



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA - TELECOMUNICACIONES

SISTEMA DE MONITOREO DE UNA RED ÓPTICA DE SENSORES

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JUAN ANTONIO JUÁREZ MANCERA

TUTOR:
DR. SERGIY KHOTYAINITSEV
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.
DICIEMBRE, 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado

Presidente: Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón

Secretario: Dr. Oleksandr Martynyuk

Vocal: Dr. Sergiy Khotyaintsev

1er Suplente: Dr. Naser Qureshi

2do Suplente: Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera

Tutor de tesis:

Dr. Sergiy Khotyaintsev

Firma

Agradecimientos

A mis padres, Yolanda y Pedro, por apoyarme en todo momento de mi vida para alcanzar mis metas.

A mis hermanos, Bruno y Miguel, por su apoyo moral y compañía en tiempos complicados.

A mi novia, Teresita, por su apoyo, comprensión y paciencia a lo largo de estos años.

A mi tutor, Dr. Sergiy Khotyaintsev, por otorgarme su confianza y conocimientos, además de proporcionarme todo lo necesario para realizar este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente al Posgrado de Ingeniería, por la oportunidad que se me concedió para estudiar mis estudios de maestría.

A la DGAPA – PAPIIT de la UNAM por el apoyo en forma del proyecto “Sistema de fibra óptica para monitoreo estructural de edificios históricos: *Desarrollo e implementación de un prototipo en el antiguo Templo San Agustín*”, con número de referencia IT101618.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

En memoria de mis abuelitos Socorro, Raymundo y Aurelio.

Índice general

Resumen	v
Objetivos	vi
1. Antecedentes	1
1.1. Introducción	1
1.2. Sensores de fibra óptica	2
1.3. Sensores Ópticos de Modulación de Intensidad	4
1.4. Multi-canalización	9
1.5. Sistemas de monitoreo de sensores de fibra óptica	12
1.6. Conclusiones	13
2. Análisis de parámetros del sistema de monitoreo	16
2.1. Señal piloto	17
2.2. Señal piloto TDM	19
2.3. Procedimiento para obtener los espectros de potencia	22
2.4. Análisis del espectro de potencia	24
2.4.1. Variación de los parámetros m, n y frecuencia	24
2.4.2. Efecto de la ventana de tiempo w	28
2.5. Potencia promedio de la señal TDM	31
2.5.1. Análisis y simulación del receptor	31
2.5.2. Comparación de eficiencia	35
2.6. Conclusiones	43
3. Interrogación de sensores ópticos en paralelo	44
3.1. Antecedentes	45
3.2. Configuración del transmisor en paralelo	48
3.3. Circuito transmisor óptimo	52
3.4. Conclusiones	54

4. Módulo TDM	56
4.1. Módulo TDM 2x2	56
4.2. Conclusiones	66
5. Transmisor para sistema de monitoreo con TDM	68
5.1. Caracterización experimental del ancho de banda	71
5.2. Conclusiones	73
6. Receptor	75
6.1. Amplificador de voltaje	78
6.2. Conclusiones	80
7. Sistema de monitoreo de una red óptica de sensores	82
7.1. Sistema de monitoreo 2x2	82
7.2. Conclusiones	86
8. Conclusiones generales	88

Resumen

En el presente documento se describen las vías de implementación de un sistema de monitorización de sensores de fibra óptica. En la primer parte del trabajo se hace un estudio del estado del arte de los sistemas de monitorización de sensores de fibra óptica, con un enfoque especial en los sensores de modulación de intensidad de la luz y en la multi-canalización para interrogar un gran número de fibras ópticas. A partir de lo anterior se elabora la propuesta conceptual de los bloques del sistema y se implementan, prueban y optimizan de manera individual y en conjunto, para cumplir los principales objetivos del sistema: interrogar un gran número de sensores, optimizar la potencia eléctrica de los transmisores y receptores, acondicionar las señales eléctricas de los sensores de fibra óptica para ser digitalizadas por un sistema de adquisición de datos y, finalmente, ser procesadas por una computadora. Mediante un análisis espectral de potencia y comparación de eficiencia, se logra conocer el efecto de los parámetros críticos sobre el sistema, dichos parámetros son: tipo de modulación (senoidal, cuadrada o triangular), frecuencia de modulación, tamaño de la ventana de tiempo y número de transmisores y receptores. Al analizar los efectos de cada parámetro sobre la eficiencia del sistema, se eligen los valores que permiten obtener una trama de señales sin distorsión y con la mayor eficiencia eléctrica posible. Para lograr interrogar un gran número de sensores se propone un sistema de multiplexación por división del tiempo (TDM), el cual se encarga de enviar y recibir las señales de los sensores, asigna una ranura de tiempo a cada uno y forma una trama con las señales moduladas por cada fibra óptica. De igual manera se investigan, optimizan e implementan los circuitos transmisores y receptores que permiten obtener la mayor potencia eléctrica de las señales moduladas por los sensores, lo cual permite generar una trama de señales eléctricas sin distorsión y con la posibilidad de ser procesadas y analizadas por una computadora. Con todo lo anterior se logra obtener un sistema que tiene la capacidad de monitorizar un gran número de sensores en un tiempo relativamente pequeño, con el mayor desempeño posible y de bajo costo.

Objetivos

Objetivo general

Investigar las vías de implementación óptima de un sistema electrónico de monitoreo de una red de sensores de fibra óptica

Objetivos particulares

- Elaborar la propuesta conceptual de cada uno de los bloques que componen el sistema de monitoreo de una red óptica de sensores
- Elaborar un análisis espectral de las señales eléctricas para conocer el comportamiento del sistema de monitoreo de sensores al variar sus parámetros principales
- Investigar la posibilidad de obtener la mayor potencia óptica de los transductores del bloque transmisor del sistema de monitoreo
- Proponer algunas variantes de implementación del bloque transmisor del sistema de monitoreo de sensores y comparar su funcionamiento
- Proponer algunas variantes de implementación del bloque receptor del sistema de monitoreo de sensores y comparar su funcionamiento
- Implementar y comprobar el funcionamiento del sistema de monitoreo completo

Capítulo 1

Antecedentes

1.1. Introducción

En la actualidad la fibra óptica juega un papel muy importante en el campo de las telecomunicaciones, sin embargo, la transmisión de información no es la única forma de utilizar esta tecnología, ya que también funciona como sensor y elemento de control e instrumentación. La fibra óptica utilizada como sensor puede medir distintos fenómenos físicos, tales como: campo magnético, esfuerzo, desplazamiento, temperatura, presión, presencia de químicos, entre muchos otros.

Un caso particular del uso de la fibra óptica como sensor es cuando se incorpora a los sistemas de monitorización de la salud estructural (S.H.M. por sus siglas en inglés). Las funciones principales de este tipo de sistemas son: detectar, localizar, cuantificar o medir el daño en la estructura y reportar o alertar a los usuarios; todo lo anterior con el fin de aportar información crítica para crear planes de mantenimiento, reparación, reemplazo o evacuación, en caso de ser necesario. Algunos sistemas de monitorización o vigilancia de la salud estructural utilizan a la fibra óptica como testigo de la presencia de grietas o ruptura de las estructuras que se supervisan.

En el presente trabajo se analizan e investigan las vías de implementación de un sistema de monitorización de un arreglo de sensores de fibras ópticas, el cual sea capaz interrogar o vigilar un gran número de hilos de fibra óptica; además de ser económico, confiable y que pueda ser utilizado en pruebas de campo.

1.2. Sensores de fibra óptica

Los sensores de fibra óptica utilizados en los sistemas de monitoreo convierten un parámetro físico, por ejemplo: temperatura, campo magnético y desplazamiento, en una señal óptica de salida; es decir, funcionan como transductores, convirtiendo la energía asociada a dichos parámetros físicos en otra forma de energía [1]. Los sensores de fibra óptica necesitan cuatro elementos básicos: fuente de luz, hilo de fibra óptica, detector y procesador de señal [2]. El esquema básico de un sensor de fibra óptica se muestra en la Figura 1.1. La fuente de luz proporciona la señal luminosa de prueba, que es modificada en alguna de sus propiedades (amplitud, longitud de onda, fase, etc.) en relación al fenómeno físico medido. La fibra óptica funciona como transductor entre la energía luminosa y el fenómeno observado. El detector captura la señal de luz modificada y la transforma, principalmente, en una señal eléctrica susceptible de ser procesada por un sistema electrónico (procesador de señal).

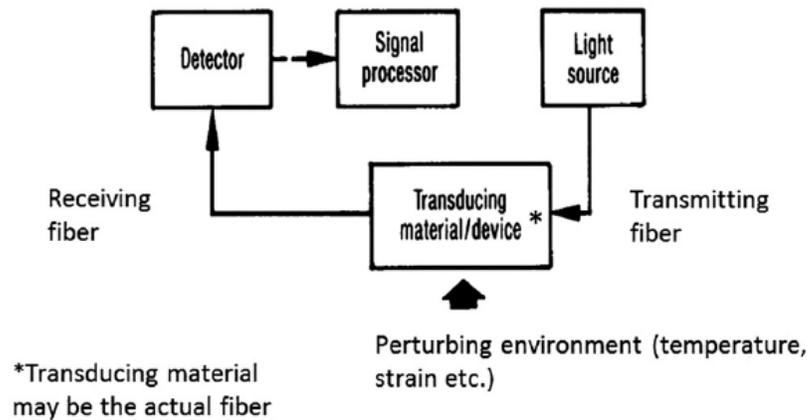


Figura 1.1: Elementos básicos que componen un sensor de fibra óptica [3].

Los sensores de fibra óptica se pueden clasificar en extrínsecos e intrínsecos. En el caso de los sensores extrínsecos, la fibra óptica sirve como mecanismo de entrega de la señal luminosa a un transductor externo, el cual se encarga de modular el haz de luz de acuerdo al parámetro físico medido. La señal que entrega es recolectada por la misma fibra (o un hilo diferente) que guía la señal modulada a un detector [2]. En los sensores intrínsecos, la fibra óptica transporta y modula la señal óptica

[1]. La Figura 1.2 muestra un esquema de las clasificaciones mencionadas anteriormente.

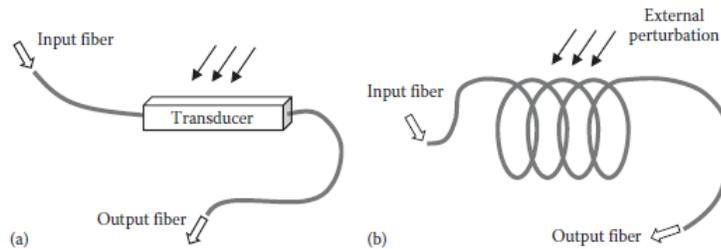


Figura 1.2: Una de las clasificaciones de los sensores de fibra óptica: a) Extrínsecos (la modulación se hace fuera de la fibra) y b) Intrínsecos (la fibra funciona como modulador) [1].

Por otro lado, los sensores de fibra óptica se pueden clasificar de acuerdo al parámetro de la luz que es modificado, lo cual da como resultado cuatro principales categorías:

- Sensores de modulación de intensidad. La detección se hace vigilando los cambios en potencia de la luz.
- Sensores de modulación de fase. En este caso se detecta la fase del haz de luz.
- Sensores de modulación de polarización. En estos sensores se observa el cambio en las propiedades de la polarización de la luz.
- Sensores de modulación por longitud de onda. Estos sensores usan los cambios en la longitud de onda para hacer la detección.

Para efectos de este proyecto de maestría se utiliza la fibra óptica como sensor intrínseco de intensidad, debido a que son de fabricación sencilla y los dispositivos que se utilizan para detectar y procesar la señal modulada no son muy complejos; todo lo anterior hace que los sistemas que utilizan este tipo de sensores sean relativamente económicos y simples [1][2][4].

1.3. Sensores Ópticos de Modulación de Intensidad

En este esquema de modulación, los cambios en la intensidad de luz son provocados al exponer la fibra óptica (directa o indirectamente) a factores como doblado, desplazamiento, vibración, temperatura, presión, aceleración, etc. Una aplicación de este tipo de sensores se desarrolla en la Universidad Airlangga, Indonesia. Yhuwana-Apsari utilizan un sensor de desplazamiento, el cual consiste en un transmisor de fibra óptica rodeada de una sonda de recepción de fibras ópticas, la fuente de luz es un láser de He-Ne y la detección se hace mediante un foto-diodo [5].

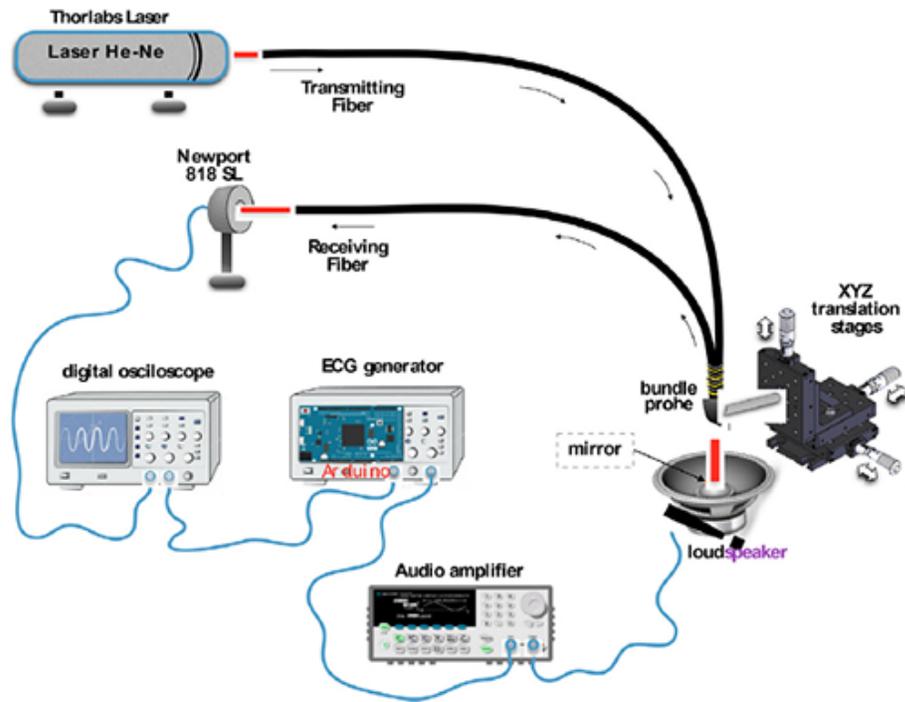


Figura 1.3: Esquema de la instalación experimental del sensor de fibra óptica para la detección del ritmo cardíaco [5].

Como se observa en la Figura 1.3, mediante un altavoz se genera una señal artificial de electro-cardiograma (ECG) y al interior de la bocina se coloca una superficie reflectiva. Al iluminar la fibra central con el láser de He-Ne, el haz de luz se refleja por la superficie y entra por las distintas fibras que rodean la sonda. Debido a que la señal de ECG modifica la posición vertical de la superficie reflectiva, se presentan modificaciones

en la amplitud de la señal recibida en el foto-diodo y, por lo tanto, en la señal de voltaje que se observa en el osciloscopio. En la gráfica de la Figura 1.4 se presenta el rango dinámico del sensor, en ella se puede comprobar que existe una relación estrecha entre el desplazamiento vertical y la intensidad del haz de luz recibida por el sensor óptico.

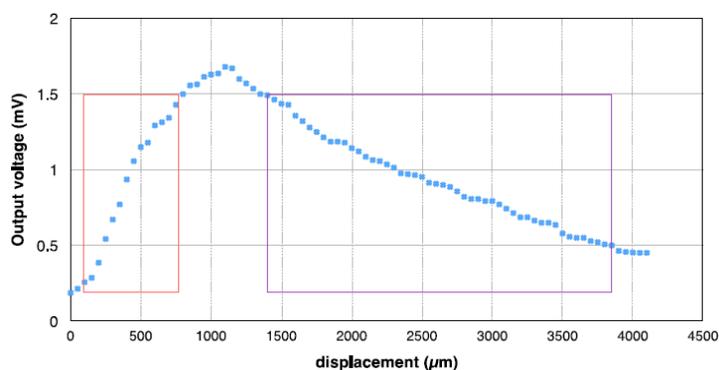


Figura 1.4: Variación del voltaje de salida debido al desplazamiento axial del altavoz [5].

Dong y Tam proponen un sensor basado en la modulación de intensidad de una señal de radio frecuencia para medir temperatura, para lo cual utilizan una fuente de emisión espontánea amplificada (ASE), la cual se conecta a un modulador electro-óptico (EOM) y en conjunto funcionan como fuente de luz. La señal de luz se envía al primer puerto del circulador, el cual posteriormente recibe por su segundo puerto dos longitudes de onda provenientes de dos fibras con rejillas de Bragg (FBG), una de ellas funciona como referencia y la otra como sensor de temperatura [6]. La señal resultante es enviada del tercer puerto del circulador a una fibra óptica mono-modo y posteriormente recibida por un foto-receptor (Figura 1.5). La señal obtenida se observa con un analizador de espectro de radio frecuencia. La amplitud de la señal de radio frecuencia, que se genera a través de las dos longitudes de onda reflejadas por las FBG, cambia debido a la diferencia de fase ocasionada por la exposición a variaciones de temperatura de una de las FBG.

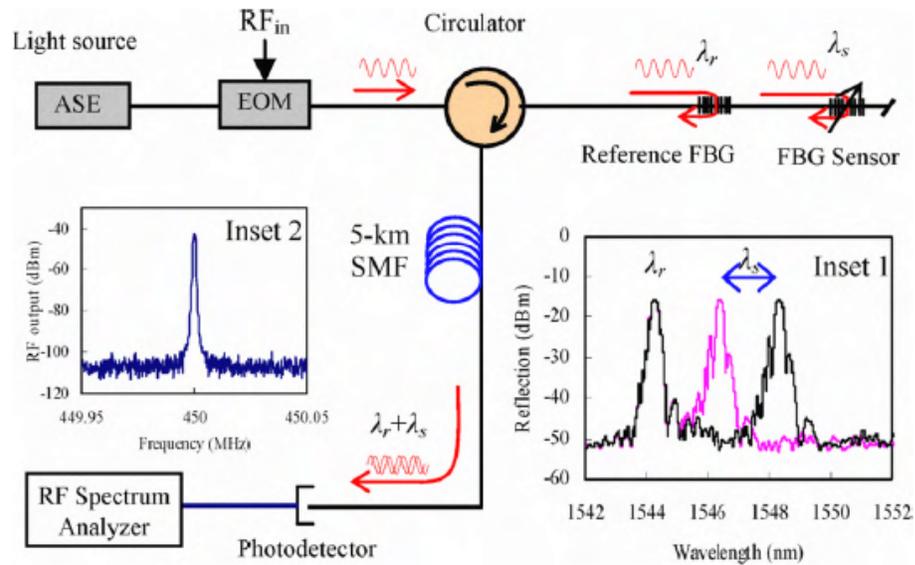


Figura 1.5: Diagrama esquemático propuesto del sistema de sensores de FBG [6].

Otra aplicación de sensores de fibra óptica con modulación de intensidad, se esquematiza en la Figura 1.6; el objetivo de este sistema es medir voltajes alrededor de los $100V_{pico}$ utilizando el principio de reflexión y un sistema piezo-eléctrico. Como se observa en el diagrama, se aplica un voltaje de entrada V_{in} en serie con el capacitor C_s y el sistema piezo-eléctrico. Debido a la diferencia de potencial, el sistema piezo-eléctrico provoca que superficie reflectiva se desplace (Figura 1.6a), esto altera la intensidad de la señal de luz que es transmitida y recibida por la sonda mediante las fibras receptoras. Es importante observar que este caso se utiliza como fuente de luz un diodo emisor de luz (LED) [7].

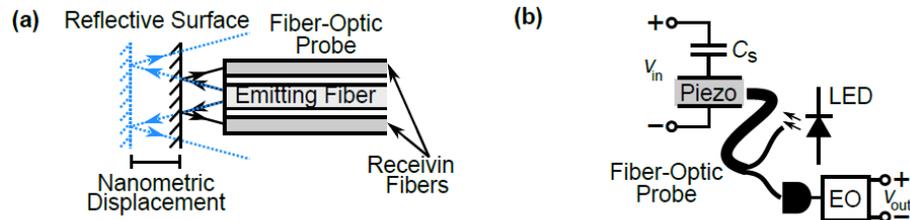


Figura 1.6: Configuración del sensor del voltaje propuesto. a) Principio de operación del sensor óptico. b) Diagrama del sistema.

El micro-doblado es otro concepto que aplica para utilizar la fibra óptica como sensor. Si una fibra es doblada, debido a la exposición directa al fenómeno físico de interés o mediante un transductor, pequeñas cantidades del haz de luz que se transmite se pierden a través de las paredes de la misma fibra; se observa entonces que hay una relación entre los cambios en la intensidad de la luz y el parámetro que es medido [8]. En la Figura 1.7a se muestra un ejemplo de este tipo de sensores, se observa que el transductor presiona la fibra óptica ocasionando en ella varios dobleces, esto provoca una disminución de la intensidad de la luz en proporción al desplazamiento de las paredes del transductor, Figura 1.7b.

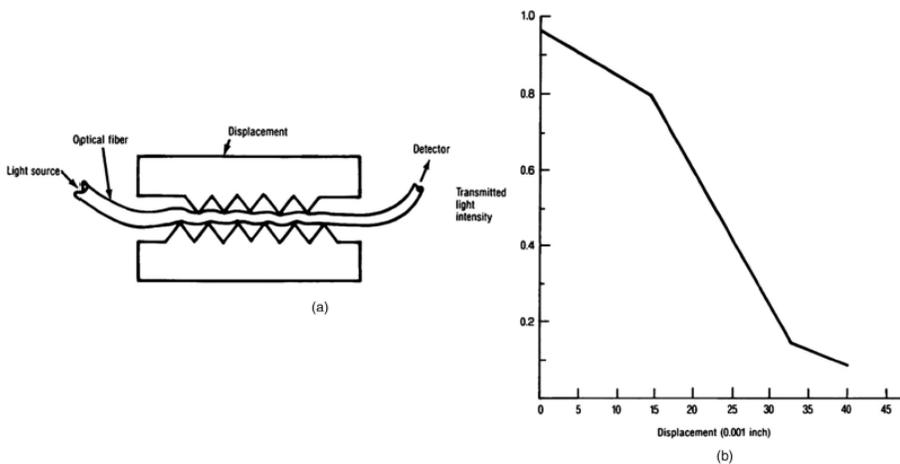


Figura 1.7: Sensor de micro-doblado [8]. a) Esquema básico del sensor. b) Intensidad de luz contra el desplazamiento provocado por un transductor.

