

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

I.T. Telecomunicación (Sist. de Telecomunicación)



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Modelado, diseño y análisis de estructuras nanofotónicas basadas en el interferómetro modal”

TRABAJO FINAL DE CARRERA

Autor/es:
Álvaro Rosa Escutia

Director/es:
Dr. Pablo Sanchis Kilders

GANDIA, 2010

Índice

1. Introducción.....	i
• Objetivos	iv
2. Guías ópticas.....	1
• Condición de monomodo para simulación en 2D.....	1
• Acople de potencia entre guías ópticas.....	5
3. El interferómetro multimodo.....	14
• Autoimagen en el interior de la estructura.....	15
• Parametros de diseño de la estructura.....	16
• Función de Matlab para el calculo de parámetros.....	18
4. Simulaciones.....	20
• El divisor 1x2 con guías monomodo.....	20
• El divisor 1x2 con guía multimodo.....	26
• El divisor 1x3 con guías monomodo.....	32
• El divisor 1x3 con guías multimodo.....	37

• El divisor 2x2 con guías monomodo.....	42
• El divisor 2x2 con guías multimodo.....	46
5. Conclusiones.....	51
• Líneas futuras.....	52
6. Bibliografía.....	54

1. Introducción

El mundo de las telecomunicaciones avanza rápidamente. En número de usuarios crece continuamente y la de demanda de ancho de banda es cada vez mayor, debido en gran parte a las nuevas aplicaciones que aparecen en tiempo real, como aplicaciones multimedia (como videoconferencias, video o audio en streaming), juegos online, y además la calidad debe ser cada vez mayor. Todo esto hace que las características de la red, deban ser cada vez mejores, tanto en número de usuarios como en ancho de banda por usuario. La fibra óptica nos ha permitido aumentar las capacidades de nuestras redes de comunicaciones en gran medida, debido en gran parte a su gran ancho de banda y su capacidad de transmisión (haciendo a muy altas frecuencia, del orden de los 100 o 200 THz).

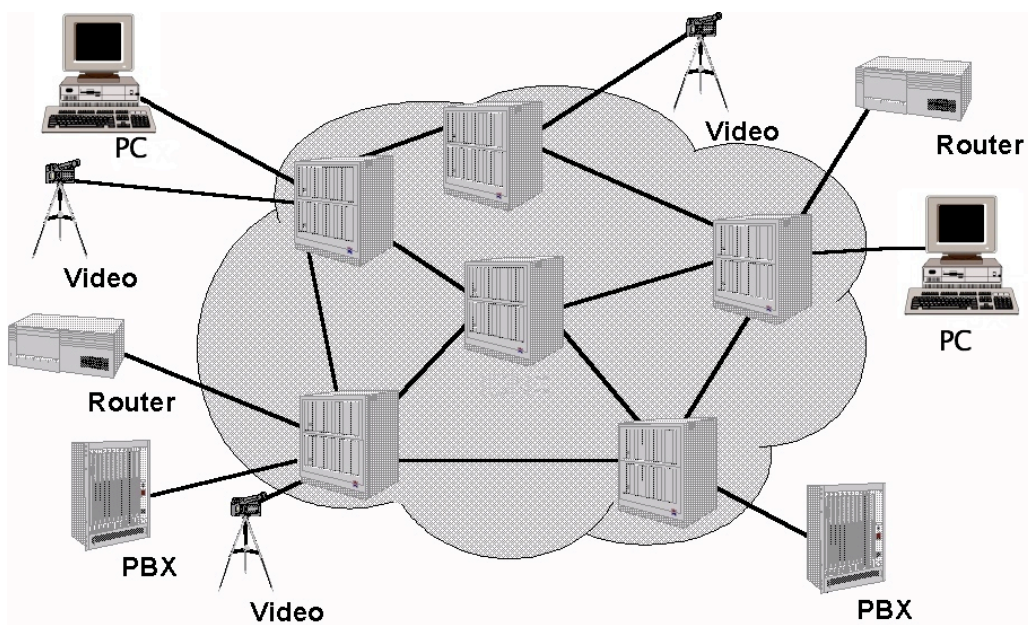


Figura 1: Red de comunicaciones en la que se ofrecen distintos tipos de servicios.

Este incremento de la capacidad de la red, viene frenado por la conmutación de paquetes y el tratamiento de las señales, ya que todas estas operaciones se hacen en el dominio eléctrico, con todas las desventajas que ello conlleva. Reducción de la capacidad de transmisión, del ancho de banda y bajar de frecuencias ópticas a frecuencias de RF. De este modo, los equipos de enrutamiento, conmutación y tratamiento de señales están haciendo de cuello de botella en la red de fibra óptica.

Es por este motivo, que nace la nanofotónica. Para intentar eliminar ese cuello de botella, con el diseño y desarrollo de chips ópticos que sean capaces de realizar la misma función pero en el dominio óptico manteniendo de este modo, las ventajas que nos ofrece la fibra óptica.

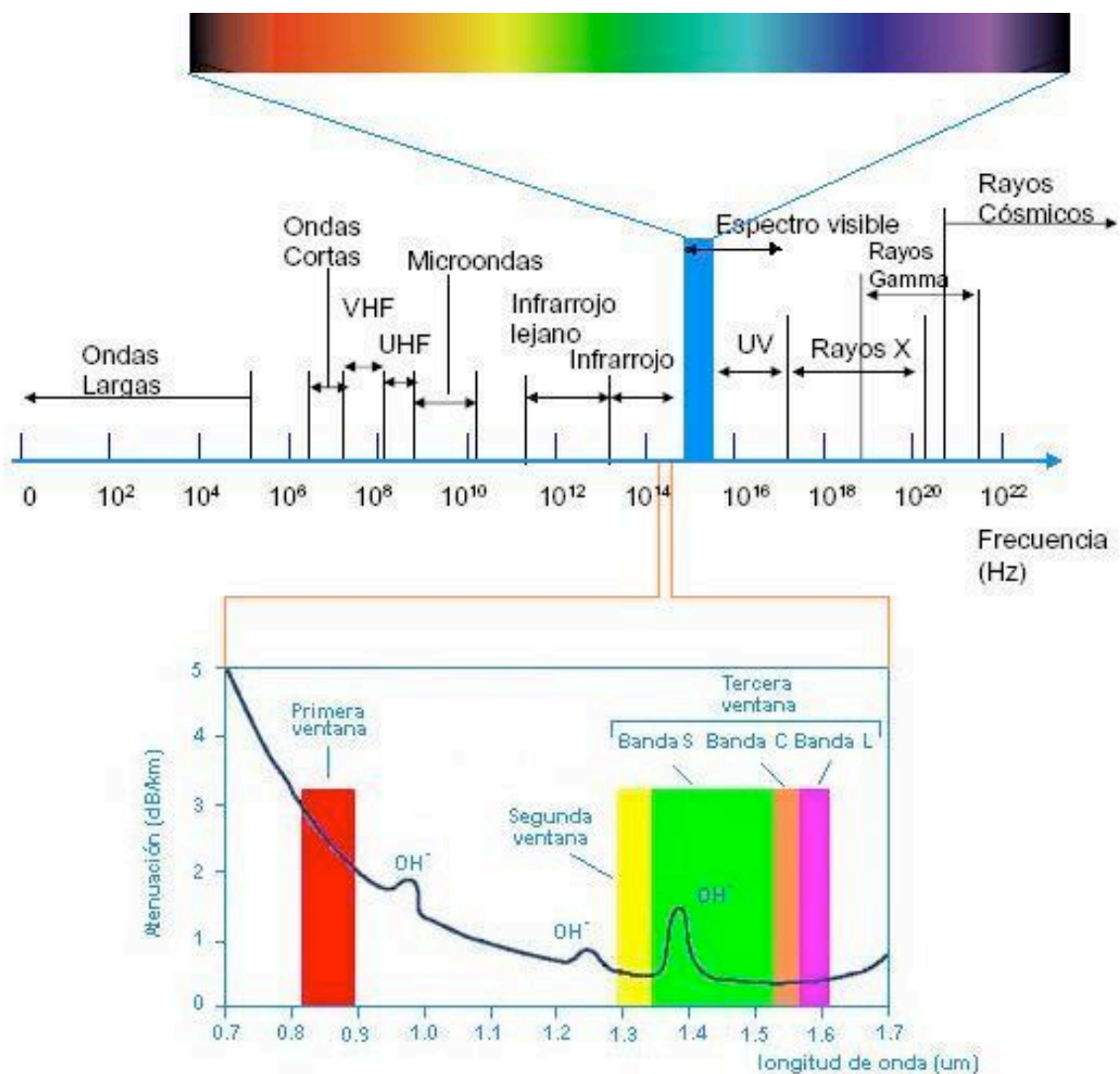


Figura 1.2: Espectro de frecuencias, donde podemos ver el espectro utilizado en la comunicaciones 6pticas.

De este modo, se intentaría conseguir redes todo-ópticas en la que no hubieran “cuellos de botella” y en las cuales se conseguiría un considerable aumento de su capacidad en cuanto a número de usuarios y capacidad de transmisión respecto a las redes actuales, que son una combinación de redes con fibra óptica pero con dispositivos electrónicos.

En los últimos años han aparecido tecnologías que permiten el desarrollo de dispositivos nanofotónicos basadas en el silicio, la cual, tiene la ventaja de ser compatible con las técnicas de fabricación CMOS y permite a la industria electrónica la fabricación de dispositivos nanofotónicos a gran escala, además de permitir la integración tanto de dispositivos fotónicos como electrónicos dentro de un mismo chip.

Para el desarrollo de dispositivos en silicio, existen dos alternativas: guiado por contraste de índices y cristales fotónicos. Los cristales fotónicos son materiales periódicos dispuestos de forma, que no se pueda propagar a través de ellos la longitud de onda que se crea apropiada. De este modo, creando un defecto en el material (cristal fotónico), podemos provocar la propagación de una longitud de onda por del defecto, sin que esta pueda propagarse en otra dirección que no sea la del defecto del material debido al diseño del cristal fotónico.

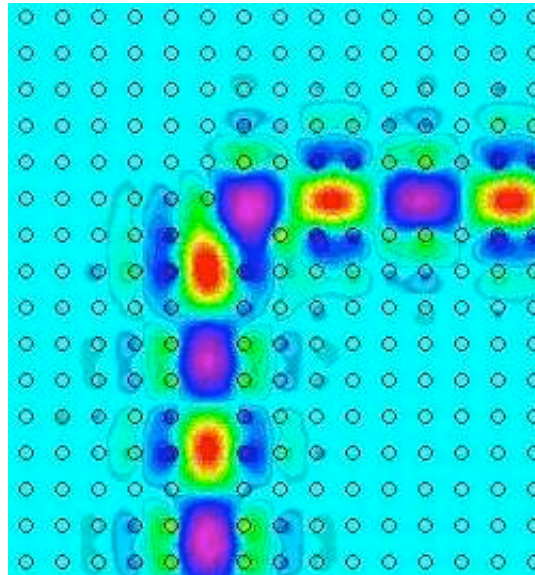


Figura 1.3: Simulación de un cristal fotónico con defecto lineal que provoca la propagación del un campo electromagnético a través del defecto.

En el caso del guiado por contraste de índice, la propagación se produce gracias al TIR (fenómeno de reflexión interna total), por la diferencia de índices existente entre el núcleo y la cubierta. Actualmente se utiliza el silicio para fabricar estructuras de alto contraste gracias a su alto índice de

refracción. La tecnología empleada para la realización de este proyecto es denominada tecnología SOI (*Silicon On Insulator*), cuya mayor característica es el alto contraste de índices entre el núcleo de silicio ($n=3.47$) y la cubierta de óxido de silicio ($n=1.45$), ya que cuanto mayor sea la diferencia entre índices, mayor será el confinamiento del campo en el interior del núcleo y por lo tanto, menor potencia se radiará hacia el exterior.

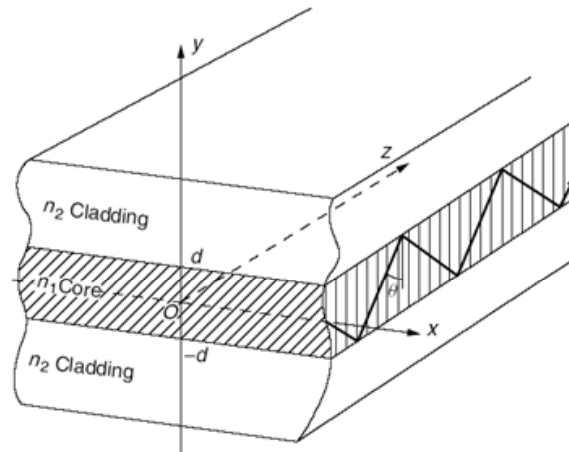


Figura 1.4: Esquema de una guía óptica simétrica donde podemos apreciar el núcleo, la cubierta y como se propaga el rayo gracias al TIR.

Objetivos:

El objetivo principal de este proyecto es modelar, diseñar y analizar diversas estructuras nanofónicas basadas basados en el interferómetro modal (MMI). Se estudiarán estructuras para implementar diversas configuraciones de divisor de potencia. Los parámetros claves serán las pérdidas de inserción, perdidas de exceso, dimensiones de la estructura del MMI y el ancho de banda.

Para la realización del proyecto se deberán tener en cuenta los siguientes objetivos secundarios:

- Analizar las ventajas e inconvenientes de cada uno de los posibles diseños para la implementación de las diversas configuraciones de divisor de potencia.
- Realizar diversos análisis paramétricos para evaluar la robustez de los diseños seleccionados.

2. Guías ópticas

Una guía óptica es una estructura física capaz de transportar ondas electromagnéticas dentro del espectro óptico, a una cierta distancia. La propagación se lleva a cabo gracias al TIR (fenómeno de reflexión interna total), debido a la diferencia de índices de refracción entre el núcleo y la cubierta y/o el aire. De este modo la luz se propaga “rebotando” por en interior del núcleo (guías multimodo) o paralelo a las paredes de este (guías monomodo). Cuánto mayor sea la diferencia entre índices, mayor será el confinamiento del campo electromagnético en interior del núcleo.

Hay distintos tipos de guías ópticas, a continuación:

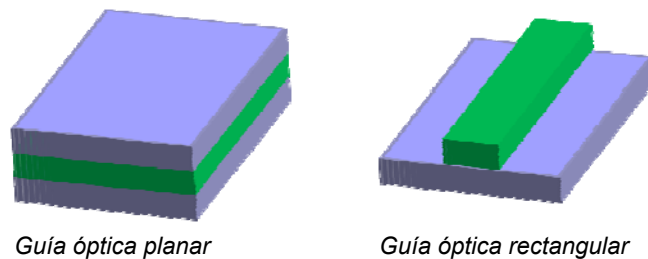


Figura 1.1 : Ejemplo de 2 tipos de guías ópticas: la planar i la rectangular.

Aunque hay mas tipos de guías, estos son los mas básicos, y en las simulaciones, se ha utilizado la guía óptica planar y se han tenido que solucionar los distinto problemas:

- Guías monomodo y multimodo: encontrar la condición de monomodo para una simulación den 2D.
- Acople de potencia entre guías ópticas. Inicialmente, las guías no estaban separadas lo suficiente unas de otras, lo que producía que el campo guiado en una guía, terminara saltando a la guía paralela, por lo tanto se ha tenido que buscar la separación minima (para cumplir con el objetivo de mínimo tamaño del MMI) para la cual, no hubiera potencia acoplada entre guías.

1. Condición de monomodo para la simulación 2D:

Como vemos en las simulaciones siguientes, las guías de $0.5 \mu\text{m}$, son guías multimodo, y en la siguiente figura podemos ver los 2 modos que se pueden propagar por la guía.

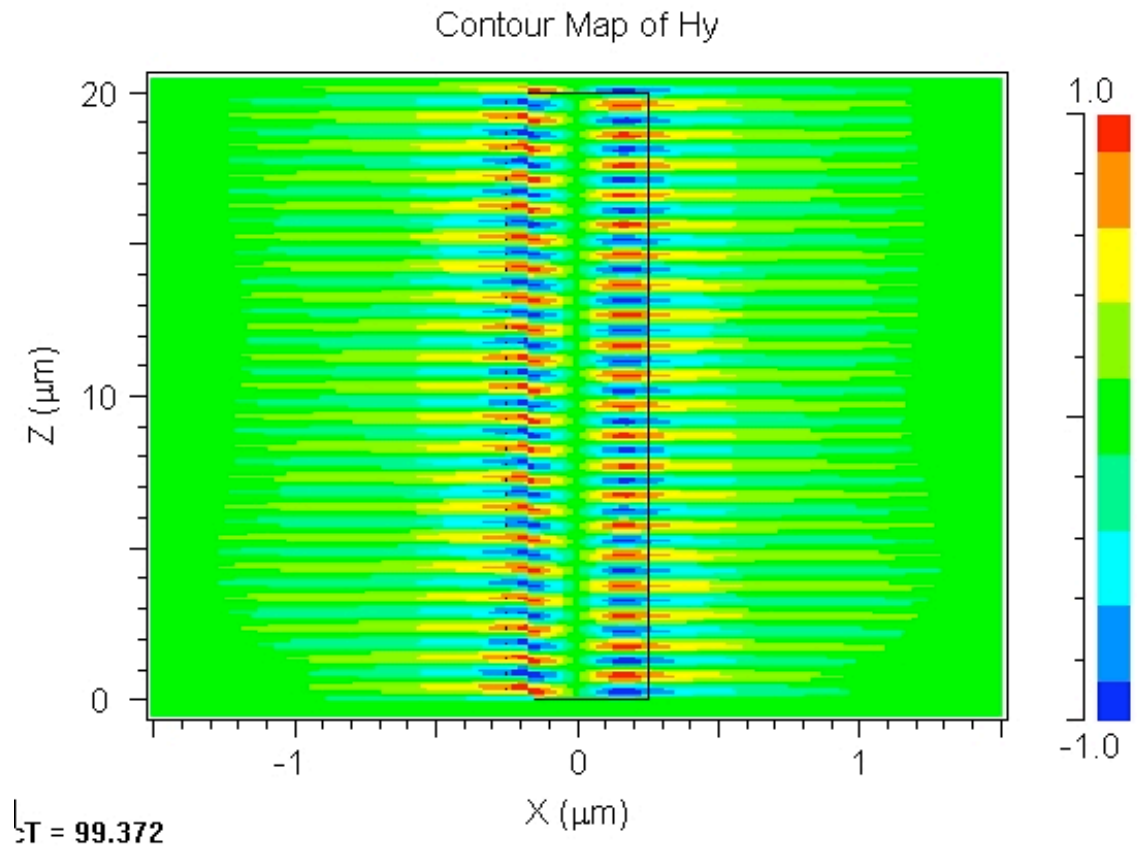


Figura 1.2 : Guía de $0.5 \mu\text{m}$ en la que se puede apreciar como se excitan los dos modos de propagación que existen en la guía.

En la Figura 1.2 podemos observar claramente como es la distribución de campo en el interior de la guía y comprobar como existen 2 modos de propagación.

En la siguiente figura podremos observar como en las mismas condiciones que el caso anterior, pero con una guía de $0.3 \mu\text{m}$, solo hay un modo posible que pueda propagarse por la guía, por lo tanto, tenemos una guía monomodo.

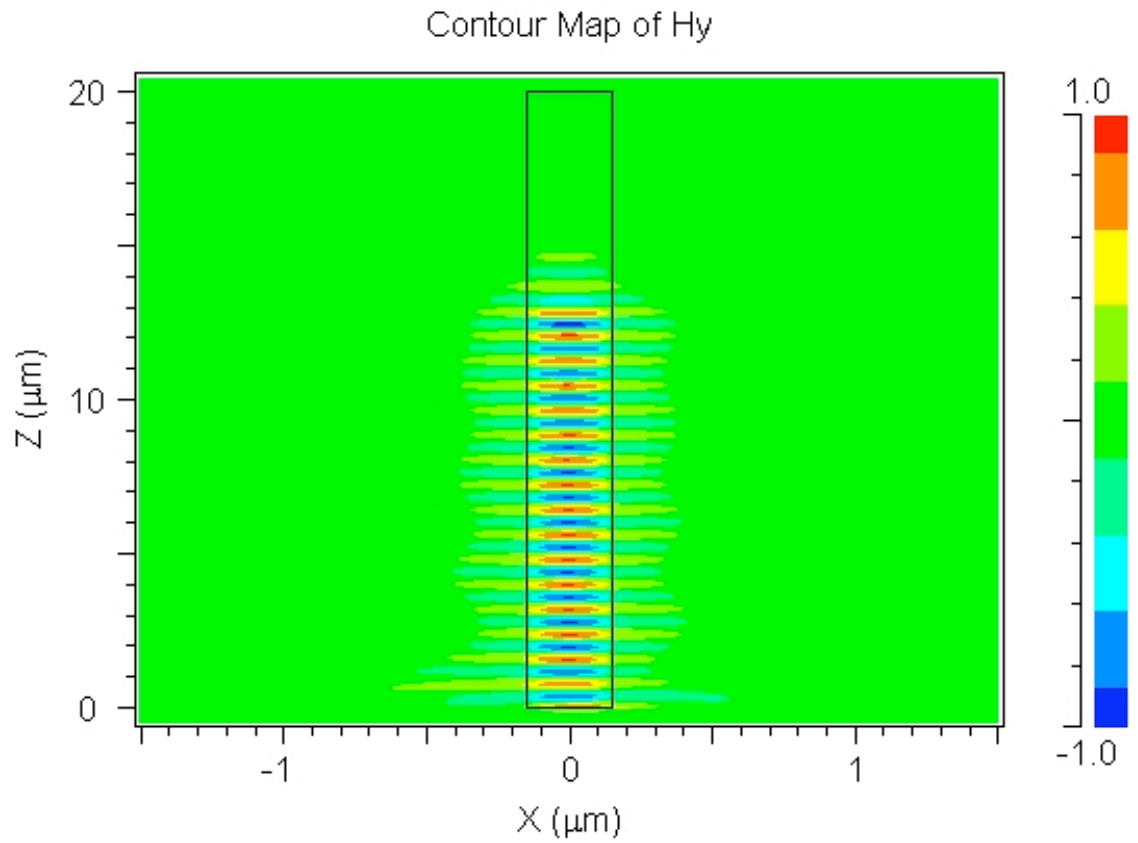


Figura 1.3 : Guía de $0.3 \mu\text{m}$, en la que se puede observar como solo hay un modo de propagación.

En la Figura 1.3 podemos ver como es la distribución de campo, que tiene la guía en su interior y podemos apreciar como solo existe un solo modo que se propaga paralelo a las paredes de la guía.

De este modo utilizaremos los valores de $0.3 \mu\text{m}$ para guías monomodo y $0.5 \mu\text{m}$ para guías multimodo

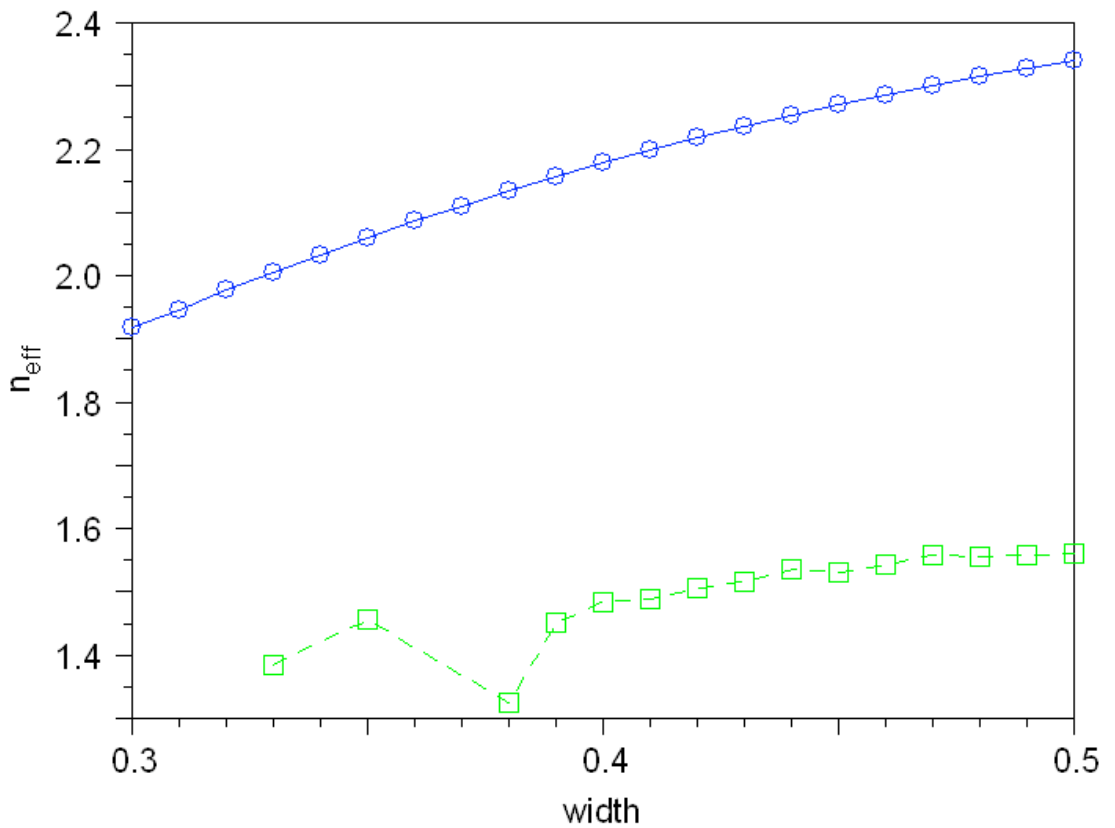


Figura 1.4 : Gráfica en la que podemos ver los distintos modos de propagación entre 0.3 y 0.5 μm .

