

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO ELECTRÓNICO

**TEMA:
MODELIZACIÓN DEL DIODO LED, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA
INTERFAZ DEL TRANSMISOR Y RECEPTOR PARA UN SISTEMA DE
COMUNICACIÓN DE LUZ VISIBLE MEDIANTE UN DIODO DE LUZ
BLANCA**

**AUTOR:
ERICK ALEXANDER PEÑAHERRERA AGUILAR**

**DIRECTOR:
MILTON NAPOLEÓN TIPÁN SIMBAÑA**

Quito, mayo 2014

**DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIZACIÓN DE USO
DE TRABAJO DE GRADO**

Yo, autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Erick Alexander Peñaherrera Aguilar
CC: 1717986861

DEDICATORIA

Primero a Dios, por cada minuto de existencia y bendiciones que he recibido a lo largo de la vida.

A mi padre Washington, mi madre Sonia por todo el esfuerzo y sacrificio que han realizado día a día, por sus consejos y comprensión, por darme el apoyo en cada etapa de mi vida.

A mi hermano Andrés, por estar siempre a mi lado y a mein liebe por estar en todo momento.

Erick Peñaherrera Aguilar

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana y al director de carrera Msc. German Arévalo por apoyar este trabajo de investigación, proporcionando los equipos y materiales necesarios para la realización del mismo.

A los docentes de la Universidad Politécnica Salesiana por los conocimientos impartidos en nuestra formación académica y de una manera especial al PhD. Daniel Cárdenas por ayudarme en la realización de este proyecto de Titulación, al Ing. Milton Tipán por apoyarnos y brindarnos sus conocimientos.

Erick Peñaherrera Aguilar

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	3
ANÁLISIS DEL PROBLEMA	3
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo general.....	3
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
1.2 Justificación del proyecto	3
1.3 Alcances	4
1.4 Metodología de investigación	4
CAPÍTULO 2	6
ESTADO DEL ARTE.....	6
2.1 Generación de pulsos para el LED con MOSFET	10
2.2 Adquisición de datos al fotodiodo.....	11
CAPÍTULO 3	12
MARCO TEÓRICO.....	12
3.1 Elementos que conforman la comunicación.....	12
3.2 Fotoemisor o fuente óptica	14
3.3 Diodo LED	14
3.3.1 Funcionamiento.	15
3.3.2 Características.....	16
3.3.3 Diodos de luz blanca.....	17
3.4 Amplificadores operacionales	18
3.4.1 Etapas de amplificación.....	19
3.4.1.1 <i>Etapas de entrada: amplificador diferencial.</i>	19
3.4.1.2 <i>Etapa intermedia: desplazador de nivel.</i>	19
3.4.1.3 <i>Etapa de salida: en contrafase.</i>	20
3.4.1.4 <i>Encapsulado.</i>	20
3.4.2 Amplificadores operacionales de propósito general.....	20
3.4.2.1 <i>Detectores de cruce por cero.</i>	20
3.4.2.2 <i>Amplificador de transconductancia.</i>	22
3.4.2.3 <i>Amplificador inversor.</i>	23
3.4.2.4 <i>Amplificador no inversor.</i>	24
3.5 Óptica	25

3.6	Lentes	25
3.7	Detectores de luz	25
3.7.1	Diodos PIN	26
3.7.2	Efecto fotoeléctrico.....	27
3.8	Corriente	29
3.9	Voltaje	30
3.9.1	Voltaje DC.....	31
3.10	Resistencia.....	32
3.11	Potencia	33
3.11.1	Potencia eléctrica.....	33
3.11.2	Potencia óptica.....	34
CAPÍTULO 4.....		35
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN		35
4.1	Diseño e implementación del sistema siso	36
4.1.1	Análisis de la FPGA.	36
4.1.2	Diseño del transmisor.	37
4.1.3	Implementación del transmisor.....	42
4.1.3.1	<i>Fresado.</i>	42
4.1.3.2	<i>Diseño de la PCB.</i>	44
4.1.3.2.1	<i>Elección adecuada de los componentes.</i>	44
4.1.3.2.2	<i>Efecto resistivo en las pistas.</i>	45
4.1.3.2.3	<i>Fabricación de PCBs.</i>	46
4.1.3.2.4	<i>Generador de formato Gerber en Proteus.</i>	47
4.1.3.2.5	<i>Generación de archivos LDM en circuitcam.</i>	49
4.1.3.2.6	<i>Exportación a BroadMaster.</i>	51
4.1.4	Diseño del receptor.	56
4.1.4.1	<i>Elaboración del PCB.</i>	57
4.1.4.2	<i>Ataco de cobre.</i>	57
4.2	Diseño e implementación del sistema MISO	59
4.2.1	Diseño del transmisor y receptor.....	59
4.2.2	Implementación del transmisor y receptor MISO.....	61
4.3	Caracterización del LED de luz blanca	63
4.3.1	Curvas características – corriente vs voltaje.	63

4.3.2	Determinación de la potencia del diodo de luz blanca.	68
4.3.3	Caracterización con filtro óptico y sin lente azul.	69
4.3.4	Caracterización con lente y filtro óptico.	71
4.4	Característica no lineal del driver.....	74
4.5	Análisis de resultados	75
4.5.1	Sistema de transmisor SISO.	75
4.5.2	Análisis de potencia vs distancia.	77
4.5.3	Análisis de voltaje vs distancia.	78
4.5.4	Sistema de comunicación MISO.....	78
CAPÍTULO 5		82
ANÁLISIS DE COSTOS		82
5.1	Costos de desarrollo matemático.....	82
5.2	Costos de software.....	82
5.3	Costos de desarrollo de hardware.....	83
5.4	Costo total de proyecto	84
CONCLUSIONES		85
RECOMENDACIONES		86
LISTA DE REFERENCIAS		87
Anexo 1. Hoja técnica para la asignación de pines de la FPGA		93
Anexo 2. Hoja técnica del circuito integrado OPA861		94
Anexo 3. Hoja técnica del circuito integrado OPA861		95

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Espectro de luz visible	6
<i>Figura 2.</i> Aplicaciones de tecnología VLC	7
<i>Figura 3.</i> One-chip type white LED (Fluorescence type).....	8
<i>Figura 4.</i> Multi-chip type white LED (Three primary colors type).....	9
<i>Figura 5.</i> Procedimiento de calibración Switched para establecer la tensión directa contra temperatura del horno.	10
<i>Figura 6.</i> Módulo del controlador LED. Un generador de impulsos de cuarzo controlado (QPG) prevé longitudes de pulso programables. U_{LED} es controlado por una fuente de alimentación estabilizada externa.	10
<i>Figura 7.</i> Elementos principales de una comunicación	12
<i>Figura 8.</i> Medio guiado	13
<i>Figura 9.</i> Medio no guiado	13
<i>Figura 10.</i> Unión de material semiconductor, estructura	15
<i>Figura 11.</i> Polarización de un diodo en forma directa e indirecta.....	15
<i>Figura 12.</i> Construcción del LED.....	16
<i>Figura 13.</i> (a) Curva característica de corriente en función del voltaje de un LED ..	16
<i>Figura 14.</i> Espectro de emisión de un LED de luz blanca longitud de onda vs potencia óptica	17
<i>Figura 15.</i> Símbolo de circuito de un amplificador operacional de propósito general	18
<i>Figura 16.</i> Diagrama de bloques simplificado de un amplificador operacional de propósito general	19
<i>Figura 17.</i> Amplificador comparador no inversor: cuando E_i está arriba de V_{ref} . $V_o = +V_{sat}$	21
<i>Figura 18.</i> Amplificador comparador inversor: cuando E_i está arriba de V_{ref} , $V_o = -V_{sat}$	21
<i>Figura 19.</i> Operacional de transconductancia	22
<i>Figura 20.</i> Modelo aproximado de amplificador de transductancia	23
<i>Figura 21.</i> Amplificador de transconductancia inversor	23
<i>Figura 22.</i> Amplificador de transconductancia no inversor	24
<i>Figura 23.</i> Tipos de lentes ópticos	25
<i>Figura 24.</i> Construcción de un fotodiodo	26
<i>Figura 25.</i> El fotón agrega la energía suficiente para que el electrón pueda pasar de la banda de valencia a la banda de conducción.....	27
<i>Figura 26.</i> Efecto fotoeléctrico	27
<i>Figura 27.</i> El espectro electromagnético. La longitud de onda (λ) es inversamente proporcional a la frecuencia (f)	28
<i>Figura 28.</i> Movimiento de electrones libres en estructura atómica.....	29
<i>Figura 29.</i> Unidades de medida para el voltaje	31
<i>Figura 30.</i> Símbolo de una fuente DC	31

<i>Figura 31.</i> Símbolo y notación de la resistencia.....	32
<i>Figura 32 .</i> Medida indirecta de potencia	33
<i>Figura 33 .</i> Medida directa de potencia	34
<i>Figura 34 .</i> Transferencia dinámica del LED	35
<i>Figura 35 .</i> Caracterización dinámica del LED y fotodiodo.....	36
<i>Figura 36 .</i> FPGA Cyclone III de Altera	36
<i>Figura 37 .</i> Pines de salida del puerto B del HSMC.....	37
<i>Figura 38.</i> Circuito de manejo para sistema de comunicación SISO	38
<i>Figura 39.</i> OTA Emisor Común	39
<i>Figura 40.</i> Implementación OTA – Amplificador de corriente.....	40
<i>Figura 41.</i> Circuito de transconductancia.....	41
<i>Figura 42.</i> Fuente de alimentación del amplificador de transconductancia OPA86044	44
<i>Figura 43.</i> Descripción del elemento en Proteus	44
<i>Figura 44.</i> Distribución de pines de un circuito integrado y vista PCB	45
<i>Figura 45.</i> Pasos para la realización de PCB.....	46
<i>Figura 46.</i> Esquema Ruteado en Labcenter Proteus 7.8 SP2 Ares.....	47
<i>Figura 47.</i> Generación de formato Gerber.....	47
<i>Figura 48.</i> Esquema de CAD/CAM.....	48
<i>Figura 49.</i> Importación de archivos Gerber.....	49
<i>Figura 50.</i> Selección de capas	50
<i>Figura 51.</i> Archivos importados selección de capas	51
<i>Figura 52.</i> PCB de transmisión en CircuitCAM.....	51
<i>Figura 53.</i> Especificación del software BoardMaster.....	52
<i>Figura 54.</i> ProtoMat S100	53
<i>Figura 55.</i> Vista frontal del PCB desde el software ARES	53
<i>Figura 56.</i> Vista frontal del PCB forma física.....	54
<i>Figura 57.</i> Vista posterior del PCB desde el software ARES	54
<i>Figura 58.</i> Vista posterior del PCB forma física	54
<i>Figura 59.</i> Diagrama de pines (polarización y entradas).....	55
<i>Figura 60.</i> Diagrama de pines (salidas para el LED).....	55
<i>Figura 61.</i> Circuito comparador	56
<i>Figura 62.</i> Diseño del receptor en ARES	57
<i>Figura 63.</i> Vista frontal de PCB de recepción en el software ARES	58
<i>Figura 64.</i> Distribución de pines (polarización, entradas y salidas).....	59
<i>Figura 65.</i> Diagrama para sistema MISO por medio guiado.....	59
<i>Figura 66.</i> Esquema de medio guiado en el software ARES.....	61
<i>Figura 67.</i> Visualización en 3D de la PCB de medio guiado	62
<i>Figura 68.</i> Distribución de pines (entradas y salidas)	62
<i>Figura 69.</i> Caracterización dinámica del LED - Corriente vs Voltaje	63
<i>Figura 70.</i> Curva voltaje vs corriente	64
<i>Figura 71.</i> Transferencia dinámica de LED	64
<i>Figura 72.</i> Curva de transferencia del LED con onda sinusoidal	65
<i>Figura 73.</i> Ancho de banda del LED.....	66
<i>Figura 77.</i> Caracterización Dinámica del LED y Fotodiodo con Labview.	66

<i>Figura 75.</i> Diagrama frontal para lectura de sensor	67
<i>Figura 76.</i> Diagrama de bloques del panel frontal	67
<i>Figura 77.</i> Caracterización dinámica de la distancia de la potencia óptica con lente y filtro óptico.....	68
<i>Figura 78.</i> Implementación VLC.....	68
<i>Figura 79.</i> Implementación para la caracterización con filtro y sin lente	69
<i>Figura 80.</i> Curva voltaje vs potencia a distancia de 5cm sin lente ni filtro.....	69
<i>Figura 81.</i> Curva voltaje vs potencia a distancia de 10cm sin lente ni filtro.....	70
<i>Figura 82.</i> Curva voltaje vs potencia a distancia de 15cm sin lente ni filtro.....	70
<i>Figura 83.</i> Curva voltaje vs potencia a distancia de 20cm sin lente ni filtro.....	71
<i>Figura 84.</i> Implementación para la caracterización con filtro y con lente azul.....	71
<i>Figura 85.</i> Curva voltaje vs potencia a distancia de 5cm con lente y filtro.....	72
<i>Figura 86.</i> Curva voltaje vs potencia a distancia de 10cm con lente y filtro.....	72
<i>Figura 87.</i> Curva voltaje vs potencia a distancia de 15cm con lente y filtro.....	73
<i>Figura 88.</i> Curva voltaje vs potencia a distancia de 20cm con lente y filtro.....	73
<i>Figura 89.</i> Característica no lineal del LED - línea azul	74
<i>Figura 90.</i> Datos recibidos en el fotodiodo	75
<i>Figura 91.</i> Datos sincronizados a) señal amarilla datos enviados de la FPGA b) señal azul datos recibidos por comunicación por luz visible	76
<i>Figura 92.</i> Datos recibidos en el fotodiodo	76
<i>Figura 93.</i> Datos sincronizados a) señal amarilla datos enviados de la FPGA b) señal azul datos recibidos por comunicación por luz visible.....	77
<i>Figura 94.</i> Ubicación de los diodos transmisores respecto al diodo receptor	79
<i>Figura 95.</i> Trama de datos multinivel.....	80
<i>Figura 96.</i> Trama de bits del transmisor y receptor.....	81
<i>Figura 97.</i> Duración del tiempo de bit en la trama	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Función de trabajo (Φ) para algunos materiales	28
Tabla 2. Asignación de pines	37
Tabla 3. Características y comparaciones entre amplificadores operacionales	38
Tabla 4. Muestra los diferentes tipos de CADs y sus respectivos fabricantes.....	43
Tabla 5. Set de brocas para el ProtoMat S100	52
Tabla 6. Datos distancia vs voltaje.....	78
Tabla 7. Valores de voltajes medidos que llegan al receptor.....	79
Tabla 8. Voltajes obtenidos en cada canal utilizando medio guiado	80
Tabla 9. Rubros del análisis y diseño.....	82
Tabla 10. Rubros de software.....	83
Tabla 11. Rubros desarrollo de hardware	83
Tabla 12. Rubros totales del proyecto.....	84

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Hoja técnica para la asignación de pines de la FPGA.....	93
Anexo 2. Hoja técnica del circuito integrado OPA861.....	94
Anexo 3: Paper en formato IEEE.....	96
Anexo 4: Paper en formato Ingenius.....	101

RESUMEN

La finalidad del trabajo es diseñar el modulador de intensidad para un sistema SISO y MISO. Se implementó un sistema SISO por modulación de encendido y apagado por luz visible, realizando un enlace punto a punto. Se realizó la caracterización del diodo LED para encontrar las mejores condiciones de trabajo. En la parte del transmisor se utilizó un diodo emisor de luz blanca (Light Emitting Diode, LED), de baja potencia y para el receptor un fotodiodo.

Se realizó la implementación de un circuito para un sistema MISO, el cual simula las condiciones que se presentan al utilizar diodos LED y permite obtener una señal multinivel a través de un medio guiado.

La implementación para los sistemas se realizó en la tarjeta FPGA (Field Programmable Gate Array) Cyclone III. Las pruebas y análisis de resultados para el sistema SISO se realizaron transmitiendo una trama de bits aleatoria a una velocidad de 10Kbps y para el sistema MISO se transmitió a una velocidad de 10Mbps, los datos transmitidos fueron visualizados en el osciloscopio para comprobar el adecuado funcionamiento de los sistemas.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to design the intensity modulator for SISO and MISO system, for which a SISO system was implemented by modulation on and off by visible light, making a point to point link. LED characterization was performed to find the best working condition. In Part transmitter emitting diode white light (Light Emitting Diode, LED), low power, and the receiver is a photodiode used.

Besides the implementation of a circuit for a MISO system, this simulates the conditions encountered when using LEDs and allows a multilevel signal by guiding means.

The implementation for the systems was performed in the FPGA (Field Programmable Gate Array) board Cyclone III. Testing and analysis of results for the SISO system is performed by transmitting a frame of random bits at a rate of 10Kbps, and the MISO system is transmitted at a rate of 10Mbps, the results were displayed within the oscilloscope which was proven system performance since the receiver recover the transmitted bits.

INTRODUCCIÓN

En este proyecto se realizó el modelamiento del diodo LED, se obtuvo diferentes curvas del diodo para ver las características de voltaje, corriente, intensidad y potencia que presenta. También se realizó el diseño e implementación de la interfaz de transmisión y recepción para un sistema de comunicación por luz visible.

El desarrollo del proyecto se divide en cinco capítulos los cuales son descritos a continuación.

En el primer capítulo se desarrollan los objetivos de la investigación, alcances, metodología de la investigación y justificación.

En el segundo capítulo consta el estado del arte con artículos científicos relevantes a la caracterización del diodo LED, fotodiodo y amplificadores de transconductancia aplicable al sistema de comunicación VLC.

En el tercer capítulo se describe el marco teórico correspondiente a los temas principales que servirán de referencia en la investigación.

En el cuarto capítulo se muestra el desarrollo del proyecto, parámetros que se deben cumplir al momento de la implementación tanto del emisor como del receptor, el análisis y resultados obtenidos así como las pruebas de funcionamiento.

En el quinto capítulo se detalla los costos tanto del modelamiento matemático, de software, hardware y el total de la investigación.

Finalmente, se presentan las conclusiones, recomendaciones, lista de referencias y anexos donde se destacan los resultados principales de la investigación durante su desarrollo.

Alcances

En este proyecto se realizará la construcción de la interfaz del transmisor y receptor entre la FPGA y el sistema de comunicación por luz visible para un sistema SISO (Single Input Single Output) y para un sistema MISO (Multiple Input Single Output) por medio guiado.

En el sistema SISO se realizará la implementación del transmisor mediante un amplificador de transconductancia y el receptor se lo efectuará con un amplificador comparador.

En el sistema MISO se realizará un circuito para obtener diferentes niveles de voltaje para así obtener la señal multinivel requerida para la interfaz.

Metodología de investigación

Para desarrollar esta propuesta de investigación se revisará las características de los diodos LED, fotodiodo, amplificadores de transconductancia, y circuitos comparadores.

También se investigará sobre los lentes y filtros ópticos. Se realizaran las pruebas en el módulo transmisor y receptor para de esta manera obtener sus curvas características del diodo LED y del fotodiodo.

Se diseñaran los circuitos de transconductancia y comparador para el sistema SISO y el circuito con divisores de voltaje para el sistema MISO. Los mismos que serán utilizados en la implementación con la FPGA.

Para realizar las pruebas de funcionamiento del sistema MISO se utilizará medios guiados para de esta manera mostrar el funcionamiento de la interfaz del emisor y receptor.

Las pruebas de funcionamiento del sistema SISO se realizarán utilizando un LED de luz blanca y un fotodiodo para de esta manera mostrar el funcionamiento de la interfaz del emisor – receptor, los resultados serán visualizados en el osciloscopio.

CAPÍTULO 1

ANÁLISIS DEL PROBLEMA

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general.

Modelizar el diodo LED, diseñar y construir la interfaz del transmisor y receptor para un sistema de comunicación de luz visible mediante un diodo de luz blanca.

1.1.2 Objetivos específicos.

- Caracterizar el LED de luz blanca obteniendo curvas corriente versus voltaje en DC.
- Determinar la frecuencia a la cual la intensidad luminosa del diodo es máxima.
- Determinar la ecuación característica de diodo de luz blanca en función de la corriente y voltaje.
- Determinar la potencia del diodo de luz blanca variando distancias.
- Determinar la máxima intensidad del diodo de luz blanca utilizando lentes convexos y filtro óptico azul.
- Diseñar y construir las interfaces de recepción y transmisión.
- Escribir artículo sobre transmisor y receptor para el sistema de comunicación con el formato IEEE y de la revista Ingenius.

1.2 Justificación del proyecto

La limitación por el espectro electromagnético ha obligado a la búsqueda de nuevos tipos de comunicaciones que no requieran autorización o causen interferencias en la banda de frecuencias licenciadas, para lo cual, se pretende utilizar el espectro visible de luz blanca ya que tiene varias ventajas sobre los sistemas de comunicaciones inalámbricas por ondas de radio como: el bajo consumo de energía (Moreno, 2010, pág. 62) y menor interferencia eléctrica (Maloney, Electrónica Industrial Moderna, 2006). La desventaja es el poco ancho de banda disponible del LED de luz blanca, que limita la velocidad de transmisión del sistema.

Un sistema de comunicación consta de 3 elementos principales: transmisor, medio y receptor. En la parte de transmisión y recepción en un sistema de comunicaciones tal como VLC se necesita conocer: longitud de onda, potencia, distancias óptimas y frecuencias máxima a la que va a trabajar el LED de luz blanca y el fotodiodo (S. Camatel, 2008), en la parte del medio de transmisión es importante caracterizar estos parámetros de manera que se pueda compensar los efectos no deseados del canal de transmisión con el objetivo de incrementar la velocidad de transmisión.

1.3 Alcances

En este proyecto se realizará la construcción de la interfaz del transmisor y receptor entre la FPGA y el sistema de comunicación por luz visible para un sistema SISO (Single Input Single Output) y para un sistema MISO (Multiple Input Single Output) por medio guiado.

En el sistema SISO se realizará la implementación del transmisor mediante un amplificador de transconductancia y el receptor se lo efectuara con un amplificador comparador.

En el sistema MISO se realizará el acoplamiento para los diferentes niveles de voltaje para la interfaz utilizando divisores de voltaje obteniendo diferencias de potencial.

1.4 Metodología de investigación

La primera etapa del proyecto consiste en la investigación teórica, por lo tanto, aquí se obtendrán los antecedentes, la información y la documentación necesaria presentada en el capítulo 2, referente al tema planteado, además, se investigarán las características de los amplificadores de transconductancia, LED, fotodiodo, lentes y filtros ópticos. Luego se procederá a revisar las curvas características del módulo transmisor y fotodiodo.

Para realizar las pruebas de funcionamiento del sistema MISO se utilizará un medio guiado para de esta manera mostrar el funcionamiento de la interfaz del emisor y receptor.

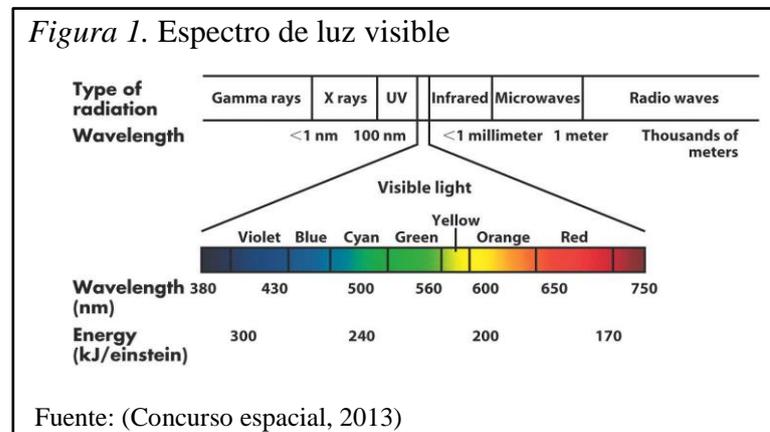
Para realizar las pruebas de funcionamiento del sistema SISO se utilizará un led de luz blanca y un fotodiodo para de esta manera mostrar el funcionamiento de la interfaz del emisor – receptor, los resultados serán visualizados en el osciloscopio.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

La tecnología VLC es bastante prometedora debido a que el espectro de radio frecuencia se satura cada vez más. Obviamente existen ciertos obstáculos técnicos que deben ser superados a fin de que esta tecnología se pueda establecer, tales como: interferencia óptica y de otras fuentes luminosas, ancho de banda de los LED de iluminación, entre otros. La tecnología LED ha hecho constancia en iluminación pero se puede explotar otras aplicaciones como la comunicación por luz emitida por diodos utilizando al máximo su frecuencia de operación (Fath, Di Renzo, & Haas, 2010, p. 990).

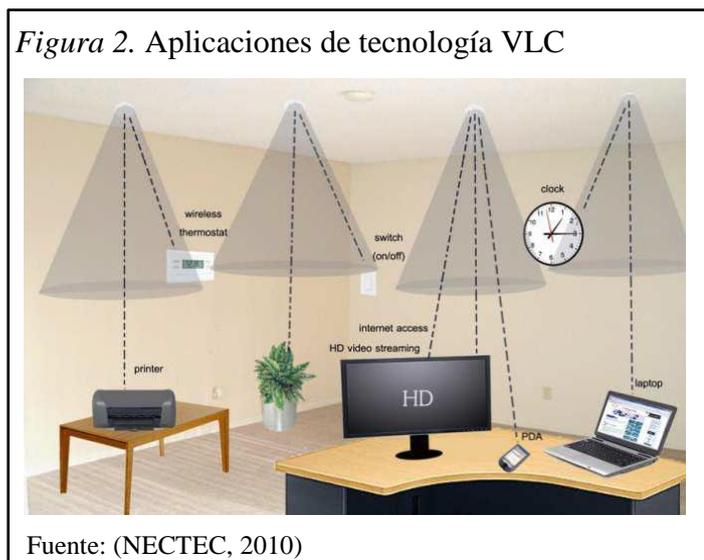
La tecnología VLC utiliza el espectro de luz visible que abarca longitudes de onda de 380 nm a 750 nm como medio de comunicación, como lo indica la figura 1. (Cen L, 2010, p. 2). La luz visible es la forma en que la radiación electromagnética es interpretada por el cerebro humano y los ojos no pueden percibir ninguna diferencia en la iluminación. (Pohlmann, 2013, p. 1)



La evolución de los sistemas de comunicaciones ópticas es gracias a la disponibilidad de fuentes de radiación luminosa. (Boquera, 2005, p. 1). Para llevar a cabo este tipo de comunicación por luz, se utiliza diodos estándar, gracias al bajo consumo de energía (Moreno, 2010, p. 62), que tienen en comparación a otros dispositivos en cuanto a la iluminación y tiene menor interferencia eléctrica (Maloney, *Electrónica Industrial Moderna*, 2006, p. 433).

Según Hass: “Es muy simple realizar una comunicación por luz, si el LED está encendido tenemos un 1 digital, si el mismo está apagado tenemos un 0 digital”, esto da estados de ON/OFF (activado y desactivado) de respuesta rápida, lo que da buenas oportunidades para la transmisión de datos (Haas H., 2011).

A medida que la eficiencia de estos dispositivos aumenta y su coste disminuye, hay predicciones de que se convertirán en la principal fuente para la iluminación general.