Lin *et al.* proponen una estructura aplicando el micro doblado, la cual fue hecha con una pieza pequeña de fibra sin núcleo (NCF) acoplada entre dos fibras mono-modo. Por un lado se conecta una fuente de luz de banda ancha a una fibra mono-modo y se aplica un doblado en ambos lados de la NCF, el cual produce un fenómeno llamado interferencia multimodal, mediante el cual se modifica la propagación de las longitudes de onda que viajan de una fibra a otra [9]. (Figura 1.8).

Mediante un analizador de espectro óptico (OSA) se observa el comportamiento de la señal de luz cuando se desplaza la plataforma sobre el eje +z (Figura 1.9). Dicho movimiento axial produce distintas curvaturas sobre la NCF, provocando que se transmitan algunas longitudes de onda con mayor o menor intensidad, este comportamiento se puede observar

en la gráfica de la Figura 1.10.

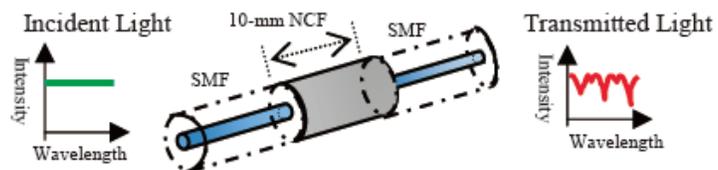


Figura 1.8: Diagrama esquemático de la estructura principal del sensor de micro-doblado [9].

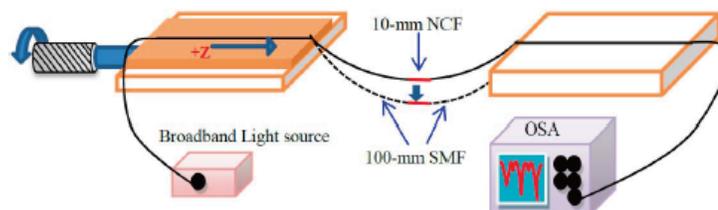


Figura 1.9: Esquema del sistema del sensor de micro-doblado [9].

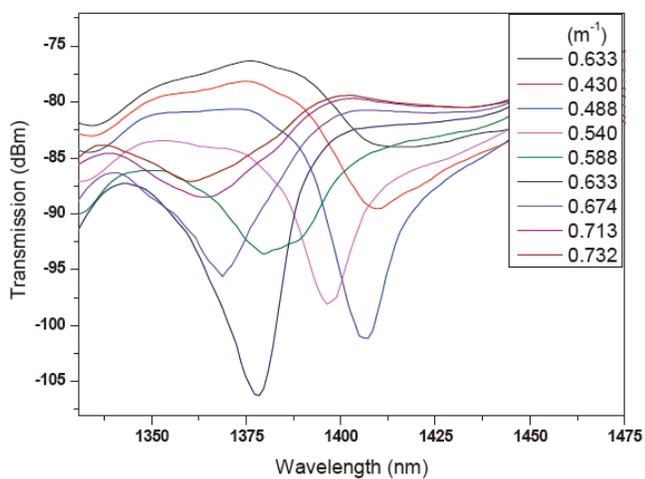


Figura 1.10: Gráfica de intensidad de luz contra longitud de onda para distintas curvaturas [9].

1.4. Multi-canalización

En el caso de los sistemas con sensores ópticos, puede ser importante vigilar o interrogar un gran número de sensores, motivo por el cual se recurre a técnicas de multiplexado o multi-canalización. Multiplexar es enviar la información que genera más de una fuente, a través de un solo medio de transmisión, a más de un destino [10]. En los sistemas de sensores ópticos, multi-canalizar permite usar una misma fibra óptica para supervisar un parámetro físico en varios puntos de interés o interrogar al mismo tiempo varios sensores de fibra óptica.

Una de las técnicas más sencillas es la monitorización en paralelo. En este esquema, la interrogación de las fibras se hace de manera individual; es decir, cada fibra es un sensor óptico individual y genera su propia señal de luz modulada. En dicha técnica se propone un sistema compuesto por un cabezal sensitivo, fuente de luz, circulador de fibra óptica y foto-detector. En este caso se interrogan hasta 8 hilos de fibra óptica, cada una de ellas se conecta a una entrada del sistema de procesamiento de señales láser, el cual a su vez envía las señales eléctricas correspondientes a una tarjeta de adquisición de datos [11] (Figura 1.11).

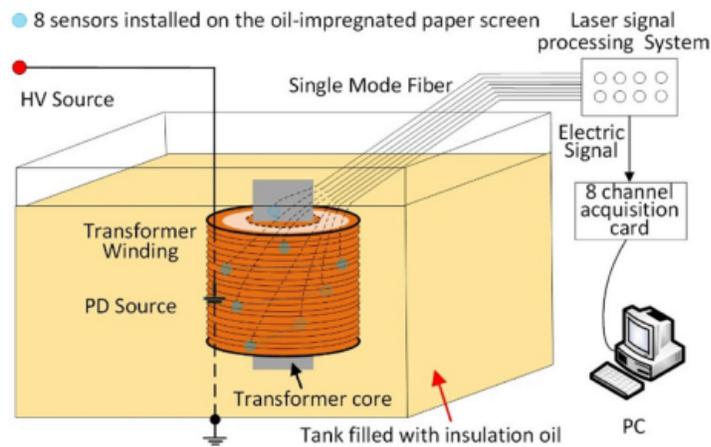


Figura 1.11: Diagrama esquemático de la instalación experimental [11].

En un sistema de interrogación de 12 fibras ópticas, cada una de las fibras se conecta a una entrada de un dispositivo de carga acoplada (CCD), el cual se encarga de recibir las señales de luz, las cuales se analizan mediante un método de procesamiento de imágenes (Figura 1.12). Este

sistema de sensores ópticos se utiliza para medir la salinidad del agua, para lo cual se compara la intensidad de luz proveniente de las 12 fibras [12].

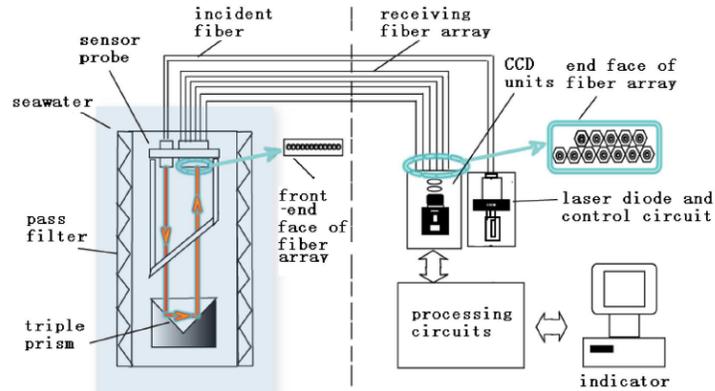


Figura 1.12: Diagrama esquemático del sistema de medición de salinidad [12].

La multi-canalización también se puede llevar a cabo mediante el uso de fibras ópticas con rejillas de Bragg y el multiplexado por división de la longitud de onda. El principio es el siguiente: sobre el núcleo de la fibra óptica se graba una sección de líneas transversales con la finalidad de cambiar el índice de refracción, esta variación provoca que las longitudes de onda asociadas al grabado sean reflejadas y enviadas de vuelta por la fibra óptica. Como se observa en la Figura 1.13, se pueden grabar múltiples rejillas de Bragg sobre una sola fibra para monitorizar múltiples puntos de interés y cada uno tiene asociado su propia longitud de onda. La detección de las longitudes de onda típicamente se hace mediante un analizador óptico de espectro (OSA).

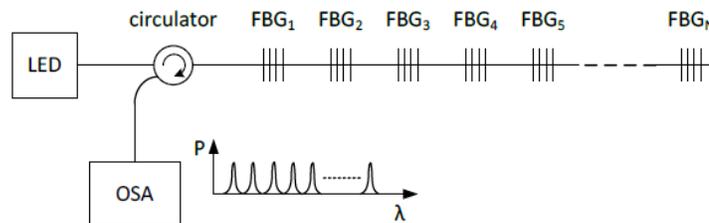


Figura 1.13: Diagrama esquemático de la multiplexación por división de la longitud de onda utilizando rejillas de Bragg [13].

Fajkus *et al.* proponen un sistema de monitoreo que utiliza rejillas de Bragg y un switch óptico, dicho sistema aumenta de manera considerable los puntos de interés que son medidos. En el esquema de la Figura 1.14 se presenta el sistema de multi-canalización diseñado; como se observa, el switch óptico envía de manera controlada y secuencial la señal de luz a las distintas fibras ópticas con rejillas de Bragg, las longitudes de onda reflejadas por las rejillas regresan al switch y entran por el circulator, el cual las envía al OSA para ser procesadas y analizadas [13].

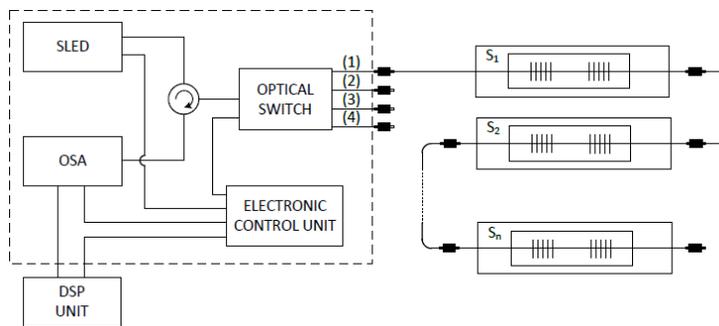


Figura 1.14: Esquema del sistema de multi-canalización con rejillas de Bragg y un switch óptico [13].

El mismo esquema de multi-canalización se emplea en el trabajo realizado por Sun *et al.*, a pesar de que se utiliza una fuente de luz distinta y tanto el acoplamiento al switch como el detector son diferentes, el principio de funcionamiento es similar [14]. (Figura 1.15).

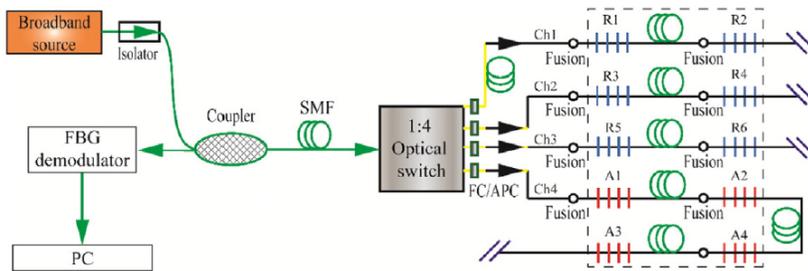


Figura 1.15: Diagrama esquemático simplificado del sistema de sensores con multi-canalización de fibras con rejillas de Bragg [14].

1.5. Sistemas de monitoreo de sensores de fibra óptica

Existen sistemas de interrogación de sensores de fibra óptica en los cuales se utilizan sensores ópticos de modulación de intensidad y multi-canalización secuencial. González-Tinoco *et al.* y Mirrón-Carrasco *et al.* proponen un sistema para la monitorización de daño estructural el cual utiliza sensores de fibra óptica. Dicho sistema se compone de 16 transmisores y 16 receptores ópticos, los cuales son activados de manera secuencial mediante un circuito que utiliza compuertas lógicas. Los transmisores y receptores se encargan de enviar y recibir las señales producidas por los sensores de fibra óptica. Las fibras ópticas son embebidas en bloques de concreto o en estructuras de mampostería, a las cuales se aplica una fuerza transversal, con la finalidad de provocar fracturas en las estructuras y en las fibras ópticas. De esta manera, se estudia la relación entre la aparición de grietas y la disminución en la intensidad de la luz que pasa a través de las fibras ópticas [15][16].

1.6. Conclusiones

Como puede observarse, en la mayoría de los trabajos presentados se utilizan fuentes de luz comerciales y esto mismo ocurre para la detección de la luz proveniente de las fibras ópticas, incluso se utilizan otro tipo de dispositivos ópticos, como lo son circuladores, moduladores electro-ópticos o sistemas piezo-eléctricos.

De igual manera, los sistemas de multi-canalización descritos anteriormente pueden llegar a ser muy costosos, ya que requieren de componentes muy especializados, por ejemplo: fibras con rejillas de Bragg, analizador de rejillas de Bragg, switch óptico, analizador de espectro óptico, etc.

En cuanto a los sistemas de interrogación de sensores de fibra óptica, se observa que no se optimiza la potencia eléctrica del sistema, ya que la corriente de la señal piloto sobre el transmisor es relativamente pequeña; además, dado que el sistema es secuencial, se tiene una capacidad máxima de 16 canales, lo cual limita el número de sensores que se pueden interrogar.

Para este trabajo se propone un sistema que utiliza a la fibra óptica como sensor de modulación de intensidad, para aplicaciones en las cuales se requiera un interrogar un gran número de sensores. Por ejemplo, para monitorizar la salud estructural de las construcciones, se desea colocar un sensor por cada punto clave de la construcción, cuando la fibra es expuesta al esfuerzo mecánico (estiramiento, dobleces o ruptura), la intensidad de la señal de luz que pasa a través de esta se modifica, permitiendo conocer si existe algún daño en la estructura.

Para lograr lo anterior, se desarrolla toda la electrónica del sistema, desde la fuente de luz, modulación y optimización de la misma, hasta los módulos de multi-canalización y recepción de la señal de luz modulada, para lo cual se utilizan fuentes de luz baratas, como lo son los LEDs ultra-luminosos, así como foto-receptores, micro-controladores, multiplexores y transistores de bajo costo.

Para aprovechar todos los circuitos transmisores y receptores y aumentar el número de sensores interrogados, se propone un módulo de multi-canalización TDM con elementos electrónicos relativamente económicos.

Referencias

- [1] G. Rajan, *OpticalFiberSensor. Advanced Techinques and Application*, First Edition, Florida: CRC Press, 2017.
- [2] D. Krohn, T. MacDougall, A. Mendez, *Fiber optic sensors. Fundamentals and applications*, Fourth Edition, Washington: SPIE PRESS, 2014.
- [3] R. S. Mellberg, “Fiber Optic Sensor” SRI International, *Research Report*, no. 684, 1983.
- [4] T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge, G. H. Sigel, J. H. Cole, S. C. Rashleigh, and R. G. Priest, “Fiber Optic Sensor Technology”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-30, no. 4, April 1982.
- [5] Y. G. Yhuwana, and R. Apsari, “Fiber Optic Sensor for a Heart Rate Detection”, *Elsevier*, vol. 134, pp. 28-32, 2017.
- [6] X. Dong and H. Tam, “A Novel Temperature-Compensated, Intensity-Modulated Fiber Bragg Grating Sensor System”, in 1st Asia-Pacific Optical Fiber Sensor Conference, 1-4 August 2008.
- [7] J. M. Lukens, N. Lagakos, V. Kaybulkin, C. J. Vizas, and D. J. King (January 2020), “Intensity-Modulated Fiber-Optic Voltaje Sensor for Power Distribution Systems”, Online, Available:<http://arxiv.org/abs/2001.05412>.
- [8] D. A. Krohn. *Fiber optic sensors. Fundamentals and applications*. Third Edition. ISA. Research Triangle Park. NC. 2000.
- [9] G. Lin, L. Huang, J. He, H. Chang, M. Fu, W. Liu and R. Kashyap, “Fiber-optic Micro-bending Sensor Using the Multimode Interference”, in 18th OptoElectronics and Communications Conference held

- jointly with 2013 International Conference on Photonics in Switching, 2013.
- [10] W. Tomasi, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, Cuarta Edición, México: Pearson Educación, 2003, pp. 708.
- [11] C. Gao, L. Yu, Y. Xu, W. Wang, S. Wang, and P. Wang, “Partial Discharge Localization Inside Transformer Windings via Fiber-Optic Acoustic Sensor Array”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 4, August 2019.
- [12] Y. Zhao, X. Zhang, T. Zhao, B. Yuan, and S. Zhang, “Optical Salinity Sensor System Based on Fiber-Optic Array”, *IEE sensors Journal*, vol. 9, no. 9, September 2009.
- [13] M. Fajkus, J. Nedoma, R. Martinek, V. Vasinek, H. Nazeran, and P. Siska, “A Non-Invasive Multichannel Hybrid Fiber-Optic Sensor System for Vital Sign Monitoring”, *MDPI Journal, Sensors*, vol. 111, 2017.
- [14] Y. Sun, Q. Li, D. Yang, C. Fan, and A. Sun, “Investigation of the Dynamic Strain Responses of Sandstone Using Multichannel Fiber-Optic Sensor Arrays”, *ELSEVIER*, vol. 213, 2016.
- [15] J. M. González-Tinoco, *Redes de fibra óptica de monitoreo de salud de estructuras*. Tesis de doctorado, F. I. UNAM, 2018.
- [16] S. J. Mirrón-Carrasco, *Arreglo de sensores basados en fibra óptica para el monitoreo de daño estructural*. Tesis de maestría, F. I. UNAM, 2017.

Capítulo 2

Análisis de parámetros del sistema de monitoreo

El objetivo principal de esta etapa del proyecto es encontrar y analizar los parámetros fundamentales del sistema de monitoreo de una red óptica de sensores, mostrado en forma genérica en la Figura 2.1, con el fin de seleccionar los valores apropiados de cada uno y garantizar el funcionamiento óptimo del sistema, tales como: la frecuencia y la forma de onda de la señal piloto proveniente del generador de funciones, la duración de la ventana de tiempo (w) asignada a cada sensor del sistema y el número de transmisores (m) y el número de receptores (n).

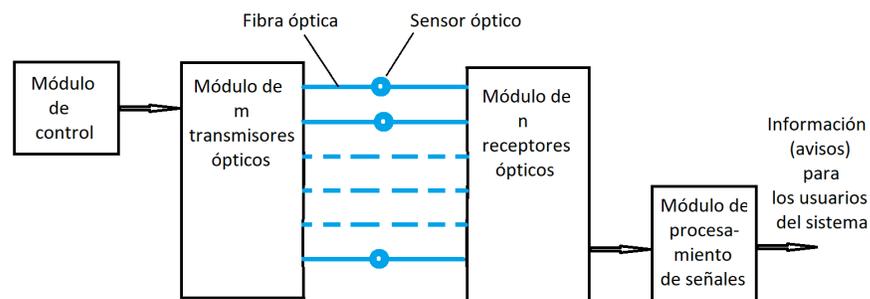


Figura 2.1: Diagrama de bloques de un sistema genérico de monitoreo de sensores ópticos tipo amplitud.

Mediante MatLab se simula la señal piloto que se genera en el sistema para sensores de fibra óptica y se prueba con distintos valores de m , n y w para obtener el efecto que producen en el espectro de potencia y la potencia promedio de la señal.

2.1. Señal piloto

El primer paso es generar la señal de prueba o señal piloto que se obtiene del generador de funciones (Figura 2.2) y que posteriormente pasa al sistema TDM para ser repartida a todos los transmisores.

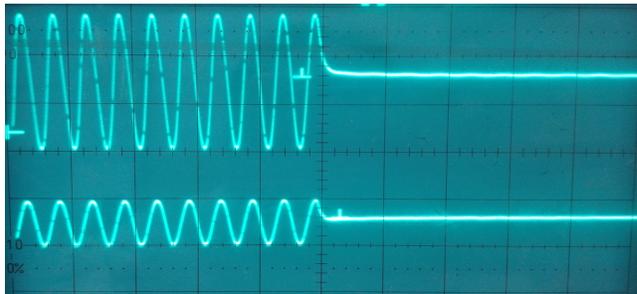


Figura 2.2: Señal eléctrica piloto obtenida del sistema TDM.

Los parámetros que se consideran en este punto son: forma de onda, frecuencia y amplitud; para efectos de esta simulación se hacen los cálculos utilizando tres formas de onda de voltaje: senoidal, cuadrada y triangular. En esta parte del código se nombran todas variables generales y se les asigna su valor, ya que los cálculos siguientes se hacen a partir de ellas. El código es el siguiente:

```
fo=5000;% Frecuencia de la señal de prueba
Xrms=0.7071/2;% Valor eficaz de la señal de prueba
wndw=1;% Tiempo de la ventana (ms)
m=1;% Transmisores
n=1;% Receptores
fs=2^20;% Frecuencia de muestreo (introducir en Hz) 2^20 valor para
fft de Matlab
Xp=Xrms/0.7071;% Valor pico de la señal de prueba
ts=1/fs;% Tiempo de muestreo
```

```

w=wndw*1e-3;% Ventana de tiempo en milisegundos
tt=w*(m*n);% Tiempo total de la trama
time=0:ts:tt;% Vector de tiempo
% Señal SENOIDAL
sin = (Xp.*sin(2*pi*fo*t));
% Señal CUADRADA
squ = (Xp.*square(2*pi*fo*t));
% Señal TRIANGULAR
sawt = (Xp.*sawtooth(2*pi*fo*t,0.5));

```

En esta sección del programa se incluyen los valores de m , n y w , ya que son importantes para determinar la duración total de la trama TDM que se calcula en el siguiente paso; también se declaran los parámetros de frecuencia, amplitud y forma de onda. A continuación se muestran las imágenes de las tres señales de prueba obtenidas para un tiempo de 1ms. Mediante estas imágenes se puede comprobar que las formas de onda se generan de manera correcta.



Figura 2.3: Señal senoidal.



Figura 2.4: Señal cuadrada.

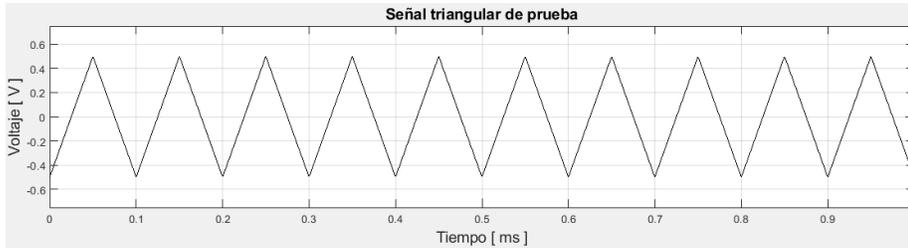


Figura 2.5: Señal triangular.