En la gráfica de la figura 1.4 podemos observar como el modo fundamental se propaga para las dos guías. Sin embargo, según las simulaciones, a partir de 0.33 μm empieza a propagarse el segundo modo de propagación y la guía se vuelve multimodo debido a su mayor anchura.

El calculo teórico de la anchura se realiza de la siguiente manera, teniendo en cuenta que hay que hacerlo para simulaciones en 2D:

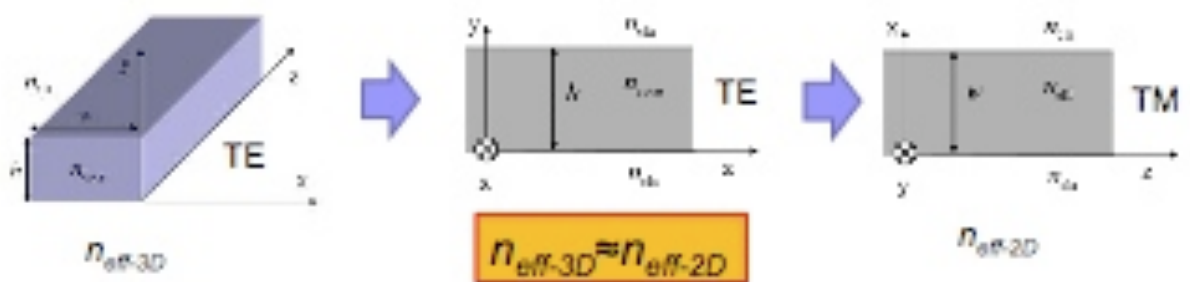


Figura 1.5: Método sobre como obtener en índice efectivo de una estructura en 3D, para luego realizar simulaciones en 2D.

En este caso estamos trabajando con silicio para en núcleo ($n_1 = 3.47$) y dióxido de silicio recubriendo el núcleo ($n_2 = 1.45$), lo cual, siguiendo el método anterior da un índice efectivo de $n_{\text{eff}} = 2.7$.

Y para encontrar la condición de monomodo, la escribimos a través de la fórmula para hallar el número máximo de modos que se propagan por una guía:

$$m_{\text{max}} = \frac{k_0 n_1 h \cos \theta_c}{\pi} = 2\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \frac{h}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad \frac{h}{\lambda} \leq \frac{1}{2\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \quad \text{Condición transmisión monomodo}$$

Figura 1.6 : Ecuación para hallar el número total de modos que se propagan en una guía, a través de la cual se halla la condición de transmisión monomodo.

Para hallar la condición de transmisión monomodo, sustituimos $m_{\text{max}} = 1$ y despejamos la anchura de la guía. Para los valores de $\lambda = 1.55 \text{ nm}$, $n_1 = n_{\text{eff}} = 2.7$, y $n_2 = 1.45$, $h \leq 0.34 \text{ }\mu\text{m}$. El valor no es exacto, pero sí es muy similar al obtenido en las simulaciones.

2. Acople de potencia entre guías ópticas:

Otro de los problemas más significativos, fue encontrar la mínima distancia entre guías sin que hubiera acople de potencia entre estas. Estas distancias mínimas, varían en función de la anchura de la guía y de la separación entre estas, ya que la longitud de onda en nuestro caso, será constante. A la longitud en que tarda en saltar el campo de una guía a otra, se le llama longitud de batido y cuanto menor sea la distancia entre guías menor será la longitud de batido.

Como no se ha encontrado un método apropiado para encontrar la distancia mínima entre guías para que no exista acople de potencia, se ha hecho a través de varias simulaciones, tanto para guías monomodo ($0.3 \text{ }\mu\text{m}$) como para guías multimodo ($0.5 \text{ }\mu\text{m}$). Veámoslo en las siguientes figuras:

- Guías de $0.3 \mu\text{m}$:

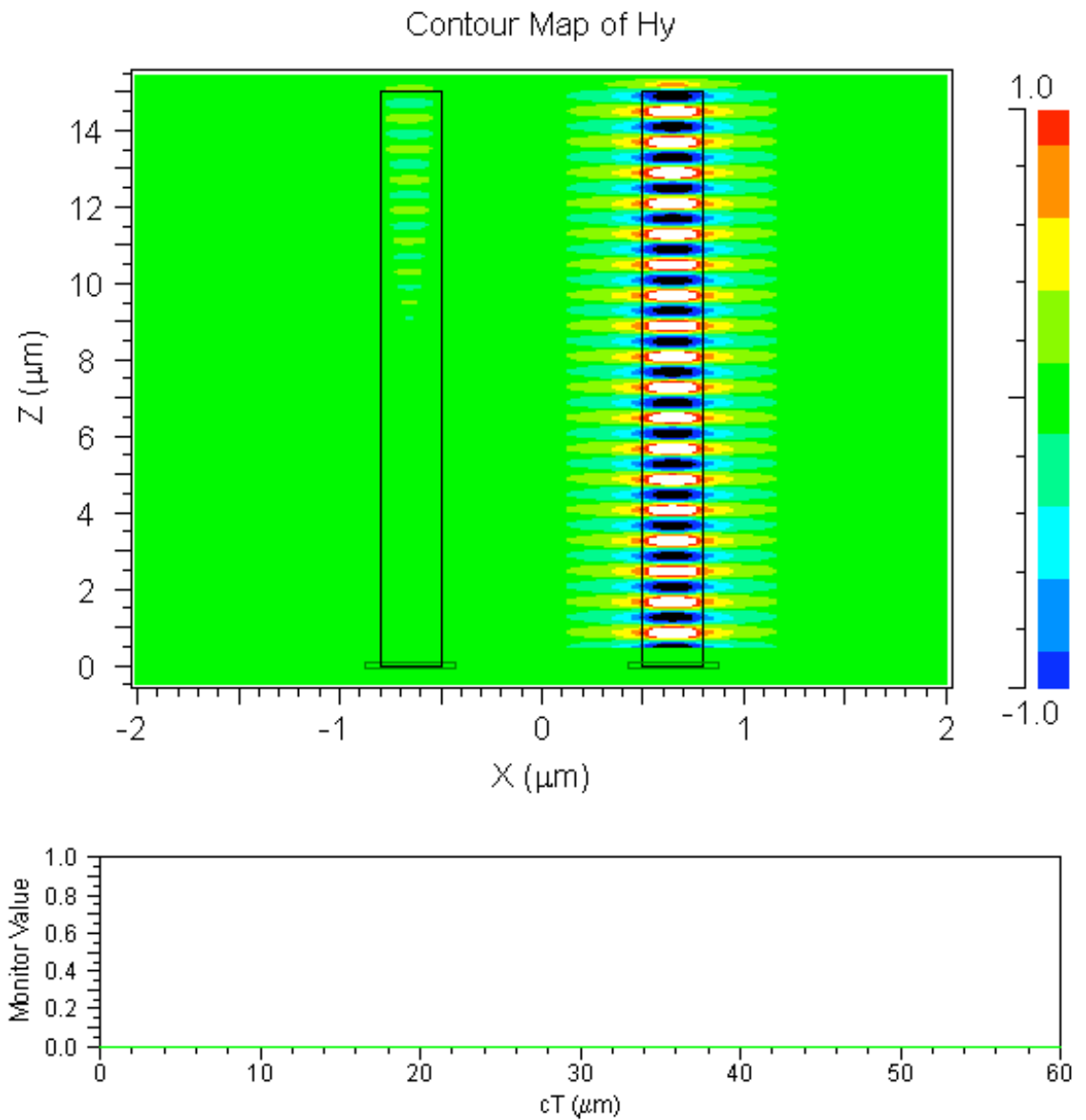


Figura 1.7: Guías ópticas con una separación de $1 \mu\text{m}$. Podemos observar como existe acople de potencia el la guía paralela.

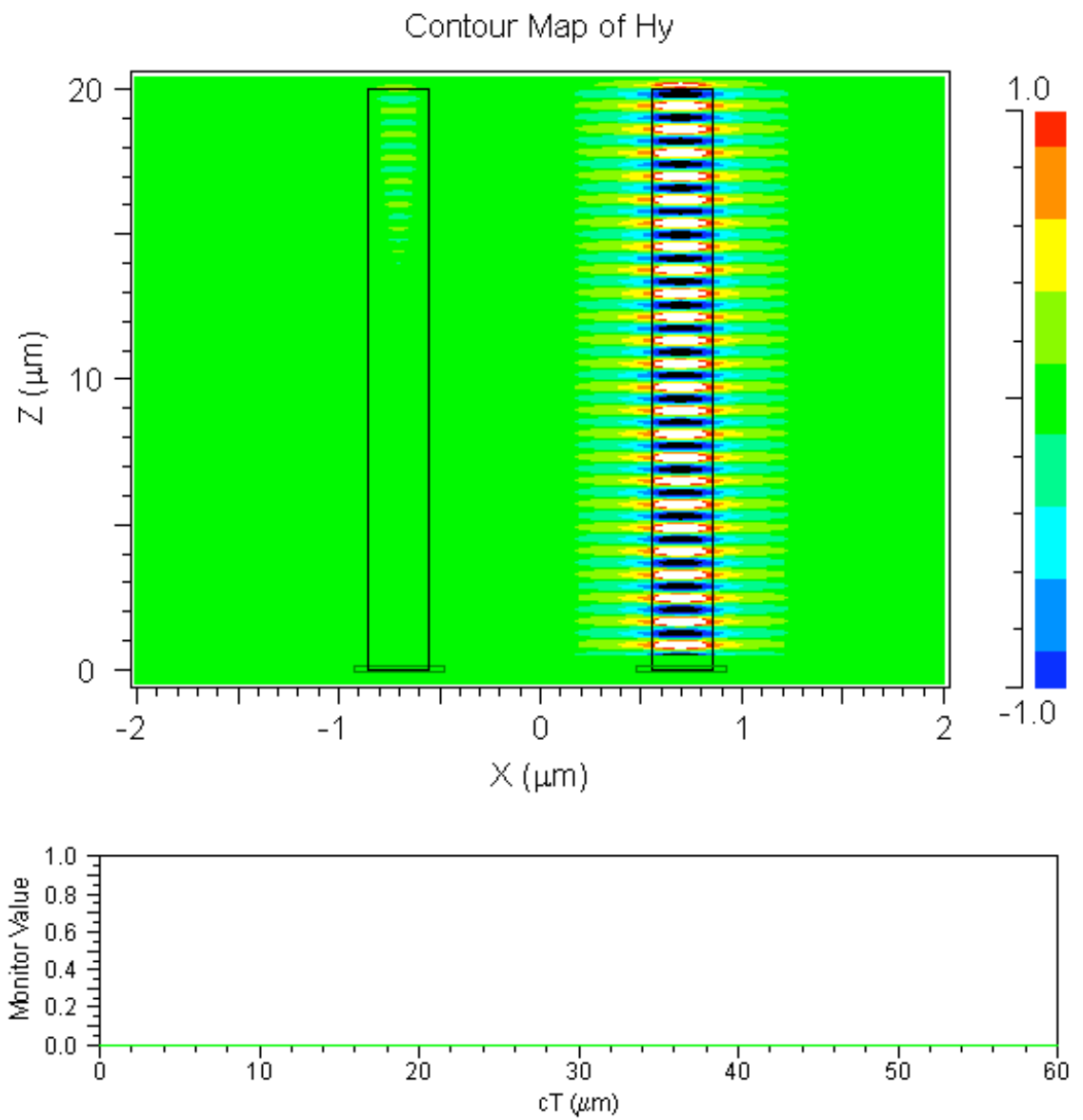


Figura 1.8: Guías ópticas con una separación de $1.1 \mu\text{m}$. Podemos observar como aún existe acople de potencia el la guía paralela.

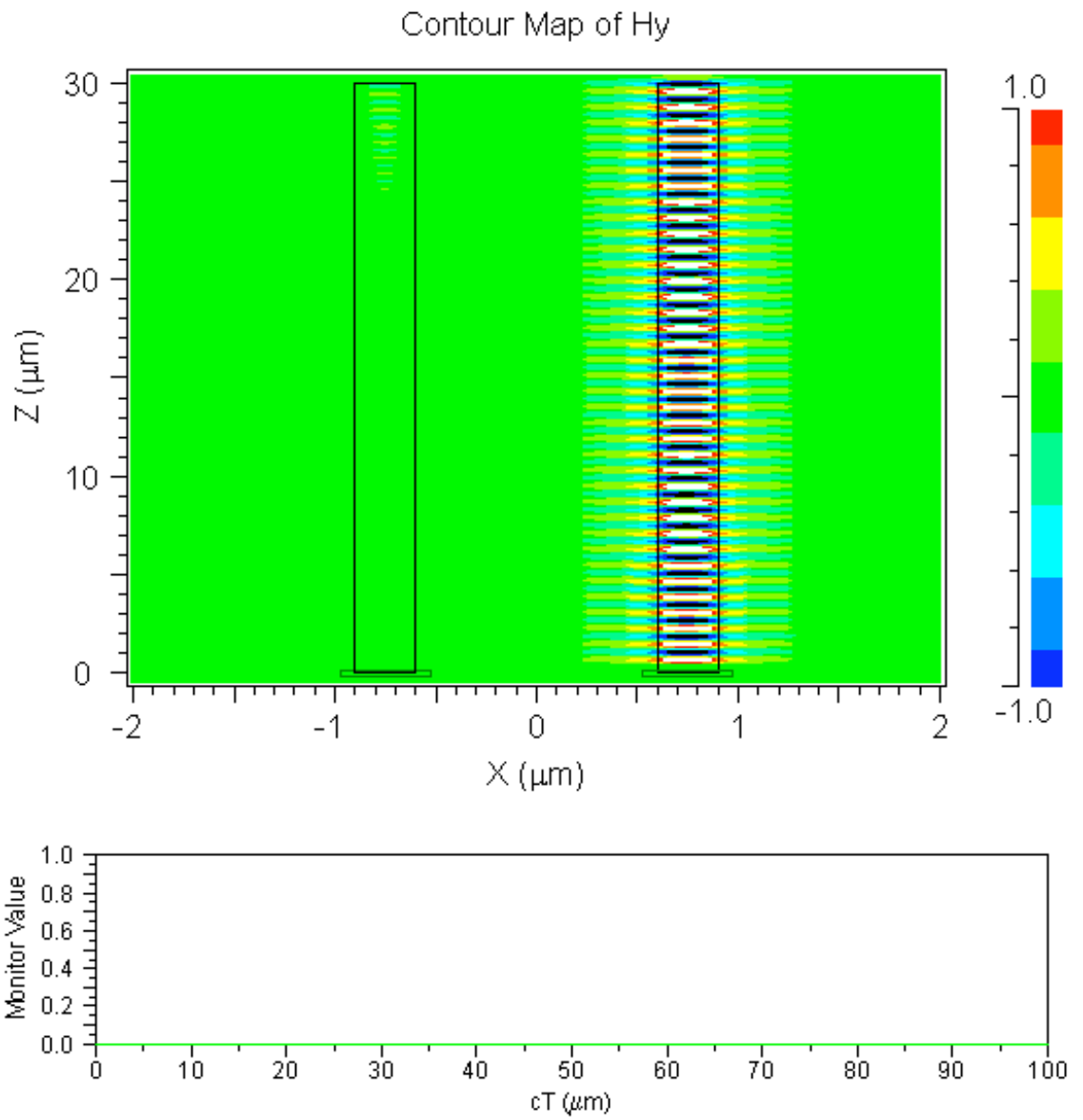


Figura 1.9: Guías ópticas con una separación de $1.2 \mu\text{m}$. Podemos observar como aún existe acople de potencia el la guía paralela. Sin embargo, podemos ver como en este caso la potencia acoplada se ha reducido considerablemente.

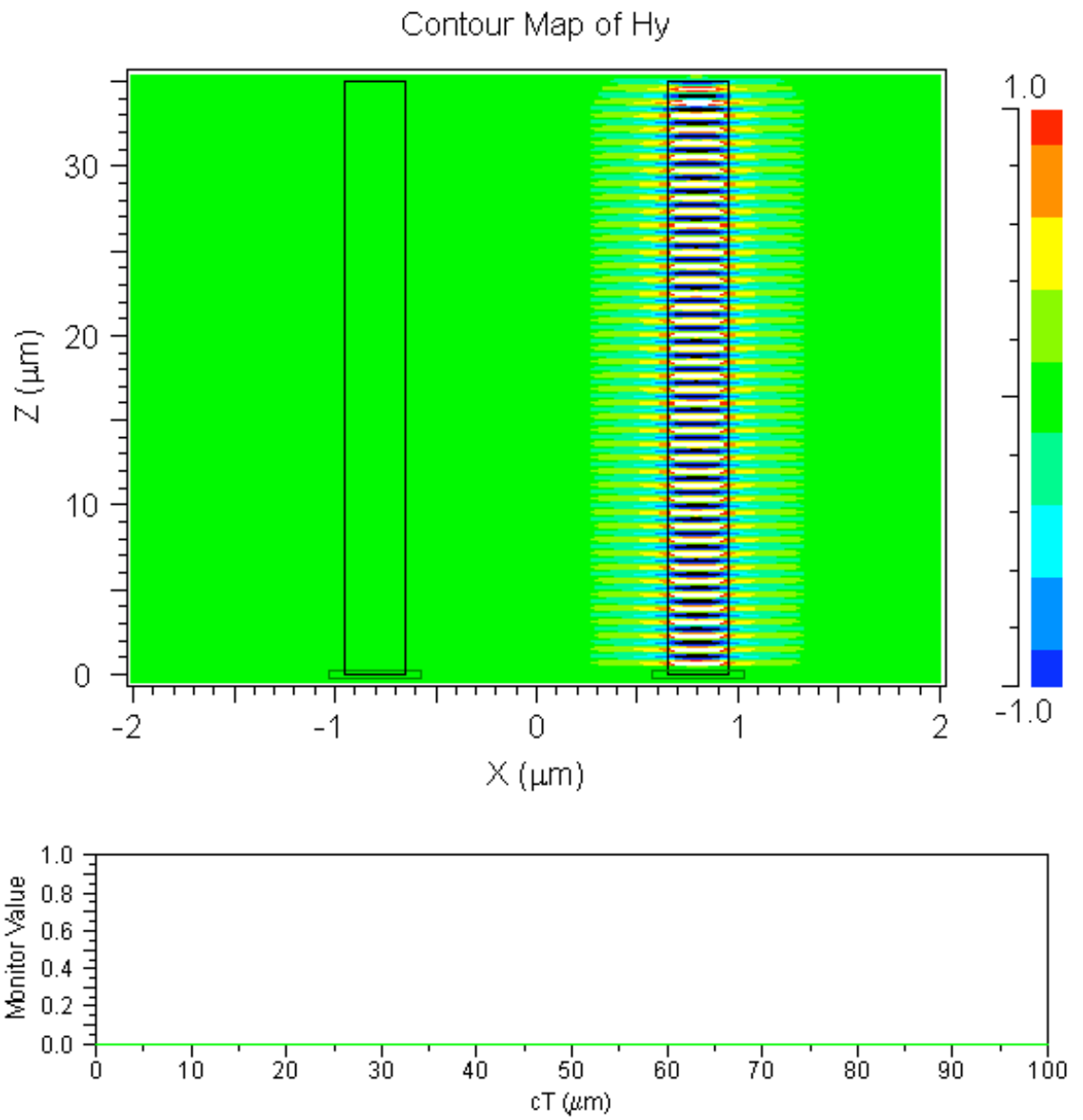


Figura 1.10: Guías ópticas con una separación de 1.3 μm . Podemos observar como ya no existe acople de potencia el la guía paralela. Cabe destacar que para caso, se ha ido incrementando la longitud de la guías previniendo el posible caso de que la potencia empezara a acoplarse mas lejos que en el caso anterior.

- Guías de 0.5:

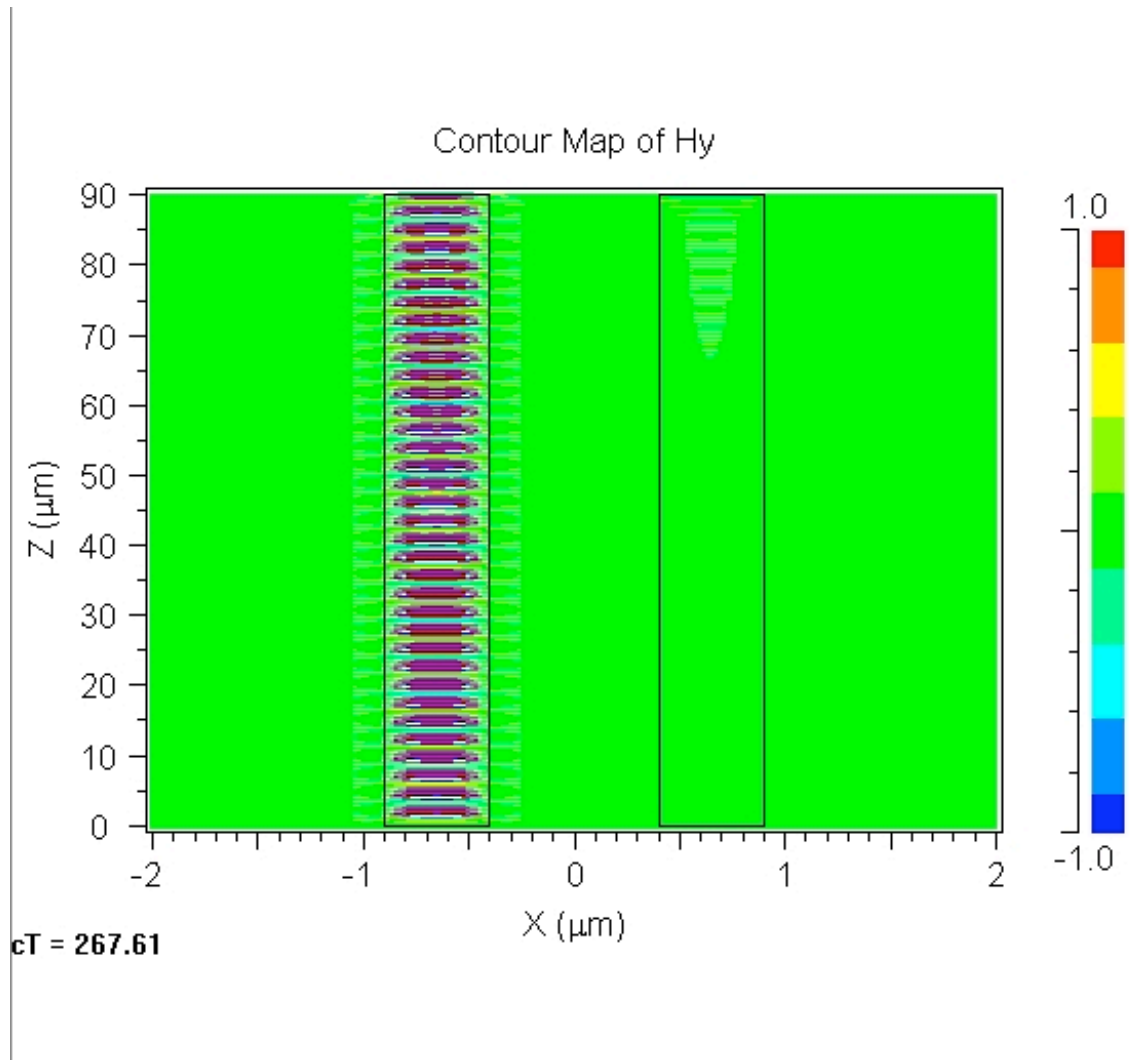


Figura 1.11: Guías ópticas con una separación de 0.8 μm. Podemos observar como existe acople de potencia el la guía paralela.

