



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Implementación de transmisor láser pulsado

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero en Telecomunicaciones

P R E S E N T A

Jorge Aldair Cortés López

DIRECTOR(A) DE TESIS

Dr. Daniel Enrique Ceballos



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

*Hacer las cosas bien, te hará triunfar.
Hacer las cosas con amor, te hará feliz.*

Reconocimientos

Sea éste trabajo un reconocimiento a mi familia; su esfuerzo, apoyo y amor han sido componentes esenciales en mi vida.

Un especial agradecimiento al Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera, su apoyo profesional para realizar éste trabajo es invaluable.

A la memoria de mi padre, la mejor persona del mundo.

Resumen

El presente trabajo se ocupa del diseño, análisis, desarrollo e implementación de un sistema transmisor óptico, desde la generación de una señal eléctrica hasta su adecuación al medio óptico. Los dispositivos y tecnologías empleadas, responden a la necesidad de generar un transmisor láser pulsado fácilmente reconfigurable, replicable y modular.

Los transmisores láser, son un componente esencial en los sistemas de comunicación ópticos actuales dada su capacidad para transmitir grandes cantidades de información a grandes distancias, producto de sus bajas pérdidas y su alta velocidad de transmisión. Por otra parte un transmisor láser, observado como sistema independiente encuentra aplicaciones diversas en sistemas de sensado y monitoreo mediante diferentes técnicas. Es por eso que presentar un sistema generador de pulsos ópticos funcional es relevante como un acercamiento al futuro desarrollo de sistemas más complejos.

Índice general

Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XI
1. Introducción	1
1.1. Definición del problema	2
1.2. Hipótesis	2
1.3. Objetivo	3
1.4. Motivación y contribuciones	3
1.5. Estructura de la tesis	3
2. Marco teórico	5
2.1. Sistemas de comunicación óptica	5
2.2. Tarjeta de desarrollo STM32F446RE	5
2.3. Fuentes de corriente controlada	7
2.4. Principio de operación del diodo láser	7
3. Diseño e implementación	9
3.1. Tarjeta de desarrollo STM32	9
4. Análisis de Resultados	11
4.1. Resultados	11
5. Conclusiones	13
5.1. Verificación del a hipótesis	13
A. Código/Manuales/Publicaciones	15
A.1. Apéndice	15
Bibliografía	17

Índice de figuras

3.1. Diagrama del sistema transmisor láser pulsado	9
--	---

Índice de tablas

Capítulo 1

Introducción

Los sistemas de comunicación óptica son una de las tecnologías más empleadas el sector de las telecomunicaciones en la actualidad; su desarrollo revolucionó la forma en que se transmite la información, mejorando de forma significativa la capacidad de canal, las velocidades de transmisión, las distancias alcanzadas así como la distancia entre dispositivos repetidores, parámetros que hasta 1970 se encontraban limitados por los principios de operación de los sistemas de microondas [1].

El uso de señales ópticas como portadoras en los sistemas de comunicación requiere de una fuente óptica coherente, un dispositivo detector y de un medio de transmisión adecuado; la invención del láser (por las siglas de *Light amplification by stimulated emission of radiation*) en 1960 [5], la investigación y desarrollo de fibras ópticas con pérdidas menores a los 2 dBm en 1970 y de detectores de alta calidad en 1980 [7] solventaron estas necesidades dando paso al despliegue de sistemas de comunicación óptica confiables, de alta capacidad y económicamente viables. Estos sistemas fueron adoptados rápidamente, pues sus características permitieron abastecer la creciente demanda de servicios de comunicación y transferencia de información a través de las redes (Video, voz, comercio electrónico, educación a distancia, etc.), que en las décadas siguientes incrementaron no solo en calidad sino también en el ancho de banda necesario para su transmisión[3].

La rápida adopción de los sistemas de comunicación óptica guiados por fibra óptica se debió también a sus notorias ventajas sobre los sistemas de comunicación tradicionales¹, entre las que encontramos expuestas por Tomasi et al. en [7]:

1. Mayor capacidad de información: Los cables metálicos generan capacitancia entre, e inductancia a lo largo, de sus conductores que los hacen funcionar como filtros pasabajas; eso limita sus frecuencias de transmisión y anchos de banda. Por otra parte, los sistemas de comunicación óptica tienen mayor capacidad de información debido a los anchos de banda inherentemente mayores a las frecuencias ópticas.
2. Inmunidad a la diafonía² e interferencia por estática: Las fibras ópticas de vidrio

¹Sistemas de comunicación que usan medios guiados convencionales de cable metálico [7]

²La diafonía es el fenómeno que se presenta cuando se acoplan líneas conductoras paralelas y genera

1. INTRODUCCIÓN

o de plástico no son medios conductores de electricidad, por lo tanto no generan inducción magnética entre cables vecinos, haciéndolos medios inmunes a la diafonía [4], por lo que además resultan inmunes a la interferencia electromagnética debida a rayos y otros dispositivos fuentes de ruido eléctrico. Por otra parte, las F.O. tampoco irradian energía de RF por lo que no representan fuentes de interferencia para otros sistemas de comunicaciones.