2.2. Señal piloto TDM

En una trama TDM completa existen $m \cdot n$ ranuras de tiempo con duración w y cada una es asociada con la señal de una fibra óptica, por lo tanto, la señal de un solo sensor se repite cada $m \cdot n \cdot w$ segundos. La señal TDM que se simula (Figura 2.2), tiene una duración de tiempo t_T que depende del valor de w (ventana de tiempo) y del número de transmisores y receptores; es decir, t_T es el periodo de la señal TDM de cada sensor y su valor es:

$$t_T = m \cdot n \cdot w [\text{segundos}]$$

Donde:

t_T : periodo de una señal TDM o tiempo total de una trama TDM

m : número de transmisores

n : número de receptores

w : ventana de tiempo para cada sensor

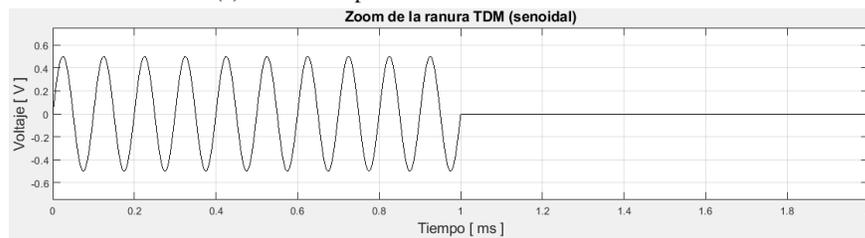
El código para generar la señal correspondiente es el siguiente:

```
% Representación de la trama TDM como una función F(t)
% Escalón con duración de w de la ventana de tiempo
% Señal SENOIDAL de prueba con duración de (mxn)*(w)
SinTDM=@(t)((t<=w).*(1)+((t<=t)&(t>w)).*0).*(Xp.*sin(2.*pi.*fo.*t));
% Señal CUADRADA de prueba con duración de (mxn)*(w)
SquTDM=@(t)((t<=w).*(1)+((t<=t)&(t>w)).*0).*(Xp.*square(2.*pi.*fo.*t));
% Señal TRIANGULAR de prueba con duración de (mxn)*(w)
SawTDM=@(t)((t<=w).*(1)+((t<=t)&(t>w)).*0).*(Xp.*sawtooth(2.*pi.*fo.*t,0.5));
```

Los resultados presentados a continuación se obtienen al simular una de las $m \cdot n$ señales obtenidas del sistema TDM y para esto se utilizan las tres modulaciones presentadas con anterioridad. Cada una de las imágenes representa la señal completa en el tiempo, por ejemplo, para $m=16$, $n=16$ y $w=1\text{ms}$, el tiempo total que dura la señal TDM es de 256ms. Además, también se presenta un zoom de las señales en el tiempo, con la finalidad de comprobar que la señal se genera de manera correcta en cada caso.



(a) Trama completa de una de las señales TDM.

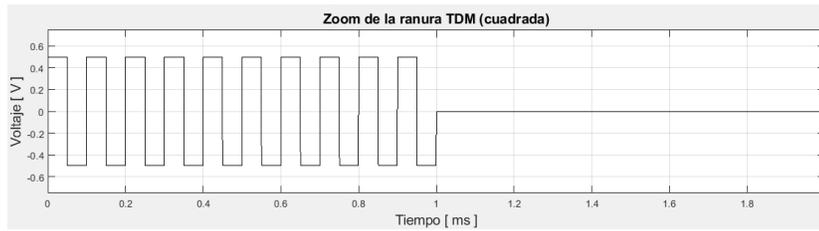


(b) Zoom a la ventana de tiempo de 1ms.

Figura 2.6: Señal TDM con modulación senoidal con frecuencia de 10kHz y amplitud de $1V_{pp}$. La ventana de tiempo es de 1ms, con 16 transmisores y 16 receptores.



(a) Trama completa de una de las señales TDM.

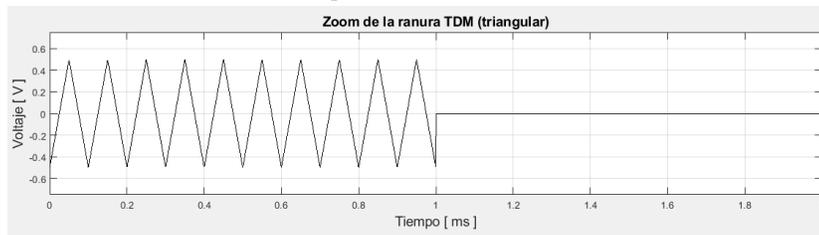


(b) Zoom a la ventana de tiempo de 1ms.

Figura 2.7: Señal TDM con modulación cuadrada con frecuencia de 10kHz y amplitud de 1V_{pp}. La ventana de tiempo es de 1ms, con 16 transmisores y 16 receptores.



(a) Trama completa de una de las señales TDM.



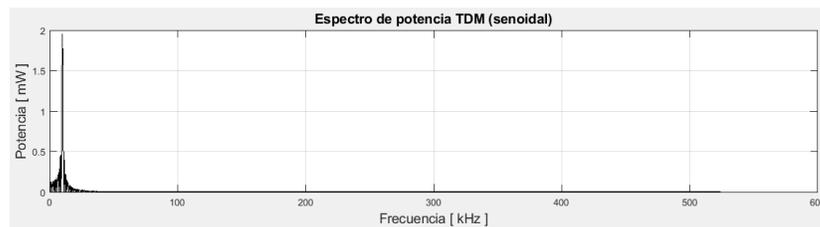
(b) Zoom a la ventana de tiempo de 1ms.

Figura 2.8: Señal TDM con modulación triangular con frecuencia de 10kHz y amplitud de 1V_{pp}. La ventana de tiempo es de 1ms, con 16 transmisores y 16 receptores.

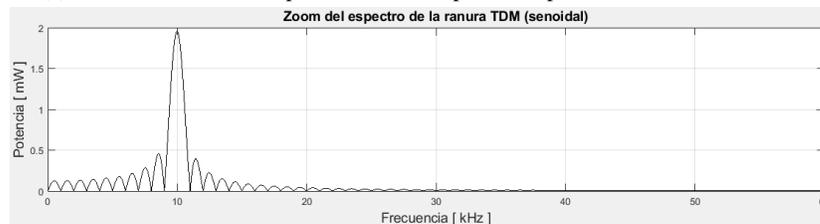
2.3. Procedimiento para obtener los espectros de potencia

En esta sección se presentan los resultados que se obtienen al calcular el espectro de potencia de la señal piloto TDM con cada tipo de modulación. En la primer parte de cada diagrama se presenta un amplio barrido en frecuencia y en la segunda un zoom del espectro, lo cual permite conocer más detalles del lóbulo principal, ya que en este se concentra la mayor parte de la energía de la señal. Dado que la señal TDM de cada sensor es periódica, se utiliza la transformada rápida de Fourier para la gráfica del espectro de potencia. A continuación se presenta el código de MatLab que permite generar el espectro de potencia de la señal TDM.

```
Ysin=fft(Sin);  
Lsin=length(Sin);  
P2sin=abs(Ysin/Lsin);  
P1sin=P2sin(1:Lsin/2+1);  
P1sin(2:end-1)=2*P1sin(2:end-1);  
fsin=fs*(0:(Lsin/2))/Lsin;
```

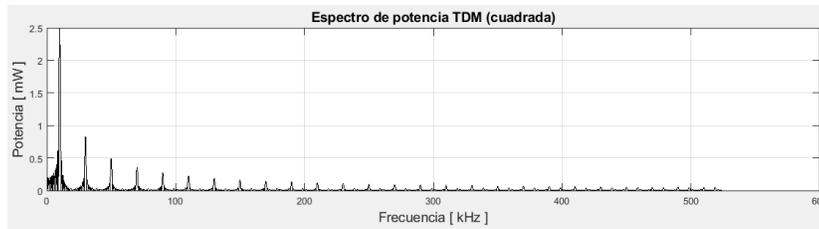


(a) Barrido en frecuencia para obtener el espectro de potencia de la señal TDM.

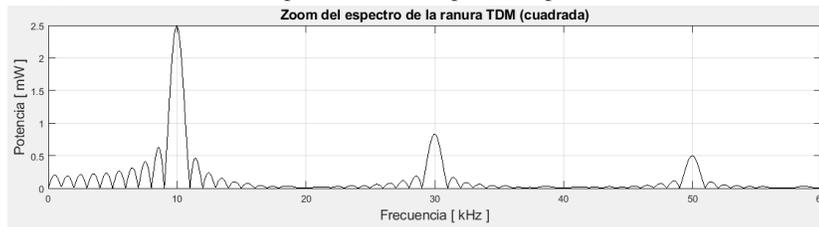


(b) Zoom a los lóbulos principales del espectro de potencia de la señal TDM.

Figura 2.9: Espectro de potencia de una señal TDM con modulación senoidal con frecuencia de 10kHz y amplitud de $1V_{pp}$. La ventana de tiempo es de 1ms, con 16 transmisores y 16 receptores.

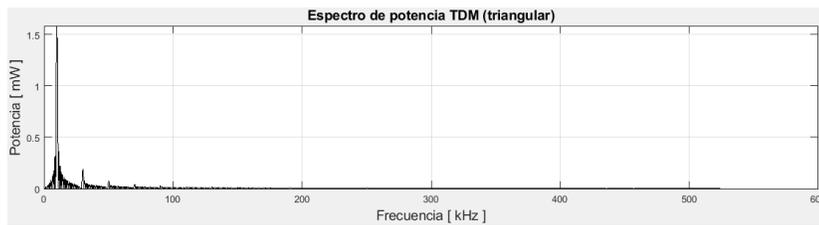


(a) Barrido en frecuencia para obtener el espectro de potencia de la señal TDM.

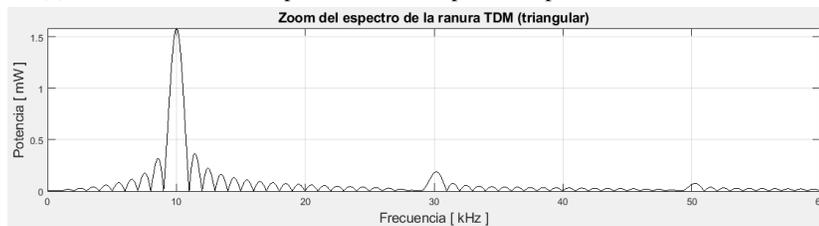


(b) Zoom a los lóbulos principales del espectro de potencia de la señal TDM.

Figura 2.10: Espectro de potencia de una señal TDM con modulación cuadrada con frecuencia de 10kHz y amplitud de $1V_{PP}$. La ventana de tiempo es de 1ms, con 16 transmisores y 16 receptores.



(a) Barrido en frecuencia para obtener el espectro de potencia de la señal TDM.



(b) Zoom a los lóbulos principales del espectro de potencia de la señal TDM.

Figura 2.11: Espectro de potencia de una señal TDM con modulación triangular con frecuencia de 10kHz y amplitud de $1V_{PP}$. La ventana de tiempo es de 1ms, con 16 transmisores y 16 receptores.

2.4. Análisis del espectro de potencia

En las secciones anteriores se comprueba que el programa en MatLab funciona de manera correcta, ya que se generan de manera adecuada las señales de prueba, las señales TDM moduladas y el espectro de potencia en cada uno de los casos. Dicho programa permite modificar los parámetros principales del sistema: forma de onda, frecuencia y amplitud de la señal de prueba, número de transmisores (m), número de receptores (n) y duración de la ventana de tiempo (w); con lo anterior se pueden analizar los efectos que producen en el espectro de potencia los cambios de los parámetros del sistema. En esta sección se presentan y comparan los espectros de potencia obtenidos al modificar los parámetros antes mencionados.

2.4.1. Variación de los parámetros m , n y frecuencia

En primer lugar, se presentan en un sólo gráfico los lóbulos principales de los espectros de potencia de cada una de las tres formas de onda y se modifican los parámetros m y n , los cuales corresponden al número de transmisores y al número de receptores del sistema TDM. Es importante tener en cuenta que la frecuencia de la señal de modulación es de 10kHz, con una amplitud de $1V_{PP}$ y que la ventana de tiempo es de 1ms. Las Figuras 2.12, 2.13, 2.14 y 2.15 muestran dichos resultados.

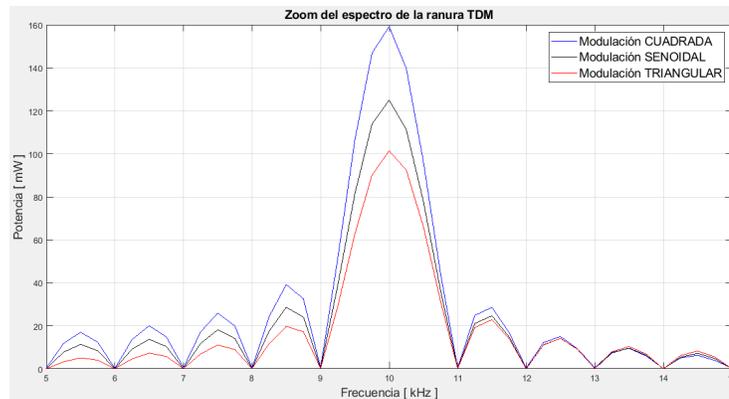


Figura 2.12: Lóbulo principal del espectro de potencia de las tres señales TDM con modulación cuadrada (color azul), senoidal (color negro) y triangular (color rojo), frecuencia de 10kHz y $1V_{PP}$ de amplitud. La ventana de tiempo es $w=1ms$, con $m=2$ transmisores y $n=2$ receptores.

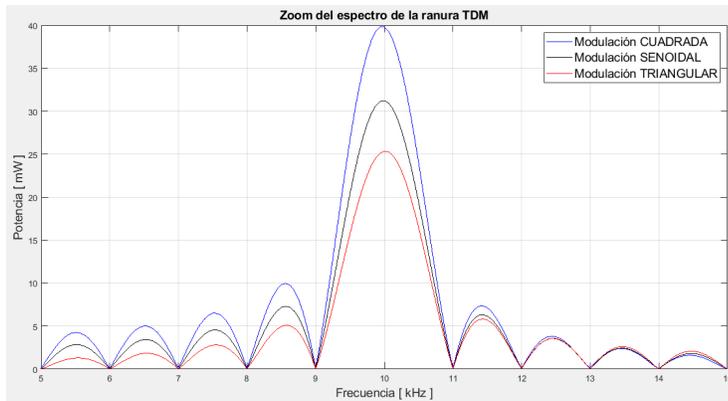


Figura 2.13: Lóbulo principal del espectro de potencia de las tres señales TDM con modulación cuadrada (color azul), senoidal (color negro) y triangular (color rojo), frecuencia de 10kHz y 1V_{PP} de amplitud. La ventana de tiempo es w=1ms, con m=4 transmisores y n=4 receptores.

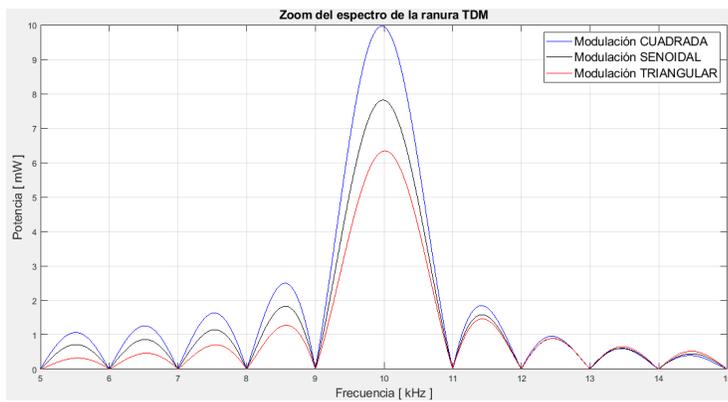


Figura 2.14: Lóbulo principal del espectro de potencia de las tres señales TDM con modulación cuadrada (color azul), senoidal (color negro) y triangular (color rojo), frecuencia de 10kHz y 1V_{PP} de amplitud. La ventana de tiempo es w=1ms, con m=8 transmisores y n=8 receptores.

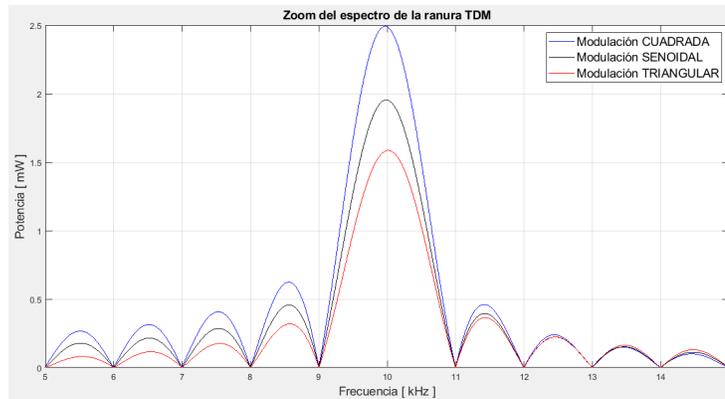


Figura 2.15: Lóbulo principal del espectro de potencia de las tres señales TDM con modulación cuadrada (color azul), senoidal (color negro) y triangular (color rojo), frecuencia de 10kHz y $1V_{PP}$ de amplitud. La ventana de tiempo es $w=1\text{ms}$, con $m=16$ transmisores y $n=16$ receptores.

Como puede observarse, al aumentar el número de transmisores (m) y el número de receptores (n), la energía concentrada en el lóbulo principal de cada tipo de modulación disminuye.

A continuación se modifica la frecuencia de las señales de prueba a 5kHz, manteniendo la amplitud de $1V_{PP}$ y se obtienen los espectros variando $m=n=2, 4, 8$ y 16. En las Figuras 2.16, 2.17, 2.18 y 2.19 se muestran los resultados.

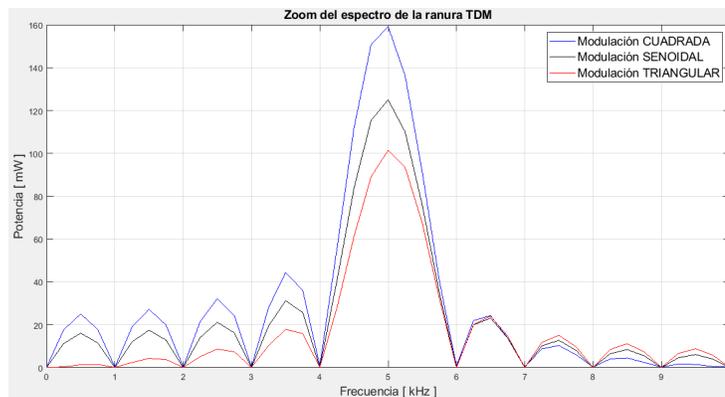


Figura 2.16: Lóbulo principal del espectro de potencia de las tres señales TDM con modulación cuadrada (color azul), senoidal (color negro) y triangular (color rojo), frecuencia de 5kHz y $1V_{PP}$ de amplitud. La ventana de tiempo es $w=1\text{ms}$, con $m=2$ transmisores y $n=2$ receptores.

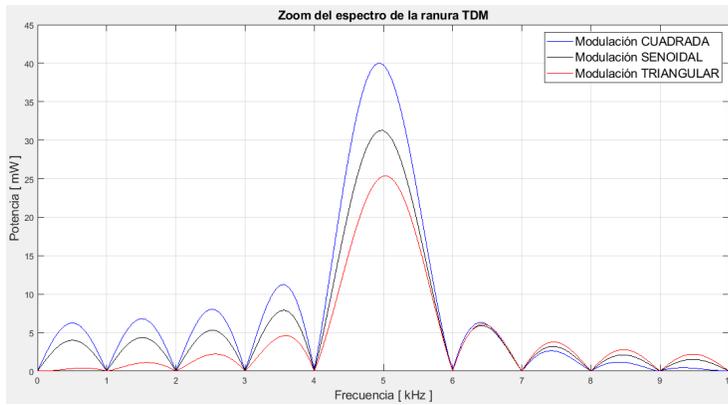


Figura 2.17: Lóbulo principal del espectro de potencia de las tres señales TDM con modulación cuadrada (color azul), senoidal (color negro) y triangular (color rojo), frecuencia de 5kHz y $1V_{PP}$ de amplitud. La ventana de tiempo es $w=1ms$, con $m=4$ transmisores y $n=4$ receptores.

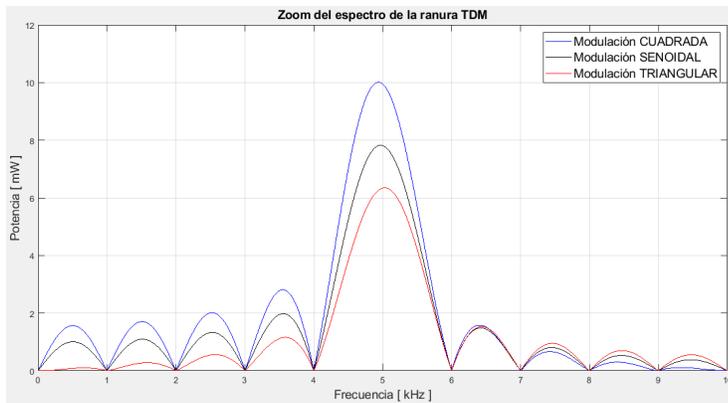


Figura 2.18: Lóbulo principal del espectro de potencia de las tres señales TDM con modulación cuadrada (color azul), senoidal (color negro) y triangular (color rojo), frecuencia de 5kHz y $1V_{PP}$ de amplitud. La ventana de tiempo es $w=1ms$, con $m=8$ transmisores y $n=8$ receptores.

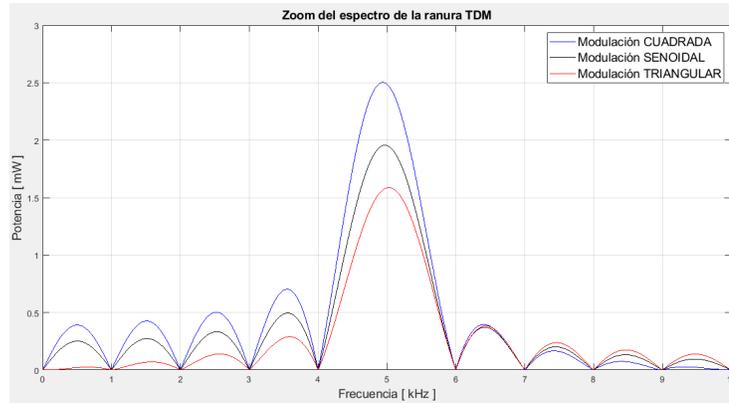


Figura 2.19: Lóbulo principal del espectro de potencia de las tres señales TDM con modulación cuadrada (color azul), senoidal (color negro) y triangular (color rojo), frecuencia de 5kHz y $1V_{PP}$ de amplitud. La ventana de tiempo es $w=1ms$, con $m=16$ transmisores y $n=16$ receptores.