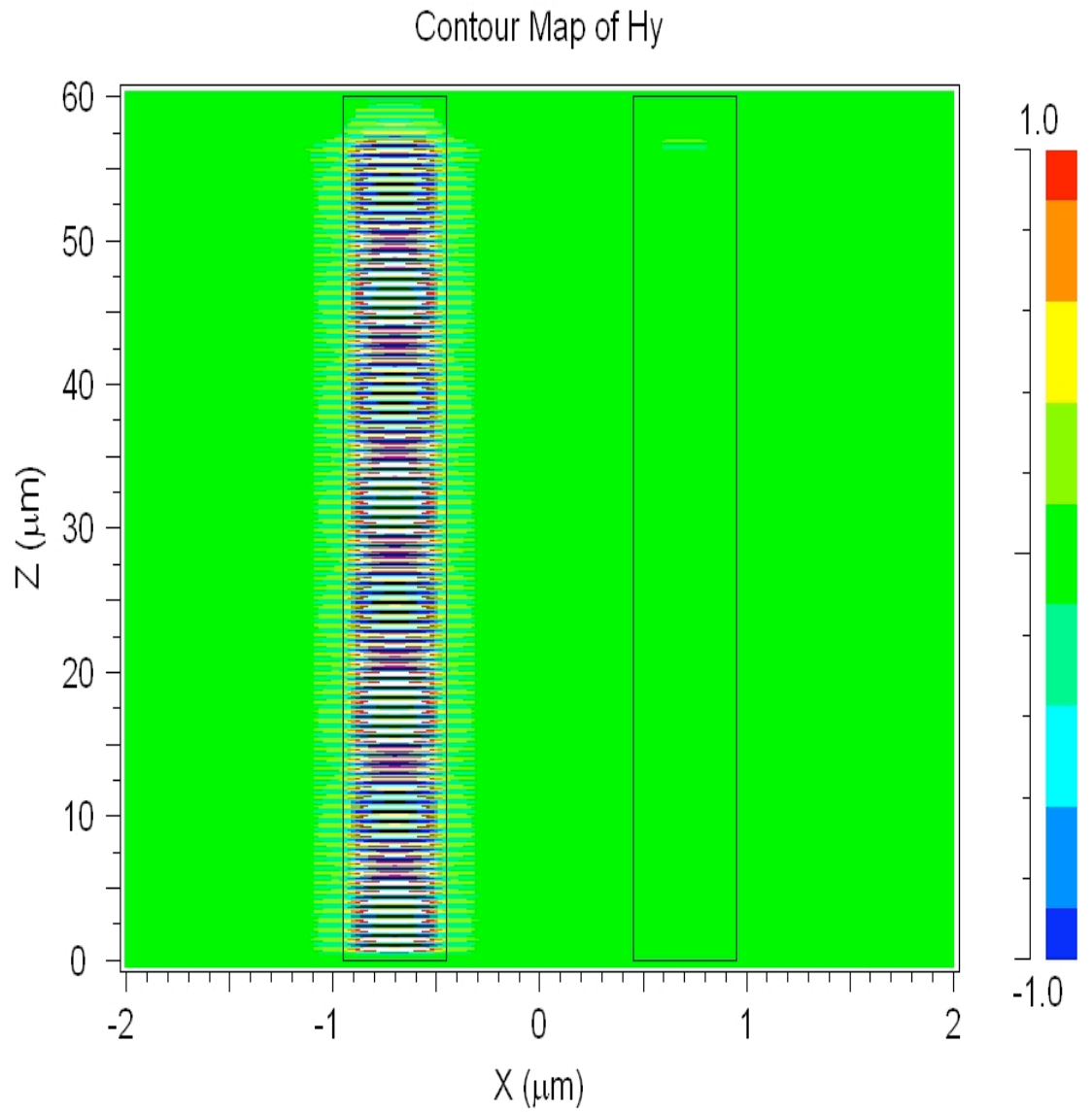


Figura 1.12: Guías ópticas con una separación de $0.9 \mu\text{m}$. Podemos observar como existe acople de potencia el la guía paralela. Aunque es tan pequeña que es difícil, incluso apreciarla en la imagen.

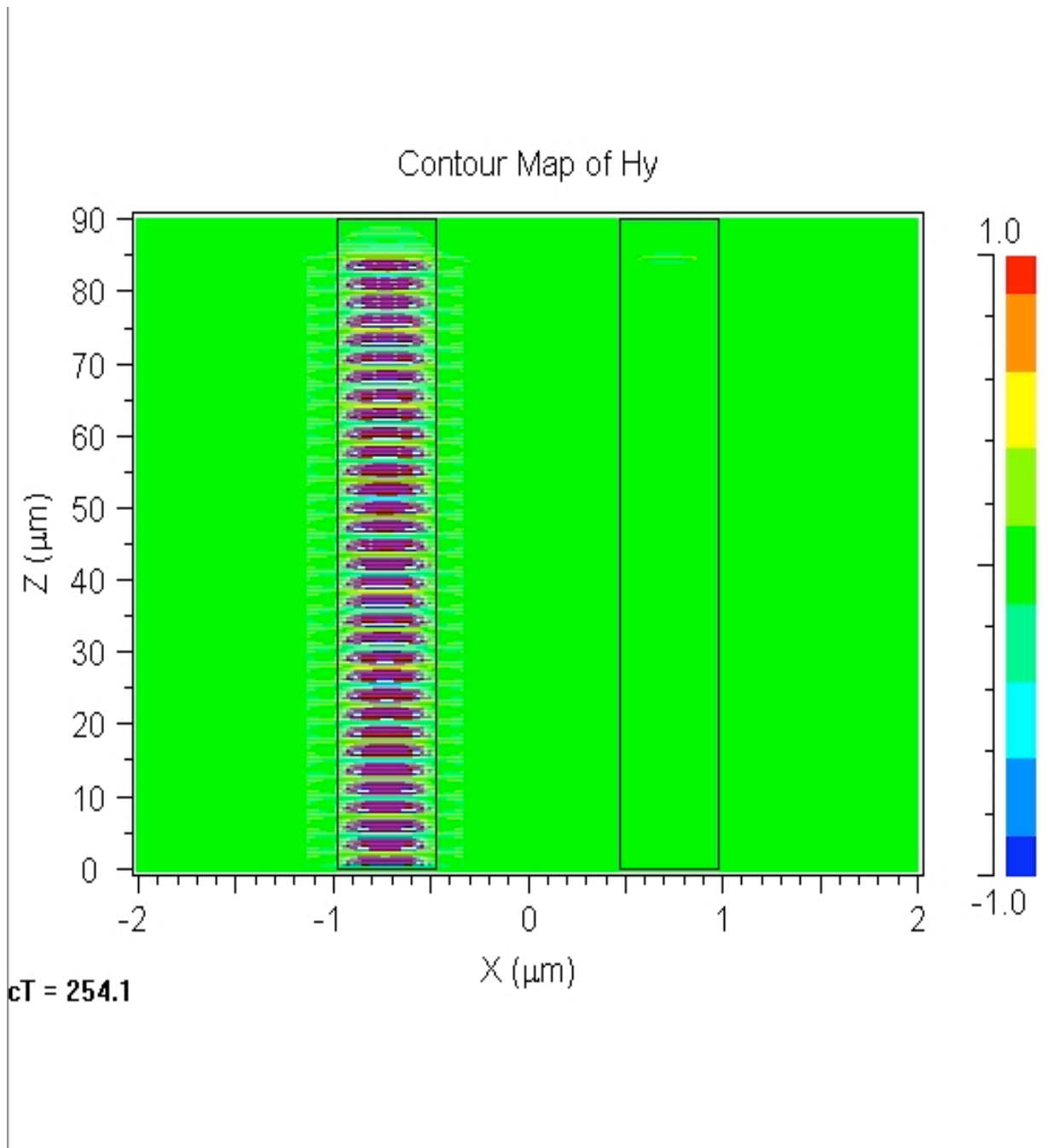


Figura 1.13: Guías ópticas con una separación de $0.95 \mu\text{m}$. Como en el caso anterior podemos observar como existe acople de potencia el la guía paralela. Aunque es tan pequeña que es difícil, incluso apreciarla en la imagen.

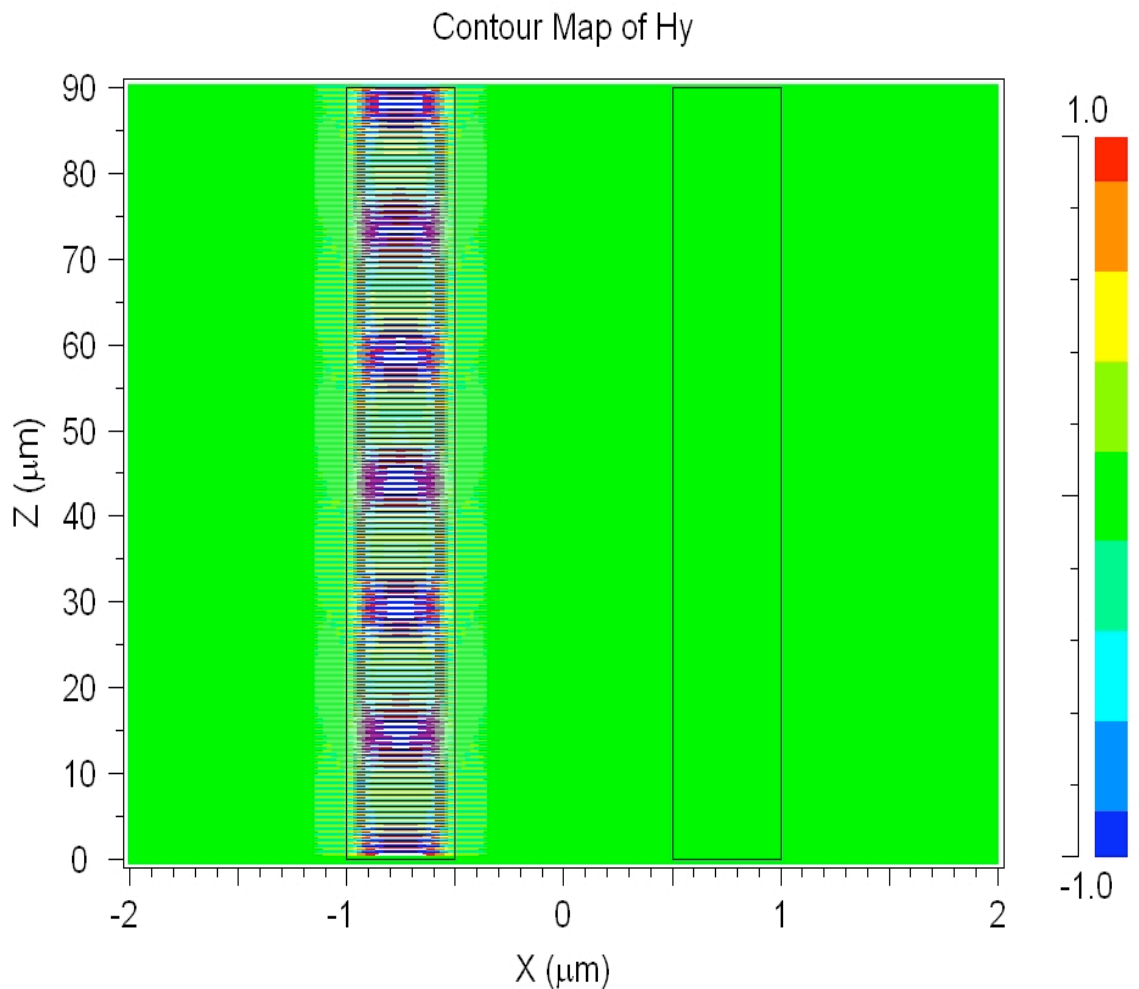


Figura 1.14: Guías ópticas con una separación de $1 \mu\text{m}$. Podemos observar como, ahora si, no existe acople de potencia el la guía paralela. Se han utilizado guías bastante largas, para asegurarse que de que no se acoplaba mas lejos que en simulaciones anteriores.

Con estas simulaciones se puede llegar a la conclusión de que para que no haya acople de potencia entre guías, la distancia mínima de separación entre guías monomodo ha de ser de $1.3 \mu\text{m}$ y para guías multimodo, esta distancia debe ser de $1 \mu\text{m}$.

Ahora con la anchura de las guías y la separación minima entre estas, se puede empezar el diseño de la estructura MMI.

3. El interferómetro multimodal (MMI)

El interferómetro multimodo (MMI), es básicamente una extensión o modificación de nuestra guía óptica de transmisión con unas dimensiones de longitud y anchura adecuadas para producir las autoimágenes de la señal de entrada justo en las guías de salida.

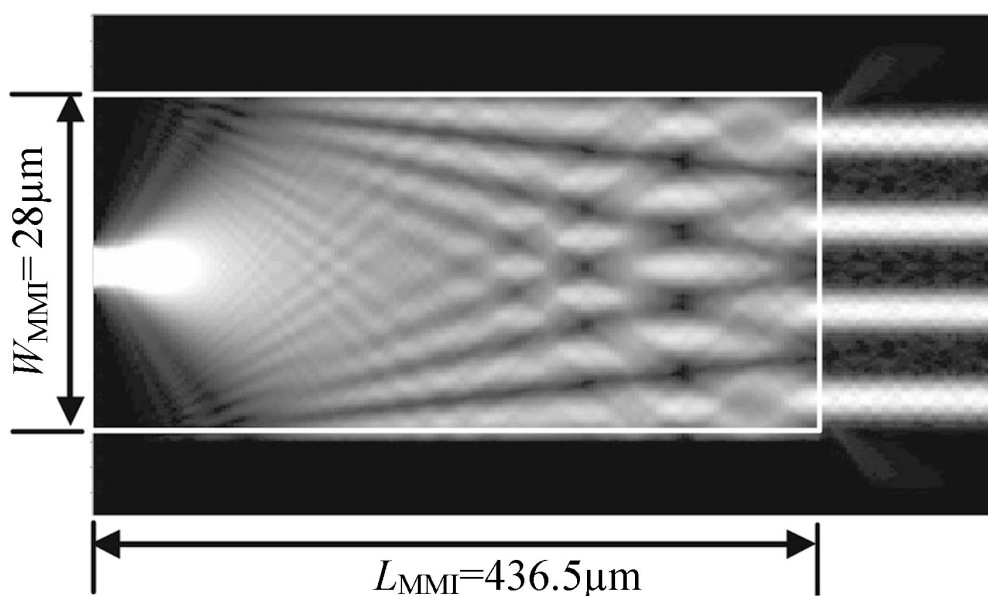


Figura 2.1: Ejemplo de la distribución de campo en el interior de un MMI con unas dimensiones dadas. Tiene un puerto de entrada en el centro de la estructura y 4 de salida.

En general, un MMI es un dispositivo diseñado, con una guía óptica, para soportar un gran número de modos (normalmente más de 3). Es un dispositivo con N puertos de entrada y M de salida (en la Figura 2.1 hay 1 entrada y 4 salidas) y entre los puertos de entrada y salida, está la guía multimodo donde se forman las autoimágenes. Las combinaciones más típicas son de $1 \times M$ o de $N \times N$.

La autoimagen es una propiedad de las guías multimodo, por la cual un campo entrante es reproducido por una o múltiples imágenes a intervalos periódicos de distancia a lo largo de la dirección de propagación de la guía.

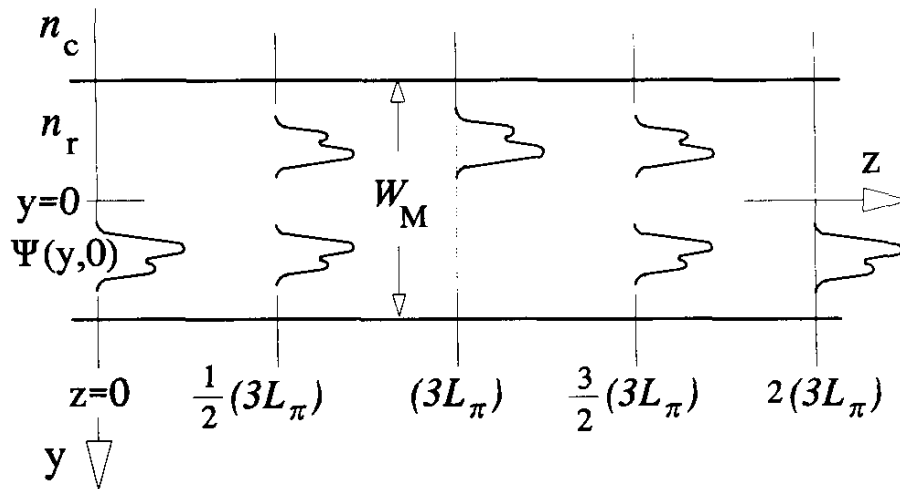


Figura 2.2 : Guía óptica multimodo en la que se puede observar como a través del campo incidente ($z=0$), se forma una imagen espejo en $3L_\pi$ y una réplica en $2(3L_\pi)$. También podemos ver las imágenes juntas en $0.5(3L_\pi)$ y $1.5(3L_\pi)$.

Las autoimágenes en el interior del MMI se producen debido a las reflexiones que se producen cuando el campo incidente se expande, al entrar en el dispositivo. Estas reflexiones se suman al campo incidente que continúa en la dirección de propagación de forma constructiva y destructiva. En el punto en el que tenemos una suma de interferencias constructivas, se puede decir que tenemos una autoimagen del campo incidente.

Las dimensiones del MMI, tanto en anchura como en longitud, se calculan para que estas autoimágenes se formen en los puntos donde deben ir colocadas las guías ópticas de salida.

Los parámetros de diseño de un MMI son los siguientes:

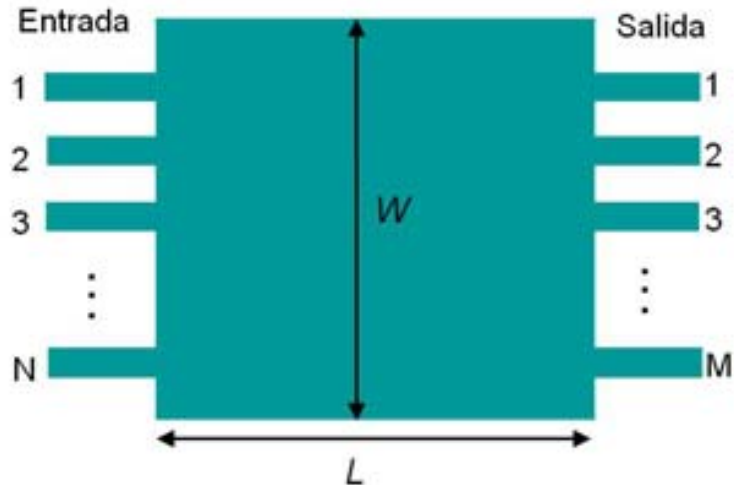


Figura 2.3: En esta figura se aprecia que los parámetros de diseño son la anchura (W), la longitud (L), en número de entradas (N) y el de salidas (M).

- El número de entradas (N) y el de salidas (M).
- La anchura (W), la cual depende de el número de entradas o de salidas (el parámetro de mayor valor). A su vez, al depender de las guías, depende también de la anchura de estas, si queremos utilizar guías multimodo o guías monomodo, y de la separación entre estas para que no haya potencia acoplada de una guía a la otra. Siempre utilizando los valores mínimos, ya que uno de los objetivos es que el MMI sea lo más pequeño posible.
- La longitud, que depende directamente de la anchura de la guía y por lo tanto del número de entradas y salidas del MMI, a través de la longitud de batido (L_π). La longitud de batido se puede definir como la longitud de repetición (o pulsación) de los dos modos de orden inferior de la guía multimodo, en este caso el MMI.

Podemos calcular la longitud de batido como:

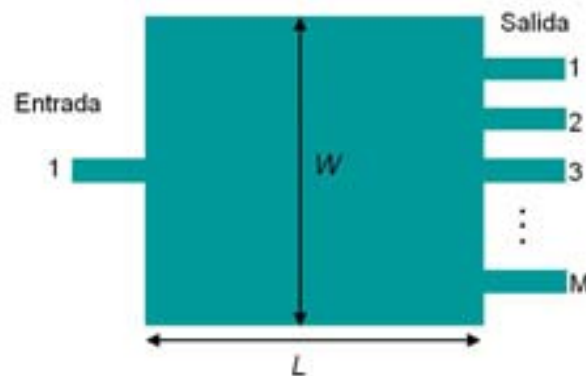
$$L_\pi \doteq \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \simeq \frac{4n_r W_e^2}{3\lambda_0}$$

para la cual necesitamos obtener la anchura eficaz del MMI, y la podemos obtener del siguiente modo:

$$W_{ev} \simeq W_e = W_M + \left(\frac{\lambda_0}{\pi} \right) \left(\frac{n_c}{n_r} \right)^{2\sigma} (n_r^2 - n_c^2)^{-(1/2)}$$

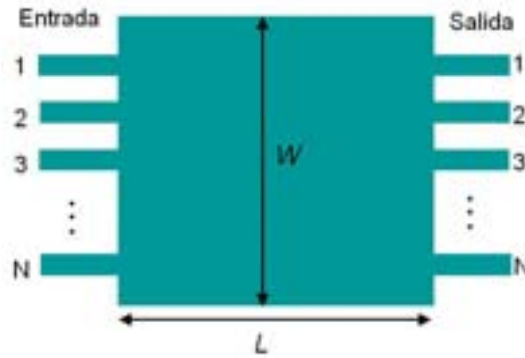
donde W_m es la anchura mínima del MMI, que viene dada por los parámetros de las guías (anchura y separación), n_c es el índice eficaz del núcleo ($n_{\text{eff}}=2.7$) y n_r es el índice de la cubierta (1.45).

Una vez obtenida la longitud de batido, ya estamos en disposición de hallar la longitud total del MMI, aunque ahora hay que diferenciar entre 2 casos: para 1 entrada y M salidas (1xM) y para N entradas y salidas (NxN):



$$L_{1xN} = \frac{3L\pi}{4N}$$

Figura 2.4: Longitud total del MMI para una configuración 1xM.



$$L_{N \times N} = \frac{3L_{\pi}}{N}$$

Figura 2.5: Longitud total del MMI para una configuración NxN.

Para calcular la longitud del MMI de forma mas rápida y sencilla, se han recogido estas expresiones en una sencilla función de matlab, de modo que introduciendo los parámetros de diseño, obtenemos la longitud:

```
function L=longitud(s,e,width,N,M)

nc=2.7; % Indice efectivo para simulación en 2D
ncd=1.45; % Indice cubierta
lambda=1.55; % Longitud de onda
theta=1; % Se podría poner como parametro de entrada, pero
en este caso las simulaciones se hacen en modo TM. Para TE,
theta=0;

% Todas las longitudes deben ir expresadas en micras.
%
% s -> separación entre guias
% width -> ancho de la guia
% e -> espacio que sobresale después de las guias
exteriores
% N -> número de guias de salida
% M -> número de guias de entrada

if N > M % Este if, es por si hubiera mas entradas
que salidas, aunque NO suele ser un caso habitual.
w=(N-1)*s+2*e+N*width
else
w=(M-1)*s+2*e+M*width
end
```

```

weff=w+ (lambda/pi)*((ncd/nc)^(2*theta))*((nc^2)-
(ncd^2))^(-0.5);
Lpi=(4*nc*weff^2)/(3*lambda);

if M == 1          % Este if, es para el caso de que haya mas
de una salida
    L=(3*Lpi)/(4*N);
else
    L=(3*Lpi)/N;
end

```

Ya con los parámetros de diseño obtenidos, podemos pasar a hacer las simulaciones y obtener sus resultados.