3. Durabilidad y seguridad: Por la naturaleza del material de las F.O. , son mas resistentes ante ambientes adversos y cambios de temperatura; además de ser notablemente más ligeras que el cable metálico, pueden ser empleadas cerca de sustancias inflamables. Respecto a la seguridad e integridad de la información que viaja a través de la fibra, es virtualmente imposible intervenir una fibra óptica sin que el usuario o administrador lo sepa.

Éstas características han permitido una notable penetración de los sistemas de comunicación óptica en todos los niveles estructurales de la redes de telecomunicaciones, desde los enlaces transoceanicos de gran capacidad hasta la implementación de FTTH como una tendencia cada vez mas adoptada.

Dada la gran cantidad de operaciones cotidianas en las que se involucran las tecnologías de comunicación óptica, resulta de vital importancia promover el desarrollo e investigación de metodologías novedosas que mejoren el desempeño de los dispositivos que constituyen a dichos sistemas; no solo aumento en la capacidad de transmisión, sino también en los métodos de monitoreo, resiliencia y adaptabilidad.

1.1. Definición del problema

Las redes ópticas de telecomunicaciones emplean niveles ópticos en su operación y uno de los elementos más importantes involucrados en su desempeño es el sistema transmisor láser; sin embargo, estudiar su funcionamiento y arquitectura de forma experimental en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería puede resultar prohibitivo dado el precio y complejidad de los dispositivos involucrados.

Una aproximación que permita manipular, editar y actualizar la configuración de un sistema transmisor láser, tanto en el hardware como en el software, permitiría a los alumnos involucrarse de forma activa en su estudio y experimentación, así como habilitarlos para operar sistemas más complejos en el futuro.

1.2. Hipótesis

Es posible realizar la implementación de un transmisor láser pulsado desde la generación de pulsos con un microcontrolador, hasta su adecuación al medio óptico que pueda ser analizado de forma modular por los lectores del presente trabajo.

capacitancias parásitas que se manifiestan como interferencias en la comunicación.

1.3. Objetivo

Diseñar e implementar un transmisor láser pulsado que sienta un antecedente académico en la Facultad de Ingeniería.

1.4. Motivación y contribuciones

Durante el estudio de los sistemas de comunicaciones ópticas, resulta frecuente la aproximación exclusivamente analítica de los principios y dispositivos involucrados, mientras que la aproximación experimental se limita a la observación de los dispositivos en operación, la experimentación sobre configuraciones existentes y que a diferencia del estudio en sistemas electrónicos, donde los componentes son reemplazables y configurables, la manipulación directa de los dispositivos láser y la arquitectura interna de los transmisores es más bien limitada.

En esta tesis se presenta una propuesta de análisis, diseño e implementación de un sistema transmisor láser, de forma que resulte ilustrativa y representativa para explicar los elementos fundamentales de su operación. El diseño comprende un microcontrolador de la familia STM32 con arquitectura Arm, un sistema de control de corriente (Driver de corriente) basado en el amplificador operacional OPA 350 y un diodo láser comercial de 1550 nm.

1.5. Estructura de la tesis

Este trabajo está dividido en XX capítulos. En primera instancia se describen los principios teóricos que sustentan el desarrollo de cada elemento que compone al sistema transmisor, comenzando con los fundamentos de la arquitectura del microcontrolador para generar pulsos de corta duración, el método de operación del amplificador operacional como una fuente de corriente controlada y finalmente la naturaleza optoelectrónica del diodo láser. A continuación, en el capítulo 3, se describe de forma detallada el diseño y análisis llevado a cabo para conseguir el transmisor de pulsos con el desempeño deseado, así como las simulaciones requeridas y la estructura del código que ejecuta el microcontrolador.

El capítulo 4 Resultados expone el desempeño logrado con el dispositivo implementado, las mediciones y la comparación con las estimaciones conseguidas mediante la simulación y la teoría previa.

