

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Estrategias de control en fase sobre interferómetro óptico para conmutar sistemas de alta velocidad

Leonardo Ignacio Faúndez Miranda

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Patrocinante:
Dr. Jaime A. Cariñe C.

Comisión:
Ricardo Bustos.
Gabriel Saavedra.

Concepción, Septiembre de 2022

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Jaime A. Cariñe C.

Estrategias de control en fase sobre interferómetro para conmutar sistemas de alta velocidad

Leonardo Ignacio Faúndez Miranda

Informe de Habilitación Profesional
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Concepción, Septiembre de 2022

Resumen

Las fibras ópticas han sido un elemento importante en comunicaciones, ya que poseen características óptimas que permiten enlazar sistemas de comunicaciones, con menor atenuación y mayor ancho de banda respecto a otros medios de transmisión (como por ejemplo el cable metálico). Esta particularidad se está utilizando para generar sistemas de comunicaciones seguras, utilizando arquitecturas que permiten medir interferencia óptica, configuraciones que son conocidas como interferómetros. Los interferómetros construidos con fibras ópticas presentan ruido de fase. El ruido de fase afecta en la calidad de las señales en el interferómetro, las cuales son medidas con parámetros conocidos como visibilidad en la interferencia óptica y Crosstalk entre caminos. El ruido de fase ha sido estabilizado con estrategias continuas e intermitentes, utilizando diferentes longitudes de onda para la eliminación del ruido de fase. Un novedoso método de estabilización controla el ruido de fase, utilizando una técnica que inserta un láser de control de forma inversa por el interferómetro, permitiendo transmitir señales de forma directa. Este método podría ofrecer un control continuo utilizando un láser de control con la misma longitud de onda que la señal directa a operar dentro de un interferómetro con una alta calidad.

En este trabajo se busca implementar un control inverso para eliminar el ruido de fase sobre un interferómetro de 4 brazos, para manipular señales ópticas con alta calidad. Para realizar esto, se utilizaron las dependencias de la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC) y el Instituto Milenio de Investigación en Óptica (MIRO) en la Universidad de Concepción (UdeC). En la UCSC se realizó el montaje de un Interferómetro Mach-Zehnder (MZI) de 2x2, y en la UdeC se operó sobre un MZI de 4x4 para evaluar Crosstalk y Visibilidad, con una previa calibración de los elementos que componen un MZI.

Entre nuestros resultados principales tenemos que, si el control directo e inverso es aplicado de forma independiente sobre un interferómetro de 4 brazos, se obtienen visibilidades superiores al 97% y Crosstalk promedio aproximado a -20[dB]. Además, demostramos que el control puede ser aplicado en toda la banda C (1530 a 1570 nm). Por otro lado, no se pudo aplicar el control inverso en conjunto con la señal a manipular debido a problemas en polarización del sistema. Sin embargo, con esta estrategia se logró evaluar el impacto en la visibilidad al controlar con la misma longitud de onda en forma continua sobre un sistema de 2 brazos reportando un decaimiento cuadrático en la visibilidad a medida que se separa de la longitud de onda.

Dedicado a mis padres, Elizabeth y Juan
y a mis hermanas Katherine y Jocelyn

Agradecimientos

Quiero agradecer al Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondecyt N11201348) y al Instituto Milenio de Investigación en Óptica (MIRO) por facilitarme el uso de los equipos experimentales presentes en los laboratorios y el financiamiento para poder realizar las actividades en la realización de esta tesis. También al profesor Jaime Cariñe por brindarme la oportunidad de tomar una tesis que aborda aspectos tanto teóricos como prácticos y por la buena disponibilidad al momento de realizar consultas respecto de esta. Finalmente, agradecer a mis padres, los cuales fueron pilares fundamentales en el proceso de enseñanza universitaria, brindándome apoyo moral y financiero, al igual que mis hermanas que siempre estuvieron presentes en este proceso de mi vida.

Abreviaciones

Mayúsculas

BS	: Beam-splitter.
MZI	: Interferómetro Mach-Zehnder.
SMF	: Fibra monomodo.
MMF	: Fibra multimodo.
MCF	: Fibra multinúcleo.
SDM	: Multiplexación por división espacial.
PM	: Modulador de fase.

Contenido

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	7
1.2. ESTADO DEL ARTE	7
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	8
1.4. OBJETIVO GENERAL	8
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.6. ALCANCES	8
1.7. TEMARIO.....	8
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. INTRODUCCIÓN A SISTEMAS ÓPTICOS	9
2.2. GENERACIÓN Y DETECCIÓN DE LUZ	11
2.2.1 Caracterización Láser utilizando el fotodetector	13
2.3. FIBRAS ÓPTICAS	15
2.3.1 Tipos de fibra óptica.....	16
2.4. DISPOSITIVOS EN FIBRAS ÓPTICAS	17
2.4.1 Beam-splitter (BS) 2x2.....	17
2.4.2 Beam-Splitter (BS) 4x4	19
2.4.3 Controlador de Polarización Manual.....	20
2.4.4 Modulador de fase (PM).....	21
2.4.5 Circulador	22
2.5. INTERFERÓMETRO MACH-ZEHNDER (MZI) DE 2 BRAZOS	23
2.5.1 Caracterización formas de onda MZI de 2x2	29
2.6. INTERFERÓMETRO MACH-ZEHNDER DE 4 BRAZOS.....	34
CAPÍTULO 3. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL PARA EL CONTROL.....	37
3.1. CAJA DE CONTROL.	37
3.2. CONTROL DIRECTO E INVERSO MZI 2x2	38
3.3. CONTROL DIRECTO E INVERSO MZI 4x4	40
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	43
4.1. CONTROL DIRECTO MZI 2x2	43
4.2. CONTROL INVERSO MZI 2x2	45
4.3. CONTROL DIRECTO MZI 4x4.....	48
4.4. CONTROL INVERSO MZI 4x4.....	52
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	59
5.1. SUMARIO	59
5.2. CONCLUSIONES	59
BIBLIOGRAFÍA.....	60
ANEXO A. CÓDIGOS EN MATLAB.....	62
CAPÍTULO 6. CÓDIGO CARACTERIZACIÓN LÁSER.....	62
CAPÍTULO 7. VISIBILIDAD VARIANDO ALPHA	63
CAPÍTULO 8. CARACTERIZACIÓN MACH-ZEHNDER 2X2	64
CAPÍTULO 9. CARACTERIZACIÓN DE RUIDO DE FASE INTERFERÓMETRO	67
CAPÍTULO 10. CONTROL DIRECTO E INVERSO MZI 2X2	71
CAPÍTULO 11. CONTROL DIRECTO E INVERSO MZI 4X4	80
ANEXO B. EXPLICACIÓN FUNCIONAMIENTO INTERFAZ DE LÁSER TUNABLE.....	96

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

En la actualidad, varios experimentos fundamentales relacionados con comunicaciones seguras [1] [2], se realizan abarcando largas distancias utilizando fibra óptica. Este medio óptico permite enviar pulsos de luz con eficiencia superior a enviar pulsos eléctricos sobre cables metálicos, ya que las fibras ópticas presentan menor atenuación en potencia ante largas distancias [3]. Además, este medio permite capacidades de transmisión cercanas a 10^{13} bit/s [4]. Por lo tanto, los sistemas de comunicaciones en fibras ópticas los denominaremos sistemas de alta velocidad. Algunos experimentos para comunicaciones seguras se basan en estructuras de interferómetros, el cual es un instrumento que permite la separación de un haz en dos o más partes, para posteriormente recombinarlos produciendo interferencia óptica, dando paso a zonas luminosas y oscuras de forma alternada [5].

Entre las aplicaciones basadas en interferómetros requeridas por redes de telecomunicaciones están los conmutadores ópticos, los cuales permiten enrutar una señal óptica de entrada en diversos canales de salida [6]. Sin embargo, una problemática asociada al uso de interferómetros es que estos producen ruidos de fase entre sus brazos. El ruido de fase se produce debido a variaciones en el índice de refracción en el interior de la fibra óptica, fenómeno producido por ruido ambiental, temperatura y perturbaciones mecánicas, el cual debe ser estabilizado para habilitar sistemas conmutadores [7]. Por tanto, para habilitar aplicaciones utilizando interferómetros el ruido de fase debe ser suprimido.

Uno de los interferómetros más utilizados para comunicaciones seguras es el interferómetro de Mach-Zehnder, cuya estructura es construida desde arquitecturas con dos brazos hasta múltiples brazos [8]. Estas investigaciones son consideradas a nivel mundial, y por lo general se realizan tesis en relación a este interferómetro, como por ejemplo el desarrollo de un biosensor fotónico de alta sensibilidad basado en interferómetros Mach-Zehnder integrados en tecnología de silicio en España [9] o un interferómetro Mach-Zehnder de guías de onda de fosforo indio avanzado, conmutadores totalmente ópticos y convertidores de longitud de onda en Suiza [10], entre otros.

1.2. Estado del arte

Estas investigaciones estudian el ruido de fase existente dentro de los interferómetros, demostrando que es aleatorio y de bajas frecuencias (kHz). Es así como el ruido de fase ha sido controlado utilizando dispositivos optoelectrónicos como por ejemplo, en el control aplicado sobre un interferómetro de 2 brazos [11] y en el control aplicado a un interferómetro de 4 brazos [2]. En el trabajo [11] se controla el ruido de fase de forma continua, pero lo realiza utilizando un láser de control con longitudes de onda separadas de la longitud de la señal, mientras que [2] utiliza un control con la misma longitud de onda de la señal, generando un manejo de alta calidad sobre la señal a transmitir, pero el control no es continuo.

A diferencia del control directo en los trabajos anteriores, en [12] se introduce una novedosa técnica que consiste en un control con láser inverso sobre interferómetros de Mach-Zehnder de dos brazos.

Considerando que un control sobre un sistema real debiera ser en forma continua, y con la misma longitud de onda de la señal para optimizar la calidad del manejo de señales en el interferómetro, es que la propuesta en [12] podría ser una solución óptima para controlar ruido de fase en interferómetros de dos o más brazos, ya que podría ofrecer un control continuo utilizando como láser de control la misma longitud que la señal a manipular dentro del MZI.

1.3. Hipótesis de Trabajo

Controlar el ruido de fase sobre un interferómetro, aplicando una configuración de control que utilice un láser inverso, permite trabajar conmutaciones de alta calidad en sistemas de alta velocidad.

1.4. Objetivo general

Aplicar sistema de control inverso en un interferómetro Mach-Zehnder de 4 caminos para evaluar conmutación con mínimo Crosstalk.

1.5. Objetivos Específicos

- Obtener ecuaciones características en interferómetro Mach-Zehnder de 2 brazos.
- Construcción de interferómetro de 2 brazos en laboratorios UCSC para validar modelo matemático y evaluar técnicas de control directo e inverso.
- Modelamiento matemático de interferómetro de 4 brazos.
- Caracterización del control de fase en interferómetro de 4 brazos en modo directo.
- Caracterización del control de fase en interferómetro de 4 brazos en modo inverso.

1.6. Alcances

Como alcance, esta tesis busca comprobar si es posible implementar control inverso sobre sistemas ópticos de dos o más brazos. La calidad obtenida con esta estrategia será comparada con el control en forma directa. También, para ejecutar los objetivos realizaremos experimentos con interferómetros en fibras ópticas disponibles en la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC) y el Instituto Milenio de Investigación en Óptica (MIRO) de la Universidad de Concepción (UdeC).

1.7. Temario

En el capítulo 1 se presenta la introducción a la tesis realizada, indicando la problemática principal que es el ruido de fase sobre interferómetros, y como se ha controlado en diversas arquitecturas. En el capítulo 2 se presenta el marco teórico, donde se detallan los modelos matemáticos de los interferómetros a estudiar y cada componente necesario para construirlos. En el capítulo 3 se presentan las configuraciones experimentales, tanto para control directo e inverso en un MZI de 2x2 y 4x4. En el capítulo 4, se exponen el análisis y resultados obtenidos experimentalmente tanto en la UCSC como en el Instituto MIRO. En el último capítulo de esta tesis, se presentan las principales conclusiones obtenidas después del análisis de los resultados obtenidos en el Capítulo 4.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Introducción a sistemas ópticos

Los sistemas de comunicaciones utilizan fuentes de luz como portadoras de información [13]. La luz puede ordenarse desde ondas de frecuencia muy altas (baja longitud de onda), hasta ondas de frecuencia muy bajas (longitudes de onda largas), tal como es mostrado en la Figura 2.1. Lo que llamamos luz solo abarca una pequeña parte del espectro electromagnético [13].

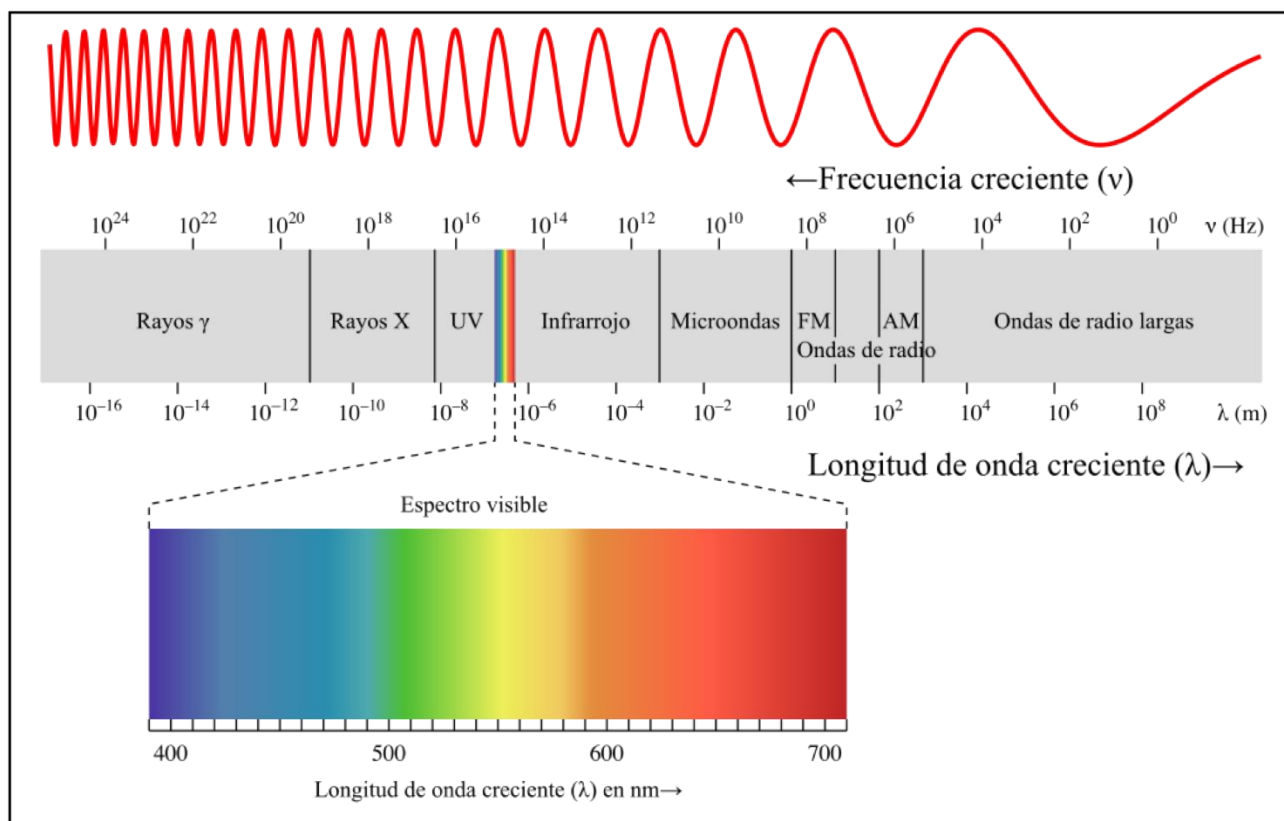


Figura 2.1 Espectro en electromagnético en frecuencia y longitud de onda. Fuente:
https://www.kindpng.com/download/TbRxiTJ_espectro-electromagnético-con-la-franja-de-luz-visible/

De la Figura 2.1, se observa que la diferencia de las radiaciones en distintas partes del espectro es una cantidad que puede ser medida de dos formas: mediante longitudes de onda, como por ejemplo la energía de un fotón, o también como frecuencia de oscilación de un campo electromagnético. Este espectro electromagnético abarca radiaciones en baja frecuencia denominadas ondas de radio largas y de alta frecuencia llamadas rayos gamma [13].

Matemáticamente, la luz se puede modelar como una onda electromagnética, por lo que puede oscilar en diferentes longitudes de onda que definen el “color”. En el caso de la luz blanca, está compuesta por todas las longitudes de onda, por lo que al pasar a través de un prisma (medio óptico)

este se difracta en diferentes ángulos según su longitud de onda, descomponiéndose así en diferentes colores, tal y como se muestra en la Figura 2.2 [13].

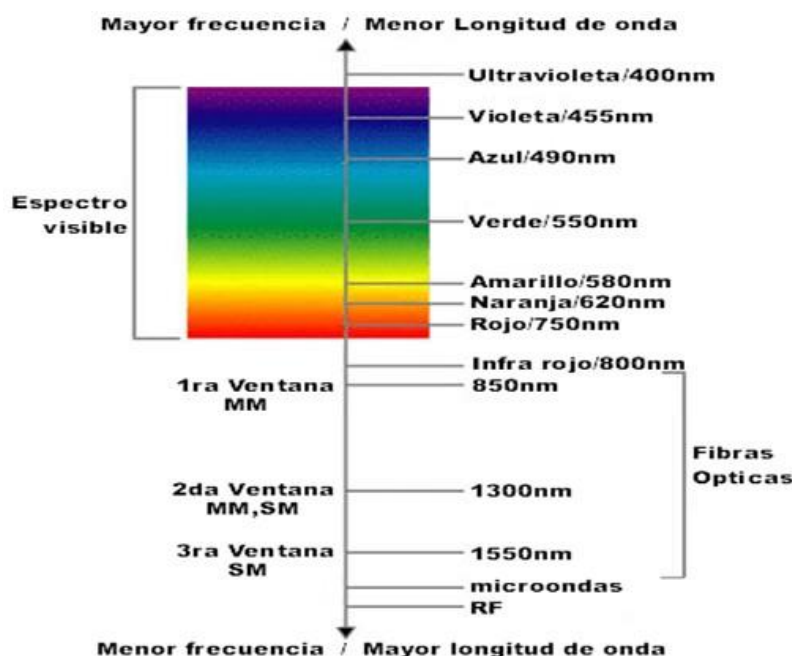


Figura 2.2 Espectro electromagnético utilizado en comunicaciones ópticas Fuente: Pinto, R. A., & Cabezas, A. F. (2014). Sistemas de comunicaciones ópticas (Primera edición).

El espectro electromagnético para frecuencias luminosas se divide en 3 bandas:

La banda infrarroja, ubicada entre los 800nm de la Figura 2.2 hasta la tercera ventana. Posee una banda de longitud de onda demasiado grande para poder ser vista por el ojo humano. La banda visible, que abarca longitudes de onda entre 400 a 800 nm. Rango que puede ser visto al ojo humano. Por último, se tiene la ultravioleta, correspondiente a la banda de longitud de onda demasiado corta para ser percibida por el ojo humano.

En la Tabla 2.1 se pueden apreciar los rangos de longitudes de onda y sus frecuencias donde está ubicada la luz visible al ojo humano.

Tabla 2.1 Colores y características luz visible. Fuente: Pinto, R. A., & Cabezas, A. F. (2014). Fuente: Sistemas de comunicaciones ópticas (Primera edición).

COLOR	λ (nm)	f (THz)
Violeta	400 a 460	750 a 650
Índigo	460 a 470	650 a 630
Azul	470 a 490	630 a 610
Verde	490 a 565	610 a 530
Amarillo	565 a 575	530 a 520
Naranja	575 a 600	520 a 500
Rojo	600 a 800	500 a 370

2.2. Generación y detección de luz

Un dispositivo para generar luz es el láser (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación), este amplifica señales de luz que son generadas por otros medios. Esta amplificación la realiza mediante una etapa de emisión estimulada, el cual es un efecto natural deducido por consideraciones relacionadas a equilibrio termodinámico, y retroalimentación óptica, que es proporcionada en la mayoría de láseres mediante la utilización de espejos. En otras palabras, un láser consta de un medio de amplificación, por el que se genera la emisión estimulada, y un conjunto de espejos encargados de retroalimentar la luz del amplificador para el crecimiento continuo del haz en desarrollo [14].

Los láseres son utilizados en una gran variedad de aplicaciones científicas y técnicas que incluyen: comunicaciones, computación, procesamiento de imágenes, almacenamiento de información, holografía, litografía, procesamiento de materiales, geología, metrología, telemetría, biología y medicina clínica [15].



Figura 2.3 Láser tunable marca Viavi

En el laboratorio de optoelectrónica de la UCSC disponemos de un láser VIAVI, cuya interfaz consiste en una plataforma compacta para la conmutación de pruebas ópticas (interfaz conocida como serie MAP). Al interior de esta plataforma se instalan diversas tarjetas, en nuestro caso, una tarjeta corresponde a un láser tunable [16]. Un láser tunable es un dispositivo el cual puede hacer variar su longitud de onda de operación de manera controlada [17].

El láser tiene una base cristalina, cuya estructura tiene grabadas rejillas que actúan como reflector de Bragg (SG-DBR), anexo a un bloqueador de longitud de onda. La potencia óptica y longitud de onda son configurables por una interfaz manual, permitiendo seleccionar uno de los canales de la banda C (1530 a 1570 nm), con un espaciado entre canales de 50[GHz]. Su potencia es configurable a un máximo de 13.5[dBm] y mínimo de 7.4[dBm] [16]. Este dispositivo posee una

operación estable, gracias a su bloqueador de ondas integrado y el bucle de control de potencia automático, haciéndolo ideal para pruebas de multiplexación por división de longitud de onda.

Para la detección de luz, en este trabajo se utilizaron fotodetectores Thorlabs PDA05CF2 que se muestra en la Figura 2.4b. Este instrumento es un detector amplificado de arseniuro de indio y galio (InGaAs), diseñado para detectar fuentes de luz con longitudes de onda que van entre los 800 y 1700 [nm]. Posee una salida con búfer que entrega un voltaje máximo de 5 [V] para impedancias de carga de 50 [Ω].



Figura 2.4 Foto-detector (a) Diagrama Foto-detector. (Los diagramas serán utilizados en dibujos de la configuración experimental de las siguientes secciones) (b) Foto-detector Thorlabs PDA05CF2. Fuente: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PDA05CF2>

La Responsividad del instrumento se define como la relación entre la fotocorriente generada (I_{PD}) y la potencia de luz incidente (P) a una longitud de onda determinada, esto es:

$$R(\lambda) = \frac{I_{PD}}{P} \quad (1)$$

El voltaje máximo de salida del foto-detector es 10 [V] para cargas de alta impedancia (por ejemplo, $R_{carga} > 5$ [k Ω]) y 5 [V] para cargas de 50 [Ω].

La representación del voltaje de salida del fotodetector, está expresada por:

$$V_{out} = R(\lambda) * Ganancia_transimpedancia * Factor_escalamiento * Potencia_de_entrada(W) \quad (2)$$

La ganancia de transimpedancia corresponde a un factor de conversión de corriente en una señal de voltaje y el Factor de escalamiento se utiliza para ajustar la salida dependiendo de las impedancias de carga [18].

Por otro lado, la potencia óptica es la integral del área del foto-detector sobre la intensidad óptica incidente en este. Como el área es constante (0.2 [mm²] para este elemento [18]), la potencia es proporcional a la intensidad óptica. Finalmente, el voltaje de salida en los detectores es representado por la ecuación (3):

$$V_{out} = R(\lambda) * G * FE * (I_{\text{óptica}} * A_{\text{detector}}) \quad (3)$$

En donde el voltaje será proporcional a la intensidad óptica [18].

Para el caso de la responsividad esta posee una curva característica a distintas longitudes de onda, mostrada en la Figura 2.5:

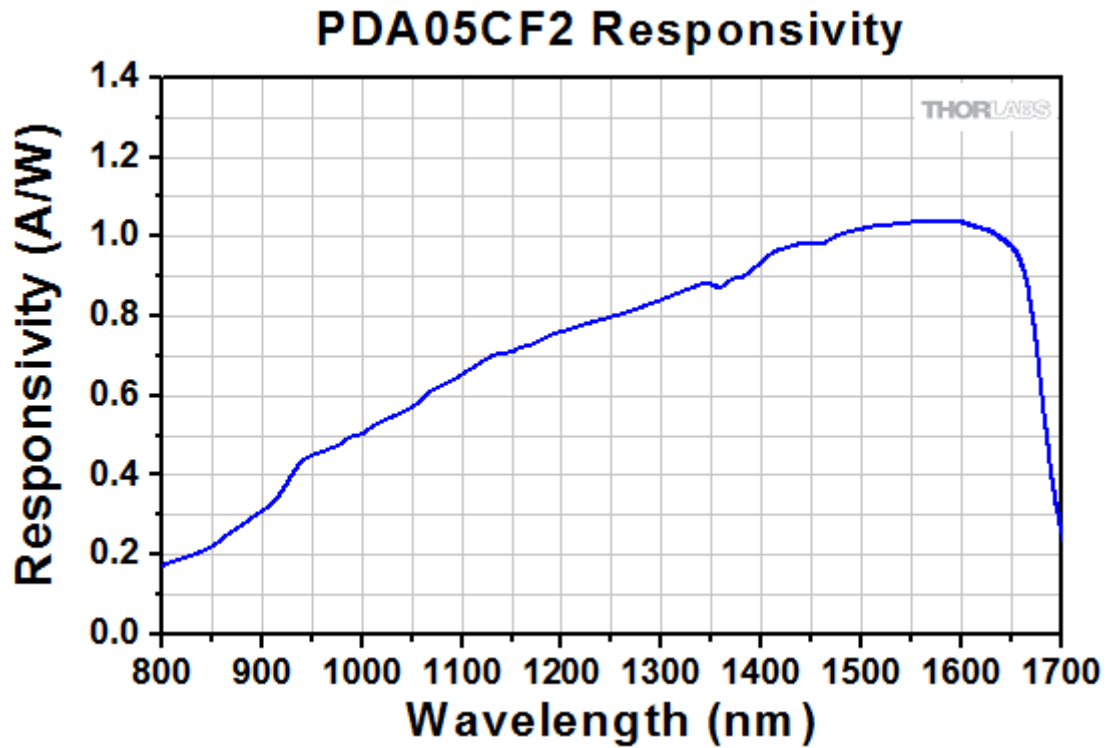


Figura 2.5 Curva de responsividad foto-detector Thorlabs PDA05CF2. Fuente: Figura obtenida desde <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PDA05CF2>

2.2.1 Caracterización Láser utilizando el fotodetector

Para tener una referencia de la emisión del láser a distintas longitudes de ondas, se conecta a un fotodetector Thorlabs PDA05CF2 que a su vez, está conectado al osciloscopio para obtener una curva de voltaje v/s longitud de onda. Para evitar saturaciones en el foto-detector, el láser se configura con la menor potencia, obteniendo el gráfico de la Figura 2.6.

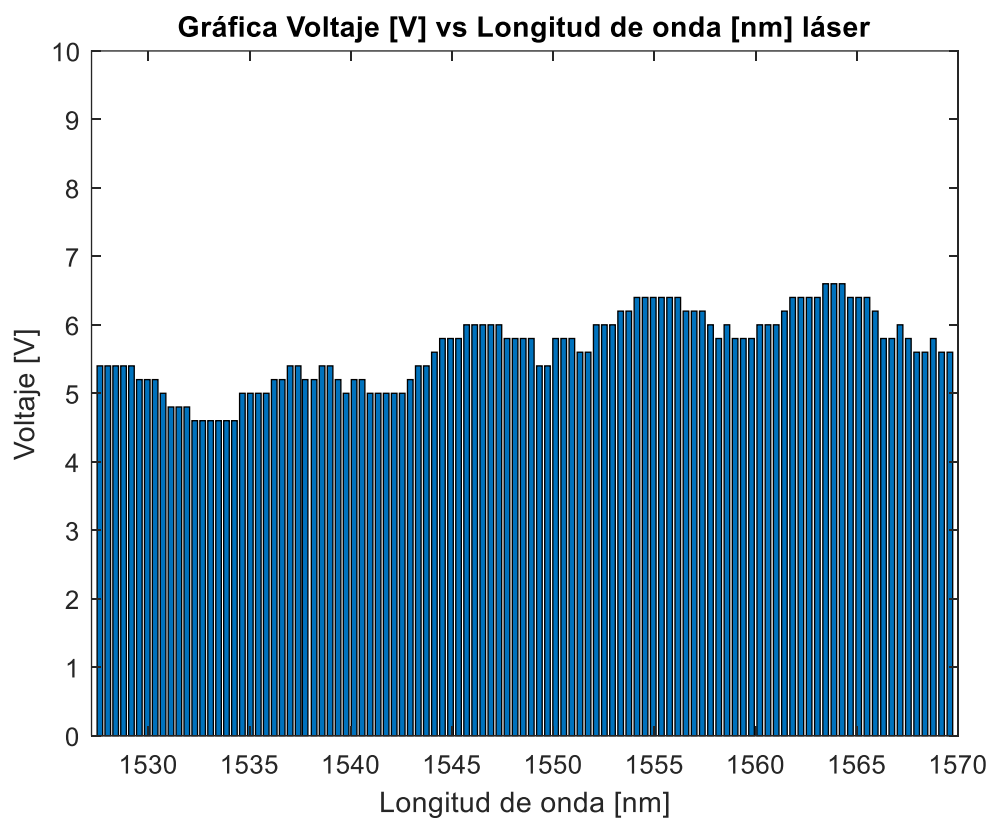


Figura 2.6 Gráfica de Voltaje vs Longitud de onda láser.

En la Figura 2.6, se puede observar que la amplitud del láser presenta fluctuaciones, con valores extremos entre 4.6 [V] y 6.6 [V]. Es importante mencionar que las amplitudes se deben corregir por la responsividad del fotodetector. Sin embargo y como se describe anteriormente, este gráfico se realiza para tener una noción de la generación del láser disponible.

2.3. Fibras ópticas

Las fibras ópticas son un medio físico de transmisión de luz, utilizado por lo general en redes de telecomunicaciones y datos. Consiste en un filamento delgado que en la mayoría son fabricados de la fusión entre vidrio y sílica de una alta pureza química [15], a través del cual viajan pulsos de luz, que contienen datos a transmitir. Poseen grandes velocidades de transmisión, baja atenuación y dispersión cromática. Además, son libres de interferencias electromagnéticas, haciéndolo así el medio de transmisión por cable más avanzado que existe en la actualidad [19].

