



## 1 Introducción

En este taller de varias prácticas experimentales, se analiza la aplicación de la fotónica en fibra óptica, con un equipo de sistema WDM (Wavelength Division Multiplexing) marca Optosci.

El objetivo principal, es realizar mediciones con longitudes de onda de uso comercial y elementos comunes en redes ópticas actuales. Se realizan comparaciones entre valores teóricos y resultados experimentales. El sistema además demuestra la revolución en las comunicaciones por fibra óptica. Los participantes adquieren un conocimiento en sistemas WDM por medio de:

- Mediciones de la pérdida de inserción directividad, retro reflexión/pérdida de retorno desde un acoplador, multiplexores en longitud de onda, aislador, circulador y demultiplexores de longitud de onda.
- La determinación de razones de aislamiento/extinción en varios componentes ópticos.
- La respuesta de banda angosta de componentes ópticos.

## 2 Sistemas WDM (Wavelength division multiplexing)

El santo grial original de las comunicaciones sobre fibra óptica, eran las masivas razones de datos potencialmente posibles en principio, al usar una frecuencia portadora óptica. Este impulso inicial del desarrollo de las comunicaciones por fibra óptica, fue reemplazada por la economía dictada en largas distancias, al usar menos repetidores, debido a la baja pérdida de transmisión, comparado con el cable coaxial (de 2 km a 3 km para el cable coaxial y más de 100 km para la fibra óptica).

La modulación directa de diodos láser está limitada a cerca de 10 Gb/s y la modulación externa usando fotónica integrada de niobato de litio, brinda hasta 40 Gb/s. Pero, debido a problemas de dispersión significativa a 40 Gb/s, la mayoría de sistemas instalados operan a 10 Gb/s.

WDM ofrece la ventaja de múltiples portadores ópticos, cada uno hasta 10 Gb/s, y se ha reconocido como la ruta preferida para razones de alta velocidad. La barrera al principio fue el repetidor optoelectrónico, que se solucionó con los EDFAs, o amplificadores de fibra contaminada con erbio, los cuales amplifican un número de señales simultáneamente, haciendo viable técnicas comerciales para incrementar las razones de bit.

El uso de WDM requiere de nuevos componentes que permitan la multiplexación, demultiplexación y enrutamiento. Además, se debió adaptar tecnología existente a nuevas especificaciones como acopladores bidireccionales de fibra fundida y multiplexores usados en EDFA, o aisladores de alto rechazo y circuladores, usados para eliminar realimentación en láseres.

WDM es un sistema equivalente a FDM en comunicaciones electrónicas, de este modo la capacidad de información de un canal simple, se multiplica por el número de canales usados.

En fotónica, el portador óptico lo brinda un diodo láser de realimentación distribuida DFB, que emite a una longitud de onda específica, y modulación de información en el portador que se logra ya sea en forma directa o externa.

La figura 1 es un diagrama esquemático de un sistema WDM genérico. Se utilizan varios LD DFB, cada uno a una longitud de onda particular, y capaz de ser modulado hasta 10 Gb/s. Generalmente las longitudes usadas están espaciadas igualmente, y separadas por más del ancho de banda de la información de la modulación aplicada.

Las longitudes de onda portadoras, se combinan en una fibra óptica simple usando un multiplexor (WDM) y para  $n$  láseres, se logra  $n$  veces 10 Gb/s. En el receptor, cada portadora es extraída a su propio detector por medio de un demultiplexor (WDDM).

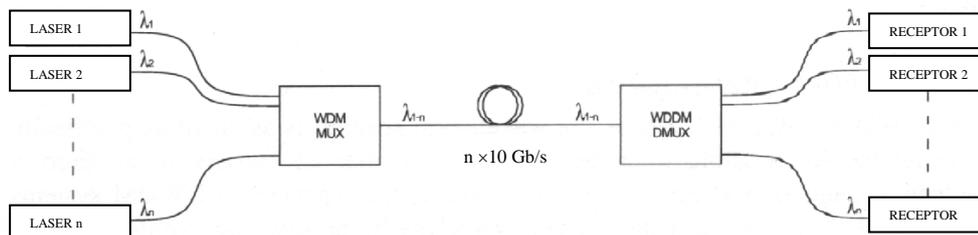


Figura 1 Diagrama esquemático de un sistema WDM

La figura 2 muestra la operación en mayor detalle, usando efectos de añadido extracción, con filtros ópticos que rechazan una banda de longitudes de onda, y permiten el paso de otra.