Al comparar los resultados, se observa que la energía máxima del lóbulo principal es casi idéntica para las frecuencias de 10kHz y 5kHz para cada par de m y n . Por otro lado, se observa que el ancho de banda de cada lóbulo se conserva para las frecuencias de 10kHz y 5kHz.

2.4.2. Efecto de la ventana de tiempo w

En esta sección se incluyen los resultados derivados de variar la ventana de tiempo w cuando el número de transmisores y receptores es fijo. Para ello se utiliza una frecuencia de 10kHz, amplitud de $1V_{PP}$ y las tres formas de onda disponibles para la señal moduladora. Para esta simulación se asigna a w los valores: 1ms, 2ms, 3ms y 4ms. Por ejemplo, para una ventana de $w=4ms$ y $m=n=16$, el sistema interroga la señal TDM cada 1.024s. En las Figuras 2.20, 2.21, 2.22 y 2.23 se muestran los resultados.

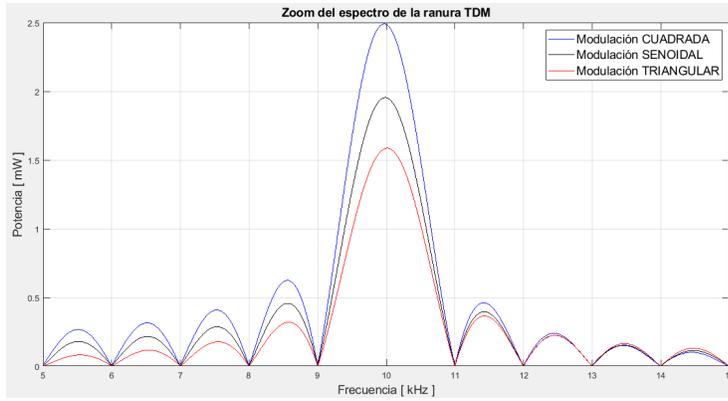


Figura 2.20: Lóbulo principal del espectro de potencia de las tres señales TDM con modulación cuadrada (color azul), senoidal (color negro) y triangular (color rojo), frecuencia de 10kHz y $1V_{pp}$ de amplitud. La ventana de tiempo es $w=1ms$, con $m=16$ transmisores y $n=16$ receptores.

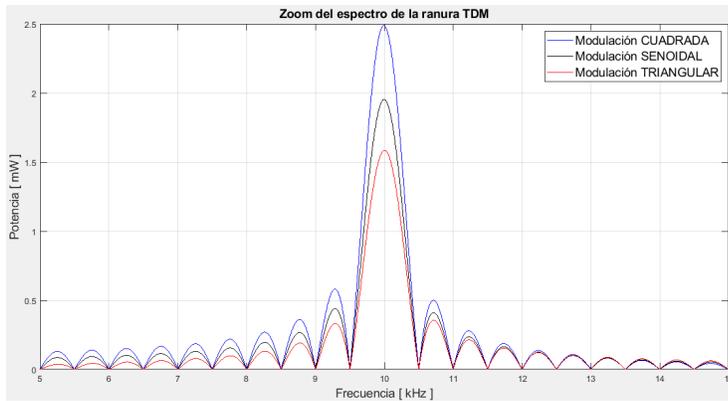


Figura 2.21: Lóbulo principal del espectro de potencia de las tres señales TDM con modulación cuadrada (color azul), senoidal (color negro) y triangular (color rojo), frecuencia de 10kHz y $1V_{pp}$ de amplitud. La ventana de tiempo es $w=2ms$, con $m=16$ transmisores y $n=16$ receptores.

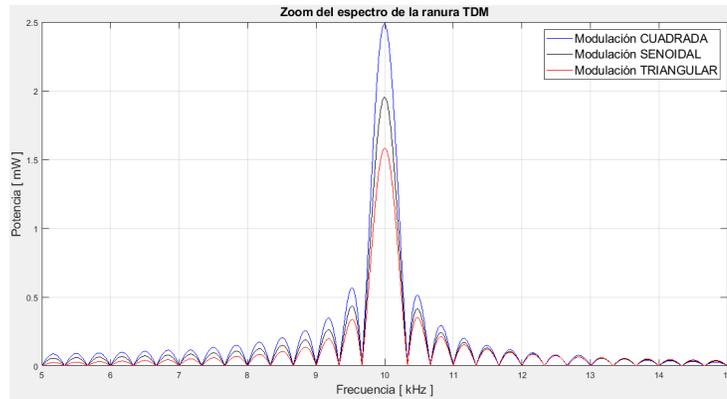


Figura 2.22: Lóbulo principal del espectro de potencia de las tres señales TDM con modulación cuadrada (color azul), senoidal (color negro) y triangular (color rojo), frecuencia de 10kHz y $1V_{pp}$ de amplitud. La ventana de tiempo es $w=3\text{ms}$, con $m=16$ transmisores y $n=16$ receptores.

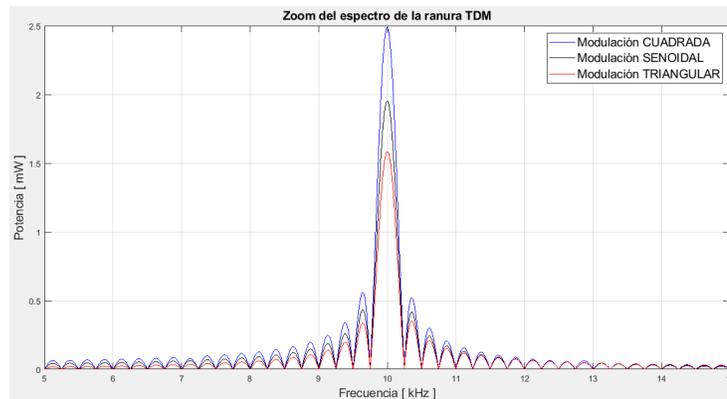


Figura 2.23: Lóbulo principal del espectro de potencia de las tres señales TDM con modulación cuadrada (color azul), senoidal (color negro) y triangular (color rojo), frecuencia de 10kHz y $1V_{pp}$ de amplitud. La ventana de tiempo es $w=4\text{ms}$, con $m=16$ transmisores y $n=16$ receptores.

Al analizar las imágenes anteriores se observa que cuando la ventana de tiempo aumenta el ancho de banda del lóbulo principal se estrecha, además se observa que la potencia máxima se conserva casi idéntica en cada caso.

2.5. Potencia promedio de la señal TDM

En esta sección se calcula la potencia promedio de la señal TDM para las tres formas de onda, distintos números de transmisores y receptores y distintas duraciones de la ventana de tiempo w . En paralelo, se calcula el porcentaje de energía que se pierde al simular el efecto del receptor sobre la señal TDM. Para ello, el receptor se simula como un filtro pasa bajas con distintas frecuencias de corte.

2.5.1. Análisis y simulación del receptor

Para obtener la eficiencia relativa del receptor al utilizar distintas formas de onda y parámetros, se considera al foto-detector PDA36A de Thorlabs, el cual permite elegir entre ocho ganancias distintas: 0dB, 10dB, 20dB, 30dB, 40dB, 50dB, 60dB y 70dB. Cada ganancia tiene su propio ancho de banda: 10MHz, 5.5MHz, 1MHz, 260KHz, 150KHz, 45KHz, 11KHz y 5KHz, respectivamente. Es importante mencionar que se utilizan las funciones de filtrado digital de MatLab para simular el efecto del receptor sobre las señales TDM. Para comprobar el funcionamiento del programa se comparan las señales TDM y sus respectivos espectros antes y después de filtrar, para esto se utilizan las tres formas de onda a una frecuencia de 5kHz (senoidal, cuadrada y trinagular), 16 transmisores, 16 receptores, una ventana de tiempo de 1ms y una frecuencia de corte de 6kHz para el filtro pasa bajas.

El primer paso del código de MatLab es generar la función para señal TDM y posteriormente evaluarla con el vector de tiempo que corresponde a t_T . Una vez generada la señal TDM, se aplica la función *lowpass* para crear un filtro pasa bajas. Mediante el parámetro *fcorte*, se ajusta la frecuencia de corte del filtro, para simular el efecto del receptor sobre la señal TDM. A continuación se muestra el código:

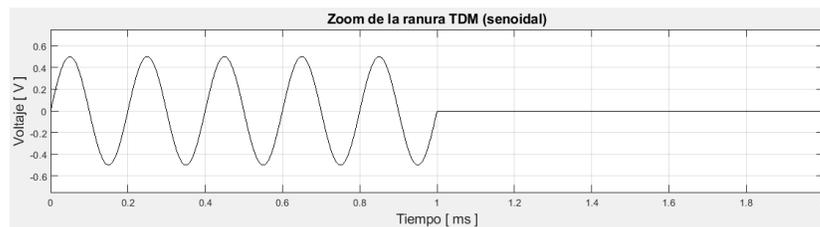
```
% Señal SENOIDAL de prueba con duración de (mxn)*(w)
SinTDM=@(t)((t<=w).*(1)+((t<=t)&(t>w)).*0).*(Xp.*sin(2.*pi.*fo.*t));
% Función que evalúa F(t) en el período T=time de una señal TDM
Sin=SinTDM(time);
% Filtrado: RR=lowpass(señal,fcorte,fmuestreo...calidad del filtro)
Sin_f=lowpass(Sin,5000,fs,'ImpulseResponse','iir','Steepness',0.95);
% Señal CUADRADA de prueba con duración de (mxn)*(w)
```

```

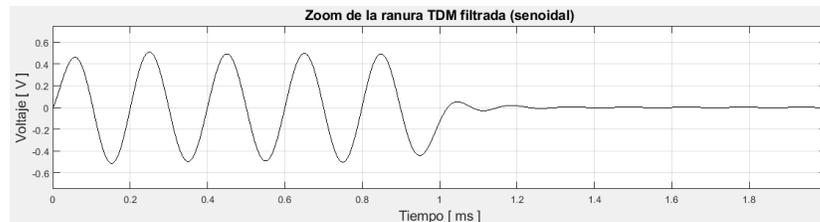
SquTDM=@(t)(((t<=w).*(1)+((t<=tt)&(t>w)).*0).*(Xp.*square(2.*pi.*fo.*t)));
% Función que evalúa F(t) en el período T=time de una señal TDM
Squ=SquTDM(time);
% Filtrado: RR=lowpass(señal,fcorte,fmuestreo...calidad del filtro)
Squ_f=lowpass(Squ,5000,fs,'ImpulseResponse','iir','Steepness',0.95);
% Señal TRIANGULAR de prueba con duración de (mxn)*(w)
SawTDM=@(t)(((t<=w).*(1)+((t<=tt)&(t>w)).*0).*(Xp.*sawtooth(2.*pi.*fo.*t,0.5)));
% Función que evalúa F(t) en el período T=time de una señal TDM
Saw=SawTDM(time);
% Filtrado: RR=lowpass(señal,fcorte,fmuestreo...calidad del filtro)
Saw_f=lowpass(Saw,5000,fs,'ImpulseResponse','iir','Steepness',0.95);

```

Para comprobar el funcionamiento del código se genera la gráfica de la señal TDM y el espectro antes y después del filtrado. A continuación se muestran los gráficos que permiten hacer la comparaciones correspondientes al filtrado.

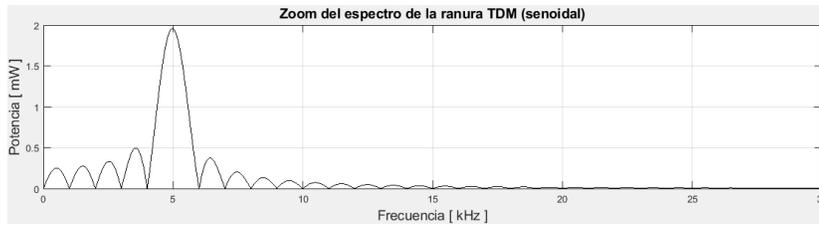


(a) Señal TDM sin filtrar (modulación senoidal).

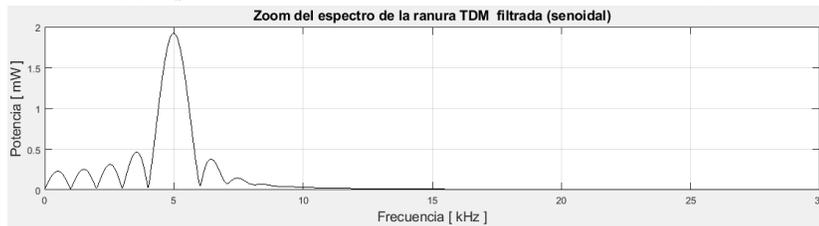


(b) Señal TDM filtrada (modulación senoidal).

Figura 2.24: Comparación de las señales TDM con modulación senoidal, 5kHz, $m=n=16$ y $w=1$ ms. Antes 2.24a y después 2.24b de usar un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 6kHz.

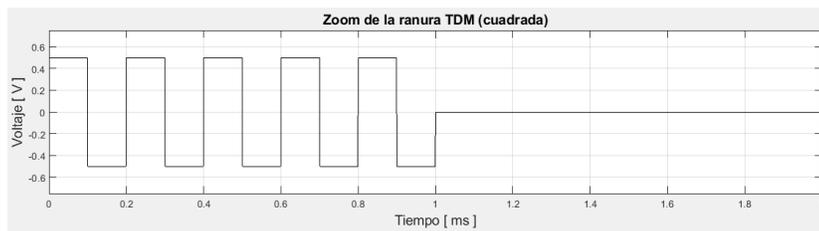


(a) Espectro de la señal TDM sin filtrar (modulación senoidal).



(b) Espectro de la señal TDM filtrada (modulación senoidal).

Figura 2.25: Comparación de los espectros de las señales TDM con modulación senoidal, 5kHz, $m=n=16$ y $w=1$ ms. Antes 2.25a y después 2.25b de usar un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 6kHz.

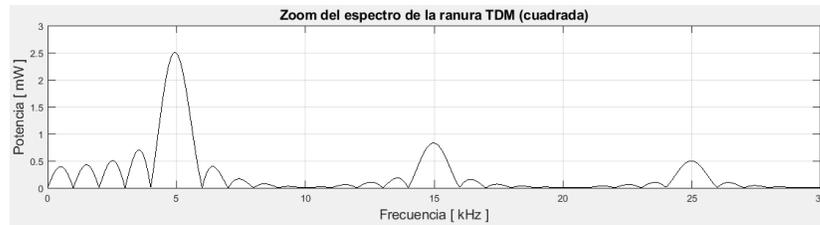


(a) Señal TDM sin filtrar (modulación cuadrada).

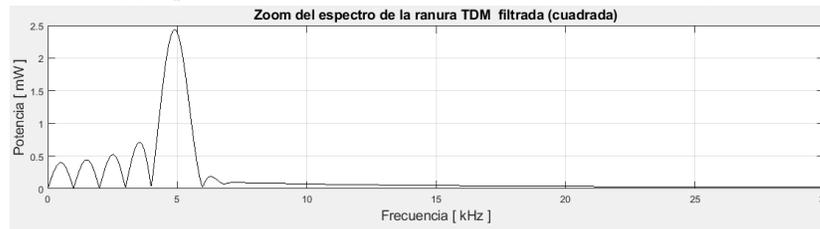


(b) Señal TDM filtrada (modulación cuadrada).

Figura 2.26: Comparación de las señales TDM con modulación cuadrada, 5kHz, $m=n=16$ y $w=1$ ms. Antes 2.26a y después 2.26b de usar un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 6kHz.

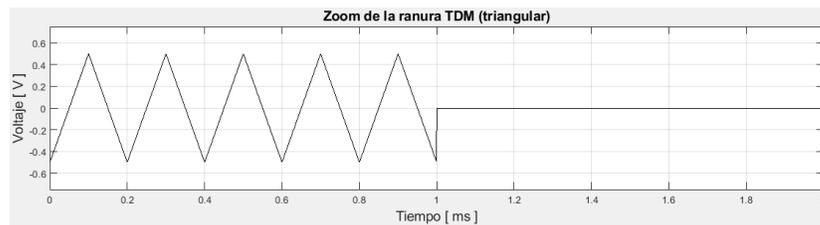


(a) Espectro de la señal TDM sin filtrar (modulación cuadrada).

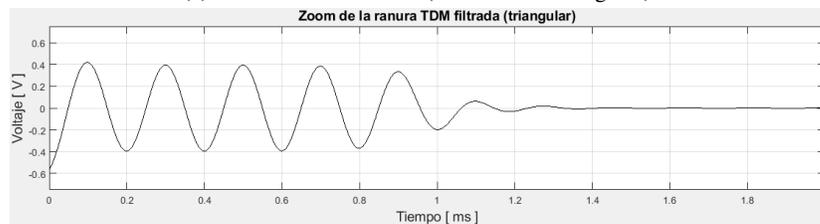


(b) Espectro de la señal TDM filtrada (modulación cuadrada).

Figura 2.27: Comparación de los espectros de las señales TDM con modulación cuadrada, 5kHz, $m=n=16$ y $w=1$ ms. Antes 2.25a y después 2.25b de usar un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 6kHz.

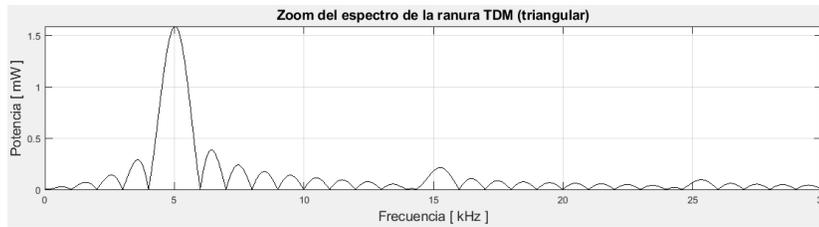


(a) Señal TDM sin filtrar (modulación triangular).

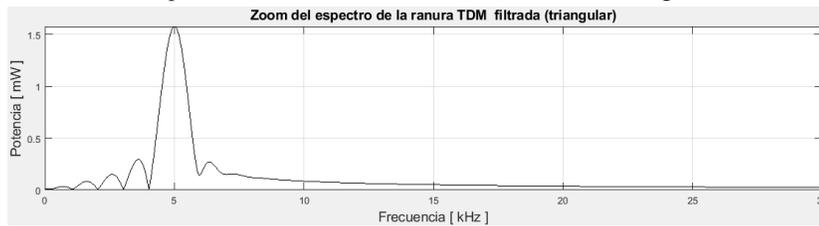


(b) Señal TDM filtrada (modulación triangular).

Figura 2.28: Comparación de las señales TDM con modulación triangular, 5kHz, $m=n=16$ y $w=1$ ms. Antes 2.28a y después 2.28b de usar un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 6kHz.



(a) Espectro de la señal TDM sin filtrar (modulación triangular).



(b) Espectro de la señal TDM filtrada (modulación triangular).

Figura 2.29: Comparación de los espectros de las señales TDM con modulación triangular, 5kHz, $m=n=16$ y $w=1$ ms. Antes 2.29a y después 2.29b de usar un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 6kHz.

Como se observa en las Figuras 2.24, 2.26 y 2.28, las señales TDM se distorsionan al perder componentes de frecuencia por efecto del filtro digital aplicado. Al analizar los espectros de las Figuras 2.25, 2.27 y 2.29, se observa que los componentes de frecuencia mayores a la frecuencia de corte de 6kHz se eliminan al pasar por el filtro pasa bajas. Con la evidencia anterior se comprueba que las simulaciones funcionan de manera correcta.

2.5.2. Comparación de eficiencia

Para calcular la potencia promedio de cada señal antes y después del filtrado se utiliza el programa de MatLab diseñado anteriormente. Con dichos cálculos se crea una tabla comparativa, la cual permite conocer cuantitativamente la relación entre m , n , w y la potencia promedio de la señal TDM, con lo anterior se crea un amplio panorama acerca de los valores que son convenientes para el sistema.

Dado que la señal TDM de cada sensor es periódica, la potencia promedio se calcula con la expresión matemática:

$$P = \frac{1}{t_T} \int_0^{t_T} |f(t)|^2 \cdot dt \quad (2.1)$$

Donde:

P = Potencia promedio
 t_T = Periodo de la señal
f(t) = Señal TDM

El periodo de la señal TDM depende del número de transmisores m, número receptores n y de la duración de la ventana w. Por lo tanto:

$$t_T = m * n * w \quad (2.2)$$

Para calcular la integral de la ecuación (2.1) se utiliza el concepto de sumatorias de Riemann. En este caso la altura de los rectángulos depende del valor de la señal TDM para cada valor del vector de tiempo (llamado *time* en la parte del código donde se establecen los parámetros) y la base *dt* corresponde al valor del tiempo de muestreo (llamado *ts* en la parte del código donde se establecen los parámetros). En este caso *ts* es menor a $1\mu s$ y el resultado de este cálculo es una buena aproximación de la potencia promedio de la señal TDM. Dado lo anterior, la integral se sustituye con la ecuación:

$$P = \frac{1}{t_T} \sum_{time=0}^{t_T} f(time)^2 \cdot ts \quad (2.3)$$

El código para realizar el cálculo de la potencia promedio antes y después del filtrado, así como la energía perdida debido al receptor es el siguiente:

```
% Cálculo de le energía por sumas de Reeman  
E_nof=((sum(Sin.^2).*ts)/tt)*1000  
% Cálculo de le energía por sumas de Reeman (FILTRADO)  
E_fil=((sum(Sin_f.^2).*ts)/tt)*1000  
% Cálculo de la energía perdida debido al receptor  
E_loss=100-(E_fil*100)/E_nof
```

En las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3 se muestran los resultados de los cálculos de la potencia promedio de las señales TDM antes y después de pasar por el receptor, simulando el foto-receptor de Thorlabs. Se asigna un ancho de banda de 0Hz a 5kHz, el cual corresponde a una ganancia de 70dB del PDA36A. La señal de modulación tiene una frecuencia de 5kHz y

amplitud de $1V_{PP}$; además, se utilizan cuatro valores para la ventana de tiempo w (1ms, 2ms, 3ms y 4ms) y cuatro valores para el número de transmisores y receptores (2, 4, 8 y 16). Para comparar los resultados, se hace el cálculo de la potencia perdida debido al filtrado.