Si bien las fibras ópticas pueden trabajar en el rango de luz visible, para el caso de telecomunicaciones se utilizan longitudes de onda entre 700 a 1600[nm], correspondientes a la zona infrarroja. En estas longitudes de onda la fibra óptica presenta menores pérdidas en potencia óptica entre otros factores [13]. Estructuralmente, las fibras ópticas están compuestas por 3 capas: el núcleo (core), revestimiento (cladding) y cubierta (buffer). En la Figura 2.7 se esquematiza su estructura.

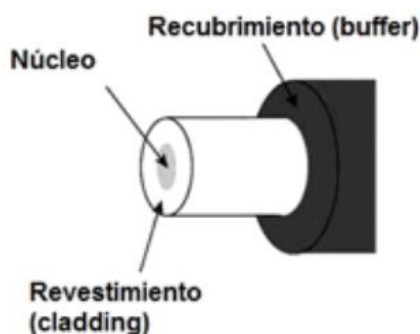


Figura 2.7 Estructura básica de una fibra óptica. Fuente: https://www.thefoa.org/ESP/Fibra_optica.htm

El Núcleo corresponde a la parte interna de la fibra óptica. Está fabricada generalmente con los materiales anteriormente mencionados. Su índice de refracción es ligeramente mayor que el del revestimiento (por ejemplo: 1,45 para el núcleo y 1,44 para el revestimiento) [15]. El Revestimiento (Cladding) es la capa intermedia que tiene como función confinar la luz en el centro. Generalmente está compuesta de los mismos materiales que el núcleo, pero con aditivos especiales, generando así distintos índices de refracción entre el núcleo y revestimiento [13]. Finalmente, la cubierta (Buffer) corresponde a la capa exterior de la fibra óptica. Por lo general es fabricada en plástico y sirve como amortiguador o protección mecánica de la fibra. Esta puede poseer 3 capas: una funda primaria, una funda de silicona o material kevlar y una funda exterior de polietileno [13].

2.3.1 Tipos de fibra óptica

La trayectoria o camino que pueda tener la luz en una fibra óptica se denomina Modo óptico. Si existe una única trayectoria por el cable, esta se denomina fibra de modo único o monomodo (SMF). Si existe más de una trayectoria, la fibra se denomina multimodo (MMF). Específicamente, una fibra monomodo para longitudes de onda en la banda C (1530 a 1570 nm) posee un núcleo con un diámetro suficientemente pequeño para que, en teoría, solo exista una trayectoria que siga la luz a través del cable. El diámetro de este núcleo está entre los 8 y 11 μm .

Por otro lado, la fibra multimodo es aquella en que los haces de luz pueden circular por más de un modo o camino. Comúnmente este tipo de fibra se utiliza para aplicaciones en distancias cortas, menores a 1[km]. Los diámetros que puede poseer el núcleo para la banda C son de 50 y 62.5 μm . Existen fibras multimodo cuyo índice de refracción del núcleo no es uniforme, variando desde uno mayor en el centro y disminuyendo gradualmente hacia la periferia (desde 1,45 en la zona central del núcleo hasta 1,44 en la cercana al revestimiento). La luz en este tipo de fibras se propaga por medio de la refracción. Al poseer un mayor índice de refracción en la zona central del núcleo, los haces de luz en este punto se propagarán de forma más lenta. Mientras que los cercanos al revestimiento al tener un índice de refracción menor, se propagan de una manera más rápida. Provocando que los haces de luz, tanto del centro como la periferia, recorran al mismo tiempo la longitud de la fibra utilizada [13].

Aunque existen otros tipos de fibra óptica de última generación, en esta memoria se trabajará con fibras ópticas multinúcleo (MCF). Estas consisten en una fibra óptica la cual posee múltiples núcleos dentro del mismo revestimiento, tal como es mostrado en la Figura 2.8. Para diseñar este tipo de fibras, la separación entre núcleos debe mantener los canales independientes, esto es, evitando que la información de un núcleo se vaya por el otro núcleo [20]. Aquí aparece un concepto llamado Crosstalk. Este se define como un fenómeno por el cual una señal transmitida por un canal, genera un efecto no deseado en otro canal [21]. Si los núcleos de la fibra óptica están muy próximos entre sí, se deberá considerar la existencia de Crosstalk [20]. Por esto, la cantidad de núcleos en una fibra es limitada a un mínimo Crosstalk. La estructura de una MCF es utilizada para la multiplexación por división espacial (SDM), la cual es considerada la última frontera para tratar con la alta demanda de capacidad de transmisión en redes de fibra óptica [22].

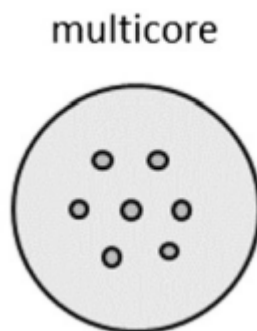


Figura 2.8 Esquema de fibra multinúcleo. Fuente: Nonlinear fiber optics (Sixth edition) Govind P. Agrawal

Para potencias ópticas en un par de núcleos cuyos sub-índices son j y k , el Crosstalk se calcula mediante la ecuación (4):

$$XT_{(j,k)} = 10 \log \left(\frac{P_j}{P_k} \right) [dB] \quad (4)$$

Por otro lado, un parámetro utilizado para medir la calidad de una señal es la visibilidad. Esta es una ecuación que evalúa la separación entre los valores máximos con los mínimos de una misma señal, generando un parámetro de medición de interferencia en un interferómetro [2]. La ecuación para estimar la visibilidad es dada por la ecuación (5):

$$Visibilidad = \frac{\max(I) - \min(I)}{\max(I) + \min(I)} \quad (5)$$

Donde $\max(I)$ representa la máxima intensidad de I y $\min(I)$ la mínima.

2.4. Dispositivos en Fibras ópticas

2.4.1 Beam-splitter (BS) 2x2

Un beam-splitter (BS) es un dispositivo óptico cuya función es dividir un haz de luz en dos o más caminos ópticos. Usualmente, el BS es una pieza de vidrio con un material dieléctrico o cubierta de metal sobre la superficie. Cuando un haz de luz incide en el BS, este tiene un porcentaje de luz reflejada (r) y transmitida (t), donde $r + t = 1$. En la Figura 2.9 se observa el dispositivo en forma de diagrama y de manera física.

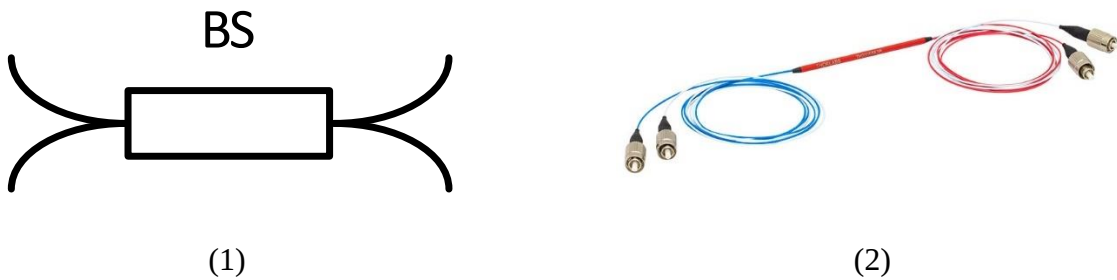


Figura 2.9 Beam-splitter de 2x2. (1) Diagrama BS de 2x2. (2) BS marca Thorlabs TH200R5F2B. Fuente: Imagen obtenida desde <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=TH200R5F2B>

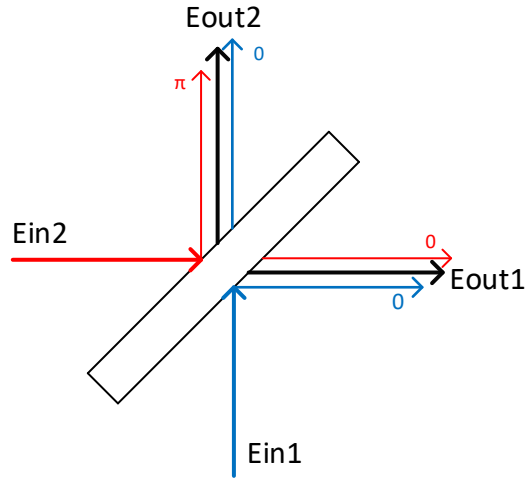


Figura 2.10 Estructura de un beam splitter.

De la Figura 2.10 se puede observar un diagrama de un BS donde la señal incidente E_{in2} presenta un desfase de π en su señal reflejada. Esto debido a que el material posee un índice de refracción mayor que la luz incidente, lo cual no sucede en el caso de la señal incidente E_{in1} . Así, expresando las ecuaciones de campo eléctrico del BS quedan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} E_{out1} &= r * E_{in1} + t * E_{in2} \\ E_{out2} &= t * E_{in1} + r * E_{in2} * e^{j\pi} \end{aligned} \quad (6)$$

Utilizando la propiedad $e^{jn} = \cos(n) + j\sin(n)$

Reemplazando en E_{out2} :

$$\begin{aligned} E_{out2} &= t * E_{in1} + r * E_{in2} * (\cos(\pi) + j\sin(\pi)) \\ E_{out2} &= t * E_{in1} + r * E_{in2} * (-1) \\ E_{out2} &= t * E_{in1} - r * E_{in2} \end{aligned}$$

Ahora, expresando de forma matricial los campos eléctricos E_{out1} y E_{out2} se tiene:

$$\begin{pmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r & t \\ t & -r \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Para un sistema simétrico ($I_0 = I_1 = 0.5$ dado una única entrada), donde las intensidades de las señales se distribuyen uniformemente, se puede probar que $r = t = \frac{1}{\sqrt{2}}$.

Así la matriz de transferencia para un BS de 2 entradas y 2 salidas queda expresada en (8):

$$M_{BS_{2 \times 2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Esta matriz será necesaria para el desarrollo del interferómetro Mach-Zehnder [23] [24] [25].

2.4.2 Beam-Splitter (BS) 4x4

El BS de 4x4 es un dispositivo cónico basado en fibra multinúcleo (ver Figura 2.11b), donde la proximidad de los núcleos produce un alto Crosstalk óptico [26].

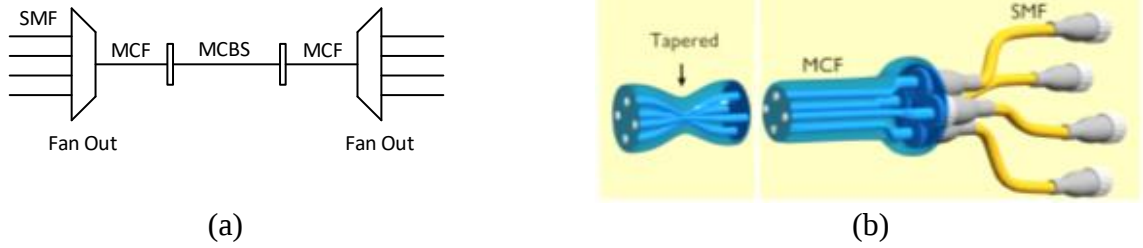


Figura 2.11 Dispositivos ópticos multicore (a) Diagrama BS de 4x4. (b) BS multicore de 4x4 y Dispositivo Multiplexor de monomodo a multicore. Fuente: Paper “Maximizing Quantum Discord from Interference in Multi-port Fiber Beamsplitters”.

Para acoplar este BS a la fuente de luz se requiere de un dispositivo multiplexor (MUX). Como muestra la Figura 2.11b, un MUX consta de un grupo de SMF fusionados con MCF, donde cada SMF está orientada para asignarse a un solo núcleo en la MCF, lo que permite el acceso a cualquiera de estos núcleos a través de una distribución de SMF. La unión del BS de 4x4 y el MUX antes descritos, conforman al BS de 4x4 que es implementado en laboratorio y está representado en forma de diagrama en la Figura 2.11a. La matriz de transferencia que relaciona la entrada con la salida del BS está expresada en (9) [1]:

$$M_{BS_{4 \times 4}} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

2.4.3 Controlador de Polarización Manual

La polarización de un haz de luz depende del desfase entre la componente x y la componente y del campo eléctrico de dicho haz. Luego, cuando la luz pasa por materiales birrefringentes (Esto es: materiales que tienen dos índices de refracción, uno para el componente x y otro para el componente y), la polarización de salida depende del desfase por cada camino dentro del material [27].



Figura 2.12 Polarizador Manual. (a) Diagrama Polarizador Manual. (b) Polarizador Thorlabs FPC560.

En la Figura 2.12b se observa el polarizador que dispone la UCSC. Este polarizador utiliza birrefringencia inducida para alterar la polarización en una fibra monomodo. Para esto, utiliza tres carretes creando tres placas de onda independientes (o retardadores de fibra). La cantidad de birrefringencia inducida en la fibra es en función del revestimiento, el diámetro del carrete, el número de vueltas en cada carrete y la longitud de onda de la fuente de luz (NOTA: La birrefringencia deseada es inducida por las vueltas de la fibra y no por el movimiento de las paletas del carrete) [28].

En un polarizador de 3 paletas, se combinan en serie; una placa de un cuarto de onda, una de media onda y una de un cuarto de onda, transformando un estado de polarización arbitrario en cualquier otro estado de polarización.

El polarizador de la Figura 2.12b posee un diámetro de 56 [mm]. Para esta memoria, las longitudes de onda a utilizar serán cercanas a 1550 [nm], por lo que en cada paleta se requerirá un cierto número de vueltas especificado por el fabricante. En este caso, la paleta de cuarto de onda debe tener 3 vueltas, tal como se observa en la Figura 2.13a. Para el caso de media onda por recomendación del fabricante este debe poseer 6 vueltas como se muestra en la Figura 2.13b. Con esta configuración el polarizador está listo para trabajar a longitudes de onda de 1550 [nm].

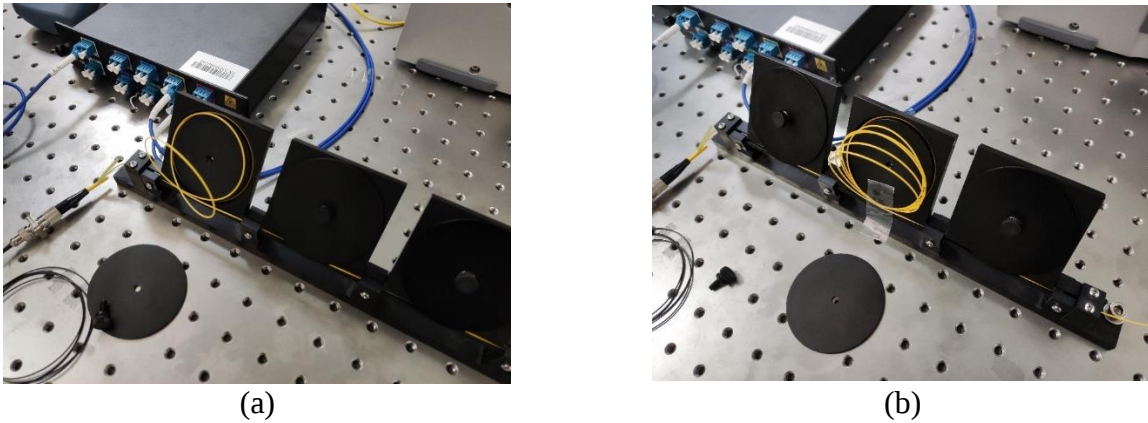


Figura 2.13 Ajuste de polarizador. (a) Ajuste de $\lambda/4$ polarizador manual. (b) Ajuste de $\lambda/2$ polarizador manual.

2.4.4 Modulador de fase (PM)

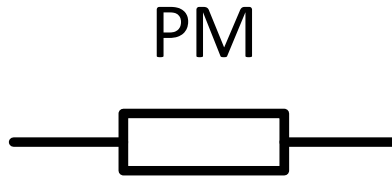


Figura 2.14 Diagrama Modulador de fase

Los moduladores de fase son dispositivos optoelectrónicos que permiten controlar la fase en un interferómetro utilizando señales de voltaje. Su estructura es cristalina en base a celdas Pockels de largo L . Cuando un haz de luz la atraviesa mientras se aplica un campo eléctrico E , existirá un cambio de fase. Si este campo eléctrico es obtenido aplicando un voltaje V a través de dos caras de la celda separadas por una distancia d , entonces $E = V / d$. Así, la ecuación de modulación de fase con respecto al voltaje queda expresada por la ecuación (10):

$$\varphi = \varphi_0 - \pi \frac{V}{V_\pi} \quad (10)$$

Donde,

$$V_\pi = \frac{d}{L} - \frac{\lambda_0}{\tau n^3} \quad (11)$$

El parámetro V_π , conocido como el voltaje de media onda, es el voltaje aplicado donde la fase cambia por π . La ecuación (10) expresa una relación lineal entre el desfase óptico y el voltaje. Por lo tanto, se puede modular la fase de una onda óptica variando el voltaje V que se aplica a través de un

material donde pasa la luz. El parámetro V_π es una característica importante del modulador que depende de las propiedades del material (n y τ), en la longitud de onda λ_0 y en la relación de aspecto d/L .

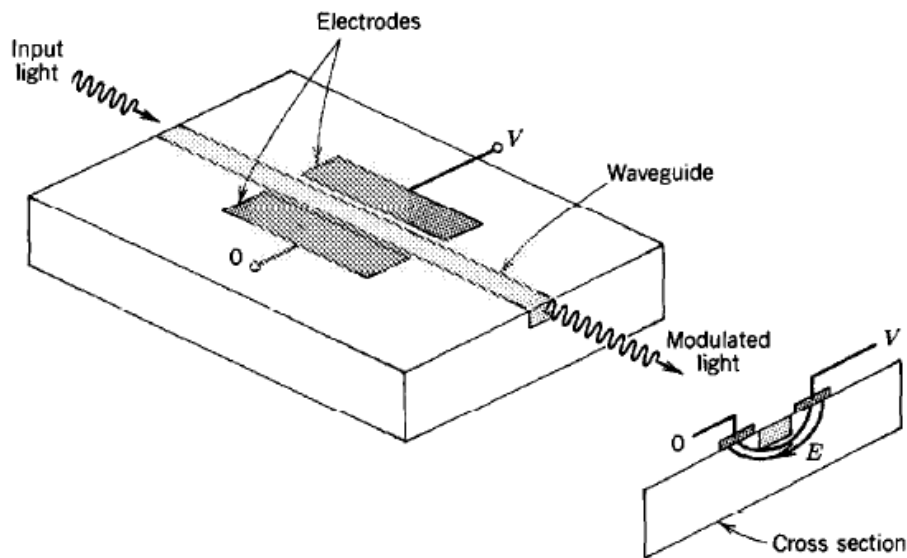


Figura 2.15 Esquema de un modulador de fase. Fuente: Bahaa E. A. Saleh Fundamentals of photonics 1ed.

Los moduladores comerciales generalmente funcionan a varios cientos de MHz, pero son posibles velocidades de modulación de varios GHz.

Los moduladores electro-ópticos también se pueden construir como dispositivos ópticos integrados. Estos dispositivos funcionan a velocidades más altas y voltajes más bajos que los dispositivos a granel. Una guía de ondas ópticas se fabrica en un sustrato electroóptico (comúnmente LiNbO_3) mediante la infusión de un material como el titanio para aumentar el índice de refracción. El campo eléctrico se aplica a la guía de ondas mediante electrodos. Debido a que la configuración es transversal y el ancho de la guía de ondas es mucho menor que su longitud ($d \ll L$), el voltaje de media onda puede ser tan pequeño como unos pocos volts. Estos moduladores han sido operados a velocidades superiores a 100 GHz. La luz se puede acoplar convenientemente dentro y fuera del modulador mediante el uso de fibras ópticas [15].

2.4.5 Circulador

Un circulador óptico es un dispositivo de tres puertos que permite que la luz viaje en una sola dirección. Una señal que ingrese al Puerto 1, saldrá al Puerto 2 con una pérdida mínima, mientras que una señal que ingrese al Puerto 2 saldrá al Puerto 3 con una pérdida mínima. La luz que ingresa al puerto 2 experimenta una gran cantidad de pérdida en el puerto 1, y la luz que ingresa al puerto 3 experimenta una gran cantidad de pérdida en los puertos 1 y 2. Los circuladores ópticos son dispositivos no recíprocos. Esto significa que cualquier cambio en las propiedades de la luz causado por pasar a través del dispositivo no se revierte al viajar en la dirección opuesta [2].



Figura 2.16 Circulador. (a) Diagrama de un circulador. (b) Circulador Thorlabs 6015-3-FC. Fuente: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=6015-3-FC>

2.5. Interferómetro Mach-Zehnder (MZI) de 2 brazos

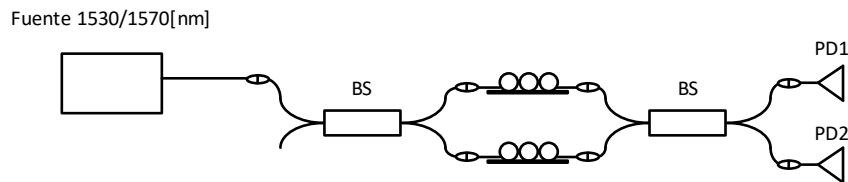


Figura 2.17 Diagrama MZI 2x2

El interferómetro Mach-Zehnder (MZI) es un dispositivo el cual sirve para demostrar interferencias por división de amplitud. Un haz de luz se divide primero por un BS y luego es recombinado en un segundo BS. Dependiendo de la fase relativa adquirida por el haz a lo largo de las dos trayectorias, el segundo BS lo reflejará con una eficiencia entre el 0% y el 100% de la señal transmitida.

Para la composición de un interferómetro de dos brazos es necesaria la utilización de dos BS en cascada. Al pasar desde un BS hacia el otro existirán variaciones de fase, las que se desconocen hasta este punto, por lo que la matriz que modela este desfase está definida de la siguiente forma:

$$M_{\phi} = \begin{pmatrix} t_1 e^{j\phi_1} & 0 \\ 0 & t_2 e^{j\phi_2} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Se puede observar de la ecuación (12) que existirá una transmisión t_1 y una transmisión t_2 correspondiente a los brazos del interferómetro donde:

$$t_1 = \alpha t_2, \quad (13)$$

con α correspondiente al coeficiente de transmisión entre los brazos.

El modelado de la matriz de transferencia asociada a un interferómetro de 2 brazos queda expresado como:

$$M_{MZI} = M_{BS} * M_{\theta} * M_{BS} \quad (14)$$

Reemplazando en la ecuación (14) las matrices (8) y (12):

$$M_{MZI} = \frac{1}{\sqrt{2}} * \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} t_1 e^{j\phi_1} & 0 \\ 0 & t_2 e^{j\phi_2} \end{pmatrix} * \frac{1}{\sqrt{2}} * \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$M_{MZI} = \frac{1}{2} * \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} t_1 e^{j\phi_1} & t_1 e^{j\phi_1} \\ t_2 e^{j\phi_2} & -t_2 e^{j\phi_2} \end{pmatrix}$$

$$M_{MZI_{2 \times 2}} = \frac{1}{2} * \begin{pmatrix} t_1 e^{j\phi_1} + t_2 e^{j\phi_2} & t_1 e^{j\phi_1} - t_2 e^{j\phi_2} \\ t_1 e^{j\phi_1} - t_2 e^{j\phi_2} & t_1 e^{j\phi_1} + t_2 e^{j\phi_2} \end{pmatrix} \quad (16)$$

Con la matriz de transferencia del MZI de 2 brazos obtenida, es posible calcular el campo eléctrico generado. El campo eléctrico del MZI se define como:

$$E_{MZI} = M_{MZI} * \begin{pmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{pmatrix} \quad (17)$$

Para un interferómetro, por lo general, se utiliza una sola fuente para generar sus señales de salida, por lo tanto:

$$\begin{pmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{pmatrix} = M_{MZI} * \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Reemplazando (16) en (18):

$$E_{MZI} = \frac{1}{2} * \begin{pmatrix} t_1 e^{j\phi_1} + t_2 e^{j\phi_2} & t_1 e^{j\phi_1} - t_2 e^{j\phi_2} \\ t_1 e^{j\phi_1} - t_2 e^{j\phi_2} & t_1 e^{j\phi_1} + t_2 e^{j\phi_2} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$E_{MZI} = \frac{1}{2} * \begin{pmatrix} t_1 e^{j\phi_1} + t_2 e^{j\phi_2} \\ t_1 e^{j\phi_1} - t_2 e^{j\phi_2} \end{pmatrix} \quad (20)$$

Ahora, para el cálculo de intensidad, se tiene que esta es la multiplicación del campo eléctrico por su transpuesta:

$$I_{MZI} = E_{MZI} * E_{MZI}^T \quad (21)$$

Reemplazando los valores de (20) en (21) para el cálculo de la primera intensidad se tiene:

$$I_{MZI1} = \frac{1}{2} * (t_1 e^{j\phi_1} + t_2 e^{j\phi_2}) * \frac{1}{2} (t_1 e^{-j\phi_1} + t_2 e^{-j\phi_2}) \quad (22)$$

$$I_{MZI1} = \frac{1}{4} * (t_1 e^{j\phi_1} + t_2 e^{j\phi_2}) * (t_1 e^{-j\phi_1} + t_2 e^{-j\phi_2})$$

Aplicando el equivalente de t_2 obtenida desde la ecuación (13):

$$I_{MZI1} = \frac{1}{4} * (t_1 e^{j\phi_1} + \alpha t_1 e^{j\phi_2}) * (t_1 e^{-j\phi_1} + \alpha t_1 e^{-j\phi_2})$$

$$I_{MZI1} = \frac{1}{4} * (t_1^2 + \alpha t_1^2 e^{j(\phi_1 - \phi_2)} + \alpha t_1^2 e^{-j(\phi_1 - \phi_2)} + (\alpha t_1)^2)$$

Definiendo $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$:

$$I_{MZI1} = \frac{1}{4} * (t_1^2 + \alpha t_1^2 e^{j\Delta\phi} + \alpha t_1^2 e^{-j\Delta\phi} + (\alpha t_1)^2)$$

Utilizando la propiedad exponencial $e^{\pm j\theta} = \cos(\theta) \pm j\sin(\theta)$:

$$I_{MZI1} = \frac{1}{4} * (t_1^2 + \alpha t_1^2 (\cos(\Delta\phi) + j\sin(\Delta\phi)) + \alpha t_1^2 (\cos(\Delta\phi) - j\sin(\Delta\phi)) + (\alpha t_1)^2)$$

$$I_{MZI1} = \frac{1}{4} * (t_1^2 + 2\alpha t_1^2 \cos(\Delta\phi) + (\alpha t_1)^2)$$

$$I_{MZI1} = \frac{t_1^2}{4} * (1 + 2\alpha \cos(\Delta\phi) + \alpha^2)$$

Para simplificar aún más esta ecuación se utiliza la propiedad $\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1 + \cos(\theta)}{2}$, para esto se requiere convenientemente sumar 1 en la ecuación, entonces:

$$I_{MZI1} = \frac{t_1^2}{4} * (1 + 2\alpha \cos(\Delta\phi) + \alpha^2 + 2\alpha - 2\alpha)$$

$$I_{MZI1} = \frac{t_1^2}{4} * (\alpha^2 - 2\alpha + 1 + 2\alpha(1 + \cos(\Delta\phi)))$$

$$I_{MZI1} = t_1^2 * \left(\frac{\alpha^2 - 2\alpha + 1}{4} + \frac{\alpha(1 + \cos(\Delta\phi))}{2} \right)$$

$$I_{MZI1} = t_1^2 * \left(\frac{(\alpha - 1)^2}{4} + \alpha \cos^2 \left(\frac{\Delta \phi}{2} \right) \right) \quad (23)$$

Así en la ecuación (23) se obtiene la primera intensidad del interferómetro.

Ahora, para la segunda intensidad y utilizando las propiedades anteriormente mencionadas se tiene:

$$I_{MZI2} = \frac{1}{2} * (t_1 e^{j\phi_1} - t_2 e^{j\phi_2}) * \frac{1}{2} (t_1 e^{-j\phi_1} - t_2 e^{-j\phi_2}) \quad (24)$$

$$I_{MZI2} = \frac{1}{4} * (t_1 e^{j\phi_1} - t_2 e^{j\phi_2}) * (t_1 e^{-j\phi_1} - t_2 e^{-j\phi_2})$$

Reemplazando t_2 :

$$I_{MZI2} = \frac{1}{4} * (t_1 e^{j\phi_1} - \alpha t_1 e^{j\phi_2}) * (t_1 e^{-j\phi_1} - \alpha t_1 e^{-j\phi_2})$$

$$I_{MZI2} = \frac{1}{4} * (t_1^2 - \alpha t_1^2 e^{j(\phi_1 - \phi_2)} - \alpha t_1^2 e^{-j(\phi_1 - \phi_2)} + (\alpha t_1)^2)$$

$$I_{MZI2} = \frac{1}{4} * (t_1^2 - \alpha t_1^2 e^{j\Delta\phi} - \alpha t_1^2 e^{-j\Delta\phi} + (\alpha t_1)^2)$$

Utilizando la propiedad de la exponencial:

$$I_{MZI2} = \frac{1}{4} * (t_1^2 - \alpha t_1^2 (\cos(\Delta\phi) + j\overline{\text{sen}(\Delta\phi)}) - \alpha t_1^2 (\cos(\Delta\phi) - j\overline{\text{sen}(\Delta\phi)}) + (\alpha t_1)^2)$$

$$I_{MZI2} = \frac{1}{4} * (t_1^2 - 2\alpha t_1^2 \cos(\Delta\phi) + (\alpha t_1)^2)$$

$$I_{MZI2} = \frac{t_1^2}{4} * (1 - 2\alpha \cos(\Delta\phi) + \alpha^2)$$

Utilizando un 1 conveniente:

$$I_{MZI2} = \frac{t_1^2}{4} * (1 - 2\alpha \cos(\Delta\phi) + \alpha^2 + 2\alpha - 2\alpha)$$

$$I_{MZI2} = \frac{t_1^2}{4} * (\alpha^2 - 2\alpha + 1 + 2\alpha(1 - \cos(\Delta\phi)))$$

Utilizando la propiedad $\text{sen}^2\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1 - \cos(\theta)}{2}$:

$$I_{MZI2} = t_1^2 * \left(\frac{(\alpha - 1)^2}{4} + \alpha \text{sen}^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \right) \quad (25)$$

Así, se obtienen las dos intensidades asociadas a un MZI de 2x2 [8].