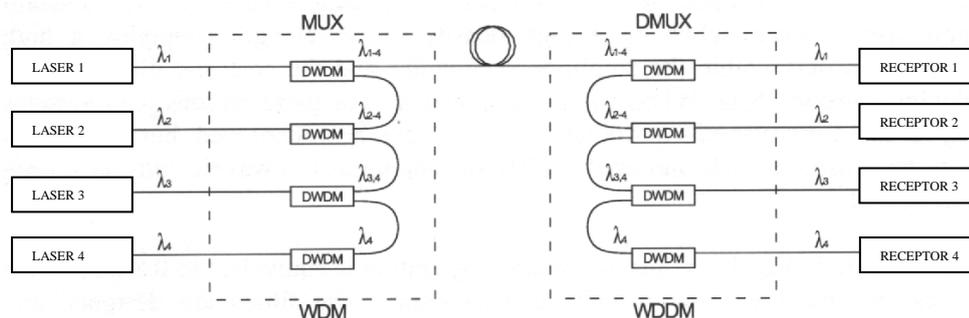


Figura 2 Uso en WDM de OADM (Optical Add-drop Multiplexer)

Los sistemas DWDM (WDM denso) utilizan un espaciado de longitudes de onda, tan pequeño como es posible. Los amplificadores EDFA se usan en conjunto estos sistemas, con tantos portadores ópticos como sea posible, dentro del ámbito de ganancia en las bandas C & L.

Las longitudes de onda están definidas por las normas ITU (International Telecommunications Union), con una separación de longitudes de onda de 0,8 nm (100 GHz), cerca de 1550 nm, incluyendo el canal 34 ( $\lambda = 1550,12$  nm), y se permiten otros espaciados múltiples de 0,8 nm.

Los filtros de añadido y extracción en WDM, tienen una banda de paso igual al espaciado de longitud de onda, y entre más angosta la banda de paso mayor el reto de fabricación y el costo.

Un espaciado de 100 GHz ofrece compromiso útil entre alta densidad de longitudes de onda, costo y dificultad de fabricación de filtros de banda angosta WDM.

La mayoría de los sistemas operativos, usan 32 longitudes de onda a 100 GHz de espaciado, pero hay también sistemas con 50 GHz y 25 GHz de espaciado, alcanzando 120 longitudes de onda.

En los sistemas DWDM a 100 GHz, la separación es 0,8 nm y la ventana de bandas de paso con baja pérdida, es solo 0,4 nm. Los filtros se diseñan y fabrican para que la longitud de onda central de ITU, esté en el centro de la banda de paso.

Cuando el sistema está en operación, esto significa que la longitud de onda no debe derivar más de  $\pm 0,2$  nm. El coeficiente de sintonización de la longitud de onda con la temperatura, es cerca de 0,08 nm/°C, lo que implica que la temperatura del láser debe estar controlada a cerca de  $\pm 2,5$  °C.

Esto se logra al colocar el diodo láser sobre un dispositivo de control termo eléctrico (TEC), y también con el uso de un sistema de referencia en frecuencia.

Estos requerimientos establecen altas tolerancias en la fabricación de láseres, para acoplarse a las longitudes de onda objetivo, con una ajustada tolerancia en las temperaturas permitidas para operación. Todo esto significa altos costos, y complejidad técnica y operacional, pero es valioso para lograr altas razones de datos, sobre largas distancias (como enlaces transoceánicos o redes de área amplia WAN).

### 3 Teoría de los componentes

#### Acoplador simple de fibras ópticas fundidas

A través de un principio de calentamiento se unen dos fibras ópticas en una zona de contacto, figura 3, creando un acoplador  $2 \times 2$ .