La iluminación mediante LED's con luz blanca son cada vez más eficientes, tienen una alta fiabilidad y se pueden incorporar en muchas aplicaciones (figura 2), tales como:

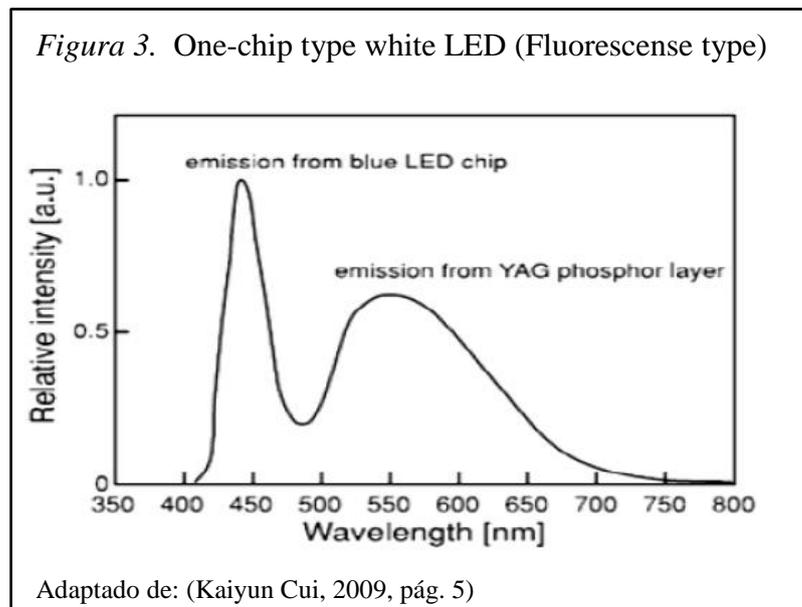
1. Comunicaciones entre enlaces punto a punto.
2. Visualización de información mediante letreros y placas indicadoras instaladas en aeropuertos, museos y otros ambientes.
3. Iluminación y comunicaciones, esto debido a que el LED puede iluminar y a la vez transmitir información en cualquier ambiente.
4. Posicionamiento y comunicaciones; ya que VLC permite la transmisión de información y posicionamiento como por ejemplo de una persona dentro de un edificio.
5. Comunicación en entornos peligrosos en donde la radiofrecuencia es potencialmente peligrosa.

6. Comunicaciones submarinas entre buzos y vehículos operados a distancia. (O'Brien, y otros, 2008, p. 2) (Kavehrad, 2010, p. 71)

Existen dos tipos de LED's de luz blanca utilizados en la iluminación:

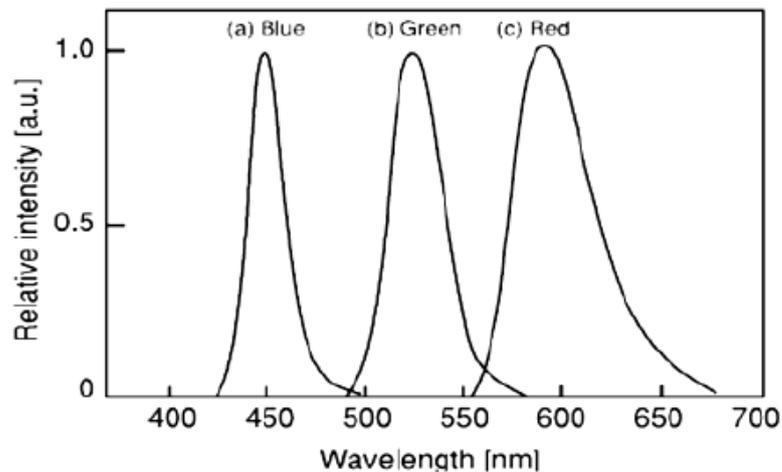
1. Emisor azul en combinación con un fósforo que emite luz amarilla. Este enfoque es atractivo para la iluminación general, debido a su menor costo y complejidad en comparación con el dispositivo de tres emisores; sin embargo, la velocidad de conmutación es limitada y se encuentra en un rango entre 4 - 5 Mbps, debido al tiempo de caída que genera la presencia de fósforo como lo indica la figura 3.

Este efecto se puede mejorar filtrando la componente azul de la señal recibida, permitiendo obtener tasas de transmisión de hasta 100 Mbps con codificaciones OOK.



2. Los dispositivos que utilizan distintos emisores rojo, verde y azul formando uno solo, poseen velocidades de conmutación más elevadas y la capacidad de generar diferentes tonalidades, como muestra la Figura 4; sin embargo, son mucho más costosos que los LED's fosforescentes. (Sánchez, 2012, p. 13) (Le-Minh, Ghassemlooy, O'Brien, & Faulkner, 2010, p. 1)

Figura 4. Multi-chip type white LED (Three primary colors type)



Fuente: (Kaiyun Cui, 2009, pág. 5)

El despliegue de una sola lámpara en los experimentos resultó en longitudes de enlace relativamente cortos, sin embargo, la iluminancia en Rx es el parámetro de diseño más relevante, no sólo para la iluminación, sino también para el rendimiento de la transmisión. Delante del fotodiodo se colocó un filtro azul con una longitud de onda de 450 nm ya que la luz azul concentra mayor cantidad de energía, para suprimir el componente fosforescente de la luz blanca.

Para las mediciones, se consideraron dos detectores de silicio, uno de ellos era un APD, y el otro un diodo PIN con una lente de polímero integrado que proporciona un amplio campo de visión.

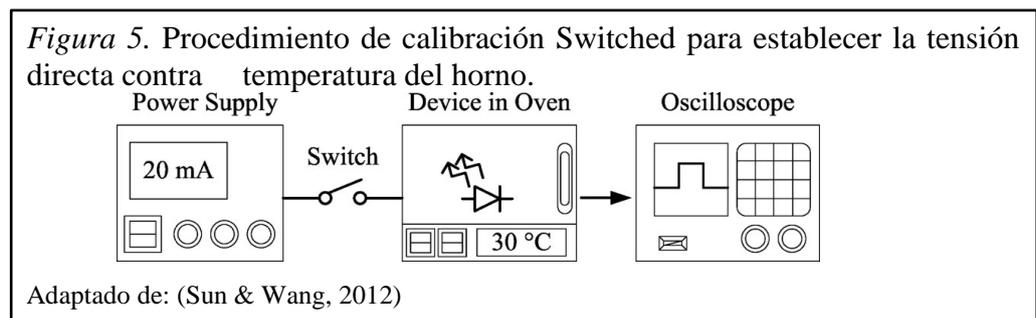
A bordo con el detector PIN, hubo una etapa de transimpedancia con bajo nivel de ruido y un amplificador de entrada. Después de la detección y amplificación, la señal pasó por un filtro paso bajo de orden superior, que tiene una frecuencia de corte de 150 MHz (DPA) y 100 MHz (PIN).

El circuito conductor del LED o driver se compone de un sistema de control para el diodo LED, y un fotodetector convencional para mantener la potencia eléctrica del LED. Las características del LED, basados en mediciones eléctricas y ópticas que con la variación del voltaje de entrada, fueron construidos para ser una referencia de búsqueda de la caracterización del LED, que sirve como un sistema para analizar las características del LED y el fotodiodo.

Para acoplar niveles de voltaje con FPGA - LED – FOTODIODO y verificación de los mismos. Se encuentra la máxima corriente y la tasa mínima de cambio del flujo radiante Φ conducido por los conductores del LED. (Sun & Wang, 2012, pág. 1)

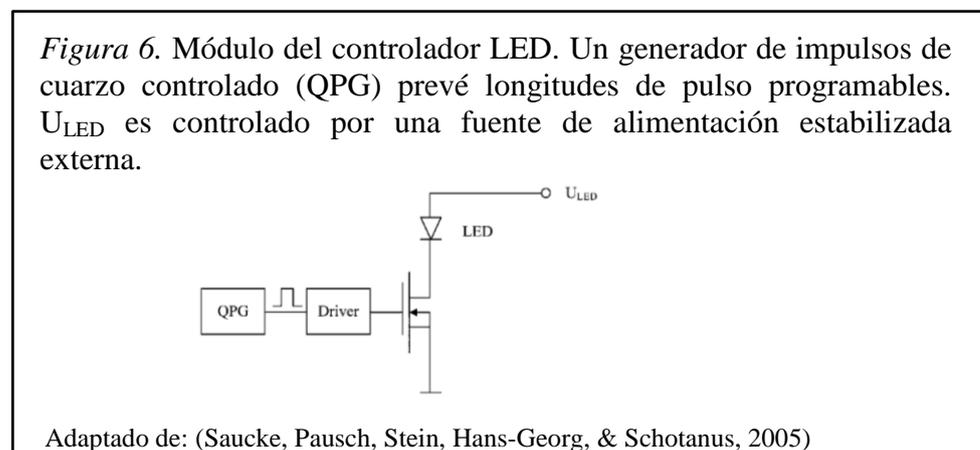
La configuración de la medición se ilustra en la figura. 5. En la medición de calibración, el LED se colocó en un horno de temperatura controlada de precisión para determinar la temperatura del dispositivo y de la salida. La temperatura varió de 5 ° C (273.5K) a 85 ° C (358 K). La medición de calibración se realizó en un modo de conmutación con un ciclo de trabajo muy pequeña, por lo tanto, el calor generado por la corriente de inyección era insignificante.

Para estabilizar la potencia de salida de iluminación de un LED, los métodos de control convencionales incluyen un fotodiodo para la detección de potencia y un circuito de accionamiento para ajustar la cantidad de corriente de accionamiento para el LED basado en el resultado detectado por el fotodiodo. (Sun & Wang, 2012, p. 3)



2.1 Generación de pulsos para el LED con MOSFET

En la figura 6 el módulo de controlador de LED genera impulsos rectangulares de tensión constante y controlada.



El ancho de pulso se puede establecerse para un máximo de la conmutación de LED. Un controlador de voltaje programable independiente proporciona la estabilizada tensión de impulso. (Saucke, Pausch, Stein, Hans-Georg, & Schotanus, 2005, p. 2)

2.2 Adquisición de datos al fotodiodo

El detector o fotodiodo se excita con la generación de pulsos de luz en el LED, se mide la amplitud del pulso y el espectro de la señales de los detectores con un analizador multicanal digital (DMCA). El DMCA tiene una conformación mayor que la longitud del pulso LED.

La sincronización del sistema se asegura de que el espectro del pulso no adquiera un desplazamiento o desfase de la señal desde el emisor hasta el receptor como resultado de la señal eléctrica enviados por un canal de transmisión con su respectivo retardo. Los espectros medidos incluyeron picos de voltaje en el LED causados por la cantidad de luz que excita el fotocátodo, así como el espectro de referencia de la fuente de luz. Las mediciones fueron controladas por software. El conjunto de datos resultantes se componen de varios datos los cuales se miden consecutivamente dando una función de transferencia. (Saucke, Pausch, Stein, Hans-Georg, & Schotanus, 2005, p. 3)

Técnicas más sofisticadas podrían aumentar drásticamente las tasas de transmisión y recepción de datos de VLC, tales como el uso paralelo de los LEDs utilizando matrices (donde cada LED transmite un flujo de datos diferente), otra técnica es el utilizar LEDs de diferentes colores (tales como rojo verde y azul para alternar la frecuencia de la luz cada frecuencia puede ser codificada con un canal de datos diferente o con un mismo canal) (Condliffe, 2011, p. 5).

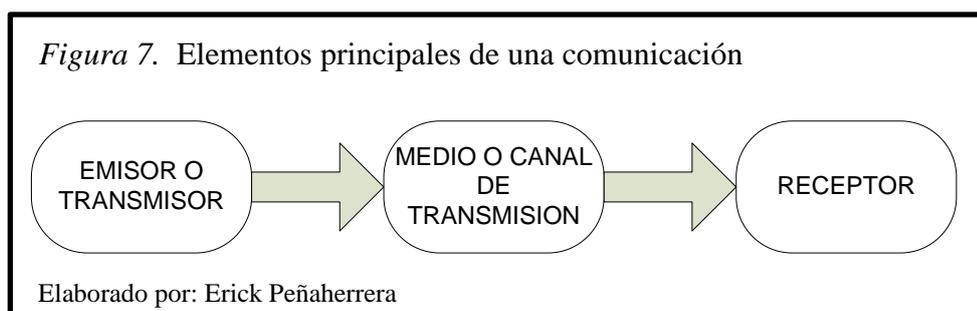
CAPÍTULO 3

MARCO TEÓRICO

Una de las dificultades en la comunicación por luz visible es el poco ancho de banda del que disponen los LED para iluminación, lo cual limitaría la velocidad de transmisión de un sistema. Adicionalmente, los LED comerciales tienen una capa de fósforo lo cual limita aún más su ancho de banda, de allí que es necesario introducir filtros ópticos.

3.1 Elementos que conforman la comunicación

Un sistema de comunicación es el proceso por el cual la información se transfiere de un lugar fuente a otro destino. Este proceso consta de los siguientes elementos:



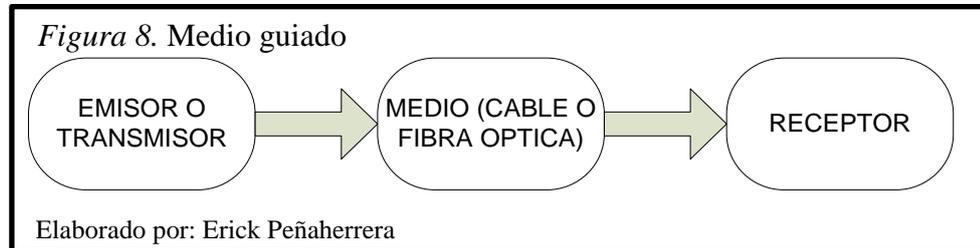
Los elementos principales para una comunicación, la especificación detallada de cada elemento se muestra a continuación:

Emisor o transmisor. Es el subsistema electrónico que recibe la señal procedente del transductor de entrada y la acondiciona para ser transmitida. La señal procedente del transductor no puede ser transmitida directamente y requiere ser tratada previamente.

Medio o canal de transmisión. Es el medio físico por el cual viaja la señal procedente del emisor con destino al receptor. Es frecuente clasificar los medios de transmisión en guiados y no guiados. Según esta clasificación los medios pueden ser por ejemplo:

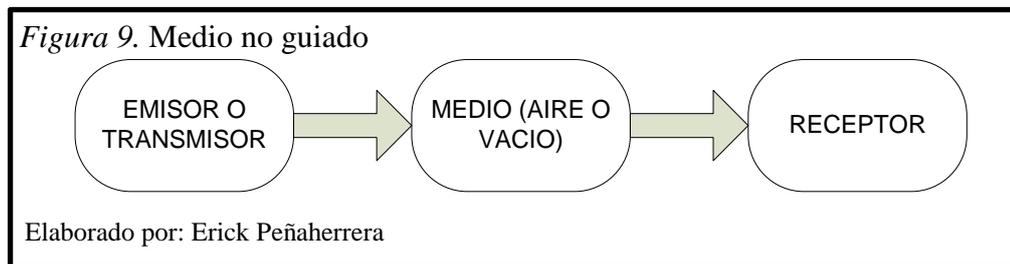
Guiados: Establecen una comunicación punto a punto entre emisor y receptor como se representa en la figura 8. Los medios más utilizados son:

1. De tipo eléctrico: cable bifilar, coaxial, guía de onda, etc.
2. De tipo óptico: fibra óptica.



No guiados: La comunicación se representa en la figura 9 y algunos tipos son:

1. Medio radioeléctrico (vacío, aire, etc.)
2. Medio acústico
3. Ondas de luz
4. Ondas de presión sonora



Receptor: Subsistema electrónico que recibe una señal procedente del medio de transmisión y la acondiciona para poder ser posteriormente interpretada por el transductor de salida. Con la frecuencia, la atenuación que provoca el medio de transmisión y la acondiciona para posteriormente ser interpretada por el transductor.

Las consideraciones generales para la comunicación son:

- Mensaje a transmitir: audio (voz, música), video (imágenes en movimiento), datos (información de control), etc.
- Tipo de procesado que ha sufrido la señal original para ser transmitida: analógica (modulación lineal, o angular) y digital (modulación de pulsos, o con señales digitales).

- Topología: emisor receptor único sin multiplexaje de comunicación, o emisor receptor múltiples con multiplexaje de comunicación (Sanchis, 2004)

3.2 Fotoemisor o fuente óptica

Es un dispositivo que emite radiación en la región del espectro correspondiente a las longitudes de onda ópticas. Esta región del espectro comprende desde 10nm a 390 nm (ultravioleta), de 390 nm a 760 nm (luz visible) y desde 760 nm infrarrojo, para formar parte de un sistema de comunicaciones, requiere las siguientes propiedades:

- Potencia: Suficiente para que no tenga pérdidas del medio de transmisión.
- Emisión: Longitudes de onda de interés (luz visible).
- Disponibilidad: Porcentaje de tiempo que un sistema es capaz de realizar las funciones para las que está diseñado.
- Seguridad: Se puede limitar a transferir datos de un lugar a otro.
- Eficiencia: Las lámparas LED son eficientes con el uso de la energía. Porque son baratas y pueden transmitir datos a velocidades que alcanzan los gigabits por segundo.
- Capacidad: el espectro de luz para transmitir datos es 10 mil veces más grande que el espectro actual de ondas de radio para comunicaciones inalámbricas. Y como la luz blanca puede estar en cualquier lado puede cubrir la demanda de datos.
- Costo: Viabilidad económica del sistema en el que vaya a ser integrado. (Boquera, 2005)

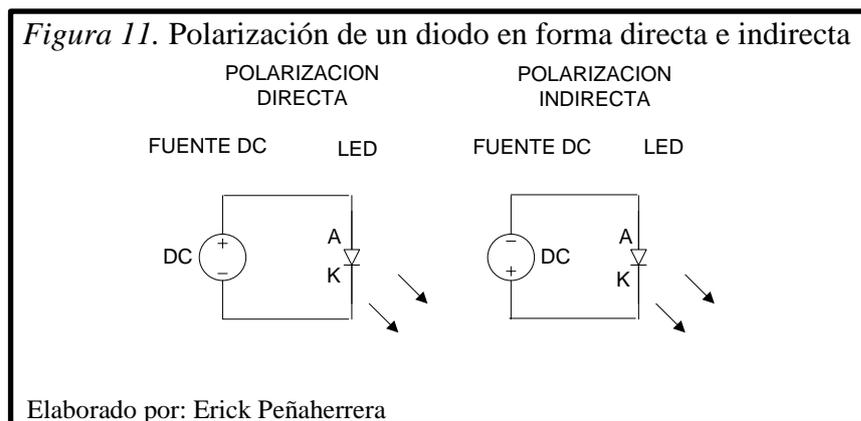
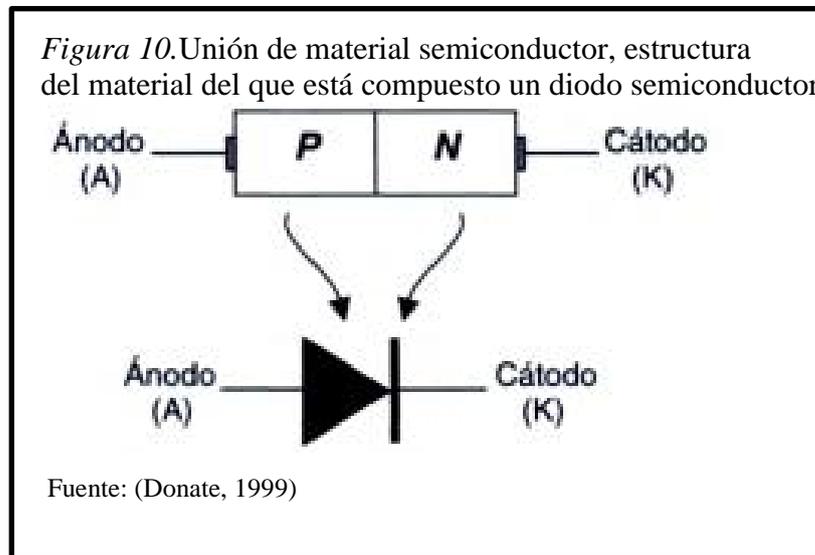
3.3 Diodo LED

Un diodo emisor de luz (LED) "Diodo Emisor de Luz", es un diodo de unión p-n, es apto para emitir luz visible cuando se energiza. En cualquier unión p-n cuando existe polarización directa hay una recombinación entre huecos y electrones y este proceso requiere energía que es poseída por el electrón libre y se crea la corriente en el LED. (Boylestad R. L., 2003)

"En todas las uniones de semiconductores cierta cantidad de energías se desprenderá en forma de calor y en otra forma de fotones" (Boylestad R. L., 2003)

3.3.1 Funcionamiento.

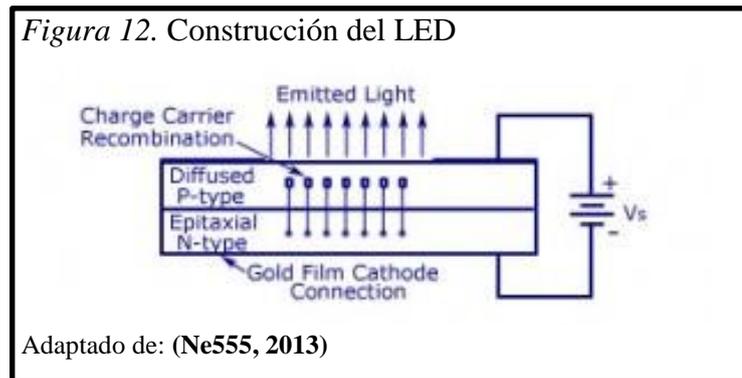
Para que el LED emita radiación óptica (luz) debe ser polarizada en forma directa. La polarización directa rebaja la barrera de potencial de la unión, permitiendo la circulación de los portadores mayoritarios (electrones libres de la zona n pasan a la zona p). Cuando un electrón alcanza la zona p, donde existe una gran concentración de huecos en la banda de valencia, pasa a ocupar uno de estos huecos, la diferencia de energías entre el nivel original del electrón en la banda de conducción y el nivel que este ha ocupado en la banda de valencia es emitida como fotón. (Boquera, 2005)



La polarización directa se comporta como un interruptor cerrado idealmente o sino entrega el voltaje de polarización y cuando se encuentra en polarización inversa, la

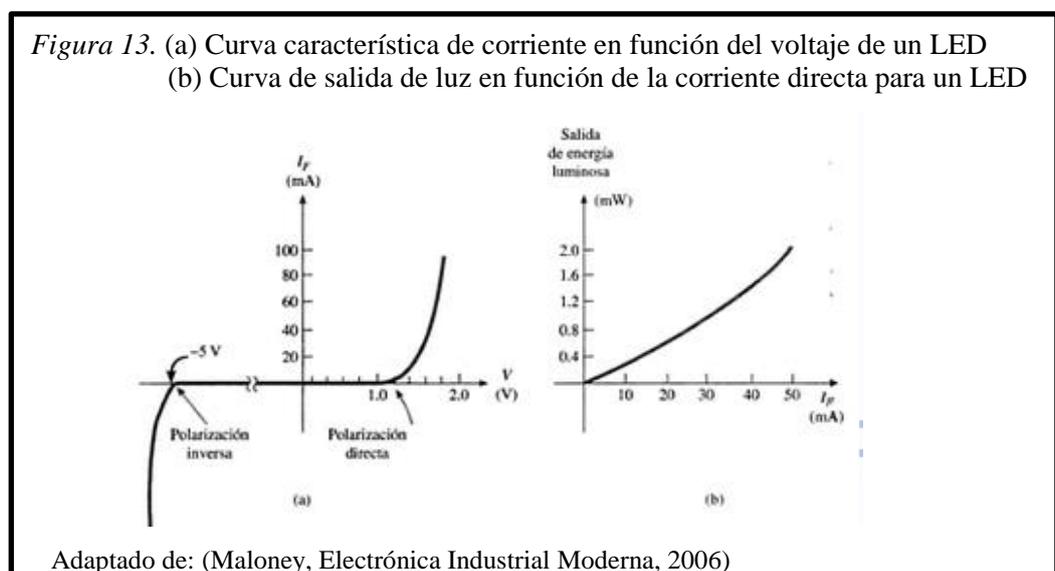
tensión del ánodo se hace negativa con respecto a la del cátodo y bloquea el paso de corriente. (Donate, 1999, p. 22)

La eficiencia cuántica interna, parámetro fundamental de un material semiconductor como se muestra en la figura 12, proporciona la fracción de pares electrón –hueco que se recombinan radiativamente con un voltaje necesario para que realice la donaciones de electrones al material tipo p y genere de luz. (Boquera, 2005, p. 10)



3.3.2 Características.

Los LEDs son fabricados de silicio como los diodos rectificadores. Por lo general tienen voltajes de polarización directa del rango de 1.0 a 2.2 V. Cuando trabaja en polarización inversa que son mucho menores que los de un diodo rectificador de silicio. La figura 13 (a) muestra la característica de voltaje-corriente de un LED típico. La figura 13 (b) muestra la relación entre la salida de energía luminosa y la corriente directa para un LED particular.



Las características del LED son:

- Ancho de banda del LED depende del material del componente
- La amplitud del LED depende de la intensidad de la corriente
- El funcionamiento del LED está ligado a la temperatura
- Los LEDs son componentes de relativa lentitud (menores a 1Gb/s)
- Los LEDs poseen un rango espectral ancho
- Los LEDs son baratos

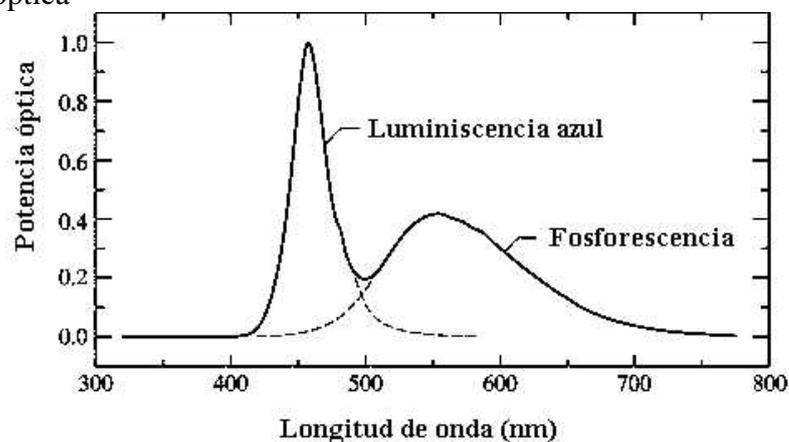
3.3.3 Diodos de luz blanca.

La luz blanca se creó para la eficiencia con materiales semiconductores, los LEDs de luz blanca son diodos azules, que emiten luz a una longitud de onda de unos 460nm, recubiertos con una capa de derivado de fosforo absorben la luz y la reemiten a distintas longitudes de onda en el espectro visible, generando luz blanca figura 14. (Cardells, 2009, p. 3)

Para obtener luz blanca de un LED, se usa fósforo combinado con LED azul. El fósforo generalmente esta incrustado en la cubierta epoxi que encapsula al semiconductor, protegiéndola y actuando como un sistema primario de óptica para la emisión de luz.

Donde la potencia óptica es máxima, es cuando la longitud de onda es de 460 nm “Luz Azul”.