Normalizando la transmisión $t_1 = 1$ presente en las ecuaciones (23) y (25) se obtienen las siguientes intensidades en los brazos del MZI:

$$I_{MZI1} = \frac{(\alpha - 1)^2}{4} + \alpha \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (26)$$

$$I_{MZI2} = \frac{(\alpha - 1)^2}{4} + \alpha \text{sen}^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (27)$$

Estas intensidades en el interferómetro dependen de α , valor el cual corresponde a una constante que define la visibilidad en el interferómetro que fue explicada anteriormente en la ecuación (5).

La visibilidad se hace máxima cuando α tiende a un valor igual a 1, es decir, solo dependerá de los factores sen^2 y $\cos^2$ los cuales corresponden a interferencias. Cuando existe una máxima interferencia constructiva y una mínima interferencia destructiva se obtiene el máximo de visibilidad en el interferómetro [2]. Este fenómeno se puede observar en la Figura 2.18:

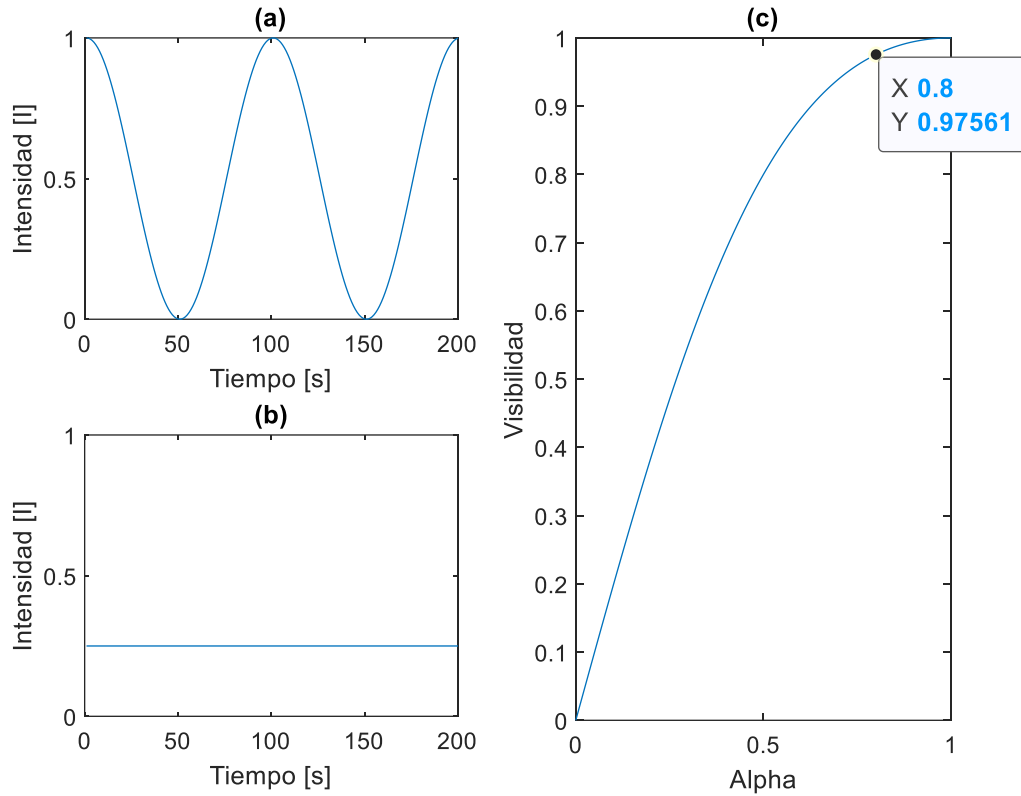


Figura 2.18 Visibilidad Interferómetro variando α . (a) Interferómetro con máxima visibilidad ($\alpha=1$). (b) Interferómetro con mínima visibilidad ($\alpha=0$). (c) Alpha v/s Visibilidad.

De la Figura 2.18a y Figura 2.18b, se puede observar el comportamiento de las ecuaciones características del interferómetro. Si la visibilidad es 0 se obtiene la componente de offset del interferómetro, mientras que si es 1 se tiene solo la componente de interferencia. Esto es válido para la ecuación (26) y (27).

En la Figura 2.18c se puede observar que si la potencia de un brazo del interferómetro es 20% menor con respecto al otro brazo, la visibilidad es de un valor aproximado de 98%, por lo que el factor de visibilidad se puede considerar despreciable si este presenta variaciones de no más del 20%.

Para asegurar un coeficiente de α cercano a 1 se utilizan polarizadores. Este elemento utiliza separación modal en polarización para aumentar la visibilidad [2]. Al utilizar un polarizador, este debe ser modelado agregando un factor que llamaremos β en las ecuaciones (26) y (27). Este afectará a las ecuaciones provocando una variación de interferencia y offset a las formas de onda. Así, las ecuaciones propuestas quedan de la siguiente forma:

$$I_{MZI1} = \frac{(\alpha-1)^2}{4} + \alpha * \beta * \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + f(\beta) \quad (28)$$

$$I_{MZI2} = \frac{(\alpha-1)^2}{4} + \alpha * \beta * \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + f(\beta) \quad (29)$$

Para encontrar $f(\beta)$ el valor de α se puede tender a 1 considerando solo alineación óptica.

Al realizar la suma de intensidades normalizadas entre ambos brazos se tiene que:

$$I_{MZI1} + I_{MZI2} = 1 \quad (30)$$

Entonces con $\alpha = 1$ y reemplazando (30) en la suma de (28) y (29) para despejar $f(\beta)$ se tiene:

$$1 = \beta * \left(\cos^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) + \sin^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \right) + 2 f(\beta) \quad (31)$$

Por propiedad trigonométrica $\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) = 1$ y reemplazando en (31):

$$1 = \beta + 2 f(\beta)$$

$$f(\beta) = \frac{1-\beta}{2} \quad (32)$$

Ahora, para obtener la expresión matemática del interferómetro de 2 brazos con polarizador se reemplaza (32) en las ecuaciones (28) y (29):

$$I_{MZI1} = \frac{(\alpha-1)^2}{4} + \frac{1-\beta}{2} + \alpha * \beta * \cos^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \quad (33)$$

$$I_{MZI2} = \frac{(\alpha-1)^2}{4} + \frac{1-\beta}{2} + \alpha * \beta * \sin^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \quad (34)$$

2.5.1 Caracterización formas de onda MZI de 2x2

De las ecuaciones (33) y (34) se puede realizar una caracterización de las formas de onda obtenidas en el laboratorio. Para esto, se realizó el montaje en laboratorio del esquema de la Figura 2.19:

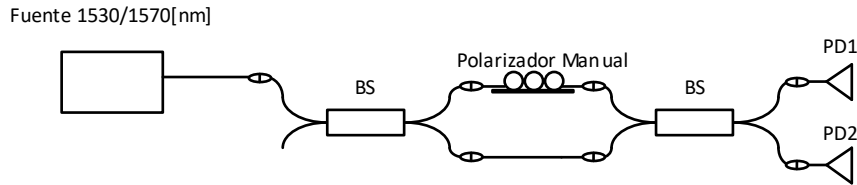


Figura 2.19 Esquema de construcción interferómetro Mach-Zehnder

Utilizando este esquema se obtiene el circuito mostrado en la Figura 2.20:

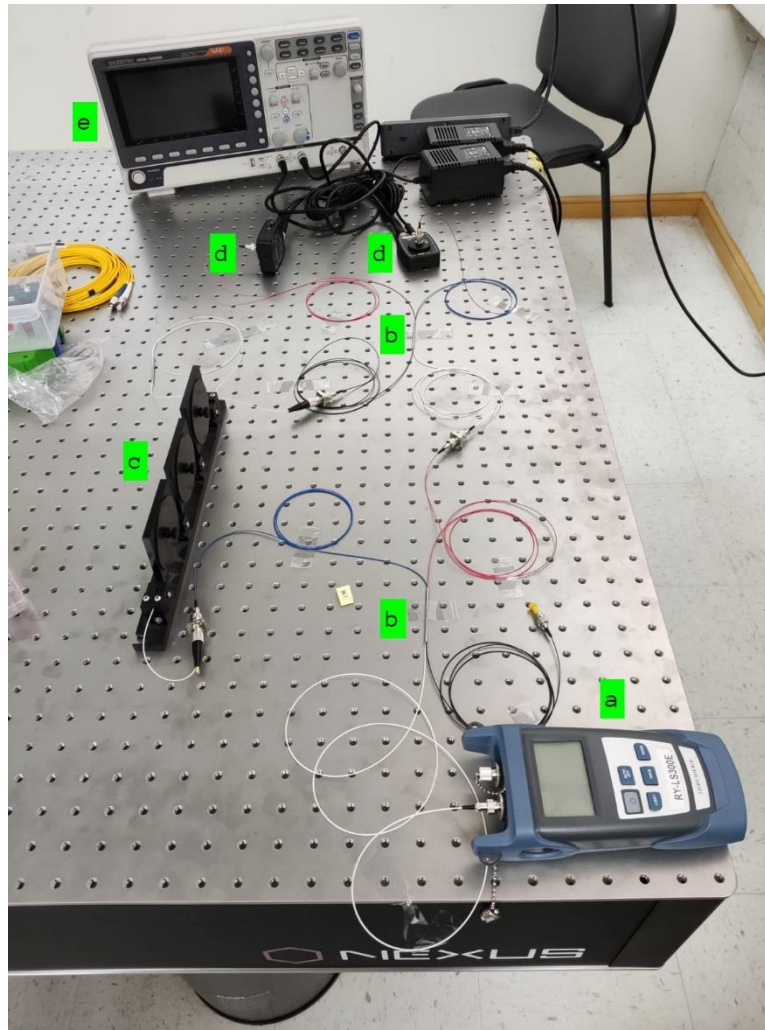


Figura 2.20 Circuito interferómetro Mach-Zehnder montado en laboratorios de la UCSC. (a) Fuente de luz láser. (b) BS de 2x2. (c) Polarizador Manual. (d) Fotodetectores. (e) Osciloscopio.

Del circuito de la Figura 2.20, se obtienen formas de onda en el osciloscopio para caracterizarlas con las ecuaciones antes descritas. Utilizando los polarizadores manuales se modifica la separación modal por polarización. Esto provoca en las ecuaciones (33) y (34) del MZI de 2x2 una variación en β , mientras que α se mantendrá en un valor constante, ya que posee variaciones despreciables al momento de utilizar un polarizador. Exportando los datos del osciloscopio y graficándolos mediante Matlab© se obtienen las siguientes formas de onda:

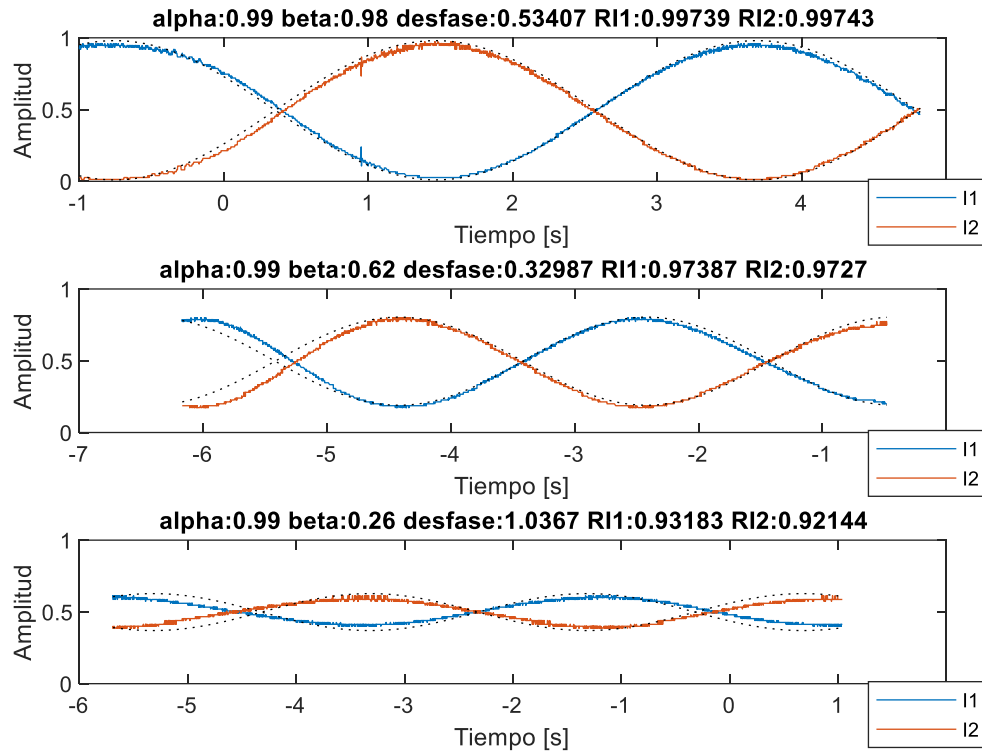


Figura 2.21 Caracterización Mach-Zehnder con polarizador con I_1 , I_2 correspondientes a las intensidades ópticas de salida en los brazos 1 y 2 del interferómetro. Alpha corresponde al factor de potencia óptica entre brazos, beta corresponde al factor de polarización, el desfase a la relación entre la señal experimental y la teórica y finalmente RI_1 y RI_2 , que corresponden a las correlaciones del brazo 1 y brazo 2 con respecto a los modelos matemáticos calculados.

De la Figura 2.21 se puede observar que, al mover las paletas del polarizador manual modificamos la separación modal por polarización. Al tener máxima visibilidad por interferencia, las correlaciones de ambas intensidades son cercanas al 99%, lo cual demuestra que las ecuaciones modeladas para el caso de máxima interferencia son bastante cercanas a los valores reales medidos en el laboratorio.

Como las ecuaciones modeladas satisfacen a las formas de onda mostradas anteriormente, es posible caracterizar ruidos de fase utilizando la máxima amplitud del polarizador, donde el valor de β será igual a 1, para así despreciar tanto los factores de α y β de las ecuaciones (33) y (34). Así, las intensidades quedan expresadas de la siguiente manera:

$$I_{MZI1} = \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (35)$$

$$I_{MZI2} = \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (36)$$

Aplicando el arcocoseno y el arcoseno en las ecuaciones (35) y (36) se puede expresar el ruido de fase del interferómetro de dos brazos cuando la interferencia es máxima.

$$\Delta\phi_1 = 2 * a \cos(\sqrt{I_{MZI1}}) \quad (37)$$

$$\Delta\phi_2 = 2 * a \sin(\sqrt{I_{MZI2}}) \quad (38)$$

Ahora realizando gráficas de 50 [s] por cuadro en el osciloscopio se obtienen las siguientes formas de onda:

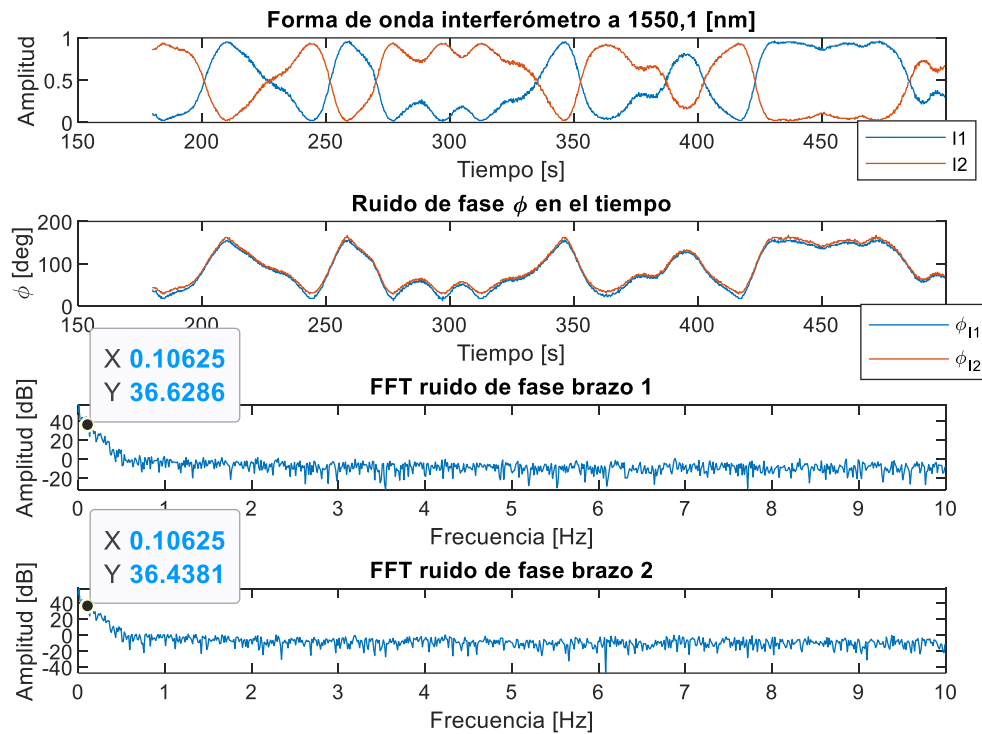


Figura 2.22 Forma de onda interferómetro a 1550,1 [nm] con 500[s], ruido de fase en el tiempo y la FFT del ruido de fase. Con I1, I2 correspondientes a las intensidades ópticas de salida del interferómetro.

De la Figura 2.22, se observa el ruido de fase que se genera a lo largo del tiempo para la forma de onda mostrada en la parte superior. Calculando la FFT del ruido de fase, se obtiene que la frecuencia de corte mostrada para ambos brazos es de 0.1[Hz]. El criterio de análisis utilizado para la determinación de las frecuencias de corte será cuando la señal decaiga en 20[dB] con respecto a la amplitud máxima en 0[Hz] (la amplitud máxima es de 57[dB] aproximadamente para ambos brazos). Con esto, se logra cubrir el 99% de las frecuencias presentes en el ruido de fase.

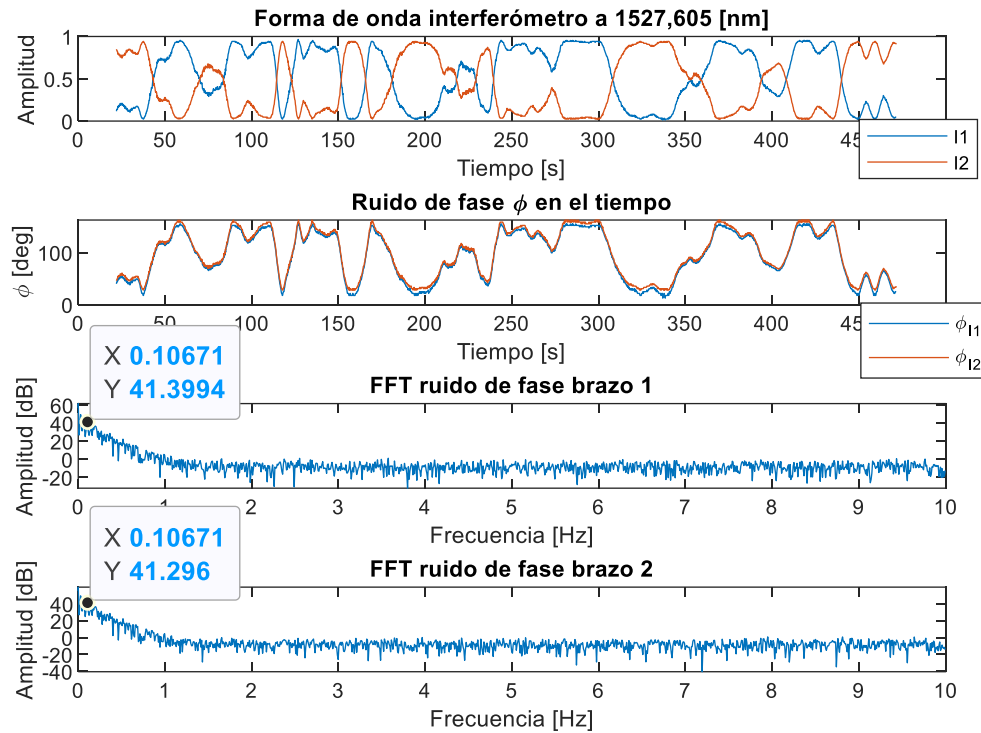


Figura 2.23 Forma de onda interferómetro a 1527,605 [nm] con 500[s], ruido de fase en el tiempo y la FFT del ruido de fase. Con I_1 , I_2 correspondientes a las intensidades ópticas de salida del interferómetro.

En la forma de onda obtenida en el caso de 1527.605 [nm], se pueden observar frecuencias de corte para ambos brazos aproximada de 0.1[Hz] (60[dB] de amplitud máxima aproximada para ambos brazos).

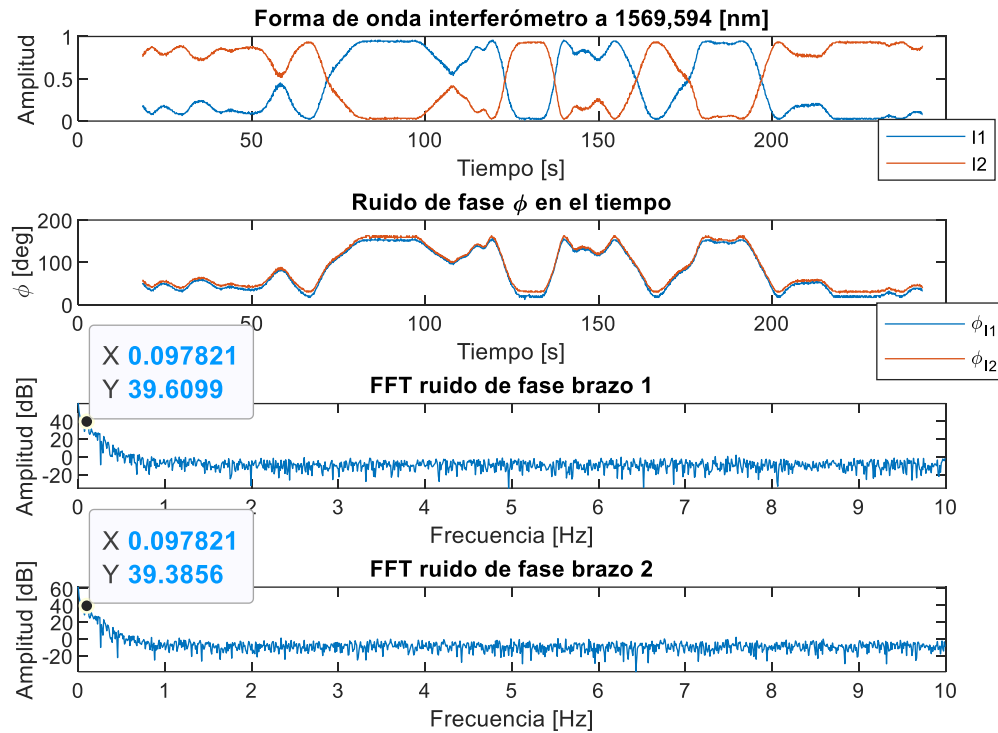


Figura 2.24 Forma de onda interferómetro a 1569,594 [nm] con 500[s], ruido de fase en el tiempo y la FFT del ruido de fase. Con I1, I2 correspondientes a las intensidades ópticas de salida del interferómetro.

De la Figura 2.24 se observa que la frecuencia de corte para 1569.594 [nm] tiene un valor de 0.1[Hz] aproximadamente para ambos brazos (60[dB] de amplitud máxima aproximadamente a 0[Hz]). Comparando las 3 longitudes de onda se puede apreciar que las frecuencias de corte presentes en el ruido de fase son de 0.1[Hz]. Entonces, las frecuencias de corte presentes en el ruido de fase para 1527[nm] a 1569[nm] se mantendrán en el rango de 0.1[Hz] aproximadamente.

Es importante señalar que el ancho de banda de 0.1[Hz] para el ruido de fase, es resultado de un MZI de 2x2 con largo aproximado de 10[m]. Construido en un espacio aproximado de 0.5[m²] sobre una mesa óptica en el laboratorio de optoelectrónica de la UCSC.

2.6. Interferómetro Mach-Zehnder de 4 brazos

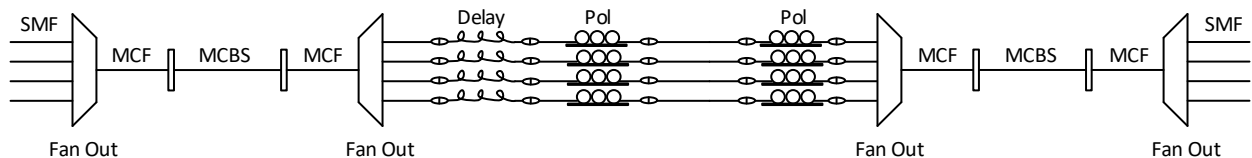


Figura 2.25 Diagrama MZI 4x4

Utilizando el mismo análisis del MZI de 2x2, se puede aplicar la ecuación (14) para un interferómetro de 4x4. Entonces, se tendrá una matriz de fase definida de la siguiente forma:

$$M_{\phi_{4 \times 4}} = \begin{pmatrix} e^{j\phi_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j\phi_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{j\phi_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{j\phi_4} \end{pmatrix} \quad (39)$$

Utilizando la ecuación (14) con las matrices (9) y (39) se tiene:

$$M_{MZI_{4 \times 4}} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{j\phi_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j\phi_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{j\phi_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{j\phi_4} \end{pmatrix} \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (40)$$

$$M_{MZI_{4 \times 4}} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{j\phi_1} & e^{j\phi_1} & e^{j\phi_1} & e^{j\phi_1} \\ e^{j\phi_2} & e^{j\phi_2} & -e^{j\phi_2} & -e^{j\phi_2} \\ e^{j\phi_3} & -e^{j\phi_3} & e^{j\phi_3} & -e^{j\phi_3} \\ e^{j\phi_4} & -e^{j\phi_4} & -e^{j\phi_4} & e^{j\phi_4} \end{pmatrix} \quad (41)$$

Con la matriz de transferencia del MZI de 4 brazos, es posible calcular el campo eléctrico de la misma forma que un MZI de 2x2. El campo eléctrico está expresado en (17), donde se hace incidir solo una señal de campo eléctrico en uno de los canales de entrada, como se muestra en (42).

$$\begin{pmatrix} E_{out_1} \\ E_{out_2} \\ E_{out_3} \\ E_{out_4} \end{pmatrix} = M_{MZI_{4 \times 4}} * \begin{pmatrix} E \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (42)$$

Reemplazando la matriz (41) en (42) se tiene:

$$\begin{pmatrix} E_{out_1} \\ E_{out_2} \\ E_{out_3} \\ E_{out_4} \end{pmatrix} = \frac{E}{4} \begin{pmatrix} e^{j\phi_1} + e^{j\phi_2} + e^{j\phi_3} + e^{j\phi_4} \\ e^{j\phi_1} + e^{j\phi_2} - e^{j\phi_3} - e^{j\phi_4} \\ e^{j\phi_1} - e^{j\phi_2} + e^{j\phi_3} - e^{j\phi_4} \\ e^{j\phi_1} - e^{j\phi_2} - e^{j\phi_3} + e^{j\phi_4} \end{pmatrix} \quad (43)$$

En la ecuación (43) se muestran las salidas de campo eléctrico de cada brazo del MZI de 4x4. Con esta ecuación es posible realizar el cálculo de la intensidad óptica utilizando la definición (21).

$$\begin{aligned}
I_{out_1} &= E_{out_1} * E_{out_1}^T = \frac{E^2}{16} (e^{j\phi_1} + e^{j\phi_2} + e^{j\phi_3} + e^{j\phi_4}) (e^{-j\phi_1} + e^{-j\phi_2} + e^{-j\phi_3} + e^{-j\phi_4}) \\
I_{out_2} &= E_{out_2} * E_{out_2}^T = \frac{E^2}{16} (e^{j\phi_1} + e^{j\phi_2} - e^{j\phi_3} - e^{j\phi_4}) (e^{-j\phi_1} + e^{-j\phi_2} - e^{-j\phi_3} - e^{-j\phi_4}) \\
I_{out_3} &= E_{out_3} * E_{out_3}^T = \frac{E^2}{16} (e^{j\phi_1} - e^{j\phi_2} + e^{j\phi_3} - e^{j\phi_4}) (e^{-j\phi_1} - e^{-j\phi_2} + e^{-j\phi_3} - e^{-j\phi_4}) \\
I_{out_4} &= E_{out_4} * E_{out_4}^T = \frac{E^2}{16} (e^{j\phi_1} - e^{j\phi_2} - e^{j\phi_3} + e^{j\phi_4}) (e^{-j\phi_1} - e^{-j\phi_2} - e^{-j\phi_3} + e^{-j\phi_4})
\end{aligned} \tag{44}$$

Realizando la multiplicación de exponenciales y agrupando términos se tiene:

$$\begin{aligned}
I_{out_1} &= \frac{E^2}{16} \left(4 + (e^{j(\phi_1-\phi_2)} + e^{-j(\phi_1-\phi_2)}) + (e^{j(\phi_1-\phi_3)} + e^{-j(\phi_1-\phi_3)}) + (e^{j(\phi_1-\phi_4)} + e^{-j(\phi_1-\phi_4)}) + \right. \\
&\quad \left. (e^{j(\phi_2-\phi_3)} + e^{-j(\phi_2-\phi_3)}) + (e^{j(\phi_2-\phi_4)} + e^{-j(\phi_2-\phi_4)}) + (e^{j(\phi_3-\phi_4)} + e^{-j(\phi_3-\phi_4)}) \right) \\
I_{out_2} &= \frac{E^2}{16} \left(4 + (e^{j(\phi_1-\phi_2)} + e^{-j(\phi_1-\phi_2)}) - (e^{j(\phi_1-\phi_3)} + e^{-j(\phi_1-\phi_3)}) - (e^{j(\phi_1-\phi_4)} + e^{-j(\phi_1-\phi_4)}) - \right. \\
&\quad \left. (e^{j(\phi_2-\phi_3)} + e^{-j(\phi_2-\phi_3)}) - (e^{j(\phi_2-\phi_4)} + e^{-j(\phi_2-\phi_4)}) + (e^{j(\phi_3-\phi_4)} + e^{-j(\phi_3-\phi_4)}) \right) \\
I_{out_3} &= \frac{E^2}{16} \left(4 - (e^{j(\phi_1-\phi_2)} + e^{-j(\phi_1-\phi_2)}) + (e^{j(\phi_1-\phi_3)} + e^{-j(\phi_1-\phi_3)}) - (e^{j(\phi_1-\phi_4)} + e^{-j(\phi_1-\phi_4)}) - \right. \\
&\quad \left. (e^{j(\phi_2-\phi_3)} + e^{-j(\phi_2-\phi_3)}) + (e^{j(\phi_2-\phi_4)} + e^{-j(\phi_2-\phi_4)}) - (e^{j(\phi_3-\phi_4)} + e^{-j(\phi_3-\phi_4)}) \right) \\
I_{out_4} &= \frac{E^2}{16} \left(4 - (e^{j(\phi_1-\phi_2)} + e^{-j(\phi_1-\phi_2)}) - (e^{j(\phi_1-\phi_3)} + e^{-j(\phi_1-\phi_3)}) + (e^{j(\phi_1-\phi_4)} + e^{-j(\phi_1-\phi_4)}) + \right. \\
&\quad \left. (e^{j(\phi_2-\phi_3)} + e^{-j(\phi_2-\phi_3)}) - (e^{j(\phi_2-\phi_4)} + e^{-j(\phi_2-\phi_4)}) - (e^{j(\phi_3-\phi_4)} + e^{-j(\phi_3-\phi_4)}) \right)
\end{aligned} \tag{45}$$

Para simplificar esta expresión utilizamos la identidad trigonométrica $e^{j\theta} + e^{-j\theta} = 2\cos(\theta)$, reemplazando en (45):

$$\begin{aligned}
I_{out_1} &= \frac{E^2}{8} (2 + \cos(\phi_1 - \phi_2) + \cos(\phi_1 - \phi_3) + \cos(\phi_1 - \phi_4) + \cos(\phi_2 - \phi_3) + \cos(\phi_2 - \phi_4) + \cos(\phi_3 - \phi_4)) \\
I_{out_2} &= \frac{E^2}{8} (2 + \cos(\phi_1 - \phi_2) - \cos(\phi_1 - \phi_3) - \cos(\phi_1 - \phi_4) - \cos(\phi_2 - \phi_3) - \cos(\phi_2 - \phi_4) + \cos(\phi_3 - \phi_4)) \\
I_{out_3} &= \frac{E^2}{8} (2 - \cos(\phi_1 - \phi_2) + \cos(\phi_1 - \phi_3) - \cos(\phi_1 - \phi_4) - \cos(\phi_2 - \phi_3) + \cos(\phi_2 - \phi_4) - \cos(\phi_3 - \phi_4)) \\
I_{out_4} &= \frac{E^2}{8} (2 - \cos(\phi_1 - \phi_2) - \cos(\phi_1 - \phi_3) + \cos(\phi_1 - \phi_4) + \cos(\phi_2 - \phi_3) - \cos(\phi_2 - \phi_4) - \cos(\phi_3 - \phi_4))
\end{aligned} \tag{46}$$

Así se tiene en la ecuación (46) las ecuaciones características de intensidad óptica correspondientes a un interferómetro de 4 brazos.