4. Simulaciones

- **Divisor 1-2:**
 - **Guías de 0.3 μm (monomodo 2D)**

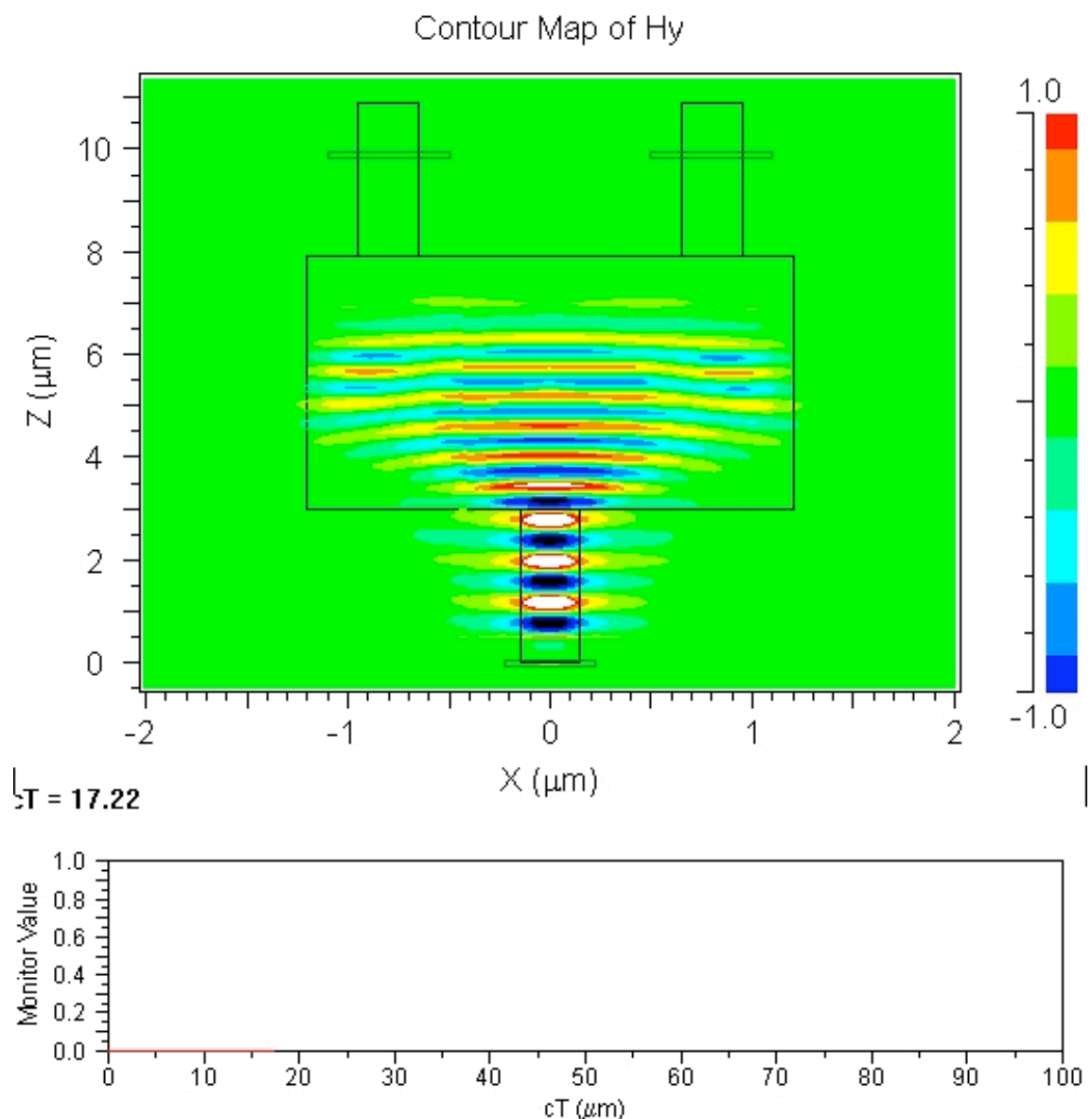


Figura 3.1: Distribución de campo al comienzo de la simulación para un divisor 1x2.

En la primera simulación (figura 1) observamos como el campo empieza a expandirse dentro del MMI y debido a las reflexiones de la señal en las paredes empiezan a producirse las primeras imágenes de la señal transmitida, debido a la suma de las señales reflejadas en las paredes del dispositivo, que se suman constructiva y destructivamente, produciendo así las denominadas “autoimágenes”.

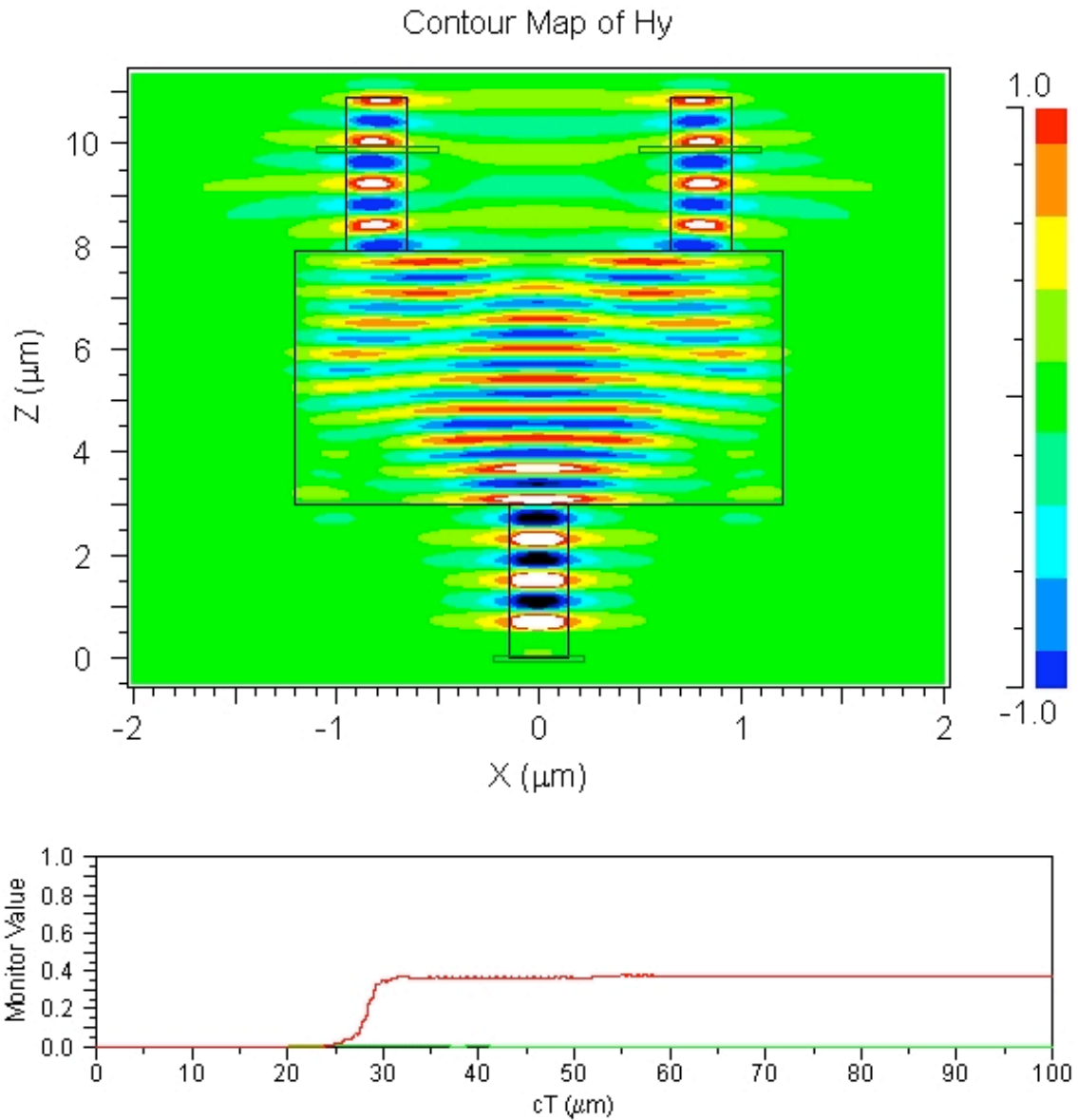


Figura 3.2: Distribución de campo del MMI 1x2, una vez se ha estabilizado la simulación.

En la Figura 2, podemos ver el funcionamiento completo del dispositivo una vez terminada la simulación. Podemos observar la potencia radiada en el espacio libre que queda entre las guías de salida y como se producen reflexiones dentro del dispositivo (esquinas inferiores), que se traducen en pérdidas.

Podemos observar en esta gráfica, que la potencia acoplada es la misma para los dos puertos de salida. Esto es debido a la simetría que presenta el dispositivo, ya

que la guía de entrada está situada en el centro del dispositivo y las guías de salida están situadas simétricamente respecto al centro del MMI.

Si nos fijamos en la línea de color verdoso, observamos que las pérdidas de retorno son muy pequeñas llegando a ser despreciables en algunos casos.

Optimización de la longitud (LMMI)

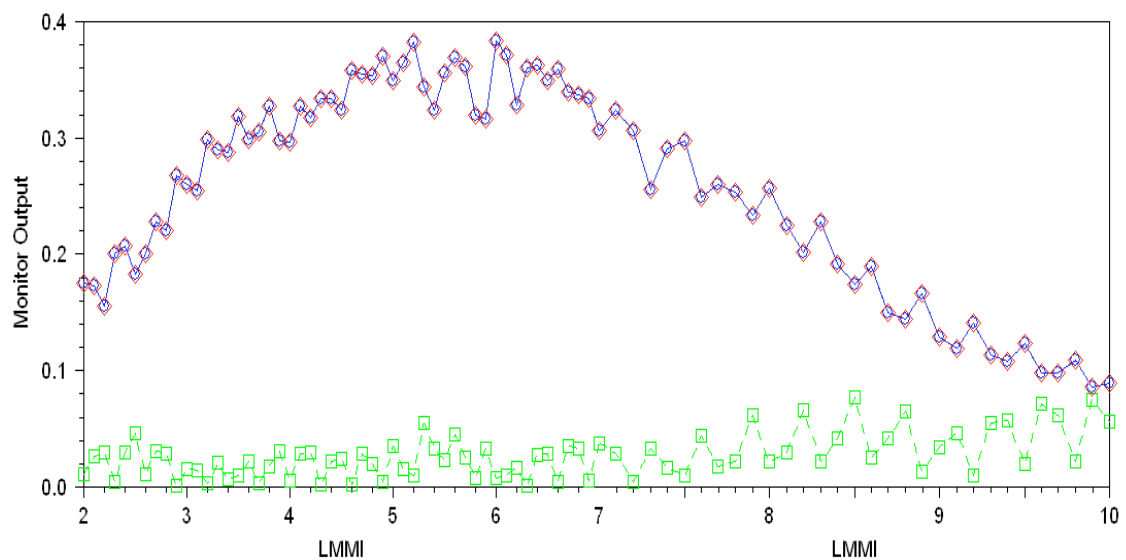


Figura 3.3: Variación de la potencia acoplada en función de la longitud.

En esta gráfica observamos como el dispositivo funciona correctamente dentro de un margen de longitudes de entre 4.5 y 6.5 μm , con unas pérdidas de exceso de 1.19 dB para LMMI = 5.2 μm y 1.16 dB para LMMI = 6 μm .

Podemos comprobar como el valor teórico calculado para la longitud del dispositivo, que es de 4.9 μm , se encuentra dentro del rango de valores entre los cuales el dispositivo funciona correctamente, y además podemos observar como la potencia reflejada tiene un valor muy cercano al cero.

Si nos fijamos detenidamente, podemos observar que los mayores valores de potencia acoplada en cada guía los obtenemos para las longitudes de 5.2 μm y de 6 μm . De modo que fijando la longitud del MMI, primero para el valor de 5.2 μm y luego para el valor de 6 μm , se realizará la optimización de la anchura (WMMI) y se

compararán los resultados para ver con que dimensiones funciona mejor el dispositivo.

Optimización de la anchura para LMMI=5.2 μm (WMMI)

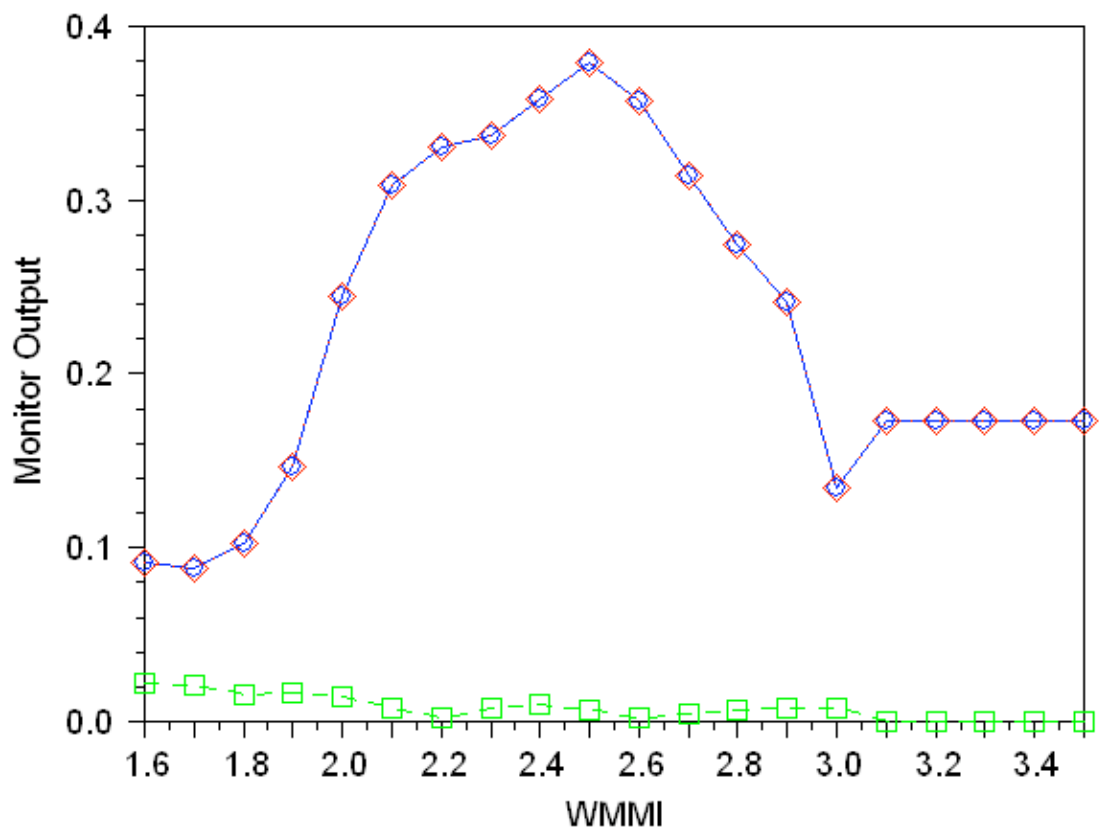


Figura 3.4: Variación de la potencia acoplada en función de la anchura para una LMMI=5.2 μm .

Para este caso, fijamos la longitud del dispositivo para LMMI = 5.2 μm y realizamos la optimización entre los valores de 1.6 μm (anchura mínima posible del MMI, que viene dada por la anchura de las guías y la separación entre estas) y 3.5 μm .

Aquí observamos como el margen de valores para un funcionamiento apropiado del MMI, es inferior al obtenido en la longitud, lo que nos indica que es mas sensible a la variación en anchura que en longitud.

El mayor valor de potencia acoplada se obtiene para una WMMI de 2.5 μm con un acople de potencia del 38% en cada salida, lo que se traduce en unas pérdidas de exceso de 1.192 dB y unas potencias reflejadas que están alrededor de -20 dB.

Optimización de la anchura para LMMI=6 μm (WMMI)

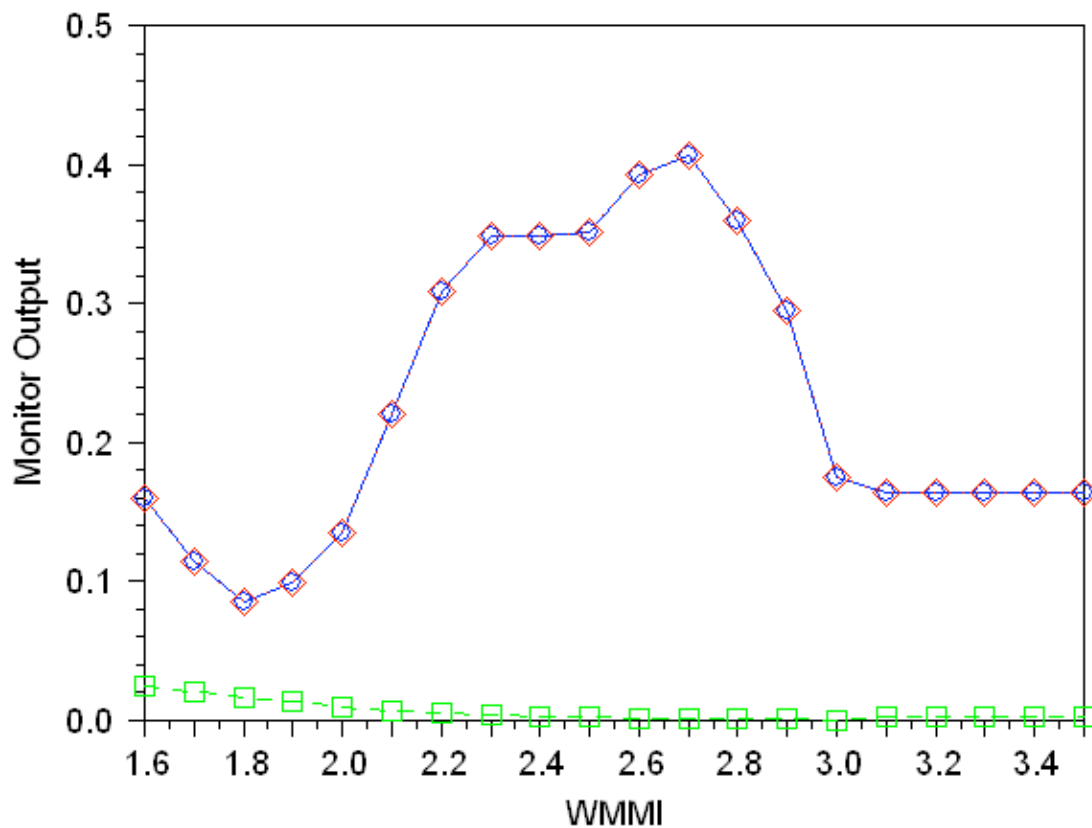


Figura 3.5: Variación de la potencia acoplada en función de la anchura para una LMMI=6 μm

Para una longitud de 6 μm observamos un comportamiento similar al de LMMI=5.2 μm en cuanto a potencia acoplada a la salida, ya que podemos observar que en cuanto a potencia reflejada tiene un comportamiento mas estable que el modelo anterior.

Este modelo es mas eficiente que el anterior, ya que mejora tanto la potencia acoplada como el margen de anchuras el que se podría apreciar un correcto funcionamiento, que va de 2.3 a 2.8 μm , teniendo de 2.6 y en 2.7 μm sus mejores resultados tanto en acople de potencia a la salida como en potencia reflejada.

En este caso obtenemos el mejor funcionamiento para un valor de anchura de $2.7 \mu\text{m}$, con un acople de potencia del 41%, lo que nos da una pérdidas de exceso 0.86 dB y unas potencias reflejadas que son prácticamente de 0 (en lineal).

El valor teórico de anchura, calculado para el dispositivo, era de $2.4 \mu\text{m}$ y podemos observar, que obtenemos unos resultados aceptables, si bien no son los mejores.

Para concluir la comparación entre los dispositivos de diferentes longitudes, observamos que obtenemos mejores resultados para el valor de $6 \mu\text{m}$ tanto en la potencia acoplada como en la reflejada y también en la estabilidad frente a los posibles errores en la fabricación, ya que es menos sensible a las variaciones en anchura.

Pero también hay que tener en cuenta que un parámetro de diseño importante es el tamaño del dispositivo y con $\text{LMMI}=5.2 \mu\text{m}$ obtendríamos un dispositivo de menor tamaño, así que en función de las necesidades podríamos optar por un diseño u otro.

Ancho de banda del dispositivo

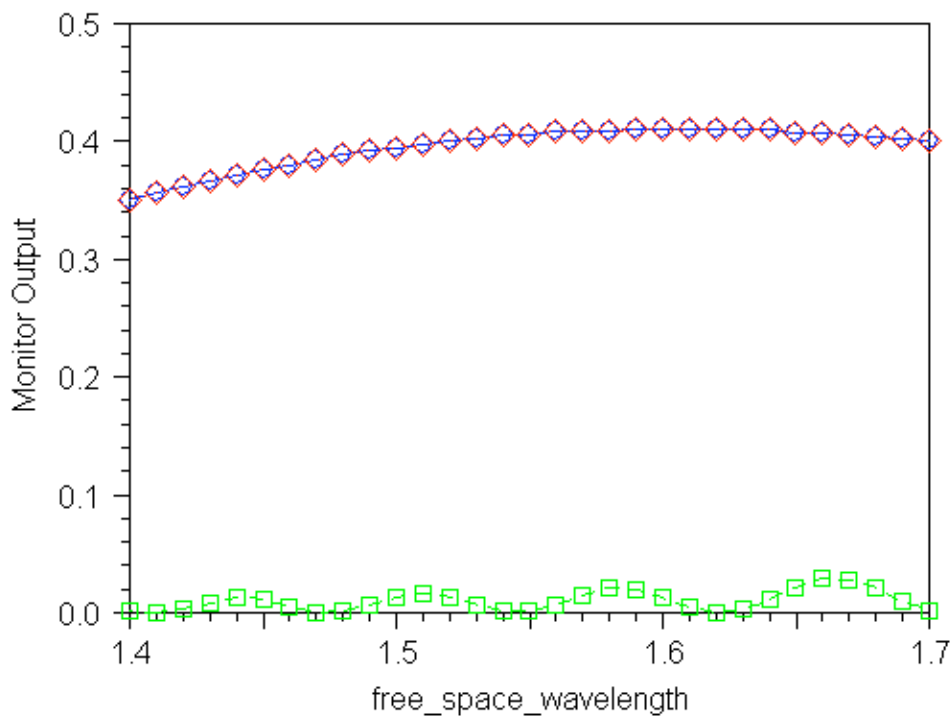


Figura 3.6: Ancho de banda el MMI 1x2 con guías de $0.3 \mu\text{m}$

Otra de las características importantes del MMI es que, en teoría, disponen de un gran ancho de banda y como podemos ver en la grafica, la simulación se

corresponde con la teoría, ya que tiene un comportamiento muy estable y con buenos resultados, de entre 35 y 41% de potencia acoplada. Mientras que podemos observar que la potencia reflejada va oscilando, conforme cambia la longitud de onda. Podemos comprobar que para $\lambda=1550$ nm (λ de diseño), la potencia reflejada es prácticamente cero.

○ **Guías de 0.5 μm (multimodo 2D)**

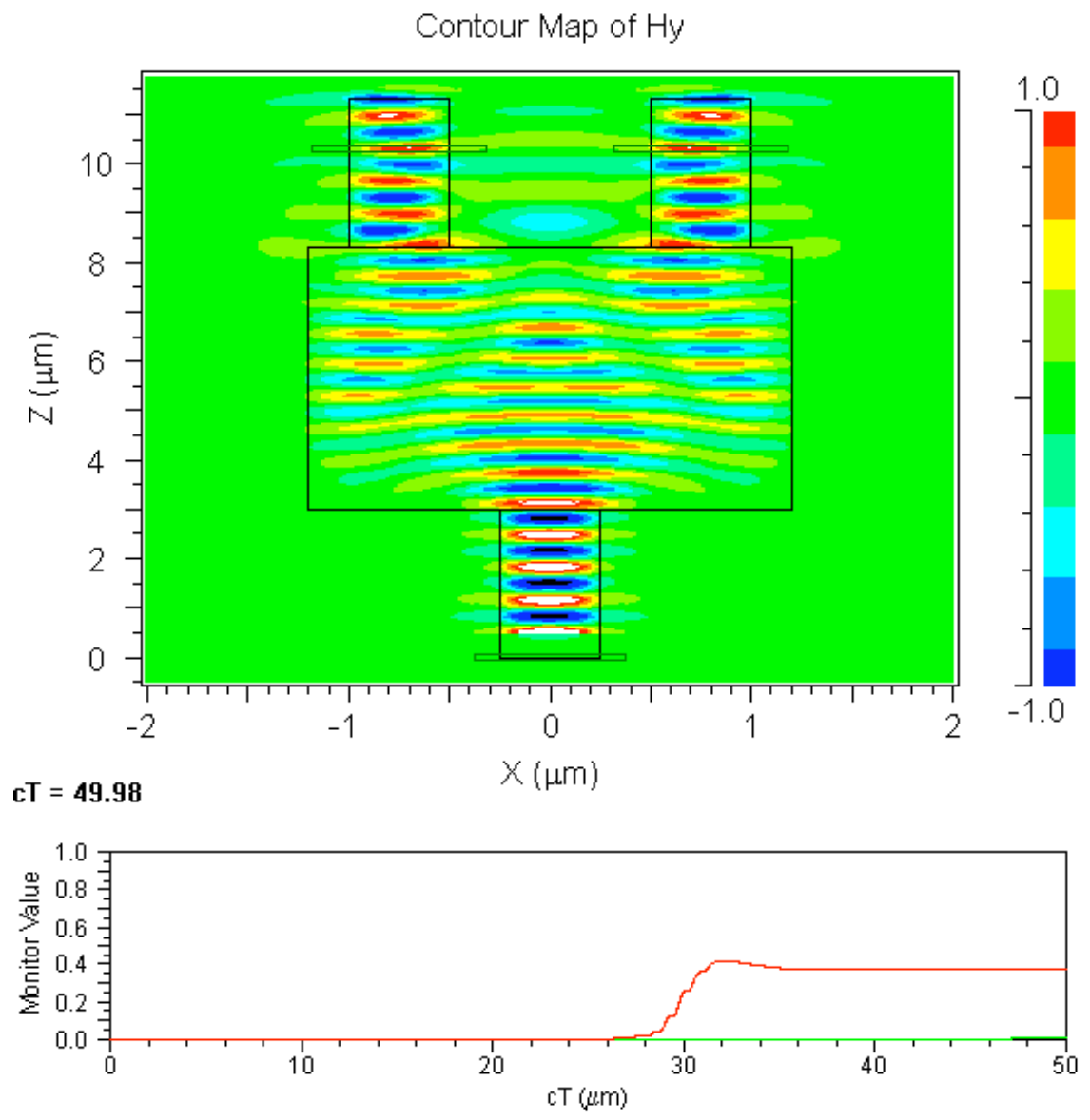


Figura 3.7: Distribución de campo para un MMI 1x2 con guías de 0.5 μm .