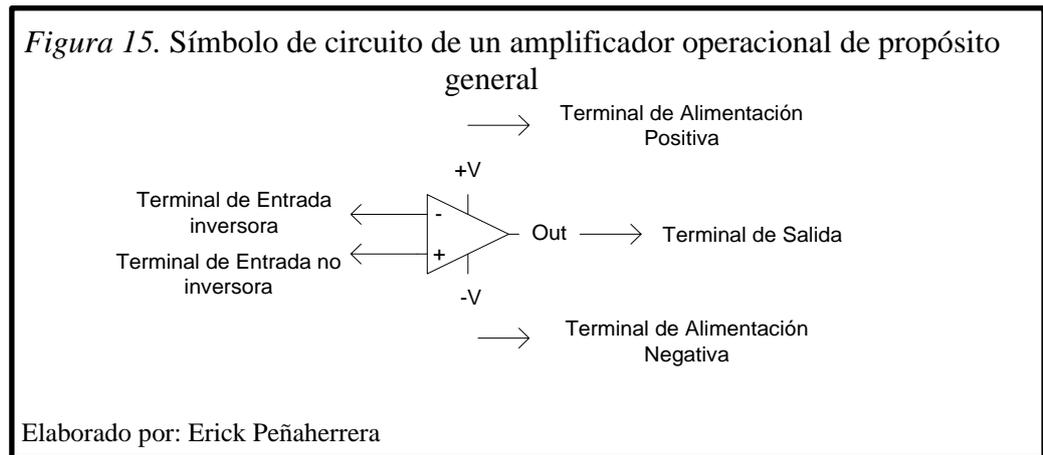
Figura 14. Espectro de emisión de un LED de luz blanca longitud de onda vs potencia óptica



Fuente: (Cardells, 2009)

3.4 Amplificadores operacionales

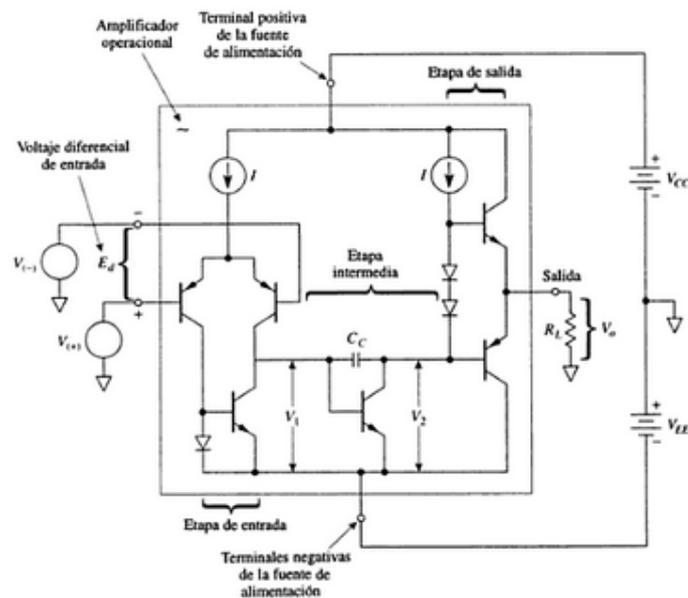
Un amplificador operacional representado en la figura 15, op-amp, es un amplificador diferencial de muy alta ganancia que posee alta impedancia de entrada y baja impedancia de salida. Se utiliza para proporcionar cambios en la amplitud de voltaje (amplitud y polaridad), en los osciladores, en circuitos de filtros y en muchos circuitos de instrumentación. (Boylestad R. L., 2003)



Un amplificador operacional para propósito general consiste en una etapa de entrada que tiene dos terminales; una etapa de salida que cuenta con un terminal de salida; y una etapa intermedia mediante la que procesa la comparación entre las dos entradas.

Como se muestra en la figura 16 que una fuente DC se conecta a las terminales de alimentación del amplificador y, por lo tanto, las señales de entrada, $V (+)$ y $V (-)$, pueden ser positivas, negativas o cero. El voltaje de salida obtenido se mide por medio de la resistencia de carga R_L , la cual se conecta entre la terminal de salida del amplificador operacional y la tierra. EL voltaje de salida, V_m depende de las señales de entrada y de las características del amplificador. (Robert F., 1999)

Figura 16. Diagrama de bloques simplificado de un amplificador operacional de propósito general



Fuente: (Robert F., 1999)

3.4.1 Etapas de amplificación.

3.4.1.1 Etapas de entrada: amplificador diferencial.

La etapa de entrada del amplificador operacional de la figura 16 se conoce como amplificador diferencial. Su impedancia de entrada es muy elevada y su ganancia de voltaje también es grande. Cuando se aplican las señales de entrada $V(+)$ y $V(-)$ el voltaje diferencial, E_d se amplifica en esta etapa y aparece como el voltaje de salida V_1 . (Robert F., 1999)

3.4.1.2 Etapa intermedia: desplazador de nivel.

La señal de voltaje V_1 a la salida del amplificador diferencial de la figura 16 se acopla directamente a la entrada de la etapa intermedia del desplazador de nivel. En esta etapa se lleva a cabo dos funciones. La primera consiste en desplazar el nivel del voltaje de salida. La segunda permite que pase la señal por V_1 casi sin modificación y convertirse en la señal de entrada V_2 de la etapa de salida. (Robert F., 1999)

3.4.1.3 Etapa de salida: en contrafase.

El Voltaje de salida V_2 de la etapa intermedia se acopla directamente a la etapa de salida. La etapa de salida que más comúnmente se utiliza es la de la configuración del transistor pnp-npn en contrafase. Usar un circuito de contrafase como etapa final permite que el amplificador operacional tenga una resistencia de salida muy baja. Como se muestra en la figura 16, la resistencia de carga R_L se conecta entre la terminal de salida y tierra para obtener el voltaje de salida V_o . (Robert F., 1999)

3.4.1.4 Encapsulado.

El amplificador operacional se fabrica en un microcircuito de silicio y se encapsula. Mediante finos alambres se conecta al microcircuito con terminales externas que salen de un encapsulado de metal, plástico o cerámica.

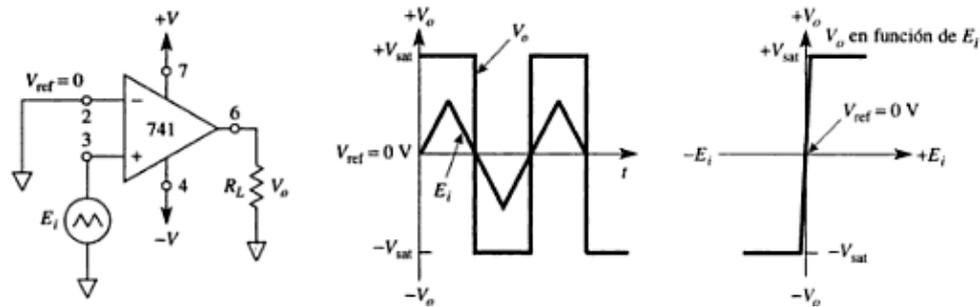
3.4.2 Amplificadores operacionales de propósito general.

3.4.2.1 Detectores de cruce por cero.

El amplificador operacional de la figura 17 funciona como comparador. Su entrada (+) contrasta el voltaje E_i con un voltaje de referencia de 0 V ($V_{ref} = 0V$). Cuando E_i es mayor que V_{ref} , V_o es igual a $+V_{sat}$. Esto se debe a que est voltaje en la entrada (+) es más positivo que el voltaje de entrada (-).

La polaridad de V_o indica si E_i está arriba o debajo de V_{ref} . La transición de V_o señala cuando E_i cruza la referencia y en qué dirección lo hace. (Robert F., 1999)

Figura 17. Amplificador comparador no inversor: cuando E_i está arriba de V_{ref} . $V_o = +V_{sat}$

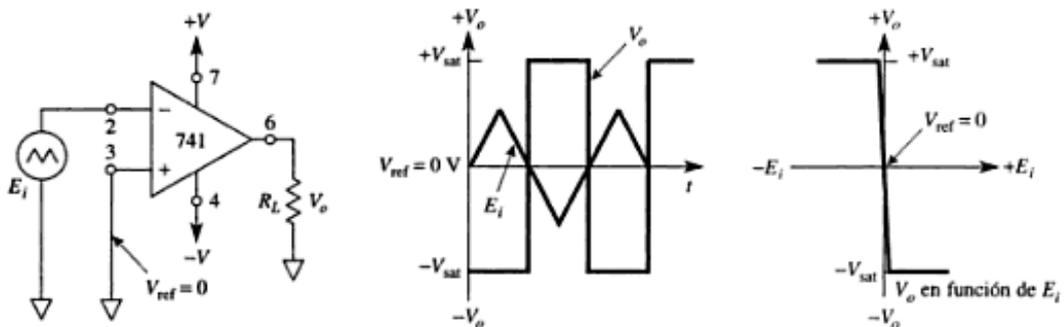


Fuente: (Robert F., 1999)

La entrada (-) del amplificador operacional de la figura 18 compara E_i con un voltaje de referencia de 0 V ($V_{ref} = 0$ V). Este circuito es un detector inversor de cruce por cero. Las formas de onda de V_o en función del tiempo y V_o en función de E_i pueden explicarse mediante:

- Si E_i está por encima de V_{ref} , V_o es igual a $-V_{sat}$.
- Cuando E_i cruza la referencia y pasa a positivo V_o realiza una transición hacia el ciclo negativo y pasa de $+V_{sat}$ a $-V_{sat}$.

Figura 18. Amplificador comparador inversor: cuando E_i está arriba de V_{ref} , $V_o = -V_{sat}$



Fuente: (Robert F., 1999)

3.4.2.2 Amplificador de transconductancia.

A este amplificador también se le conoce como fuente controlada por tensión. La condición de transferencia es:

Ecuación 1. Condición de transferencia

$$I_o = g_m V_f$$

Dónde:

I_o = corriente de salida

g_m = La transconductancia de un amplificador

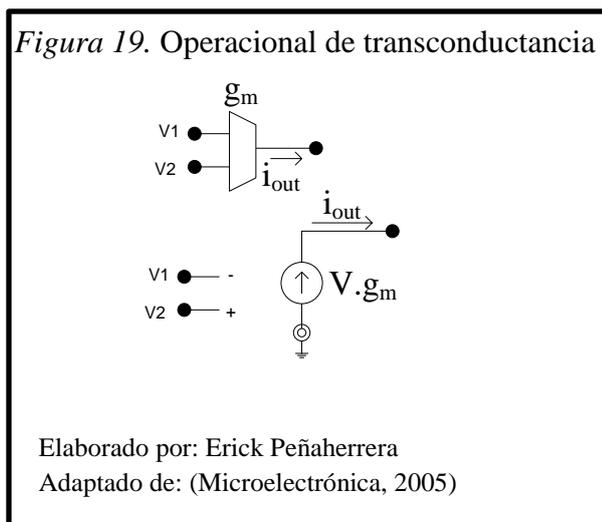
$V_f = V^+ - V^-$

V^+ = Voltaje de entrada positivo en el operacional

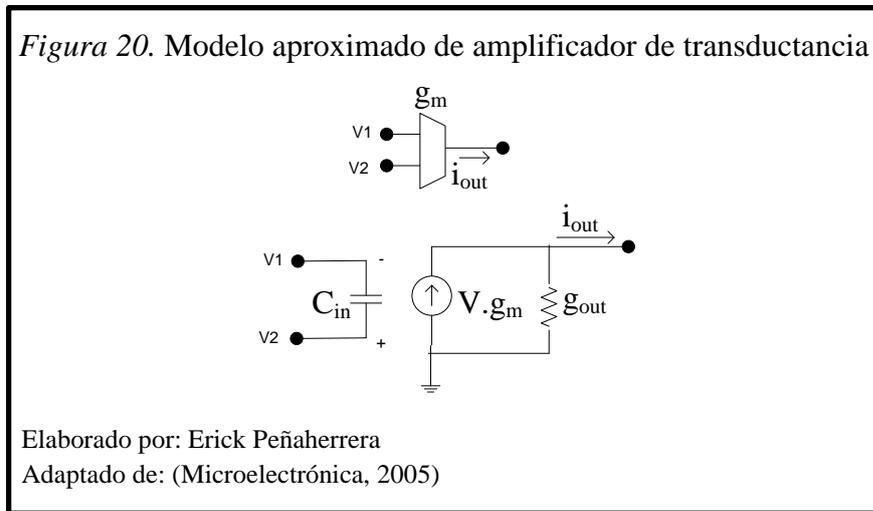
V^- = Voltaje de entrada negativo en el operacional

El amplificador de corriente ideal y el de transconductancia tienen un generador de corriente ideal en la salida y por lo tanto esta corriente de salida no está afectada por la tensión de salida que se desarrolle en la carga. (Vega, 2006, p. 220)

Este amplificador figura 19 es un dispositivo con entrada diferencial y una única salida con transconductancia finita g_m , la impedancia de entrada infinita e impedancia de salida infinita. (Microelectrónica, 2005, p. 4)

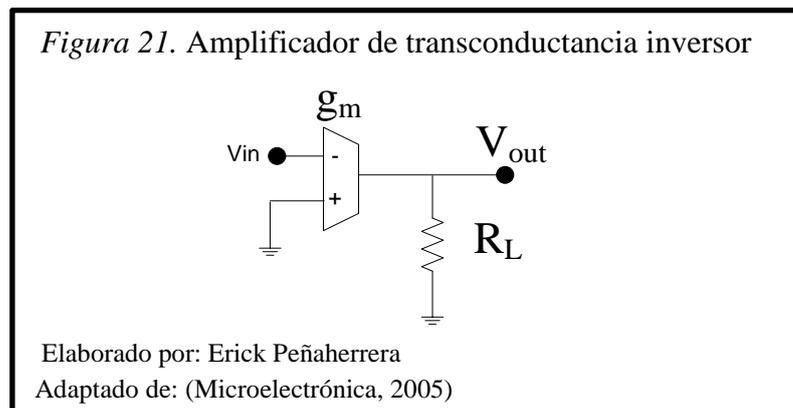


En el amplificador de transconductancia figura 20 un modelo más aproximado incluye la capacidad de entrada y la admitancia de salida y mantiene el modelo anterior.



3.4.2.3 Amplificador inversor.

Un amplificador de transconductancia actúa como amplificador inversor, sin emplear realimentación externa comparando con un amplificador de propósito general y de la misma manera que la señal ingresa a la entrada negativa del amplificador como se muestra en la figura 21. (Microelectrónica, 2005)



Donde los cálculos son:

Ecuación 2. Ganancia del amplificador inversor

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -g_m * R_L$$

Ecuación 3. Relación de impedancia del amplificador inversor

$$Z_i = \infty$$

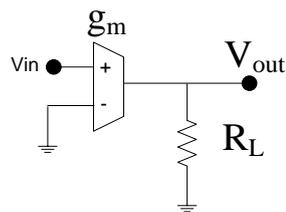
Ecuación 4. Relación de impedancia con carga del amplificador inversor

$$Z_{out} = R_L$$

3.4.2.4 Amplificador no inversor.

Un amplificador de transconductancia actúa como amplificador no inversor, sin emplear realimentación externa, comparando con un amplificador de propósito general y de la misma manera que la señal que ingresa a la entrada positiva del amplificador como en la figura 22.

Figura 22. Amplificador de transconductancia no inversor



Elaborado por: Erick Peñaherrera

Donde los cálculos son:

Ecuación 5. Ganancia del amplificador no inversor

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = g_m * R_L$$

Ecuación 6. Relación de impedancia del amplificador no inversor

$$Z_i = \infty$$

Ecuación 7. Relación de impedancia con carga del amplificador inversor

$$Z_{out} = R_L$$

(Microelectrónica, 2005, p. 3)

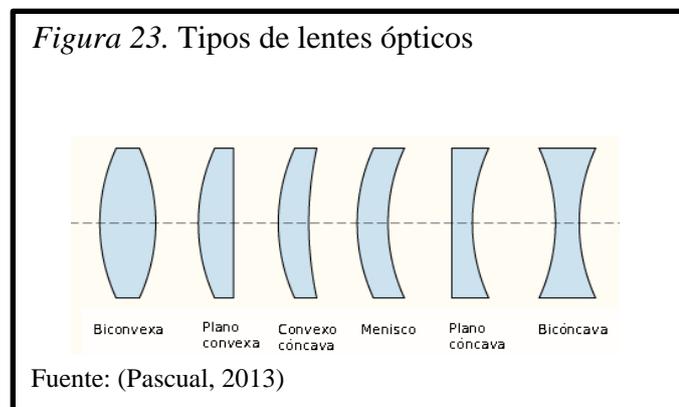
3.5 Óptica

La óptica es la ciencia que estudia los orígenes, la propagación y la detección de luz, no solamente define a la luz sino la radiación electromagnética visible, sino también la infrarroja y la ultravioleta. Para propósito general se debe saber que la luz es una onda electromagnética.

3.6 Lentes

Una lente sencilla es un trozo circular y delgado de material transparente, normalmente de vidrio, cuyo espesor varía del centro al borde.

Las dos superficies de una lente pueden ser planas, cóncavas o convexas, existen dos tipos básicos de lentes: lentes convergentes (positivas) y divergentes (negativa). Las lentes biconvexas y plano-convexa son siempre convergentes; las lentes plano cóncava y bicóncava son siempre divergentes y las lentes convexo cóncava y menisco pueden ser convergentes o divergentes dependiendo la curvatura relativa de sus superficies cóncava y convexa. (Cromer, 2007)



3.7 Detectores de luz

Hay dos dispositivos que se suelen usar para detectar la energía luminosa en los receptores de comunicación con fibra óptica: los PIN (tipo p-tipo n intrínseco) y los APD (fotodiodo de avalancha).

3.7.1 Diodos PIN

Un diodo PIN es un fotodiodo de agotamiento, y es probable que sea el dispositivo más usado como detector de luz en los sistemas de comunicaciones.

La figura 24 muestra el esquema básico de un fotodiodo. Una capa dopada muy ligeramente (casi pura o intrínseca) del material semiconductor tipo n se encierra entre la unión de las dos áreas de contacto tipo p y tipo n, muy dopadas como se muestra en la figura 25. La luz entra al dispositivo de una ventana muy pequeña y cae sobre el material intrínseco carente de portadores. El material intrínseco se hace lo suficientemente grueso como la mayoría de los fotones que entren al dispositivo queden absorbidos por esta capa. El fotodiodo funciona al contrario que un LED. La mayoría de los fotones quedan absorbidos por electrones de la banda de valencia del material intrínseco. Los fotones agregan la energía suficiente para generar portadores en la región de agotamiento, y permiten el paso de corriente por el dispositivo. (Tomasi, 2003, p. 351)

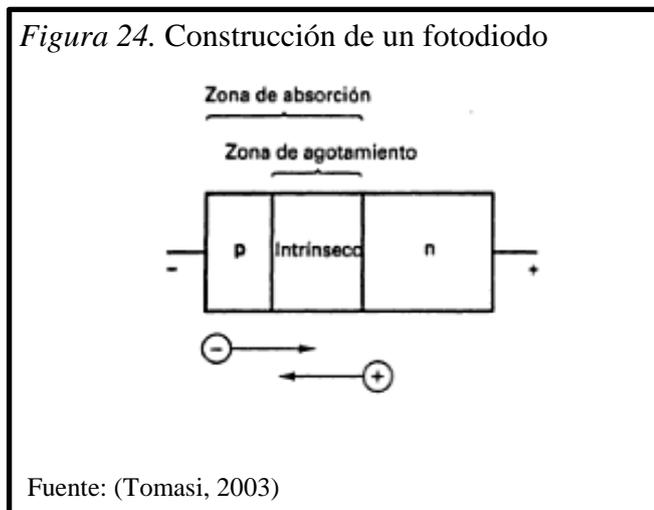


Figura 25. El fotón agrega la energía suficiente para que el electrón pueda pasar de la banda de valencia a la banda de conducción.



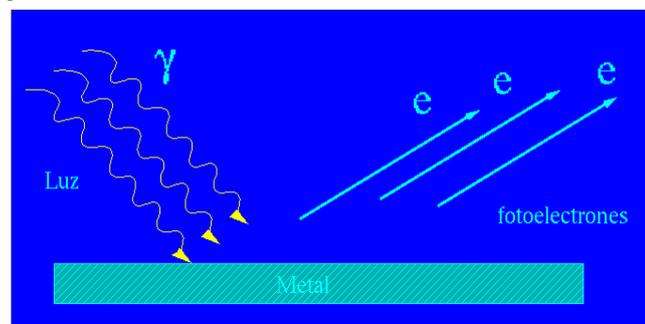
Fuente: (Tomasi, 2003)

3.7.2 Efecto fotoeléctrico.

Debido a que los materiales contienen electrones libres, se determinó que una de las formas de que los electrones pueden extraerse de los metales es el efecto fotoeléctrico. Es luz incidente sobre un metal que expulsa electrones de la superficie. (Priwer & Cynthia, 2005, p. 31)

Para explicar ciertos fenómenos que se presenta con los metales al incidir un haz de luz y variando intensidad y frecuencia como se presenta en la figura 26. La emisión de electrones de un metal expuesto a la luz. La superficie del metal absorbe suficiente energía de la luz” fotón” como para que los electrones se liberen de sus átomos y escapen al exterior desde la superficie. (Flores & Figueroa, 2007)

Figura 26. Efecto fotoeléctrico



Adaptado de: (RHS Linux User, 2013)

El efecto fotoeléctrico mediante la suposición de que la energía de la energía del haz luminoso viaja a través del espacio en paquetes de luz llamados fotones. Los fotones corresponden a la radiación con frecuencia γ .

Ecuación 8. Energía cinética del fotón

$$k_{\text{máx}} = eV_0 = h\gamma - \Phi$$

Dónde: h = Constante de plank

γ = Frecuencia de la luz

Φ = Función de trabajo

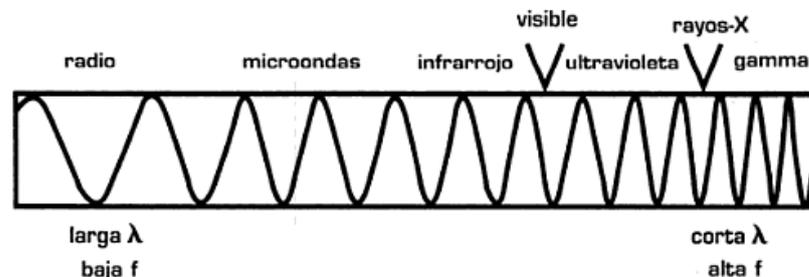
$K_{\text{máx}}$ = Energía cinética del fotón

Tabla 1. Función de trabajo (Φ) para algunos materiales

Metal	Φ (eV)
Na	2.28
Al	4.08
Cu	4.70
Zn	4.31
Ag	4.73
Fe	4.5
Si	4.85
K	2.29

Adaptado de: (Flores & Figueroa, 2007)

Figura 27. El espectro electromagnético. La longitud de onda (λ) es inversamente proporcional a la frecuencia (f)



Fuente: (Priwer & Cynthia, 2005)

El espectro electromagnético es la radiación de longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos

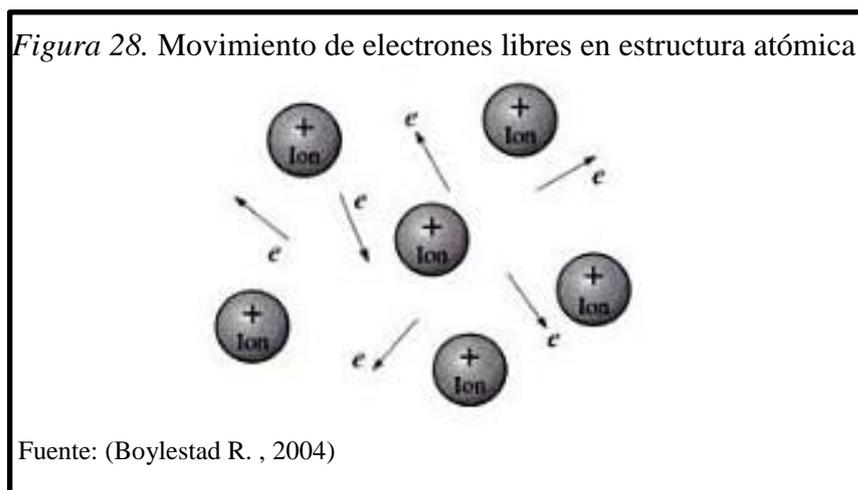
infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio como se muestra en la figura 27.

Resumen del efecto fotoeléctrico:

- El número de electrones liberados es proporcional a la intensidad de las radiaciones incidentes.
- La energía cinética máxima de los fotones depende de la frecuencia, no de la intensidad de la luz incidente.
- $K_{\text{máx}}$ tiene una relación lineal con γ a través de la ecuación 8.
- El potencial de frenado V_0 depende de la función de trabajo Φ .
- Existe una frecuencia umbral γ_0 por debajo de la cual no ocurre el efecto fotoeléctrico. (Flores & Figueroa, 2007)

3.8 Corriente

Es el movimiento de electrones libres en materiales semiconductores y conductores creados por la energía térmica que los electrones adquieren del medio ambiente. Cuando los átomos pierden sus electrones libres, adquieren una carga positiva y se les denomina iones positivos. Los electrones libres se encuentran listos para moverse dentro de estos iones positivos y abandonar el átomo, el electrón libre es el portador de carga en un conductor de electricidad.



La figura 28 representa los iones positivos y los electrones libres. Dentro de esta disposición, los electrones libres se encuentran ganando o perdiendo energía por el cambio en su dirección y velocidad.

- Las colisiones con los iones positivos y con otros electrones
- Las fuerzas de atracción para los iones positivos
- Fuerza de repulsión que existen entre electrones

Corriente, I, amperios (A) es la cantidad de electrones que cruzan a través de una superficie en 1 segundo (Boylestad R. , 2004)

Ecuación 9. Corriente

$$I = \frac{Q}{t}$$

Dónde: I = amperios

Q = coulombs

T = segundos

3.9 Voltaje

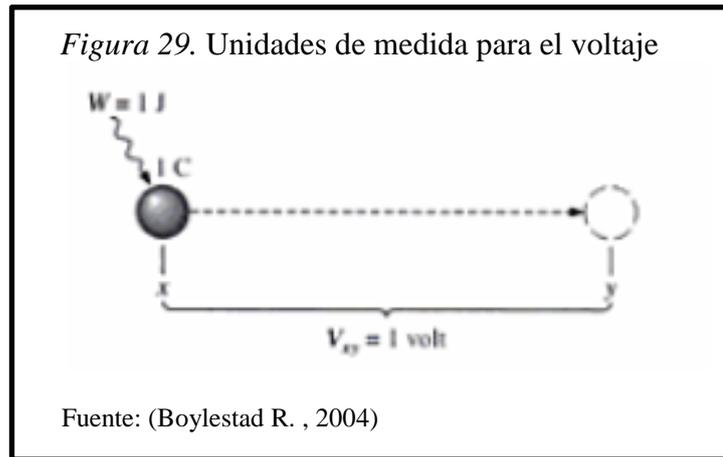
El flujo de carga de la corriente mediante una “presión” externa derivada que una masa tiene por virtud de su posición: energía potencial.

Energía, es la capacidad para realizar trabajo. Si una masa (m) se eleva cierta altura (h) por encima de un plano de referencia, tendrá un coeficiente de energía potencial expresado en joules (J) que está determinado por:

Ecuación 10. Energía potencial

$$W(\text{energía potencial}) = mgh$$

La diferencia de potencial de volt (V) entre dos puntos si se intercambia I joule (J) de energía al mover I coulomb (C) de carga entre los dos puntos.



Se muestra una diferencia de potencial o voltaje siempre se mide entre dos puntos en el sistema. Al cambiar cualquier punto puede cambiar la diferencia de potencial entre dos puntos. (Boylestad R. , 2004, p. 36)

Ecuación 11. Diferencia de potencial

$$V = \frac{W}{Q}$$

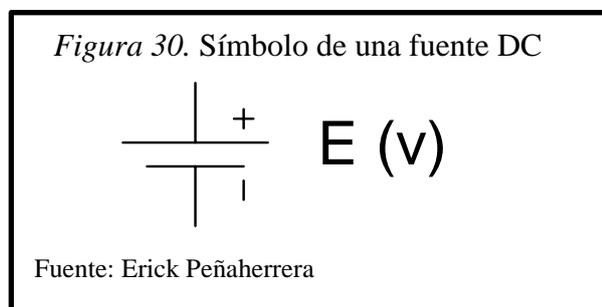
Dónde: V = Voltios

Q = Coulombs

W = Joules

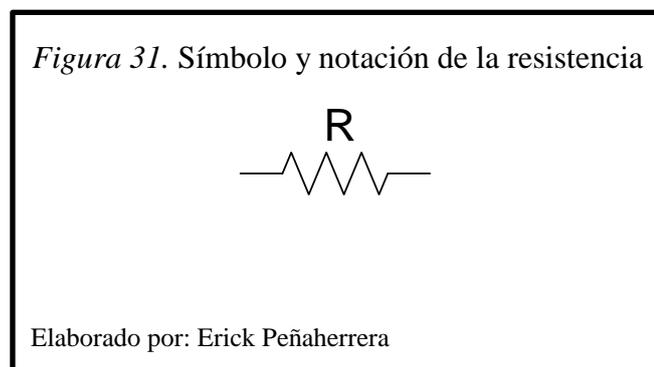
3.9.1 Voltaje DC.

Los términos DC significan corriente directa, la cual los sistemas eléctricos son de flujo de carga de una sola dirección y flujo constante donde su representación gráfica se muestra en la figura 30 donde se encuentra el positivo y negativo de la fuente DC.