Capítulo 3. Configuración experimental para el control

3.1. Caja de control.

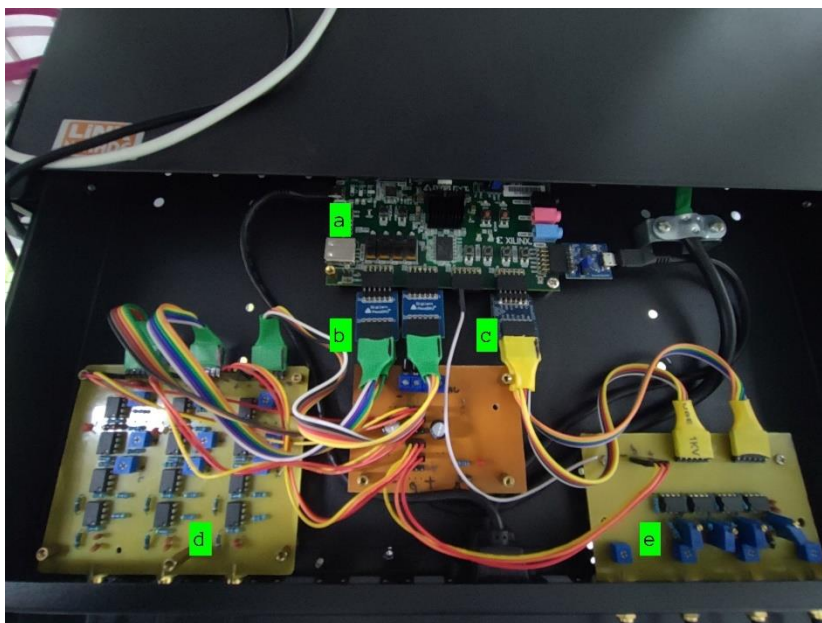


Figura 3.1 Caja de Control utilizada. Con (a) FPGA Zybo-Z20. (b) Conversores DAC. (c) Conversores ADC. (d) Circuito para calibrar la señal enviada por el DAC. (e) Circuito para calibrar la señal que recibe el ADC.

Esta caja de control fue facilitada por el laboratorio de optoelectrónica de la UCSC. Consiste en un dispositivo que contiene en su interior un FPGA Zybo-Z20 (a), conectado a 2 conversores ADC; uno montado en la parte superior y otro en la parte inferior (c), con 2 entradas cada uno, para obtener las señales de intensidad óptica obtenidas mediante los fotodetectores. Existe una etapa de potenciómetros (e), que sirven para ajustar las amplitudes de las intensidades de los módulos ADC, que son visualizados mediante un software en computador. Los datos del ADC ingresan hacia el FPGA, para luego con esa señal enviar el control a los PM utilizando 3 conversores DAC donde uno de los conversores está ubicado debajo de otro conversor (b). Estos envían una señal triangular o pulsos eléctricos para aplicar el sistema de control que es calibrada por otra etapa de potenciómetros (d).

El software fue facilitado por la UCSC para controlar el MZI, el control que utiliza esta máquina es un algoritmo basado en Maximum Power Point Tracking [2]. La plataforma que utiliza se basa en programación en Visual C#, el cual será el encargado de generar el control hacia el MZI. Posee múltiples funcionalidades, dentro de las cuales destaca la posibilidad de activar modulación en los PM, modulación de la señal a controlar, controles máximos, mínimos y de referencia, modificar el ancho de modulación de la señal, entre otros.

3.2. Control directo e inverso MZI 2x2

Para realizar el control directo e inverso de un MZI es necesario realizarle modificaciones al circuito de la Figura 2.19. Esto se muestra en la Figura 3.2:

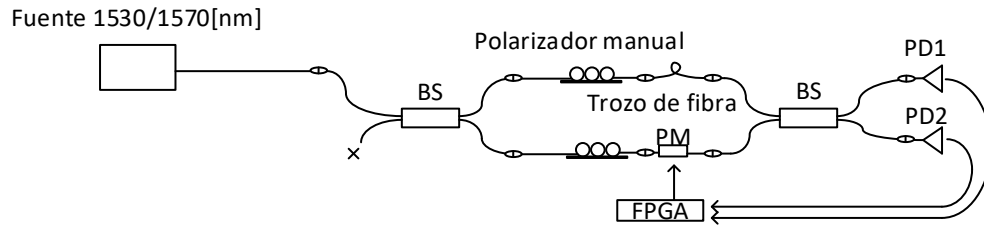


Figura 3.2 Esquema MZI de 2 brazos para control directo.

Para el caso de la Figura 3.2 con respecto a la Figura 2.19, se debe agregar un polarizador manual por brazo. Esto para hacer despreciable la constante de polarización β y la constante de potencia óptica entre brazos α mostradas en las ecuaciones (33) y (34). Además, también debe agregarse un modulador de fase (PM), el cual recibirá señales de voltaje enviadas mediante un FPGA. Con un software ya existente, se generará una señal de control basada en la recopilación de información obtenida por los fotodetectores para ser enviada hacia el PM. El trozo de fibra adicional en el interferómetro es necesario para asegurar máxima interferencia en la señal. Con una máxima interferencia se asegura que la visibilidad puede llegar a ser máxima. Este concepto se denomina longitud de coherencia en un interferómetro.

El circuito montado en el laboratorio se observa en la Figura 3.3:

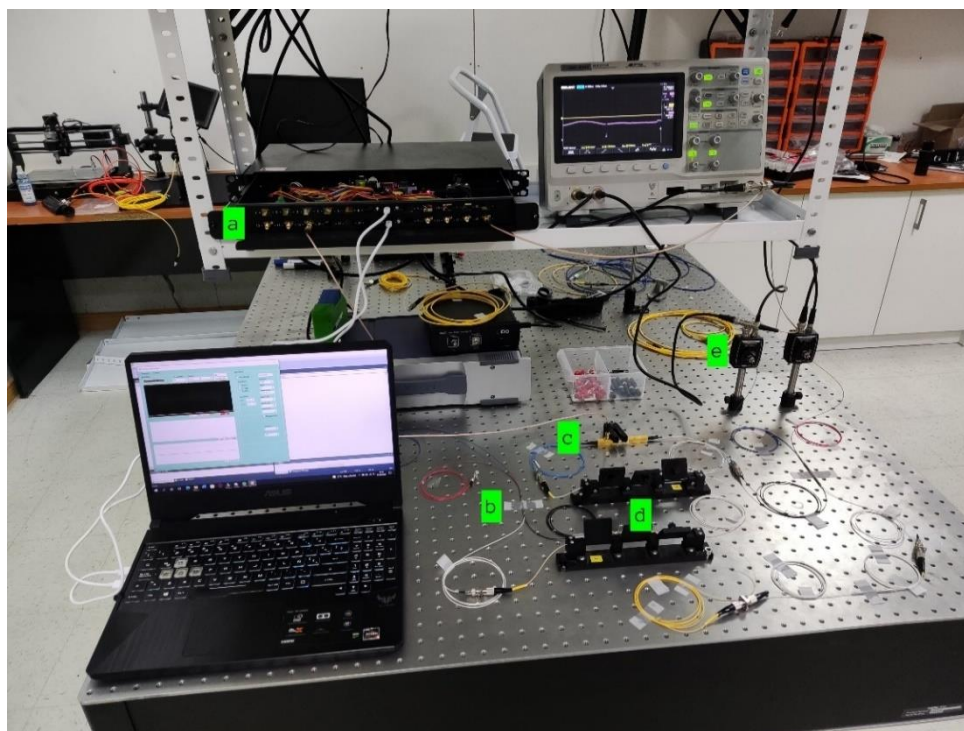


Figura 3.3 MZI 2x2 montado en UCSC para control directo. a) Caja Control. b) BS. c) PM. d) Polarizador Manual. e) Fotodetector

Para realizar el control inverso es necesario considerar otras modificaciones al circuito, tal como se muestra en la Figura 3.4:

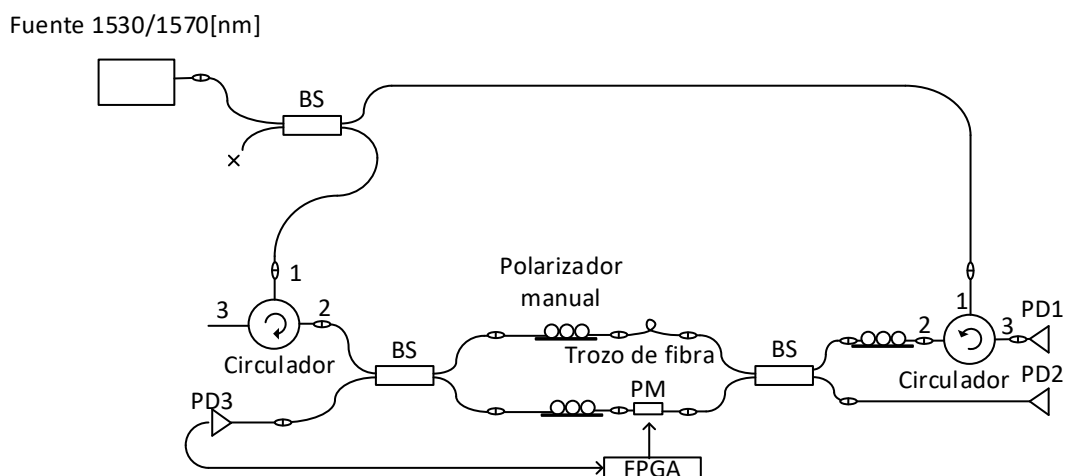


Figura 3.4 Esquema MZI de 2 brazos para control inverso.

En la Figura 3.4 se puede observar un elemento adicional llamado circulator. La función de este elemento es impedir que el láser de control de forma inversa ingrese nuevamente por el láser utilizado como señal para evitar una avería en el láser utilizado. También se dispone de un tercer

polarizador, ubicado en el circulador derecho, la función de este polarizador es modificar la polarización de la señal de control, ya que la polarización estará ajustada para el láser utilizado como señal, por lo que su visibilidad pudiese no ser máxima. Finalmente se observa otro fotodetector (PD3) que recibe los datos hacia el FPGA para ejecutar el control mediante el PM.

El circuito construido en base al esquema de la Figura 3.4 se presenta en la Figura 3.5.

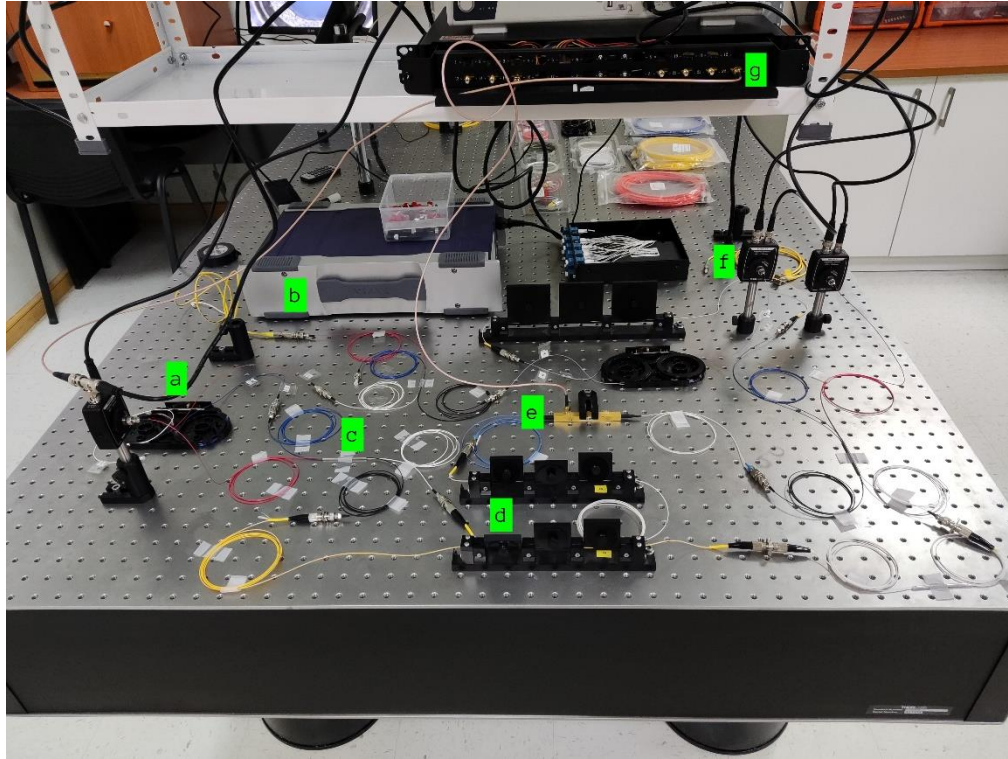


Figura 3.5 MZI 2x2 utilizando control inverso. a) Circulador. b) Láser tunable. c) BS. d) Polarizador Manual. e) PM. f) Fotodetector. g) Caja Control.

3.3. Control directo e inverso MZI 4x4

Este interferómetro fue montado en las dependencias de la Universidad de Concepción, que está regido por el esquema de la Figura 3.6:

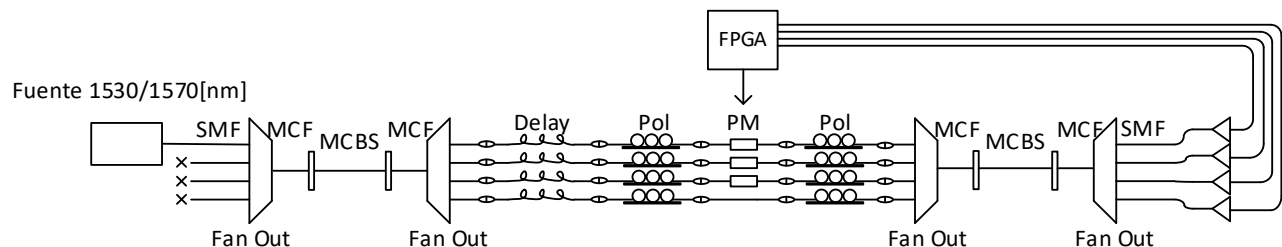


Figura 3.6 Esquema MZI de 4x4

El MZI de la Figura 3.6 posee 4 entradas. Usualmente, para un interferómetro se utiliza una sola, que es donde ingresa el láser. De forma inicial, la señal pasa por un BS de 4x4 multicore

(incluyendo los DEMUX, que consiste en un elemento que posee una entrada y varias salidas, mostrados en el esquema como fan-out). Se conecta a una etapa de Delay que consiste en trozos de fibra óptica para llegar a la etapa de polarización. Aquí se puede modificar la amplitud de la señal. Luego pasa por moduladores de fase de la misma forma que la explicada en la Figura 3.2. Finalmente, pasa por otra etapa de polarización encargada de obtener la máxima visibilidad en el interferómetro y llegar a otro BS de 4x4 para obtener 4 salidas en fibra monomodo.

Una vez corroborado que el sistema es capaz de transmitir un láser en sentido directo e inverso, se procede a modificar el setup para enviar tanto el láser de señal como el láser de control. Esto se hace de la misma forma que el esquema mostrado en la Figura 3.4, donde será necesaria la implementación de circuladores en cada extremo para conectar 2 fuentes, esto con el fin de evitar averías en los láseres. El esquema a montar es mostrado a continuación:

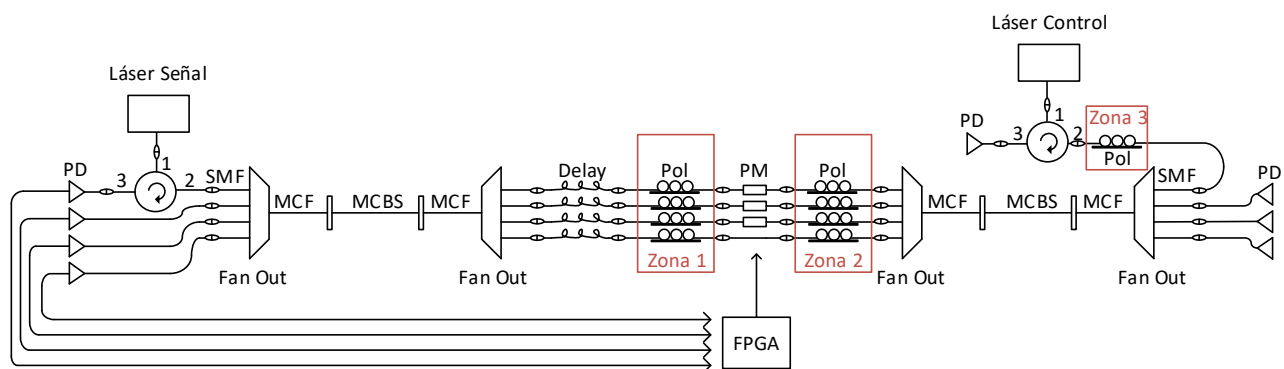


Figura 3.7 Esquema MZI 4x4 utilizando control inverso en una señal

En el esquema de la Figura 3.7 se puede observar que existen 3 zonas de interés al aplicar el control inverso en el setup que se va a montar, correspondientes a los polarizadores. Estas zonas son importantes a la hora de realizar el control en el circuito, ya que gracias a estos se puede obtener la mayor visibilidad posible en el sistema. En la zona 1 se modifica la amplitud del láser de señal a la salida y la visibilidad en el láser de control, mientras que la zona 2 actuará de forma inversa (modifica amplitud del láser de control y visibilidad del láser de señal). Finalmente, la zona 3 modifica solo la amplitud y visibilidad del láser de control.

El circuito utilizando el control inverso en los laboratorios es mostrado en la Figura 3.8

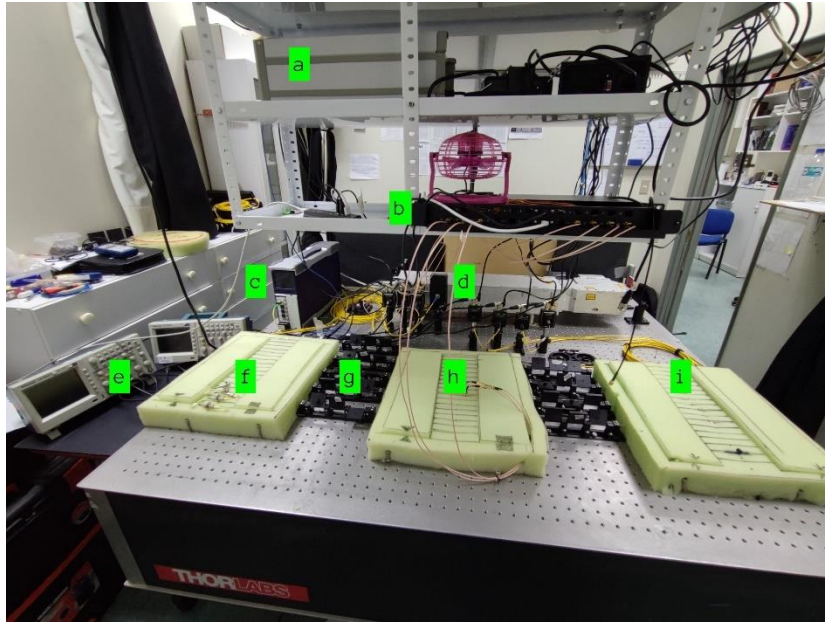


Figura 3.8 MZI de 4x4 instalado en laboratorio UdeC. (a) Láser de Control. (b) Caja de Control. (c) Láser de Señal. (d) Fotodetectores. (e) Osciloscopios. (f) BS 4x4. (g) Polarizadores Manuales. (h) PMS. (i) BS 4x4.

En la Figura 3.8, se observa el setup instalado en el laboratorio. En “a”, “b”, “c” se muestra el láser de control, caja de control y láser de señal respectivamente. En “d”, hay un conjunto de 8 fotodetectores en donde 4 medirán la señal modulada y el resto la señal de control mediante los osciloscopios mostrados en “e”. Al interior de “f” se encuentra el BS de 4x4 multicore en conjunto con los fan-out. En “g” se ubican los polarizadores manuales, que van a la entrada y salida de “h” donde en este punto se ubican los PM. Finalmente, en “i” se ubica otra etapa de BS para conformar la estructura del MZI de 4x4. Los circuladores no logran ser visualizados, pero estos están ubicados a la entrada de cada láser como es mostrado en el esquema de la Figura 3.7.

Capítulo 4. Análisis y resultados

4.1. Control directo MZI 2x2

Una vez montado el circuito directo del MZI de 2x2, se calcula la visibilidad en cada brazo más su Crosstalk asociado. Para el cálculo de visibilidad se utiliza la ecuación (5), donde se requiere un valor máximo y mínimo de una misma señal. Para esto se procede a utilizar a modo de ejemplo la Figura 4.1, donde el valor máximo del brazo 1 será el correspondiente al del control directo del brazo 1 y su valor mínimo se obtiene de la gráfica mostrada cuando se utiliza el control directo en el brazo 2.

Para el Crosstalk, nos regimos por la ecuación (4), donde al usar solo 2 brazos, se utiliza la potencia del brazo que está en un valor mínimo con respecto al que está en un valor máximo. En caso de que se utilicen una mayor cantidad de brazos, este Crosstalk se mide haciendo mediciones individuales por cada brazo que sea mínimo con respecto a su brazo que es máximo.

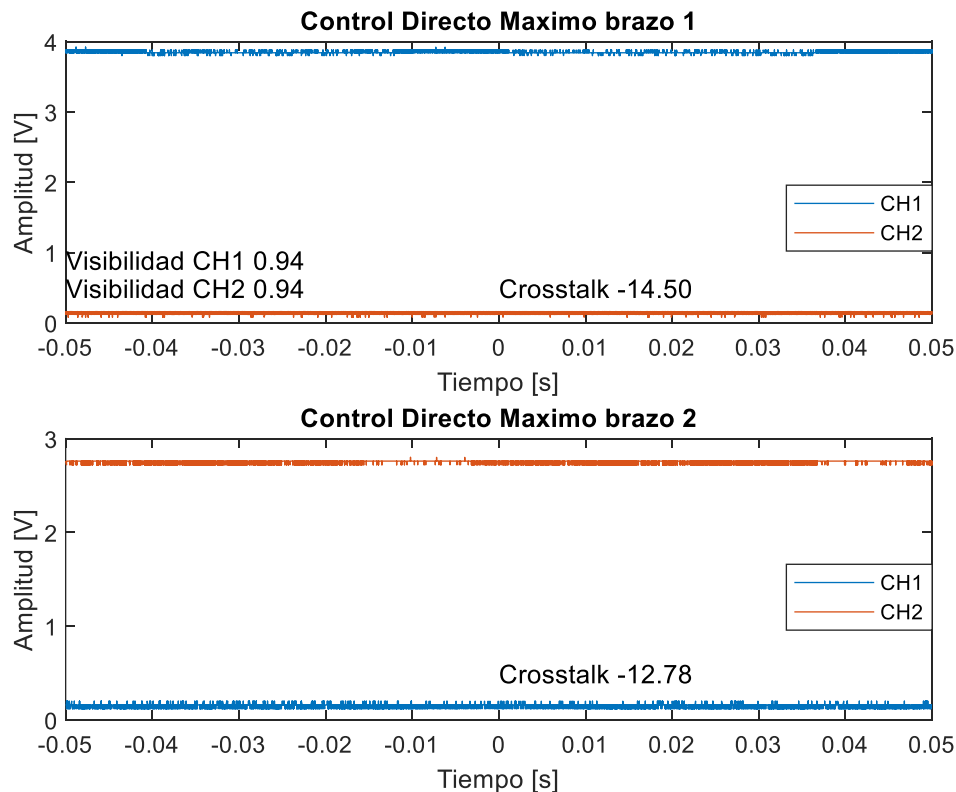


Figura 4.1 Control Directo Máximo MZI de 2x2

Para el caso de control directo, se puede observar que la visibilidad de cada brazo es de 0.94, valor que indica que el MZI no posee una correcta alineación debido a que la polarización no es

máxima. En el caso del Crosstalk se puede observar que el sistema de control trabaja mejor para el control máximo del primer brazo.

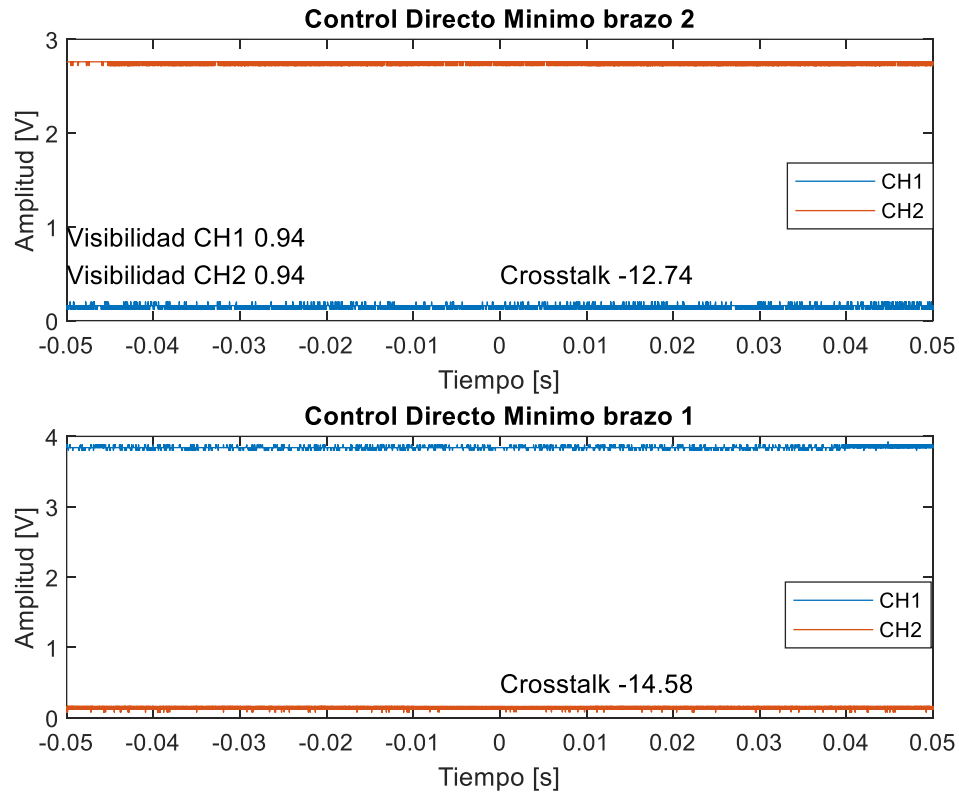


Figura 4.2 Control Directo Mínimo MZI de 2x2

Aplicando el control mínimo también se puede observar que el sistema de control tiene un mejor desempeño en el brazo 1 del interferómetro. Esto es debido a que la potencia otorgada por el BS no es uniforme en cada brazo, valor que es corroborado al observar que el brazo 1 posee una mayor amplitud con respecto al brazo 2. Estas diferencias con respecto al Crosstalk se pueden deber a que la referencia utilizada en la caja de control no correspondía al máximo y mínimo valor del brazo 2 del interferómetro, este parámetro se puede mejorar si se vuelve a realizar la alineación en el interferómetro, buscando un mejor valor de visibilidad y ajustando los potenciómetros ubicados en la caja de control (sección 3.1).