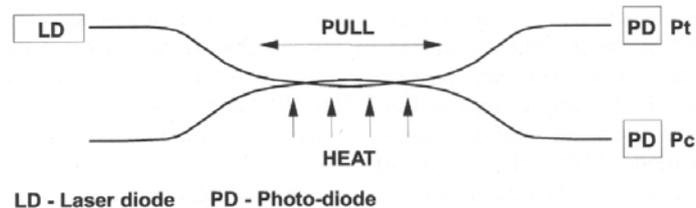


Figura 3 Fabricación de acoplador de fibras ópticas fundidas

Algunas especificaciones son:

**Razón de acople  $CR$  (%):** razón de la potencia (flujo radiante) acoplada en un puerto de salida respecto a la potencia total de salida. Acopladores simples permiten razones desde 1 % a 99 % con una tolerancia establecida (ejemplo  $\pm 1$  %) a la longitud de onda de operación.

$$CR = \frac{P_c}{P_r + P_c} \times 100\%$$

**Pérdida de exceso  $EL$  (dB):** razón de la potencia (flujo radiante) total de salida respecto a la potencia total de entrada, y representa la pérdida total por el dispositivo:

$$EL = -10 \log_{10} \frac{P_r + P_c}{P_i}$$

Las pérdidas típicas están entre 0,1 dB a 0,2 dB.

**Pérdida de inserción  $IL$  (dB):** razón de la potencia (flujo radiante) de salida en cualquier puerto, usualmente el brazo acoplado, a la potencia total de entrada. Este cifra toma en cuenta la separación de potencia así como  $EL$ . Para el brazo acoplado:

$$IL = -10 \log_{10} \frac{P_c}{P_i}$$

El valor de  $IL$  depende fuertemente de la razón de acople. Por ejemplo para un acoplador de 50 % (3 dB), el valor de  $IL$  al brazo acoplado es cerca de 3,1 dB (incluye 0,1 dB de  $EL$ ).

**Pérdida de retorno  $RL$  (dB):** razón de la potencia (flujo radiante) retornada a cualquier puerto a la potencia inyectada. Para un puerto que refleja  $P_r$ :

$$RL = -10 \log_{10} \frac{P_r}{P_i}$$

El valor de  $RL$  es típicamente entre 40 dB a 60 dB.

#### Otros componentes

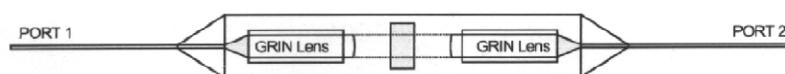


Figura 4 Componente micro óptico

Es un componente para conectar fibras ópticas por medio de lentes GRIN y tiene un recubrimiento antirreflexión, para minimizar reflexiones y pérdidas.

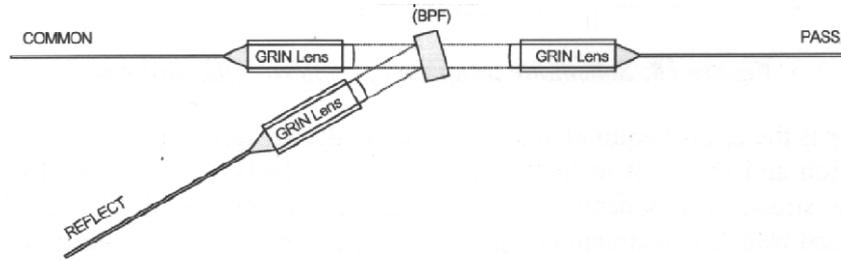


Figura 5 Estructura de WDM/WDDM

Se conocen como multiplexores ópticos de añadido extracción (OADM), e incorporan un filtro de interferencia que permite el paso de una banda angosta de longitudes de onda y refleja el resto.

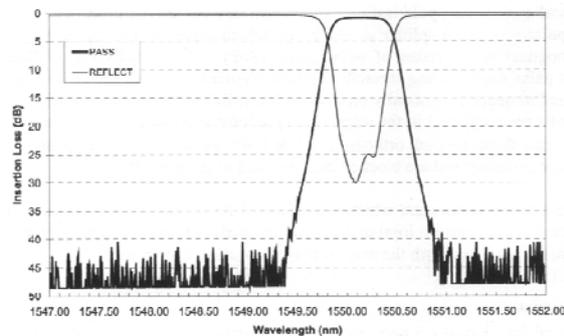


Figura 6 Respuesta espectral de un dispositivo OADM

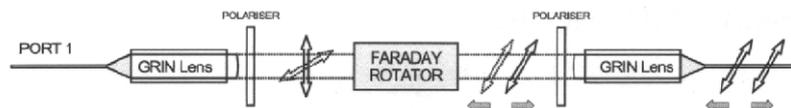


Figura 7 Aislador óptico

Es un componente que permite el paso de radiación óptica en una dirección, con baja pérdida, y lo bloquea en dirección contraria. Sirve para protección de diodos láser de retroreflexiones que surgen en diferentes componentes en la conexión óptica.