3.10 Resistencia

El flujo de carga a través de cualquier material encuentra una fuerza opuesta que es similar en muchos aspectos a la fricción mecánica. A esta oposición, debida a las colisiones entre electrones y átomos del material, que convierte la energía eléctrica en forma de calor se le llama resistencia del material. La unidad de medida de la resistencia es el ohm, para el cual se emplea el símbolo (Ω) y su representación gráfica se muestra en la figura 31. (Boylestad R. , 2004, p. 59)



La resistencia de cualquier material con el área transversal uniforme se determina mediante:

- ✓ Material
- ✓ Longitud
- ✓ Área Transversal
- ✓ Temperatura

Ecuación 12. Resistividad del material

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Dónde: ρ es la resistividad del material, l es la longitud de la muestra y A es la área transversal de la muestra. (Boylestad R. , 2004, p. 81)

3.11 Potencia

3.11.1 Potencia eléctrica.

Es la cantidad de trabajo realizado por una corriente eléctrica. Cuando se trata de corriente continua DC la potencia eléctrica desarrollada en un cierto instante por un elemento es el producto de la diferencia de potencial y la intensidad de corriente que pasa a través del elemento. La unidad de medida es vatios [W].

Ecuación 13. Potencia con respecto a voltaje y corriente

$$P = V * I$$

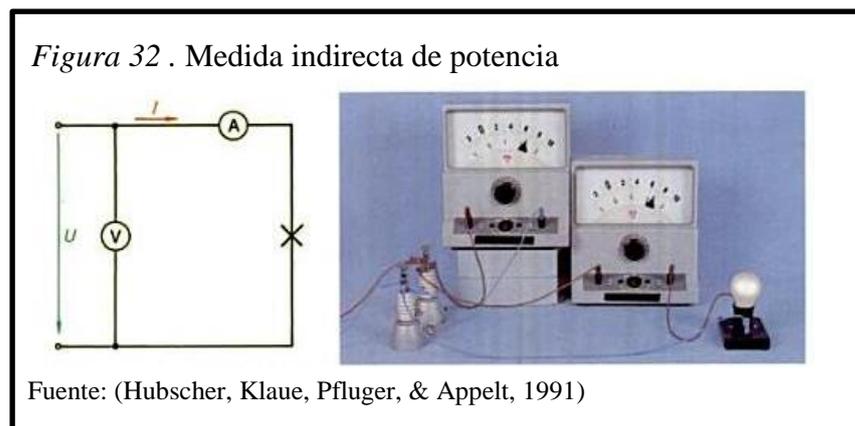
Donde I[A] es la intensidad de corriente y V[V] es el voltaje o la diferencia de potencial del elemento.

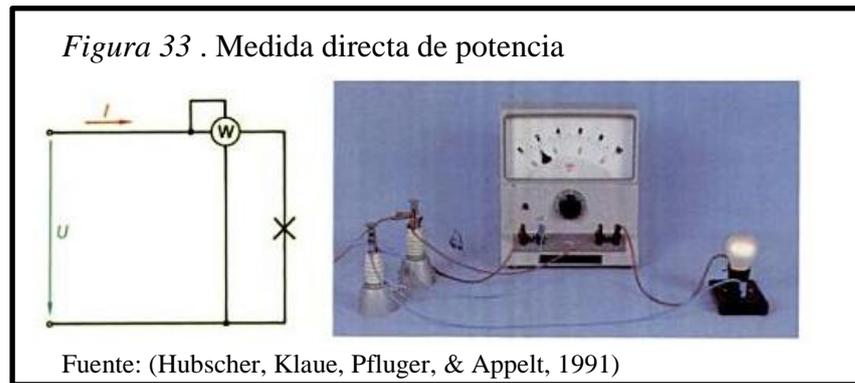
Cuando un elemento es una resistencia de valor R o se puede calcular la resistencia equivalente del elemento, la potencia se puede deducir de la siguiente manera:

Ecuación 14. Potencia con respecto a voltaje y resistencia

$$P = R \cdot I^2 = \frac{V^2}{R}$$

Un watímetro eléctrico, es un aparato para medir la potencia, tiene una estructura que posee un circuito de tensión y de intensidad como se muestra en la figura 32 y 33. (Hubscher, Klaue, Pfluger, & Appelt, 1991, p. 1)





3.11.2 Potencia óptica.

La intensidad luminosa se puede expresar en términos tanto fotométricos como radiométricos. La fotometría es la ciencia que mide sólo las ondas luminosas visibles al ojo humano y la radiometría mide la luz en todo espectro electromagnético. En términos fotométricos la intensidad luminosa se describe como la densidad de flujo luminoso, y se mide en lúmenes por unidad de área. En términos radiométricos, la potencia óptica mide la tasa con la que las ondas electromagnéticas transfieren energía luminosa o el flujo de energía luminosa que atraviesa determinado punto en un tiempo específico. (Tomasi, 2003, p. 100)

Ecuación 15. Potencia óptica con respecto a energía luminosa y tiempo

$$\text{Potencia} = \frac{d(\text{energía luminosa})}{d(\text{tiempo})}$$

Ecuación 16. Notación de potencia

$$P = \frac{dQ}{dt} \text{ (watts)} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde : P = Potencia Óptica (watts)

dQ = carga instantánea (joules)

dt = cambio instantáneo de tiempo (segundos)

La potencia óptica se le llama flujo luminoso o radiante (ϕ), que equivale joules por segundo, y es la misma potencia que se mide eléctricamente o térmicamente en watts. (Tomasi, 2003, p. 102)

CAPÍTULO 4

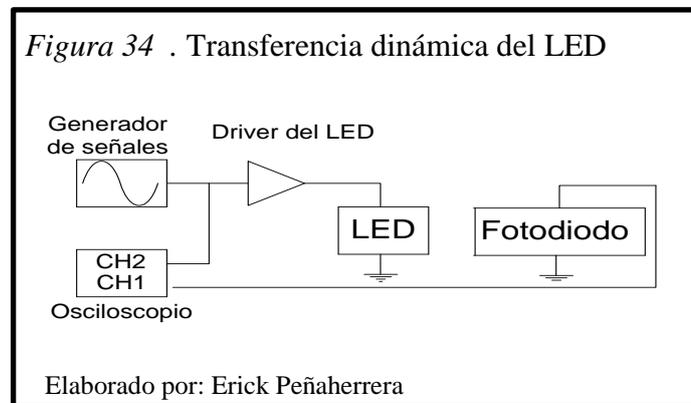
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN

El proyecto VLC tiene por objetivo realizar una transmisión de información con fuentes LED de luz visible usadas para iluminación mediante la implementación de un prototipo en tiempo real basado en una FPGA. El diseño e implementación del sistema de transmisión y recepción se realizó mediante programas de simulación y luego en una tarjeta de circuito impreso (Printed Circuit Board, PCB).

Se realizará dos tipos de implementación:

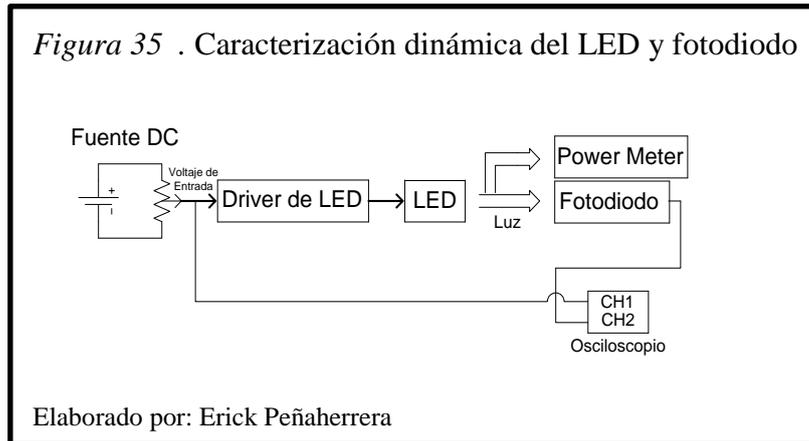
- Sistema OOK: La implementación se la realizará con la tarjeta Cyclone III de ALTERA, el driver de transmisor y la tarjeta de recepción.
- Sistema SSK: La implementación se la realizará con la tarjeta Cyclone III de ALTERA y el PCB por medio guiado.

La configuración para el trabajo experimental en laboratorio para la caracterización del LED.



Para la caracterización del LED en términos de potencia óptica y ancho de banda se utilizará la configuración que se muestra en la figura 35.

Figura 35 . Caracterización dinámica del LED y fotodiodo



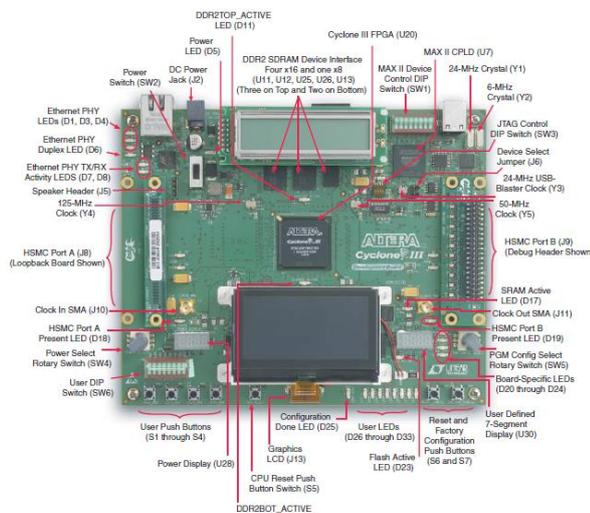
Para lo cual se diseñará la tarjeta PCB controladora (driver) del LED y se la caracterizará en términos de ancho banda. Según estos resultados se procederá a establecer la velocidad de transmisión.

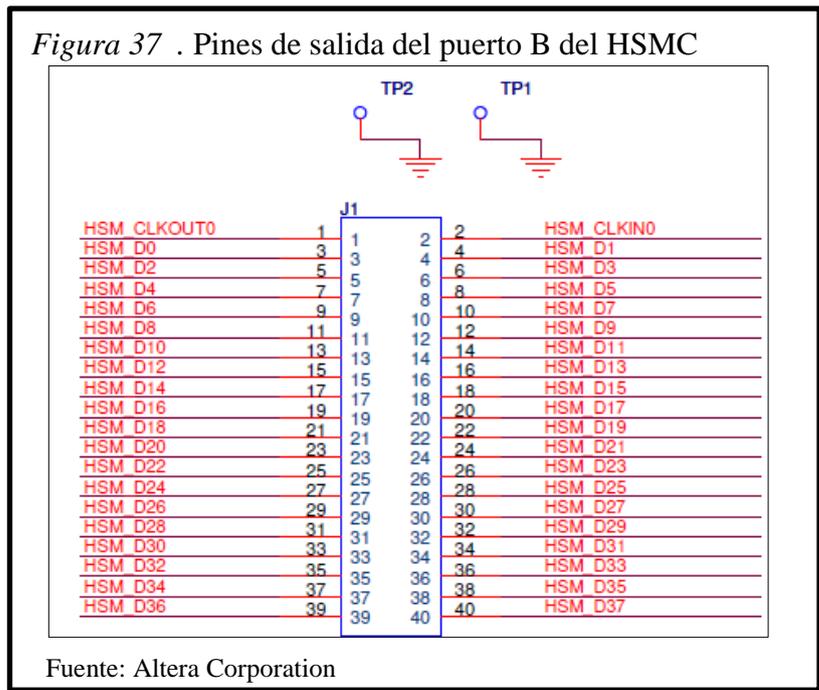
4.1 Diseño e implementación del sistema siso

4.1.1 Análisis de la FPGA.

Se realizó un análisis de las configuraciones de las entradas y salidas de la FPGA obteniendo que los pines de salidas digitales presentan un voltaje de 2,5 v y el ADC es de 14 bits, 150 MS/s, y su entrada de voltaje utilizando el conector SMA es de aproximadamente 512mv. La configuración de los Pines de salida del puerto B del HSMC de la FPGA se muestra en la Figura 36.

Figura 36 . FPGA Cyclone III de Altera





En la tabla 2 y la figura 37 se muestran los nombres y asignación de pines que se utilizan para configurar las salidas de la FPGA.

Tabla 2. Asignación de pines

Número de Pin conector (J1)	Nombre de la señal	Número de Pin FPGA
3	HSM D0	G24
4	HSM D1	H23
5	HSM D2	G25
6	HSM D3	H24
7	HSM D4	J25
8	HSM D5	F27
9	HSM D6	J26

Adaptado de: (Caiza & Echeverría, 2013)

4.1.2 Diseño del transmisor.

Para el diseño y construcción de las PCBs se debe conocer cuales dispositivos son adecuados para una buena comunicación, donde se verifica los datos técnicos y específicos de los amplificadores operacionales para tener buenas condiciones de trabajo o buena calidad de servicio, como se muestra en la siguiente tabla:

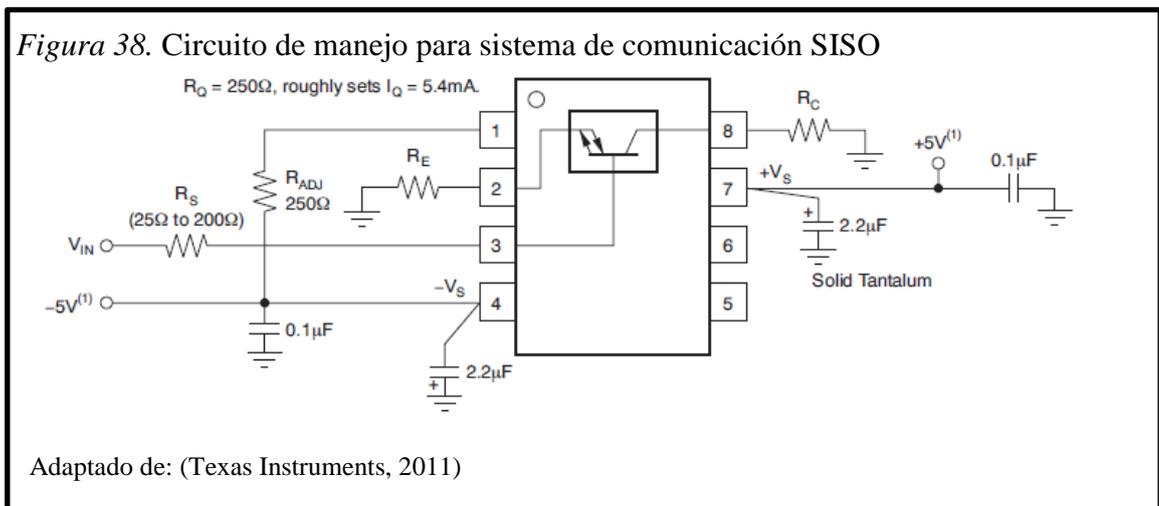
Tabla 3. Características y comparaciones entre amplificadores operacionales

Parámetros	TL081	LM741	OPA860
Number of Channel	1	1	1
Total Supply Voltage (Min) (+5V=5, +/-5V=10)	7	10	6.5
Total Supply Voltage (Max) (+5V=5, +/-5V=10)	36	44	6.5
Iq per channel (Max) (mA)	2,8	1.7	11,2
GBW (Typ) (MHz)	3	1	470
Slew Rate (Min) (V/us)	8	0.3	860
Slew Rate (Typ) (V/us)	13	0,7	900
Vos (Offset Voltage @ 25C) (Max) (mV)	15	5	12
Vn at 1kHz (Typ) (nV/rtHz)	18	30	2.4
IIB (Max) (pA)	400	80000	5000000
CMRR (Min) (dB)	70	70	70

Elaborado por: Erick Peñaherrera

En la tabla 3 se observa las características principales, se procedió a comparar cual es la mejor elección entre distintos amplificadores operacionales, se necesita que cumpla un mayor ancho de banda donde el parámetro de la tabla 3 es GBW (Typ) (MHz), que es el amplificador operacional OPA860.

Para realizar una comunicación por luz visible con el sistema de comunicación SISO en el elemento del emisor se realizó un circuito electrónico OTA (Operational Transconductance Amplifier), El amplificador Operacional de Transconductancia cuya característica principal es convertir la señal de voltaje a señal de corriente a ser consumida por el LED:



En la figura 38 los condensadores de tantalio de alimentación deben estar ubicados cerca el amplificador, la corriente de reposo esta ajustada con una resistencia de R_{ADJ} , fuente de corriente interna que se encuentra conectada al pin 1 a $-V_S$ sad, la corriente estática máxima es de 6 mA para un rendimiento óptimo de la sección de OTA.

Ecuación 18. Ley de Ohm

$$V = I * R$$

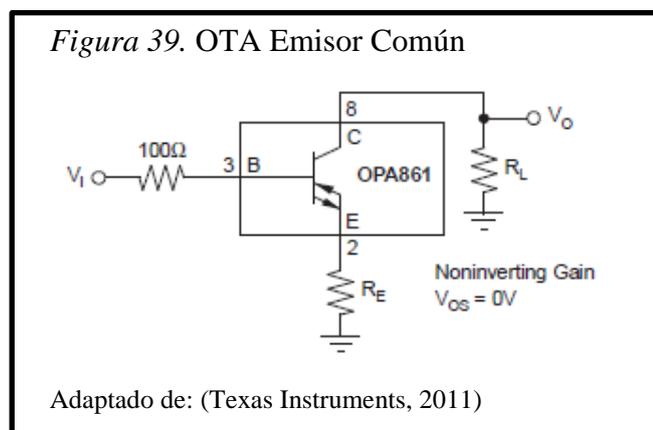
Donde:

V es voltaje en entrada $-V_S$, I es la corriente interna y R es la resistencia R_{ADJ} , despejando R de la Ecuacion 18 y conociendo la corriente que va a manejar el amplificador y el voltaje:

Ecuación 19. Cálculo de la resistencia Radj

$$R_{ADJ} = \frac{V}{I} = \frac{5 V}{6 mA} = 83.33 \cong 84 \Omega$$

La resistencia de R_E es aproximada a cero $R_E = 1\Omega$ para tener una configuración de emisor común, y que el amplificador trabaje a frecuencias altas y tenga ganancias mucho más altas en voltaje y corriente, la mayoría de los circuitos de aplicaciones para la sección OTA consisten en unos pocos tipos en los cuales hay emisor común, base común y colector común. En el modo de corriente, el OTA puede ser útil para cálculos analógicos, tales como amplificador de corriente, diferenciador de corriente, integrador de corriente, etc. que son tipos de configuraciones para el amplificador.

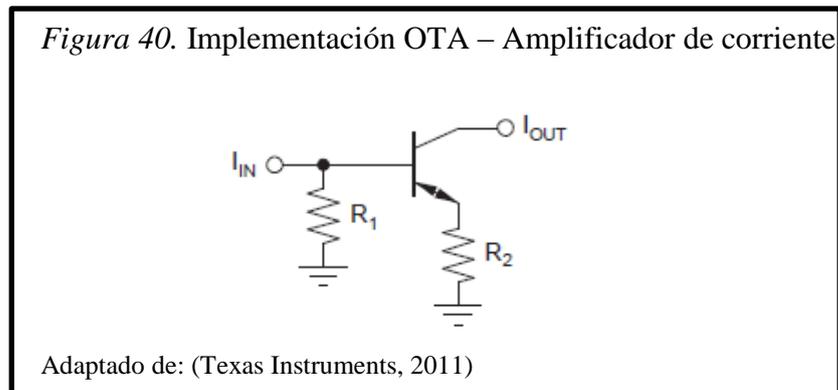


La figura 39 el OTA no requiere polarización comparando con un BJT y la ganancia de transconductancia se mantiene constante. La ganancia se ajusta de manera similar como para el equivalente BJT con la ecuación 20:

Ecuación 20. Ganancia del BJT

$$G = \frac{R_L}{\frac{1}{g_m} + R_E}$$

Donde el g_m es la variación de la corriente con la temperatura que mantiene la transconductancia este dato se especifica en el datasheet del dispositivo en ELECTRICAL CHARACTERISTICS en el caso de emisor común $g_m = 95\text{mA/V}$.



De la ecuación 18 se despeja la corriente:

$$I = \frac{V}{R}$$

Dónde: $I=I_{IN}$ Corriente de entrada del amplificador
 $R=R_s$ Resistencia de entrada al Pin 3 del amplificador
 $V=5\text{v}$ Voltaje de polarización

Donde reemplazando los valores se obtiene:

$$I_{IN} = \frac{5\text{V}}{200\Omega}$$

$$I_{IN} = 25\text{ mA}$$

La función de transferencia del amplificador de corriente de la figura 40 es:

Ecuación 21. Función de transferencia del amplificador

$$I_{OUT} = \frac{R_1}{R_2} \times I_{IN}$$

Dónde: $R_1 = 200\Omega$, $R_2 = 250\Omega$ y la $I_{IN} = 25.25\text{mA}$

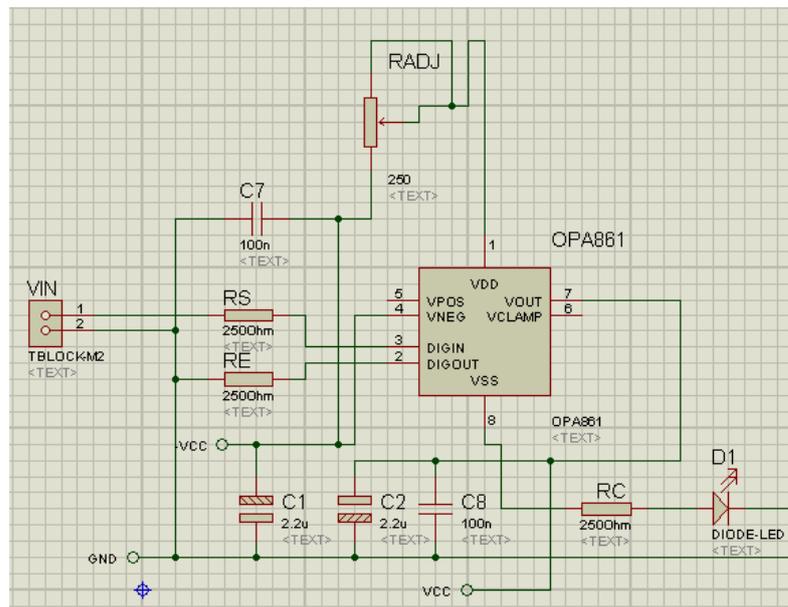
$$I_{OUT} = \frac{200}{250} \times 25.25$$

Por lo tanto:

$$I_{OUT} = 20.2\text{ mA}$$

El led necesita 20mA para alcanzar su máxima intensidad luminosa por lo que existe un porcentaje de error del $\pm 1\%$ causada por la tolerancia de las resistencias y efectos EMI.

Figura 41. Circuito de transconductancia



Elaborado por: Erick Peñaherrera

El circuito de transconductancia de la figura 44 se tomó de una investigación de amplificadores de transconductancia especialmente de la Texas Instruments como se muestra en el anexo 2 y/o figura 41 “Basic Connections”. (Texas Instruments, 2011)

4.1.3 Implementación del transmisor.

Una placa de circuito impreso (PCBs) es una plancha de material rígido aislante, cubierta por unas pistas de cobre en una de sus caras o en ambas, para servir como conductor o de interconexión eléctrica entre los distintos componentes que se montarán sobre ella.

La materia prima consiste en una plancha aislante, típicamente de “fibra de vidrio” o “Baquelita”, cubierta completamente por una lámina de cobre.

Conforme avanza la tecnología, los PCBs se convierten en parte fundamental en el desarrollo de circuitos electrónicos, cada vez con mayor densidad y por ende exige exactitud y precisión, esto hace necesario la utilización de diseños asistidos por computadora, existe el método manual o artesanal y la elaboración de PCB por máquinas Fresadoras.

4.1.3.1 Fresado.

- **Diseño:** Un circuito complejo requiere el uso de herramientas computacionales que permitan diseñar y simular el esquema electrónico y su arte de circuito impreso.
- **Fresado:** Consiste principalmente en el corte del material que se mecaniza con una herramienta rotativa con brocas, que ejecuta movimientos de avance programados de la mesa de trabajo en 2 ejes X y Y en los que se puede desplazar la baquelita y después perfora los orificios en donde se colocaran los componentes.
- **Cortado:** Conocido el tamaño del circuito impreso, se procede a realizar el corte de la tarjeta.
- **Limpieza:** se realiza el lavado y limpieza de la placa para eliminar todas las impurezas.
- **Soldadura:** etapa donde se realiza el montaje (colocación y soldadura) de los componentes.
- **Pruebas de Funcionamiento:** Antes de realizar interconexiones se verifica el funcionamiento del circuito (Cortocircuitos, circuitos abiertos, soldaduras frías, entre otros.)

En el diseño, es necesario definir el esquemático del circuito y el diagrama de conexiones que formarán las pistas de cobre sobre la placa. Generalmente se hace en dos fases; en primer lugar, partiendo de las especificaciones sobre la funcionalidad del circuito, se deciden los componentes a utilizar y las interconexiones necesarias entre ellos, y a través del editor de esquemas del software se realiza el diagrama esquemático. Después, con esa información se define la máscara en el editor del arte del PCB, que es una representación virtual de los componentes sobre la placa, y se establece la forma física de las conexiones entre ellos.

Para realizar un circuito eléctrico o electrónico, el diseñador requiere de documentación, hojas técnicas de fabricantes y/o apoyo de herramientas computacionales que orienten en cuanto a las variables, parámetros y componentes requeridos.

Es recomendable la elaboración y simulación del circuito esquemático previo a la elaboración del PCB; la tabla 4 muestra los principales programas para elaboración y simulación.

Tabla 4. Muestra los diferentes tipos de CADs y sus respectivos fabricantes.

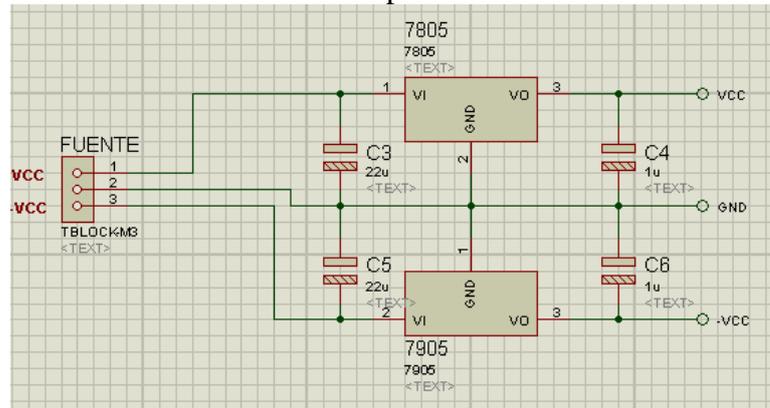
Empresa o fabricante	Nombre del CAD	Circuito esquemático	Circuito impreso
Cadence	Orcad	Capture	Orcad PCB
National Instruments antes de Electronic Workbench	Circuit Desing	Multisim	Ultiboard
LabCenter	Proteus	Isis	Ares
Cadsoft	Eagle	Schematic	Layout

Elaborado por: Erick Peñaherrera

Después de diseñar el circuito de transmisión se procede a la simulación en el software Labcenter Proteus 7.8 SP2 en el circuito esquemático Isis como se muestra en la figura 44 y 45 respectivamente.

El software Proteus 7.8 fue elegido por la gran manejabilidad tanto para el circuito esquemático como también para el circuito impreso, el software para circuito esquemático Multisim y circuito impreso Ultiboard no fue realizado porque tiene licencias y es muy robusto.