En este siguiente diseño se han utilizado guías multimodo, mas anchas que las anteriores, de $0.5 \mu\text{m}$, lo cual cambia la anchura minima del dispositivo, ya que no solo cambia la achura de las guías sino también la separación minima entre guías para que no haya acople de potencia, y por lo tanto también cambiará la longitud.

Podemos observar como el campo al acoplarse, va oscilando por el interior de las guías de salida debido a su mayor anchura (guías multimodo). Vamos a observar como se consigue una mayor potencia a la salida debido a que hay un mayor acople con estas guías debido a su mayor anchura.

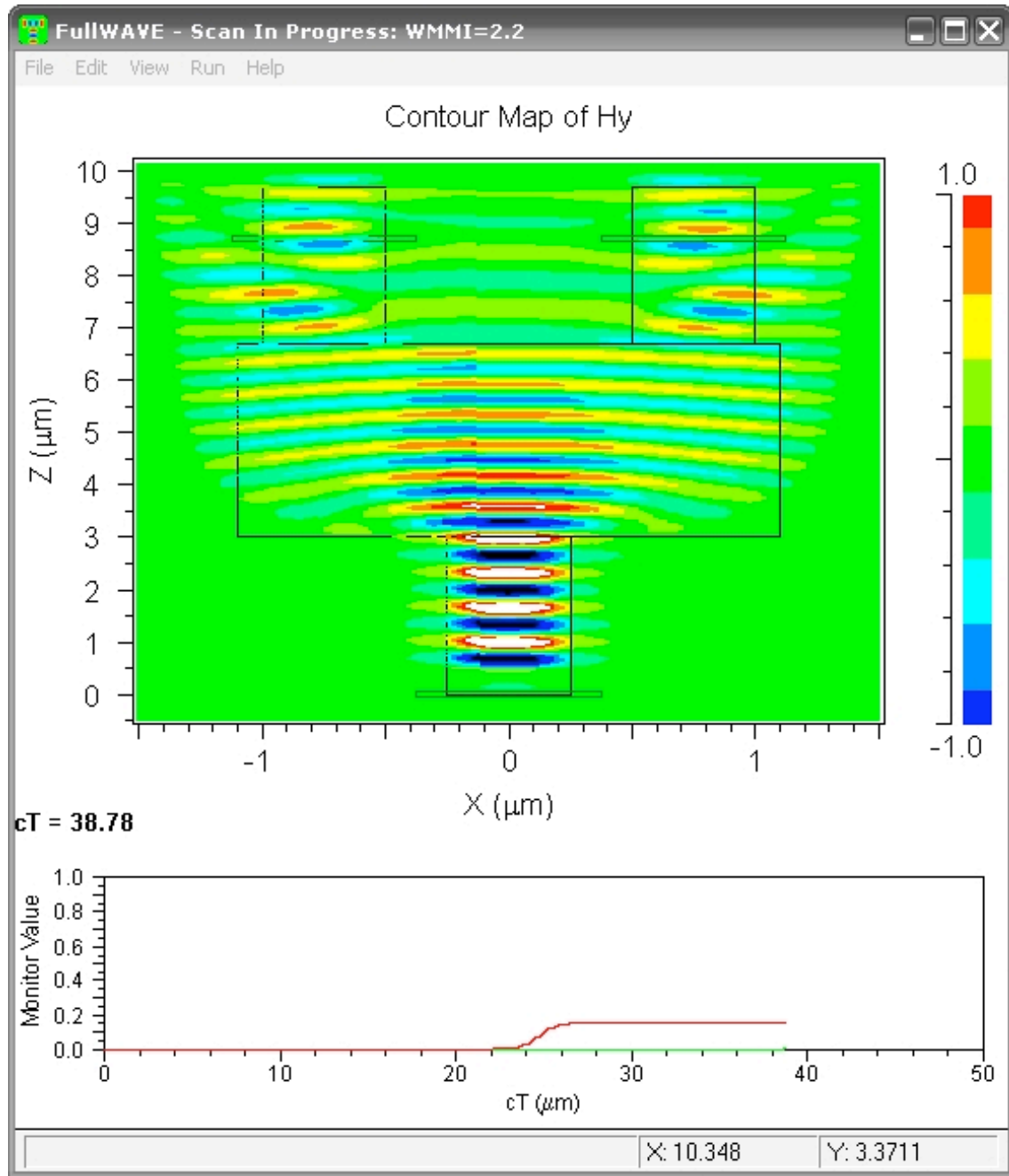


Figura 3.8: Distribución de campo para un MMI demasiado "corto".

En la Figura 8 podemos ver como se comporta el MMI con un mal diseño. El mayor problema que mostraba este dispositivo, se encontraba en su longitud, también en su anchura, pero sobre todo en su longitud. El dispositivo era demasiado corto, tanto que no permitía que se llegaran a producir interferencias (ni constructivas ni destructivas) en su interior, el campo se expande por el MMI y la cantidad que se acopla a la salida es mínima. Además, debido a que el campo mas intenso se encuentra en el centro, no entra en la guía de frente sino con una cierta inclinación lo cual, además, aumenta las pérdidas de propagación en el interior de la guía.

Optimización de la longitud (LMMI)

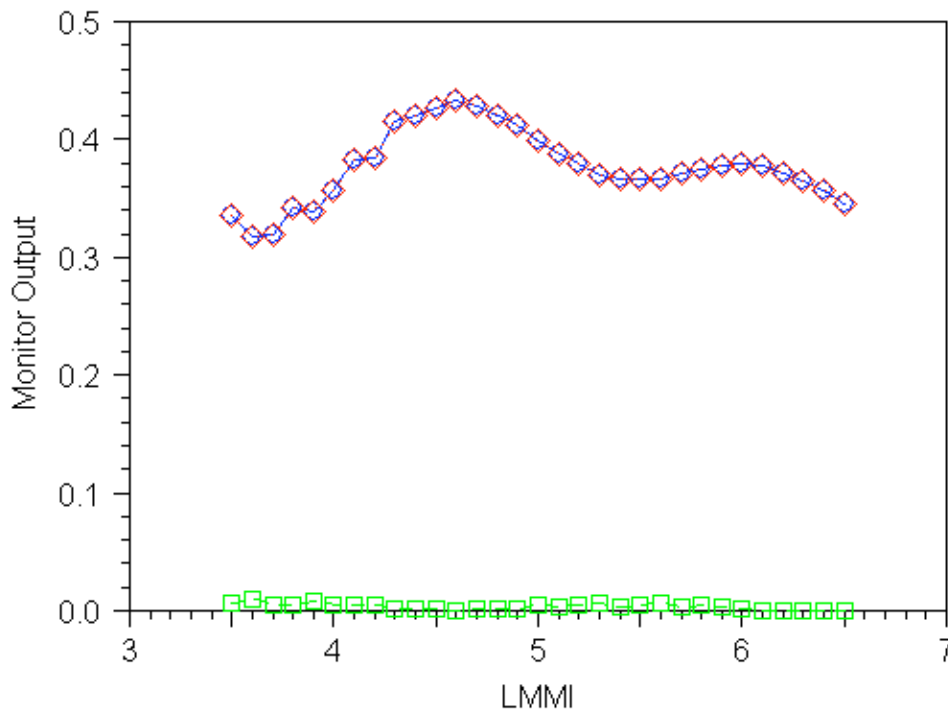


Figura 3.9: : Variación de la potencia acoplada en función de la longitud.

En esta figura podemos observar como varia la potencia acoplada en función de la longitud del MMI para un diseño correcto, como el de la figura 7 con $L_{MMI} = 5.3 \mu\text{m}$ y $W_{MMI} = 2.4 \mu\text{m}$.

La longitud del dispositivo para las simulaciones se tomó en torno a valores relativamente grandes alrededor del valor teórico ($5.3 \mu\text{m}$), para que se pudiera apreciar con suficiente claridad la respuesta del MMI a su variación en longitud.

Vemos que de 4.3 a 4.8 μm la potencia acoplada a la salida es superior al 41%, llegando hasta un 44% de potencia acoplada para 4.6 μm . Para estas dimensiones y en el rango de longitudes de correcto funcionamiento, observamos que las pérdidas de exceso (EL) varían entre 0.55 dB y 0.86 dB.

Optimización de la anchura (WMMI)

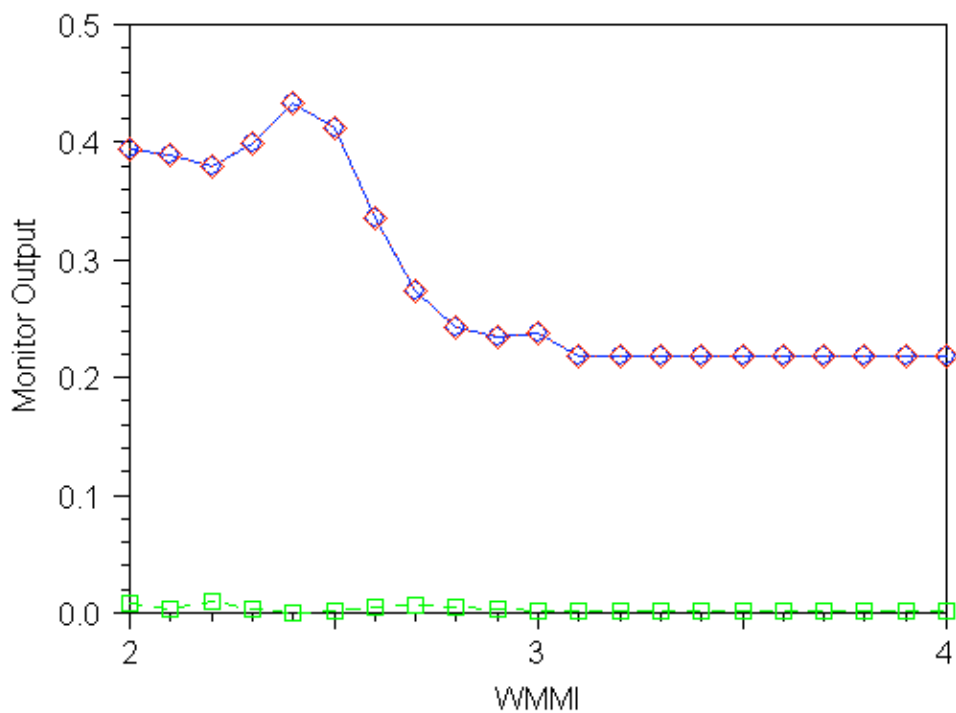


Figura 3.10: : Variación de la potencia acoplada en función de la longitud para un MMI 1x2 con guías de 0.5 μm

Para el máximo valor de anchura, tomamos la mejor solución obtenida en la simulación anterior, la cual nos daba una anchura de 4.6 μm y una potencia acoplada a las salidas del 44%, un valor bastante próximo al ideal del 50%.

Las soluciones obtenidas para los valores de 2.3, 2.4 y 2.5 μm , se encuentran por encima del 40% de potencia acoplada teniendo en 2.4 el máximo.

Si observamos con detenimiento, vemos que para una anchura de 2.4, lo que está ocurriendo es que se mantiene el valor máximo de potencia a la salida (44%),

mientras que para las otras longitudes este valor empeora y por lo tanto aumentan las pérdidas.

Cabe mencionar en este caso, que el mejor valor de anchura obtenido en la simulación coincide con el resultado teórico obtenido previamente.

Ancho de banda del MMI para guías de $0.5\mu\text{m}$ y una separación de $1\mu\text{m}$

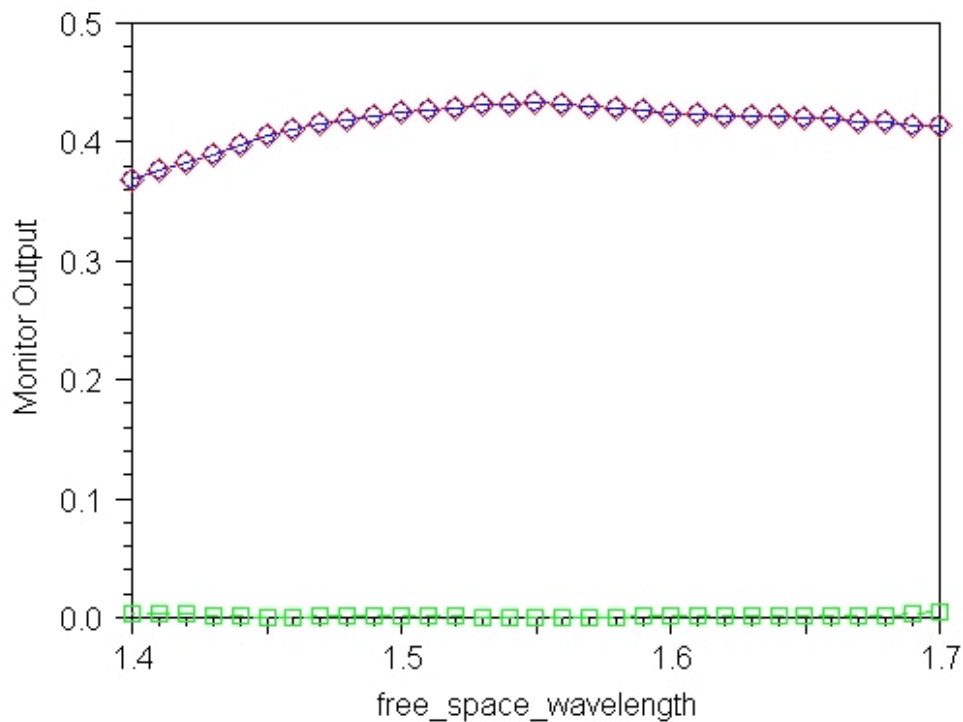


Figura 3.11: Ancho de banda del MMI 1x2 con guías de $0.5\mu\text{m}$

Podemos ver como el ancho del banda del MMI es muy grande y vemos como entre 1.5 nm y 1.6 nm la respuesta es prácticamente plana y con un resultado superior al 40% de potencia acoplada.

Vemos como el acople de potencia disminuye cuando la longitud de onda va decreciendo a partir de 1.5 nm.

También observamos que para la longitud de onda de diseño, el dispositivo ofrece mejor potencia acoplada y la potencia reflejada es prácticamente nula, aunque la

potencia reflejada a la entrada ofrece buenos resultados desde 1.4 nm hasta 1.7 nm.

Cabe destacar que en estos casos el desbalance de potencias es 0, ya que debido a la guía de entrada central y que las guías de salida son simétricas respecto al centro, la potencia acoplada a las 2 salidas es siempre la misma.

- **Divisor 1-3:**

- Guías de 0.3 μm (monomodo 2D)

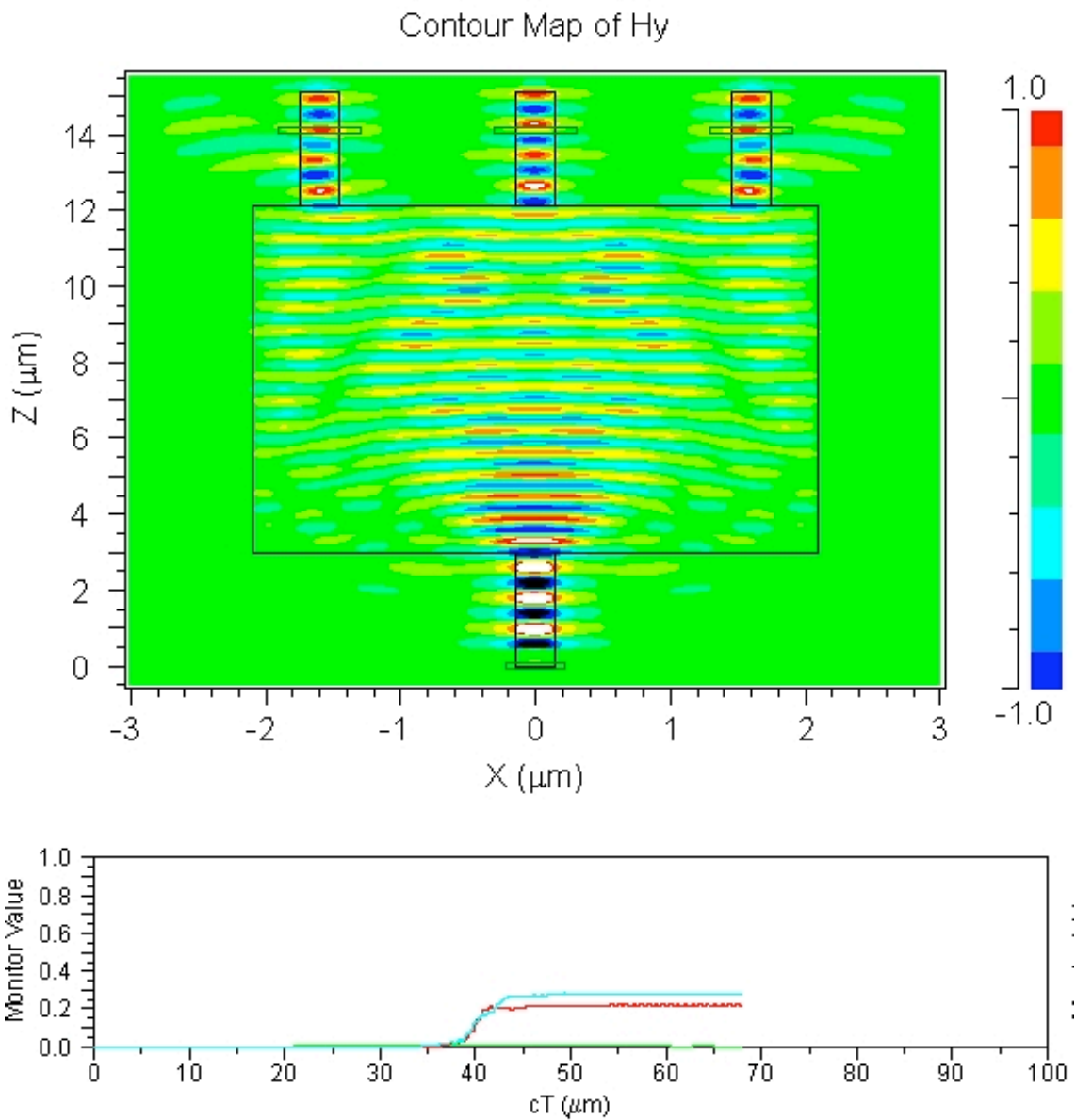


Figura 3.12: Vista de una simulación del MMI 1x3 con guías de 0.3 μm

En el divisor 1 x 3, hemos perdido la simetría que teníamos anteriormente con 2 salidas y el acople de potencias será distinto para la guía central, respecto a las guías laterales.

En esta figura podemos observar como se pierde potencia a la salida, en las guías exteriores, debido a un ángulo de entrada del campo en la guía demasiado abrupto y por ello parte de la potencia se ve refractada hacia fuera de la guía.

Optimización de la longitud (LMMI)

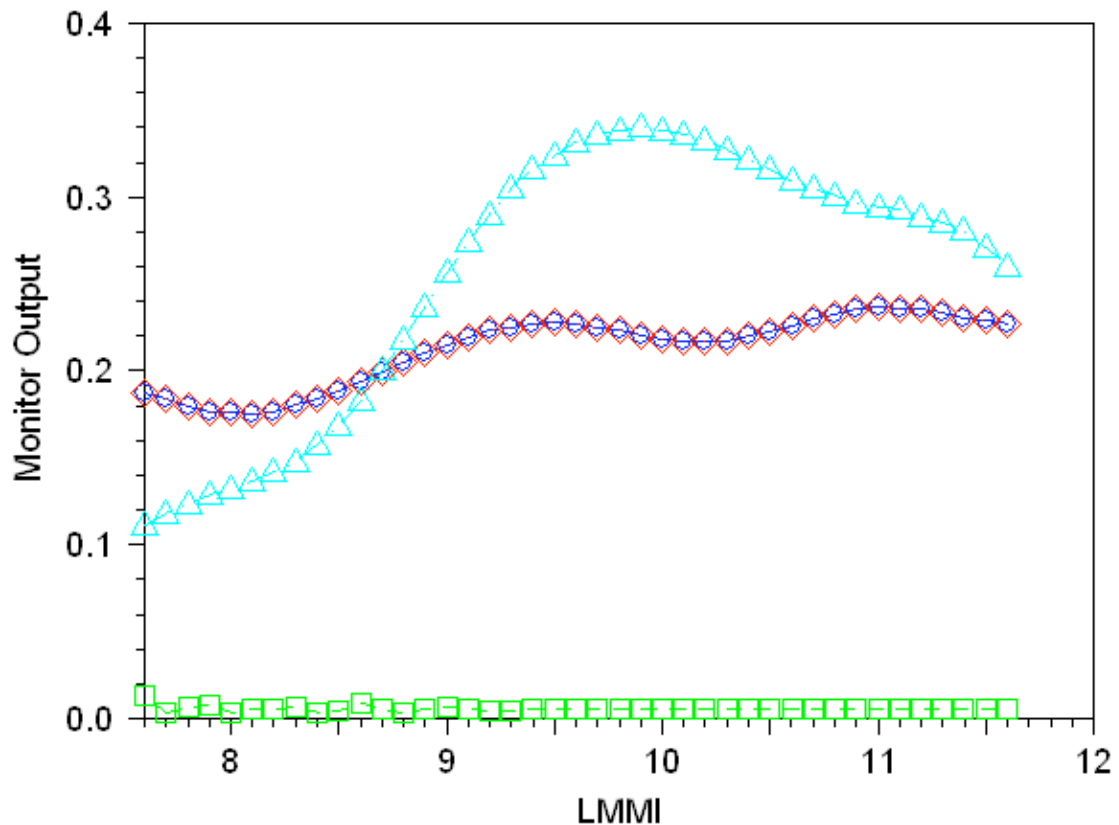


Figura 3.13: Variación de la potencia a la salida según la longitud del MMI. La traza azul claro corresponde al puerto de salida central, mientras que la traza azul y roja corresponde a los puertos laterales.

En los resultados obtenidos para la optimización de la longitud (LMMI), podemos observar que la potencia acoplada en la guía central es distinta a la acoplada en las guías laterales. Para obtener la misma potencia de salida en las 3 guías, deberíamos utilizar una longitud de $8.6 \mu\text{m}$, con una potencia acoplada a la salida de cada guía del 20%, lo que nos da una potencia total acoplada del 60%, teniendo unas pérdidas de exceso de 2.21dB.

En el caso de que una aplicación requiera de mayor potencia en la guía central, se puede conseguir aumentando la longitud del MMI hasta 9.9 o $10 \mu\text{m}$, llegando a tener una potencia acoplada en la guía central del 34% y del 22% en las laterales. Esto nos da un desbalance de potencias de 1.89 dB.

Para este caso, el valor teórico obtenido sobre la longitud es de $9.4 \mu\text{m}$, que como vemos se encuentra una zona de buen funcionamiento, pero no obtenemos la misma potencia de salida para las 3 guías de salida.

Optimización de la longitud (LMMI) (continuación...)