Valores de m y n	Valor de la ventana w	Potencia sin filtrado	Potencia con filtrado	Potencia perdida
2	1 ms	31.25 mW	27.10 mW	13.28 %
4	1 ms	7.81 mW	6.77 mW	13.28 %
8	1 ms	1.95 mW	1.69 mW	13.28 %
16	1 ms	0.49 mW	0.42 mW	13.28 %
2	2 ms	31.25 mW	28.47 mW	8.89 %
4	2 ms	7.81 mW	7.12 mW	8.89 %
8	2 ms	1.95 mW	1.78 mW	8.89 %
16	2 ms	0.49 mW	0.44 mW	8,89 %
2	3 ms	31.25 mW	28.93 mW	7.42 %
4	3 ms	7.81 mW	7.23 mW	7.42 %
8	3 ms	1.95 mW	1.80 mW	7.42 %
16	3 ms	0.49 mW	0.45 mW	7.42 %
2	4 ms	31.25 mW	29.16 mW	6.69 %
4	4 ms	7.81 mW	7.28 mW	6.69 %
8	4 ms	1.95 mW	1.82 mW	6.69 %
16	4 ms	0.49 mW	0.46 mW	6.69 %

Tabla 2.1: Tabla de potencia promedio de la señal TDM con modulación senoidal de 5kHz y receptor de Thorlabs con frecuencia de corte de 5kHz y ganancia de 70dB.

Valores de m y n	Valor de la ventana w	Potencia sin filtrado	Potencia con filtrado	Potencia perdida
2	1 ms	62.53 mW	46.98 mW	24.84 %
4	1 ms	15.63 mW	11.75 mW	24.84 %
8	1 ms	3.91 mW	2.94 mW	24.84 %
16	1 ms	0.98 mW	0.73 mW	24.84 %
2	2 ms	62.53 mW	47.82 mW	23.68 %
4	2 ms	15.63 mW	11.93 mW	23.68 %
8	2 ms	3.91 mW	2.98 mW	23.68 %
16	2 ms	0.98 mW	0.75 mW	23.68 %
2	3 ms	62.51 mW	47.92 mW	23.34 %
4	3 ms	15.63 mW	11.98 mW	23.34 %
8	3 ms	3.91 mW	3.00 mW	23.34 %
16	3 ms	0.98 mW	0.75 mW	23.34 %
2	4 ms	62.51 mW	48.05 mW	23.14 %
4	4 ms	15.63 mW	12.01 mW	23.14 %
8	4 ms	3.91 mW	3.00 mW	23.14 %
16	4 ms	0.98 mW	0.75 mW	23.14 %

Tabla 2.2: Tabla de potencia promedio de la señal TDM con modulación cuadrada de 5kHz y receptor de Thorlabs con frecuencia de corte de 5kHz y ganancia de 70dB.

Valores de m y n	Valor de la ventana w	Potencia sin filtrado	Potencia con filtrado	Potencia perdida
2	1 ms	20.86 mW	19.13 mW	8.29 %
4	1 ms	5.21 mW	4.78 mW	8.29 %
8	1 ms	1.30 mW	1.20 mW	8.29 %
16	1 ms	0.33 mW	0.30 mW	8.29 %
2	2 ms	20.86 mW	19.38 mW	7.09 %
4	2 ms	5.21 mW	4.84 mW	7.09 %
8	2 ms	1.30 mW	1.21 mW	7.09 %
16	2 ms	0.33 mW	0.30 mW	7.09 %
2	3 ms	20.84 mW	19.45 mW	6.68 %
4	3 ms	5.21 mW	4.86 mW	6.68 %
8	3 ms	1.30 mW	1.22 mW	6.68 %
16	3 ms	0.33 mW	0.30 mW	6.68 %
2	4 ms	20.84 mW	19.49 mW	6.49 %
4	4 ms	5.21 mW	4.87 mW	6.49 %
8	4 ms	1.30 mW	1.22 mW	6.49 %
16	4 ms	0.33 mW	0.30 mW	6.49 %

Tabla 2.3: Tabla de potencia promedio de la señal TDM con modulación triangular de 5kHz y receptor de Thorlabs con frecuencia de corte de 5kHz y ganancia de 70dB.

En las Tablas 2.4, 2.5 y 2.6 se muestran los resultados de los cálculos de la potencia promedio de las señales TDM, en esta ocasión se asigna un ancho de banda de 0Hz a 11kHz, el cual corresponde a una ganancia de 60dB del PDA36A. La señal de modulación cambia a una frecuencia de 10kHz.

Valores de m y n	Valor de la ventana w	Potencia sin filtrado	Potencia con filtrado	Potencia perdida
2	1 ms	31.25 mW	30.10 mW	1.51 %
4	1 ms	7.81 mW	7.69 mW	1.51 %
8	1 ms	1.95 mW	1.92 mW	1.51 %
16	1 ms	0.49 mW	0.48 mW	1.51 %
2	2 ms	31.25 mW	30.99 mW	0.83 %
4	2 ms	7.81 mW	7.75 mW	0.83 %
8	2 ms	1.95 mW	1.94 mW	0.83 %
16	2 ms	0.49 mW	0.48 mW	0.83 %
2	3 ms	31.25 mW	31.06 mW	0.61 %
4	3 ms	7.81 mW	7.76 mW	0.61 %
8	3 ms	1.95 mW	1.94 mW	0.61 %
16	3 ms	0.49 mW	0.48 mW	0.61 %
2	4 ms	31.25 mW	31.10 mW	0.50 %
4	4 ms	7.81 mW	7.77 mW	0.50 %
8	4 ms	1.95 mW	1.94 mW	0.50 %
16	4 ms	0.49 mW	0.48 mW	0.50 %

Tabla 2.4: Tabla de potencia promedio de la señal TDM con modulación senoidal de 10kHz y receptor de Thorlabs con frecuencia de corte de 11kHz y ganancia de 60dB.

Valores de m y n	Valor de la ventana w	Potencia sin filtrado	Potencia con filtrado	Potencia perdida
2	1 ms	62.53 mW	50.31 mW	19.53 %
4	1 ms	15.63 mW	12.57 mW	19.53 %
8	1 ms	3.91 mW	3.14 mW	19.53 %
16	1 ms	0.98 mW	0.78 mW	19.53 %
2	2 ms	62.53 mW	50.46 mW	19.29 %
4	2 ms	15.63 mW	12.61 mW	19.29 %
8	2 ms	3.91 mW	3.15 mW	19.29 %
16	2 ms	0.98 mW	0.78 mW	19.29 %
2	3 ms	62.51 mW	50.49 mW	19.22 %
4	3 ms	15.63 mW	12.62 mW	19.22 %
8	3 ms	3.91 mW	3.15 mW	19.22 %
16	3 ms	0.98 mW	0.78 mW	19.22 %
2	4 ms	62.51 mW	50.52 mW	19.18 %
4	4 ms	15.63 mW	12.63 mW	19.18 %
8	4 ms	3.91 mW	3.15 mW	19.18 %
16	4 ms	0.98 mW	0.78 mW	19.18 %

Tabla 2.5: Tabla de potencia promedio de la señal TDM con modulación cuadrada de 10kHz y receptor de Thorlabs con frecuencia de corte de 11kHz y ganancia de 60dB.

Valores de m y n	Valor de la ventana w	Potencia sin filtrado	Potencia con filtrado	Potencia perdida
2	1 ms	20.86 mW	20.45 mW	1.97 %
4	1 ms	5.21 mW	5.11 mW	1.97 %
8	1 ms	1.30 mW	1.29 mW	1.97 %
16	1 ms	0.33 mW	0.31 mW	1.97 %
2	2 ms	20.86 mW	20.48 mW	1.80 %
4	2 ms	5.21 mW	5.12 mW	1.80 %
8	2 ms	1.30 mW	1.28 mW	1.80 %
16	2 ms	0.33 mW	0.32 mW	1.80 %
2	3 ms	20.84 mW	20.47 mW	1.72 %
4	3 ms	5.21 mW	5.12 mW	1.72 %
8	3 ms	1.30 mW	1.28 mW	1.72 %
16	3 ms	0.33 mW	0.32 mW	1.72 %
2	4 ms	20.84 mW	20.48 mW	1.70 %
4	4 ms	5.21 mW	5.12 mW	1.70 %
8	4 ms	1.30 mW	1.28 mW	1.70 %
16	4 ms	0.33 mW	0.32 mW	1.70 %

Tabla 2.6: Tabla de potencia promedio de la señal TDM con modulación triangular de 10kHz y receptor de Thorlabs con frecuencia de corte de 11kHz y ganancia de 60dB.

2.6. Conclusiones

Cuando el número de transmisores (m) y el número de receptores (n) aumenta (2, 4, 8 y 16), la energía concentrada en el lóbulo principal del espectro de potencia y la potencia promedio disminuyen.

La energía máxima del lóbulo principal del espectro de potencia y la potencia promedio es casi idéntica para las frecuencias de 10kHz y 5kHz de la señal moduladora. Además, se observa que el ancho de banda del lóbulo principal se conserva para ambas frecuencias.

Cuando la ventana de tiempo (w) aumenta (1ms, 2ms, 3ms y 4ms), el ancho de banda del lóbulo principal del espectro de potencia se estrecha; sin embargo, las amplitudes máximas de potencia se conservan.

La potencia promedio de la señal se conserva al aumentar la ventana de tiempo para cada par de valores de m y n .

La modulación senoidal es la mejor opción, ya que la señal TDM no presenta distorsión al pasar por el receptor. Esto se debe a que la mayoría de la energía de la señal se encuentra en el lóbulo principal del espectro de potencia. Además, la pérdida de potencia es mucho menor comparada con las otras modulaciones.

Dado que la duración de la ventana de tiempo no influye en la potencia promedio de la señal TDM, cualquier valor (1ms, 2ms, 3ms o 4ms) es una buena opción.

Para minimizar las pérdidas de potencia, es necesario que la frecuencia de la señal moduladora esté dentro del ancho de banda del receptor.

Capítulo 3

Interrogación de sensores ópticos en paralelo

El sistema de monitoreo de sensores ópticos en paralelo cuenta con n transmisores, n receptores y n hilos de fibra óptica, como se observa en el diagrama de la Figura 3.1. En este caso, cada transmisor transmite la señal de prueba a una sola fibra óptica y esta a su vez es conectada a su propio receptor. La ventaja de esta configuración radica en que en todo instante de tiempo todos los sensores son interrogados, por lo tanto, no se pierde detalle de los cambios en la intensidad de luz que viaja por la fibra óptica.

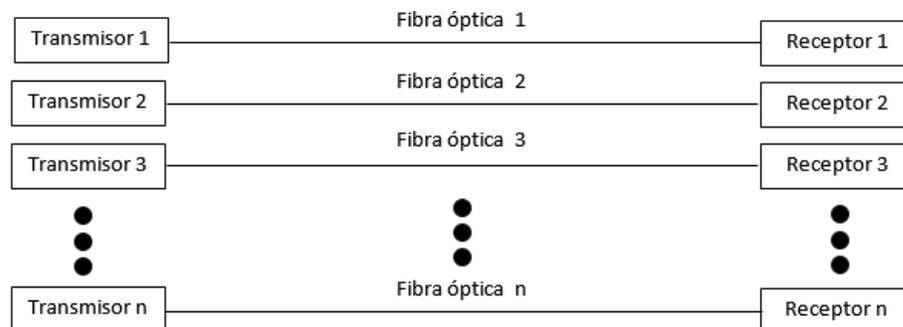


Figura 3.1: Sistema de monitoreo de sensores con interrogación en paralelo.

El transmisor en paralelo se compone de dos bloques: un generador de funciones y un amplificador con transductor. La función del generador de funciones es proporcionar la señal eléctrica de prueba, la cual es acondicionada por el módulo siguiente para ser enviada de manera ópti-

ma a través de la fibra óptica. Por su parte, el amplificador recibe la señal del generador y la amplifica en corriente para finalmente ser enviada al transductor. En este caso específico el transductor es un LED, de color rojo principalmente, el cual es el encargado de recibir la señal eléctrica entregada por el amplificador y transformarla en una señal luminosa capaz de viajar a través de los hilos de fibra óptica. Se elige utilizar luz visible ya que permite detectar de manera muy fácil las rupturas en la fibra óptica, en caso de utilizar al sistema de interrogación de sensores ópticos en el ambiente de monitorización de estructuras.

El objetivo principal del transmisor es generar una señal luminosa apropiada en potencia y frecuencia que no presente distorsión. Esta tarea es especialmente complicada ya que se tienen dos principales limitaciones; por una lado, el LED marca SiLED [1], cuenta con una valor nominal de corriente de 20mA, es decir, la corriente que pasa a través de este debe oscilar sobre dicho valor para asegurar que trabaja bajo las condiciones aconsejadas por el fabricante, con ello se evita disminuir el tiempo de vida y/o que se queme el componente. Por otro lado, al utilizar elementos electrónicos activos, en este caso particular los transistores, bajo ciertas condiciones eléctricas pueden amplificar y distorsionar la señal, esto último depende directamente de la red de polarización que lo acompaña.

3.1. Antecedentes

Como primer paso del desarrollo del transmisor se hace un análisis del transmisor de uno de los últimos sistemas de monitorización de fibras ópticas analizados en el capítulo 1 [2].

El generador de funciones utiliza el circuito integrado ICL8038 y requiere de un arreglo de resistencias y un potenciómetro para ajustar la simetría de la señal. Este detalle es muy importante, ya que al probar el circuito en cuestión se observa que es difícil obtener una señal del todo simétrica y la forma de onda es más parecida a una señal triangular que una senoidal. El efecto de distorsión en la señal senoidal de prueba se puede observar en la Figura 3.2.

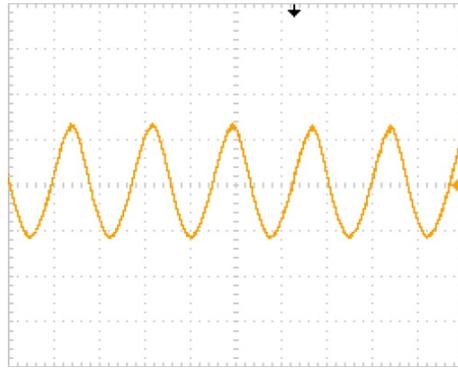


Figura 3.2: Señal de prueba con distorsión del generador [2].

Otro punto importante es que cuando el generador de funciones se ajusta para que la señal de prueba tenga una amplitud pico-pico mayor a 1.2V, la forma de onda que se observa sobre la resistencia de 0.5Ω (Figura 3.5) se encuentra distorsionada, esto se comprueba mediante la Figura 3.3 obtenida con un osciloscopio. Lo anterior mencionado justifica un cambio sustancial en el generador de señales.

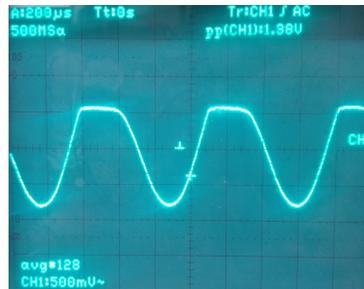


Figura 3.3: Forma de onda con distorsión obtenida de resistencia de 0.5Ω .

Por otro lado se analiza el amplificador con LED de la Figura 3.4, el cual corresponde a una configuración de seguidor de emisor.

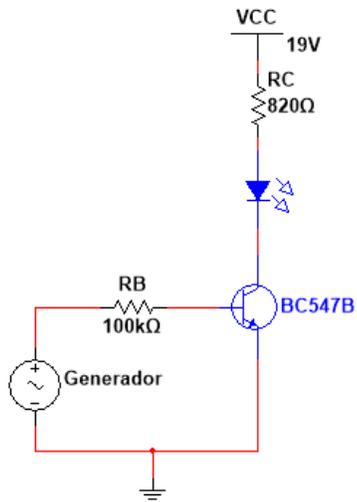


Figura 3.4: Transmisor de la tesis *Sistema optoelectrónico de interrogación de arreglos de sensores de fibras ópticas*.

Se hace la medición de las corrientes alterna (i_{RMS}) y directa (I) que pasan por el LED y se observa con un osciloscopio la forma de onda de la señal utilizando una resistencia de 0.5Ω como se muestra en la Figura 3.5. Las corrientes máximas que se pueden obtener de este circuito se muestran en la Tabla 3.1.

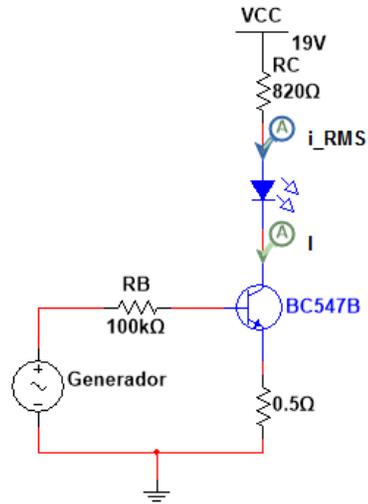


Figura 3.5: Circuito adaptado para obtener las corrientes y la forma de onda que pasan a través del LED.

Corriente alterna (i_{RMS})	Corriente directa (I)
4.6 mA	6.8 mA

Tabla 3.1: Valores de corriente sobre el LED.

Utilizando los datos anteriores se calculan los valores de corriente pico, pico-pico, máxima y promedio con las siguientes ecuaciones:

$$i_{pico} = \frac{i_{RMS}}{0.7071} = \frac{4.6mA}{0.7071} = 6.5mA$$

$$i_{pico-pico} = 2 * i_{pico} = 2 * 6.5mA = 13.0mA$$

$$i_{max} = i_{pico} + I = 6.5mA + 6.8mA = 13.3mA$$

$$i_{promedio} = \frac{2 * i_{max}}{\pi} = \frac{2 * 13.3mA}{\pi} = 8.5mA$$

Dado que el fabricante del LED indica que el valor nominal de corriente es de 20mA y si comparamos dicho valor con la corriente promedio calculado con anterioridad, se deduce que este circuito no usa toda la capacidad eléctrica del LED. Lo anterior justifica la búsqueda de un nuevo circuito eléctrico que mejore el uso de la potencia óptica del LED.

3.2. Configuración del transmisor en paralelo

Para comenzar el desarrollo del transmisor, se propone utilizar el amplificador de seguidor de emisor con un transistor BC547B[3], ya que este tipo de circuitos presentan una alta impedancia de entrada y baja impedancia de salida, es decir, demandan una cantidad mínima de corriente en su entrada (del orden de μA) y entregan una cantidad mayor de corriente a la carga[4][5]. El circuito se muestra en la Figura 3.6.

Se utiliza el generador de funciones para proporcionar la señal de prueba V_s , la cual se ajusta con un valor de voltaje pico-pico de 5V a una frecuencia de 1.4kHz y se utiliza un potenciómetro R_p de 1k Ω . En primer lugar se busca obtener los valores de R_1 , R_E y C_1 que produzcan una corriente promedio en el LED cercana a 20mA.

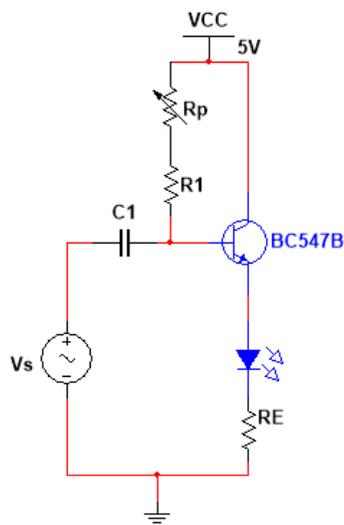


Figura 3.6: Amplificador con transistor BJT en configuración de seguidor de emisor.

Se comienza por utilizar los siguientes valores: $C_1 = 0.1\mu F$, $R_1 = 50\Omega$ y $V_{CC} = 5V$. A la resistencia de emisor se asignan 3 valores: 2 Ω , 50 Ω y 500 Ω , con el fin de obtener el intervalo de valores de corriente directa (I) y corriente alterna (i_{RMS}) sobre el LED (i_{LED}) y la forma de onda (V_{RE}) sobre la resistencia de emisor R_E , mostrados en el circuito de la Figura 3.7. Los resultados de esta prueba se muestran en la Tabla 3.2.

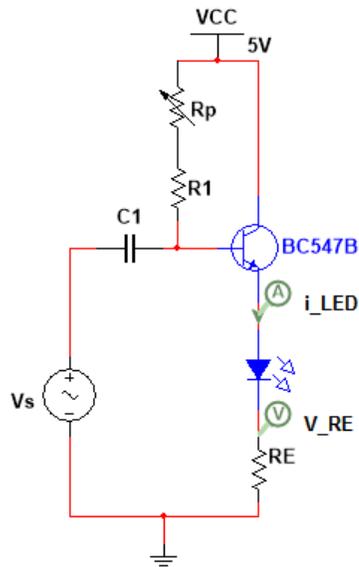


Figura 3.7: Voltaje y corriente en el circuito transmisor.

Resistencia de emisor (R_E)	Resistencia variable (R_P)	Corriente alterna (i_{RMS})	Corriente directa (I)
2Ω	0Ω	2.3mA _{RMS}	64.3mA
	1kΩ	22.8mA _{RMS}	44.2mA
50Ω	0Ω	0.7mA _{RMS}	22.5mA
	1kΩ	8.0mA _{RMS}	17.0mA
500Ω	0Ω	0.1mA _{RMS}	3.8mA
	1kΩ	1.2mA _{RMS}	2.8mA

Tabla 3.2: Valores de corriente contra resistencia de emisor.

En todos los casos en que R_P es cercano a 0 la forma de onda no presenta distorsión (Figura 3.8a), sin embargo, cuando adquiere valores cercanos a 1kΩ la señal de voltaje se distorsiona como puede apreciarse en la Figura 3.8b. Para evitar la distorsión se debe utilizar la señal de prueba con una amplitud pico-pico de voltaje menor o igual a 1V.

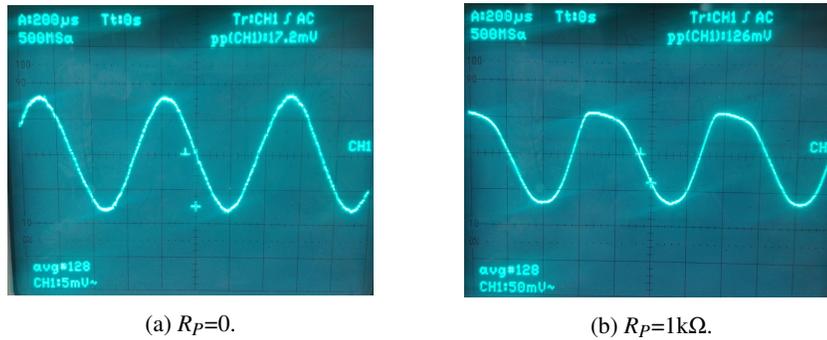


Figura 3.8: Formas de onda de voltaje sobre la resistencia R_E .