Figura 42. Fuente de alimentación del amplificador de transconductancia OPA860



Elaborado por: Erick Peñaherrera

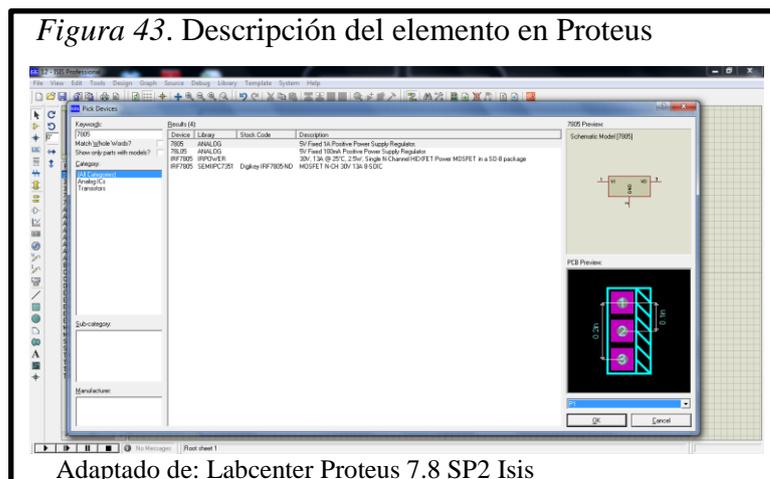
La fuente de alimentación del amplificador de transconductancia es el que suministra el voltaje y corriente necesaria para que funcione correctamente el amplificador operacional como se muestra los pines +VCC, -VCC y GND de la figura 41 y 42, el regulador de voltaje 7805 y el 7905 proporciona +5 [v] y -5 [v] respectivamente, la cual provee voltaje.

4.1.3.2 Diseño de la PCB.

4.1.3.2.1 Elección adecuada de los componentes.

Tomar en cuenta las limitaciones de inventarios de los proveedores: se deben adquirir todos los componentes y conectores o tener seguridad del despacho de los encapsulados a utilizar, la distribución de pines y tamaño entre elementos a utilizar.

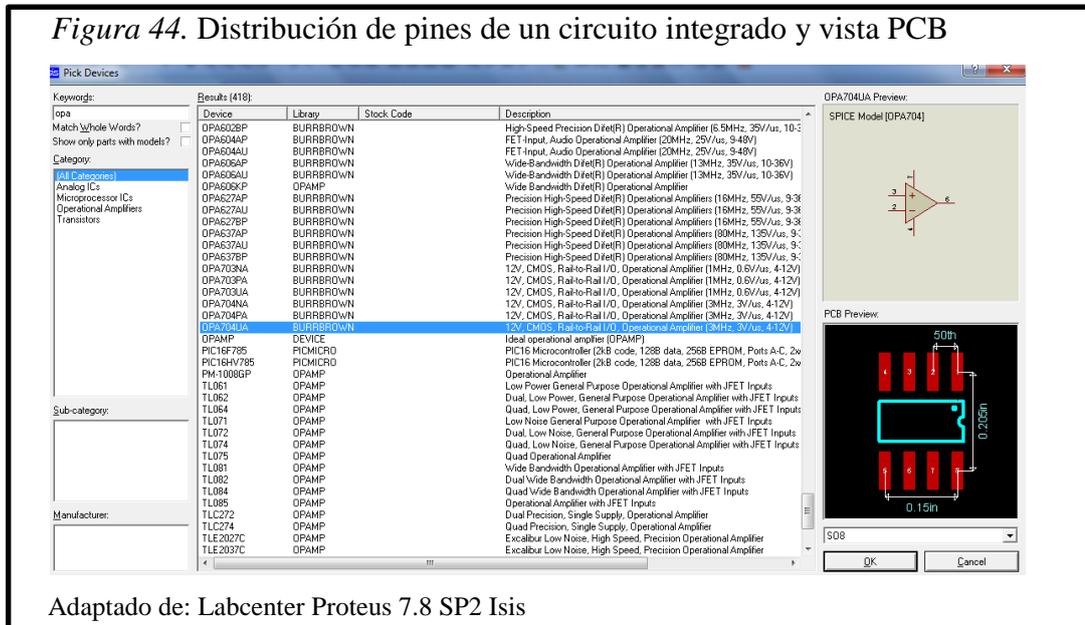
Figura 43. Descripción del elemento en Proteus



Adaptado de: Labcenter Proteus 7.8 SP2 Isis

Antes de realizar la placa verificar cuidadosamente las interconexiones y numeración de cada componente y de cada circuito integrado, así como también la correspondencia del tamaño de cada uno de ellos en el PCB como se muestra en la figura 44.

Figura 44. Distribución de pines de un circuito integrado y vista PCB



Adaptado de: Labcenter Proteus 7.8 SP2 Isis

4.1.3.2.2 Efecto resistivo en las pistas.

Diseñar las pistas teniendo en cuenta la longitud, grosor y máxima corriente: es recomendable utilizar herramientas de software como PCB Via Calculator y PCB Trace Width Calculator para determinar y calcular las dimensiones de pistas a usar según parámetros solicitados; ya que estas dimensiones, mal diseñadas, podrán incrementar el valor de una resistencia no deseada y causar problemas por caídas de tensión o servir de fusible al limitar el paso de corriente. Todo material conductor presenta una resistividad propia y según las dimensiones del mismo, se tendrá una resistencia eléctrica como se muestra en la ecuación 18 despejando R (resistencia), expresado por la ecuación 22:

Ecuación 22. Resistividad de la pista

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

En donde:

R = Resistencia eléctrica, expresado en Ohm[Ω]

P = Resistividad del material en unidades [Ωm]

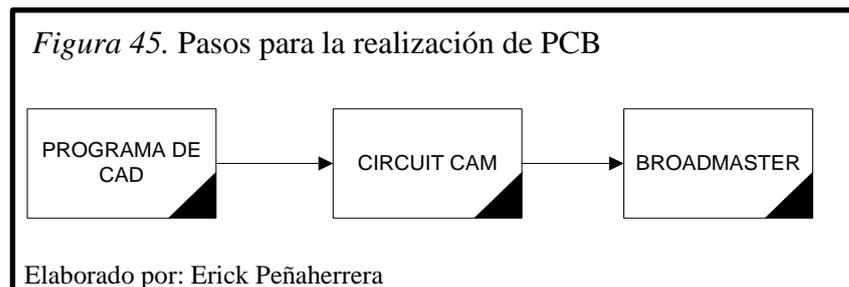
L = Longitud que por las unidades del sistema internacional es el metro [m]

A = Área transversal dado en [m^2]

En los circuitos de instrumentación y de medición, ubicar los componentes de tal forma que la longitud de las pistas sean lo más pequeñas posible, para evitar efectos de carga en la línea de interconexión.

4.1.3.2.3 Fabricación de PCBS.

Para crear las pistas PCB utilizando la fresadora, se debe realizar antes una serie de pasos:



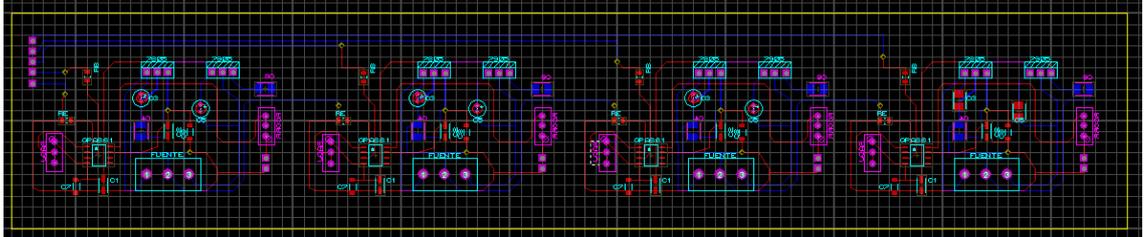
Para realizar el diseño en Circuit Cam lo primero que se debe es generar los archivos Gerber. El formato Gerber es un archivo de texto, que contiene coordenadas, dependiendo del archivo que se necesite, estarán las coordenadas de las perforaciones, de qué punto a qué punto están las pistas, donde están colocados los componentes, el borde de la placa, etc.

Los archivos “.LDM” son los generados por el Circuit Cam, que serán leídos por el BoarMaster (que es el programa que controla a la fresadora). En los archivos LDM, se incluye toda la información necesaria para que la fresadora “sepa” como actuar. Se limitará el corte de la placa, las brocas que deben usarse, los caminos que llevará a cabo la fresa para eliminar el cobre de las pistas, etc.

4.1.3.2.4 Generador de formato Gerber en Proteus.

Después de analizar, diseñar y simular el esquema, queda aproximadamente como se muestra en la figura 46 donde las dimensiones de la PCB son de 5 cm x 26 cm y un modo de pistas estilo T12 para reducir la impedancia de la pista de cobre.

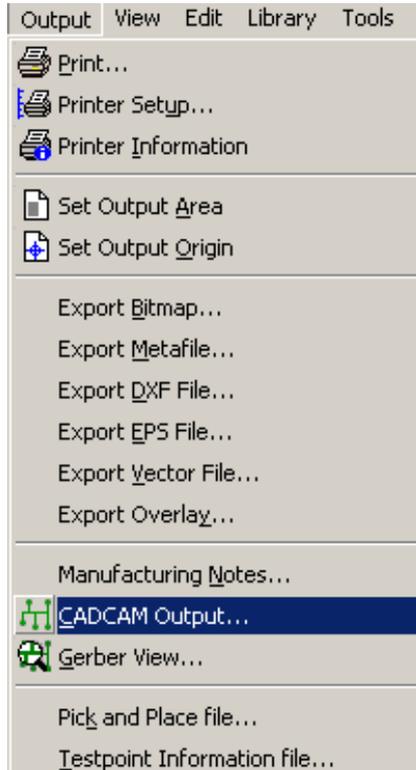
Figura 46. Esquema Ruteado en Labcenter Proteus 7.8 SP2 Ares



Elaborado por: Erick Peñaherrera

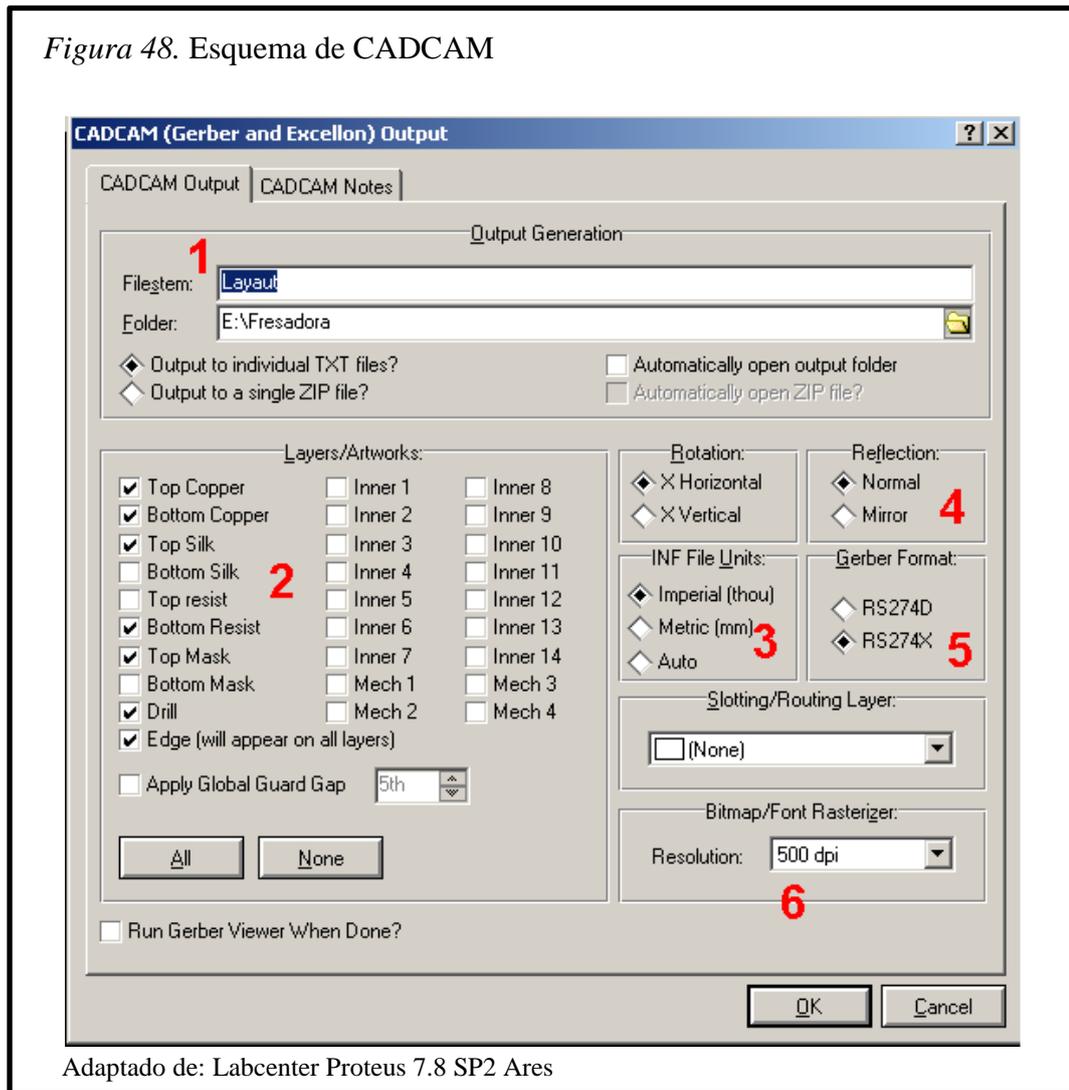
Después de que se tiene el diseño en Ares, se generará los archivos en formato Gerber siguiendo los pasos de las figuras 47 y 48:

Figura 47. Generación de formato Gerber



Adaptado de: Labcenter Proteus 7.8 SP2 Ares

Figura 48. Esquema de CAD/CAM



Adaptado de: Labcenter Proteus 7.8 SP2 Ares

Se explicará cada uno de los puntos que se ha enumerado del 1 al 6 en la figura 48:

1. Aquí se introduce el nombre que quiere dar al archivo Gerber.

También se puede escoger la ubicación donde serán guardados los archivos.

2. Aquí se escoge los archivos Gerber que se desea, generándose un archivo .txt por cada una de las opciones marcadas. Y cada opción tiene su función como se explicará a continuación:

- ✓ Top Copper : Son las pistas de la parte superior (top) del PCB
- ✓ Bottom Cooper: Son las pistas de la parte de abajo(Bottom) del PCB
- ✓ Bottom Resist: Muestra los puntos de soldadura alrededor de los pines de los componentes.
- ✓ Top Mask: Realza los puntos de inserción en el TOP del PCB. Es necesario si la baquelita sobre la que se va a trabajar tiene cobre por ambos lados.

✓ Drill: Tiene las coordenadas de los taladros y la posición.

3. Aquí puede escoger el sistema métrico donde se manipulará los datos de las coordenadas.

4. Si se está trabajando con una PCB a doble cara, se debe tener en cuenta que una de las capas debe estar mirada como en un espejo ya que está invertida por un lado.

5. Hay varios tipos de formato de Gerber, estos tienen diferentes formatos de integrados, conectores y demás. Se deja seleccionado el “RS274X” que es el “estándar”

6. Se coloca aquí la “calidad” de la imagen.

4.1.3.2.5 Generación de archivos LDM en circuitcam.

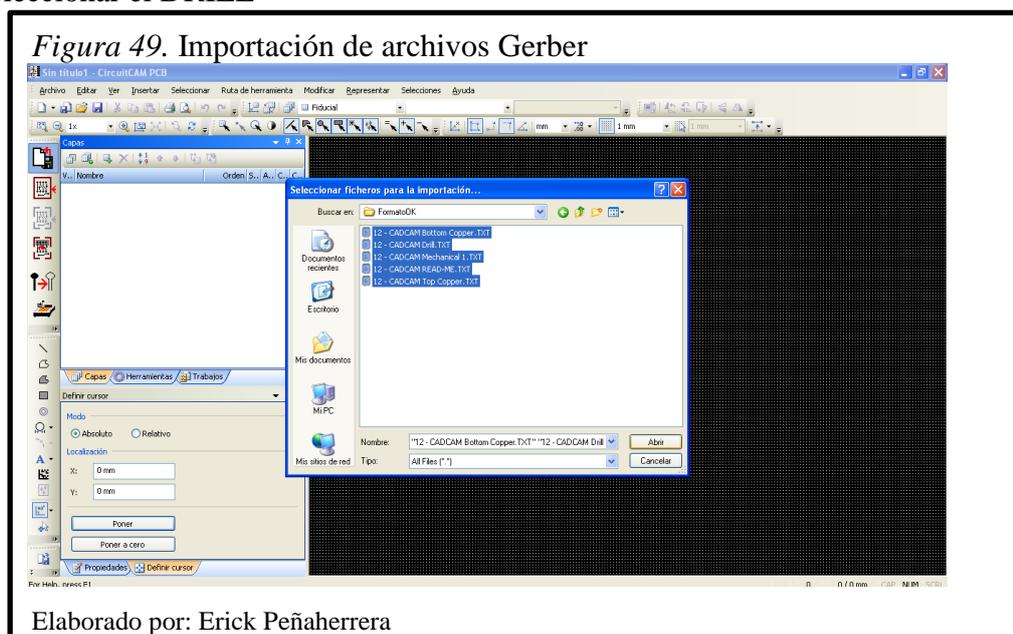
Después de haber generado los archivos Gerber, aparecerán tantos archivos como opciones, se marca y se añade uno a uno a la lista según se requiera, un Readme con todo lo hecho en la creación de los Gerber como se muestra en la figura 49. Este archivo es muy útil en el proyecto, porque además añade las especificaciones técnicas de las brocas y fresas a usar.

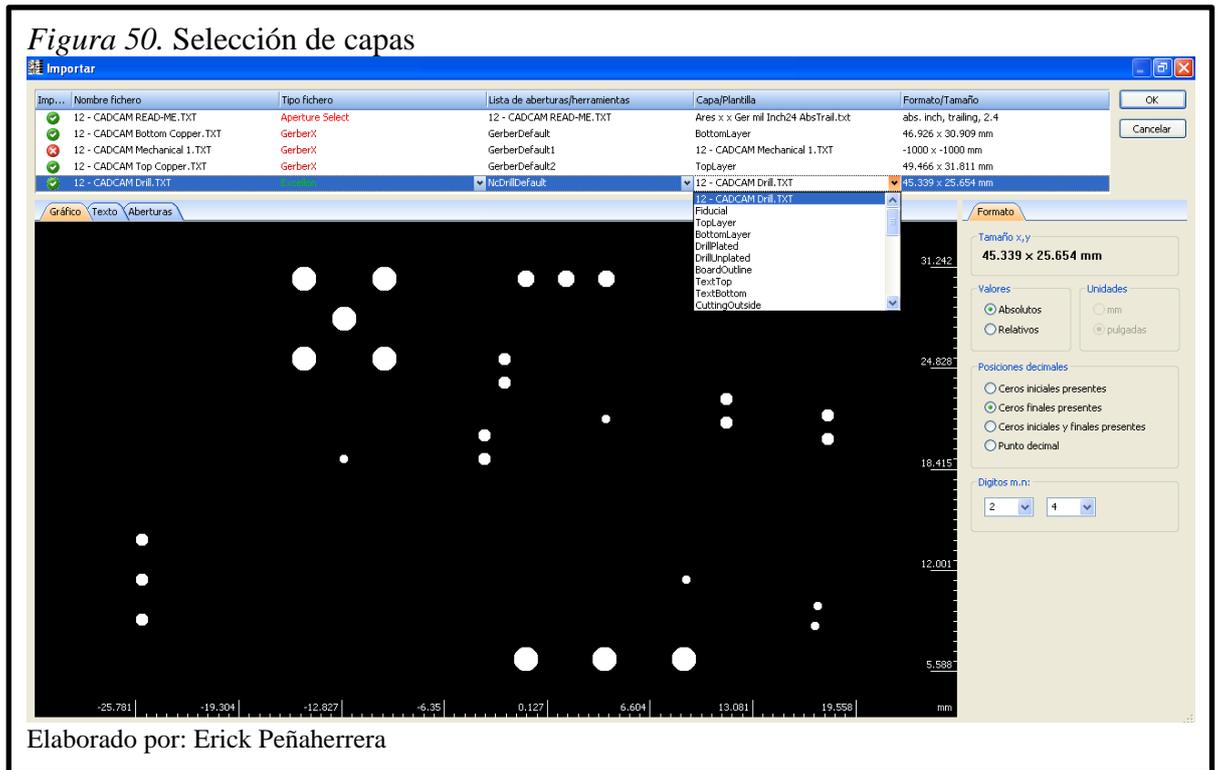
Se añade 1 a 1 los archivos de texto que se han generado. Para eso se pulsa en el botón de “añadir”. Se debe seguir los siguientes pasos:

1º Seleccionar el Top Cooper.

2º Seleccionar el Bottom Cooper.

3º Seleccionar el DRILL





La figura 50 muestra la selección de capas previamente con la exportación de archivos Gerber del circuito simulado.

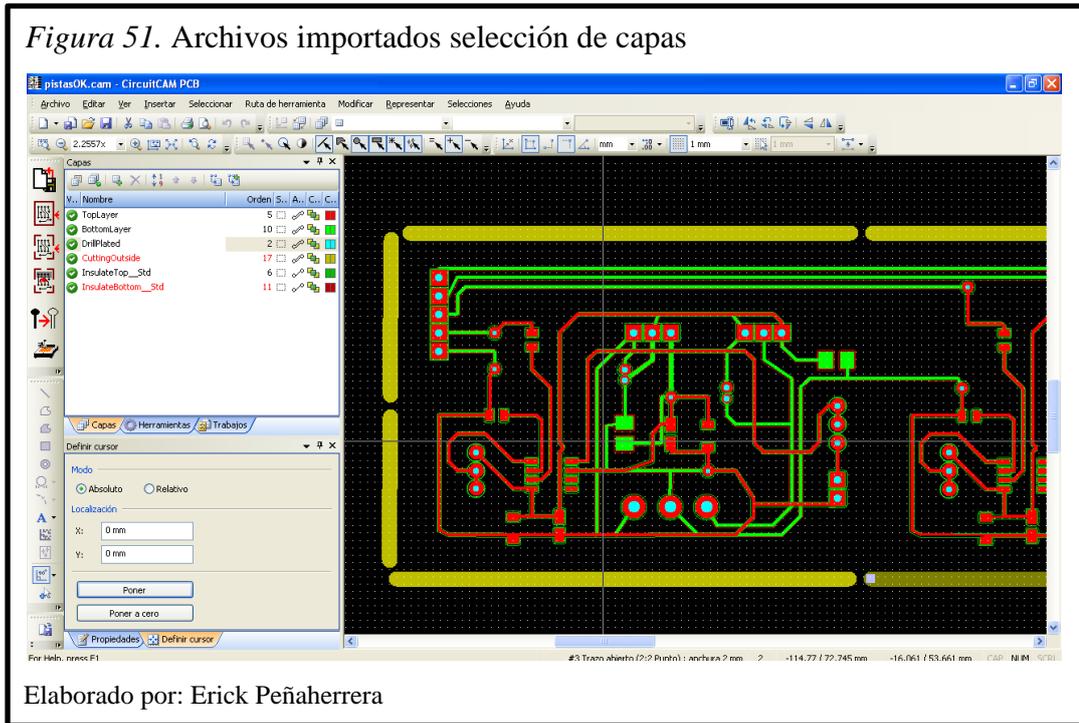
Hay un par de puntos importantes a tener en cuenta en la parte de importación de los Gerber.

Se podría cambiar el tipo de librería y demás. Pero lo que realmente importa y lo que se debe modificar es el “layer”. Se escoge la capa donde debe colocarse. Por tanto se abre el archivo con la extensión “Bottom Cooper” por ejemplo, se sabe que en Layer se deberá escoger “Bottom” o “Top” en caso contrario. Si lo que se va a importar es el borde se escogerá el referente a “Board Outline”.

El tamaño de la placa que se escogió, al marcar el borde se fija, en cuanto ocupa la placa en su totalidad, ya que se lo necesitara saber más adelante para adecuar los agujeros del taladro (Drills).

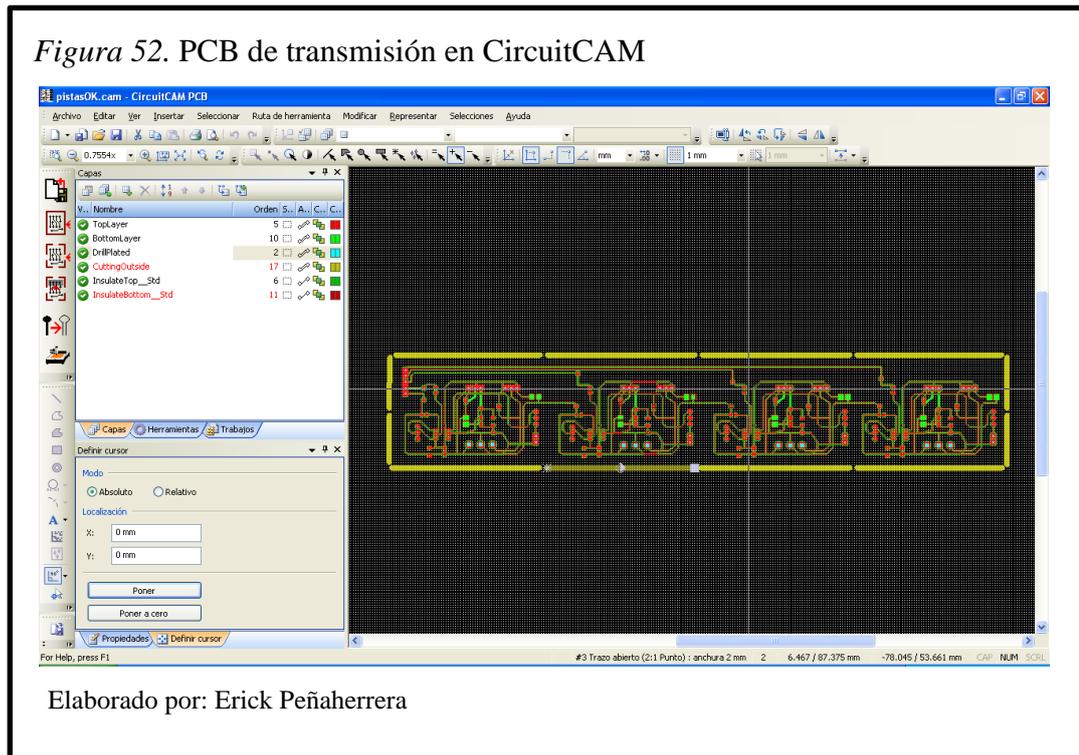
Una vez importado todos los archivos, debería quedar como se muestra en la figura 51 y 52:

Figura 51. Archivos importados selección de capas



Elaborado por: Erick Peñaherrera

Figura 52. PCB de transmisión en CircuitCAM



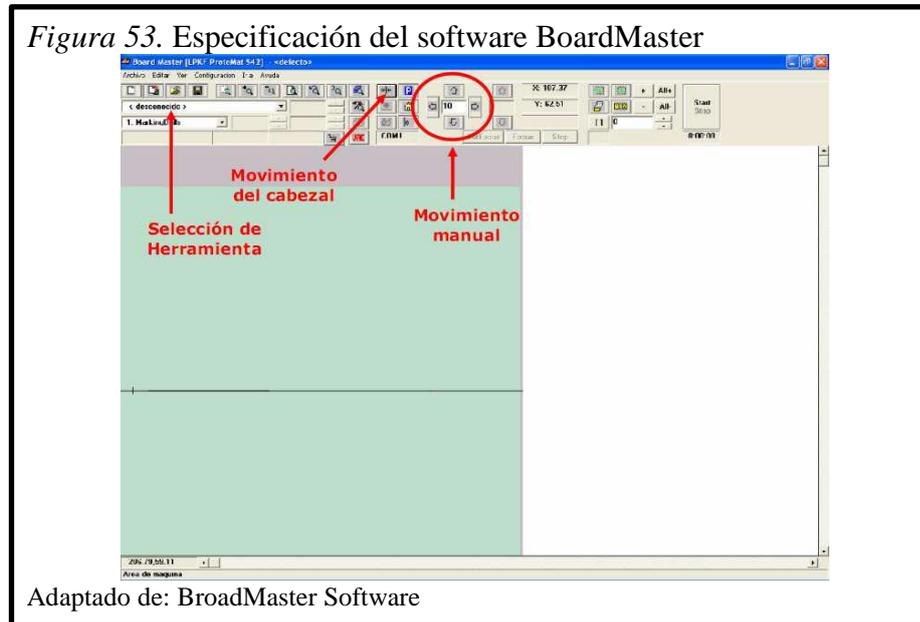
Elaborado por: Erick Peñaherrera

4.1.3.2.6 Exportación a BoardMaster.

Para, llegar al BoardMaster se debe generar los archivos LDM que son exportables a

BoardMaster, para ello se pulsa el botón:  , esto generará el archivo y si además

necesariamente se tiene que tener el BoardMaster abierto, lo exportará directamente como se visualiza en la figura 53.