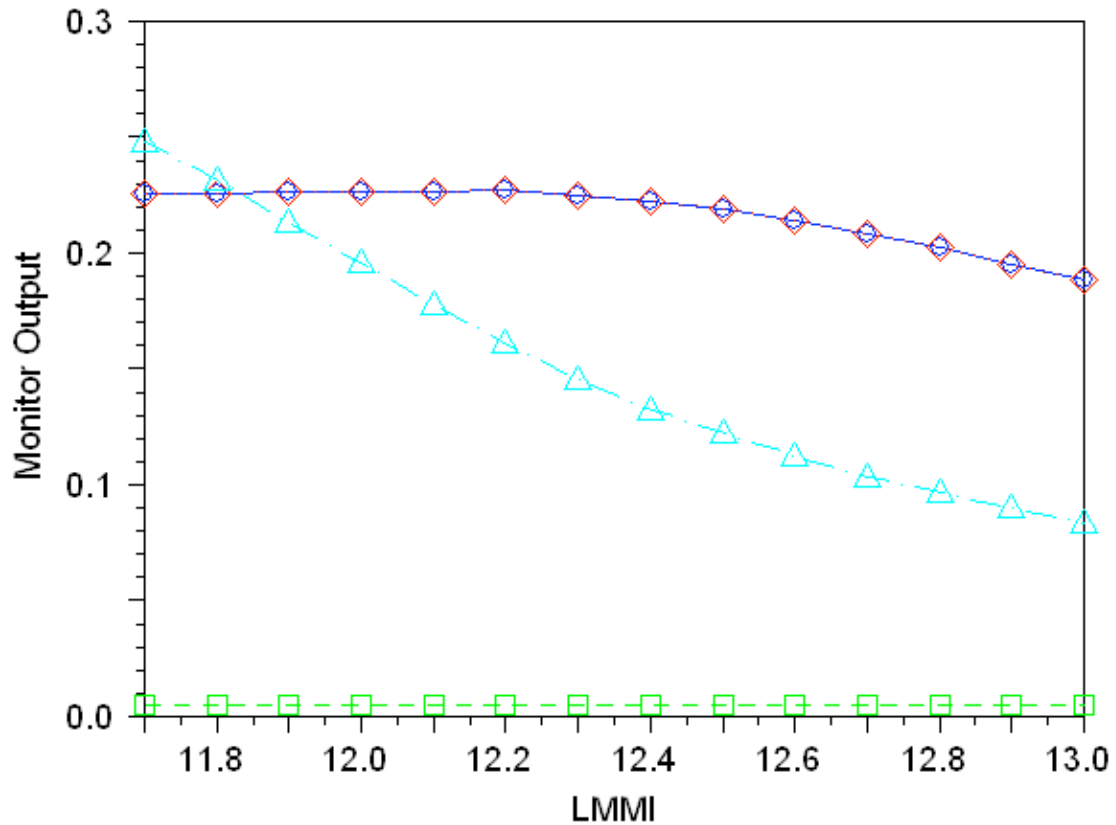


Figura 3.14: Continuación de la variación de la potencia a la salida según la longitud del MMI. La traza azul claro corresponde al puerto de salida central, mientras que la traza azul y roja corresponde a los puertos laterales.

En la figura 14, podemos ver la continuación de la gráfica anterior, en la que se podía intuir que las curvas de potencia, se iban a volver a juntar, dándonos otro punto donde la potencia a las 3 salidas es prácticamente la misma. En $11.8 \mu\text{m}$, obtenemos una potencia acoplada similar para las 3 guías de salida, del 23%, obteniendo mayor potencia acoplada que para $LMMI = 8.6 \mu\text{m}$, pero por el contrario tenemos una longitud bastante mayor, lo cual resulta ser un hándicap ya que uno de los objetivos de diseño es que el dispositivo sea lo más pequeño posible.

También vemos en esta gráfica como la potencia acoplada a las guías va siendo cada vez peor y por lo tanto el dispositivo deja de funcionar correctamente.

Optimización de la anchura (WMMI)

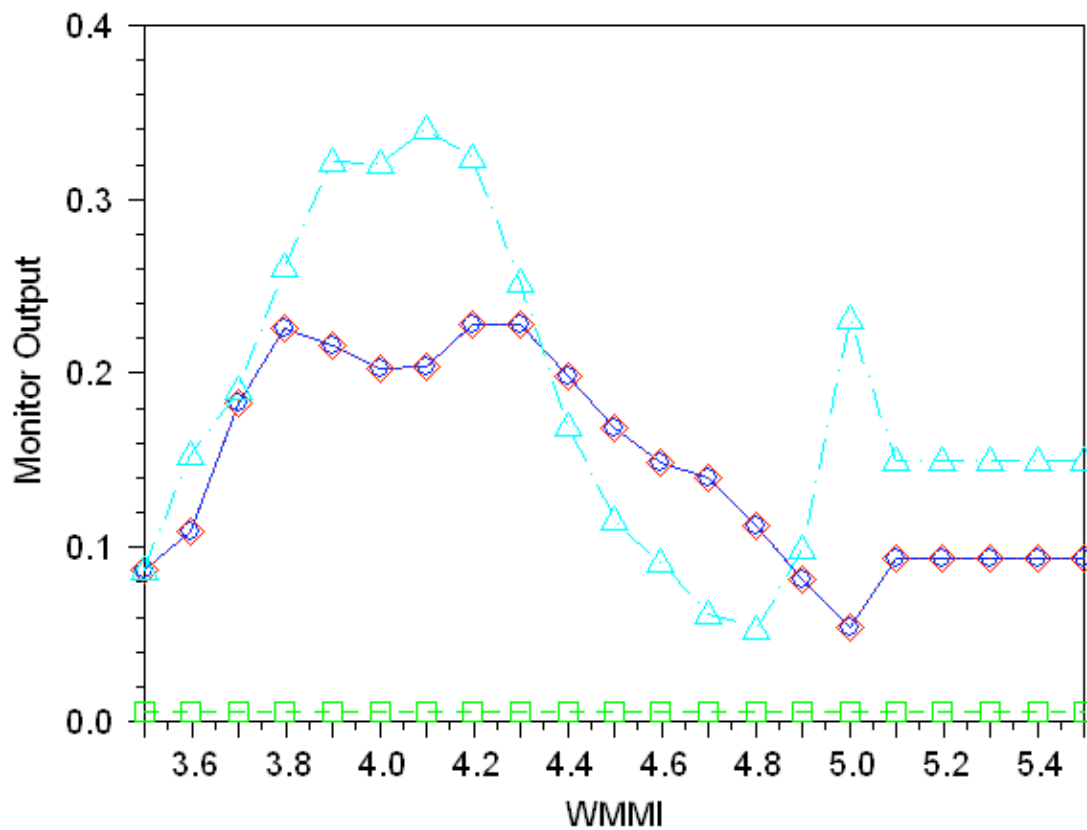


Figura 3.15: Variación de la potencia acoplada a la salida en función de la anchura del MMI. La traza azul claro corresponde al puerto de salida central, mientras que la traza azul y roja corresponde a los puertos laterales.

En esta figura vemos como la variación en anchura produce cambios bruscos en la potencia de salida. Así resulta más fácil identificar un margen de anchuras donde considerar un funcionamiento correcto, que este estaría entre 3.8 y 4.3 μm , obteniendo para 4.3 μm los valores de potencia más parejos para las 3 guías de salida.

Para 4.3 μm , tenemos una potencia acoplada de 23% para las guías laterales y de 24% para la guía central, con lo que tenemos unas pérdidas de exceso de 1.54 dB, y un desbalance mínimo entre las salidas de 0.18 dB.

Ancho de banda del MMI para guías de $0.3\mu\text{m}$ y una separación de $1.3\mu\text{m}$

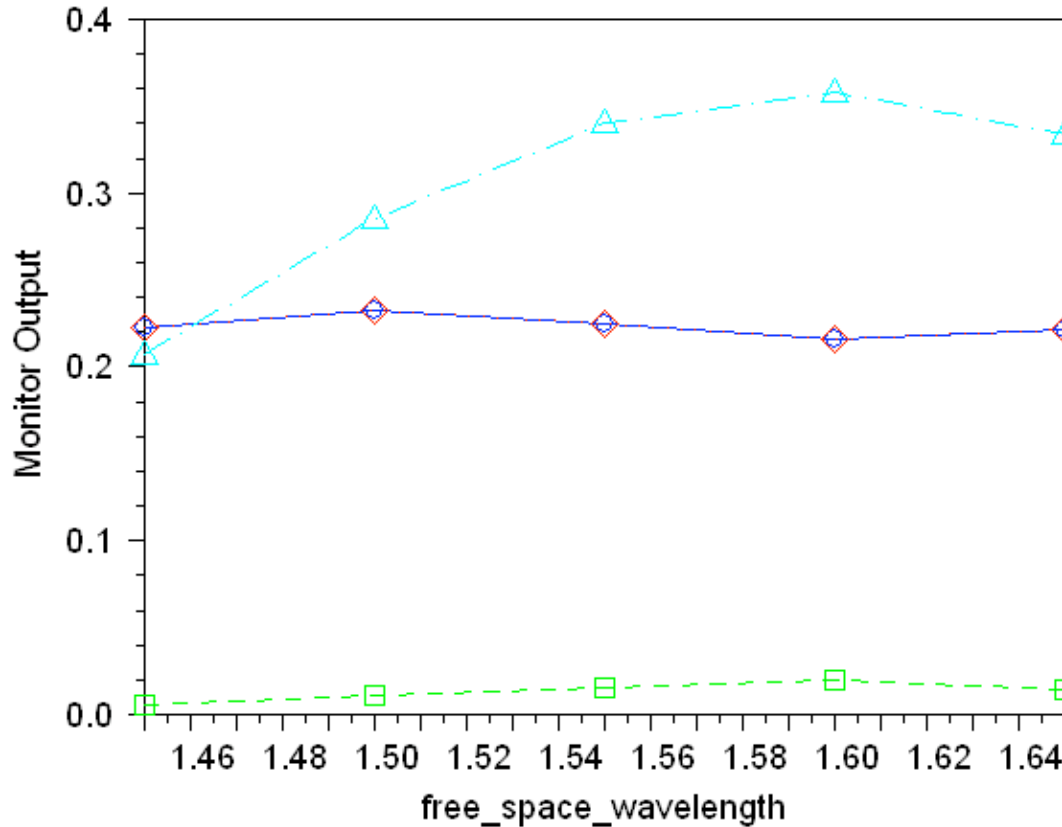


Figura 3.16: Ancho de banda del MMI 1x3 con guías de $0.3\mu\text{m}$. La traza azul claro corresponde al puerto de salida central, mientras que la traza azul y roja corresponde a los puertos laterales.

En la siguiente grafica vemos que el ancho de banda es diferente entre la guía central y las guías laterales debido a que se ha perdido la simetría de la que disponíamos en el 1x2.

Se puede observar que el ancho de banda es prácticamente plano para las guías laterales, mientras que el de la guía central aumenta para luego disminuir aunque prácticamente en todo momento se mantiene por encima, en potencia a la salida, que las guías laterales.

- **Guías de 0.5 μm (multimodo 2D)**

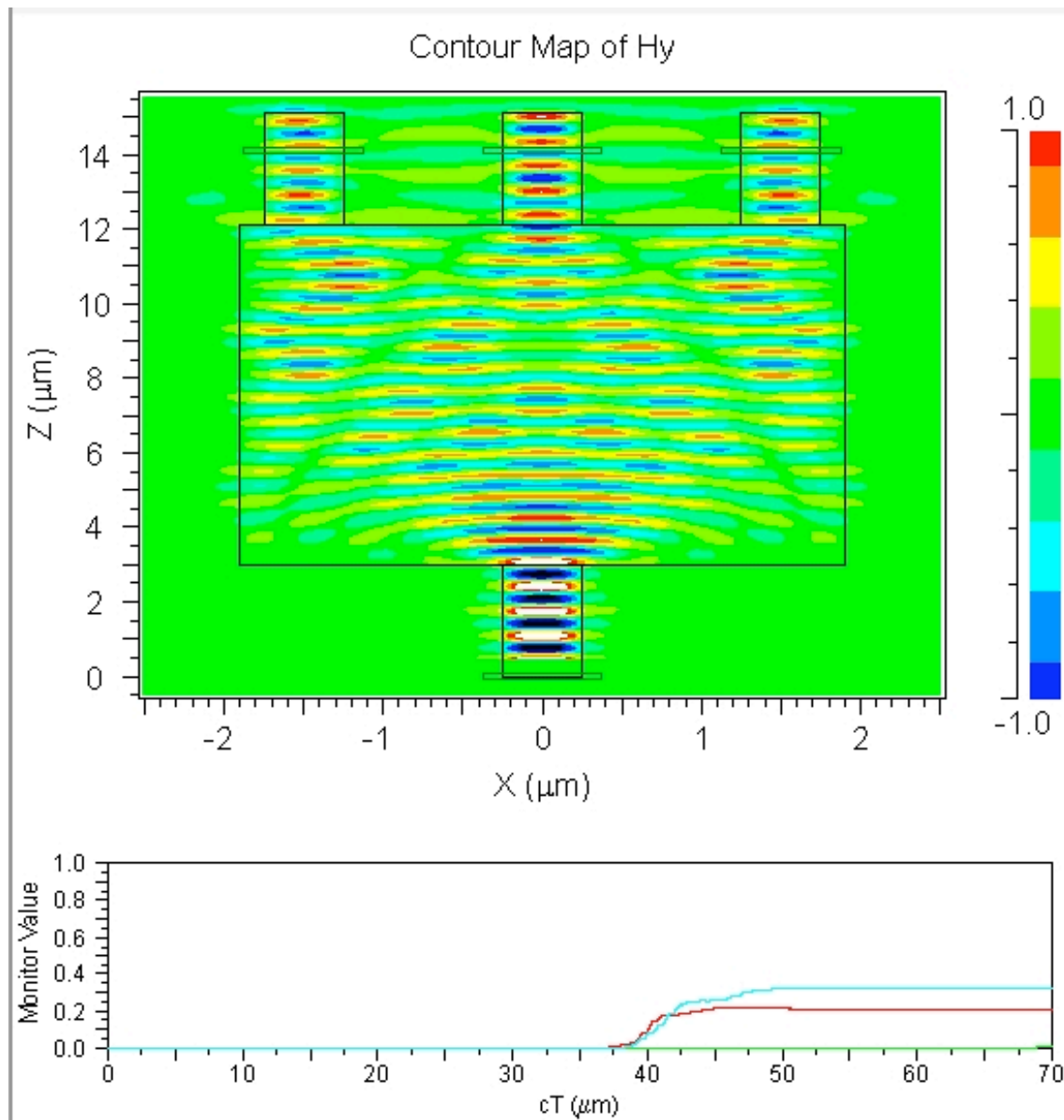


Figura 3.17: Distribución de campo en el interior del MMI con guías de 0.5 μm (multimodo)

Este dispositivo, es el mismo que el anterior, pero debido a las guías multimodo su anchura ha aumentado y por lo tanto también se ha visto afectada su longitud.

Podemos observar como el campo en la guía central de salida sale propagándose paralelo a la guía, mientras que en las guías laterales se producen pequeñas

oscilaciones en el campo debido a su mayor anchura (recordemos que son guías multimodo).

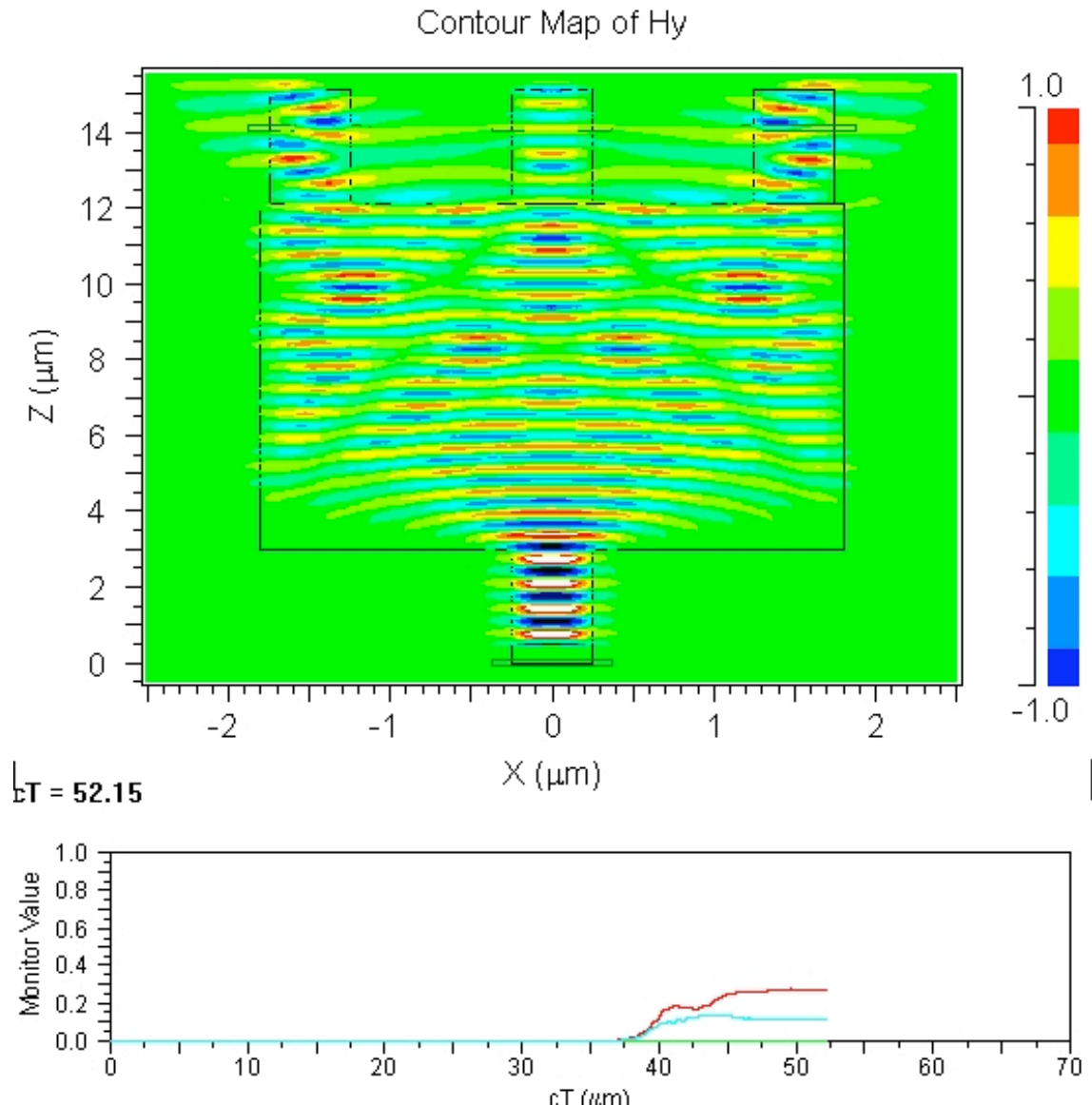


Figura 3.17: Distribución de campo en el interior del MMI mal diseñado con guías de $0.5 \mu\text{m}$

En la figura 17 vemos como es la distribución de campo en un MMI mal diseñado, con dimensiones que no son las adecuadas ni en longitud ni en anchura.

Podemos ver como las *autoimágenes* que se forman en el límite del dispositivo, no lo hacen a la entrada de las guías, sino que hay 2 en los laterales de la guía central que llegan a entrar en la guía. Mientras que la *autoimagen* que se forma a la entrada de la guía lateral lo hace tan a en el borde de la guía, que al propagarse por esta lo hace de tal manera que la potencia se va radiando hacia el exterior y además se consigue que se excite otro modo de propagación.

Optimización de la longitud (LMMI)

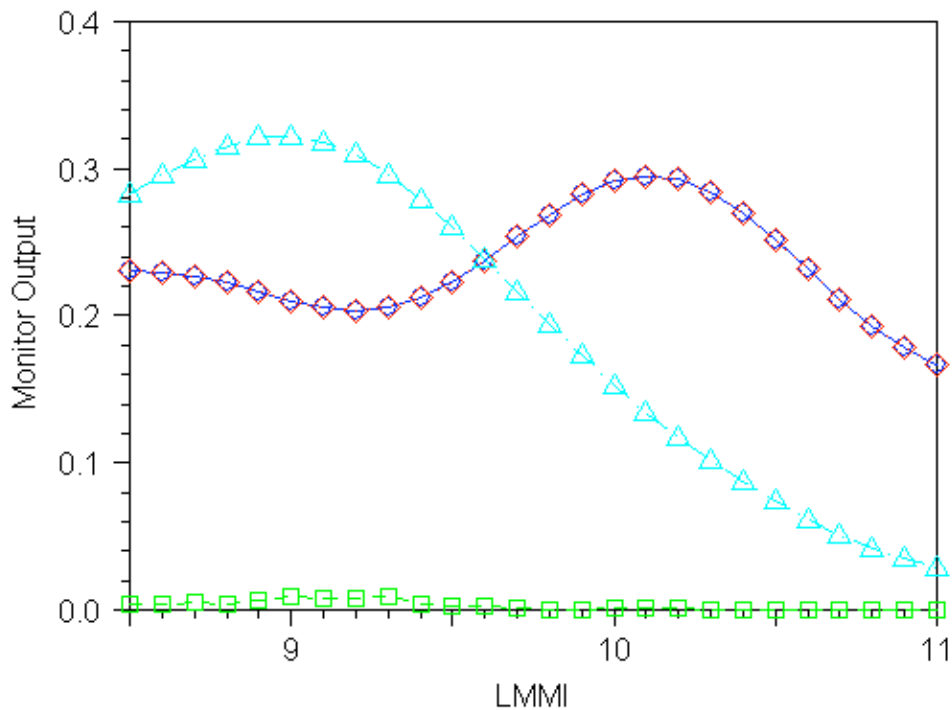


Figura 3.18: Variación de la potencia a la salida según la longitud del MMI. La traza azul claro corresponde al puerto de salida central, mientras que la traza azul y roja corresponde a los puertos laterales.

En los resultados obtenidos para la optimización de la longitud (LMMI), podemos observar que la potencia acoplada en la guía central es distinta a la acoplada en las guías laterales. En este caso hay punto claro donde la potencia de salida, es la misma por la 3 guías de salida y para el cual, deberíamos utilizar una longitud de $9.6 \mu\text{m}$, con una potencia acoplada a la salida de cada guía del 24%, lo que nos da una potencia total acoplada del 72%, teniendo unas pérdidas de exceso de 1.42dB.

En el caso de que una aplicación requiera de mayor potencia en la guía central, se puede conseguir reduciendo la longitud del MMI hasta $9 \mu\text{m}$, llegando a tener una potencia acoplada en la guía central del 32% y del 22% en las laterales. Esto nos da un desbalance de potencias de 1.89 dB.

Para este caso, el valor teórico obtenido sobre la longitud es de $9.6 \mu\text{m}$, que coincide con el valor obtenido en la simulación, pero no obtenemos la misma potencia de salida para las 3 guías de salida.

Optimización de la anchura (WMMI)

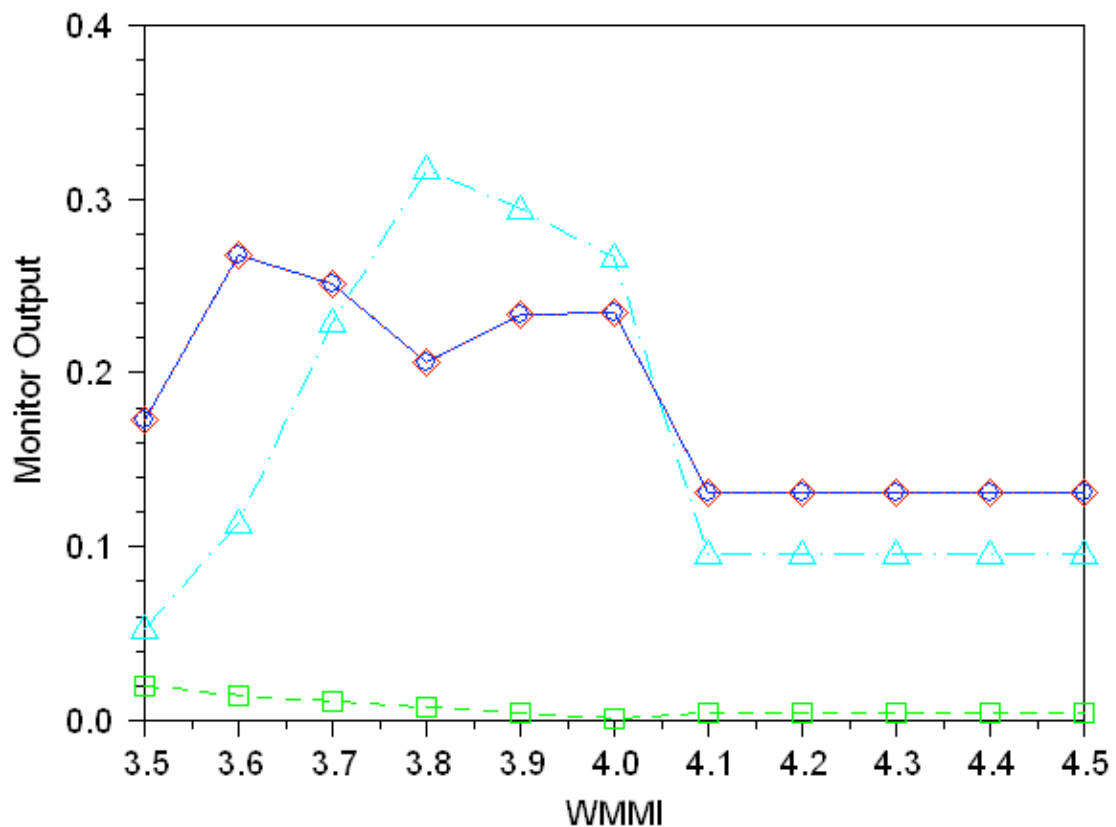


Figura 3.19: Variación de la potencia acoplada a la salida en función de la anchura del MMI. La traza azul claro corresponde al puerto de salida central, mientras que la traza azul y roja corresponde a los puertos laterales.