Para obtener una corriente promedio de aproximadamente $20mA$ se requieren valores de corriente alterna cercanos a $8mA$ (RMS) y de corriente directa de $20mA$. Como se puede observar en la Tabla 3.2, los valores de R_E entre 2Ω y 50Ω son los que proporcionan valores de corriente cercanos a los requeridos; sin embargo, la proporción entre la corriente alterna y directa no es la mejor para obtener una corriente promedio de $20mA$.

Adicionalmente se propone un modelo del transmisor con una fuente de alimentación mayor ($10V$), así mismo se ajustan los valores de los elementos: $C_1 = 0.5\mu F$, $R_1 = 200\Omega$ y $R_E = 500\Omega$. Los valores de corriente que se obtienen aparecen en la Tabla 3.3. Como puede observarse, los valores de corriente son similares a los obtenidos con anterioridad, sin embargo, no son los correctos para lograr una corriente promedio de $20mA$.

Resistencia de emisor (R_E)	Resistencia variable (R_P)	Corriente alterna (i_{RMS})	Corriente directa (I)
500 Ω	0 Ω	0.8mA _{RMS}	12.9mA
	1k Ω	1.2mA _{RMS}	12.5mA

Tabla 3.3: Valores de corriente contra resistencia de emisor cuando $V_{CC} = 10V$.

3.3. Circuito transmisor óptimo

Se propone el circuito de la Figura 3.9. Se hace la medición de las corrientes alterna y directa y a continuación se hacen los cálculos de corriente.

Dado que:

$$i_{RMS} = 6.8mA \text{ e } I = 16.8mA$$

$$i_{pico} = \frac{i_{RMS}}{0.7071} = \frac{6.8mA}{0.7071} = 9.6mA$$

$$i_{pico-pico} = 2 * i_{pico} = 2 * 9.6mA = 19.2mA$$

$$i_{max} = i_{pico} + I = 9.6mA + 16.8mA = 26.4mA$$

$$i_{promedio} = \frac{2 * i_{max}}{\pi} = \frac{2 * 26.4mA}{\pi} = 16.8mA$$

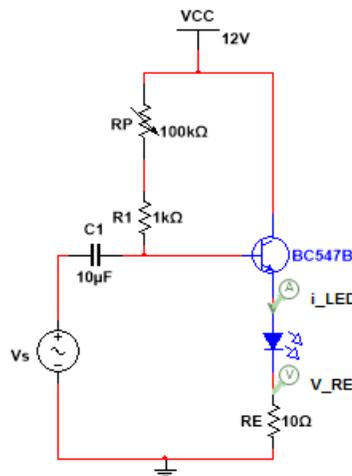


Figura 3.9: Circuito transmisor en paralelo propuesto.

Como puede observarse, con este nuevo circuito, las corrientes promedio, alterna y directa se acercan mucho a los valores ideales, por lo

tanto se espera que la eficiencia óptica de este transmisor sea mayor a la de su predecesor. Finalmente se grafican los valores de corriente para obtener la forma de onda teórica (Figura 3.10).

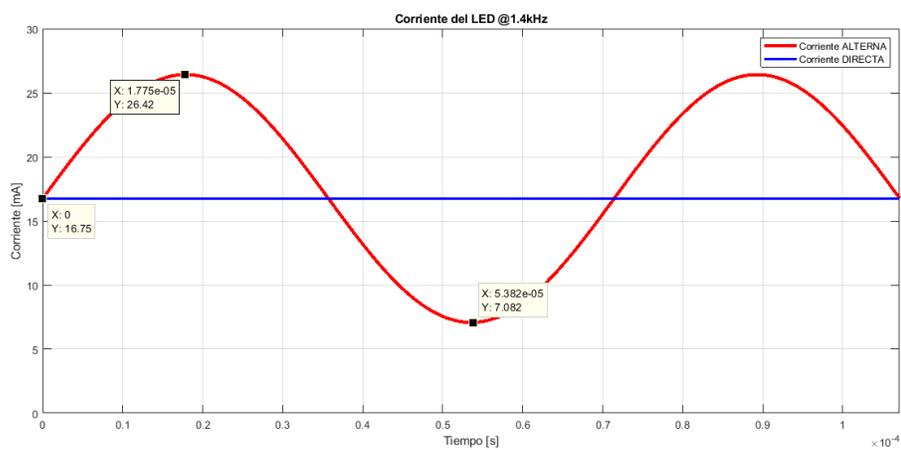


Figura 3.10: Forma de onda de la corriente que pasa a través del LED (i_{LED}). Corriente alterna (rojo) y corriente directa (azul).

3.4. Conclusiones

La dificultad de desarrollar un circuito transmisor radica en que, para evitar la distorsión de señal eléctrica de prueba, la corriente directa debe ser positiva y mayor a la corriente alterna sobre el LED.

Al utilizar un transistor BJT, con una variante de la polarización de seguidor de emisor, se logra una relación entre las corrientes alterna y directa tal que, la corriente promedio de la señal de prueba y la corriente nominal del LED son muy parecidas. Con lo anterior se garantiza que la señal luminosa que se envía del LED a la fibra óptica no presenta distorsión; además, dicha configuración permite utilizar la mayor potencia óptica del LED sin arriesgar el tiempo de vida del componente.

El generador de funciones que se propone permite obtener tres formas de onda, con un voltaje pico-pico ligeramente menor a 12V y un intervalo de frecuencias de 3.5kHz a 46.2kHz. Adicionalmente, se observa que la señal eléctrica senoidal no presenta distorsión al salir del generador, con lo anterior se corrige el problema de pre-distorsión al utilizar el circuito integrado ICL8038.

Referencias

- [1] “LED-R3D-UB-R30 data sheet”, SiLED SA, México.
- [2] J. M. González-Tinoco, *Sistema optoelectrónico de interrogación de arreglos de sensores de fibras ópticas*. Tesis de maestría, F. I. UNAM, 2013.
- [3] “BC547B Transistor data sheet”, Fairchild Semiconductor Corporation, USA.
- [4] R. Boylestad, L Nashelsky. *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos*. 10a Edición. México: Prentice Hall. 2009.
- [5] V. Y. Plata, *Principios de Microelectrónica*. 1a Edición. México: UAM-A. 1998.

Capítulo 4

Módulo TDM

En este capítulo se describe el desarrollo del sistema de multiplexación por división del tiempo[1] (TDM, por sus siglas en inglés), el cual tiene como objetivo principal proporcionar al sistema de monitoreo la capacidad de aumentar de manera considerable el número de sensores de fibra óptica que se pueden utilizar. El módulo TDM se compone principalmente de un micro controlador, el cual es programado para que genere las señales de reloj que controlan y mantienen la sincronía del sistema. Dichas señales de control se envían a los mux/demux, los cuales permiten gestionar múltiples canales, para enviar y recibir las señales eléctricas del sistema de monitoreo de una red óptica de sensores.

4.1. Módulo TDM 2x2

Para comprobar el principio de operación del módulo TDM se considera el diagrama de bloques de la Figura 4.1, el cual es un sistema de 2 transmisores, 2 receptores y 4 hilos de fibra óptica. La señal de luz de cada fibra, representadas como S_1 , S_2 , S_3 y S_4 , se reciben de forma serial y se procesan mediante una tarjeta de adquisición de datos o DAQ[2]. Por lo tanto, el número de señales S_{mn} de este sistema de monitoreo es igual al número de transmisores m por el número de receptores n , es decir, $S_{mn} = m * n$.

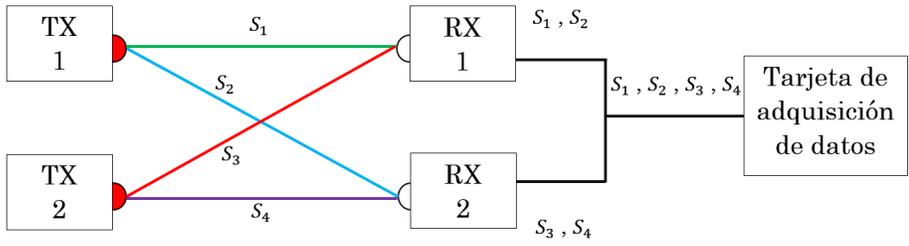


Figura 4.1: Sistema TDM de 2 transmisores y 2 receptores.

El módulo TDM genera la trama de señales $S_1 S_2 S_3 S_4$ y repite el ciclo, para ello asigna una ranura de tiempo con duración de t segundos a cada señal S_X ; es decir, el sistema envía a la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) la señal S_1 por t segundos, después envía S_2 por t segundos y así sucesivamente como se muestra en la Figura 4.2.

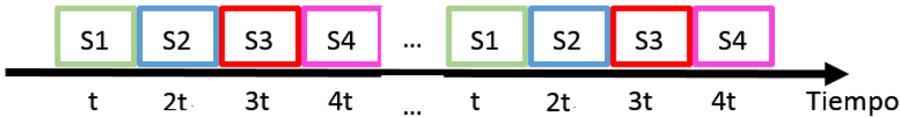


Figura 4.2: Ranuras de tiempo para las señales ópticas de cada fibra.

De acuerdo con lo anterior, se propone el diagrama de bloques de la Figura 4.3 en el cual se observan los principales componentes del módulo TDM, el cual está formado por 3 elementos: demux, mux y microcontrolador. Es importante tener en mente que los tres circuitos utilizan niveles de voltaje lógicos, 0 lógico = 0V y 1 lógico = 5V.

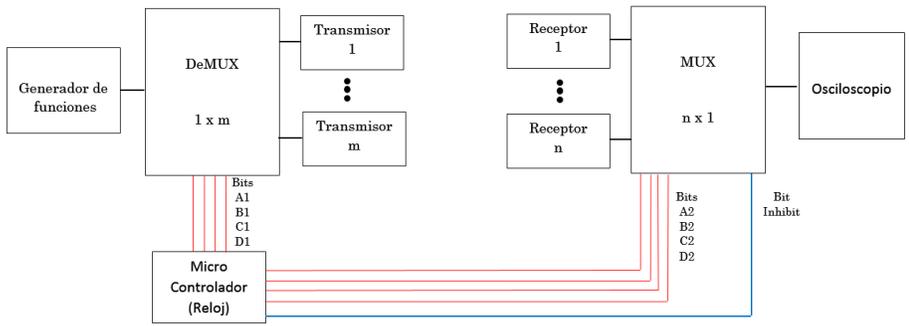


Figura 4.3: Diagrama de bloques del sistema TDM de $m \times n$ canales.

A continuación se hace una breve descripción de los elementos que componen el módulo TDM:

Microcontrolador. Es el encargado de generar las señales de control que mantienen la sincronía de los otros dos elementos, en otras palabras, es el reloj del sistema. En este caso se utiliza un PIC16F84A marca Motorola [3]. Se programa al PIC para que genere una ranura de tiempo t igual a 1ms, con esto se garantiza que en un segundo se interrogan varias veces todas las fibras ópticas.

Demultiplexor (DeMUX). Este circuito electrónico se encarga de dividir en tiempo la señal de prueba del generador y entregarla a cada uno de los transmisores. Por lo tanto, cada salida del DeMUX debe estar habilitada por n ranuras de tiempo, donde n es el número de receptores. El circuito integrado que se utiliza en el sistema es el CD4067B.

Multiplexor (MUX). Este circuito electrónico se encarga de recibir las señales provenientes de cada receptor y entregar la trama de señales $S_1S_2S_3S_4$ al DAQ. Cada entrada del MUX debe estar habilitada durante una ranura de tiempo. Para esta parte del módulo del TDM se utiliza otro circuito integrado CD4067B.

Dado que el circuito CD4067B cuenta con un máximo de 16 canales, se pueden acoplar 16 receptores y 16 transmisores al sistema TDM[4]. Para facilitar el análisis e implementación del sistema TDM se decide utilizar 2 transmisores y 2 receptores. En el diagrama de tiempo de la Figura 4.4 se observa la forma en la que se activan los transmisores y los receptores. Como ya se ha mencionado antes, la ranura de tiempo mínima es de 1ms y, como se puede observar, los transmisores permanecen activos durante 2ms mientras que cada receptor es habilitado por 1ms.

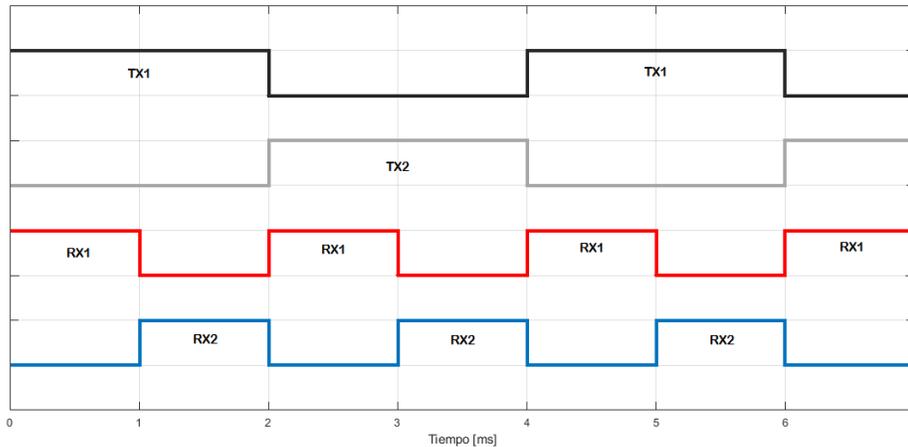


Figura 4.4: Diagrama de tiempo de los transmisores y receptores.

Al hacer la multiplicación de los cuatro elementos del diagrama de tiempo se obtiene trama $(TX1 * RX1)(TX1 * RX2)(TX2 * RX1)(TX2 * RX2)$, la cual aparece en color negro en la Figura 4.5. Dado que, tanto los transmisores como los receptores se activan en ranuras de tiempo distintas, se obtienen los cuatro productos mencionados anteriormente y cada combinación corresponde a la señal de una de las cuatro fibras ópticas, como se observa en el diagrama de la Figura 4.5. De esta manera se obtiene la secuencia de señales de la Figura 4.2 que es enviada al DAQ.

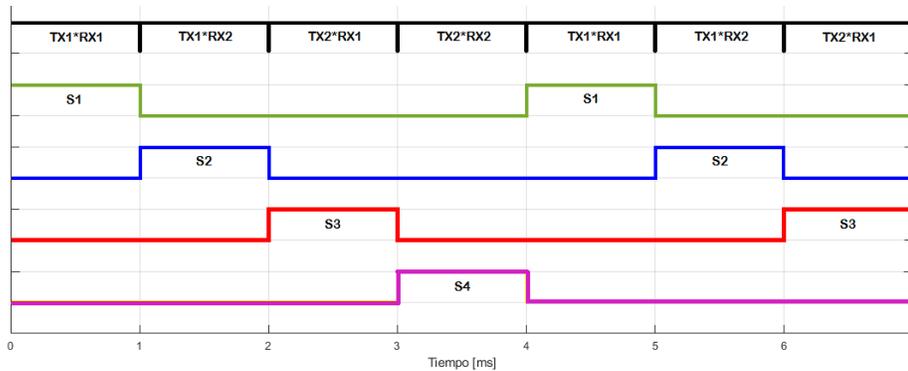


Figura 4.5: Diagrama de tiempo de las ranuras del sistema TDM para cada canal.

En la Figura 4.6, se presenta la distribución de los pines del DeMUX-MUX con matrícula CD4067B. La hoja de datos indica que se necesitan

de los cuatro bits de control A, B, C y D para controlar las salidas 0 a 15; en consecuencia, este módulo TDM tiene la capacidad de habilitar hasta 16 transmisores y 16 receptores y, por lo tanto, tiene la capacidad de monitorear hasta 256 sensores de fibra óptica.

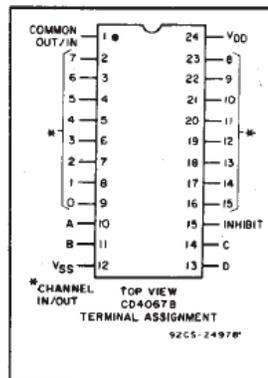


Figura 4.6: Distribución de los pines del DeMUX-MUX CD4067B[4].

La distribución de las líneas del PIC16F84A se encuentra en la Figura 4.7. Este microcontrolador cuenta con 13 puertos de entrada/salida, que en este caso se activan como salidas para proporcionar los bits de control A, B, C y D para los dos circuitos integrados CD4067B (líneas rojas en la Figura 4.3). Es importante mencionar que en el caso del MUX, que se utiliza con los receptores, se usa un bit adicional llamado INHIBIT para definir las ventanas de tiempo de 1ms (línea azul en la Figura 4.3).



Figura 4.7: Distribución de los pines del microcontrolador PIC16F84A[3].

El diagrama eléctrico del módulo TDM se encuentra en la Figura 4.8. Se observa que las líneas RA0, RA1, RA2 y RA3 del PIC16F84A corresponden a los bits A1, B1, C1 y D1 del DeMUX. Por otro lado, las líneas RB0, RB1, RB2 Y RB3 controlan los bits A2, B2, C2 y D2 del MUX;

adicionalmente la línea RB4 controla el bit INHIBIT del segundo circuito CD4067B. Todas estas líneas de control también se pueden apreciar en la Figura 4.3 y corresponden a las señales del reloj del módulo TDM.

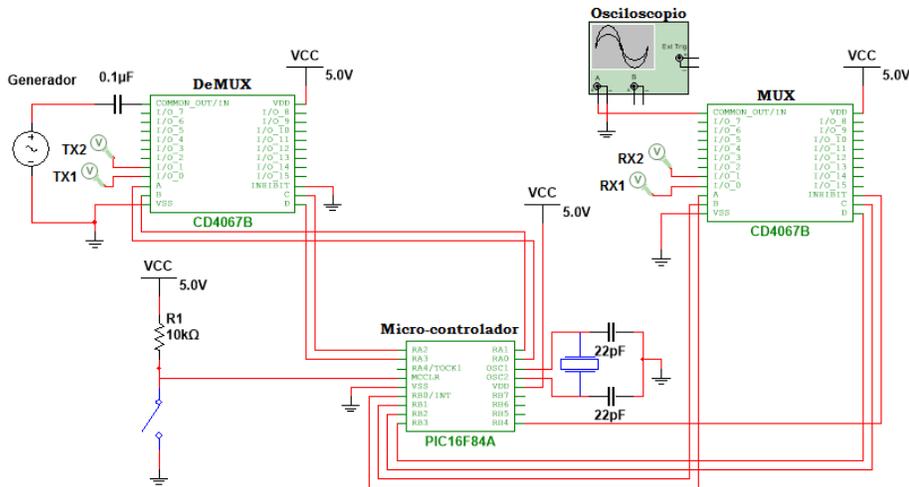


Figura 4.8: Diagrama eléctrico del módulo TDM.

La señal del generador se coloca en la línea COMMON_OUT/IN del primer CD4067B para que, posteriormente, los pines de salida I/O_1 y I/O_2 proporcionen las señales para los transmisores TX1 y TX2, respectivamente. De manera similar, los pines de entrada I/O_1 y I/O_2 del segundo CD4067B reciben las respectivas señales de los receptores RX1 y RX2 y la línea COMMON_OUT/IN entrega la cadena de señales provenientes de las fibras ópticas.

La programación del PIC para generar todas las señales del reloj, que habilitan los puertos de los circuitos CD4067B, se hace de acuerdo a las tabla de verdad de la Figura 4.9. Dado que se utilizan dos transmisores y dos receptores, se ocupan los renglones 2 y 3 de la tabla. De acuerdo a lo anterior, el canal 0 de cada CD4067B corresponden al transmisor 1 y receptor 1 respectivamente; de manera similar, el canal 1 de cada CD4067B corresponden al transmisor 2 y receptor 2 respectivamente, esta conexión se puede comprobar en el circuito de la Figura 4.8.

CD4067 TRUTH TABLE

A	B	C	D	Inh	Selected Channel
X	X	X	X	1	None
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1
0	1	0	0	0	2
1	1	0	0	0	3
0	0	1	0	0	4
1	0	1	0	0	5
0	1	1	0	0	6
1	1	1	0	0	7
0	0	0	1	0	8
1	0	0	1	0	9
0	1	0	1	0	10
1	1	0	1	0	11
0	0	1	1	0	12
1	0	1	1	0	13
0	1	1	1	0	14
1	1	1	1	0	15

Figura 4.9: Tabla de verdad del CD4067B para habilitar los 16 puertos de entrada/salida[4].

Como puede observarse en el renglón 2 de la Tabla 4.9, en primer lugar todos los bits están en 0 lógico, con ello se activa el canal 0 del primer CD4067B y se envía la señal prueba al transmisor 1. En el segundo estado, que corresponde al tercer renglón de la Tabla 4.9, únicamente se asigna el 1 lógico al bit A, con esto se activa el canal 1 y se envía la señal de prueba al transmisor 2. Cada transmisor se activa por 2ms, ya que el tiempo que debe transmitir cada uno es de 1ms por cada receptor. En la Figura 4.10 se muestran las señales lógicas para los bits A, B, C y D del DeMUX.

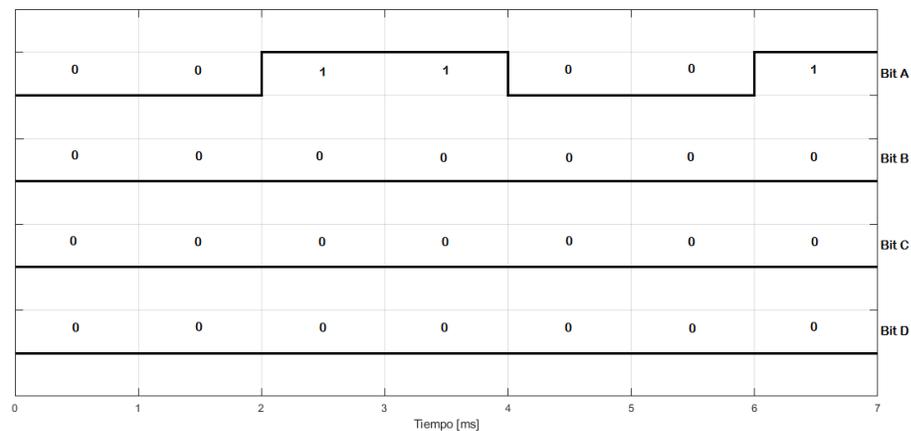


Figura 4.10: Señales lógicas de activación de los canales del CD4067B para los transmisores 1 y 2.