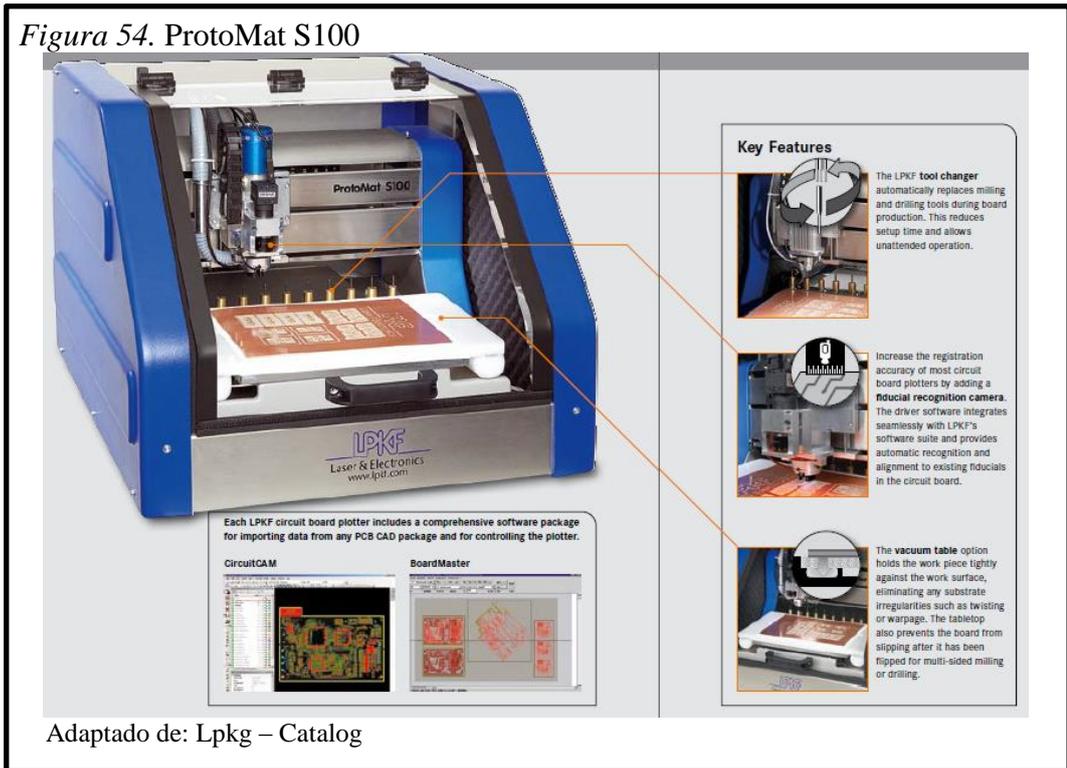
Se exporta el archivo y automáticamente las pistas se generan en el BoardMaster. Se coloca las brocas que se especifica en la tabla 5 que automáticamente el programa genera, se sitúa en diferente posición y se especifica dónde va a ser colocada como se muestran en la figura 54.

Tabla 5. Set de brocas para el ProtoMat S100

Set de Brocas
Spiral Drill 1/8", 38 mm (1.5"), d=0.60 (24 mil)
Spiral Drill 1/8", 38 mm (1.5"), d=0.70 (278 mil)
Spiral Drill 1/8", 38 mm (1.5"), d=0.80 (31 mil)
Spiral Drill 1/8", 38 mm (1.5"), d=0.90 (35 mil)
Spiral Drill 1/8", 38 mm (1.5"), d=1.00 (39 mil)
Spiral Drill 1/8", 38 mm (1.5"), d=1.10 (43 mil)
Spiral Drill 1/8", 38 mm (1.5"), d=1.30 (51 mil)
Spiral Drill 1/8", 38 mm (1.5"), d=1.50 (59 mil)
Spiral Drill 1/8", 38 mm (1.5"), d=3.00 (118 mil)
Contour Router 1/8", 38 mm (1.5"), d=1.00 (39 mil)
Contour Router 1/8", 38 mm (1.5"), d=2.00 (79 mil)
End Mill 1/8", 36 mm (1.4"), d=1.00 mm (39 mil)
End Mill 1/8", 36 mm (1.4"), d=2.00 (79 mil)
End Mill (RF) 1/8", 36 mm (1.4"), d=0.40 (16 mil)
Universal Cutter 1/8", 36 mm (1.4"), 0.2–0.5 mm (8–20 mil)

Elaborado por: Erick Peñaherrera

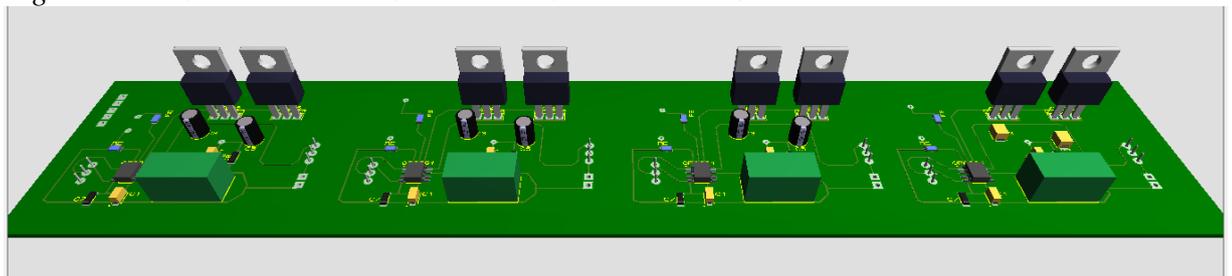
Figura 54. ProtoMat S100



En las figuras 55 y 57 se visualizan las vistas en 3D de la PCB en simulación donde se puede ver si la distribución de elementos es la adecuada.

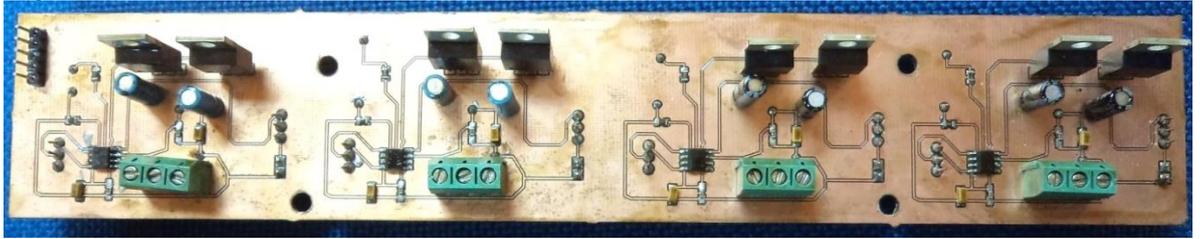
En las figuras 56 y 58 se puede ver la forma terminada de la PCB después del fresado con su respectiva soldadura y ubicación de elementos. Donde se puede observar componentes montados en ambas caras de la PCB y una mezcla de tipos de componentes como: inserción y montaje superficial.

Figura 55. Vista frontal del PCB desde el software ARES



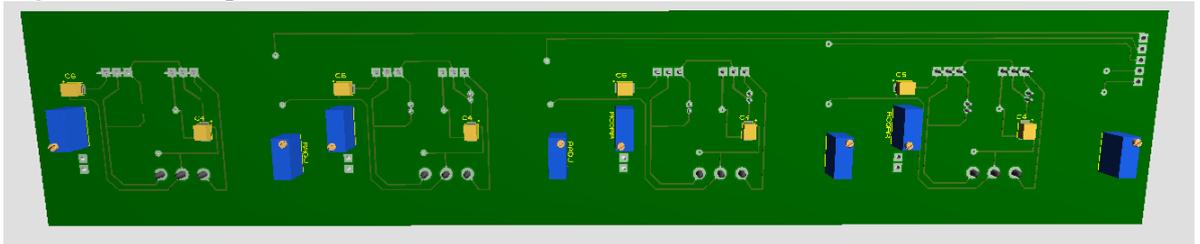
Elaborado por: Erick Peñaherrera

Figura 56. Vista frontal del PCB forma física



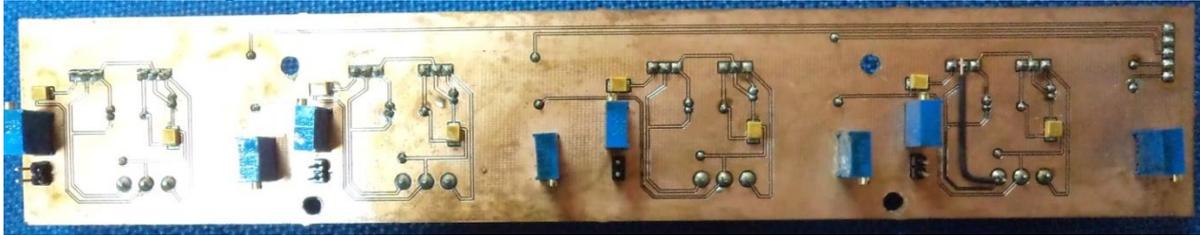
Elaborado por: Erick Peñaherrera

Figura 57. Vista posterior del PCB desde el software ARES



Elaborado por: Erick Peñaherrera

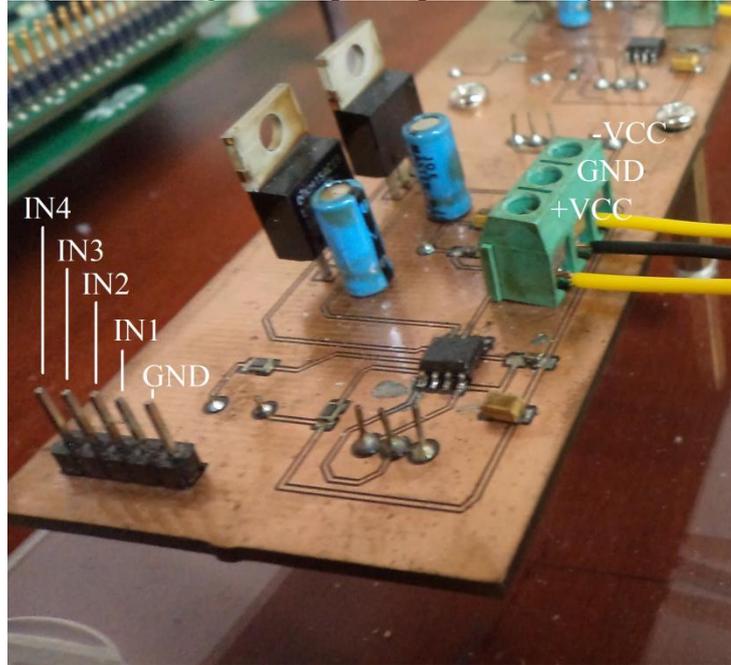
Figura 58. Vista posterior del PCB forma física



Elaborado por: Erick Peñaherrera

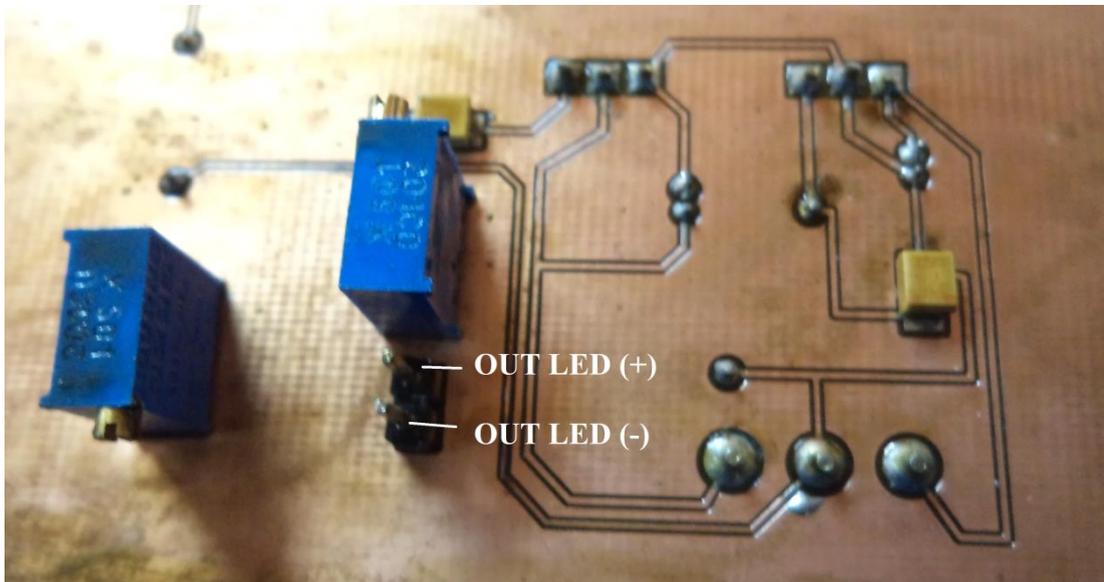
En las figuras 59 y 60 se especifica el diagrama de pines para la conexión e implementación del sistema, donde IN se refiere a las entradas de la FPGA y OUT las salidas para los diodos LED's.

Figura 59. Diagrama de pines (polarización y entradas)



Elaborado por: Erick Peñaherrera

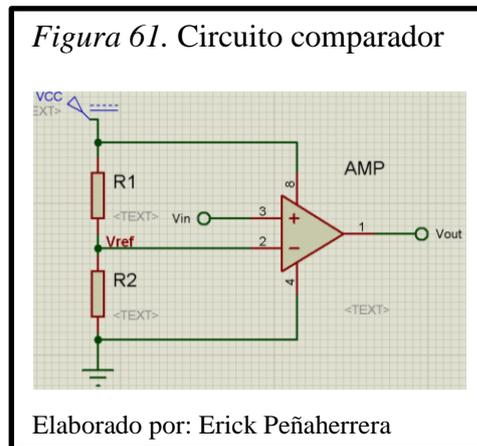
Figura 60. Diagrama de pines (salidas para el LED)



Elaborado por: Erick Peñaherrera

4.1.4 Diseño del receptor.

Para el sistema SISO en el elemento de recepción se analizó y se dedujo que la señal es ON – OFF por lo cual se realizó con un amplificador operacional un comparador para obtener 0 y 3 voltios para la entrada de la FPGA:



En la figura 61 para obtener la comparación y el voltaje de salida se realiza el siguiente análisis, se mide el valor de la onda o la señal de entrada V_{IN} después se obtiene un valor X que se encuentre en el rango de Voltaje pico de entrada como se especifica en la Ecuación 5. Después de haber conocido el dato X se calculan las resistencias R_1 y R_2 .

Ecuación 23. Límites de control para el comparador

$$-V_{IN} \leq X \leq +V_{IN}$$

Ecuación 24. Divisor de voltaje

$$V_{REF} = \frac{V_{CC} \times R_2}{R_1 + R_2}$$

Despejando R_1 de Ecuación 24:

Ecuación 25. Despeje de R_1

$$R_1 = \frac{R_2(V_{IN} - V_{REF})}{V_{REF}}$$

Ecuación 26. Límites de voltaje de salida con respecto al voltaje de entrada

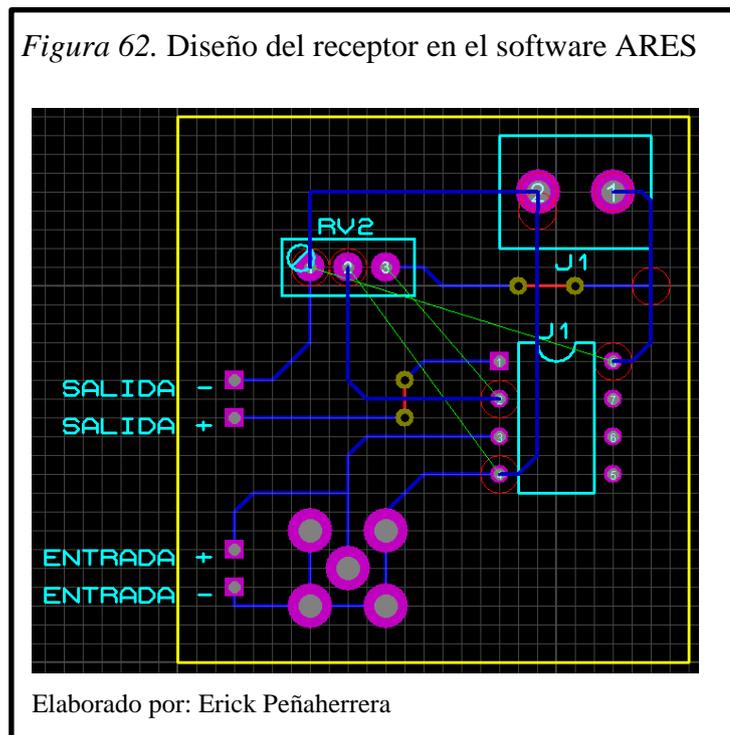
$$V_{OUT} = \begin{cases} V_{IN} \geq V_{REF} & \therefore +V_{REF} \\ V_{IN} < V_{REF} & \therefore -V_{REF} \end{cases}$$

El amplificador operacional, es un amplificador diferencial de muy alta ganancia que posee alta impedancia de entrada y baja impedancia de salida. El amplificador operacional se utiliza para proporcionar cambios en la amplitud de voltaje y/o corriente (amplitud y polaridad) como se muestra en la ecuación 21 y la ecuación 24.

4.1.4.1 Elaboración del PCB.

Cuando se analiza y se diseña el circuito de recepción se procede a realizar el esquema en Ares como en la figura 62 para la elaboración de la PCB.

Figura 62. Diseño del receptor en el software ARES

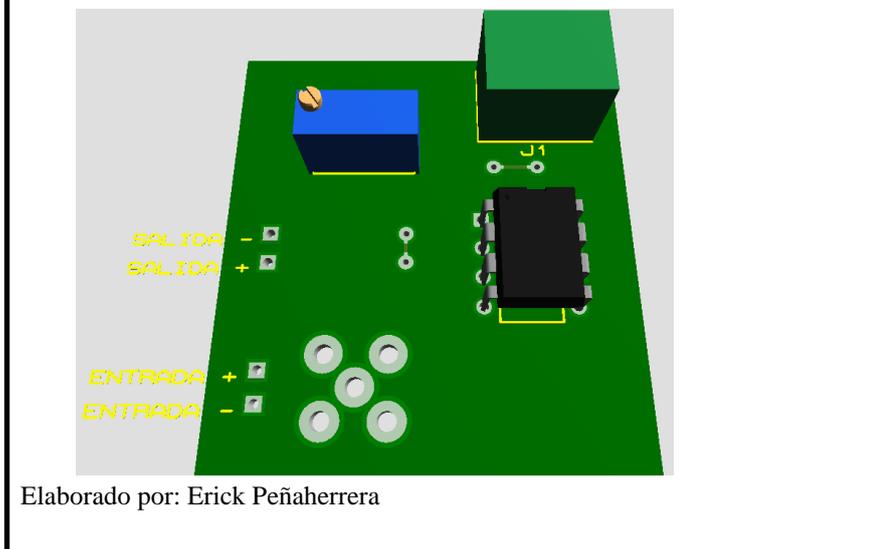


4.1.4.2 Ataco de cobre.

- Diseño: Un circuito complejo requiere el uso de herramientas computacionales que permitan diseñar y simular el esquema electrónico y su arte de circuito impreso.
- Cortado: Conocido el tamaño del circuito impreso, se procede a realizar el corte de la tarjeta.
- Impresión en la placa de cobre: una vez que la máscara esta lista, se procede a grabarla en la placa, este procedimiento depende de la técnica a utilizar.

- Atacado del cobre: se inserta la placa de cobre previamente grabada, en soluciones ácidas que eliminan el cobre no deseado.
- Taladro: Se perforan los orificios en donde se colocaran los componentes.
- Limpieza: Se realiza el lavado y limpieza de la placa para eliminar todas las impurezas.
- Soldadura: etapa donde se realiza el montaje (colocación y soldadura) de los componentes.
- Pruebas de funcionamiento: Antes de realizar interconexiones se verifica el funcionamiento del circuito (Cortocircuitos, circuitos abiertos, soldaduras frías, entre otros.)

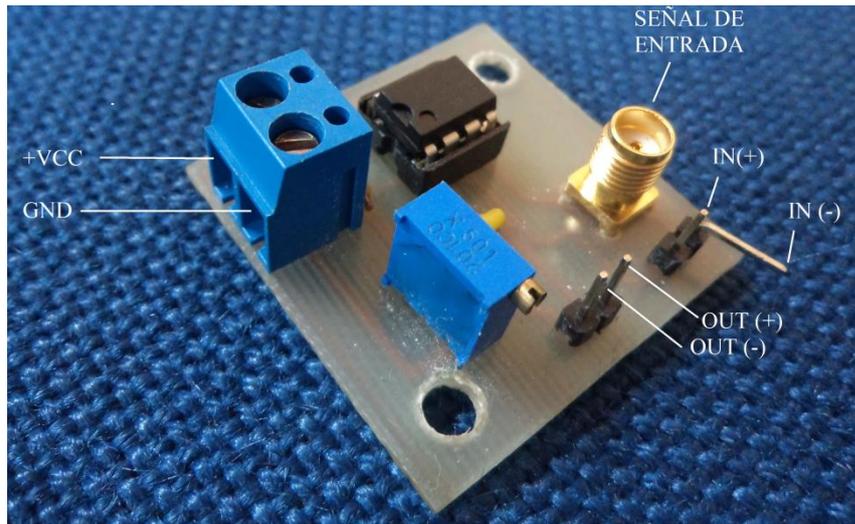
Figura 63. Vista frontal de PCB de recepción en el software ARES



En la figura 64 se muestra la distribución de pines para ser implementadas en su respectivo sistema donde la señal de entrada es la señal del fotodiodo DET360 por conector SMA, los pines IN son para la visualización de la señal de entrada y los pines OUT son la señal de comparación ON-OFF para la FPGA.

Las dimensiones de la PCB son de 3.68 cm x 3.43 cm y un modo de pistas estilo T12.

Figura 64. Distribución de pines (polarización, entradas y salidas)



Elaborado por: Erick Peñaherrera

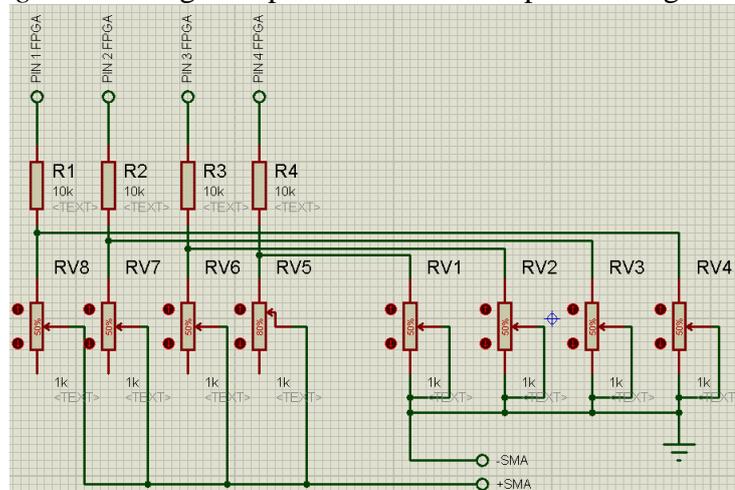
Sus componentes fueron montados en una cara de la PCB.

4.2 Diseño e implementación del sistema MISO

4.2.1 Diseño del transmisor y receptor.

Para realizar una comunicación por luz visible con el sistema de comunicación MISO tanto para el elemento del emisor y receptor se realizó un circuito divisor de voltaje para tener distintos niveles de voltaje y simular el canal de transmisión y recepción como se muestra en la figura 65:

Figura 65. Diagrama para sistema MISO por medio guiado



Elaborado por: Erick Peñaherrera

Se requiere obtener una señal multinivel con valores de voltaje de 400mv, 300mv, 200mv y 100mv porque el modulo análogo de la FPGA soporta hasta un máximo de 500 mv, para lo cual se utiliza divisores de voltaje y los cálculos para obtener estos valores a la salida se muestran a continuación:

✓ Cálculo para $V_{out1} = 400\text{mv}$:

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_{V4}}{R_1 + R_{V4}}$$

Dónde: $V_{in} = 2.5 \text{ v}$

$$R_1 = 150 \Omega$$

Despejo R_2 :

$$R_{V4} = 28.57 \Omega$$

✓ Cálculo para $V_{out2} = 300\text{mv}$:

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_{V3}}{R_2 + R_{V3}}$$

Dónde: $V_{in} = 2.5 \text{ v}$

$$R_2 = 150 \Omega$$

Despejo R_2 :

$$R_{V3} = 20.45 \Omega$$

✓ Cálculo para $V_{out3} = 200\text{mv}$:

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_{V2}}{R_3 + R_{V2}}$$

Dónde: $V_{in} = 2.5 \text{ v}$

$$R_3 = 150 \Omega$$

Despejo R_2 :

$$R_{V2} = 13.04 \Omega$$

✓ Cálculo para $V_{out4} = 100\text{mv}$:

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_{V1}}{R_4 + R_{V1}}$$

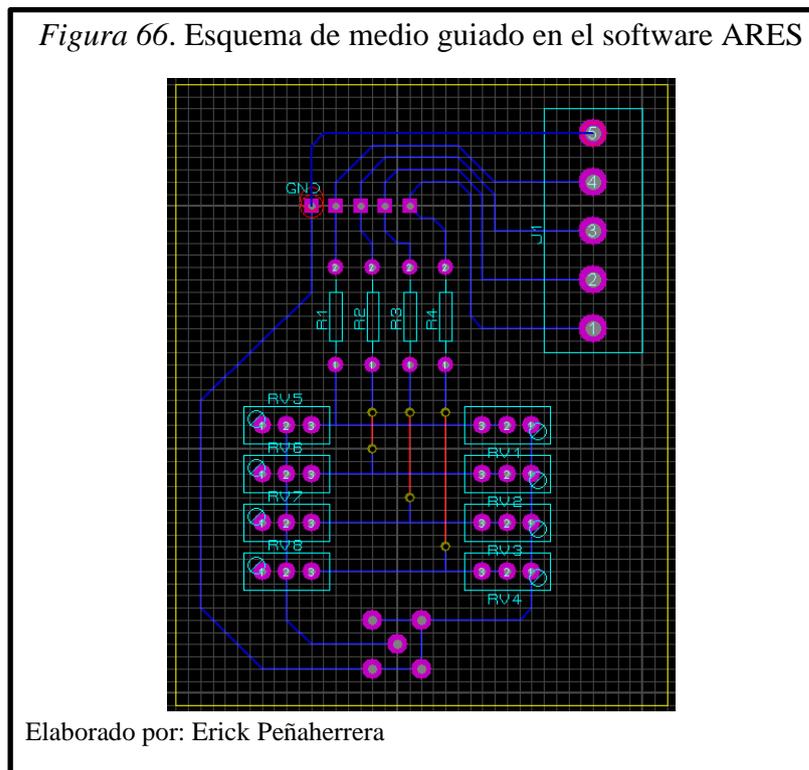
Dónde: $V_{in} = 2.5 \text{ v}$

$R_4 = 150 \Omega$

Despejo R_2 :

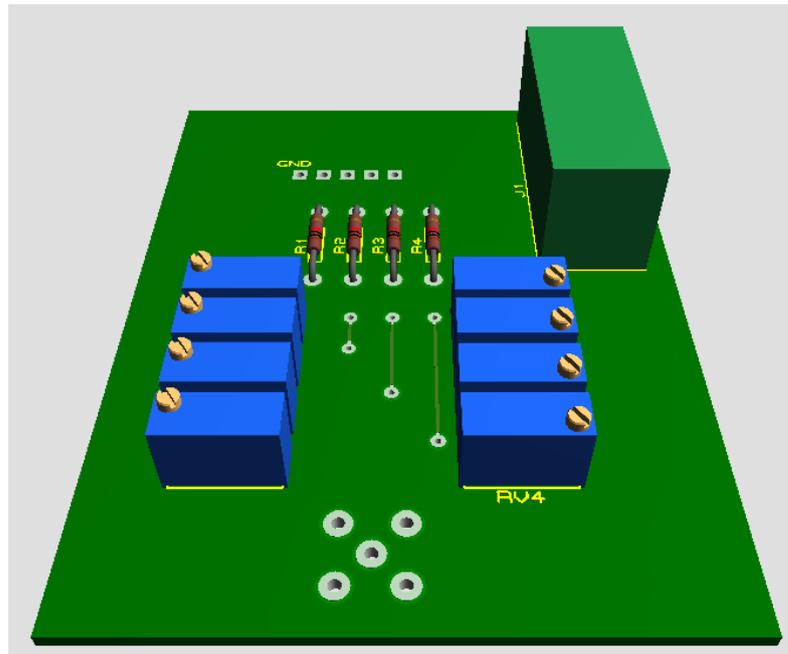
$$R_{V1} = 6.25 \Omega$$

4.2.2 Implementación del transmisor y receptor MISO.



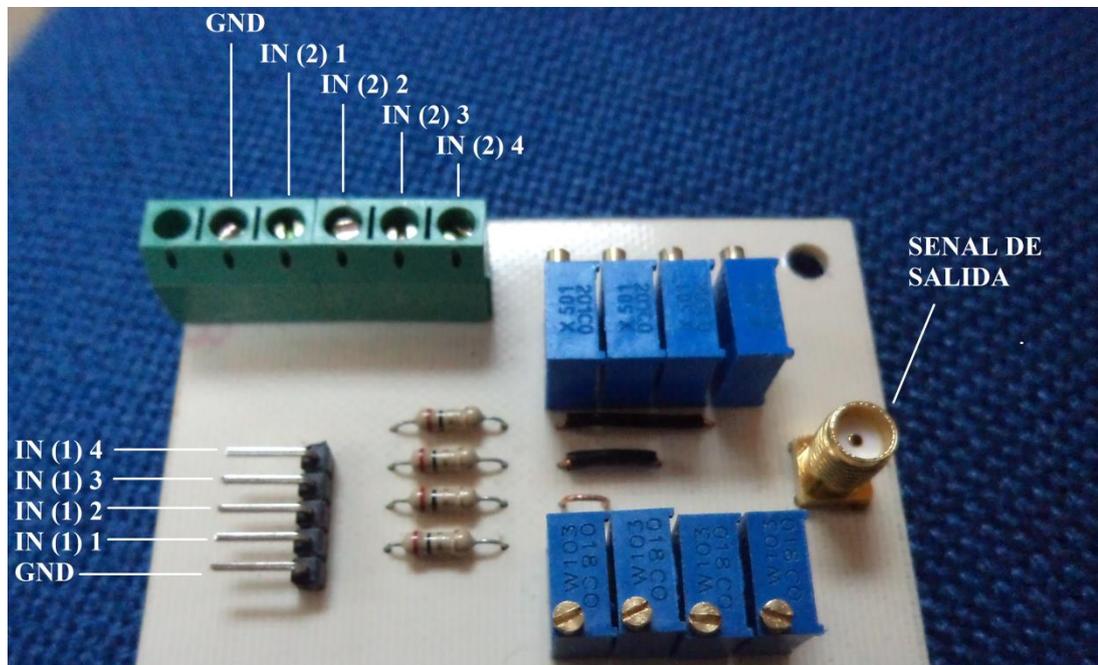
La figura 66 es el esquema en simulador Ares el cual se visualiza las conexiones entre elementos donde las dimensiones de la PCB son de 5,1 cm x 6.48 cm y un modo de pistas estilo T12, y la figura 67 se observa si la distribución de los elementos es adecuada.