4.2. Control Inverso MZI 2x2

Para el control inverso, se implementa el circuito de control inverso del MZI de 2x2, obteniéndose las siguientes gráficas:

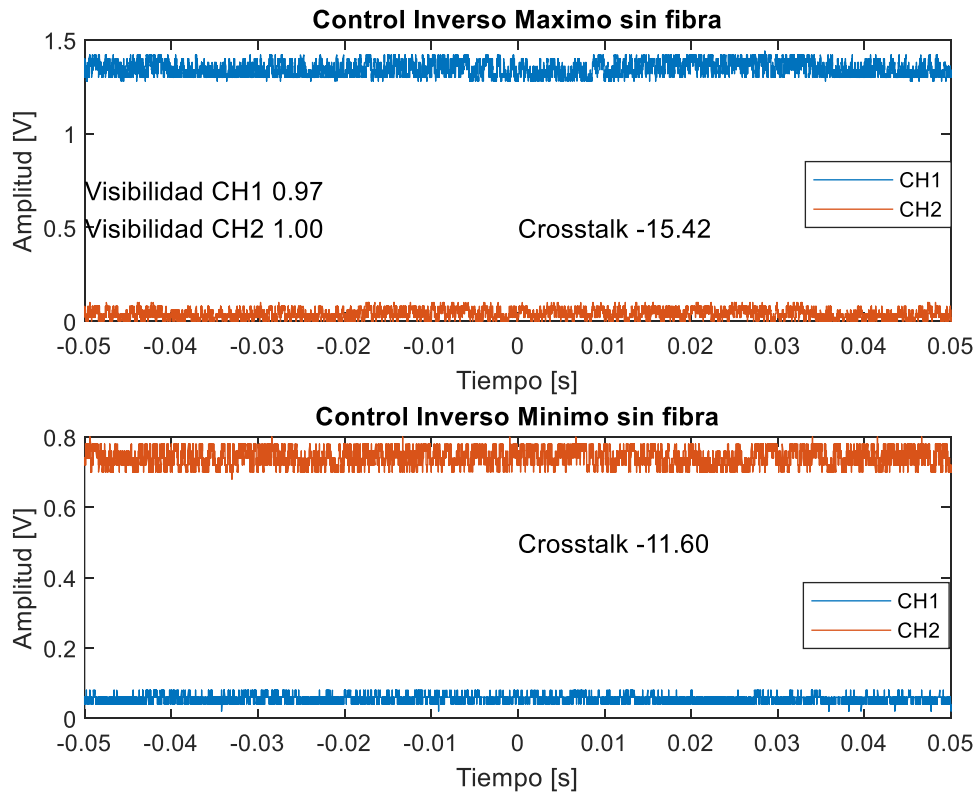


Figura 4.3 Control Inverso MZI de 2x2

Para el control inverso la señal obtenida por el FPGA proviene de un fotodetector, por lo que solo se puede aplicar control inverso en modo máximo o mínimo.

A pesar de que la visibilidad y Crosstalk en este experimento poseen mejores resultados que el control directo, estas señales presentan mucho ruido al aplicar el control inverso. Esto es debido a que existe una interferencia de fase del láser, ya que en este caso es el mismo láser el que sirve como láser de señal y láser de control mediante un BS. Para atenuar este problema es necesario romper la longitud de coherencia entre el láser de señal y el láser de control lo cual se logra añadiendo un par de metros extra de fibra en la señal de control. Para esto se realizaron 2 mediciones añadiendo 5 y 10 metros de fibras, gráficas que son mostradas en la Figura 4.4 y Figura 4.5:

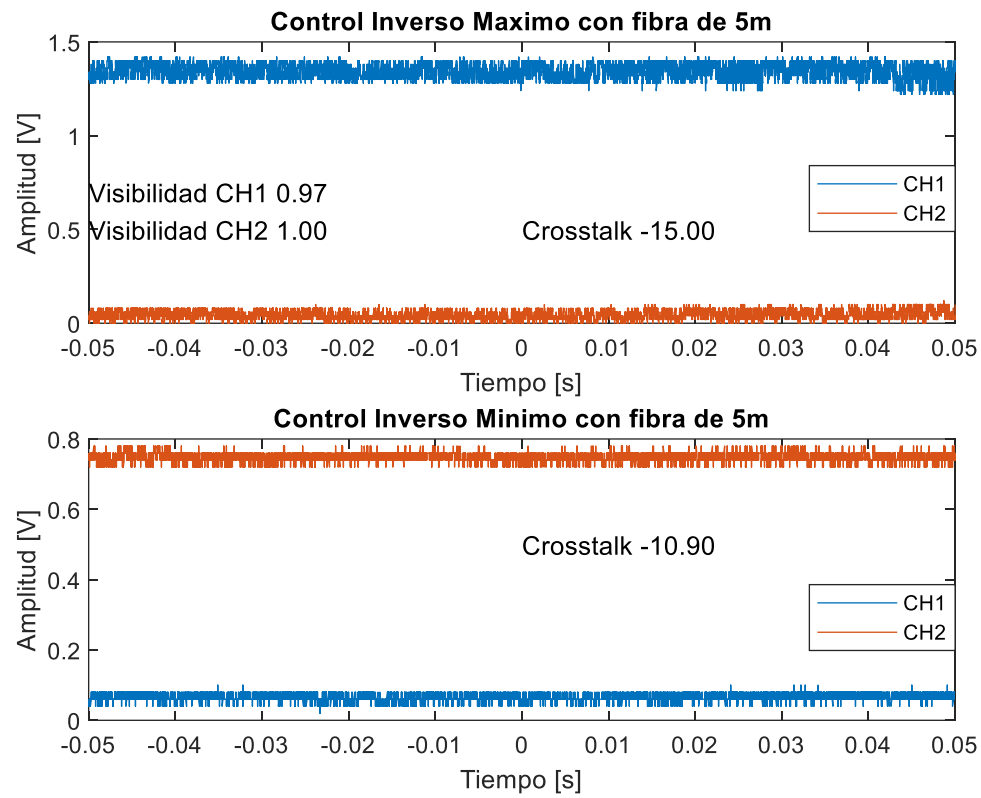


Figura 4.4 Control Inverso MZI de 2x2 utilizando 5 metros de fibra en señal de control

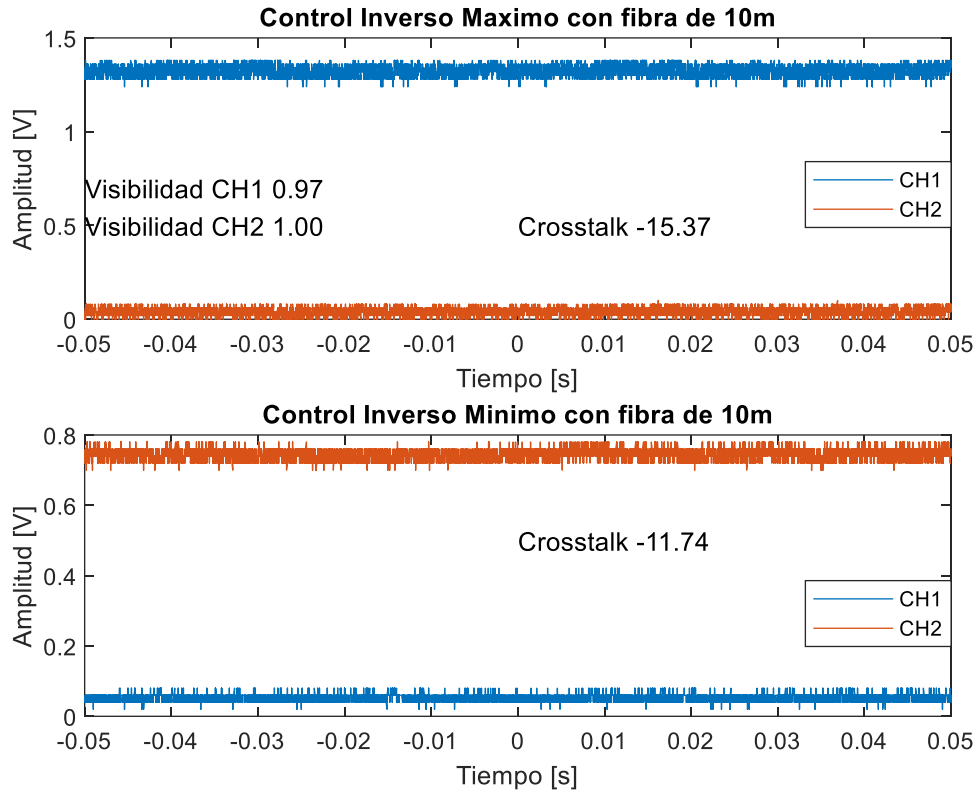


Figura 4.5 Control Inverso MZI de 2x2 utilizando 10 metros de fibra en señal de control

A continuación, se presenta una tabla comparativa del control inverso utilizando distintas longitudes de fibra en la señal de control:

Tabla 4.1 Tabla comparativa de control inverso en MZI de 2x2 utilizando distintos metros de fibra

Fibra óptica	Visibilidad		Crosstalk [dB]		Desviación Estándar Control Inverso Máximo		Desviación Estándar Control Inverso Mínimo	
	CH1	CH2	Control Inverso Máximo	Control Inverso Mínimo	CH1	CH2	CH1	CH2
0	0.9726	1	-15.4177	-11.597	0.0395	0.0251	0.0103	0.0243
5	0.97222	1	-15.0046	-10.9003	0.0425	0.0241	0.0110	0.0129
10	0.97143	1	-15.3651	-11.7445	0.0317	0.0214	0.0105	0.0166

En la Tabla 4.1 se puede ver que a medida que se va añadiendo fibra óptica, la visibilidad al verse afectada también se verá afectado el Crosstalk asociado, obteniéndose igual o peores resultados que los obtenidos sin fibra. Las perturbaciones presentes en la fibra para el caso de 5 y 10 [m] se deben a que la fibra óptica es muy susceptible a perturbaciones, generando mediciones de baja calidad. Entre estas perturbaciones están: el ruido ambiente, las conexiones y desconexiones de elementos para cambiar la fibra, entre otros. No obstante, a pesar de estas perturbaciones se puede observar que

ninguna medición ofrece una mejor visibilidad o Crosstalk que cuando no se utiliza fibra óptica adicional en el sistema.

4.3. Control Directo MZI 4x4

Para el control directo se monta el esquema de control directo del MZI de 4x4. Como señal óptica de entrada se utilizará el láser tunable en uno de los brazos del MZI, el cual irá variando su longitud de onda para aplicar el control mediante la caja de control. El control solo se aplica una vez alineado el interferómetro para obtener su máxima visibilidad. Para esto, se realiza el procedimiento mostrado a continuación:

- 1) Inicialmente se programa el FPGA y se activa el software de computadora.
- 2) Se ajusta la polarización en los primeros polarizadores (Zona 1 Figura 3.7), para modificar la amplitud óptica en cada brazo. Para esto, es necesaria la desconexión de 3 brazos antes de la zona 1 o después de la zona 2 (Figura 3.7). Luego, se procede a ajustar el polarizador del brazo que está conectado. Este proceso se repite para cada brazo en donde se debe buscar que la amplitud óptica de todos los brazos sea lo más uniforme posible.
- 3) Se conectan los brazos de a pares y con los segundos polarizadores (Zona 2 Figura 3.7), se busca obtener la mayor interferencia o visibilidad en el MZI. Es decir, se busca que la amplitud óptica de la señal posea un valor mínimo lo más cercano a cero para todas las señales. Para esto se puede utilizar la modulación de los PM mediante el software y así, obtener una máxima visibilidad.
- 4) Una vez realizado el paso 2, se conectan los 4 brazos del MZI. Se calibran las amplitudes de los conversores ADC mediante potenciómetros para igualar las intensidades en cada brazo, ya que estas son distintas debido a los BS y la responsividad de los fotodetectores. Para la calibración, es posible utilizar el control máximo y utilizar una misma referencia para cada brazo.
- 5) Luego viene la calibración de los PM en el circuito mediante los DAC. Utilizando los potenciómetros ubicados en el DAC se procede a calibrar la fase de los PM. Aquí el FPGA entrega un voltaje correspondiente a fase 0 o fase π . Estas combinaciones provienen de la matriz del BS de la ecuación (9). En esta ecuación el valor 1 corresponde a una fase 0 y el valor -1 corresponde a la fase π .

Una vez realizada la alineación del MZI de 4x4, se hace uso del sistema de control mediante el software. Inicialmente se utiliza el control directo y se obtienen las gráficas de la Figura 4.6:

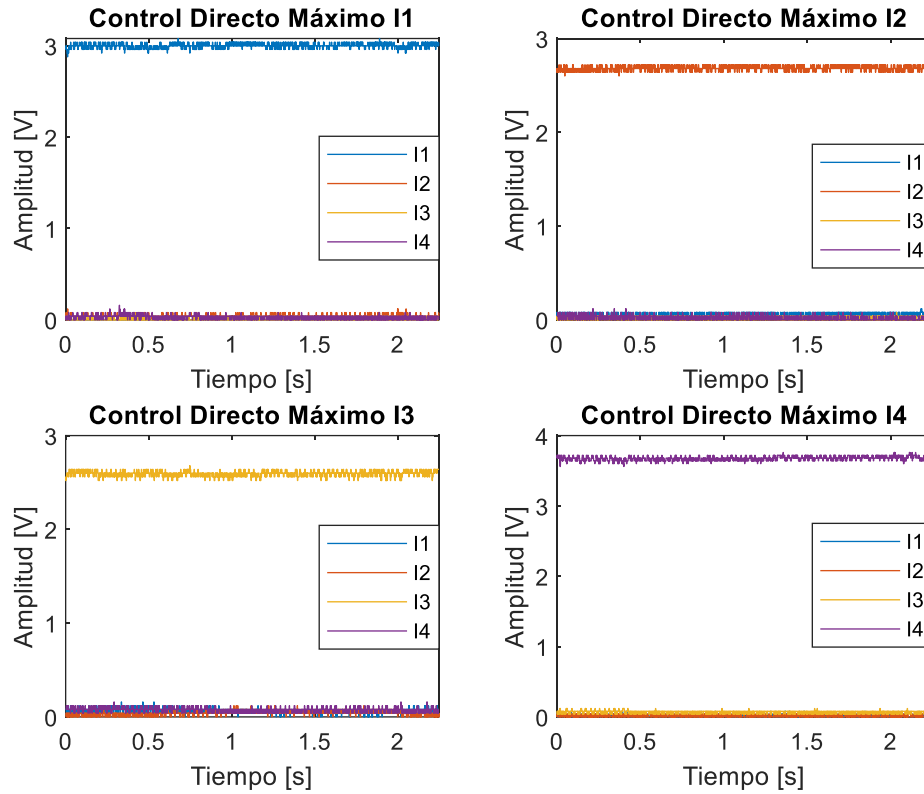


Figura 4.6 Control Directo Máximo MZI 4x4, en color azul se presenta la intensidad óptica presente en el brazo 1, naranja en el brazo 2, amarilla en el brazo 3 y morada en el brazo 4.

Al aplicar el control máximo se procede a activar la etapa de modulación de la señal mediante el software. En esta etapa se envían pulsos de voltaje, que van variando la fase de un brazo desde 0 a 2π , obteniéndose instantes de tiempo en donde una intensidad óptica del brazo se hará máxima y el resto será mínima, tal como es mostrado en la Figura 4.7a. Luego, se procede a calcular el valor de Crosstalk de esta zona, que se definen como el valor en donde una intensidad óptica es máxima. Utilizando la ecuación (4) de Crosstalk, se obtienen vectores correspondientes al cálculo de cada Crosstalk individual. El brazo que sea máximo en un instante de tiempo será el correspondiente a la potencia P_k , mientras que las componentes P_j serán las señales que contaminan a P_k durante ese período de modulación (ver Figura 4.7a). Esto es aplicado para cada zona formando una matriz de Crosstalk representada en la ecuación (47):

$$Crosstalk[dB] = 10 \log_{10} * \begin{pmatrix} \frac{P_1}{P_1} & \frac{P_2}{P_1} & \frac{P_3}{P_1} & \frac{P_4}{P_1} \\ \frac{P_1}{P_2} & \frac{P_2}{P_2} & \frac{P_3}{P_2} & \frac{P_4}{P_2} \\ \frac{P_1}{P_3} & \frac{P_2}{P_3} & \frac{P_3}{P_3} & \frac{P_4}{P_3} \\ \frac{P_1}{P_4} & \frac{P_2}{P_4} & \frac{P_3}{P_4} & \frac{P_4}{P_4} \end{pmatrix} \quad (47)$$

De la matriz en la ecuación (47), la diagonal corresponde al Crosstalk producido por la señal en sí misma, por tanto, corresponde a un máximo Crosstalk. Luego, se obtiene el valor promedio del resto de los componentes de la matriz para obtener un valor de Crosstalk en función de la longitud de onda mostrados en la Figura 4.7b.

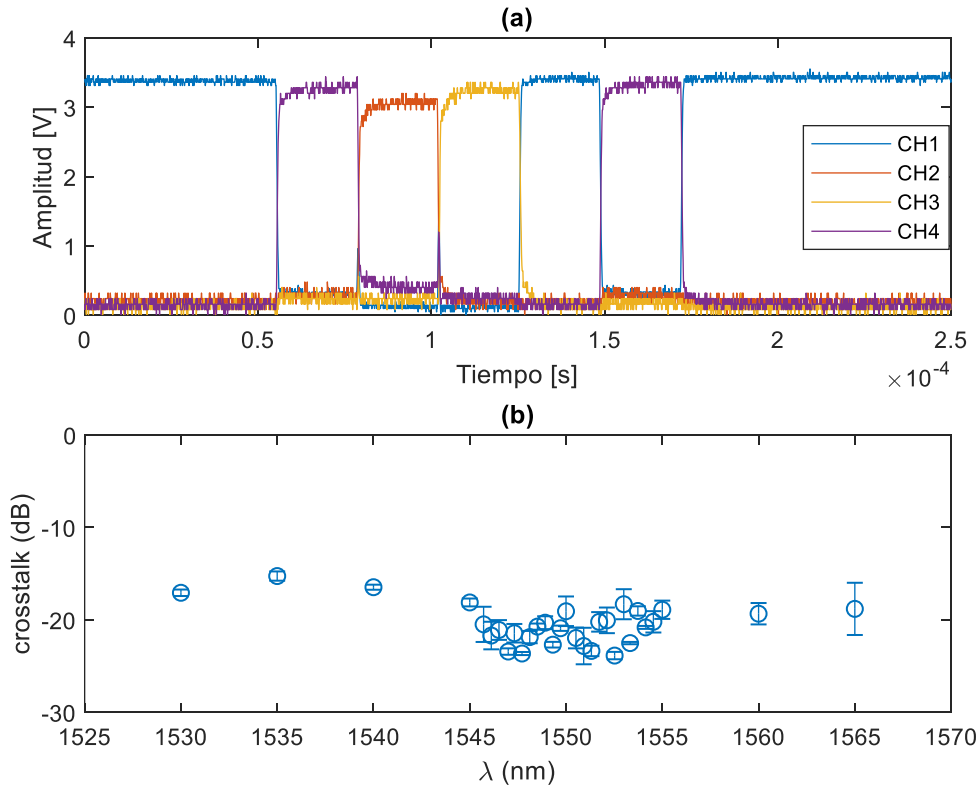


Figura 4.7 Gráficas MZI 4x4 utilizando control directo. (a) Gráfica referencial de control máximo más modulación (b) Gráfica de promedios de Crosstalk vs Longitud de onda

En la Figura 4.7b, se realizaron 10 mediciones por longitud de onda, donde se promediaron para obtener un valor de Crosstalk. Esto se replicó para 30 longitudes de onda diferentes. Los datos recopilados en la Figura 4.7b son presentados en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2 Datos Longitud de onda vs Crosstalk de la Figura 4.7b

Longitud de onda [nm]	Crosstalk [dB]	Longitud de onda [nm]	Crosstalk [dB]
1530	-17.07	1550	-19.07
1535	-15.27	1550.517	-21.96
1540	-16.47	1550.918	-22.83
1545	-18.12	1551.319	-23.36
1545.720	-20.49	1551.721	-20.22
1546.119	-21.70	1552.123	-20.06
1546.518	-21.10	1552.524	-23.87
1547	-23.43	1553	-18.31
1547.316	-21.45	1553.329	-22.51
1547.715	-23.64	1553.731	-19.04
1548.115	-21.87	1554.134	-20.82
1548.515	-20.73	1554.537	-20.22
1548.915	-20.31	1555	-18.91
1549.315	-22.69	1560	-19.34
1549.715	-20.91	1565	-18.82

De la Tabla 4.2, se puede observar que el sistema de control puede cubrir toda la banda C, presentando distintos Crosstalk en función de la longitud de onda. Esto es debido a que en la caracterización del láser la potencia óptica varía de acuerdo a la longitud de onda que se configura el láser, cambiando el valor de referencia utilizado en la caja de control.

4.4. Control Inverso MZI 4x4

Para aplicar el control inverso, esta vez la fuente irá conectada en la salida de los fotodetectores y en la entrada se conectarán los fotodetectores para que apliquen el control mediante el FPGA como se muestra en la Figura 4.8.

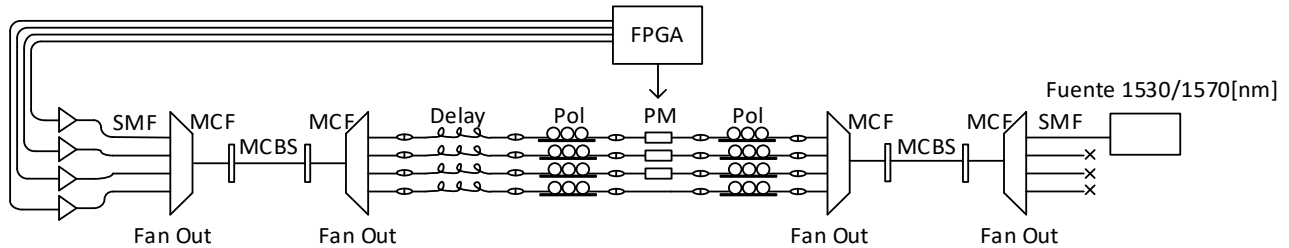


Figura 4.8 Esquema aplicación láser de forma inversa en MZI 4x4

Esta aplicación solo se utiliza para comprobar que efectivamente el control puede ser aplicado cuando el láser va en dirección opuesta a la arquitectura del MZI de 4x4.

Utilizando el láser de forma inversa se obtienen las gráficas mostradas en la Figura 4.9:

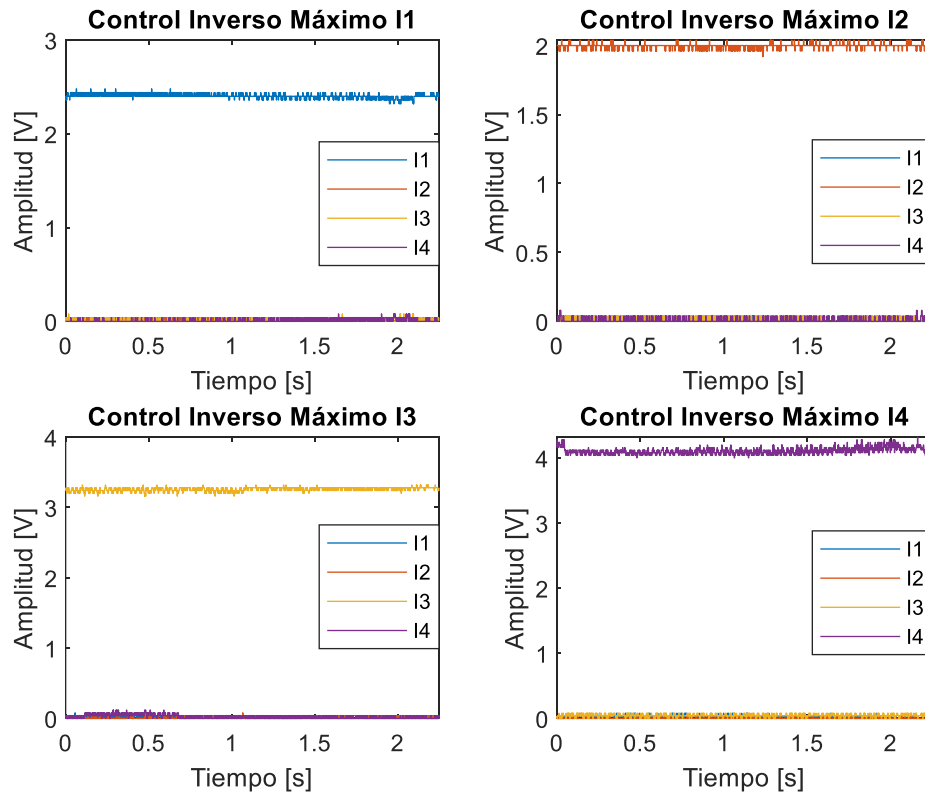


Figura 4.9 Control Inverso Máximo MZI 4x4, con I1, I2, I3, I4 correspondientes a las intensidades ópticas de salida del MZI.

Utilizando el mismo método de la sección 4.1, se calculan los Crosstalk, Visibilidad y desviación estándar que son mostrados en la Figura 4.10, Figura 4.11 y Figura 4.12:

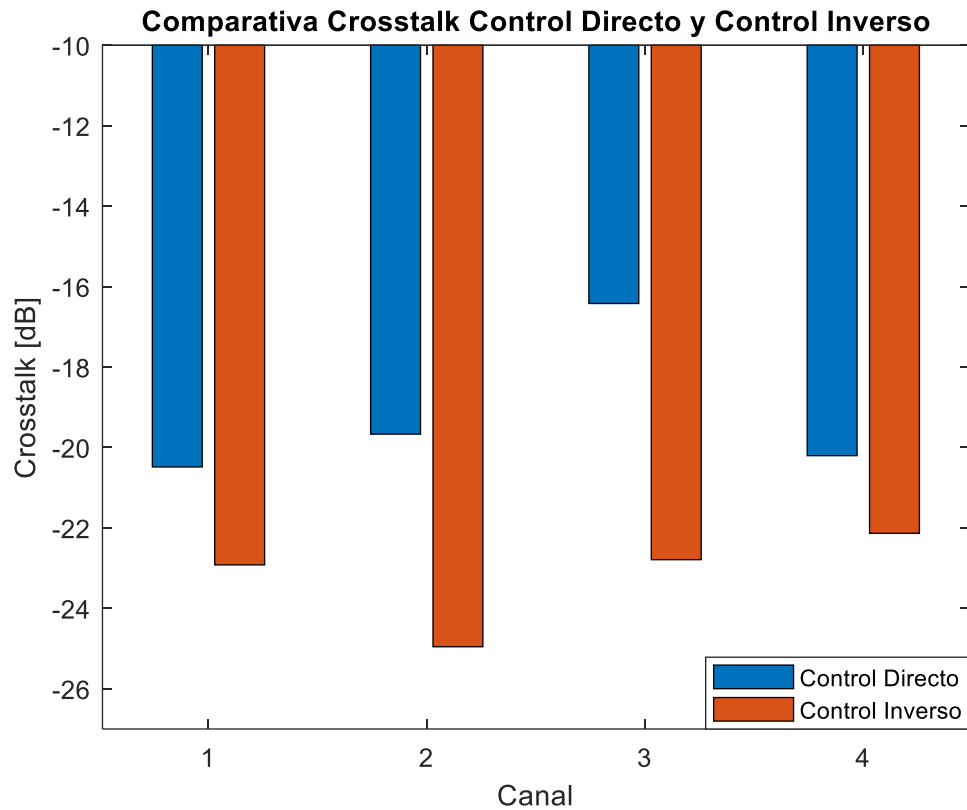


Figura 4.10 Comparativa Crosstalk control directo y control inverso MZI 4x4

Utilizando la Figura 4.10, se realiza una tabla resumen donde se tendrá el valor de Crosstalk promedio entre los 4 brazos, tanto para control directo como control inverso.

Tabla 4.3 Comparativa Crosstalk promedio

Tipo de control	Crosstalk promedio [dB]
Directo	-19.195
Inverso	-23.2

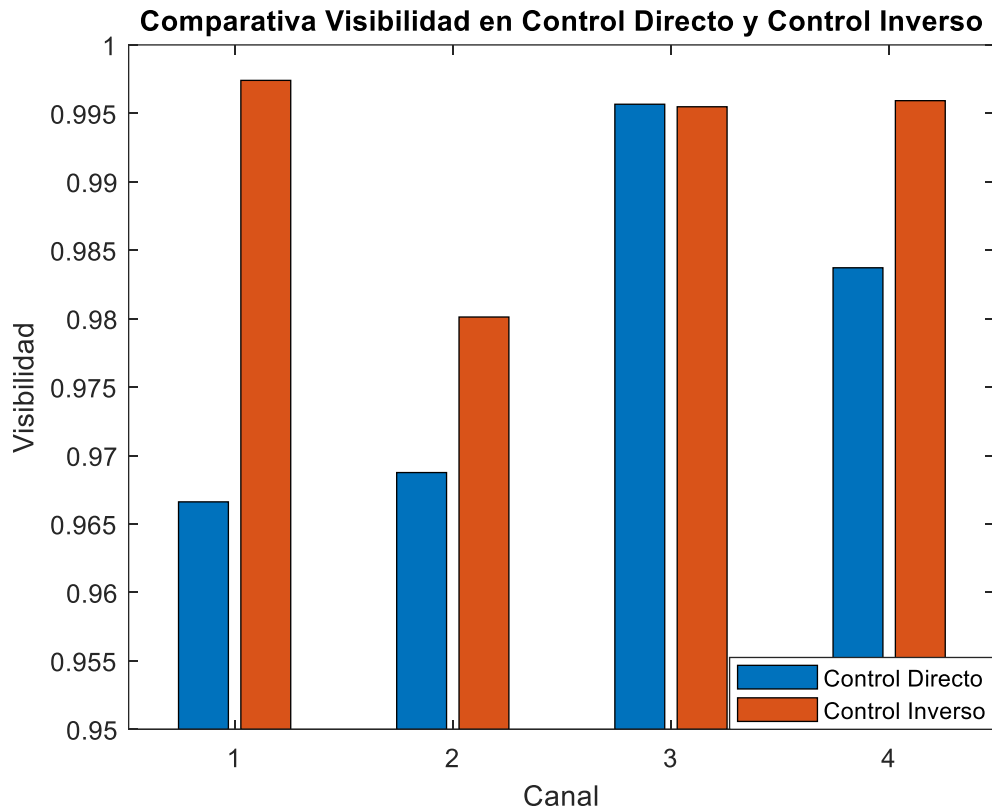


Figura 4.11 Comparativa Visibilidad control directo y control inverso MZI 4x4

Para el caso de la Visibilidad en la Figura 4.11 de la misma forma que la Figura 4.10 se calcula la visibilidad promedio entre los brazos tanto para el control directo e inverso.