Finalmente, en el capítulo 5 revisamos las conclusiones a las que se llegaron tras el análisis de los resultados con la hipótesis inicial, además de hacer observaciones sobre las proyecciones del proyecto como un trabajo en continuo desarrollo, con aplicaciones en ejercicios que involucren transmisores láseres de pulsos.

Capítulo 2

Marco teórico

En éste capítulo se expone el respaldo teórico que sustenta el diseño e implementación de un transmisor láser pulsado.

De forma inicial se describen los elementos constitutivos de un sistema de comunicación óptica, enfocado en el papel del transmisor y sus componentes; posteriormente se describen las características de los microcontroladores de la familia SMT32, la arquitectura arm, el entorno de desarrollo y la estructura del código necesario para su operación. A continuación, se explica el funcionamiento de un amplificador operacional como una fuente de corriente controlada, su respuesta en frecuencia y se revisa la bibliografía existente específicamente en materia de drivers de corriente para diodos láser; finalmente se presenta el principio de operación del diodo láser como una fuente de radiación coherente así como los esquemas de modulación existentes.

2.1. Sistemas de comunicación óptica

El esquema de un sistema de comunicaciones ópticas más elemental, contempla un transmisor óptico, una línea de transmisión, generalmente se trata de un cable de fibra óptica y un receptor cuyo dispositivo elemental en un foto receptor.

La tarea del transmisor dentro de un sistema de comunicación óptica, es la de generar la señal óptica, montar información en dicha señal y enviar la señal modulada dentro de la fibra óptica. En los transmisores empleados hoy en día, se utilizan generalmente fuentes ópticas basadas en semiconductores.

La aproximación propuesta para estudiar uel transmisor óptico comprende ...

2.2. Tarjeta de desarrollo STM32F446RE

La tarjeta de desarrollo STM32F446RE (STM32 Nucleo-64) pertenece a una familia de tarjetas de desarrollo con diferentes configuraciones y prestaciones; contienen

embebido un microcontrolador STM32 con un empaquetado LQFP64¹

El microcontrolador STM32 embebido en la tarjeta de desarrollo STM32F446RE tiene un núcleo Arm² Cortex-M4 basado en la arquitectura RISC (Reduced Instruction Set Computer) de 32 bits y una Unidad de Punto Flotante(FPU por las siglas en inglés de *Floating-Point Unit*) [6]. Ésta arquitectura provee a los microcontroladores y procesadores que la implementan de una gran eficiencia en la ejecución del código, lo cual se ve reflejado en un alto rendimiento computacional con un bajo costo de energía.

Los principios de diseño más importantes de la arquitectura computacional RISC son:

- **Uso de operaciones simples**
- **Uso de operaciones registro a registro**
- **Modos de direccionamiento simples**
- **Gran número de registros**
- **Formato de instrucciones simples de longitud fija**

Dicha arquitectura es generalmente contrastada y comparada con su antecesor, la arquitectura CISC(Complex Instruction Set Computing), que, cómo su nombre lo indica utiliza instrucciones complejas en lugar de instrucciones simples; esa característica privilegia la ejecución de instrucciones complejas descritas en pequeñas líneas de código, además de permitir que la administración de los accesos a memoria sean versátiles sin embargo, también aumenta de forma considerable el número de instrucciones y ciclos de reloj mediante el cual se realizan las operaciones, aumentando la complejidad del hardware y la paralelización de tareas simples.

Si bien, la arquitectura Arm esta basada en los principios de RISC, lo cierto es que también implementa algunas características de CISC, como el uso de instrucciones complejas para realizar ciertas operaciones, con el objetivo de "facilitar" la ejecución de tareas frecuentes

La arquitectura Arm se comercializa bajo el esquema de licencias, es decir, ARM Holdings, la empresa propietaria de la autoría intelectual, licencia el uso de los métodos de diseño, el conjunto de instrucciones y herramientas de desarrollo a las empresas para manufacturar sus chips. En éste sentido, y en armonía con las ventajas y características antes mencionadas, la arquitectura Arm no solo es utilizada en microcontroladores en tarjetas de desarrollo, sino que ésta es solo una ventana en la cual es posible desarrollar y experimentar, puesto que al día de hoy, la arquitectura Arm es utilizada en los chips de un gigantesco número de dispositivos que incluyen teléfonos

¹Siglas en ingles de Low-profile Quad Flat Package 64 Terminals (*Encapsulado Cuadrado Plano de Perfil Bajo de 64 terminales*)

²Anteriormente ARM por las siglas en inglés de Advanced RISC MACHine y actualmente Arm por Acorn RISC Machine

celulares, electrodomésticos, vehículos y computadoras personales que actualmente dominan el mercado[2]. Dentro de las principales empresas que desarrollan productos que implementar Arm se encuentran: Atmel, Broadcom, Microsoft, Nintendo, Nokia, Sony, Qualcomm, Samsung, Yamaha, Nvidia, Texas Instruments y la propia STMicroelectronics, que desarrolla la tarjeta descrita en éste subcapítulo.

