frac{\pi \varpi_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right) \quad (2)$$

siendo λ la longitud de onda, z la distancia entre la posición del “beam waist” y el reflector, y ϖ_0 el valor del “beam waist”.

De igual manera, pero partiendo del haz deseado en el aplicador, podemos determinar el radio de curvatura equivalente del segundo reflector visto desde la cavidad final. Ahora, sólo queda resolver el enlace entre los reflectores para tener definidos completamente todos los reflectores que componen la línea de transmisión. Es sobradamente conocido que para definir completamente un reflector utilizando la aproximación de óptica física, basta con fijar los radios de curvatura de los frentes de fase de los haces incidente y reflejado.

Se puede demostrar, planteando las ecuaciones de los haces gaussianos entre los reflectores, que existen dos soluciones posibles. Una con una cintura más ancha que otra. Para favorecer aún más el efecto de filtrado, se elige la de cintura más estrecha.

Los datos finales de los reflectores los tenemos presentados en la Tabla I.

Tabla I: Datos mas significativos de los reflectores de la línea de transmisión. Dimensiones en milímetros.

	Entrada		Salida	
	ϖ_0	z	ϖ_0	z
1 ^{er} Reflector	11.64	122.6	38.56	303.9
2 ^o Reflector	38.56	557.2	13.08	169.7

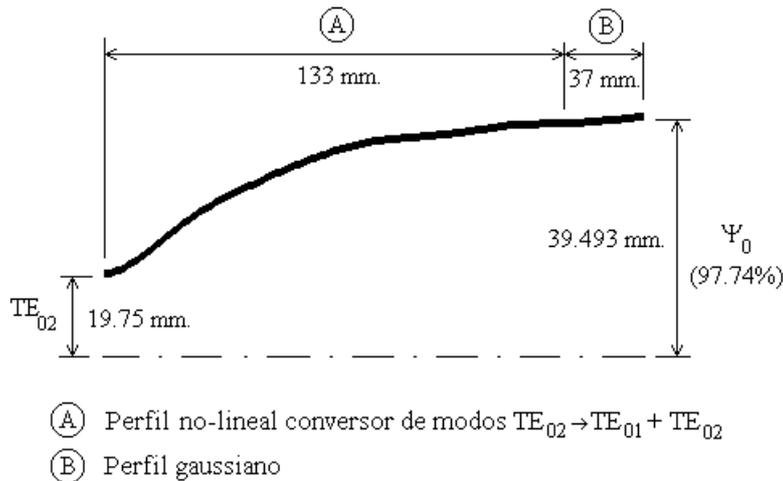


Figura 2.- Perfil de la antena excitadora de un modo gaussino cónico de primer orden, a partir de un modo TE_{02} de guía circular lisa.

5. Resultados

Como resultado más significativo cabe destacar la eficiencia de transmisión medida con este nuevo diseño. Un 91% de la potencia emitida por el gyrotron es introducida en la cavidad final. Con el diseño original, un 30% de la potencia emitida se perdía por el camino, y debía ser convenientemente absorbida para evitar males mayores.

Este valor del 91% de eficiencia, podía haberse incrementado aún más, de no tener las restricciones geométricas que se impusieron desde un principio. Esto se tendrá que tener en cuenta, de cara a diseñar un nuevo prototipo, ya que posiblemente modificando ligeramente algunas dimensiones, podríamos aumentar hasta un 97% la eficiencia de transmisión de la línea.

En los cálculos realizados de las distribuciones de densidad de potencia sobre la superficie de los reflectores, se puede apreciar la distorsión generada por la configuración de reflectores elegida. La configuración es prácticamente el peor caso en cuanto a la distorsión se refiere, pero queda demostrado, por el nivel de eficiencia conseguido, que pese a que hay distorsión, o en otras palabras, conversión de modos gaussianos, la potencia no se dispersa, sino que se mantiene en todo momento dentro de la zona paraxial.

Hasta la fecha, y por cuestiones prácticas, no se han realizado más medidas. La única prueba que tenemos hasta el momento de que las reflexiones son bajas, es que el gyrotrón funciona correctamente, sin ningún tipo de problemas.

6. Conclusiones

Con el diseño realizado se ha demostrado prácticamente que es posible la utilización de modos

gaussianos de orden superior para transportar la potencia a través de una guía de onda cuasi-óptica. Gracias a la utilización de estos modos de orden superior, ha sido posible aumentar la eficiencia de transmisión de la línea del sistema de calentamiento en algo más de un 20%.

También se ha demostrado el efecto de filtrado longitudinal, una característica intrínseca de las líneas de transmisión cuasi-ópticas que las hace especialmente atractivas para asilar el generador de las posibles reflexiones producidas en la aplicación final.

En un futuro próximo se espera incrementar las prestaciones del sistema dentro del proyecto europeo INCO-COPERNICUS, PL964469.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado a través de unas Acciones Integradas Hispano-Alemanas (HA-29A) y un proyecto Cycit TIC96-0556-E.

8. Referencias

- [1] Del Río, C., "Diseño de guías de onda cuasi-ópticas para modos gaussianos de orden superior", Tesis doctoral. E.T.S. de Ing. Industriales y de Telecomunicación, UPNA, Noviembre 1996.
- [2] Wencker, G. 1969, "Rekursionsformeln und Entwicklungen der Strukturfunktionen Gaußscher Strahlen", A.U.E., Band 23, pp. 521-523.
- [3] Del Río, C., Gonzalo, R, y Sorolla, M. "Paraxiality considerations of higher order gaussian modes", 21 Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, Berlín, Julio 1996, pp. Bth6.