En esta figura vemos como la variación en anchura produce cambios menos suaves en la potencia de salida que en la variación de longitud. Así resulta más fácil identificar un margen de anchuras donde considerar un funcionamiento correcto, que este estaría entre 3.7 y $4 \mu\text{m}$.

Para $3.7 \mu\text{m}$ (que obtenemos el mejor resultado, aparte de tener menores dimensiones), tenemos una potencia acoplada de 26% para las guías laterales y de 24% para la guía central, con lo que tenemos unas pérdidas de exceso de 1.31 dB, y un desbalance mínimo entre las salidas de 0.34 dB.

Ancho de banda del MMI (1x3) para guías de $0.5\mu\text{m}$ y una separación de $1\mu\text{m}$

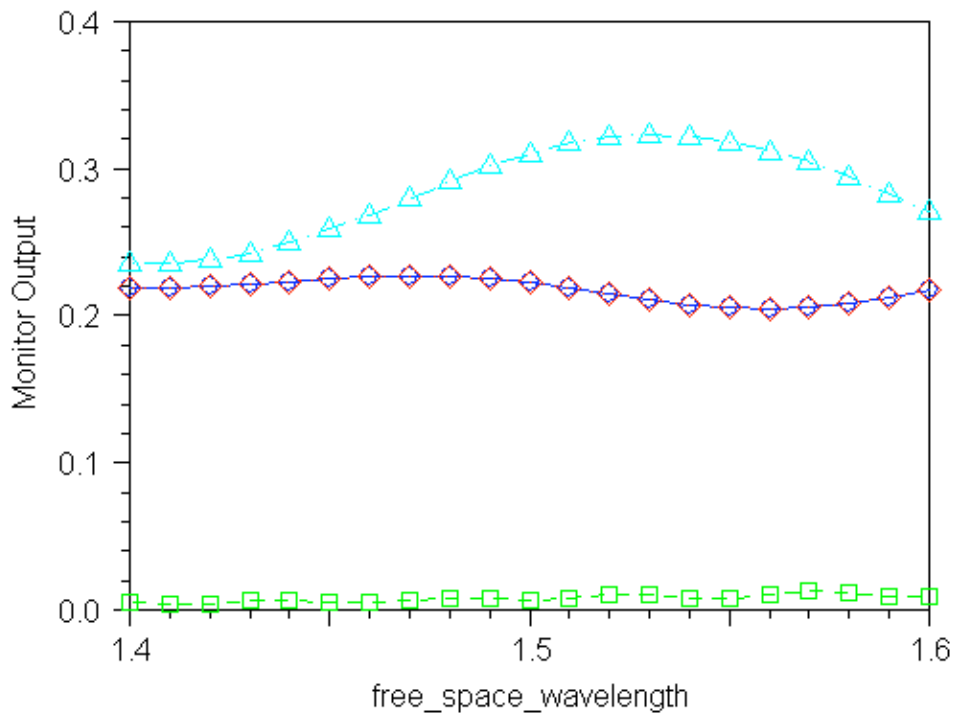


Figura 3.20: Ancho de banda del MMI 1x3 con guías de $0.5\mu\text{m}$. La traza azul claro corresponde al puerto de salida central, mientras que la traza azul y roja corresponde a los puertos laterales.

En la siguiente grafica vemos que el ancho de banda es diferente entre la guía central y las guías laterales. Vemos como la respuesta para las guías laterales es bastante mas plana durante todo el rango del longitudes de onda que para la potencia acoplada en la guía central, que tiene una curva, suave, pero mas pronunciada aunque siempre por encima (hablando en niveles de potencia), de la respuesta de las guías laterales.

Se puede observar que la potencia reflejada a la entrada es prácticamente nula, aunque esta va aumentando conforme vamos aumentando la longitud de onda, es decir, que aumenta cuando la frecuencia disminuye.

- **Divisor 2-2:**

- **Guías de 0.3 μm (monomodo 2D)**

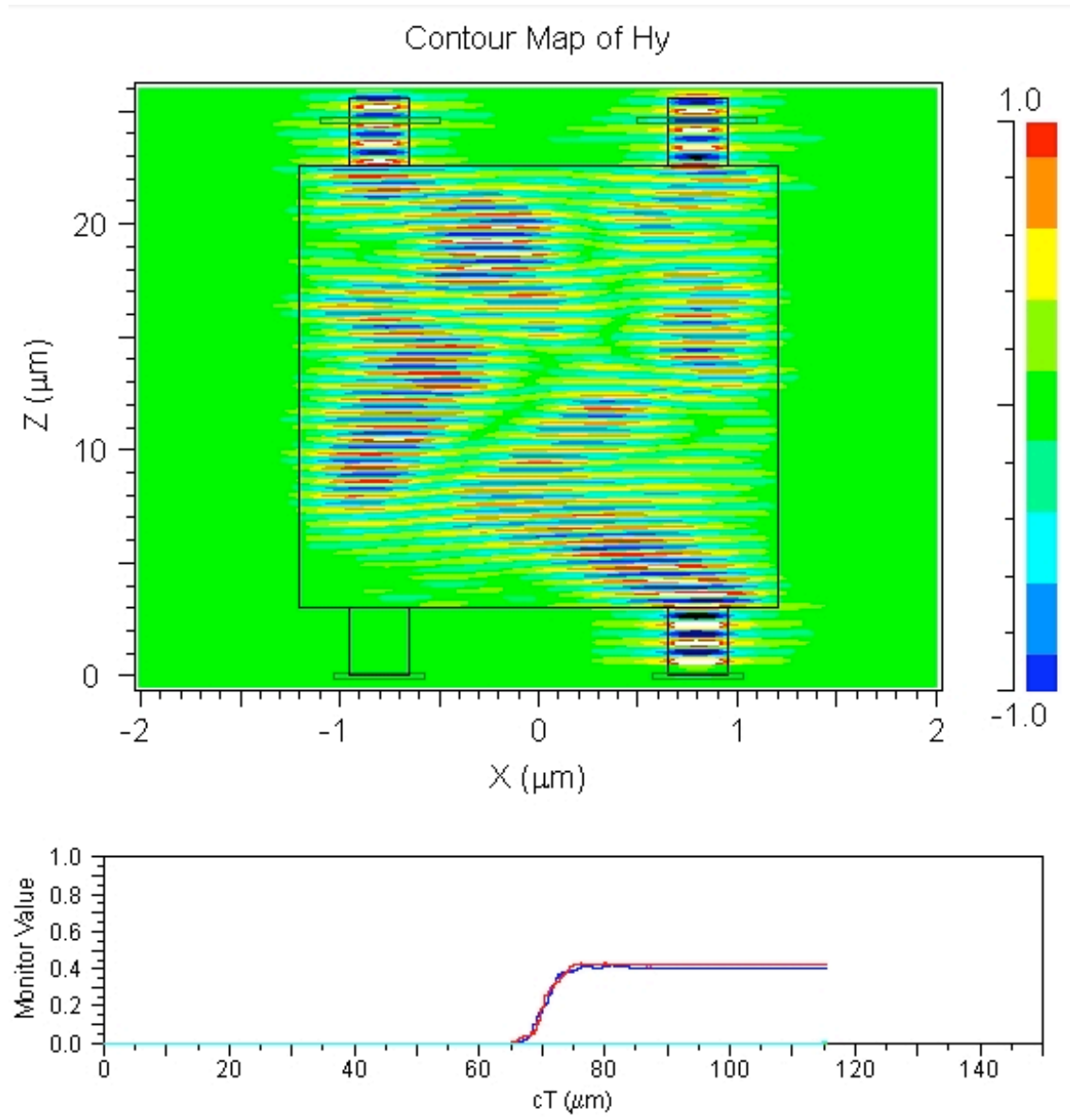


Figura 3.21: Distribución de campo en el interior del MMI 2x2 con guías de 0.3 μm (monomodo)

En este caso, al inyectar potencia por una de las dos guías laterales, vemos como la distribución de campo dentro del MMI tampoco es simétrica. Lo cual producirá un desbalance de potencias en la guías de salida, aunque como podemos observar, el desbalance se podrá ajustar utilizando valore adecuado de longitud y anchura.

Optimización de la longitud (LMMI)

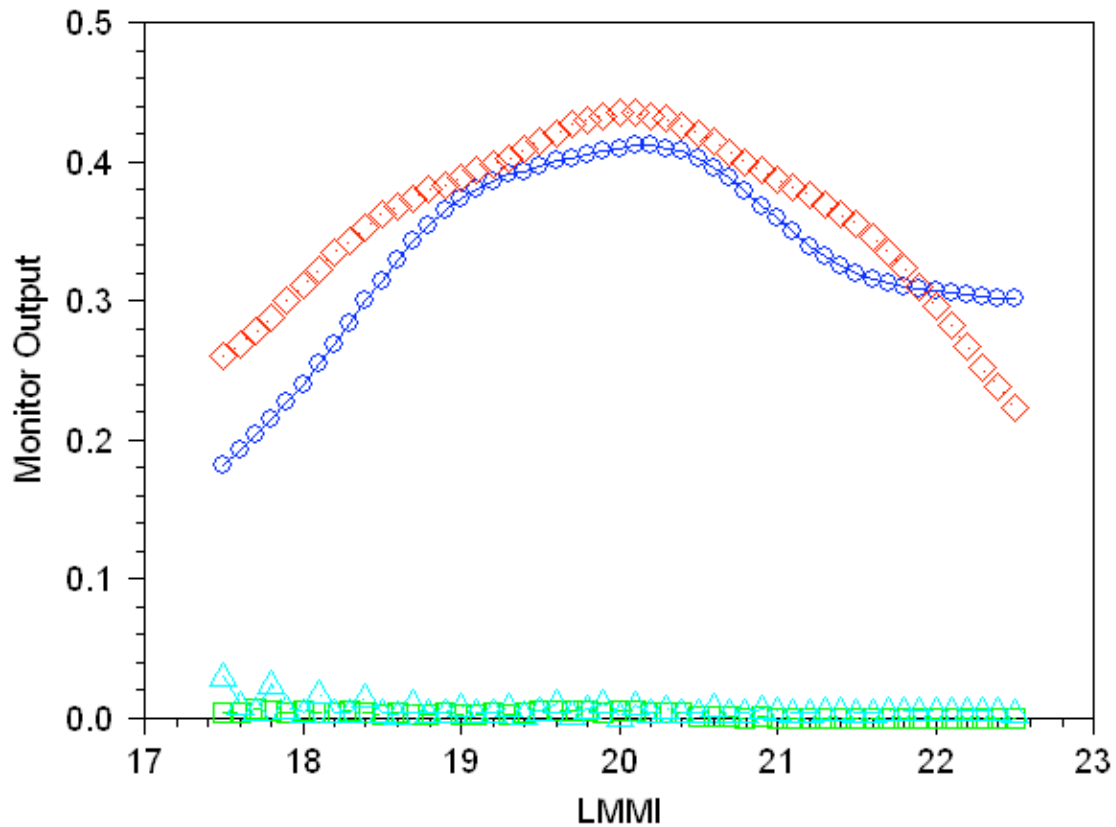


Figura 3.22: Variación de la potencia a la salida según la longitud del MMI. La traza roja corresponde al puerto de la derecha, mientras que la azul corresponde al de la izquierda. Las trazas en azul claro (puerto de entrada izquierdo) y verde (puerto derecho) corresponden a la potencia reflejada.

Los resultados obtenidos para la optimización de la longitud (LMMI), nos muestran que la potencia acoplada en la guía derecha es mayor a la acoplada en la guía izquierda. En este caso hay punto claro donde la potencia de salida, es la máxima para las 2 guías de salida y para el cual, deberíamos utilizar una longitud de 22 μm , con una potencia acoplada a la salida de la guía derecha cerca del 44% y en la guía izquierda del 42%, lo que nos da una potencia total acoplada del 86%, y unas pérdidas de exceso de 0.65 dB. El desbalanceo, producido por la falta de simetría ya que la entrada esta desplazada a un lado, esta en torno a los 0.2 dB.

Para este caso, el valor teórico obtenido sobre la longitud es de 20 μm , que es bastante cercano al valor obtenido en la simulación (20.2 μm), aunque no consigamos obtener el mismo valor para ambas salidas, ya que como vemos en la Figura 22, tan solo se cruzan en un punto que nos da una potencia acoplada del 30% y una longitud de 22 μm , lo cual lo hace un resultado menos apropiado debido

a objetivos de diseño como las dimensiones (cuanto mas pequeño mejor) y de potencia acoplada a la salida.

Optimización de la anchura (WMMI)

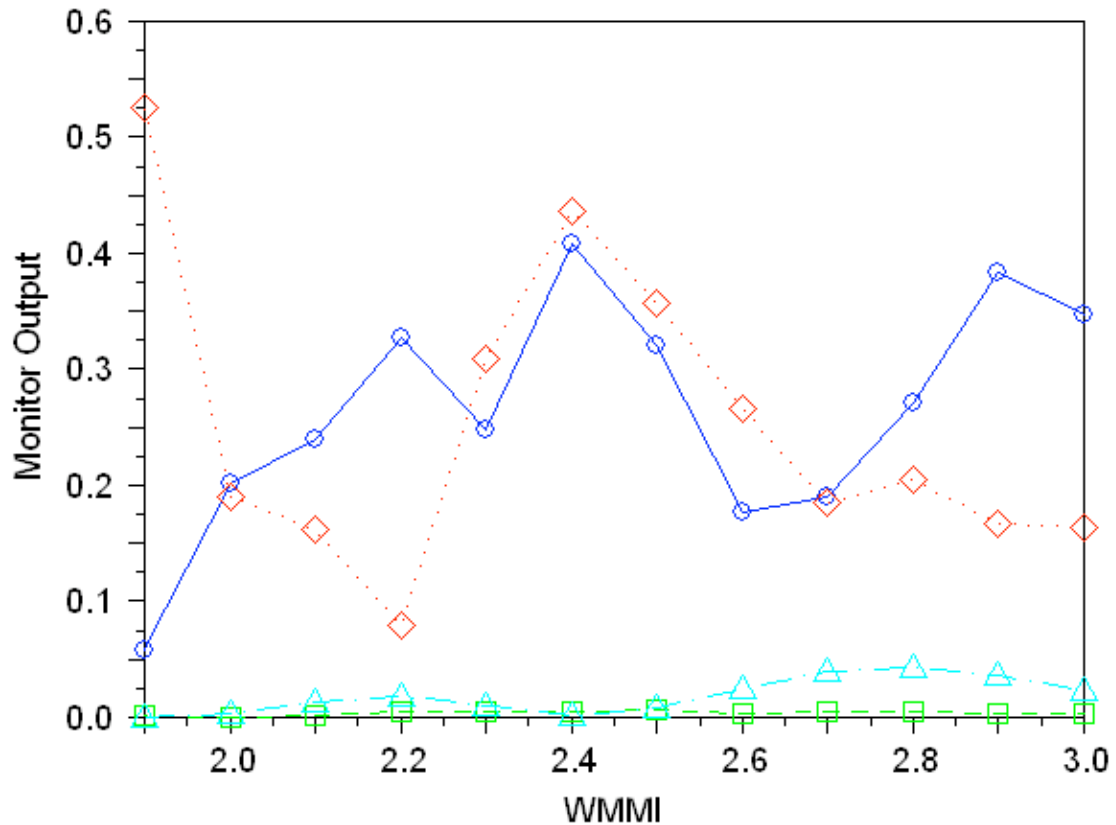


Figura 3.23: Variación de la potencia a la salida según la anchura del MMI. La traza roja corresponde al puerto de la derecha, mientras que la azul corresponde al de la izquierda. Las trazas en azul claro (puerto de entrada izquierdo) y verde (puerto derecho) corresponden a la potencia reflejada.

En la Figura 23 podemos observar como la variación en anchura produce cambios bruscos, con grandes variaciones en la potencia de salida. Estos cambios, son debidos a que un cambio en la anchura provoca un cambio directo en la situación de las autoimagenes dentro del MMI, mientras que en la variación de longitud, las autoimagenes permanecen “inamovibles” y poco a poco se adapta la longitud, de ahí los cambios mas suaves.

De este modo identificar la anchura del MMI donde considerar un buen funcionamiento resulta mas sencillo, y el punto de anchura obtenido es de 2.4 μm .

Para $2.4 \mu\text{m}$, tenemos una potencia acopada de 44% para la guía derecha y de 42% para la guía izquierda, con lo que tenemos unas pérdidas de exceso de 0.65 dB, y un desbalance mínimo entre las salidas de 0.2 dB. Resultado obtenidos anteriormente ya que el valor de anchura obtenido en la simulación coincide con el valor que se obtiene teóricamente.

Ancho de banda del MMI para guías de $0.3 \mu\text{m}$ y una separación de $1.3 \mu\text{m}$

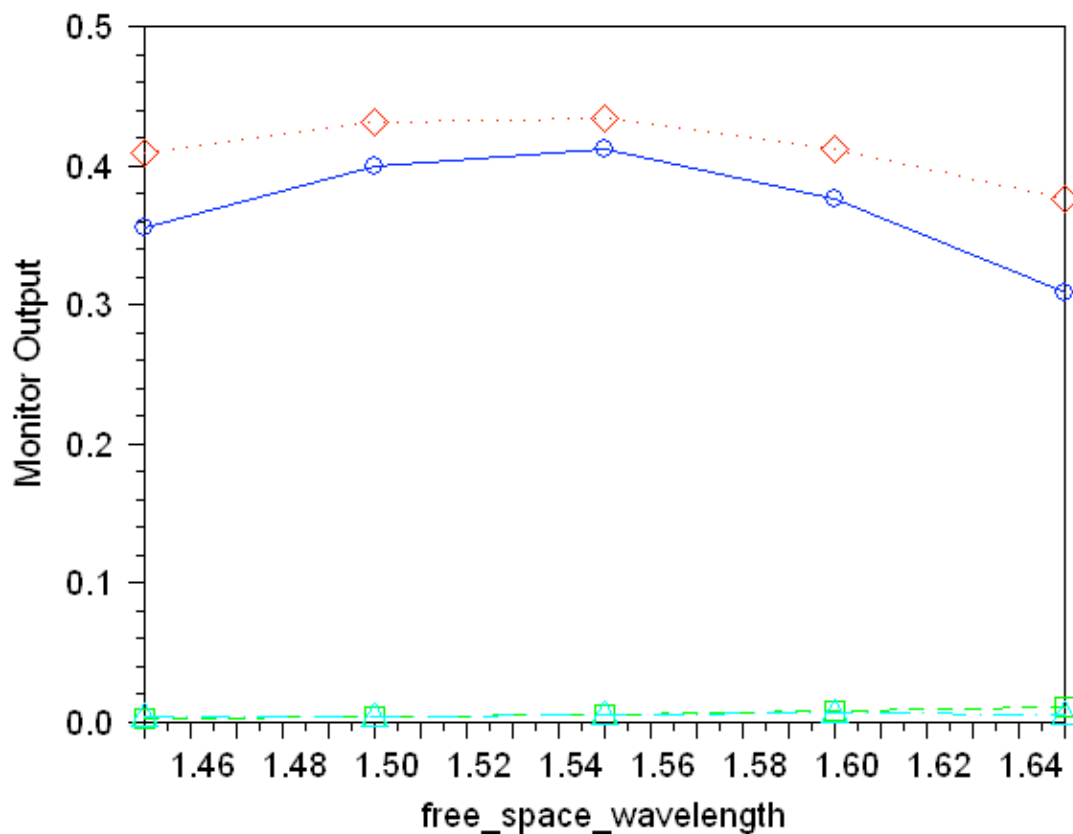


Figura 3.24: Ancho de banda del MMI 2x2 con guías de $0.3 \mu\text{m}$ La traza roja corresponde al puerto de la derecha, mientras que la azul corresponde al de la izquierda. Las trazas en azul claro (puerto de entrada izquierdo) y verde (puerto derecho) corresponden a la potencia reflejada.

En la figura 24 vemos que el ancho de banda es diferente entre la guía derecha y la guía izquierda. Vemos como la respuesta para la guía derecha se mantiene siempre por encima (hablando en términos de potencia acoplada), durante todo el rango del longitudes de onda. También podemos observar, que para las 2 salida, la respuesta es una curva bastante “plana”, lo cual no dice que el MMI dispone de un gran ancho de banda.

Se puede observar que la potencia reflejada a la entrada es prácticamente nula, aunque esta va aumentando conforme vamos aumentando la longitud de onda, es decir, que aumenta cuando disminuye la frecuencia.

- **Guías de 0.5 μm (multimodo 2D)**

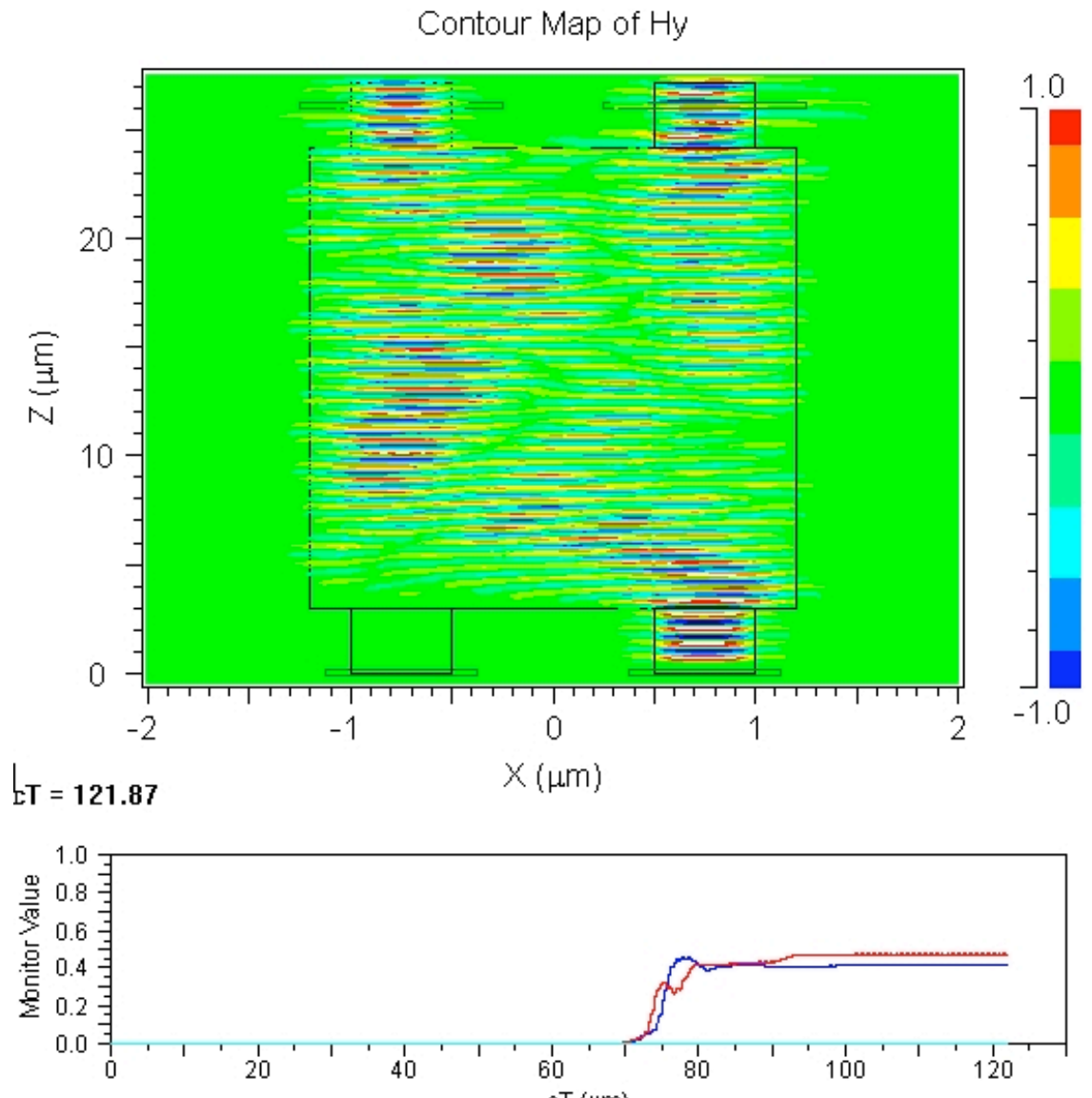


Figura 3.25: Distribución de campo en el interior del MMI 2x2 con guías de 0.5 μm (multimodo)

En este caso, vemos que la distribución de campo en el interior del dispositivo, es similar al caso anterior, ya que como veremos a continuación, las dimensiones teóricas obtenidas para este caso, con guías multimodo, son las mismas que para el caso anterior, aunque con pequeñas puntualizaciones. No obstante, también

veremos que la potencia acoplada a la salida, es mayor debido a la mayor anchura de las guías de salida.