Además de anunciar dentro de su catálogo de productos, diseños y plataformas enfocadas a seguir tendencias del desarrollo tecnológico, como aplicaciones de IoT e Inteligencia Artificial.

2.3. Fuentes de corriente controlada

2.4. Principio de operación del diodo láser

Capítulo 3

Diseño e implementación

En el presente capítulo se retoman los conceptos desarrollados en el capítulo anterior para describir el diseño e implementación del sistema transmisor láser que utiliza la tarjeta de desarrollo STM32F446RE como generador de pulsos e interfaz de usuario, el amplificador operacional OPA350 como elemento principal del driver de corriente basado en el diseño de la fuente de corriente Howland y finalmente se expone la operación y funcionamiento del diodo láser de 1550 nm como una fuente de pulsos ópticos modulados. El diagrama del sistema antes mencionado es ilustrado en la Figura 3.1 y es descrito a detalle en las secciones siguientes.

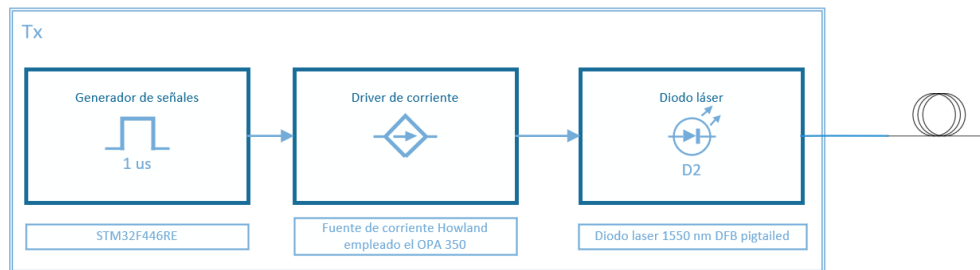


Figura 3.1: Diagrama del sistema transmisor láser pulsado

3.1. Tarjeta de desarrollo STM32

La tarjeta de desarrollo STM32F446RE (STM32 Nucleo-64) pertenece a una familia de tarjetas de desarrollo con diferentes configuraciones y prestaciones; contienen

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

embebido un microcontrolador STM32 con un empaquetado LQFP64¹

El microcontrolador STM32 embebido en la tarjeta de desarrollo STM32F446RE tiene un núcleo Arm² Cortex-M4 basado en la arquitectura RISC (Reduced Instruction Set Computer) de 32 bits y una Unidad de Punto Flotante(FPU por las siglas en inglés de *Floating-Point Unit*).

¹Siglas en ingles de Low-profile Quad Flat Package 64 Terminals (*Encapsulado Cuadrado Plano de Perfil Bajo de 64 terminales*)

²Anteriormente ARM por las siglas en inglés de Advanced RISC MACHine y actualmente Arm por Acorn RISC Machine

Capítulo 4

Análisis de Resultados

4.1. Resultados

El sistema implementado es capaz de generar pulsos ópticos de 10 μ seconds

Capítulo 5

Conclusiones

Los sistemas de comunicación óptica son por

5.1. Verificación del a hipótesis

Apéndice A

Código/Manuales/Publicaciones

A.1. Apéndice

Apéndice

Bibliografía

- [1] Agrawal, G. P. (2012). *Fiber-Optic Communication Systems*. John Wiley& Sons, Hoboken, 4 edition. [1](#)
- [2] Holdings, A. (2020). Arm developers site. [7](#)
- [3] Keiser, G. (1991). *Optical fiber communications*. McGraw-Hill. [1](#)
- [4] Neri Vela, R. (2013). *Líneas de Transmisión*. Universidad Veracruzana. [2](#)
- [5] Rawicz, A. H. (2008). Theodore Harold Maiman and the invention of laser. *Photonics, Devices, and Systems IV*, 7138:713802. [1](#)
- [6] STMicroelectronics (2020). STM32F446xC / Reference Manual. [6](#)
- [7] Tomasi, W., Gloria, I., Hernández, M., Virgilio, I., and Pozo, G. (2003). *Sistemas de comunicaciones opticas*. [1](#)