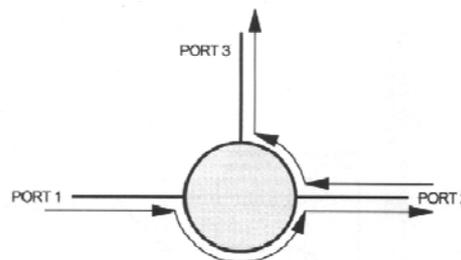


Figura 8 Circulador

En un componente de tres puertos que permite que la potencia que entra por un puerto 1, salga por un puerto 2 y la potencia que entra por un puerto 2 salga por un puerto 3, pero la potencia incidente en un puerto 3 por el puerto 1 o 2 (aislados).

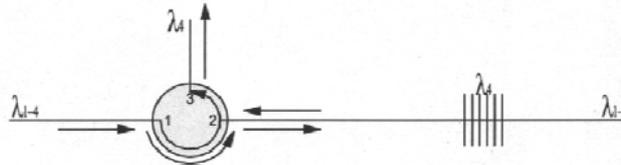


Figura 9 Retícula de Bragg usada como multiplexor de caída de canal en conjunto con un circulador

Una fibra óptica de retícula de Bragg (FBG), presenta una variación en el índice de refracción, que crea una perturbación que actúa como sitio de reflexión/esparcimiento, lo que origina una longitud de onda relacionada al periodo de la retícula, en la selección de reflexión. Esta es afectada por la temperatura y la presión en la fibra óptica de Bragg. Se usa junto a un circulador como OADM, para un sistema de comunicación.

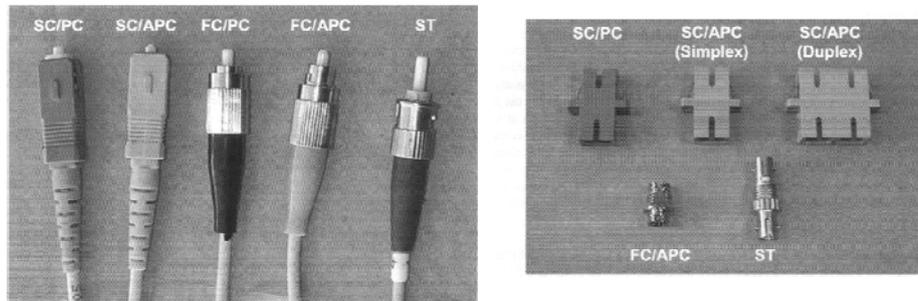


Figura 10 Conectores y adaptadores SC, PC y ST

Los conectores sirven para la unión semi permanente entre dos extremos de fibras óptica y existen los adaptadores de conexión apropiados.