El procedimiento para activar los canales del MUX para cada receptor

es el mismo, sin embargo existen dos modificaciones: la primera es que cada canal se activa por 1ms y se introduce la señal INHIBIT. La función de esta última es desactivar todos los canales por un tiempo de 0.1ms, de esta manera se acotan las ventanas de tiempo para cada canal y se evita que haya traslape de señales. Es importante mencionar que para el INHIBIT un 0 lógico equivale a mantener activados los canales y un 1 lógico provoca el apagado de los mismos, esta señal lógica es generada en el micro-controlador y se envía por uno de sus puertos (RB4) al pin 15 del MUX. El estado antes descrito de todos los bits se puede observar en la Figura 4.11.

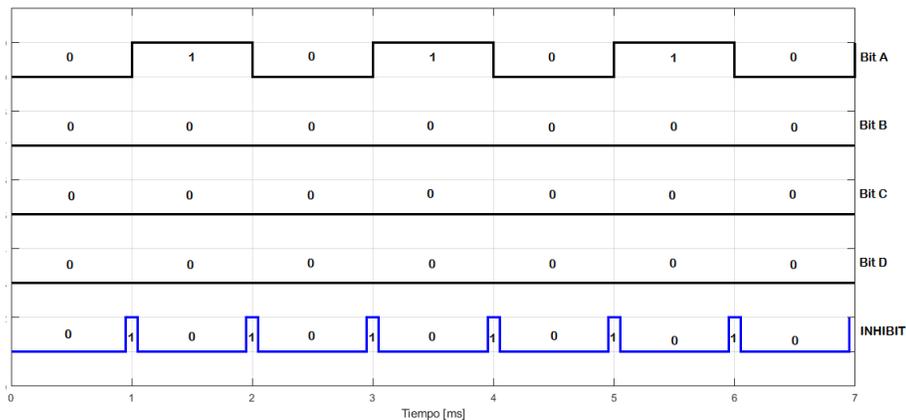


Figura 4.11: Señales lógicas de activación de los canales del CD4067B para los receptores 1 y 2.

Una vez definida la lógica y los tiempos de las señales de control, se procede a armar el circuito de la Figura 4.8 y se programa al microcontrolador. Para comprobar que las señales se generan de manera correcta se conecta un osciloscopio en el pin 17 del PIC16F84A, el cual corresponde al bit A del DeMUX. La señal que se observa aparece en la Figura 4.12 y se comprueba que tiene la misma forma y duración que el de la Figura 4.10.

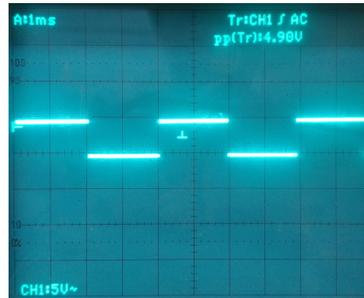


Figura 4.12: Bit de control A para los transmisores 1 y 2.

De igual manera se prueba el funcionamiento del bit A para el MUX, encargado de activar cada 1ms los receptores, la señal aparece en la Figura 4.13 y, una vez más, se observa que coincide en forma y duración con la mostrada en la Figura 4.11. En este caso, la división en tiempo del osciloscopio es de $500\mu s$, por lo tanto, permanece en 1 o en 0 por 1ms.

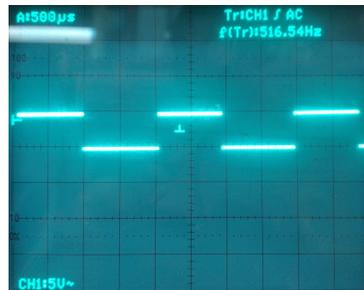


Figura 4.13: Bit de control A para los transmisores 1 y 2.

Para observar la señal del bit INHIBIT se usa el osciloscopio MSO 2012 de Tektronix, el cual permite mostrar señales que duran unos cuantos μs , ya que el osciloscopio principal que se utiliza, B&K Precision modelo 5105B, no es capaz de detectar de manera eficiente la señal antes mencionada. La señal captada de este bit se aprecia en la Figura 4.14 y al ser comparada con la Figura 4.11 se muestra que son iguales. De esta manera se comprueba que todas las señales de control se generan de manera correcta en tiempo y forma.

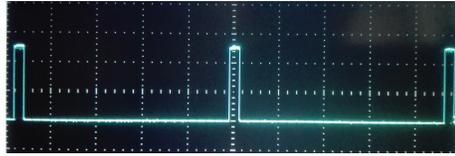


Figura 4.14: Bit de control INHIBIT.

Para comprobar el funcionamiento del sistema TDM completo se conectan 4 cables de cobre: del transmisor 1 a los receptores 1 y 2 y del transmisor 2 a los receptores 1 y 2 (Figura 4.1). De esta manera se evita el efecto de malos acoplamientos entre las fibras y los LEDs y fototransistores y se logra que todas las señales observadas en el osciloscopio tengan la misma amplitud de voltaje. Con lo anterior se espera observar la cadena de señales de la Figura 4.2. Para lo anterior se conecta el osciloscopio al pin COMMON OUT/IN del MUX, el resultado se presenta en la Figura 4.15; como puede observarse, aparece la señal de cada uno de los cables de cobre, que simulan las fibras ópticas sin pérdidas por acoplamiento, y la duración de cada señal es de 1ms. Con lo anterior se demuestra que el sistema TDM de 2 transmisores y 2 receptores funciona de manera correcta.

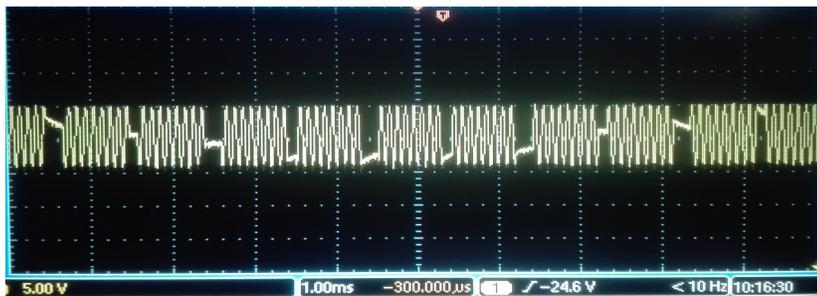


Figura 4.15: Trama TDM con cuatro señales con duración de 1ms cada una.

4.2. Conclusiones

Al utilizar un esquema de transmisores y receptores en paralelo, el sistema de monitoreo se limita a interrogar un número reducido de sensores. Para aprovechar de una mejor manera cada transmisor y receptor se implementa el módulo TDM.

El módulo TDM provee la secuencia con la cual se envía y recibe, de forma ordenada y sincronizada, la señal luminosa modulada de cada hilo de fibra óptica.

Este bloque del sistema permite aumentar de manera considerable el número de fibras ópticas que se pueden interrogar, aprovechando cada circuito transmisor y receptor. Además, permite crear una sola trama de señales, la cual se puede digitalizar con una sistema de adquisición de datos y analizar mediante un ordenador.

Referencias

- [1] W. Tomasi, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, Cuarta Edición, México: Pearson Educación, 2003.
- [2] “Service Guide: Keysight U2300A Series USB Multifunction Data Acquisition Devices”, Keysight Technologies, Penang, Malaysia, 2017.
- [3] J. I. Vega, G. Salgado, M. A. Lagos, V. N. Tapia, *Notas del PIC16f84 para la UEA. Sistemas Digitales II.*, 1a Edición, México: UAM-A, 2004.
- [4] “CD4067B data sheet”, Texas Instruments Incorporated, USA.

Capítulo 5

Transmisor para sistema de monitoreo con TDM

Una vez que la señal de prueba sale del sistema TDM, particularmente del demultiplexor, se observa que la corriente alterna tiene una amplitud muy pequeña, al rededor de los $24\mu A_{RMS}$; debido a esto es necesario hacer un ajuste al transmisor óptico. Para ello se agrega una etapa de pre amplificación de corriente y propone una nueva configuración para el amplificador de salida. En este capítulo se muestra el proceso llevado a cabo para obtener la mejor eficiencia óptica que puede suministrar el transmisor y que no excede los parámetros de corriente que puede tolerar el LED.

Para la etapa de preamplificación de corriente se considera un modelo de seguidor de emisor con el transistor BC547B[1][2]. Posteriormente se agrega una etapa final de amplificación para hacer el último ajuste a la corriente alterna, la cual es transformada en luz mediante el LED. Es importante mencionar que para obtener el modelo final del transmisor TDM se hacen muchas pruebas con distintos valores de resistencias y capacitores. Un problema importante que se presenta en los primeros diseños es la elevada temperatura sobre los transistores BJT.

El diseño final del transmisor se encuentra en la Figura 5.1. La señal proveniente del sistema TDM se representa como $DEMUX_m$, es decir, cada una de las m salidas del DeMUX se conecta a un transmisor de este tipo[3]. La amplitud de la señal de prueba se ajusta con $2.9V_{pp}$ y un voltaje de offset de 0.6V.

La etapa de preamplificación se compone de un transistor BC547B[4], el capacitor C_i y las resistencias RB_1 y RE_1 ; la etapa del transductor,

que también amplifica levemente la corriente, se compone de un transistor BC547B, los capacitores CB y CE₂, las resistencias RB₂ y RE₂ y un LED ultra luminoso marca SiLED[5].

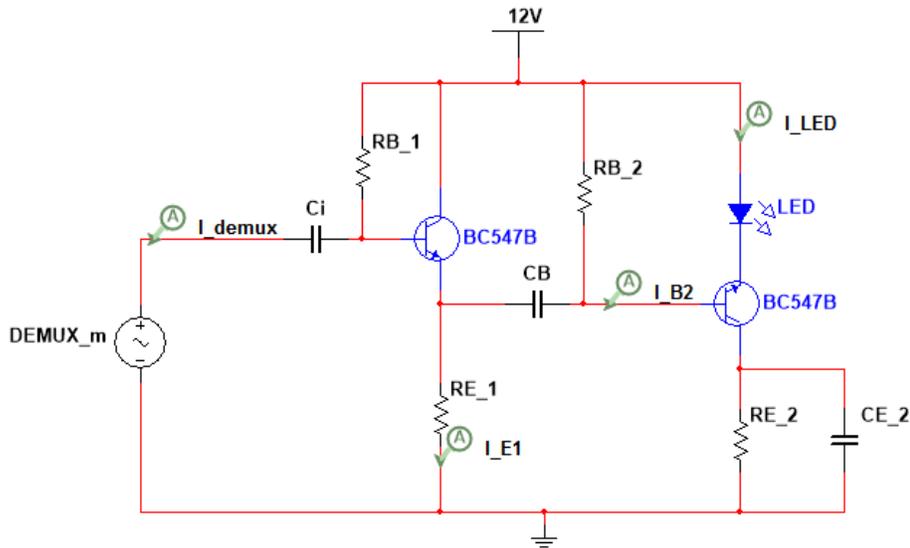


Figura 5.1: Circuito transmisor final.

i_{demux}	I_{E1}	I_{B2}	I_{LED}
$24.5 \mu A_{RMS}$	$5.6 mA_{RMS}$	$4.4 mA_{RMS}$	$13.8 mA_{RMS}$

Tabla 5.1: Valores de corriente alterna del circuito transmisor.

En la Tabla 5.1 se muestran el valor de la corriente alterna en cada etapa. Al hacer el cociente de I_{B2} , que es la corriente de salida que entrega la etapa de preamplificación, entre la corriente i_{demux} , que es la corriente de entrada del DeMUX, se obtiene la ganancia en corriente de la primer etapa A_{i1} :

$$A_{i1} = \frac{I_{B2}}{i_{demux}} = \frac{4.4 mA_{RMS}}{24.5 \mu A_{RMS}} = 180$$

Ya que se requiere de una pequeña amplificación final, es decir, que A_{i2} sea pequeña para que de este modo se alcance un valor de corriente

promedio de aproximadamente 20mA, se coloca el transistor en la forma que se muestra en la Figura 5.1, con lo anterior se logra que la amplificación intrínseca del transistor, conocida como H_F o β , disminuya drásticamente. Este comportamiento se observa al calcular la ganancia en corriente A_{i2} de la etapa final:

$$A_{i2} = \frac{I_{LED}}{i_{B2}} = \frac{13.8mA_{RMS}}{4.4mA_{RMS}} = 3$$

De los datos anteriores se calcula la ganancia total en corriente A_{iT} del circuito:

$$A_{iT} = A_{i1} * A_{i2} = 180 * 3 = 540$$

Al hacer la medición de la corriente directa sobre el LED se obtiene que $I=35.3mA$. Una vez obtenidos los datos de corriente alterna y directa, se calcula el valor de la corriente promedio sobre el LED:

$$i_{pico} = \frac{i_{RMS}}{0.7071} = \frac{13.8mA}{0.7071} = 19.5mA$$

$$i_{pico-pico} = 2 * i_{pico} = 2 * 19.5mA = 39.0mA$$

$$i_{max} = i_{pico} + I = 19.5mA + 35.3mA = 54.8mA$$

$$i_{promedio} = \frac{2 * i_{max}}{\pi} = \frac{2 * 54.8mA}{\pi} = 34.9mA$$

Este es el valor máximo de corriente promedio que se puede obtener sobre el LED y se observa que es ligeramente mayor a los 20mA que propone el fabricante del LED. Para controlar el valor de corriente promedio se decide colocar una resistencia variable a la entrada del transmisor. Con la modificación anterior se logra obtener una corriente promedio mínima de aproximadamente 16.5mA; en otras palabras, con el resistor variable se puede ajustar la corriente promedio en el intervalo de 16.5mA a 34.9mA. De esta manera se logra controlar la potencia óptica de la señal de prueba. El circuito final se observa en la Figura 5.2.

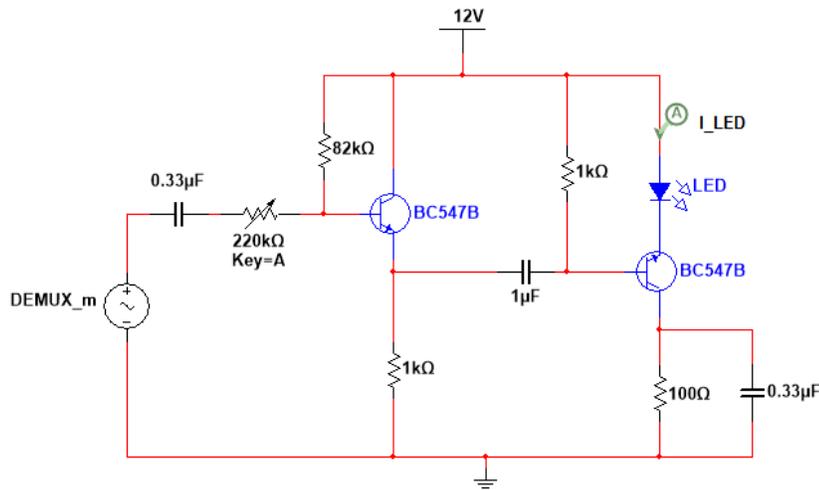


Figura 5.2: Circuito transmisor final para el sistema TDM.

5.1. Caracterización experimental del ancho de banda

Para conocer el ancho de banda del transmisor se coloca un generador de funciones a la entrada del circuito y se observa la señal sobre el nodo de la resistencia RE_2 mediante un osciloscopio. Se hace variar la frecuencia de la señal del generador y se observa que la amplitud máxima que se puede obtener en la resistencia RE_2 es de $1.4V_{PP}$, la Figura 5.3 representa la conexión del circuito de prueba que se utiliza.

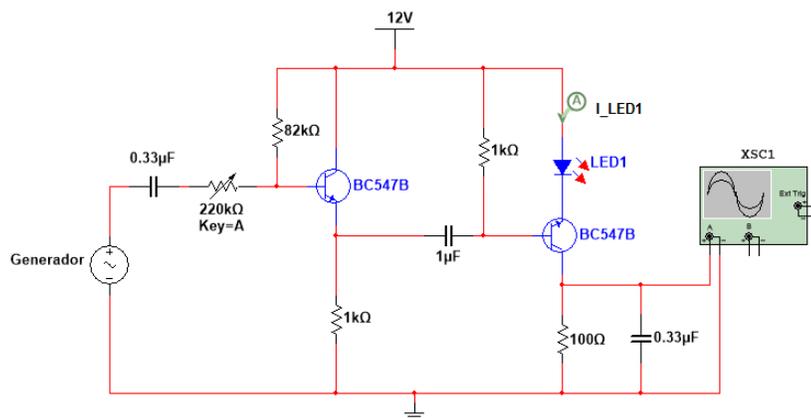


Figura 5.3: Conexión del circuito para obtener el ancho de banda del sistema.

Dado que amplitud máxima que se puede obtener es de $1.4V_{PP}$ entre 2.5kHz y 6kHz, se disminuye la frecuencia de la señal hasta disminuir el voltaje al 50%, esta frecuencia representa el extremo inferior del ancho de banda. Para obtener el extremo superior se aumenta la frecuencia hasta que nuevamente el valor de la amplitud es del 50%. Para observar claramente el ancho de banda se hacen mediciones de voltaje contra frecuencia dentro del intervalo de frecuencias obtenido y se hace la gráfica de los datos, el resultado se presenta en la Figura 5.4.

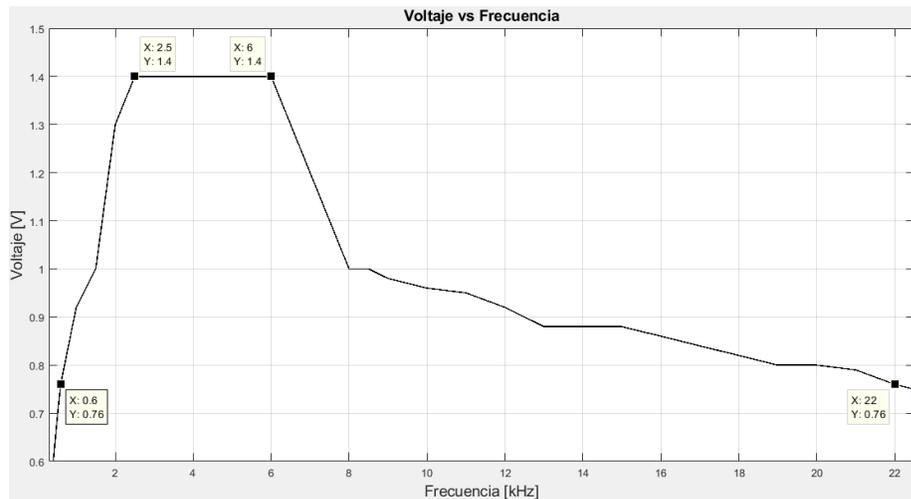


Figura 5.4: Ancho de banda del transmisor.

De la gráfica del ancho de banda se deduce que la señal de prueba se puede utilizar con frecuencias dentro del intervalo [600Hz,25kHz] antes de que la señal disminuya por debajo del 50%.

5.2. Conclusiones

Dado que al aumentar el número de transmisores y de receptores (m y n , respectivamente) se disminuye la potencia de cada señal TDM, es necesario implementar un amplificador para el transmisor.

La mejor manera de incrementar de la corriente promedio de cada señal es aplicar una fase de pre-amplificación y hacer un ajuste al circuito transmisor, esto último con el fin evitar la distorsión de la señal de prueba.

El circuito propuesto logra proporcionar una corriente promedio sobre el LED, alrededor del valor nominal de corriente propuesto por el fabricante, con la posibilidad de ser ajustada si es necesario.

Con esta nueva configuración del circuito transmisor se logra la condición necesaria para evitar la pre-distorsión de la señal eléctrica de prueba, es decir, se logra que la corriente pico de la señal alterna sea menor al valor de la corriente directa.

Al comprobar el ancho de banda del circuito, se observa que el intervalo de frecuencias al cual trabaja es muy amplio y se ajusta a las frecuencias a las que se pretende utilizar la señal de prueba.

Referencias

- [1] R. Boylestad, L Nashelsky. *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos*. 10a Edición. México: Prentice Hall. 2009.
- [2] V. Y. Plata, *Principios de Microelectrónica*. 1a Edición. México: UAM-A. 1998.
- [3] “CD4067B data sheet”, Texas Instruments Incorporated, USA.
- [4] “BC547B Transistor data sheet”, Fairchild Semiconductor Corporation, USA.
- [5] “LED-R3D-UB-R30 data sheet”, SiLED SA, México.

Capítulo 6

Receptor

El circuito eléctrico receptor se encarga de recibir las señales de luz provenientes de los racimos de fibra óptica y las transforma en señales eléctricas, las cuales se envían al sistema TDM para formar la trama de señales deseada. El receptor principal se compone un foto-transistor con resistencia en el emisor[1][2]. En este caso, el PT331C[3] se usa para captar la señal de luz y transformarla en una señal de voltaje (Figura 6.1).

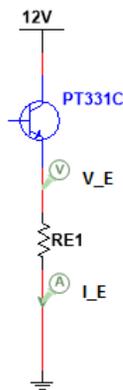


Figura 6.1: Circuito de recepción de la señal luminosa proveniente de las fibras ópticas[1][2].

Para obtener el valor de la resistencia RE se utiliza el circuito de prueba de la Figura 6.2. RE debe permitir que el voltaje de corriente alterna v_{RE} tenga la mayor amplitud posible sin distorsión. Para lograr lo anterior se acopla un extremo de la fibra óptica al foto-transistor y el otro

extremo se conecta a uno de los transmisores desarrollados anteriormente. Una vez hecho lo anterior se envía por la fibra una señal de prueba y se observa con el osciloscopio la forma de onda sobre la resistencia RE. Se utilizan varios valores RE y se hacen las mediciones de voltaje Colector-Emisor (V_{CE}), voltaje en alterna (v_{RE}) y directa en la resistencia RE (V_{RE}) y corriente alterna (i_{RE}) y directa (I_{RE}) sobre la resistencia RE. Las Tablas 6.1 y 6.2 muestran los resultados de dichas mediciones.

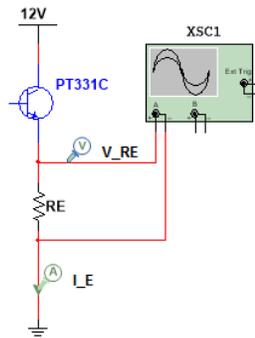


Figura 6.2: Circuito de prueba para determinar el valor de la resistencia RE.