Tabla 4.4 Comparativa Visibilidad promedio

Tipo de Control	Visibilidad Promedio
Directo	0.9787
Inverso	0.992225

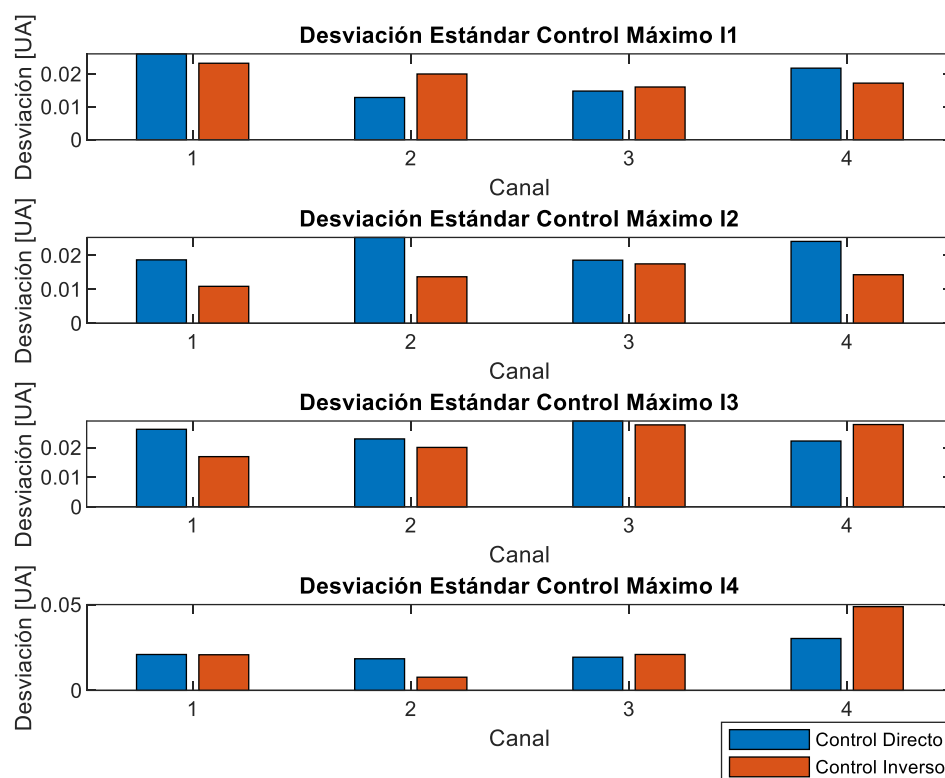


Figura 4.12 Comparativa Desviación Estándar control directo y control inverso MZI 4x4

Finalmente, al igual que las anteriores imágenes se procede a calcular el promedio entre brazos de la desviación estándar de la Figura 4.12. Estos valores se promedian con el fin de obtener una representación del MZI con respecto al ruido total que afecta a la señal, tanto para control directo y control inverso.

Tabla 4.5 Comparativa desviación estándar

Tipo de Control	Desviación Estándar Promedio Control I1	Desviación Estándar Promedio Control I2	Desviación Estándar Promedio Control I3	Desviación Estándar Promedio Control I4
Directo	0.0188875	0.02168	0.02643	0.0222225
Inverso	0.0191325	0.0140975	0.02308	0.02453525

Comparando la Tabla 4.3, Tabla 4.4 y Tabla 4.5, en nuestros resultados se puede observar que aplicando el láser en sentido inverso genera mejores valores tanto de Crosstalk como visibilidad promedio. En cuanto a la desviación estándar en el caso del control I1, el control directo tiene un 98% ($0.0188875/0.0191325 \times 100$) de la dispersión del control inverso. En el control I2, el control directo aumenta a 154% respecto al control inverso. Para el control 3, el control directo posee un 115% más de dispersión que el control inverso. Finalmente, para el control I4, el control directo posee un 91% de la dispersión del control inverso. Realizando la comparativa sobre los porcentajes globales, se

puede observar que el control directo posee una mayor desviación estándar que el control inverso, es decir, presenta curvas de control con mayor ruido. En resumen, se puede concluir que el control inverso opera de forma óptima en esta arquitectura.

Para validar ahora la aplicabilidad de esta estrategia, se procede a utilizar el esquema del control inverso del MZI de 4x4, donde se tendrá un láser de control con una longitud de onda de 1550[nm] y un láser de señal que irá variando su longitud de onda desde 1527[nm] a 1669[nm] (banda C).

Al aplicar esta metodología, no se pudo aplicar el control con los 4 brazos, esto debido a problemas con la polarización. Al intentar realizar la alineación del láser de señal a máxima visibilidad esta no correspondía a una máxima visibilidad para el láser de control. Al no tener una máxima visibilidad no se podía generar el control de fase del interferómetro, por ende, no se podían obtener valores tanto de Crosstalk como Visibilidad. Para intentar compensarlo se utilizó el polarizador correspondiente a la zona 3 del esquema de control inverso de la sección 3.3. La problemática surge al momento de alinear este polarizador utilizando los 4 brazos del interferómetro. Este polarizador modifica la polarización de los 4 brazos del MZI a la vez, los cuales no necesariamente poseen la misma polarización, impidiendo una mejora en la visibilidad del láser de control. Sin embargo, para evaluar el impacto del control inverso sobre la longitud de onda de la señal en la banda C, se utiliza una configuración utilizando solo 2 brazos del MZI de 4x4.

Para las mediciones que se realizarán más adelante solo se utilizarán los brazos 1 y 2 del MZI, donde se tendrá que alinear el sistema mediante los pasos explicados en la sección 4.3. Esta variación en longitudes de onda tiene como objetivo observar que tan efectivo es el control sobre una señal que va variando su longitud de onda. Para esto se utilizará como parámetro de comparación la visibilidad, mostrado en la Figura 4.13:

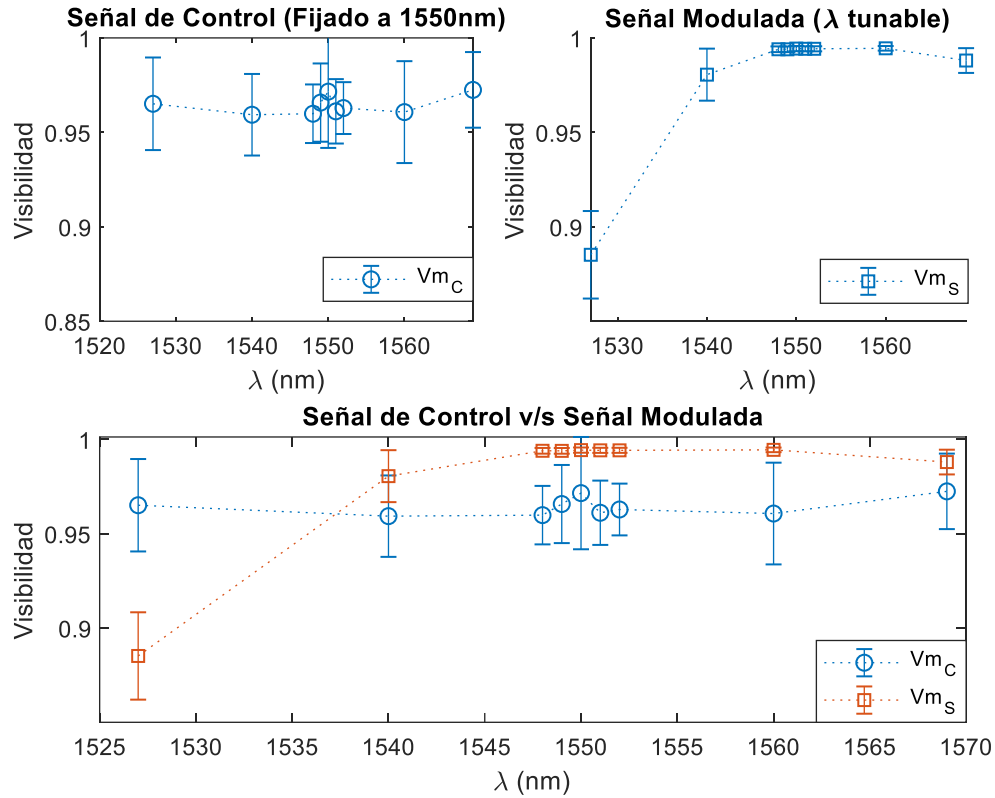


Figura 4.13 Comparativa Visibilidad Señal de Control fijada en 1550[nm] y Señal modulada con λ variable, con V_{m_c} correspondiente a la visibilidad promedio del láser de control y V_{m_s} correspondiente a la visibilidad promedio del láser de señal

De la Figura 4.13 se tienen graficas de Visibilidad tanto en el láser de control (longitud de onda fija en 1550 [nm]) como el de señal (longitud de onda variable). De aquí se puede observar que la alineación en el MZI fue con respecto al láser de señal, debido a que este posee una visibilidad mayor con respecto al láser de control. También se aprecia que el control en la señal modulada funciona mejor a longitudes de onda cercanas a 1550[nm] valor que decae a medida que nos alejamos de estas longitudes de onda. Esto se ve más detallado en la Figura 4.14.

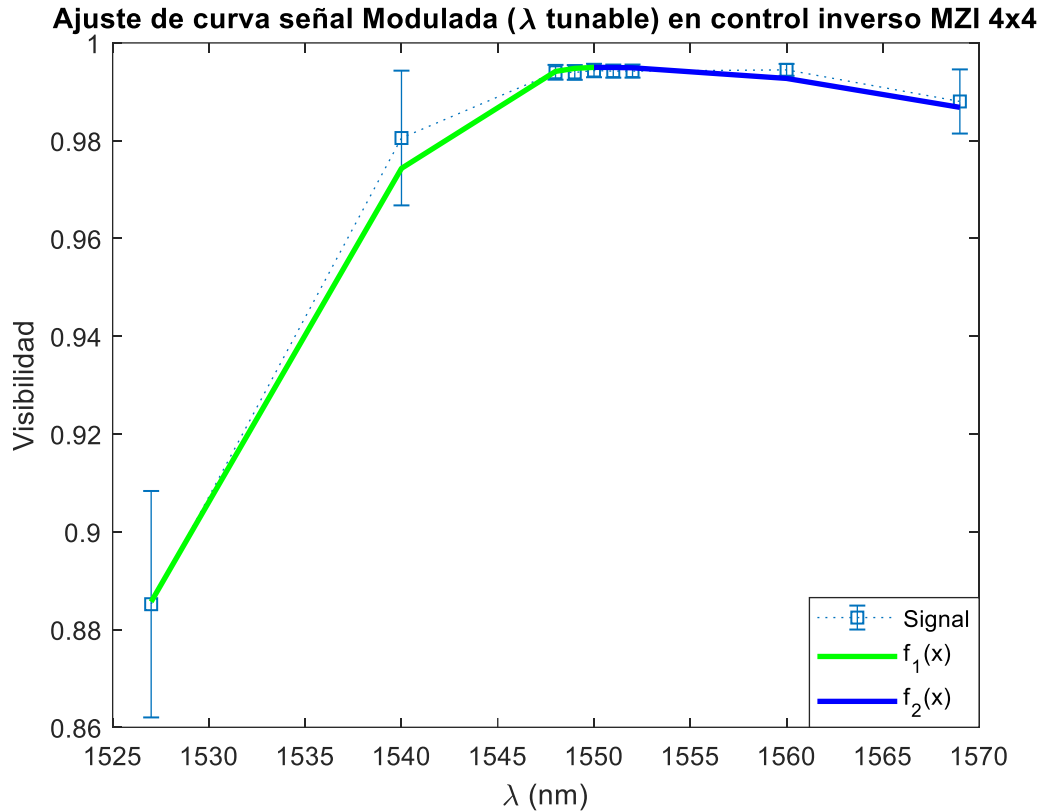


Figura 4.14 Ajuste en curva de visibilidad del láser de Señal a distintas longitudes de onda con control inverso en MZI de 4x4.

En la Figura 4.14, se realiza un ajuste de curva para tener una noción del decaimiento de la visibilidad a medida que nos alejamos de la longitud de onda del láser de control, tanto para longitudes de onda mayores y menores a la utilizada como referencia. Se propone que la visibilidad decae con tendencia cuadrática. Por lo tanto, se busca una función que represente las longitudes mayores y menores obteniéndose así la función propuesta en la ecuación (48).

$$f(x) = -\delta * (1550 - x)^2 + 0.995 \quad (48)$$

Esta función cuadrática se centra en los 1550[nm] correspondientes a la longitud de onda que posee el láser de control. La ecuación (48) sirve para los rangos mayores y menores a esta longitud de onda, pero a distintas amplitudes donde δ tiene un valor de $206.67 * 10^{-6}$ a longitudes de onda menores a 1550[nm] y δ tiene un valor aproximado de $22.67 * 10^{-6}$ a longitudes de onda mayores a 1550[nm].

Es posible que exista un modelo más preciso que cubra todo el rango de la banda C sin necesidad de otra amplitud distinta, pero implicaría realizar más mediciones y considerar más variables, las cuales se alejan del objetivo de trabajo de tesis. Esto podría ser un tema para trabajos futuros.

Capítulo 5. Conclusiones

5.1. Sumario

Se aplicaron técnicas de control sobre interferómetros contruidos en fibras ópticas. Para la construcción del MZI de 2 brazos fue necesario tener conocimientos de fusión en fibras ópticas, para igualar el largo de los brazos y obtener una máxima visibilidad en el interferómetro. En las mediciones experimentales fue necesario alinear el sistema cada vez que fue utilizado, tanto para el MZI de 2x2 y el de 4x4. Según lo apreciado en este trabajo, los sistemas de control funcionan adecuadamente en ambiente de laboratorio. Sin embargo, en otro tipo de ambientes como en espacio libre las técnicas de control deberían considerar las perturbaciones presentes en la fibra óptica.

5.2. Conclusiones

En este trabajo se utilizaron modelos matemáticos del MZI de 2x2, obteniendo una correlación del 99% con respecto a las mediciones en laboratorio, demostrando en la sección 2.5.1 que el principal factor que afecta a la visibilidad en un interferómetro es la polarización. Por otro lado, al aplicar control directo en el MZI de 2x2 se obtienen valores de visibilidad de un 94% y Crosstalk Promedio de -13.6[dB]. En control inverso se obtienen valores de visibilidad superiores al 97%, y Crosstalk promedio de -13[dB].

Se aplicó control directo sobre un MZI de 4x4, evaluándose en toda la banda C con un láser sintonizable y se obtuvo una visibilidad superior al 97% con Crosstalk promedio aproximado de -20[dB]. Además, se aplicó el control inverso de forma independiente, sin la señal de comunicación en directo, obteniendo visibilidades del 99% y Crosstalk del orden de -23[dB].

Debido a problemas en la polarización no fue posible aplicar el control inverso en el MZI de 4x4 con la señal de comunicaciones (en directo). Sin embargo, se evaluó el impacto en visibilidad al controlar con la misma longitud de onda y de manera continua utilizando solo 2 brazos cubriendo toda la banda C. En esta configuración se obtienen valores de visibilidad del 99% en la señal de comunicaciones (directa), cuyo índice decae de manera cuadrática a medida que nos alejamos de la longitud de onda.

Finalmente, para el control inverso del MZI de 4x4 resulta necesario utilizar técnicas de alineación para eliminar el problema de polarización, pudiéndose cubrir en un trabajo futuro, además de encontrar un mejor modelo matemático que represente el decaimiento cuadrático de la visibilidad al variar la longitud de onda en el control.

Bibliografía

- [1] Cariñe, J., Asan-Srain, M.N., Lima, G. et al., «Maximizing quantum discord from interference in multi-port fiber beamsplitters.,» *npj Quantum Information*, vol. 7, p. 172, 2021.
- [2] Máté Farkas, Nayda Guerrero, Jaime Cariñe, et al., «Self-Testing Mutually Unbiased Bases in Higher Dimensions with Space-Division Multiplexing Optical Fiber Technology,» *Phys. Rev. Applied*, vol. 15, p. 014028, 2021.
- [3] Ibrahín Alonso Vargas, *Sistemas de fibra óptica*, vol. 1, Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica, 2013.
- [4] D. J. Richardson, J. M. Fini y L. E. Nelson, «Space-division multiplexing in optical fibres,» *Nature Photonics*, vol. 7, pp. 354-362, 2013.
- [5] José Ramón Bertomeu Sánchez, «Refractómetros e interferómetros,» Universidad de Valencia, 2005.
- [6] Gusqui LLivicota, Lenin Javier, «Análisis y simulación de un conmutador óptico basado en tecnología de Niobato de Litio para una red de Conmutación Óptica de Ráfagas,» Quito, 2017.
- [7] D. Grassani, M. Galli y D. Bajoni, «Active stabilization of a Michelson interferometer at an arbitrary phase with subnanometer resolution,» *Opt. Lett.*, vol. 39, pp. 2530-2533, 2014.
- [8] Christopher Abdón Mancilla Campos, «Caracterización de ruido en fase para un interferómetro Mach-Zehnder diseñado en fibras multinúcleo,» Universidad de Concepción, 2018.
- [9] José Sánchez del Río Saez, «Desarrollo de un biosensor fotónico de alta sensibilidad basado en interferómetros Mach-Zehnder integrados en tecnología microelectrónica de silicio,» Universidad Autónoma de Madrid, 2007.
- [10] Juerg Leuthold, «Advanced indium-phosphide waveguide Mach-Zehnder interferometer all-optical switches and wavelength converters,» ETHzürich, 1998.
- [11] G. Xavier y J. von der Weid, «Stable single-photon interference in a 1 km fiber-optic Mach-Zehnder interferometer with continuous phase adjustment,» *Opt. Lett.*, vol. 36, pp. 1764-1766, 2011.
- [12] Beatrice Da Lio, Davide Bacco, Daniele Cozzolino, et al., «Stable Transmission of High-Dimensional Quantum States Over a 2-km Multicore Fiber,» *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 26, pp. 1-8, 2020.
- [13] Ricardo Alfonso Pinto García y Andrés Felipe Cabezas, *Sistemas de comunicaciones ópticas*, vol. 1, Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada, 2014.
- [14] William T. Silfvast, *Laser Fundamentals*, 2 ed., vol. 1, Cambridge University Press, 2004.
- [15] Bahaa Saleh y Malvin Teich, *Fundamentals of Photonics*, vol. 1, Wiley-Interscience, 1991.
- [16] VIAVI, «MAP Tunable DBR Laser Module (mTLG),» [En línea]. Available: <https://www.viavisolutions.com/es-es/node/2546#resources>.
- [17] Frank J Duarte, *Tunable Laser Optics*, 2 ed., vol. 1, CRC Press, 2017.
- [18] Thorlabs, «PDA05CF2 InGaAs Amplified Fixed Gain Detector User Guide,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.thorlabs.com/drawings/c513c9809609454e-76422B37-D222-5F22-29C81C45D1512976/PDA05CF2-Manual.pdf>.
- [19] Editorial Etecé, «Fibra óptica,» 5 Agosto 2021. [En línea]. Available: <https://concepto.de/fibra-optica/>.

- [20] Agrawal Govind P., «Chapter 14 - Multimode fibers,» de *Nonlinear Fiber Optics*, 6 ed., vol. 1, Academic Press, 2019, pp. 621-683.
- [21] Federal Standard, «1037C: Telecommunications: Glossary of Telecommunication Terms. National Communication System. Technology and Standards Division. Washington, DC: General Services Administration,» *Information Technology Service*, vol. 1, 1996.
- [22] W. Klaus, J. Sakaguchi, B. J. Puttnam, et al., «Free-Space Coupling Optics for Multicore Fibers,» *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, pp. 1902-1905, 2012.
- [23] K. P. Zetie, S. F. Adams y R. M. Tocknell, «How does a Mach-Zehnder interferometer work?,» *Physics Education*, vol. 35, pp. 46-48, 2000.
- [24] Eugene Hecht, *Optics*, 4 ed., vol. 1, Addison-Wesley, 2001.
- [25] Mattle K., Michler M., Weinfurter H., et al., «Nonclassical statistics at multiport beam-splitters,» *Applied Physics B-Lasers and Optics*, vol. 60, pp. S111-S117, 1995.
- [26] J. Carine, G. Canas, P. Skrzypczyk, et al., «Multi-core fiber integrated multi-port beam splitters for quantum information processing,» *Optica*, vol. 7, pp. 542-550, 2020.
- [27] M. Wulpart, P. Megret, M. Blondel, et al., «Measurement of the spatial distribution of birefringence in optical fibers,» *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, pp. 836-838, 2001.
- [28] Thorlabs, «Manual fiber polarization controllers User guide,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.thorlabs.com/drawings/d866a40bf1f01a17-D78A1A60-D0EB-3EB8-E8EE5D24F9F92AA7/FPC560-Manual.pdf>.

Anexo A. Códigos en Matlab

Capítulo 6. Código Caracterización Láser

```
close all
```

```
clear all
```

```
clc
```

```
longitud_onda = [1527.605; 1527.994; 1528.384; 1528.773; 1529.163; 1529.553; 1529.944;
1530.334; 1530.725; 1531.116; 1531.507; 1531.898; 1532.290; 1532.681;
1533.073; 1533.465; 1533.858; 1534.250; 1534.643; 1535.036; 1535.429;
1535.822; 1536.216; 1536.609; 1537.003; 1537.397; 1537.742; 1538.186;
1538.581; 1538.976; 1539.371; 1539.766; 1540.162; 1540.557; 1540.953;
1541.349; 1541.746; 1542.142; 1542.539; 1542.936; 1543.333; 1543.730;
1544.128; 1544.526; 1544.924; 1545.322; 1545.720; 1546.119; 1546.518;
1546.917; 1547.316; 1547.715; 1548.115; 1548.515; 1548.915; 1549.315;
1549.715; 1550.116; 1550.517; 1550.918; 1551.319; 1551.721; 1552.123;
1552.524; 1552.927; 1553.329; 1553.731; 1554.134; 1554.537; 1554.940;
1555.344; 1555.747; 1556.151; 1556.555; 1556.959; 1557.363; 1557.768;
1558.173; 1558.578; 1558.983; 1559.389; 1559.794; 1560.200; 1560.606;
1561.013; 1561.419; 1561.826; 1562.233; 1562.640; 1563.047; 1563.455;
1563.863; 1564.271; 1564.679; 1565.087; 1565.496; 1565.905; 1566.314;
1566.723; 1567.133; 1567.542; 1567.952; 1568.362; 1568.773; 1569.183;
1569.594];
```

```
Voltaje = [5.40; 5.40; 5.40; 5.40; 5.40; 5.20; 5.20; 5.20; 5.00; 4.80; 4.80; 4.80;
4.60; 4.60; 4.60; 4.60; 4.60; 4.60; 5.00; 5.00; 5.00; 5.00; 5.20; 5.20;
5.40; 5.40; 5.20; 5.20; 5.40; 5.40; 5.20; 5.00; 5.20; 5.20; 5.00; 5.00;
5.00; 5.00; 5.00; 5.20; 5.40; 5.40; 5.60; 5.80; 5.80; 5.80; 6.00; 6.00;
6.00; 6.00; 6.00; 5.80; 5.80; 5.80; 5.80; 5.40; 5.40; 5.80; 5.80; 5.80;
5.60; 5.60; 6.00; 6.00; 6.00; 6.20; 6.20; 6.40; 6.40; 6.40; 6.40; 6.40;
6.40; 6.20; 6.20; 6.20; 6.00; 5.80; 6.00; 5.80; 5.80; 5.80; 6.00; 6.00;
6.00; 6.20; 6.40; 6.40; 6.40; 6.40; 6.60; 6.60; 6.60; 6.40; 6.40; 6.40;
6.20; 5.80; 5.80; 6.00; 5.80; 5.60; 5.60; 5.80; 5.60; 5.60];
```

```
figure(1)
```

```
bar(longitud_onda,Voltaje)
```

```
title('Gráfica Voltaje [V] vs Longitud de onda [nm] láser')
```

```
xlabel('Longitud de onda [nm]')
```

```
ylabel('Voltaje [V]')
```

```
ylim([0 10])
```

Capítulo 7. Visibilidad Variando alpha

```
clear all
clc
close all
phase=0:0.01*pi:2*pi;
alpha=1;
i=1;
for alpha=0:0.01:1
    alphao=1-alpha;
    I=(1-alphao)^2/4+alphao*cos(phase).^2;
    Vmax=max(I);
    Vmin=min(I);
    Vis(i)=(Vmax-Vmin)/(Vmax+Vmin);
    alphak(i)=alphao;
    % figure(1)
    % plot(I)
    % title('Visibilidad del interferómetro cuando se modifica la intensidad de los brazos')
    % xlabel('Tiempo [s]')
    % ylabel('Intensidad [I]')
    % ylim([0 1]);
    % xlim([0 200])
    pause(0.1)
    i=i+1;
end
alpha1 = 1;
alpha2 = 0;
I1=(1-alpha1)^2/4+alpha1*cos(phase).^2;
I2=(1-alpha2)^2/4+alpha2*cos(phase).^2;
figure(1)
subplot(2,2,1)
plot(I1);
title('(a)')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Intensidad [I]')
ylim([0 1]);
xlim([0 200])
subplot(2,2,3)
```

```

plot(I2);
title('(b)')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Intensidad [I]')
ylim([0 1]);
xlim([0 200])
subplot(2,2,[2,4])
plot(alphak,Vis)
title('(c)')
xlabel('Alpha')
ylabel('Visibilidad')

```

Capítulo 8. Caracterización Mach-Zehnder 2x2

```

%close all
clear all
clc
x0=4499;
x1=7409;
data=xlsread('Alfa cercano a uno 1.CSV');
data=data(x0:x1,:);
t=data(:,1);
I1=data(:,2);
I2=data(:,3);
Imax=max(I1+I2);
I1=I1/Imax;
I2=I2/Imax;
figure(1)
subplot(311)
alpha=0.99;
beta=0.98;
desfase=0.17*pi;
phase=0.225*pi*t+desfase;
IT1=(1-beta)/2+(alpha-1)^2/4+beta*alpha*cos(phase).^2;
IT2=(1-beta)/2+(alpha-1)^2/4+beta*alpha*sin(phase).^2;
RI1 = corr(I1,IT1)^2;
RI2 = corr(I2,IT2)^2;

plot(t,I1,t,I2,t,IT1,'k',t,IT2,'k')
title(['alpha:',num2str(alpha),' beta:',num2str(beta),' desfase:',num2str(desfase),

```

```

    ' RI1:',num2str(RI1),' RI2:',num2str(RI2)])
ylabel('Amplitud');
xlabel('Tiempo [s]');

x0=1914;
x1=4761;
data=xlsread('Alfa cercano al valor intermedio 1.CSV');
data=data(x0:x1,:);
t=data(:,1);
I1=data(:,2);
I2=data(:,3);
% Imax=max(I1+I2);
I1=I1/Imax;
I2=I2/Imax;

subplot(312)

%alpha=0.99;
beta=0.62;
desfase=0.105*pi;
phase=0.25*pi*t+desfase;
IT1=(1-beta)/2+(1-alpha)^2/4+beta*alpha*cos(phase).^2;
IT2=(1-beta)/2+(1-alpha)^2/4+beta*alpha*sin(phase).^2;

RI1 = corr(I1,IT1)^2;
RI2 = corr(I2,IT2)^2;

plot(t,I1,t,I2,t,IT1,':k',t,IT2,':k')
ylim([0 1])
title(['alpha:',num2str(alpha),' beta:',num2str(beta),' desfase:',num2str(desfase),
    ' RI1:',num2str(RI1),' RI2:',num2str(RI2)])
ylabel('Amplitud')
xlabel('Tiempo [s]')

x0=2154;
x1=5519;
data=xlsread('Alfa cercano a cero 1.CSV');
data=data(x0:x1,:);
t=data(:,1);
I1=data(:,2);

```

```

I2=data(:,3);
% Imax=max(I1+I2);
I1=I1/Imax;
I2=I2/Imax;

subplot(313)

%alpha=0.99;
beta=0.26;
desfase=0.33*pi;
phase=0.25*pi*t+desfase;
IT1=(1-beta)/2+(1-alpha)^2/4+beta*alpha*cos(phase).^2;
IT2=(1-beta)/2+(1-alpha)^2/4+beta*alpha*sin(phase).^2;

RI1 = corr(I1,IT1)^2;
RI2 = corr(I2,IT2)^2;

plot(t,I1,t,I2,t,IT1,':k',t,IT2,':k')
ylim([0 1])
title(['alpha:',num2str(alpha),' beta:',num2str(beta),' desfase:',num2str(desfase),
      ' RI1:',num2str(RI1),' RI2:',num2str(RI2)])
ylabel('Amplitud')
xlabel('Tiempo [s]')

```

Capítulo 9. Caracterización de ruido de fase interferómetro

```

close all
clear
clc

%% Ruido de fase a 1550,1 [nm]
x0=883;
x1=2482;
data=xlsread('Ruido de fase 50 segundos a 1550,1 nm.CSV');
data=data(x0:x1,:);
t=data(:,1);
I1= data(:,2);
I2=data(:,3);
Imax=max(I1+I2);
I1=I1/Imax;
I2=I2/Imax;

figure(1)
subplot(411)
plot(t,I1,t,I2)
title('Forma de onda interferómetro a 1550,1 [nm]')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Amplitud')

subplot(412)

phi1=2.*asin(sqrt(I1));
phi2=2.*acos(sqrt(I2));
plot(t,phi1*180/pi,t,phi2*180/pi)
title('Ruido de fase \phi en el tiempo')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('\phi [deg]')

fm      = 1/50e-3;
Tf_I1   = fft(I1);
M_Tf_I1 = fftshift(abs(Tf_I1).^2);
f       = (1:length(t))/length(t)*fm;

```

```

f          = f - mean(f);
Tf_I2      = fft(I2);
M_Tf_I2    = fftshift(abs(Tf_I2).^2);

subplot(413)
plot(f,10*log10(M_Tf_I1))
xlim([0 10])
title('FFT ruido de fase brazo 1')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Amplitud [dB]')

subplot(414)
plot(f,10*log10(M_Tf_I2))
xlim([0 10])
title('FFT ruido de fase brazo 2')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Amplitud [dB]')

%% Ruido de fase a 1527,605 [nm]
x0=93;
x1=2341;
data=xlsread('Ruido de fase 50 segundos a 1527,605 nm.CSV');
data=data(x0:x1,:);
t=data(:,1);
I1= data(:,2);
I2=data(:,3);
Imax=max(I1+I2);
I1=I1/Imax;
I2=I2/Imax;

figure(2)
subplot(411)
plot(t,I1,t,I2)
title('Forma de onda interferómetro a 1527,605 [nm]')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Amplitud')

subplot(412)

phi1=2.*asin(sqrt(I1));