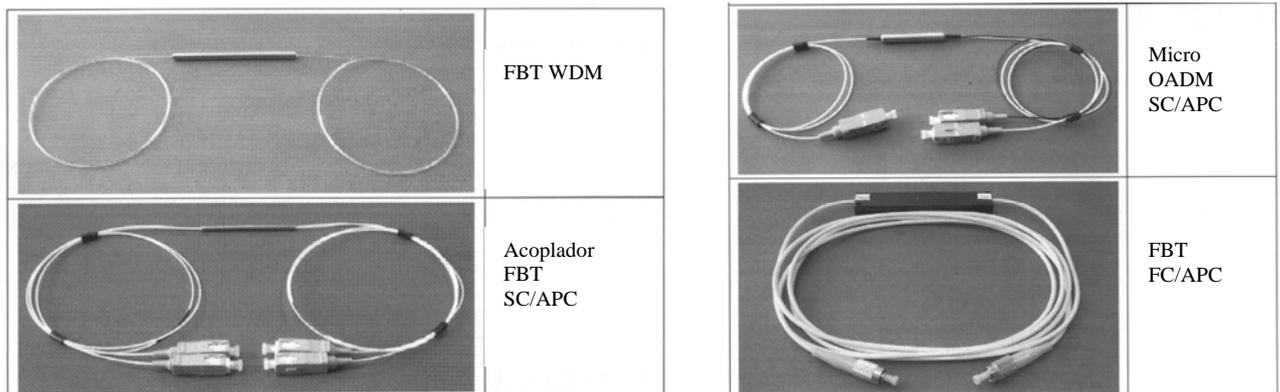


Figura 11 Componentes fotónicos prácticos



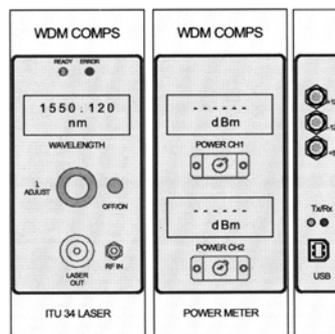
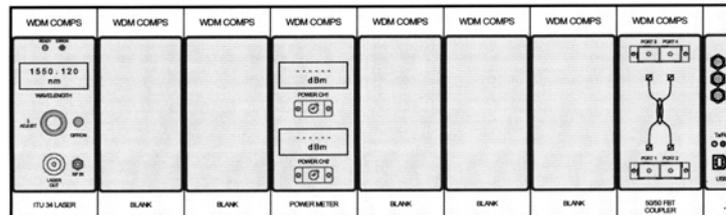
### 3 Descripción del equipo

El equipo de laboratorio consiste en una serie de módulos: un juego básico, componentes WDM y tres módulos de extensión, no solo para estudiar del sistema WDM, sino adquirir experiencia práctica en la investigación, análisis y características de los componentes de fibra óptica, diodos láser, sistemas WDM, y retículas de Bragg.

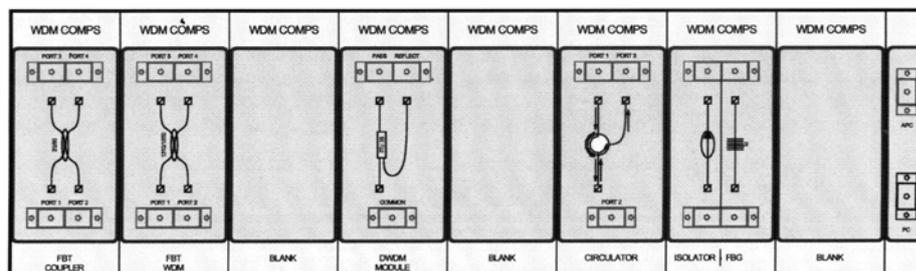
Los componentes WDM permiten la medición de las pérdidas de inserción, retroreflexión y pérdidas de retorno para los puertos de sus componentes.

El módulo de componentes WDM consiste de:

- Un módulo de láser ITU DFB de rejilla con manejadores de precisión de corriente y temperatura.
- Dos medidores de potencia óptica de InGaAs con conectorización SC y en unidades dBm.
- Módulos de componentes de fibra óptica con conectorización SC: acoplador FBT, WDM FBT, aislador, circulador, OADM, rejilla de Bragg, conectores PC y APC.
- Chasis de 3 unidades de rack de 19 pulgadas y todos los cordones de fibra óptica necesarios.
- Chasis de 3 unidades de rack de 19 pulgadas con fuente de poder integrada, interfaz USB, todas las interconexiones eléctricas necesarias y cables RF.



Módulos de electrónica y medidores



Módulos de componentes ópticos

**Prácticas experimentales (más detalles de cada práctica se brindan en el laboratorio):**

En estas prácticas experimentales, se obtienen importantes parámetros de desempeño de ciertos componentes fotónicos, usados en redes ópticas en general y redes WDM en particular. Se obtienen algunas conclusiones interesantes sobre los límites requeridos en varios parámetros claves.

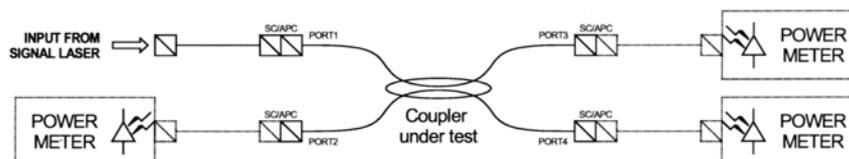
Las mediciones se realizan con un diodo láser que emite cerca de 1550 nm.