Optimización de la longitud (LMMI)

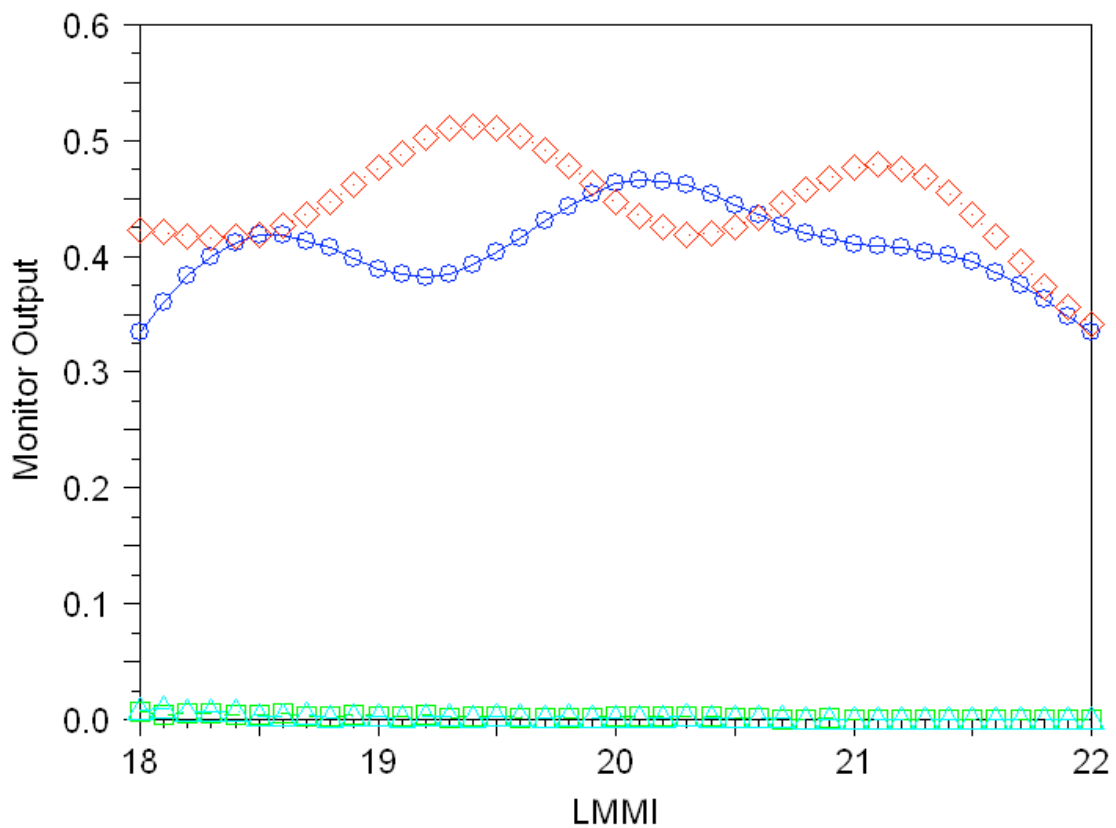


Figura 3.26: Variación de la potencia a la salida según la longitud del MMI. La traza roja corresponde al puerto de la derecha, mientras que la azul corresponde al de la izquierda. Las trazas en azul claro (puerto de entrada izquierdo) y verde (puerto derecho) corresponden a la potencia reflejada.

En este caso, podemos observar como se producen mayores variaciones en la potencia acoplada, aunque son suaves, se producen mas variaciones que en el caso anterior, con guías monomodo. También podemos observar en la Figura 26, como la potencia reflejada va disminuyendo a medida q aumentamos la longitud.

También podemos ver en la gráfica, que el punto óptimo por potencia acoplada y por el desbalanceo de potencia entre guías se encuentra a una longitud de 19.9 μm .

En ese caso, el desbalanceo entre las salidas, es prácticamente cero y se consigue alrededor de un 46% de potencia acoplada, lo que da unas pérdidas de exceso de 0.36 dB. El valor teórico obtenido para la longitud, es de 20 μm , por lo que no difiere mucho del resultado obtenido en la simulación.

Optimización de la anchura (WMMI)

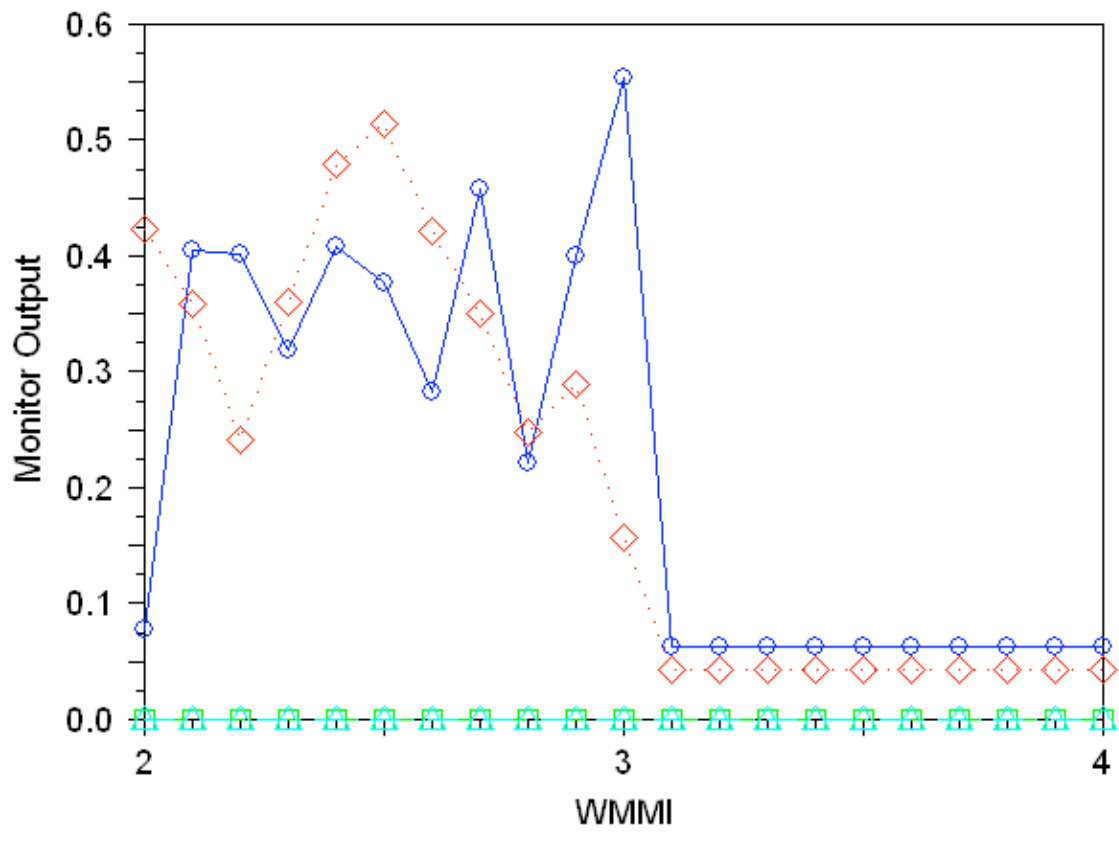


Figura 3.27: Variación de la potencia a la salida según la anchura del MMI. La traza roja corresponde al puerto de la derecha, mientras que la azul corresponde al de la izquierda. Las trazas en azul claro (puerto de entrada izquierdo) y verde (puerto derecho) corresponden a la potencia reflejada.

En la Figura 27 vemos como encontrar una buena relación entre la potencia acoplada a la salida y el desbalanceo entre las potencias de las guías de salida, va a resultar imposible debido a los cambios bruscos que se producen en la potencia acoplada cuando cambia la anchura del MMI. Por ello el mejor resultado en relación potencia de salida y desbalanceo, lo encontramos para una anchura de 2.4

μm , para el cual obtenemos un desbalanceo entre salidas de 0.68 dB y unas pérdidas de exceso de 0.5 dB.

En esta gráfica, se hace mas fácil de observar que a partir de una cierta anchura, la potencia acoplada es mínima y siempre constante a medida que vamos aumentando la anchura. Este efecto es debido a que a partir de un cierto valor de anchura el dispositivo es demasiado grande, y no se producen reflexiones.

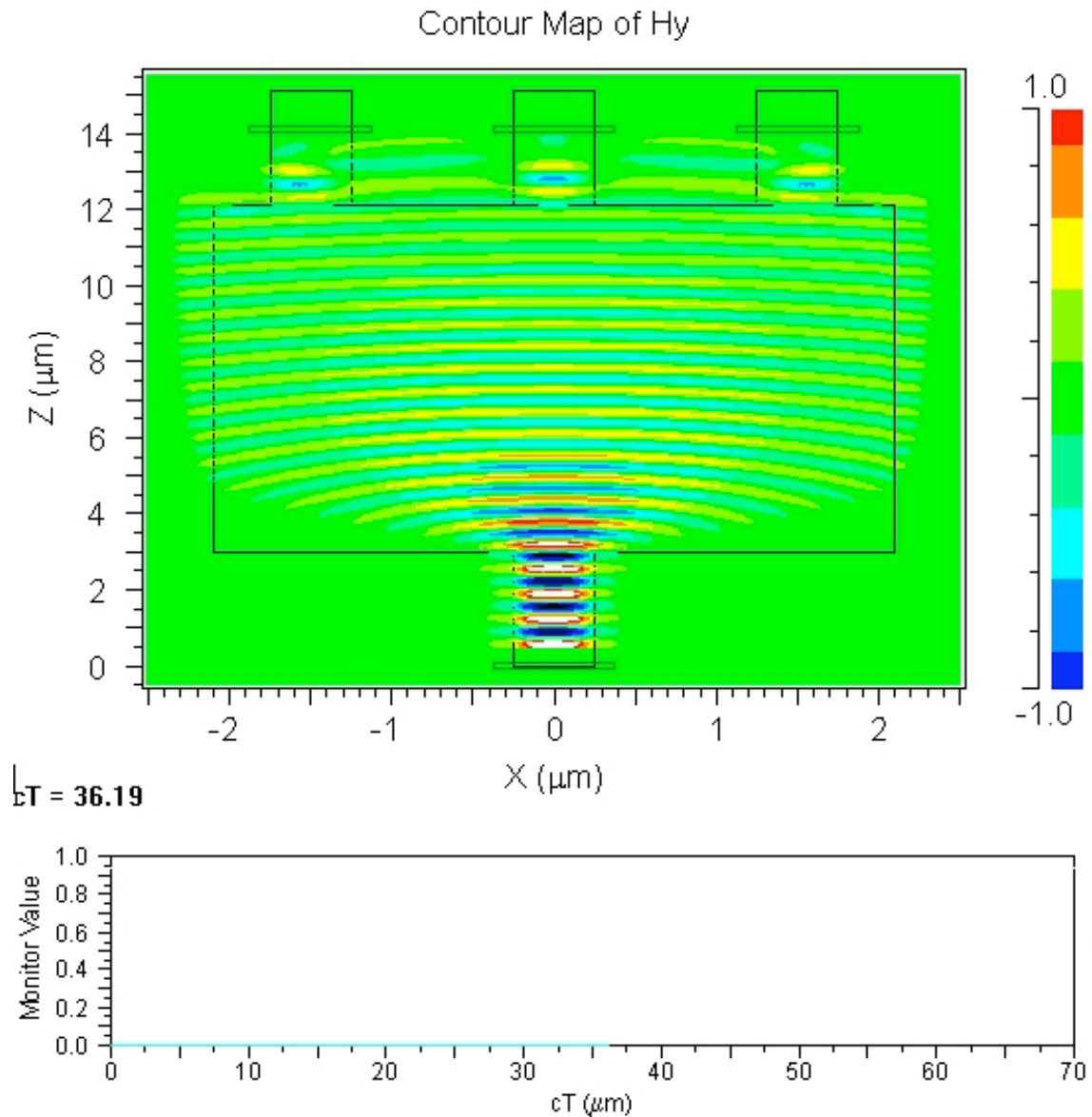


Figura 3.28: Efecto producido al ensanchar demasiado el MMI. Sobre un 1x3 resulta mas sencillo de ver debido a que la guía de entrada se encuentra centrada.

Como vemos en esta simulación, al ensanchar demasiado el MMI, no se producen reflexiones en los laterales y por lo tanto no hay autoimágenes de la señal de entrada. Así la potencia acoplada a las guías de salida, solo es la potencia que se expandió y propagó por el MMI y llega directamente a la salida. En este caso el MMI no cumple su función de generar autoimágenes, para acoplar la potencia a la salida.

Ancho de banda del MMI para guías de $0.5\mu\text{m}$ y una separación de $1\mu\text{m}$

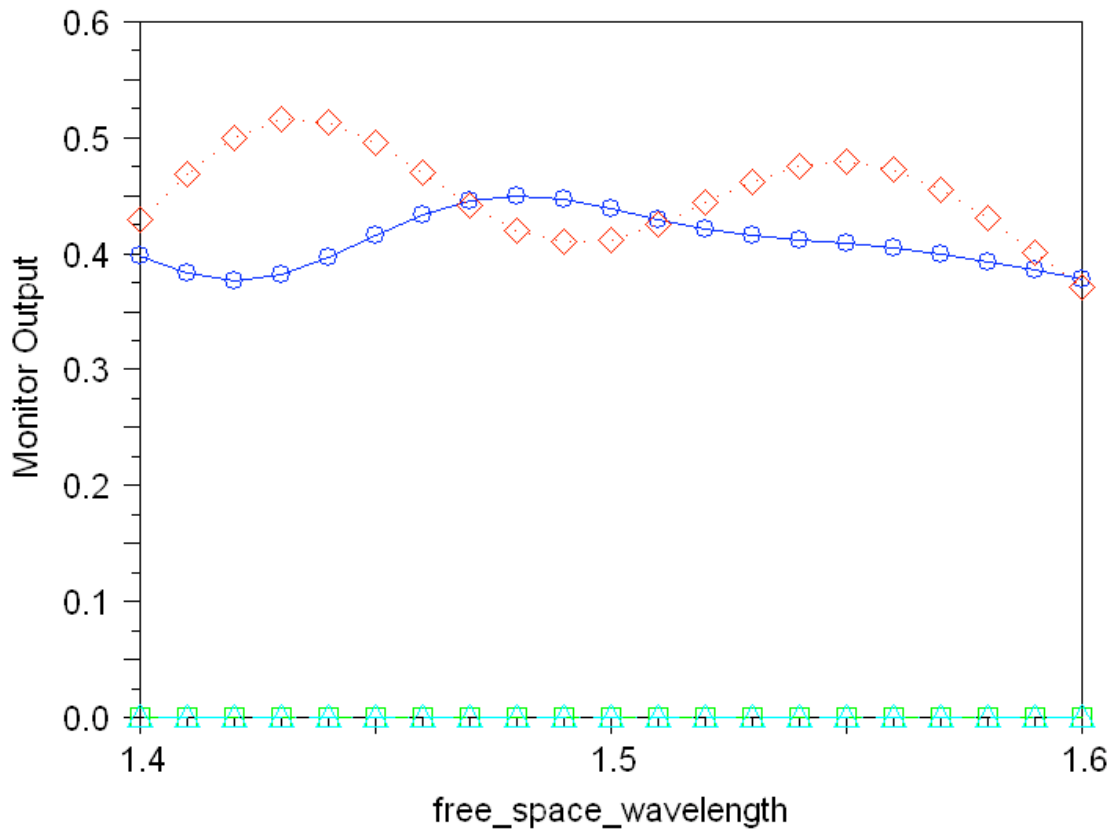


Figura 3.29: Ancho de banda del MMI 2x2 con guías de $0.5\mu\text{m}$. La traza roja corresponde al puerto de la derecha, mientras que la azul corresponde al de la izquierda. Las trazas en azul claro (puerto de entrada izquierdo) y verde (puerto derecho) corresponden a la potencia reflejada.

En la figura 29 vemos que el ancho de banda es diferente entre la guía derecha y la guía izquierda. Vemos como la respuesta para la guía derecha va oscilando entre el 50% y el 40% de potencia acoplada, durante todo el rango de longitudes de onda. Mientras que la guía izquierda oscila entre el 38% y el 45%, pero de una forma más

suave. Sin embargo, para la longitud de onda de diseño encontramos un 40% en la guía izquierda y un 45% en la guía derecha.

También se puede observar que la potencia reflejada a la entrada es prácticamente nula, para las 2 guías de entrada.

5. Conclusiones

Los divisores de potencia nanofotónicos basados en el interferómetro modal, disponen de un gran ancho de banda y unas pérdidas de inserción muy bajas, prácticamente nulas en algunos casos. Finalmente el tamaño de los dispositivos es del orden de los micrómetros, como veremos a continuación en una tabla resumen de los resultados obtenidos.

--	WMMI teórico	WMMI simulación	LMMI teórico	LMMI simulación	Potencia acoplada
1x2 guías monomodo	2.4	2.7	4.9	6	41%
1x2 guías multimodo	2.4	2.4	5.3	4.6	43%
1x3 guías monomodo	4.3	4.3	9.4	9.9	34% guía central 22% guías laterales
1x3 guías multimodo	3.7	4	9.6	9.6	24% en las 3 guías
2x2 guías monomodo	2.4	2.4	20	20.2	Derecha 40% Izquierda 41%
2x2 guías multimodo	2.3	2.4	20	19.9	Derecha 46% Izquierda 44%

Tabla 3.1: Todas la longitudes van expresadas en micrómetros. Para las guías de tres salidas, podremos elegir si queremos la misma potencia en las 3 salidas o distinta en función de lo que requiera la aplicación.

Como vemos en la tabla, a medida que aumentamos las salidas, aumenta el tamaño de los dispositivos, pero el aumento es aun mas considerable al aumentar el número de entradas. En los divisores de 1x3, podemos variar la potencia de las salidas según requiera nuestra aplicación, sin embargo existe un compromiso entre las guías laterales y la central, ya que si aumentamos la potencia en la guía central se reducirá la de las guías laterales, y si aumentamos la potencia en las guías laterales, reduciremos la potencia en la guía central.

Se ha evitado colocar en la tabla una columna con la potencia reflejada a la entrada del MMI debido a que esta resulta prácticamente nula en la mayoría de los casos.

Sin embargo, al ser la potencia de entrada prácticamente nula y no llegar a la potencia deseada (50% con 2 salidas y 33% con 3), el resto de las pérdidas son pérdidas de exceso, con potencia que se radia hacia el exterior del MMI y no se acopla a los puertos de salida, debido a las reflexiones que se producen en el interior del MMI.

Gracias a su gran ancho de banda, estos dispositivos pueden resultar útiles en un gran número de aplicaciones, ya que permite ser utilizado en un gran rango de frecuencias. Su pequeño tamaño permite su inclusión en la fabricación de varios microchips tanto todo-ópticos como híbridos (combinación electrónicos y ópticos).

Líneas futuras:

Este proyecto podría tener su continuidad realizando el mismo estudio que se ha hecho en este, pero con simulaciones en 3D y así poder comparar los resultados. Así como también se podrían realizar la fabricación de algún dispositivo para proceder después a su medición.

También se podría realizar el estudio de Tapers, para que haya una mejor adaptación entre los puertos, tanto de entrada como de salida, con el MMI y comprobar que de este modo, se pueden reducir la pérdidas de inserción y las pérdidas de exceso.

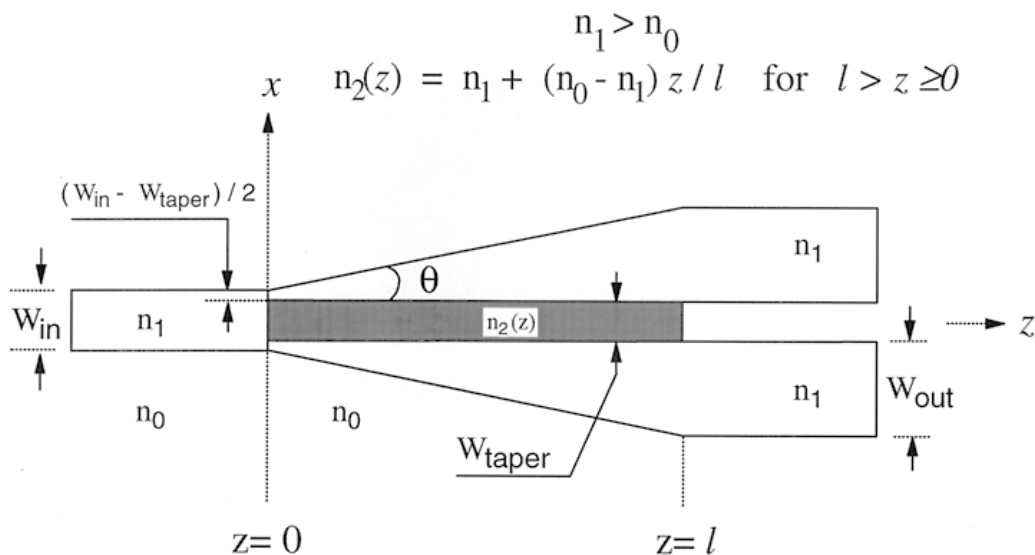


Figura 3.1: Ejemplo de taper, que puede servir para adaptar los puertos de entrada y salida al MMI.

6. Bibliografía

Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications, Lucas B. Soldano and Erik C. M. Pennings, *Member, IEEE*

Compact silicon-on-insulator-based multimode interference coupler with bilevel taper structure , Daoxin Dai, Jian-Jun He, and Sailing He

Efficient photonic crystal directional couplers, Morten Thorhauge,* Lars H. Frandsen, and Peter I. Borel Center for Communications, Optics and Materials, Technical University of Denmark, Building 345V, DK-2800, Kgs. Lyngby, Denmark

Improved performance of a silicon-on-insulator-based multimode interference coupler by using taper structures Yaocheng Shi a,b,* , Daoxin Dai a,b,c, Sailing He a,b,c:

a) Centre for Optical and Electromagnetic Research, State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Joint Research Center of Photonics of the Royal Institute of Technology, Sweden

b) Zhejiang University, Zhejiang University, Yu-Quan, Hangzhou 310027, PR China

c) Division of Electromagnetic Theory, Alfvén Laboratory, Royal Institute of Technology, S-100 44 Stockholm, Sweden

A Low-Loss and Compact Waveguide Y-Branch Using Refractive-Index Tapering M. H. Hu, J. Z. Huang, R. Scarmozzino, M. Levy, and R. M. Osgood, Jr., *Fellow, IEEE*

Estructuras funcionales básicas de circuitos fotónicos, Tema 3 de la asignatura de Nanofotónica impartida por la U.P.V. en el Master en Tecnologías, Sistemas y Redes de comunicaciones. Pablo Sanchis Kilders

Tema 6: Cristales fotónicos: fundamentos, dispositivos y aplicaciones , Tema 6 de la asignatura de Nanofotónica impartida por la U.P.V. en el Master en Tecnologías, Sistemas y Redes de comunicaciones. Alejandro Martínez