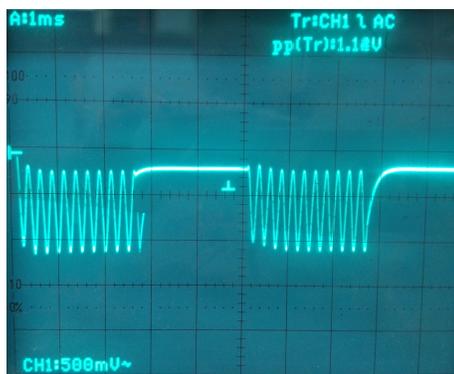
Resistencia (RE)	Corriente CD (I_{RE})	Corriente CA (i_{RE})
1 k Ω	196 μ A	5.2 μ A _{RMS}
2.8 k Ω	153 μ A	2.9 μ A _{RMS}
5.6 k Ω	151 μ A	2.1 μ A _{RMS}
10 k Ω	155 μ A	1.9 μ A _{RMS}
47 k Ω	138 μ A	1.5 μ A _{RMS}

Tabla 6.1: Valores de la resistencia RE contra valores de corriente.

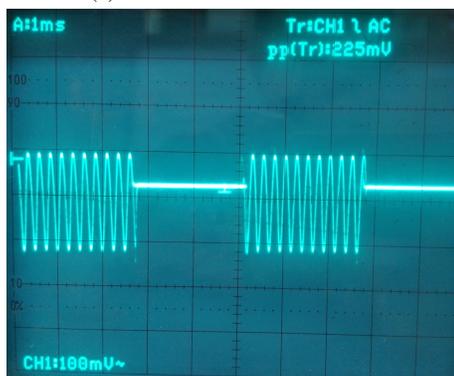
En la Tabla 6.2 se indica que para una resistencia RE de 2.8k Ω la señal observada en el osciloscopio no presenta distorsión y alcanza un valor de voltaje pico-pico mayor, esta evidencia permite seleccionar dicho valor para la resistencia de emisor del receptor óptico (Figura 6.3).

Resistencia (RE)	Voltaje Colector-Emisor (V_{CE})	Voltaje CD (V_{RE})	Voltaje CA (V_{RE})	Observación
1 k Ω	11.7 V	0.2 V	0.2 V _{PP}	Sin distorsión
2.8 k Ω	11.5 V	0.4 V	0.28 V _{PP}	Sin distorsión
5.6 k Ω	11.1 V	0.8 V	0.38 V _{PP}	Distorsión
10 k Ω	10.4 V	1.5 V	0.40 V _{PP}	Distorsión
47 k Ω	5.4 V	6.5 V	0.46 V _{PP}	Distorsión

Tabla 6.2: Valores de corriente alterna del circuito receptor.



(a) Señal TDM con distorsión.



(b) Señal TDM sin distorsión.

Figura 6.3: Señales de voltaje del circuito de recepción. 6.3a Mayor amplitud de voltaje con distorsión y 6.3b Menor amplitud de voltaje sin distorsión.

6.1. Amplificador de voltaje

Una vez obtenido el circuito de recepción de la señal óptica, se procede a implementar una etapa de amplificación para la señal voltaje producida por la etapa anterior. Para ello se elige un Amplificador Operacional (OpAmp) en configuración de amplificador no inversor (Figura 6.4) con ganancia variable[4][5].

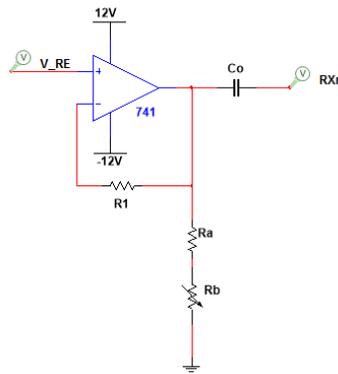


Figura 6.4: Amplificador de voltaje no inversor.

Se conecta la señal de voltaje V_{RE} de la etapa anterior al pin no inversor del OpAmp y se coloca el capacitor C_o a la salida del sistema para eliminar el voltaje de cd. Para controlar la ganancia del amplificador se conectan en serie las resistencias R_a y R_b . Dado que la etapa anterior puede entregar un voltaje de aproximadamente un cuarto de volt, es suficiente con obtener un intervalo de amplificación de 1 a 10 aproximadamente. La ecuación de la ganancia en voltaje del amplificador es:

$$A_V = 1 + \frac{R_1}{R_a + R_b}$$

Para obtener una ganancia cercana a 1 se utilizan los valores $R_1=1k\Omega$, $R_a=100\Omega$ y $R_b=1k\Omega$, con ello se obtiene que:

$$A_V = 1 + \frac{1k\Omega}{100\Omega + 1k\Omega} = 1.9$$

Por otro lado, para obtener una ganancia cercana a 10 se utilizan los valores $R_1=1k\Omega$, $R_a=100\Omega$ y $R_b=0\Omega$, con ello se obtiene que:

$$A_V = 1 + \frac{1k\Omega}{100\Omega + 0\Omega} = 11.1$$

De acuerdo a los cálculos anteriores, se deduce que se puede utilizar una resistencia variable R_b de $1k\Omega$ para poder variar la ganancia del amplificador en el intervalo de 1.9 a 11.1, según sea conveniente.

Se acoplan las dos etapas descritas anteriormente y se obtiene el circuito eléctrico del receptor óptico de la Figura 6.5, en donde RX_n corresponde a la señal de voltaje amplificado del transmisor n del sistema. En la Figura 6.6 se observa la comparación de las señales de entrada y salida del amplificador.

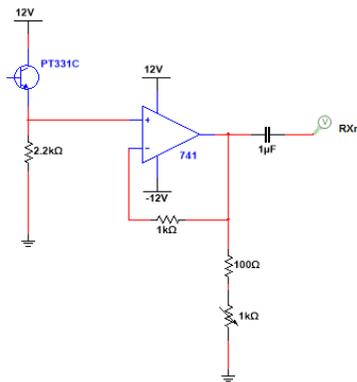


Figura 6.5: Circuito eléctrico completo del receptor óptico.

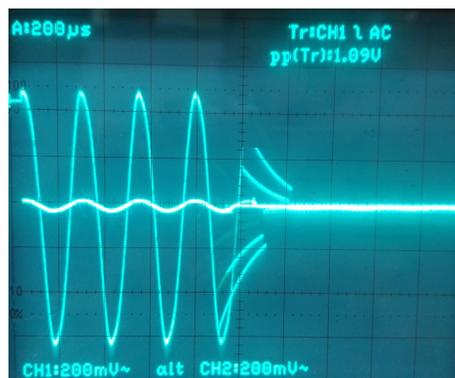


Figura 6.6: Comparación de las señales de entrada y salida del amplificador.

6.2. Conclusiones

Dado que la corriente y voltaje que se genera en el receptor son de baja amplitud, es importante utilizar un amplificador. En este caso, usar un amplificador no inversor, es suficiente para amplificar la señal recibida.

Mediante un circuito de dos elementos (foto-transistor y resistencia) se puede recibir la señal luminosa proveniente de las fibras ópticas. Es necesario ajustar la resistencia que se conecta al emisor para lograr que la señal que se recibe de las fibras ópticas no presente distorsión.

Una vez que la señal es amplificada puede ser procesada por el sistema TDM, para finalmente ser enviada al sistema de adquisición de datos.

Referencias

- [1] S. J. Mirrón-Carrasco, *Arreglo de sensores basados en fibra óptica para el monitoreo de daño estructural*. Tesis de maestría, F. I. UNAM, 2017.
- [2] R. Boylestad, L Nashelsky. *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos*. 10a Edición. México: Prentice Hall. 2009.
- [3] “PT202C/PT331C Phototransistor data sheet”, Everlight Electronics, USA.
- [4] “LM741 Operational Amplifier data sheet”, National Semiconductor Corporation, USA.
- [5] I. R. Sinclair, J. Dunton. *Practical Electronics Handbook*. 6th. Edition. Great Britain: ELSEVIER. 2007.

Capítulo 7

Sistema de monitoreo de una red óptica de sensores

En la primer parte este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la implementación de un sistema de monitoreo de 2 receptores y 2 transmisores, con la capacidad de interrogar 4 sensores de fibra óptica. Este etapa del proyecto tiene como finalidad comprobar que el sistema funciona de manera correcta una vez que interactúan directamente todos los módulos desarrollados previamente. Posteriormente se implementa un sistema de 16 transmisores y 16 receptores, es decir, con la capacidad máxima del sistema, y se analiza su comportamiento para determinar los límites del mismo.

7.1. Sistema de monitoreo 2x2

El diagrama de bloques del sistema de monitoreo de una red óptica de sensores desarrollado en este trabajo se muestra en la Figura 7.1. El número de sensores S_{mn} ópticos que se pueden interrogar depende del número de transmisores (m) y del número de receptores (n), de tal forma que:

$$S_{mn} = m * n$$

Es importante considerar que cada DeMUX/MUX CD4067B[1] tiene una capacidad máxima de 16 canales, por lo tanto el número máximo de sensores que se pueden interrogar es de 256.

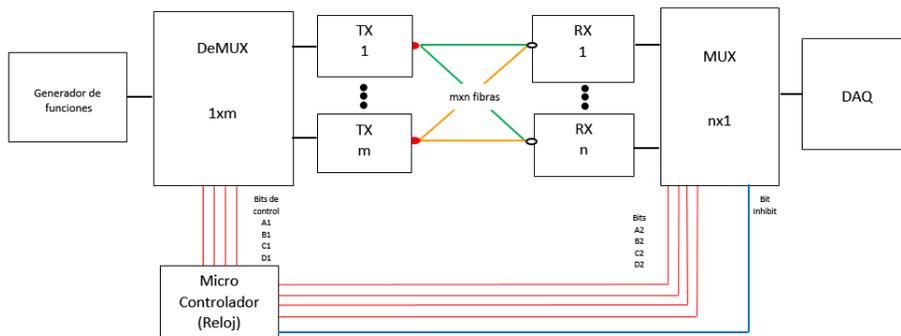


Figura 7.1: Diagrama de bloques del sistema de monitoreo de una red óptica de sensores con capacidad total de mxn sensores.

Para comprobar el funcionamiento del sistema se conectan todos los módulos hechos anteriormente y para simplificar el análisis se usa un sistema de 2 transmisores y dos receptores. Mediante unos acopladores de fibra óptica a LED, se conectan 4 hilos de fibra óptica de 0.5m de longitud cada uno; el tipo de fibra es AFS50/125Y de $50\mu\text{m}$ de núcleo y $125\mu\text{m}$ de recubrimiento [2]. Además se hace la programación del microcontrolador para generar una ventana de 1ms para cada fibra óptica y para observar la trama de señales se utiliza un osciloscopio [3]. La Figura 7.2 ilustra la forma en que se conecta el sistema.

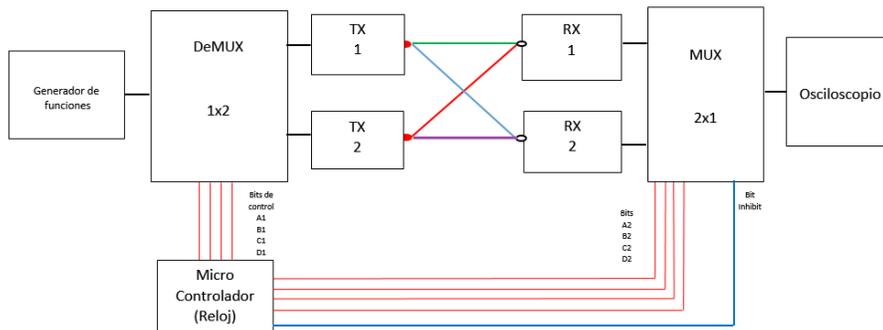


Figura 7.2: Diagrama de bloques del sistema de prueba.

El resultado de esta prueba se muestra en la Figura 7.3, en donde se aprecian las cuatro señales de las fibras ópticas, en donde cada señal ocupa una ranura de tiempo de 1ms. Con lo anterior se comprueba que el sistema funciona de manera correcta. Adicionalmente se puede observar que la amplitud de las señales es distinta a pesar de que se utiliza la

misma señal de prueba, esto se debe a que el acoplamiento de las fibras a los LEDs y a los fotoreceptores es distinto en cada fibra. También se comprueba que, cuando se dobla alguna de las fibras, la amplitud de la señal, observada en su respectiva ranura de tiempo, disminuye. Con lo anterior se comprueba que el sistema es capaz de captar y mostrar los cambios en la intensidad del haz luz que pasa por cada fibra óptica.

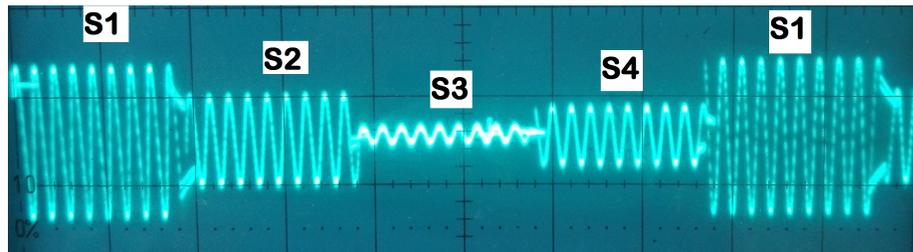
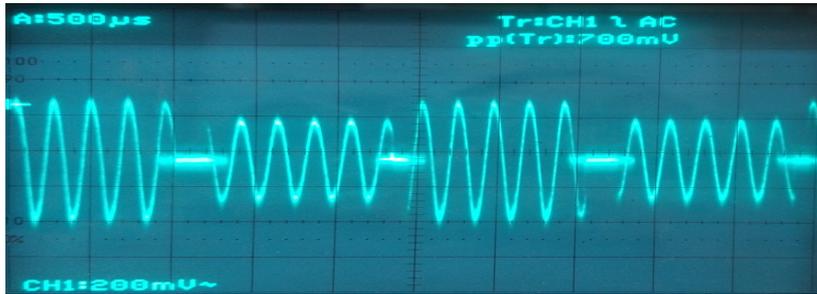
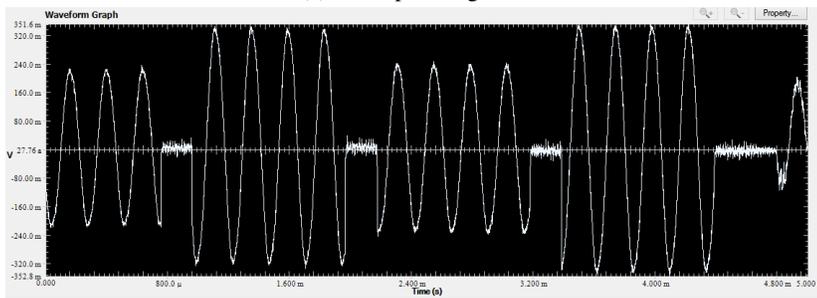


Figura 7.3: Trama de señales S1S2S3S4, correspondiente a cada una de las 4 fibras utilizadas.

Una vez que se comprueba el funcionamiento del sistema, se procede a digitalizar la señal de salida del sistema con el DAQ, marca Keysight, modelo U2531A; cuenta con 4 canales y con una tasa de muestreo de 2 millones de muestras por segundo[4]. Para este experimento, se utiliza la máxima de muestreo del sistema y un canal. El software del DAQ tiene la capacidad de almacenar los datos y una función para visualizar la señal obtenida (Figura 7.4).



(a) Descripción figura a.



(b) Descripción figura b.

Figura 7.4: Descripción general de la figura.

7.2. Conclusiones

Al probar el sistema completo utilizando dos transmisores y dos receptores se verifica que la trama TDM se genera de manera correcta. Se puede observar que cada sensor de fibra óptica cuenta con su propia ventana de tiempo.

Observar la trama TDM en un osciloscopio digital o analógico es relativamente complicado, ya que durante las pruebas del sistema, se observa que la imagen no permanece estática, como en el caso de las señales eléctricas provenientes de un generador de funciones. Sin embargo, se concluye que es más fácil observar una trama TDM cuando se utiliza un número pequeño de transmisores y receptores.

Al aplicar una curvatura a las fibras ópticas, se observa que la amplitud de la señal de voltaje correspondiente en la trama TDM disminuye. Esto implica que la fibra óptica como sensor de amplitud funciona de manera correcta. Una vez que se retira el esfuerzo mecánico, la amplitud de la señal regresa a su valor anterior.

Para observar de una manera más definida los ciclos de la señal de cada sensor, se recomienda aumentar el tamaño de la ventana de tiempo asignada a cada fibra óptica y disminuir la frecuencia de la señal de prueba, por ejemplo, al utilizar una frecuencia de 5kHz y una ventana de tiempo de 1ms permite observar con detalle la señal de cada sensor.

Como se observa, la señal de cada sensor no tiene la misma amplitud que la de los otros, esto se debe a que la potencia óptica no se distribuye de manera homogénea; lo anterior se debe a que el acoplamiento entre el LED, foto-transistor y racimos de fibra óptica no es bueno.

La tarjeta de adquisición de datos más recomendable para este sistema es el modelo U2531A, ya que la tasa de muestreo es muy grande y permite digitalizar la trama TDM con una buena definición. Se recomienda utilizar un sólo canal del DAQ, ya que en caso de usar más de uno, la tasa de muestreo se divide entre el número de canales que se ocupan; lo anterior implica que se puede perder resolución de la trama TDM.

Los datos capturados por el DAQ son susceptibles de ser procesados y analizados por un ordenador, con el fin de determinar en qué sensores se presenta una disminución de la amplitud de voltaje, lo cual implica que la fibra ha sido expuesta a un esfuerzo mecánico.

Referencias

- [1] “CD4067B data sheet”, Texas Instruments Incorporated, USA.
- [2] “4241-S01-AFS50_125Y-SpecSheet”, THORLABS, USA. 2013.
- [3] J. I. Vega, G. Salgado, M. A. Lagos, V. N. Tapia, *Notas del PIC16f84 para la UEA. Sistemas Digitales II.*, 1a Edición, México: UAM-A, 2004.
- [4] “Service Guide: Keysight U2300A Series USB Multifunction Data Acquisition Devices”, Keysight Technologies, Penang, Malaysia, 2017.

Capítulo 8

Conclusiones generales

1. Al analizar el estado del arte de los sistemas de monitorización de fibras ópticas como sensores de modulación de amplitud, se observa que en la mayoría de los trabajos consultados se utilizan rejillas de Bragg, circuladores, analizadores de espectro, OTDR y otros dispositivos ópticos que resultan muy costosos. Esto mismo sucede cuando se analizan los sistemas en cuales se propone un sistema de multi-canalización para monitorear un mayor número de sensores. Dado que en este trabajo se utilizan elementos eléctricos y electrónicos sencillos, se logra obtener un sistema relativamente económico comparado con los sistemas consultados.

2. A partir del análisis de los parámetros que intervienen en el sistema de monitoreo de una red óptica de sensores, observa que la forma de onda senoidal es el mejor tipo modulación para la señal piloto, además se pueden utilizar frecuencias modulación del orden de los kHz y ventanas de tiempo entre 1ms y 4ms sin provocar disminución en la potencia eléctrica de la señal. Los parámetros m y n , número de transmisores y receptores respectivamente, influye de manera directa sobre la potencia eléctrica de cada señal, es decir, al aumentar m y n la potencia de la señal disminuye drásticamente.

3. Es posible implementar un circuito transmisor para la interrogación en paralelo con transistores BJT y LEDs. Para lograrlo se debe hacer un análisis de las distintas configuraciones de los circuitos existentes y elegir la polarización adecuada para lograr un balance óptimo entre las corrientes alterna y directa que pasan a través del LED, para que esta manera se evite una pre-distorsión de la señal piloto y se utilice la mayor potencia eléctrica posible de los elementos, sin dañarlos ni disminuir su

vida útil.

4. Con circuitos electrónicos básicos, como son los multiplexores y micro-controladores, se puede construir un sistema TDM capaz de crear una trama de las señales ordenadas de cada sensor de fibra óptica. Mediante este módulo se pueden interrogar hasta 256 hilos de fibra óptica en poco más de un segundo, utilizando un máximo de 16 transmisores y 16 receptores. Para ello se debe plantear la lógica del sistema con tablas de verdad y diagramas de tiempo, para posteriormente hacer la programación del micro-controlador. Al observar la trama generada por este módulo, se concluye que cada señal es acotada en su respectiva ranura tiempo y es susceptible de ser analizada individualmente por una computadora una vez que ha sido digitalizada.

5. Los circuitos con transistores BJT y LEDs pueden ser ajustados de tal manera que se adapten a las necesidades del sistema, tal es el caso de los circuitos de transmisión con multiplexación con división del tiempo. Dado que los multiplexores entregan una corriente del orden de los μA , es necesario ajustar el circuito transmisor y utilizar una etapa de pre-amplificación, de tal forma que la corriente promedio que circula por el LED no exceda el valor nominal de corriente del LED. Al obtener el ancho de banda del circuito transmisor se observa que trabaja en el intervalo de frecuencias con el cual el sistema de monitoreo mantiene un nivel de potencia eléctrica óptimo.

6. Para implementar un circuito que reciba la señal de luz de los racimos de fibra óptica se puede utilizar un circuito sencillo, compuesto por un foto-transistor y una resistencia. Es importante controlar la polarización del foto-receptor, ya que mediante esta se puede obtener a la salida la mayor amplitud, sin distorsión, de las señales moduladas por los sensores. Dado que este arreglo de dos elementos entrega una señal eléctrica débil, es necesario agregar una etapa de amplificación, la cual permita aumentar los niveles de voltaje de las señales y sea posible captarlas con la tarjeta de adquisición de datos.

7. Con la evidencia obtenida, se puede predecir que el sistema puede funcionar de manera óptima utilizando las máxima capacidad de transmisores y receptores. Sin embargo, para obtener una distribución homogénea de potencia óptica en cada racimo de fibras ópticas, es necesario desarrollar un acoplamiento adecuado con los LEDs. Lo mismo se recomienda para el acoplamiento entre los racimos y los foto-transistores.

8. El sistema puede ser replicado para realizar pruebas con distintos tipos de fibras ópticas, en aplicaciones en donde requiera monitorizar un

gran número sensores ópticos de modulación de intensidad. En conjunto con el sistema, se puede desarrollar un programa informático que sea capaz de procesar y analizar la trama de las señales moduladas y con ello determinar la relación entre el cambio de la intensidad de luz y el parámetro que se desea medir.