1. Caracterización del diodo láser. Utilizar un control por computador para presentar la caracterización del diodo láser DFB.
2. Caracterización de acoplador FBT (Fused biconical taper) 50/50 y establecimiento de configuración básica de medición. Detalles para la medición y caracterización.

FBT Coupler Characterisation		
Schematic & Definitions:		
Parameter	Linear Measurements (W)	Logarithmic Measurements (dBm)
Insertion Loss	$-10 \log_{10} \left[ \frac{P_{3,4}}{P_1} \right] dB$	$[P_1 - P_{3,4}] dB$
Coupling Ratio	$\left[ \frac{P_4}{P_3 + P_4} \right] \times 100\%$	$\frac{10^{\left(\frac{P_4}{10}\right)}}{10^{\left(\frac{P_3}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{P_4}{10}\right)}} \times 100\%$
Excess Loss	$-10 \log_{10} \left[ \frac{P_3 + P_4}{P_1} \right] dB$	$-10 \log_{10} \left[ \frac{10^{\left(\frac{P_3}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{P_4}{10}\right)}}{10^{\left(\frac{P_1}{10}\right)}} \right] dB$
Directivity	$-10 \log_{10} \left[ \frac{P_2}{P_1} \right] dB$	$[P_1 - P_2] dB$
Return Loss	$-10 \log_{10} \left[ \frac{P_5}{P_1} \right] dB$	$[P_1 - P_5] dB$

En esta práctica se determinan las pérdidas de inserción, pérdidas de exceso, razón de acople y directividad de un acoplador FBT. Usar el mismo medidor de potencia (flujo) radiante, (CH1 o CH2) en todas las mediciones para eliminar variaciones.

1. Medir la potencia radiante de emisión del láser. Despreciar pérdidas del cordón.
2. Conectar el equipo como se muestra en la Figura .1 y medir la potencia radiante emitida por los puertos 2, 3 y 4 del acoplador.

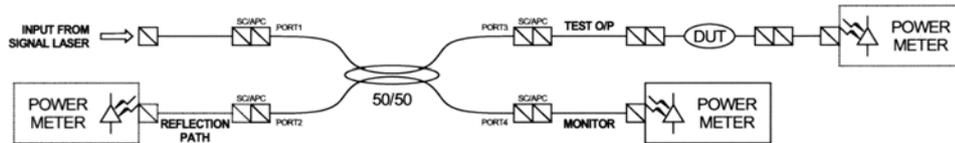


**Figura 2.1 Conexiones para el experimento 1**

3. Calcular los parámetros incluidos en la tabla anterior.

3 Uso de acoplador FBT como parte del sistema de medición. Con el objetivo de tener una salida de monitor y considerar las reflexiones, conectar el circuito como se muestra en la Figura 3.1 **Circuito de pruebas con salida de monitor**

Conectores y terminadores. .1.



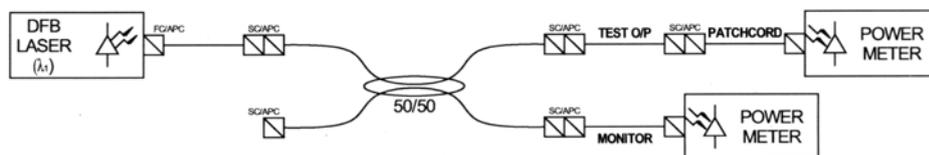
**Figura 3.1** Circuito de pruebas con salida de monitor

4. Conectores y terminadores. Notación y ecuaciones que se utilizarán para los distintos cálculos de esta sección.

Patchcord		
Schematic & Definition:		
Parameter	Linear Measurements (W)	Logarithmic Measurements (dBm)
Insertion Loss	$-10 \log_{10} \left[ \frac{P_2}{P_1} \right] dB$	$[P_1 - P_2] dB$
Backreflection	$-10 \log_{10} \left[ \frac{P_3}{P_1} \right] dB$ $\left[ \frac{P_3}{P_1} \right] \times 100\%$	$[P_1 - P_3] dB$

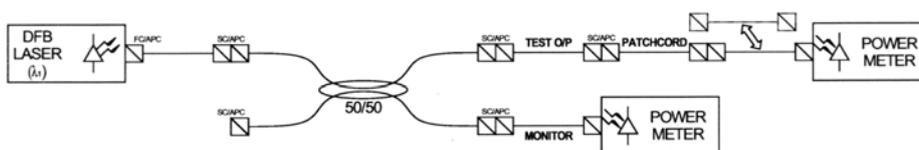
En este ejercicio se miden las pérdidas de inserción y pérdidas de retorno (*retroreflexión*) de conectores y las retroreflexiones de terminaciones PC y APC, como se definen en la tabla anterior.