Figura 67. Visualización en 3D de la PCB de medio guiado



Elaborado por: Erick Peñaherrera

Figura 68. Distribución de pines (entradas y salidas)



Elaborado por: Erick Peñaherrera

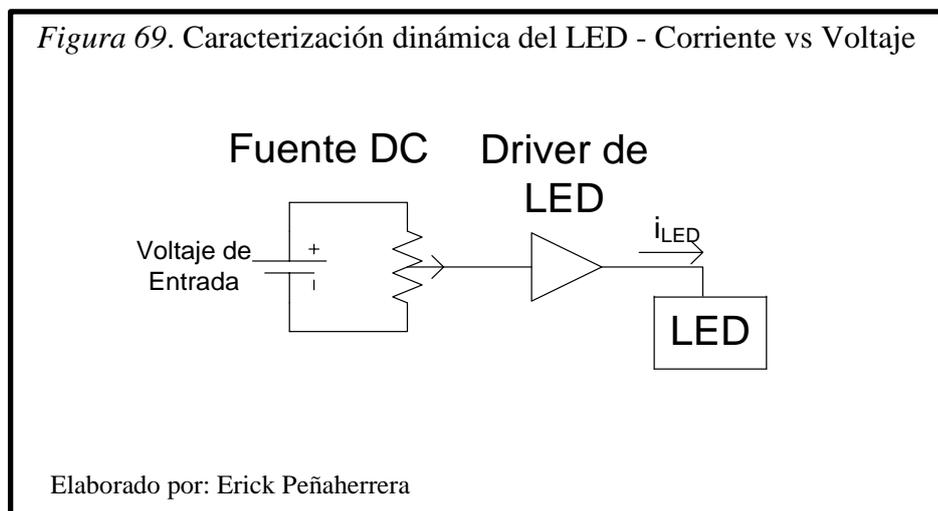
En la figura 68 se observa el diagrama de pines, sus respectivas conexiones para el sistema MISO como: IN (1) y IN (2) son las entradas de la FPGA por distintos tipos en conexiones y la señal de salida es la señal multinivel que entra a la señal analógica de la FPGA.

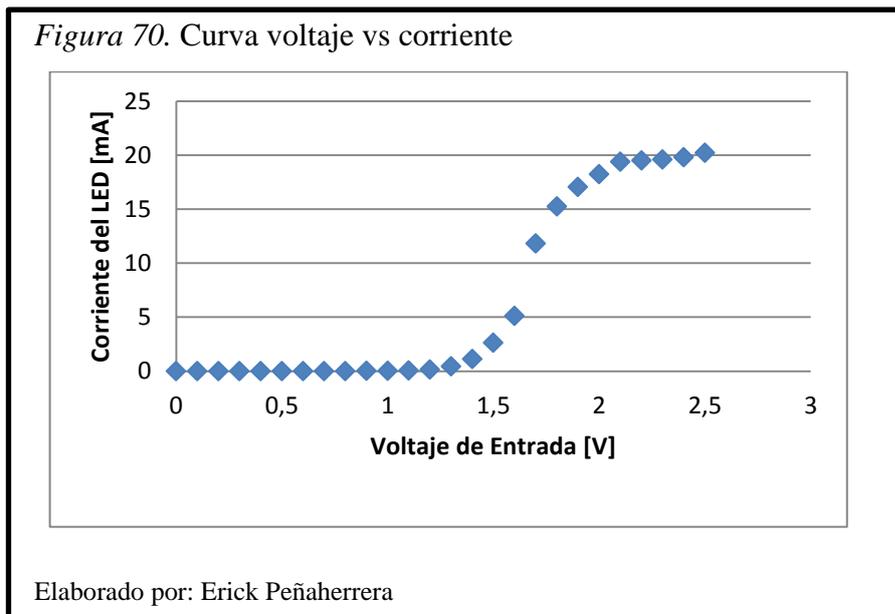
4.3 Caracterización del LED de luz blanca

Con la caracterización del LED se conoció el funcionamiento y algunas propiedades del LED, como curvas características y el comportamiento no lineal del LED con respecto al voltaje y corriente.

4.3.1 Curvas características – corriente vs voltaje.

Para la caracterización del LED se realizó mediciones para el cual, cuando se tiene un voltaje de entrada máximo de 2.5V, el driver transforma de señal de voltaje a señal de corriente más conocido como amplificador de transconductancia, El LED consumirá una corriente de 20mA para que empieza a trabajar. En la FPGA se configura para tener voltajes hasta 2.5 voltios pico luego se realiza la curva característica del diodo LED.





En la figura 70 se observa la curva característica del driver del LED donde el Led comienza a trabajar cuando tiene 1.5v con una corriente de 2.64 mA y llegando a una corriente máxima de 20 mA con voltaje de 2.1v y también describe las características no lineales de los LED.

Línea de tendencia o curva característica Voltaje vs Corriente de la figura 73:

$$I_{LED} = 9,8552V_{in}^6 - 75,858V_{in}^5 + 211,54V_{in}^4 - 256,78V_{in}^3 + 132,09V_{in}^2 - 21,987V_{in}$$

El circuito del driver, la configuración y la medición de la transferencia dinámica del driver se muestra en la figura 71. Bajo el manejo de una onda sinusoidal se mide la respuesta del driver en términos de voltaje como se muestra en la figura 72.

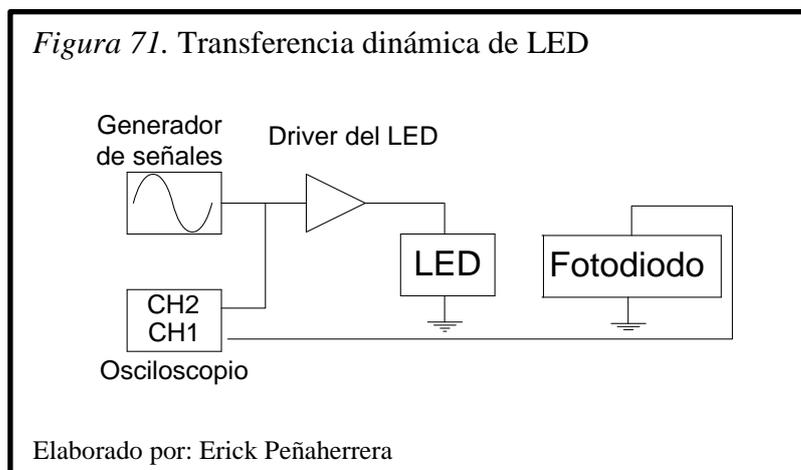
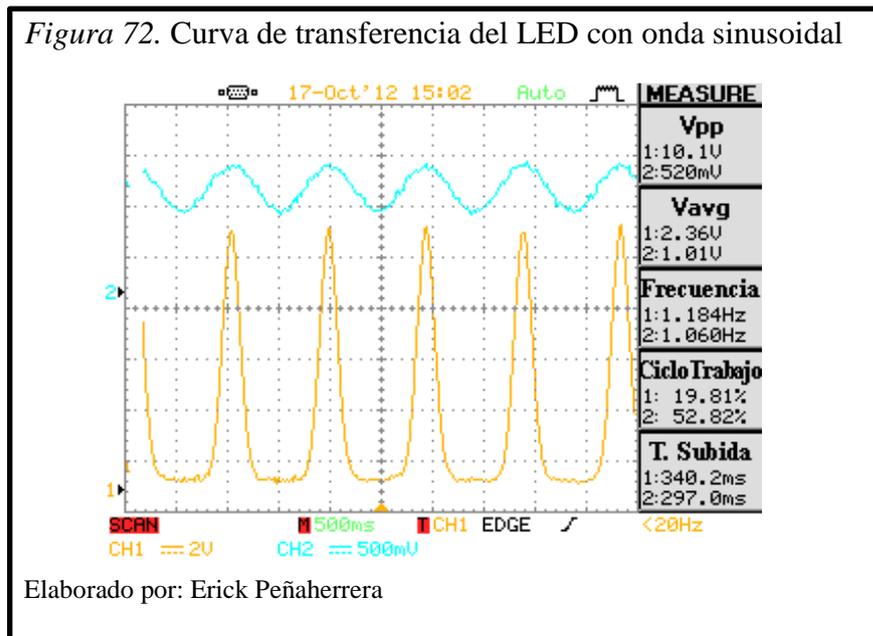


Figura 72. Curva de transferencia del LED con onda sinusoidal



La función de transferencia es un modelo matemático que a través de un cociente relaciona la respuesta de un sistema y sirve para caracterizar las relaciones de entrada y salida de variables, en este caso en voltaje de entrada variante en la frecuencia o en el tiempo para el diodo LED.

El voltaje de entrada se calculó en base al bias (voltaje de trabajo) del LED, el voltaje necesario para que se prenda el LED es de 2.1 v, si se le suma 1.2 más 1.15 se tiene un voltaje máximo de 2.35 y si restamos 1.2 menos 1.15 tenemos un voltaje mínimo de 0.05 v así se contrala los voltajes límites de trabajo del LED, donde el voltaje de entrada se muestra a continuación.

$$V_{in} = 1,2 \sin(\omega t) + 1,15$$

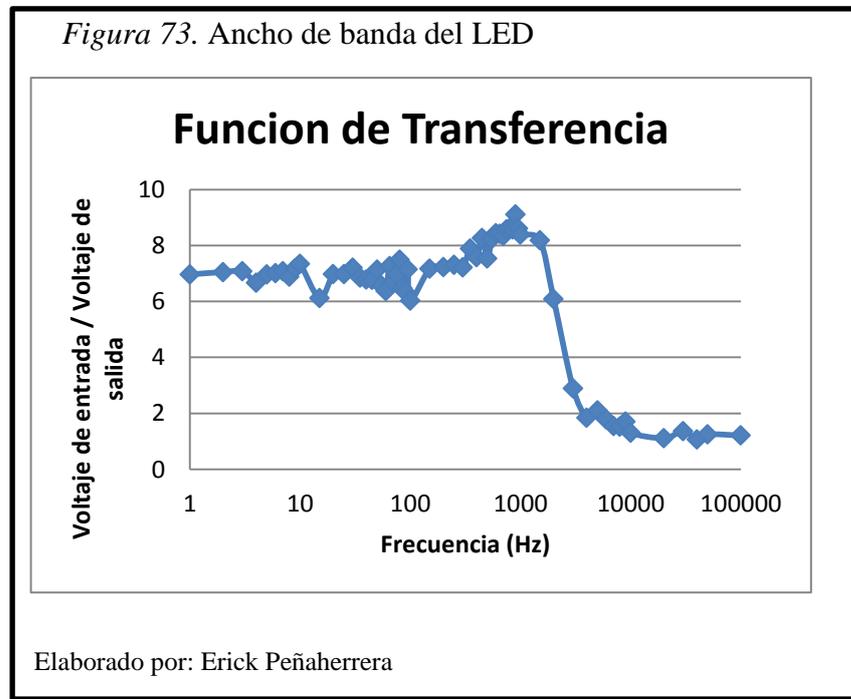
Dónde:

V_{in} Voltaje de entrada
 t Tiempo

Sabiendo que $f=1/t$

f Frecuencia

En la figura 73 se puede ver gráficamente la función de transferencia de LED dado en ancho de banda donde se tiene una frecuencia de corte de 2.25KHz y la figura 77 muestra la caracterización dinámica con el software Labview con sus respectivos elementos.

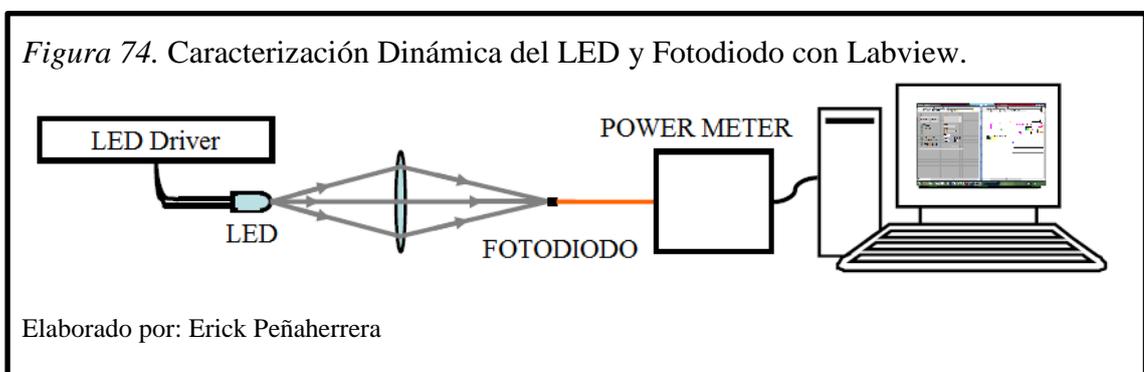


Dónde la línea de tendencia por medio de interpolación de la función de transferencia es:

Ecuación 27. Línea de tendencia de la función de transferencia

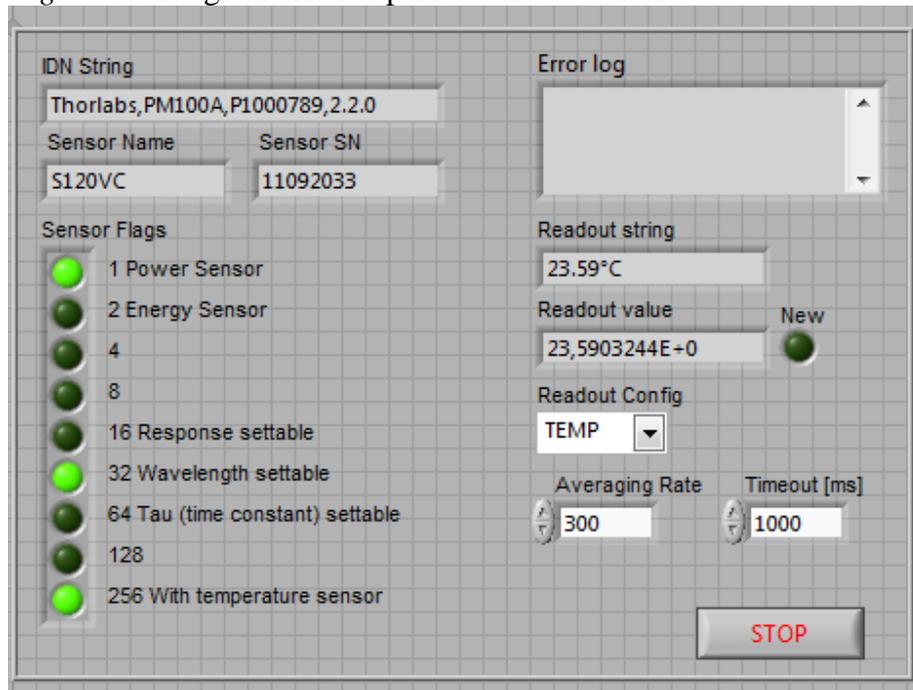
$$V_{IN}/V_{OUT} = 3 \times e^{-9*f} - 0.003f + 6.9742$$

Dónde: V_{IN} = Voltaje de entrada
 V_{OUT} = Voltaje de salida
 f = frecuencia



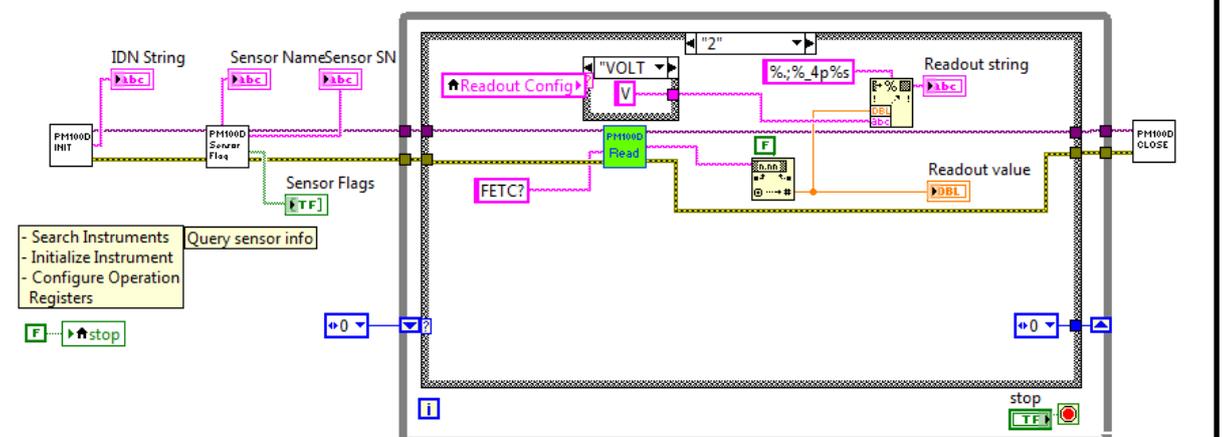
Para la realización adecuada de la caracterización del LED, se diseñó un programa en Labview para poder observar voltaje, corriente, potencia óptica, energía, temperatura, resistencia y frecuencia a través de comunicación USB para leer en la computadora como se muestra en las figuras 75 y 76. Utilizando el Power Meter o Medidor de potencia óptica PM100A.

Figura 75. Diagrama frontal para lectura de sensor



Elaborado por: Erick Peñaherrera
Adaptado de: Labview - Thorlabs

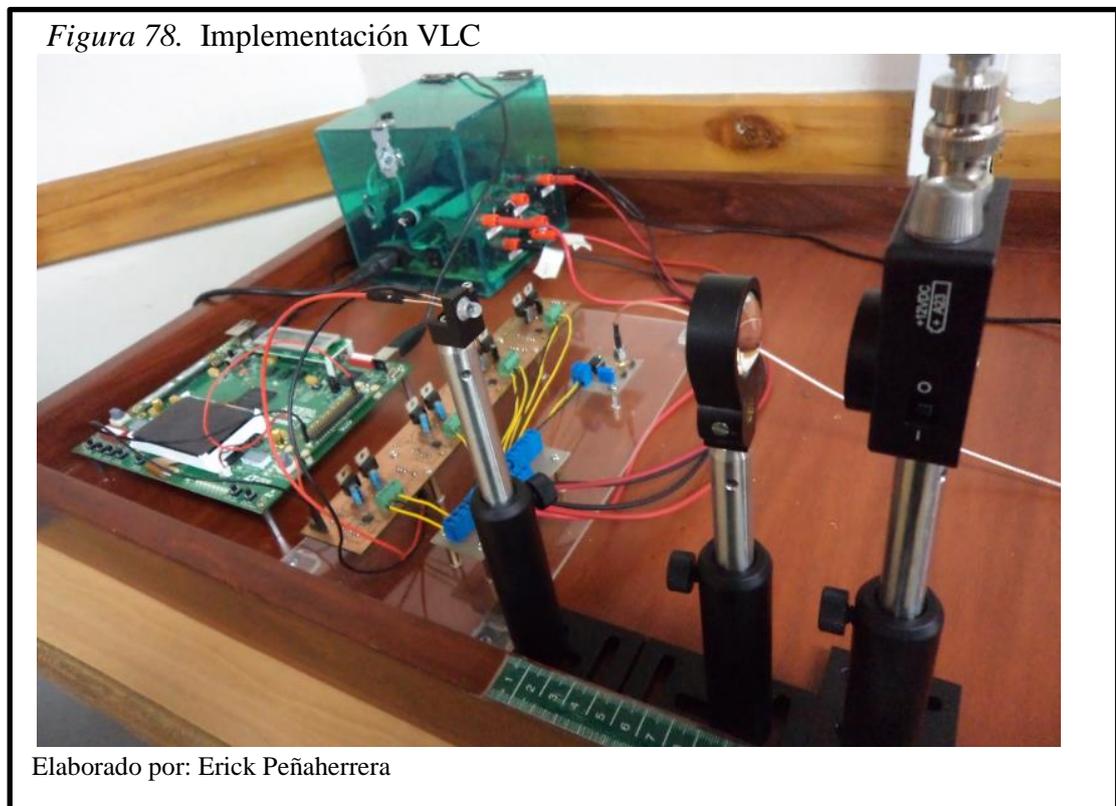
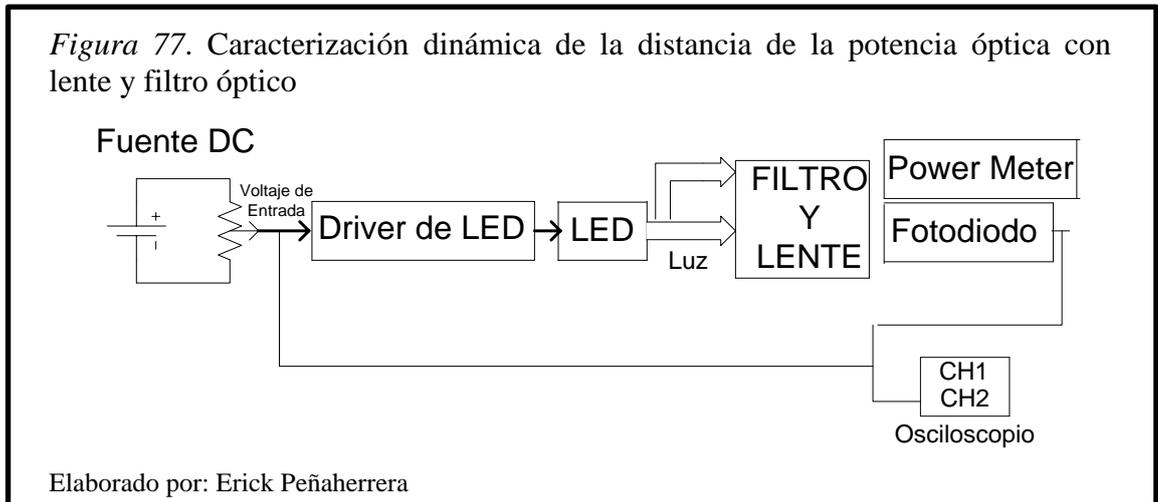
Figura 76. Diagrama de bloques del panel frontal



Elaborado por: Erick Peñaherrera
Adaptado de: Labview - Thorlabs

4.3.2 Determinación de la potencia del diodo de luz blanca.

Variando la distancia entre transmisor y emisor se obtendrá graficas las cuales se analizará cual respuesta es la conveniente para la comunicación. Se obtendrá las respuestas sin filtros ópticos ni lente y con filtro óptico y lente. Como se muestra en la figura 77.



En la figura 78 se muestra el sistema SISO implementado, comunicación por luz visible.

4.3.3 Caracterización con filtro óptico y sin lente azul.

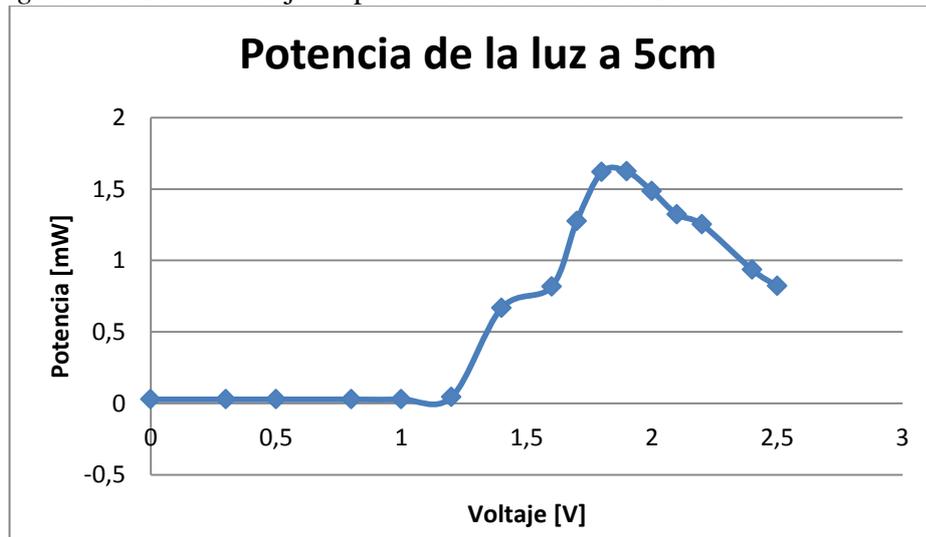
En la figura 79 se muestra el sistema SISO implementado demostrando la caracterización dinámica con filtro y sin lente.