```

```

phi2=2.*acos(sqrt(I2));
plot(t,phi1*180/pi,t,phi2*180/pi)
title('Ruido de fase \phi en el tiempo')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('\phi [deg]')

fm      = 1/50e-3;
Tf_I1   = fft(I1);
M_Tf_I1 = fftshift(abs(Tf_I1).^2);
f       = (1:length(t))/length(t)*fm;
f       = f - mean(f);
Tf_I2   = fft(I2);
M_Tf_I2 = fftshift(abs(Tf_I2).^2);

subplot(413)
plot(f,10*log10(M_Tf_I1))
xlim([0 10])
title('FFT ruido de fase brazo 1')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Amplitud [dB]')

subplot(414)
plot(f,10*log10(M_Tf_I2))
xlim([0 10])
title('FFT ruido de fase brazo 2')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Amplitud [dB]')

%% Ruido de fase a 1569,594[nm]
x0=169;
x1=2417;
data=xlsread('Ruido de fase 50 segundos a 1569,594 nm.CSV');
data=data(x0:x1,:);
t=data(:,1);
I1= data(:,2);
I2=data(:,3);
Imax=max(I1+I2);
I1=I1/Imax;
I2=I2/Imax;

```

```
figure(3)
subplot(411)
plot(t,I1,t,I2)
title('Forma de onda interferómetro a 1569,594 [nm]')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Amplitud')
```

```
subplot(412)
```

```
phi1=2.*asin(sqrt(I1));
phi2=2.*acos(sqrt(I2));
plot(t,phi1*180/pi,t,phi2*180/pi)
title('Ruido de fase \phi en el tiempo')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('\phi [deg]')
```

```
fm      = 1/50e-3;
Tf_I1   = fft(I1);
M_Tf_I1 = fftshift(abs(Tf_I1).^2);
f       = (1:length(t))/length(t)*fm;
f       = f - mean(f);
Tf_I2   = fft(I2);
M_Tf_I2 = fftshift(abs(Tf_I2).^2);
```

```
subplot(413)
plot(f,10*log10(M_Tf_I1))
xlim([0 10])
title('FFT ruido de fase brazo 1')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Amplitud [dB]')
```

```
subplot(414)
plot(f,10*log10(M_Tf_I2))
xlim([0 10])
title('FFT ruido de fase brazo 2')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Amplitud [dB]')
```

Capítulo 10. Control directo e inverso MZI 2x2

```
clear variables
```

```
clc
```

```
close all
```

```
load('tiempo.mat')
```

```
load('VoltajeCirculador.mat')
```

```
load('ControlInversosinfibra.mat')
```

```
load('ControlInversofibra5m.mat')
```

```
load('ControlInversofibra10m.mat')
```

```
load('ControlInversofibra20m.mat')
```

```
load('Controlmaxdirecto.mat')
```

```
load('Controlmindirecto.mat')
```

```
Voltaje_circulador_CH1(Voltaje_circulador_CH1<0) = 0;
```

```
Voltaje_circulador_CH2(Voltaje_circulador_CH2<0) = 0;
```

```
CH1_Cmax(CH1_Cmax<0) = 0;
```

```
CH2_Cmax(CH2_Cmax<0) = 0;
```

```
CH1_Cmin(CH1_Cmin<0) = 0;
```

```
CH2_Cmin(CH2_Cmin<0) = 0;
```

```
CH1_Cmax_5m(CH1_Cmax_5m<0) = 0;
```

```
CH2_Cmax_5m(CH2_Cmax_5m<0) = 0;
```

```
CH1_Cmin_5m(CH1_Cmin_5m<0) = 0;
```

```
CH2_Cmin_5m(CH2_Cmin_5m<0) = 0;
```

```
CH1_Cmax_10m(CH1_Cmax_10m<0) = 0;
```

```
CH2_Cmax_10m(CH2_Cmax_10m<0) = 0;
```

```
CH1_Cmin_10m(CH1_Cmin_10m<0) = 0;
```

```
CH2_Cmin_10m(CH2_Cmin_10m<0) = 0;
```

```
CH1_Cmax_20m(CH1_Cmax_20m<0) = 0;
```

```
CH2_Cmax_20m(CH2_Cmax_20m<0) = 0;
```

```
CH1_Cmin_20m(CH1_Cmin_20m<0) = 0;
```

```
CH2_Cmin_20m(CH2_Cmin_20m<0) = 0;
```

```
CH1_CmaxD_I1(CH1_CmaxD_I1<0) = 0;
```

```
CH2_CmaxD_I1(CH2_CmaxD_I1<0) = 0;
```

```
CH1_CmaxD_I2(CH1_CmaxD_I2<0) = 0;
```

```
CH2_CmaxD_I2(CH2_CmaxD_I2<0) = 0;
```

```
CH1_CminD_I1(CH1_CminD_I1<0) = 0;
```

```
CH2_CminD_I1(CH2_CminD_I1<0) = 0;
```

```

CH1_CminD_I2(CH1_CminD_I2<0) = 0;
CH2_CminD_I2(CH2_CminD_I2<0) = 0;
%% Visibilidad
%%% Visibilidad sin fibra
Visibilidad_CH1 = (max(CH1_Cmax) - min(CH1_Cmin)) /
    (max(CH1_Cmax) + min(CH1_Cmin));
Visibilidad_CH2 = (max(CH2_Cmin) - min(CH2_Cmax)) /
    (max(CH2_Cmin) + min(CH2_Cmax));
%%% Visibilidad con 5 metros de fibra
Visibilidad_CH1_5m = (max(CH1_Cmax_5m) - min(CH1_Cmin_5m)) /
    (max(CH1_Cmax_5m) + min(CH1_Cmin_5m));
Visibilidad_CH2_5m = (max(CH2_Cmin_5m) - min(CH2_Cmax_5m)) /
    (max(CH2_Cmin_5m) + min(CH2_Cmax_5m));
%%% Visibilidad con 10 metros de fibra
Visibilidad_CH1_10m = (max(CH1_Cmax_10m) - min(CH1_Cmin_10m)) /
    (max(CH1_Cmax_10m) + min(CH1_Cmin_10m));
Visibilidad_CH2_10m = (max(CH2_Cmin_10m) - min(CH2_Cmax_10m)) /
    (max(CH2_Cmin_10m) + min(CH2_Cmax_10m));
%%% Visibilidad con 20 metros de fibra
Visibilidad_CH1_20m = (max(CH1_Cmax_20m) - min(CH1_Cmin_20m)) /
    (max(CH1_Cmax_20m) + min(CH1_Cmin_20m));
Visibilidad_CH2_20m = (max(CH2_Cmin_20m) - min(CH2_Cmax_20m)) /
    (max(CH2_Cmin_20m) + min(CH2_Cmax_20m));
%%% Visibilidad Control Directo utilizando control max
Visibilidad_Controlmaxdirecto_CH1 = (max(CH1_CmaxD_I1) - min(CH1_CmaxD_I2)) /
    (max(CH1_CmaxD_I1) + min(CH1_CmaxD_I2));
Visibilidad_Controlmaxdirecto_CH2 = (max(CH2_CmaxD_I2) - min(CH2_CmaxD_I1)) /
    (max(CH2_CmaxD_I2) + min(CH2_CmaxD_I1));
%%% Visibilidad Control Directo utilizando control min
Visibilidad_Controlmindirecto_CH1 = (max(CH1_CminD_I2) - min(CH1_CminD_I1)) /
    (max(CH1_CminD_I2) + min(CH1_CminD_I1));
Visibilidad_Controlmindirecto_CH2 = (max(CH2_CminD_I1) - min(CH2_CminD_I2)) /
    (max(CH2_CminD_I1) + min(CH2_CminD_I2));

%% Crosstalk

%%% Sin fibra
Promedio_CH1_Cmin = sum(CH1_Cmin) / length(CH1_Cmin);
Promedio_CH1_Cmax = sum(CH1_Cmax) / length(CH1_Cmax);
Promedio_CH2_Cmin = sum(CH2_Cmin) / length(CH2_Cmin);

```

```
Promedio_CH2_Cmax = sum(CH2_Cmax) / length(CH2_Cmax);
```

```
Crosstalk_Cmin = 10*log10(Promedio_CH1_Cmin/  
    (Promedio_CH2_Cmin + Promedio_CH1_Cmin));
```

```
Crosstalk_Cmax = 10*log10(Promedio_CH2_Cmax/  
    (Promedio_CH2_Cmax + Promedio_CH1_Cmax));
```

```
D_E_Cmax_sin_fibra_CH1 = std(CH1_Cmax);
```

```
D_E_Cmax_sin_fibra_CH2 = std(CH2_Cmax);
```

```
D_E_Cmin_sin_fibra_CH1 = std(CH1_Cmin);
```

```
D_E_Cmin_sin_fibra_CH2 = std(CH2_Cmin);
```

```
%%% Fibra 5 metros
```

```
Promedio_CH1_Cmin_5m = sum(CH1_Cmin_5m) / length(CH1_Cmin_5m);
```

```
Promedio_CH1_Cmax_5m = sum(CH1_Cmax_5m) / length(CH1_Cmax_5m);
```

```
Promedio_CH2_Cmin_5m = sum(CH2_Cmin_5m) / length(CH2_Cmin_5m);
```

```
Promedio_CH2_Cmax_5m = sum(CH2_Cmax_5m) / length(CH2_Cmax_5m);
```

```
Crosstalk_Cmin_5m = 10*log10(Promedio_CH1_Cmin_5m/  
    (Promedio_CH2_Cmin_5m + Promedio_CH1_Cmin_5m));
```

```
Crosstalk_Cmax_5m = 10*log10(Promedio_CH2_Cmax_5m/  
    (Promedio_CH2_Cmax_5m + Promedio_CH1_Cmax_5m));
```

```
D_E_Cmax_5m_CH1 = std(CH1_Cmax_5m);
```

```
D_E_Cmax_5m_CH2 = std(CH2_Cmax_5m);
```

```
D_E_Cmin_5m_CH1 = std(CH1_Cmin_5m);
```

```
D_E_Cmin_5m_CH2 = std(CH2_Cmin_5m);
```

```
%%% Fibra 10 metros
```

```
Promedio_CH1_Cmin_10m = sum(CH1_Cmin_10m) / length(CH1_Cmin_10m);
```

```
Promedio_CH1_Cmax_10m = sum(CH1_Cmax_10m) / length(CH1_Cmax_10m);
```

```
Promedio_CH2_Cmin_10m = sum(CH2_Cmin_10m) / length(CH2_Cmin_10m);
```

```
Promedio_CH2_Cmax_10m = sum(CH2_Cmax_10m) / length(CH2_Cmax_10m);
```

```
Crosstalk_Cmin_10m = 10*log10(Promedio_CH1_Cmin_10m/  
    (Promedio_CH2_Cmin_10m + Promedio_CH1_Cmin_10m));
```

```
Crosstalk_Cmax_10m = 10*log10(Promedio_CH2_Cmax_10m/  
    (Promedio_CH2_Cmax_10m + Promedio_CH1_Cmax_10m));
```

```
D_E_Cmax_10m_CH1 = std(CH1_Cmax_10m);
```

```
D_E_Cmax_10m_CH2 = std(CH2_Cmax_10m);
```

```
D_E_Cmin_10m_CH1 = std(CH1_Cmin_10m);
```

```
D_E_Cmin_10m_CH2 = std(CH2_Cmin_10m);
```

%%% Fibra 20 metros

```
Promedio_CH1_Cmin_20m = sum(CH1_Cmin_20m) / length(CH1_Cmin_20m);
Promedio_CH1_Cmax_20m = sum(CH1_Cmax_20m) / length(CH1_Cmax_20m);
Promedio_CH2_Cmin_20m = sum(CH2_Cmin_20m) / length(CH2_Cmin_20m);
Promedio_CH2_Cmax_20m = sum(CH2_Cmax_20m) / length(CH2_Cmax_20m);
```

```
Crosstalk_Cmin_20m = 10*log10(Promedio_CH1_Cmin_20m/
                               (Promedio_CH2_Cmin_20m + Promedio_CH1_Cmin_20m));
Crosstalk_Cmax_20m = 10*log10(Promedio_CH2_Cmax_20m/
                               (Promedio_CH2_Cmax_20m + Promedio_CH1_Cmax_20m));
```

```
D_E_Cmax_20m_CH1 = std(CH1_Cmax_20m);
D_E_Cmax_20m_CH2 = std(CH2_Cmax_20m);
D_E_Cmin_20m_CH1 = std(CH1_Cmin_20m);
D_E_Cmin_20m_CH2 = std(CH2_Cmin_20m);
```

%%% Control Directo Maximo

```
Promedio_CH1_CmaxD_I1 = sum(CH1_CmaxD_I1) / length(CH1_CmaxD_I1);
Promedio_CH1_CmaxD_I2 = sum(CH1_CmaxD_I2) / length(CH1_CmaxD_I2);
Promedio_CH2_CmaxD_I1 = sum(CH2_CmaxD_I1) / length(CH2_CmaxD_I1);
Promedio_CH2_CmaxD_I2 = sum(CH2_CmaxD_I2) / length(CH2_CmaxD_I2);
```

```
Crosstalk_Cmax_I1 = 10*log10(Promedio_CH2_CmaxD_I1/
                              (Promedio_CH2_CmaxD_I1 + Promedio_CH1_CmaxD_I1));
Crosstalk_Cmax_I2 = 10*log10(Promedio_CH1_CmaxD_I2/
                              (Promedio_CH1_CmaxD_I2 + Promedio_CH2_CmaxD_I2));
```

```
D_E_CmaxD_CH1_I1 = std(CH1_CmaxD_I1);
D_E_CmaxD_CH2_I1 = std(CH2_CmaxD_I1);
D_E_CmaxD_CH1_I2 = std(CH1_CmaxD_I2);
D_E_CmaxD_CH2_I2 = std(CH2_CmaxD_I2);
```

%%% Control Directo Minimo

```
Promedio_CH1_CminD_I1 = sum(CH1_CminD_I1) / length(CH1_CminD_I1);
Promedio_CH1_CminD_I2 = sum(CH1_CminD_I2) / length(CH1_CminD_I2);
Promedio_CH2_CminD_I1 = sum(CH2_CminD_I1) / length(CH2_CminD_I1);
Promedio_CH2_CminD_I2 = sum(CH2_CminD_I2) / length(CH2_CminD_I2);
```

```
Crosstalk_Cmin_I2 = 10*log10(Promedio_CH1_CminD_I1/
                              (Promedio_CH2_CminD_I1 + Promedio_CH1_CminD_I1));
```

```

Crosstalk_Cmin_I1 = 10*log10(Promedio_CH2_CminD_I2/
                             (Promedio_CH1_CminD_I2 + Promedio_CH2_CminD_I2));
D_E_CminD_CH1_I1 = std(CH1_CminD_I1);
D_E_CminD_CH2_I1 = std(CH2_CminD_I1);
D_E_CminD_CH1_I2 = std(CH1_CminD_I2);
D_E_CminD_CH2_I2 = std(CH2_CminD_I2);
%% Graficas
figure(1)
plot(t,Voltaje_circulador_CH1,t,Voltaje_circulador_CH2)
title('Voltaje Circulador')
legend('CH1','CH2')
ylim([0 1])

figure(2)
subplot(2,1,1)
plot(t,CH1_Cmax,t,CH2_Cmax)
title('Control Inverso Maximo sin fibra')
legend('CH1','CH2')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Amplitud [V]')
text(-0.05,0.7,sprintf('Visibilidad CH1 %.2f',Visibilidad_CH1))
text(-0.05,0.5,sprintf('Visibilidad CH2 %.2f',Visibilidad_CH2))
text(0,0.5,sprintf('Crosstalk %.2f',Crosstalk_Cmax))
subplot(2,1,2)
plot(t,CH1_Cmin,t,CH2_Cmin)
title('Control Inverso Minimo sin fibra')
legend('CH1','CH2')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Amplitud [V]')
text(0,0.5,sprintf('Crosstalk %.2f',Crosstalk_Cmin))

figure(3)
subplot(2,1,1)
plot(t,CH1_Cmax_5m,t,CH2_Cmax_5m)
title('Control Inverso Maximo con fibra de 5m')
legend('CH1','CH2')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Amplitud [V]')
text(-0.05,0.7,sprintf('Visibilidad CH1 %.2f',Visibilidad_CH1_5m))
text(-0.05,0.5,sprintf('Visibilidad CH2 %.2f',Visibilidad_CH2_5m))

```

```

text(0,0.5,sprintf('Crosstalk %.2f',Crosstalk_Cmax_5m))
subplot(2,1,2)
plot(t,CH1_Cmin_5m,t,CH2_Cmin_5m)
title('Control Inverso Minimo con fibra de 5m')
legend('CH1','CH2')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Amplitud [V]')
text(0,0.5,sprintf('Crosstalk %.2f',Crosstalk_Cmin_5m))

figure(4)
subplot(2,1,1)
plot(t,CH1_Cmax_10m,t,CH2_Cmax_10m)
title('Control Inverso Maximo con fibra de 10m')
legend('CH1','CH2')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Amplitud [V]')
text(-0.05,0.7,sprintf('Visibilidad CH1 %.2f',Visibilidad_CH1_10m))
text(-0.05,0.5,sprintf('Visibilidad CH2 %.2f',Visibilidad_CH2_10m))
text(0,0.5,sprintf('Crosstalk %.2f',Crosstalk_Cmax_10m))
subplot(2,1,2)
plot(t,CH1_Cmin_10m,t,CH2_Cmin_10m)
title('Control Inverso Minimo con fibra de 10m')
legend('CH1','CH2')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Amplitud [V]')
text(0,0.5,sprintf('Crosstalk %.2f',Crosstalk_Cmin_10m))

figure(5)
subplot(2,1,1)
plot(t,CH1_Cmax_20m,t,CH2_Cmax_20m)
title('Control Inverso Maximo con fibra de 20m')
legend('CH1','CH2')
text(-0.05,0.7,sprintf('Visibilidad CH1 %.2f',Visibilidad_CH1_20m))
text(-0.05,0.5,sprintf('Visibilidad CH2 %.2f',Visibilidad_CH2_20m))
text(0,0.5,sprintf('Crosstalk %.2f',Crosstalk_Cmax_20m))
subplot(2,1,2)
plot(t,CH1_Cmin_20m,t,CH2_Cmin_20m)
title('Control Inverso Minimo con fibra de 20m')
text(0,0.5,sprintf('Crosstalk %.2f',Crosstalk_Cmin_20m))

```

```
figure(6)
subplot(2,1,1)
plot(t,CH1_CmaxD_I1,t,CH2_CmaxD_I1)
title('Control Directo Maximo brazo 1')
legend('CH1','CH2')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Amplitud [V]')
text(-0.05,0.9,sprintf('Visibilidad CH1 %.2f',Visibilidad_Controlmaxdirecto_CH1))
text(-0.05,0.5,sprintf('Visibilidad CH2 %.2f',Visibilidad_Controlmaxdirecto_CH2))
text(0,0.5,sprintf('Crosstalk %.2f',Crosstalk_Cmax_I1))
subplot(2,1,2)
plot(t,CH1_CmaxD_I2,t,CH2_CmaxD_I2)
title('Control Directo Maximo brazo 2')
legend('CH1','CH2')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Amplitud [V]')
text(0,0.5,sprintf('Crosstalk %.2f',Crosstalk_Cmax_I2))
```

```

Visibilidad_ControlInverso_CH2 = [Visibilidad_CH2 Visibilidad_CH2_5m
Visibilidad_CH2_10m];
%% Visibilidad_CH2_20m];
Largo = [0 5 10];%% 20];

```

```

figure(8)
subplot(2,1,1)
plot(Largo,Visibilidad_ControlInverso_CH1,'*-')
title('Visibilidad Control Inverso CH1')
subplot(2,1,2)
plot(Largo,Visibilidad_ControlInverso_CH2,'*-')
title('Visibilidad Control Inverso CH2')

```

```

Crosstalk_ControlInverso_Cmax = [Crosstalk_Cmax Crosstalk_Cmax_5m Crosstalk_Cmax_10m];
                                %% Crosstalk_Cmax_20m];
Crosstalk_ControlInverso_Cmin = [Crosstalk_Cmin Crosstalk_Cmin_5m Crosstalk_Cmin_10m];
                                %% Crosstalk_Cmin_20m];

```

```

figure(9)
subplot(2,1,1)
plot(Largo,Crosstalk_ControlInverso_Cmax,'*-')
title('Crosstalk Control Inverso Máximo')
subplot(2,1,2)
plot(Largo,Crosstalk_ControlInverso_Cmin,'*-')
title('Crosstalk Control Inverso Mínimo')

```

```

Desviacion_estandar_ControlMax_CH1 = [D_E_Cmax_sin_fibra_CH1 D_E_Cmax_5m_CH1
D_E_Cmax_10m_CH1];
%% D_E_Cmax_20m_CH1];
Desviacion_estandar_ControlMax_CH2 = [D_E_Cmax_sin_fibra_CH2 D_E_Cmax_5m_CH2
D_E_Cmax_10m_CH2];
%% D_E_Cmax_20m_CH2];

```

```

figure(10)
subplot(2,1,1)
plot(Largo,Desviacion_estandar_ControlMax_CH1,'*-')
title('Desviación Estándar Control Inverso Máximo CH1')
subplot(2,1,2)
plot(Largo,Desviacion_estandar_ControlMax_CH2,'*-')
title('Desviación Estándar Control Inverso Máximo CH2')

```

```

Desviacion_estandar_ControlMin_CH1 = [D_E_Cmin_sin_fibra_CH1 D_E_Cmin_5m_CH1
D_E_Cmin_10m_CH1];
%% D_E_Cmin_20m_CH1];
Desviacion_estandar_ControlMin_CH2 = [D_E_Cmin_sin_fibra_CH2 D_E_Cmin_5m_CH2
D_E_Cmin_10m_CH2];
%% D_E_Cmin_20m_CH2];
figure(11)
subplot(2,1,1)
plot(Largo,Desviacion_estandar_ControlMin_CH1,'*-')
title('Desviación Estándar Control Inverso Mínimo CH1')
subplot(2,1,2)
plot(Largo,Desviacion_estandar_ControlMin_CH2,'*-')
title('Desviación Estándar Control Inverso Mínimo CH2')

```

Capítulo 11. Control Directo e Inverso MZI 4x4

Códigos de Control Directo y Control inverso sin modulación:

a) Código Principal

```
clear variables
clc
close all

load('Tiempo.mat')
load('ControlMax_I1.mat')
load('ControlMax_I2.mat')
load('ControlMax_I3.mat')
load('ControlMax_I4.mat')
load('ControlMax_I1_Inverso.mat')
load('ControlMax_I2_Inverso.mat')
load('ControlMax_I3_Inverso.mat')
load('ControlMax_I4_Inverso.mat')

%% Recorte data Osciloscopio
t = t(1:2250);

[ControlMax_I1_CH1_R,ControlMax_I1_CH2_R,ControlMax_I1_CH3_R,
ControlMax_I1_CH4_R]= recorte4canales(ControlMax_I1_CH1,ControlMax_I1_CH2,
ControlMax_I1_CH3,ControlMax_I1_CH4);

[ControlMax_I2_CH1_R,ControlMax_I2_CH2_R,ControlMax_I2_CH3_R,
ControlMax_I2_CH4_R]= recorte4canales(ControlMax_I2_CH1,ControlMax_I2_CH2,
ControlMax_I2_CH3,ControlMax_I2_CH4);

[ControlMax_I3_CH1_R,ControlMax_I3_CH2_R,ControlMax_I3_CH3_R,
ControlMax_I3_CH4_R]= recorte4canales(ControlMax_I3_CH1,ControlMax_I3_CH2,
ControlMax_I3_CH3,ControlMax_I3_CH4);

[ControlMax_I4_CH1_R,ControlMax_I4_CH2_R,ControlMax_I4_CH3_R,
ControlMax_I4_CH4_R]= recorte4canales(ControlMax_I4_CH1,ControlMax_I4_CH2,
ControlMax_I4_CH3,ControlMax_I4_CH4);
```

```
[ControlMax_I1_Inverso_CH1_R,ControlMax_I1_Inverso_CH2_R,
ControlMax_I1_Inverso_CH3_R,ControlMax_I1_Inverso_CH4_R]
= recorte4canales(ControlMax_I1_Inverso_CH1,ControlMax_I1_Inverso_CH2,
ControlMax_I1_Inverso_CH3,ControlMax_I1_Inverso_CH4);
```

```
[ControlMax_I2_Inverso_CH1_R,ControlMax_I2_Inverso_CH2_R,
ControlMax_I2_Inverso_CH3_R,ControlMax_I2_Inverso_CH4_R]
= recorte4canales(ControlMax_I2_Inverso_CH1,ControlMax_I2_Inverso_CH2,
ControlMax_I2_Inverso_CH3,ControlMax_I2_Inverso_CH4);
```

```
[ControlMax_I3_Inverso_CH1_R,ControlMax_I3_Inverso_CH2_R,
ControlMax_I3_Inverso_CH3_R,ControlMax_I3_Inverso_CH4_R]
= recorte4canales(ControlMax_I3_Inverso_CH1,ControlMax_I3_Inverso_CH2,
ControlMax_I3_Inverso_CH3,ControlMax_I3_Inverso_CH4);
```

```
[ControlMax_I4_Inverso_CH1_R,ControlMax_I4_Inverso_CH2_R,
ControlMax_I4_Inverso_CH3_R,ControlMax_I4_Inverso_CH4_R]
= recorte4canales(ControlMax_I4_Inverso_CH1,ControlMax_I4_Inverso_CH2,
ControlMax_I4_Inverso_CH3,ControlMax_I4_Inverso_CH4);
```

%% Eliminación valores negativos

```
ControlMax_I1_CH1_R(ControlMax_I1_CH1_R<0) = 0;
ControlMax_I1_CH2_R(ControlMax_I1_CH2_R<0) = 0;
ControlMax_I1_CH3_R(ControlMax_I1_CH3_R<0) = 0;
ControlMax_I1_CH4_R(ControlMax_I1_CH4_R<0) = 0;
```

```
ControlMax_I2_CH1_R(ControlMax_I2_CH1_R<0) = 0;
ControlMax_I2_CH2_R(ControlMax_I2_CH2_R<0) = 0;
ControlMax_I2_CH3_R(ControlMax_I2_CH3_R<0) = 0;
ControlMax_I2_CH4_R(ControlMax_I2_CH4_R<0) = 0;
```

```
ControlMax_I3_CH1_R(ControlMax_I3_CH1_R<0) = 0;
ControlMax_I3_CH2_R(ControlMax_I3_CH2_R<0) = 0;
ControlMax_I3_CH3_R(ControlMax_I3_CH3_R<0) = 0;
ControlMax_I3_CH4_R(ControlMax_I3_CH4_R<0) = 0;
```

```
ControlMax_I4_CH1_R(ControlMax_I4_CH1_R<0) = 0;
ControlMax_I4_CH2_R(ControlMax_I4_CH2_R<0) = 0;
```

```
ControlMax_I4_CH3_R(ControlMax_I4_CH3_R<0) = 0;
ControlMax_I4_CH4_R(ControlMax_I4_CH4_R<0) = 0;
```

```
ControlMax_I1_Inverso_CH1_R(ControlMax_I1_Inverso_CH1_R<0) = 0;
ControlMax_I1_Inverso_CH2_R(ControlMax_I1_Inverso_CH2_R<0) = 0;
ControlMax_I1_Inverso_CH3_R(ControlMax_I1_Inverso_CH3_R<0) = 0;
ControlMax_I1_Inverso_CH4_R(ControlMax_I1_Inverso_CH4_R<0) = 0;
```

```
ControlMax_I2_Inverso_CH1_R(ControlMax_I2_Inverso_CH1_R<0) = 0;
ControlMax_I2_Inverso_CH2_R(ControlMax_I2_Inverso_CH2_R<0) = 0;
ControlMax_I2_Inverso_CH3_R(ControlMax_I2_Inverso_CH3_R<0) = 0;
ControlMax_I2_Inverso_CH4_R(ControlMax_I2_Inverso_CH4_R<0) = 0;
```

```
ControlMax_I3_Inverso_CH1_R(ControlMax_I3_Inverso_CH1_R<0) = 0;
ControlMax_I3_Inverso_CH2_R(ControlMax_I3_Inverso_CH2_R<0) = 0;
ControlMax_I3_Inverso_CH3_R(ControlMax_I3_Inverso_CH3_R<0) = 0;
ControlMax_I3_Inverso_CH4_R(ControlMax_I3_Inverso_CH4_R<0) = 0;
```

```
ControlMax_I4_Inverso_CH1_R(ControlMax_I4_Inverso_CH1_R<0) = 0;
ControlMax_I4_Inverso_CH2_R(ControlMax_I4_Inverso_CH2_R<0) = 0;
ControlMax_I4_Inverso_CH3_R(ControlMax_I4_Inverso_CH3_R<0) = 0;
ControlMax_I4_Inverso_CH4_R(ControlMax_I4_Inverso_CH4_R<0) = 0;
```