1. Medir las pérdidas de inserción para múltiples conectores y cordones. Para esto utilice de referencia la Figura 4.1 .1



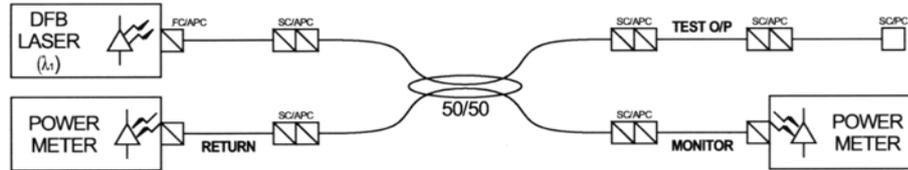
**Figura 4.1** Esquema para medición de pérdidas por inserción y retroreflexiones

2. Conectar un segundo cordón y realizar mediciones de potencia, Figura 4.1 .2



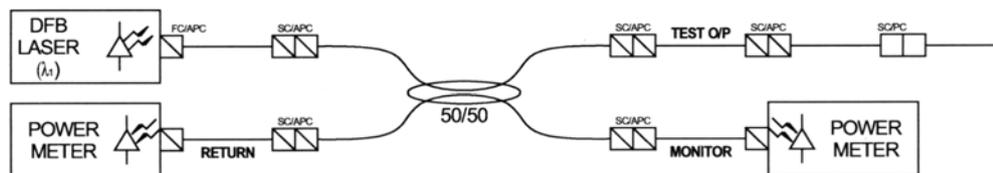
**Figura 4.2** Medición de pérdidas por inserción de cordones adicionales

- Medir la retroreflexión (pérdida de retorno) de un conector “plano” pulido. Para esto, utilice la conexión de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Realizar las mediciones para conectores PC y APC



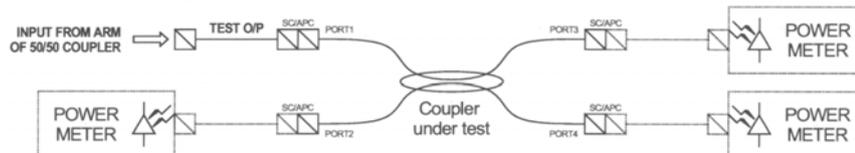
**Figura 4.3 Medición de retro reflexión desde terminación PC sin terminar**

- Repetir la medición anterior pero conectando el cordón sin terminar al puerto terminado del panel del equipo adecuadamente (PC o APC, según sea el caso).



**Figura 4.4 Medición de retro reflexión desde terminación PC con terminación**

- Acoplador FBT. Se determinan IL, EL, CR y directividad de un acoplador FBT a 1550 nm.

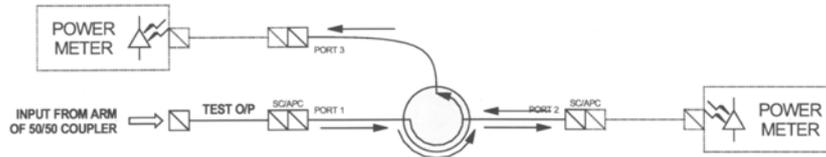


**Figura 5.1 Medición de características de acoplador**

- Circuladores. En este experimento se miden los parámetros significativos del puerto 3 de un circulador.

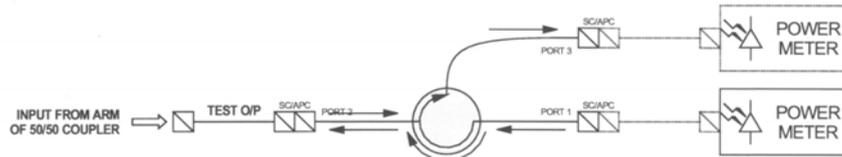
Circulator Specifications		
Schematic & Definitions:		
Parameter	Linear Measurements (W)	Logarithmic Measurements (dBm)
Insertion Loss (1>2)	$-10 \log_{10} \left[ \frac{P_{1>2}}{P_1} \right] dB$	$[P_1 - P_{1>2}] dB$
Insertion Loss (2>3)	$-10 \log_{10} \left[ \frac{P_{2>3}}{P_2} \right] dB$	$[P_2 - P_{2>3}] dB$
Isolation (2>1)	$-10 \log_{10} \left[ \frac{P_{2>1}}{P_2} \right] dB$	$[P_2 - P_{2>1}] dB$
Isolation (3>2)	$-10 \log_{10} \left[ \frac{P_{3>2}}{P_3} \right] dB$	$[P_3 - P_{3>2}] dB$
Directivity (1>3)	$-10 \log_{10} \left[ \frac{P_{1>3}}{P_1} \right] dB$	$[P_1 - P_{1>3}] dB$
Directivity (3>1)	$-10 \log_{10} \left[ \frac{P_{3>1}}{P_3} \right] dB$	$[P_3 - P_{3>1}] dB$
Return Loss (x=1,2,3)	$-10 \log_{10} \left[ \frac{P_{x>x}}{P_x} \right] dB$	$[P_x - P_{x>x}] dB$

1. Caracterizar el puerto 1 con mediciones en los puertos 2 y 3. Determinar pérdida de inserción y directividad.



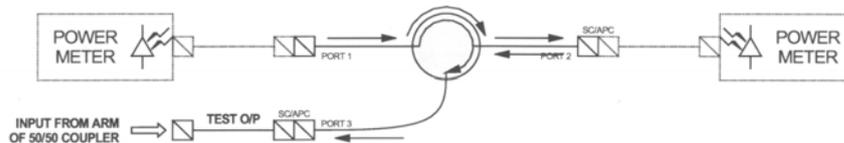
**Figura 6.1 Caracterización del puerto 1**

2. Caracterizar el puerto 2 con mediciones en los puertos 1 y 3. Determinar pérdida de inserción y aislamiento.



**Figura 6.2 Caracterización del puerto 2**

3. Caracterizar el puerto 3 con mediciones en los puertos 1 y 2. Determinar pérdida de directividad y aislamiento.



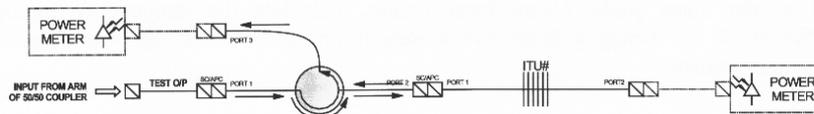
**Figura 6.3 Caracterización del puerto 3**

- 7 Fibras ópticas de retículas de Bragg. Se obtienen sus parámetros de desempeño.

Fibre Bragg Grating		
<b>Schematic &amp; Definition:</b> <p> <math>P_o(\lambda_R) + P_o(\lambda_T)</math> INPUT  <math>P_R(\lambda_R) + P_R(\lambda_T)</math> REFLECT  <math>P_T(\lambda_T) + P_T(\lambda_R)</math> TRANSMIT            ITU #         </p> <p>(Note: ITU# is the REFLECT channel)</p>		
Parameter	Linear Measurements (W)	Logarithmic Measurements (dBm)
Insertion Loss (Transmit)	$-10 \log_{10} \left[ \frac{P_T(\lambda_T)}{P_o(\lambda_T)} \right] dB$	$[P_o(\lambda_T) - P_T(\lambda_T)] dB$
Reflectivity	$\left[ \frac{P_R(\lambda_R)}{P_o(\lambda_R)} \right] \times 100 \%$	



Al menos 2 longitudes de onda se usan con FBG, y para DWDM propósitos se especifican 2 longitudes de onda ITU (100 GHz) adyacentes. Para limitar retro reflexiones al DFB, se utiliza la figura 7.1 para medir la reflexión y la transmisión de FBG.



**Figura 7.1 Caracterización de fibra óptica de retícula de Bragg**

Discutir y obtener conclusiones de los resultados.

### **Bibliografía**

Optosci. (2008). *ED-COM: WDM components laboratory manual*. Glasgow: OptoSci Limited.