%% Graficas

```
figure(1)
subplot(2,2,1)
plot(t,ControlMax_I1_CH1_R,t,ControlMax_I1_CH2_R,t,ControlMax_I1_CH3_R,t,
ControlMax_I1_CH4_R)
legend('I1','I2','I3','I4')
title('Control Directo Máximo I1')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Amplitud [V]')

subplot(2,2,2)
plot(t,ControlMax_I2_CH1_R,t,ControlMax_I2_CH2_R,t,ControlMax_I2_CH3_R,t,
ControlMax_I2_CH4_R)
legend('I1','I2','I3','I4')
title('Control Directo Máximo I2')
xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylabel('Amplitud [V]')
```

```
subplot(2,2,3)
```

```
plot(t,ControlMax_I3_CH1_R,t,ControlMax_I3_CH2_R,t,ControlMax_I3_CH3_R,t,  
ControlMax_I3_CH4_R)
```

```
legend('I1','I2','I3','I4')
```

```
title('Control Directo Máximo I3')
```

```
xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylabel('Amplitud [V]')
```

```
subplot(2,2,4)
```

```
plot(t,ControlMax_I4_CH1_R,t,ControlMax_I4_CH2_R,t,ControlMax_I4_CH3_R,t,  
ControlMax_I4_CH4_R)
```

```
legend('I1','I2','I3','I4')
```

```
title('Control Directo Máximo I4')
```

```
xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylabel('Amplitud [V]')
```

```
figure(2)
```

```
subplot(2,2,1)
```

```
plot(t,ControlMax_I1_Inverso_CH1_R,t,ControlMax_I1_Inverso_CH2_R,t,  
ControlMax_I1_Inverso_CH3_R,t,ControlMax_I1_Inverso_CH4_R)
```

```
legend('I1','I2','I3','I4')
```

```
title('Control Inverso Máximo I1')
```

```
xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylabel('Amplitud [V]')
```

```
subplot(2,2,2)
```

```
plot(t,ControlMax_I2_Inverso_CH1_R,t,ControlMax_I2_Inverso_CH2_R,t,  
ControlMax_I2_Inverso_CH3_R,t,ControlMax_I2_Inverso_CH4_R)
```

```
legend('I1','I2','I3','I4')
```

```
title('Control Inverso Máximo I2')
```

```
xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylabel('Amplitud [V]')
```

```
subplot(2,2,3)
```

```
plot(t,ControlMax_I3_Inverso_CH1_R,t,ControlMax_I3_Inverso_CH2_R,t,  
ControlMax_I3_Inverso_CH3_R,t,ControlMax_I3_Inverso_CH4_R)
```

```
legend('I1','I2','I3','I4')
```

```
title('Control Inverso Máximo I3')
```

```

xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Amplitud [V]')

subplot(2,2,4)
plot(t,ControlMax_I4_Inverso_CH1_R,t,ControlMax_I4_Inverso_CH2_R,t,
ControlMax_I4_Inverso_CH3_R,t,ControlMax_I4_Inverso_CH4_R)
legend('I1','I2','I3','I4')
title('Control Inverso Máximo I4')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Amplitud [V]')

%% Crosstalk

[Crosstalk_ControlMax_I1] = medidordeCrosstalk4Canales(ControlMax_I1_CH1_R,
ControlMax_I1_CH2_R,ControlMax_I1_CH3_R,
ControlMax_I1_CH4_R);
[Crosstalk_ControlMax_I2] = medidordeCrosstalk4Canales(ControlMax_I2_CH1_R,
ControlMax_I2_CH2_R,ControlMax_I2_CH3_R,
ControlMax_I2_CH4_R);
[Crosstalk_ControlMax_I3] = medidordeCrosstalk4Canales(ControlMax_I3_CH1_R,
ControlMax_I3_CH2_R,ControlMax_I3_CH3_R,
ControlMax_I3_CH4_R);
[Crosstalk_ControlMax_I4] = medidordeCrosstalk4Canales(ControlMax_I4_CH1_R,
ControlMax_I4_CH2_R,ControlMax_I4_CH3_R,
ControlMax_I4_CH4_R);

[Crosstalk_ControlMax_I1_Inverso] =
medidordeCrosstalk4Canales(ControlMax_I1_Inverso_CH1_R,ControlMax_I1_Inverso_CH2_R,
ControlMax_I1_Inverso_CH3_R,ControlMax_I1_Inverso_CH4_R);
[Crosstalk_ControlMax_I2_Inverso] =
medidordeCrosstalk4Canales(ControlMax_I2_Inverso_CH1_R,ControlMax_I2_Inverso_CH2_R,
ControlMax_I2_Inverso_CH3_R,ControlMax_I2_Inverso_CH4_R);
[Crosstalk_ControlMax_I3_Inverso] =
medidordeCrosstalk4Canales(ControlMax_I3_Inverso_CH1_R,ControlMax_I3_Inverso_CH2_R,
ControlMax_I3_Inverso_CH3_R,ControlMax_I3_Inverso_CH4_R);
[Crosstalk_ControlMax_I4_Inverso] =
medidordeCrosstalk4Canales(ControlMax_I4_Inverso_CH1_R,ControlMax_I4_Inverso_CH2_R,
ControlMax_I4_Inverso_CH3_R,ControlMax_I4_Inverso_CH4_R);

%% Desviación Estándar

```

D_E_ControlMax_I1_CH1_R = std(ControlMax_I1_CH1_R);
 D_E_ControlMax_I1_CH2_R = std(ControlMax_I1_CH2_R);
 D_E_ControlMax_I1_CH3_R = std(ControlMax_I1_CH3_R);
 D_E_ControlMax_I1_CH4_R = std(ControlMax_I1_CH4_R);

D_E_ControlMax_I2_CH1_R = std(ControlMax_I2_CH1_R);
 D_E_ControlMax_I2_CH2_R = std(ControlMax_I2_CH2_R);
 D_E_ControlMax_I2_CH3_R = std(ControlMax_I2_CH3_R);
 D_E_ControlMax_I2_CH4_R = std(ControlMax_I2_CH4_R);

D_E_ControlMax_I3_CH1_R = std(ControlMax_I3_CH1_R);
 D_E_ControlMax_I3_CH2_R = std(ControlMax_I3_CH2_R);
 D_E_ControlMax_I3_CH3_R = std(ControlMax_I3_CH3_R);
 D_E_ControlMax_I3_CH4_R = std(ControlMax_I3_CH4_R);

D_E_ControlMax_I4_CH1_R = std(ControlMax_I4_CH1_R);
 D_E_ControlMax_I4_CH2_R = std(ControlMax_I4_CH2_R);
 D_E_ControlMax_I4_CH3_R = std(ControlMax_I4_CH3_R);
 D_E_ControlMax_I4_CH4_R = std(ControlMax_I4_CH4_R);

D_E_ControlMax_I1_Inverso_CH1_R = std(ControlMax_I1_Inverso_CH1_R);
 D_E_ControlMax_I1_Inverso_CH2_R = std(ControlMax_I1_Inverso_CH2_R);
 D_E_ControlMax_I1_Inverso_CH3_R = std(ControlMax_I1_Inverso_CH3_R);
 D_E_ControlMax_I1_Inverso_CH4_R = std(ControlMax_I1_Inverso_CH4_R);

D_E_ControlMax_I2_Inverso_CH1_R = std(ControlMax_I2_Inverso_CH1_R);
 D_E_ControlMax_I2_Inverso_CH2_R = std(ControlMax_I2_Inverso_CH2_R);
 D_E_ControlMax_I2_Inverso_CH3_R = std(ControlMax_I2_Inverso_CH3_R);
 D_E_ControlMax_I2_Inverso_CH4_R = std(ControlMax_I2_Inverso_CH4_R);

D_E_ControlMax_I3_Inverso_CH1_R = std(ControlMax_I3_Inverso_CH1_R);
 D_E_ControlMax_I3_Inverso_CH2_R = std(ControlMax_I3_Inverso_CH2_R);
 D_E_ControlMax_I3_Inverso_CH3_R = std(ControlMax_I3_Inverso_CH3_R);
 D_E_ControlMax_I3_Inverso_CH4_R = std(ControlMax_I3_Inverso_CH4_R);

D_E_ControlMax_I4_Inverso_CH1_R = std(ControlMax_I4_Inverso_CH1_R);
 D_E_ControlMax_I4_Inverso_CH2_R = std(ControlMax_I4_Inverso_CH2_R);
 D_E_ControlMax_I4_Inverso_CH3_R = std(ControlMax_I4_Inverso_CH3_R);
 D_E_ControlMax_I4_Inverso_CH4_R = std(ControlMax_I4_Inverso_CH4_R);

%% Visibilidad

Promedio_Minimo_I2_CH1 = $\text{sum}(\text{ControlMax_I2_CH1_R})/\text{length}(\text{ControlMax_I2_CH1_R})$;

Minimo_I2_CH1 = Promedio_Minimo_I2_CH1 ;%- D_E_ControlMax_I2_CH1_R;

Promedio_Minimo_I1_CH2 = $\text{sum}(\text{ControlMax_I1_CH2_R})/\text{length}(\text{ControlMax_I1_CH2_R})$;

Minimo_I1_CH2 = Promedio_Minimo_I1_CH2 ;%- D_E_ControlMax_I1_CH2_R;

Promedio_Minimo_I1_CH3 = $\text{sum}(\text{ControlMax_I1_CH3_R}(985:1197))/$
 $\text{length}(\text{ControlMax_I1_CH3_R}(985:1197))$;

Minimo_I1_CH3 = Promedio_Minimo_I1_CH3 ;%- D_E_ControlMax_I1_CH3_R;

Promedio_Minimo_I1_CH4 = $\text{sum}(\text{ControlMax_I1_CH4_R})/\text{length}(\text{ControlMax_I1_CH4_R})$;

Minimo_I1_CH4 = Promedio_Minimo_I1_CH4 ;%- D_E_ControlMax_I1_CH4_R;

Promedio_Minimo_I2_Inverso_CH1 = $\text{sum}(\text{ControlMax_I2_Inverso_CH1_R})/$
 $\text{length}(\text{ControlMax_I2_Inverso_CH1_R})$;

Minimo_I2_Inverso_CH1 = Promedio_Minimo_I2_Inverso_CH1 ;

%- D_E_ControlMax_I2_Inverso_CH1_R;

Promedio_Minimo_I1_Inverso_CH2 = $\text{sum}(\text{ControlMax_I1_Inverso_CH2_R})/$
 $\text{length}(\text{ControlMax_I1_Inverso_CH2_R})$;

Minimo_I1_Inverso_CH2 = Promedio_Minimo_I1_Inverso_CH2 ;

%- D_E_ControlMax_I1_Inverso_CH2_R;

Promedio_Minimo_I1_Inverso_CH3 = $\text{sum}(\text{ControlMax_I1_Inverso_CH3_R})/$
 $\text{length}(\text{ControlMax_I1_Inverso_CH3_R})$;

Minimo_I1_Inverso_CH3 = Promedio_Minimo_I1_Inverso_CH3 ;

%- D_E_ControlMax_I1_Inverso_CH3_R;

Promedio_Minimo_I1_Inverso_CH4 = $\text{sum}(\text{ControlMax_I1_Inverso_CH4_R})/$
 $\text{length}(\text{ControlMax_I1_Inverso_CH4_R})$;

Minimo_I1_Inverso_CH4 = Promedio_Minimo_I1_Inverso_CH4 ;

%- D_E_ControlMax_I1_Inverso_CH4_R;

Visibilidad_CH1 = $(\text{max}(\text{ControlMax_I1_CH1_R}) - \text{Minimo_I2_CH1})/$
 $(\text{max}(\text{ControlMax_I1_CH1_R}) + \text{Minimo_I2_CH1})$;

Visibilidad_CH2 = $(\text{max}(\text{ControlMax_I2_CH2_R}) - \text{Minimo_I1_CH2})/$
 $(\text{max}(\text{ControlMax_I2_CH2_R}) + \text{Minimo_I1_CH2})$;

Visibilidad_CH3 = $(\text{max}(\text{ControlMax_I3_CH3_R}) - \text{Minimo_I1_CH3})/$

$$\text{Visibilidad_CH4} = \frac{(\max(\text{ControlMax_I3_CH3_R}) + \text{Minimo_I1_CH3}) + (\max(\text{ControlMax_I4_CH4_R}) - \text{Minimo_I1_CH4})}{(\max(\text{ControlMax_I4_CH4_R}) + \text{Minimo_I1_CH4})};$$

$$\text{Visibilidad_CH1_Inverso} = \frac{(\max(\text{ControlMax_I1_Inverso_CH1_R}) - \text{Minimo_I2_Inverso_CH1}) + (\max(\text{ControlMax_I1_Inverso_CH1_R}) + \text{Minimo_I2_Inverso_CH1})}{2}$$

$$\text{Visibilidad_CH2_Inverso} = \frac{(\max(\text{ControlMax_I2_Inverso_CH2_R}) - \text{Minimo_I1_Inverso_CH2}) + (\max(\text{ControlMax_I2_Inverso_CH2_R}) + \text{Minimo_I1_Inverso_CH2})}{2}$$

$$\text{Visibilidad_CH3_Inverso} = \frac{(\max(\text{ControlMax_I3_Inverso_CH3_R}) - \text{Minimo_I1_Inverso_CH3}) + (\max(\text{ControlMax_I3_Inverso_CH3_R}) + \text{Minimo_I1_Inverso_CH3})}{2}$$

$$\text{Visibilidad_CH4_Inverso} = \frac{(\max(\text{ControlMax_I4_Inverso_CH4_R}) - \text{Minimo_I1_Inverso_CH4}) + (\max(\text{ControlMax_I4_Inverso_CH4_R}) + \text{Minimo_I1_Inverso_CH4})}{2}$$

$$\text{Crosstalk_Medidas} = [\text{Crosstalk_ControlMax_I1}, \text{Crosstalk_ControlMax_I1_Inverso}, \text{Crosstalk_ControlMax_I2}, \text{Crosstalk_ControlMax_I2_Inverso}, \text{Crosstalk_ControlMax_I3}, \text{Crosstalk_ControlMax_I3_Inverso}, \text{Crosstalk_ControlMax_I4}, \text{Crosstalk_ControlMax_I4_Inverso}];$$

$$\text{Comparativa_Visibilidad} = [\text{Visibilidad_CH1}, \text{Visibilidad_CH1_Inverso}, \text{Visibilidad_CH2}, \text{Visibilidad_CH2_Inverso}, \text{Visibilidad_CH3}, \text{Visibilidad_CH3_Inverso}, \text{Visibilidad_CH4}, \text{Visibilidad_CH4_Inverso}];$$

$$\text{Desviacion_Estandar_ControlMax_I1} = \sqrt{\frac{(\text{D_E_ControlMax_I1_CH1_R})^2 + (\text{D_E_ControlMax_I1_Inverso_CH1_R})^2 + (\text{D_E_ControlMax_I1_CH2_R})^2 + (\text{D_E_ControlMax_I1_Inverso_CH2_R})^2 + (\text{D_E_ControlMax_I1_CH3_R})^2 + (\text{D_E_ControlMax_I1_Inverso_CH3_R})^2 + (\text{D_E_ControlMax_I1_CH4_R})^2 + (\text{D_E_ControlMax_I1_Inverso_CH4_R})^2}{8}}$$

$$\text{Desviacion_Estandar_ControlMax_I2} = \sqrt{\frac{(\text{D_E_ControlMax_I2_CH1_R})^2 + (\text{D_E_ControlMax_I2_Inverso_CH1_R})^2 + (\text{D_E_ControlMax_I2_CH2_R})^2 + (\text{D_E_ControlMax_I2_Inverso_CH2_R})^2 + (\text{D_E_ControlMax_I2_CH3_R})^2 + (\text{D_E_ControlMax_I2_Inverso_CH3_R})^2 + (\text{D_E_ControlMax_I2_CH4_R})^2 + (\text{D_E_ControlMax_I2_Inverso_CH4_R})^2}{8}}$$

$$\text{Desviacion_Estandar_ControlMax_I3} = \sqrt{\frac{(\text{D_E_ControlMax_I3_CH1_R})^2 + (\text{D_E_ControlMax_I3_Inverso_CH1_R})^2}{2}}$$

```
D_E_ControlMax_I3_CH2_R,D_E_ControlMax_I3_Inverso_CH2_R
D_E_ControlMax_I3_CH3_R,D_E_ControlMax_I3_Inverso_CH3_R
D_E_ControlMax_I3_CH4_R,D_E_ControlMax_I3_Inverso_CH4_R];
```

```
Desviacion_Estandar_ControlMax_I4 =
```

```
[D_E_ControlMax_I4_CH1_R,D_E_ControlMax_I4_Inverso_CH1_R
D_E_ControlMax_I4_CH2_R,D_E_ControlMax_I4_Inverso_CH2_R
D_E_ControlMax_I4_CH3_R,D_E_ControlMax_I4_Inverso_CH3_R
D_E_ControlMax_I4_CH4_R,D_E_ControlMax_I4_Inverso_CH4_R];
```

```
figure(3)
bar(Crosstalk_Medidas)
title('Comparativa Crosstalk Control Directo y Control Inverso')
legend('Control Directo','Control Inverso')
ylim([-27 -15])
xlabel('Canal')
ylabel('Crosstalk [dB]')
figure(4)
bar(Comparativa_Visibilidad)
title('Comparativa Visibilidad en Control Directo y Control Inverso')
legend('Control Directo','Control Inverso')
xlabel('Canal')
ylabel('Visibilidad')
ylim([0.95 1])
```

```
figure(5)
subplot(4,1,1)
bar(Desviacion_Estandar_ControlMax_I1)
title('Desviación Estándar Control Máximo I1')
legend('Control Directo','Control Inverso')
xlabel('Canal')
ylabel('Desviación [UA]')
subplot(4,1,2)
bar(Desviacion_Estandar_ControlMax_I2)
title('Desviación Estándar Control Máximo I2')
legend('Control Directo','Control Inverso')
xlabel('Canal')
ylabel('Desviación [UA]')
```

```

subplot(4,1,3)
bar(Desviacion_Estandar_ControlMax_I3)
title('Desviación Estándar Control Máximo I3')
legend('Control Directo','Control Inverso')
xlabel('Canal')
ylabel('Desviación [UA]')
subplot(4,1,4)
bar(Desviacion_Estandar_ControlMax_I4)
title('Desviación Estándar Control Máximo I4')
legend('Control Directo','Control Inverso')
xlabel('Canal')
ylabel('Desviación [UA]')

```

- b) Función recorte4canales (esta función es necesaria debido a que el osciloscopio envia data negativa para representar datos que no existen, con amplitudes de -2.12[V])

```

function [OCH1,OCH2,OCH3,OCH4] = recorte4canales(CH1,CH2,CH3,CH4)

j = 1;
k = 1;
l = 1;
m = 1;
for i=1:2500
    if(CH1(i)>=-1)
        OCH1(j,1) =CH1(i);
        j=j+1;
    end
    if(CH2(i)>=-1)
        OCH2(k,1) =CH2(i);
        k=k+1;
    end
    if(CH3(i)>=-1)
        OCH3(l,1) =CH3(i);
        l=l+1;
    end
    if(CH4(i)>=-1)
        OCH4(m,1) =CH4(i);
        m=m+1;
    end
end
end

```

c) Función medidordeCrosstalk4Canales:

```
function [Crosstalk] = medidordeCrosstalk4Canales(CH1,CH2,CH3,CH4)

max_aux = [CH1(1) CH2(1) CH3(1) CH4(1)];
[~,index_max] = max(max_aux);

Promedio_CH1 = sum(CH1)/length(CH1);
Promedio_CH2 = sum(CH2)/length(CH2);
Promedio_CH3 = sum(CH3)/length(CH3);
Promedio_CH4 = sum(CH4)/length(CH4);
Promedio_all = [Promedio_CH1 Promedio_CH2 Promedio_CH3 Promedio_CH4];

Crosstalk = 10*log10((sum(Promedio_all,2)-Promedio_all(:,index_max))./
    (3.*Promedio_all(:,index_max))));
```

Código calculador de Crosstalk Promedio en señal modulada MZI 4x4 Control Directo:

a) Código Principal

```
clear all
clc
% close all
load('dataC');

for i=1:30
    C1=C1min(:,i);
    C2=C2min(:,i);
    n(i)=Iname_P2(i);
    Cm1=mean(C1(find(C1~=0)));
    Cm2=mean(C2(find(C2~=0)));
    VC=[Cm1 Cm2];
    Cm(i)=mean(VC);
    Cstd(i)=std(VC);
    %Cstd(i)=std[Cm1;Cm2];
    % Cm(i)=mean(C(find(C~=0)));
    % Cstd(i)=std(C(find(C~=0)));
end

figure(1)
```

```

subplot(212)
errorbar(n,Cm,Cstd,'o')
%plot(n, Cm)
ylim([-30 0])
xlim([1525 1570])
%title('Crosstalk vs Longitud de onda')
title('(b)')
xlabel('\lambda (nm)')
ylabel('crosstalk (dB)')
subplot(211)
plot(linspace(0,2.5e-4,2500),I)
xlim([0 2.5e-4])
title('(a)')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Amplitud [V]')
legend('CH1','CH2','CH3','CH4')

```

b) Código para leer archivos CSV

```

function [t,I]=leerCSV(dir_carpeta)
cd(dir_carpeta);
s_csv=dir('*.csv');
for k=1:4
MyCell = readcell(s_csv(k).name);
t = MyCell(:,4);
I0(:,k) = MyCell(:,5);
end
I=cell2mat(I0);
I(I<0)=0;
cd('.')

```

c) Código Lector de Carpetas con la data ingresada

```

function [Is,Iname,Nmed]=leerIcarpetas(NcarpetaOr,dir0)
cd(NcarpetaOr)
s=dir('1*');
cd(dir0)
Nmed=length(s);
i=1;
for i=1:Nmed

```

```

Ncarpeta=s(i).name;
dir1=[s(1).folder,'\',Ncarpeta];
cd(dir0);
[t,I]=leerCSV(dir1);
if(length(Ncarpeta)<5)
    Iname(i,:)=[Ncarpeta(1:4),'.000'];
else
    Iname(i,:)=[Ncarpeta(1:8)];
end

Is(i,:)=I;
end
Iname=str2num(Iname);
cd(dir0);
d) Código detector de flancos de bajada

```

```

function xm=detFb(I)
    dI=diff(I(:,,:));
    for j=1:4
        x=find(dI(:,j)==min(dI(:,j)));
        xm(j)=x(1);
    end

```

e) Calculador de Crosstalk

```

function [Cmin,Cmed,Cstd]=crosstalk01(I,title01,Nfig)
    xmin=detFb(I);
    figure(Nfig)
    plot(I);
    for k=1:4
        xi=xmin(k)-160;
        xf=xmin(k)-10;
        Lx1=xline(xi,'r',['C_j / C_{',num2str(k),'}'])
        Lx1.LabelVerticalAlignment = 'middle';
        Lx1.LineWidth = 2;
        Lx2=xline(xf,'r')
        Lx2.LineWidth = 2;
        Ij_1k=I(xi:xf,:)/I(xi:xf,k);%razon entre una porción de I
        CrT=10*log10(Ij_1k);%crosstalk completo por región
        Cmin(:,k)=min(CrT);
    end

```

```

Cmed(:,k)=mean(CrT);
Cstd(:,k)=std(CrT);
end
title(['crosstalk \lambda: ',num2str(title01)]);
legend('I_1','I_2','I_3','I_4')

```

Luego del Cálculo de Crosstalk se almacena la data para utilizar el Código Principal.

Calculo de Visibilidad Control Inverso MZI 4x4 variando longitud de onda.

a) Código Principal

```

clear all
clc
% close all
s0=dir();
dir0=s0(1).folder;
% [IC,InameC]=leerIcarpetas2('Laser Control',dir0);
% [IS,InameS]=leerIcarpetas2('Laser Señal',dir0);

load('data');
Vc=visib(IC,InameC,90);
VS=visib(IS,InameS,90);
index=buscaMAxV(VS,9)

VmC=mean(Vc(index,2:5));
VsC=std(Vc(index,2:5));
VmS=mean(VS(index,2:5));
VsS=std(VS(index,2:5));
figure(1)
subplot(2,2,1)
% plot(Vc(index,1), (Vc(index,2:5))', 'o-')
errorbar(Vc(index,1),VmC,VsC,'o:');
title('Señal de Control (Fijado a 1550nm)');
ylim([0.85 1]);legend('Vm_C');ylabel('Visibilidad');xlabel('\lambda (nm)')
subplot(2,2,2)
% plot(VS(index,1), (VS(index,2:5))', 's:')
errorbar(VS(index,1),VmS,VsS,'s:');
% title('modulated signal (\lambda tunable)');
% ylim([0.85 1]);legend('Vm_S');ylabel('Visibility');xlabel('\lambda')

```

```

% axes('Position',[.7 .7 .2 .2])
hold on
f=-((VS(index,1)-1550)/1550).^2+1;
plot(VS(index,1),VmS,'r')
hold off
box on
errorbar(VS(index,1),VmS,VsS,'s:');
ylim([0.99 1]);xlim([1547 1553]);
box off

title('Señal Modulada (\lambda tunable)');
ylim([0.85 1]);legend('Vm_S');ylabel('Visibilidad');xlabel('\lambda (nm)')
subplot(2,2,[3,4])
errorbar(Vc(index,1),VmC,VsC,'o:');
hold on
errorbar(VS(index,1),VmS,VsS,'s:');
hold off
% plot(Vc(index,1),mean(Vc(index,2:5))','o-',VS(index,1),mean(VS(index,2:5))','s:')
ylim([0.85 1]);legend('Vm_C','Vm_S');ylabel('Visibilidad');xlabel('\lambda (nm)')

```

b) Código para calcular Visibilidad

```

function V=visib(Ig,Ing,N)
% Ig=IC;
% Ing=InameC;
for i=1:N
I(:,i)= Ig(i,:);
Imax=max(I);
Imin=min(I);
Imin(find(Imin<=0))=0.01;
Iso=Imax-Imin;
Iuo=Imax+Imin;
Vo=Iso./Iuo;
V(i,:)= [Ing(i),Vo];
end

```

c) Código para encontrar la máxima visibilidad por punto.

```

function V=visib(Ig,Ing,N)
% Ig=IC;

```

```
% Ing=InameC;
for i=1:N
I(:,:)= Ig(i,:,:);
Imax=max(I);
Imin=min(I);
Imin(find(Imin<=0))=0.01;
Iso=Imax-Imin;
Iuo=Imax+Imin;
Vo=Iso./Iuo;
V(i,:)=[Ing(i),Vo];
end
```

Anexo B. Explicación funcionamiento interfaz de láser tunable

Este láser consta de una pantalla táctil con la cual se pueden modificar las distintas longitudes de onda y potencia generada a la salida de este, esto es explicado detalladamente a continuación:

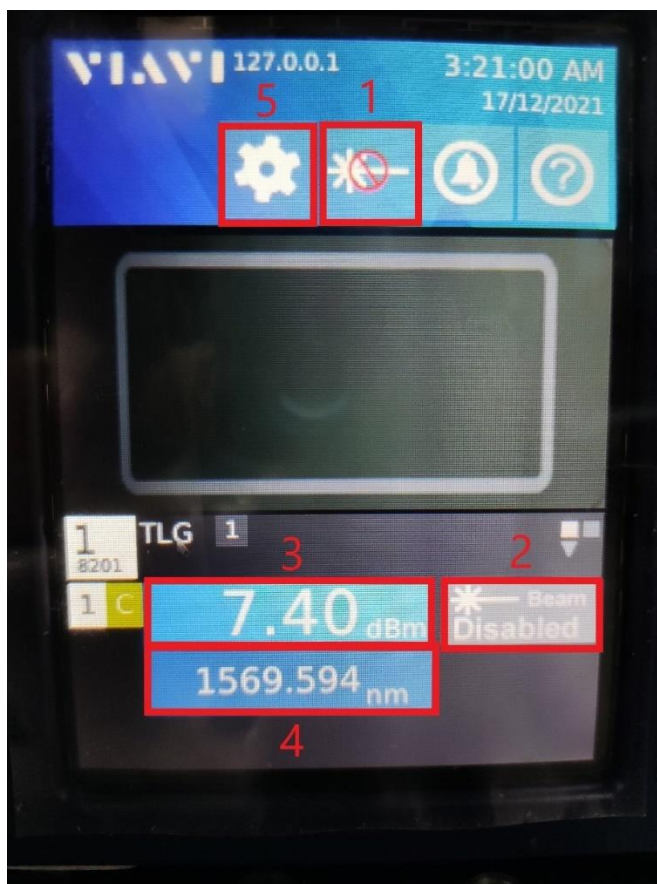
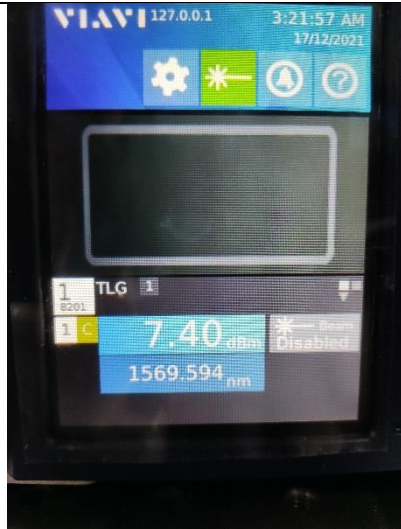
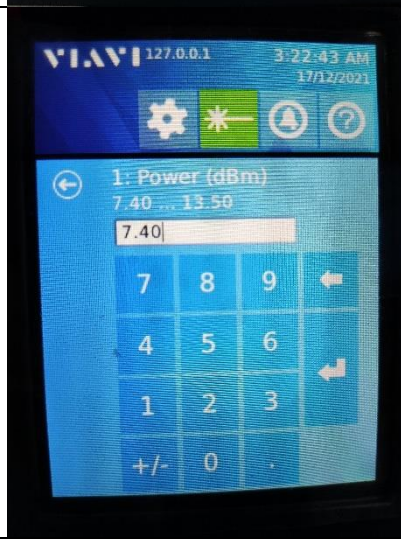


Figura B.1 Display pantalla táctil láser Fuente: Foto editada y tomada en laboratorios de Ingeniería UCSC

De la Figura B.1 se puede observar el display del láser a utilizar en el proyecto en donde se destacaron los bloques más importantes para el funcionamiento de este de forma enumerada, donde se describirá mediante una tabla el funcionamiento de cada uno de estos botones.

Tabla B.1 Detalle display de dispositivo láser marca VIAVI. Fuente: Laboratorios de Ingeniería UCSC

1	 The screenshot shows the VIAVI 127.0.0.1 interface. At the top, it displays the time 3:21:57 AM and date 17/12/2021. Below the status bar, there are icons for settings, a laser beam, a bell, and a question mark. The central screen is dark. Below it, there are labels '1 TLG 1' and '1 C'. The power level is shown as 7.40 dBm and the wavelength as 1569.594 nm. A green button labeled 'Beam Disabled' is visible on the right.	Este cuadro corresponde a una seguridad que posee el dispositivo láser, con el fin de evitar activaciones de este de manera accidental, en la imagen mostrada al costado se puede apreciar la activación de este lo cual permitirá la activación del cuadro n°2.
2	 This screenshot is similar to the first one, but the 'Beam Disabled' button is now highlighted in green and labeled 'Beam Enabled', indicating that the laser is active.	Este cuadro corresponde al activador del láser el cual se observa activado en la figura del costado, este cuadro es el encargado de dejar salir la luz infrarroja del dispositivo, pudiendo cambiarlo de estado enabled o disabled según el requerimiento.
3	 The screenshot shows the power adjustment interface. It displays '1: Power (dBm)' with a range from 7.40 to 13.50. A text input field shows '7.40'. Below this is a numeric keypad with buttons for digits 7, 8, 9, 4, 5, 6, 1, 2, 3, and a +/- button. There are also left and right arrow buttons.	Si uno pulsa el cuadro n°3 llegará a esta interfaz, donde se podrá seleccionar una potencia de salida del láser en dBm en un rango mínimo de 7.4 [dBm] hasta un máximo de 13.5 [dBm].

4		Si uno pulsa el cuadro n°4 se encontrará con la interfaz que muestra las longitudes de onda posibles a utilizar por el dispositivo, esta consta de un rango mínimo de 1527.605 [nm] hasta un máximo de 1569.594 [nm].
5		Finalmente, el cuadro n°5 corresponde a los ajustes del dispositivo, donde al presionarlo se puede apreciar esta ventana, donde aparece la información del equipo, actualizaciones, entre otros. De esta sección el cuadro más importante corresponde al de power, ya que este permite apagar el dispositivo de manera segura.