Figura 79. Implementación para la caracterización con filtro y sin lente



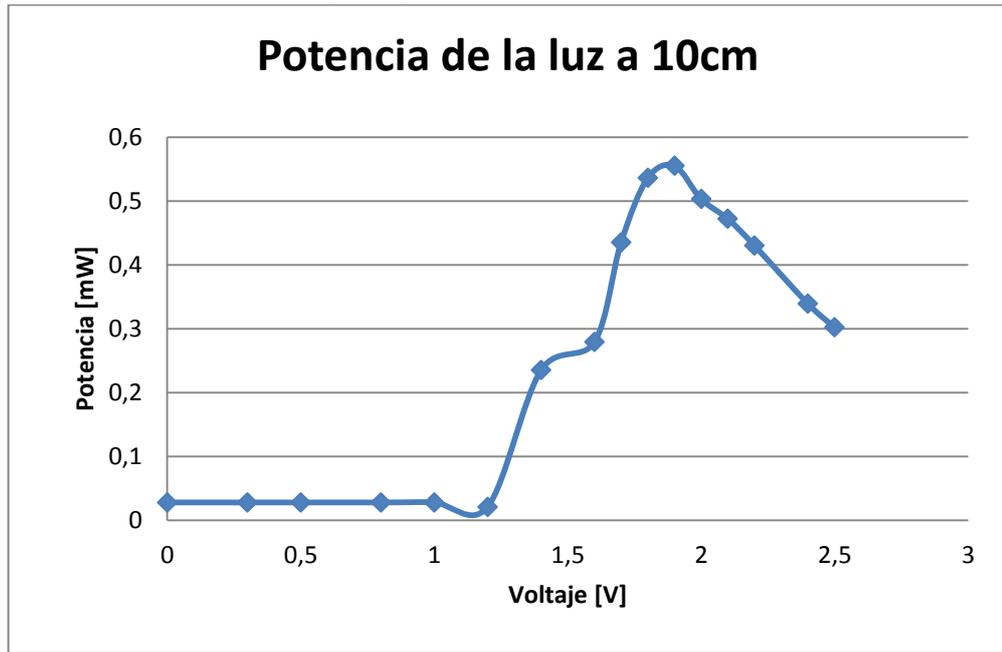
Elaborado por: Erick Peñaherrera

Figura 80. Curva voltaje vs potencia a distancia de 5cm sin lente ni filtro



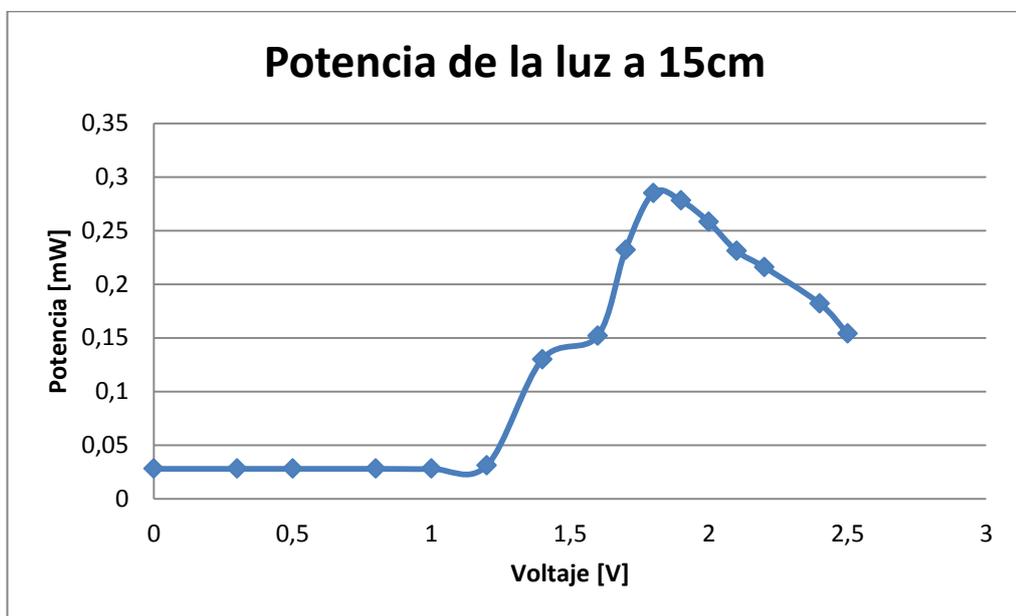
Elaborado por: Erick Peñaherrera

Figura 81. Curva voltaje vs potencia a distancia de 10cm sin lente ni filtro



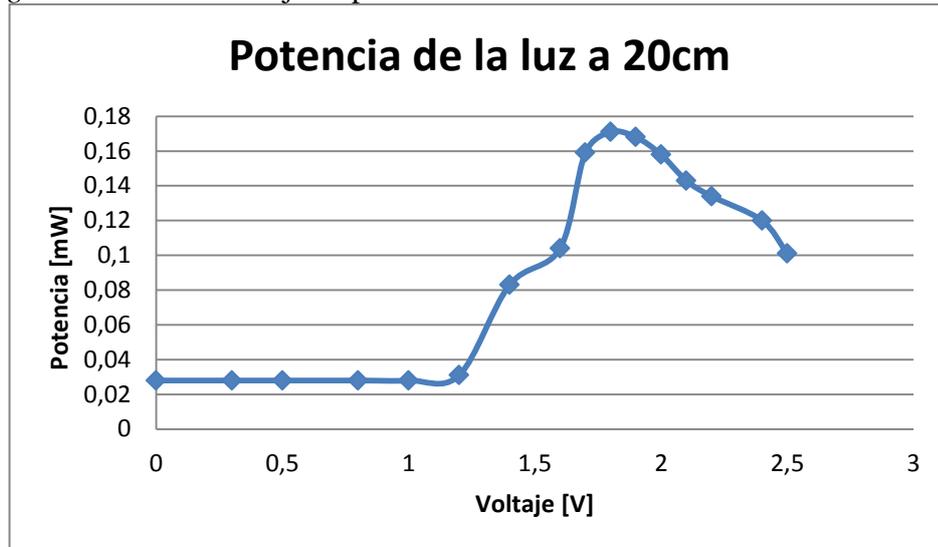
Elaborado por: Erick Peñaherrera

Figura 82. Curva voltaje vs potencia a distancia de 15cm sin lente ni filtro



Elaborado por: Erick Peñaherrera

Figura 83. Curva voltaje vs potencia a distancia de 20cm sin lente ni filtro

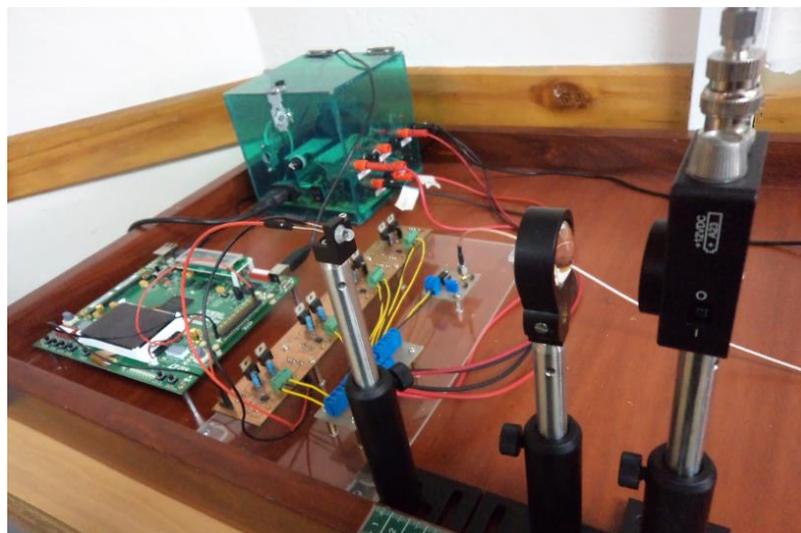


Elaborado por: Erick Peñaherrera

Analizando las figuras 80, 81, 82 y 83 se obtuvo que la distancia es inversamente proporcional a la potencia óptica del LED, donde quiere decir que a mayor distancia, menor será la potencia óptica. Para efectos experimentales, el funcionamiento de los circuitos implementados se realizó a distancias y frecuencias máximas a las cuales todavía existía transmisión de datos y así se logró conocer las limitaciones que tiene el sistema.

4.3.4 Caracterización con lente y filtro óptico.

Figura 84. Implementación para la caracterización con filtro y con lente azul



Elaborado por: Erick Peñaherrera

En la figura 84 se muestra el sistema SISO implementado demostrando la caracterización dinámica con filtro y lente.

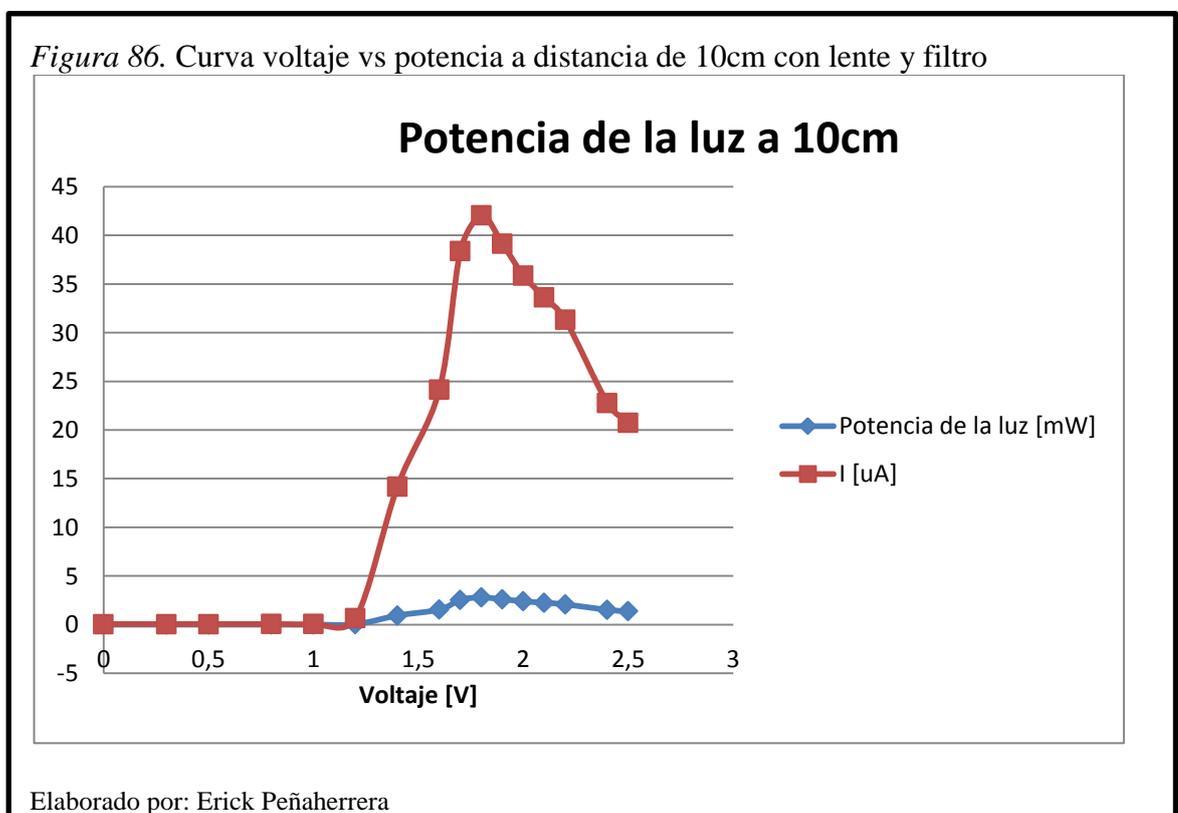
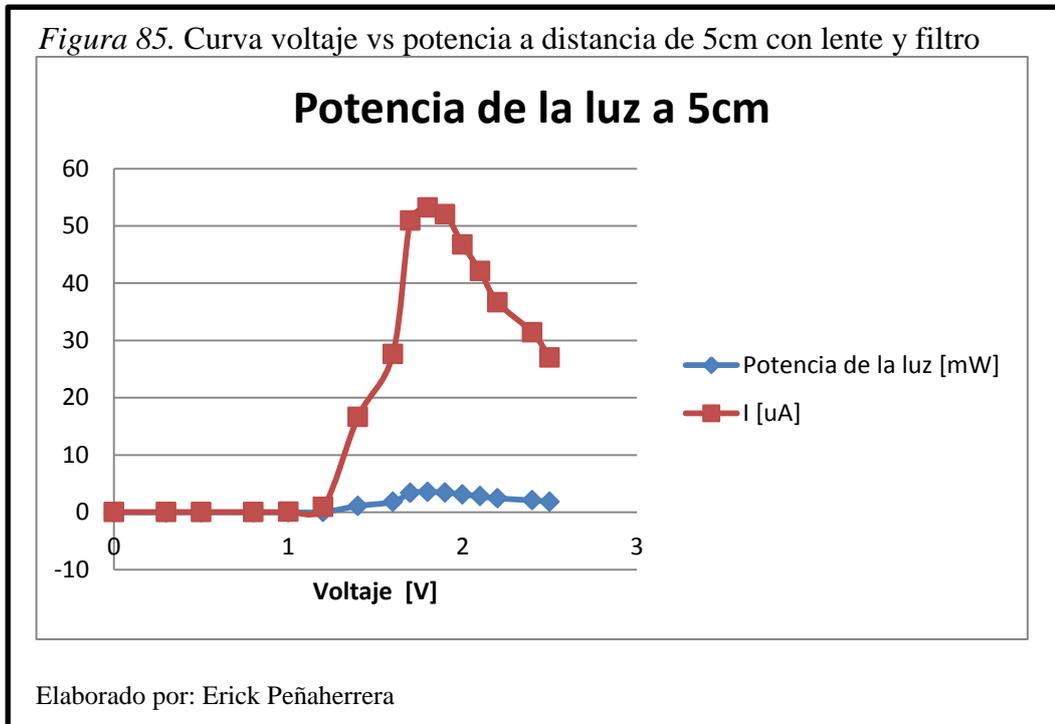
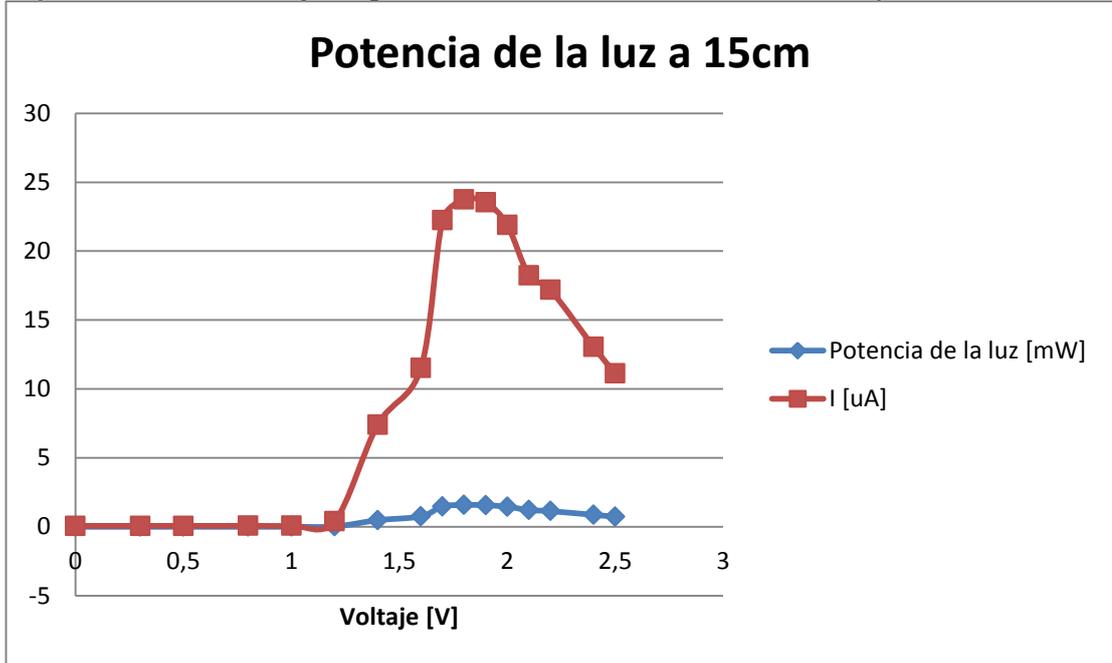
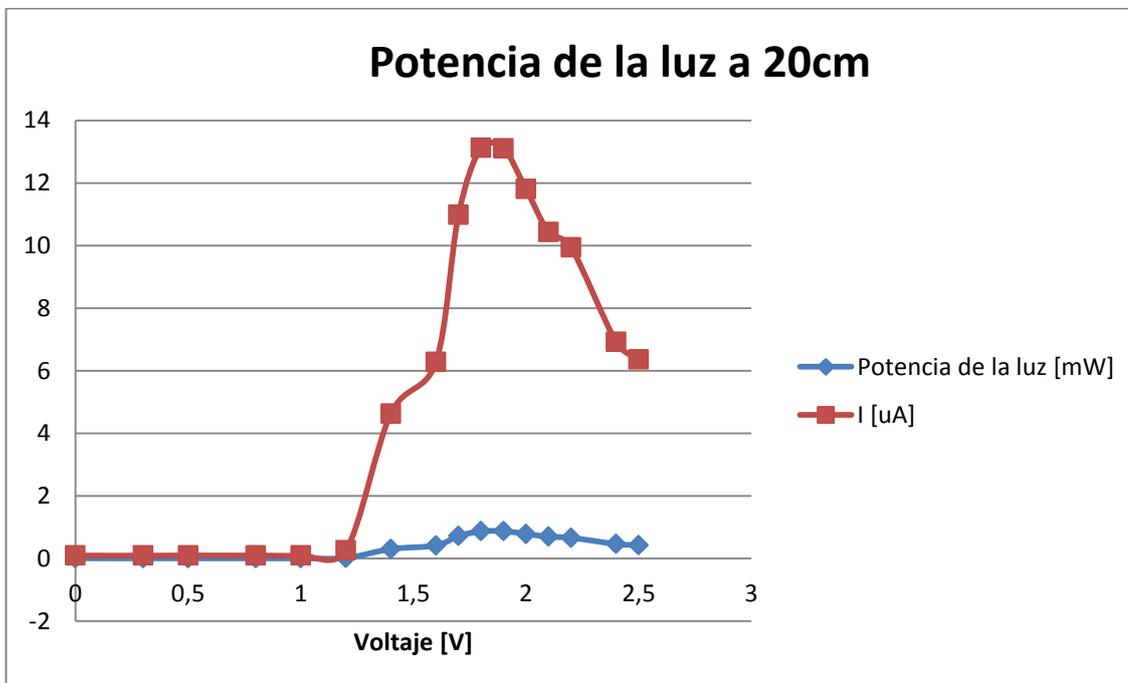


Figura 87. Curva voltaje vs potencia a distancia de 15cm con lente y filtro



Elaborado por: Erick Peñaherrera

Figura 88. Curva voltaje vs potencia a distancia de 20cm con lente y filtro



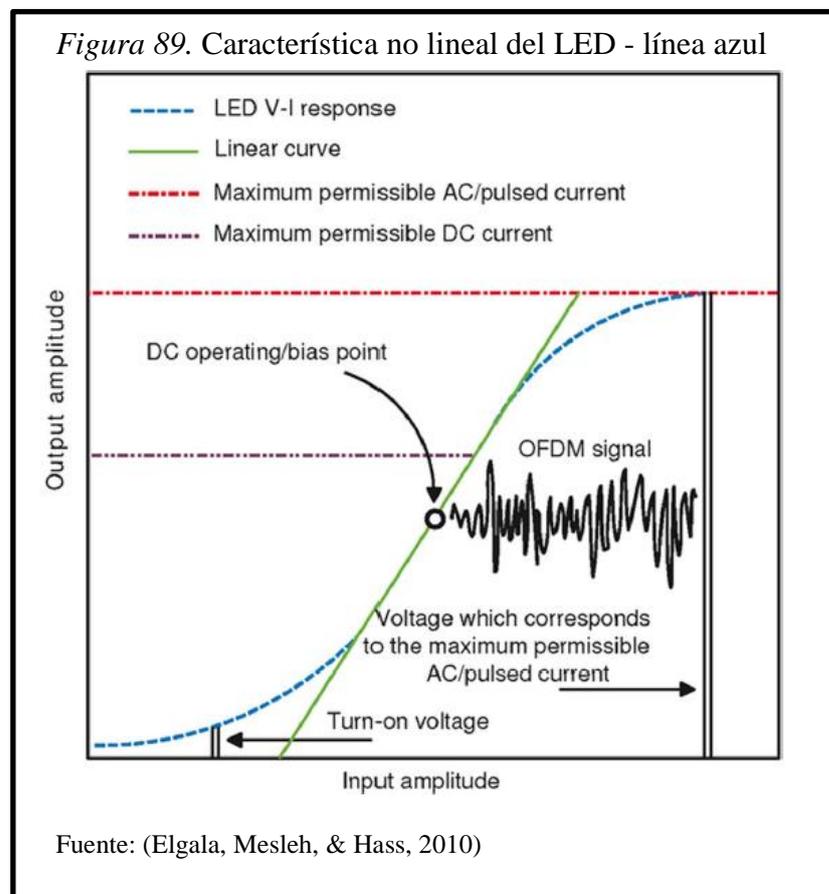
Elaborado por: Erick Peñaherrera

Analizando las figuras 85, 86, 87 y 88 se obtuvo que la distancia es inversamente proporcional a la potencia óptica y a la corriente del LED, medido con el sensor DET36A con el software Labview, el cual es otra forma de caracterizar y se logra conocer más datos a la vez como potencia óptica, corriente, voltaje, energía y longitud de onda.

4.4 Característica no lineal del driver

Como se pudo analizar y observar las gráficas en las curvas características de voltaje vs corriente, voltaje vs potencia y potencia óptica, se observó la caracterización dinámica no lineal del dispositivo “circuito de transconductancia” como se muestra en la figura 89. Para simplificar la situación, se decidió caracterizar el LED en una región dinámica, pero a una velocidad por debajo de la señal máxima de las características del diodo LED.

Por lo tanto se centra en una caracterización lineal utilizando una señal de entrada en onda sinusoidal variando las frecuencias.



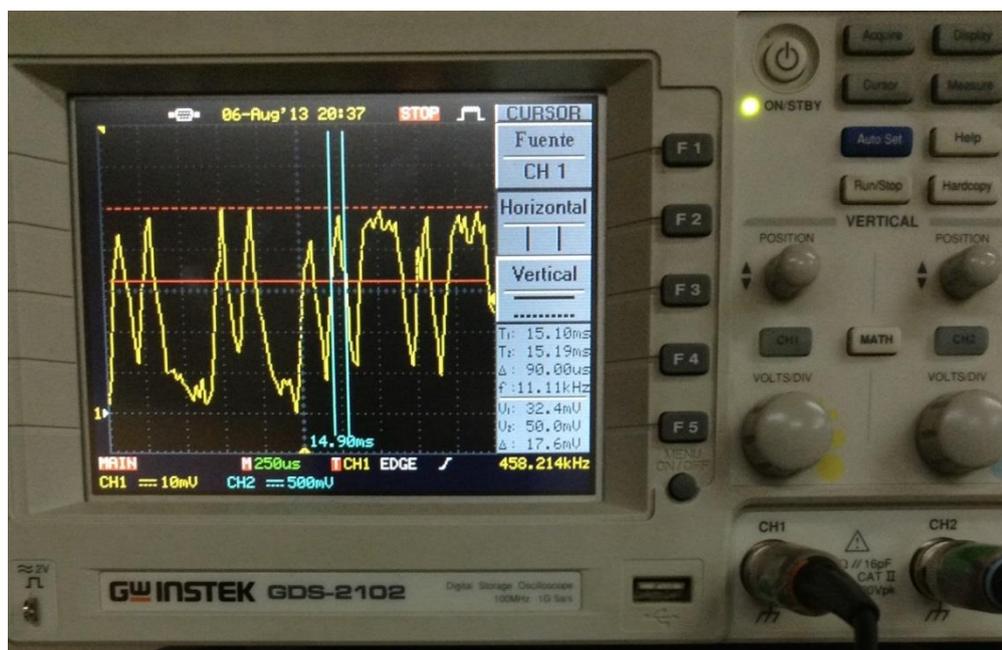
4.5 Análisis de resultados

4.5.1 Sistema de transmisor SISO.

El análisis de funcionamiento se realizará tanto para el transmisor como para el receptor, hay que tener en cuenta que el transmisor y receptor son implementados en una sola tarjeta FPGA y cada uno tiene sus respectivas asignaciones a diferentes pines de entradas y salidas. Las pruebas se ejecutarán mediante un LED de luz blanca como transmisor y un fotodiodo como receptor con circuitos independientes, los resultados serán visualizados en el osciloscopio ya sea para medir los datos enviados a través del LED, datos que llegan al receptor y el pin de sincronización del sistema en la FPGA.

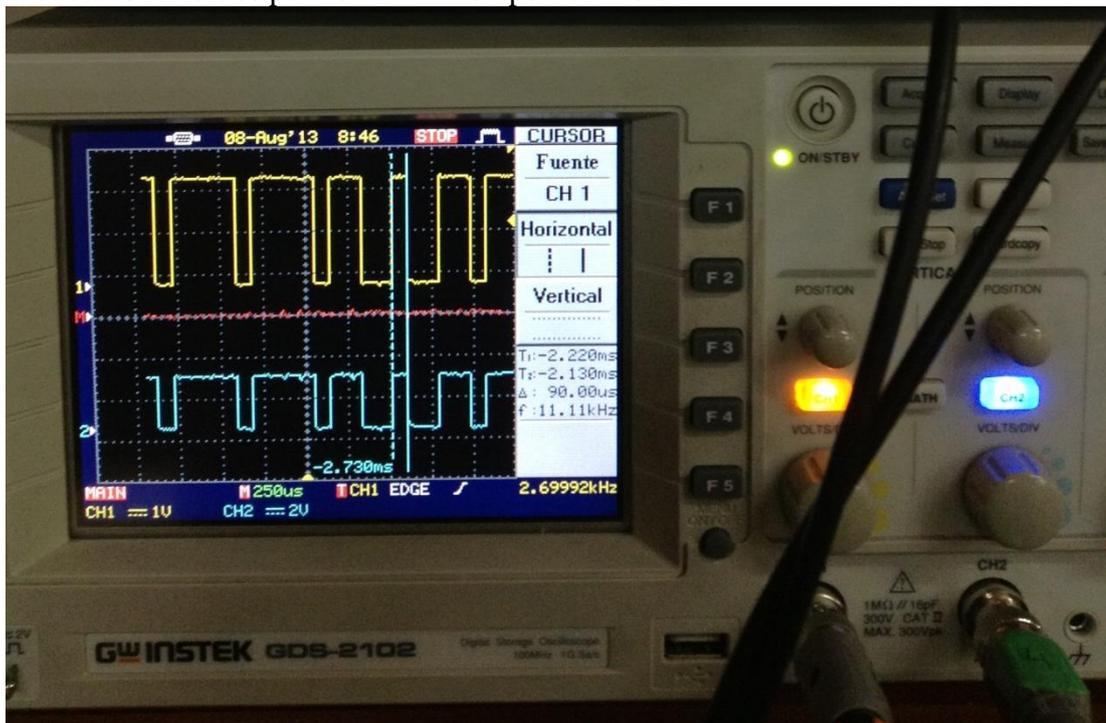
En la figura 90 y 91 están trabajando a una frecuencia de transmisión de 11.1 KHz a una distancia de 20cm y las Figuras 92 y 93 con una frecuencia de 12.5 KHz a una distancia de 15cm entonces la velocidad varía dependiendo de la distancia a la que se encuentra el transmisor con respecto al receptor lo que implica una desventaja ya que no se puede transmitir a grandes distancias sin afectar la velocidad.

Figura 90. Datos recibidos en el fotodiodo



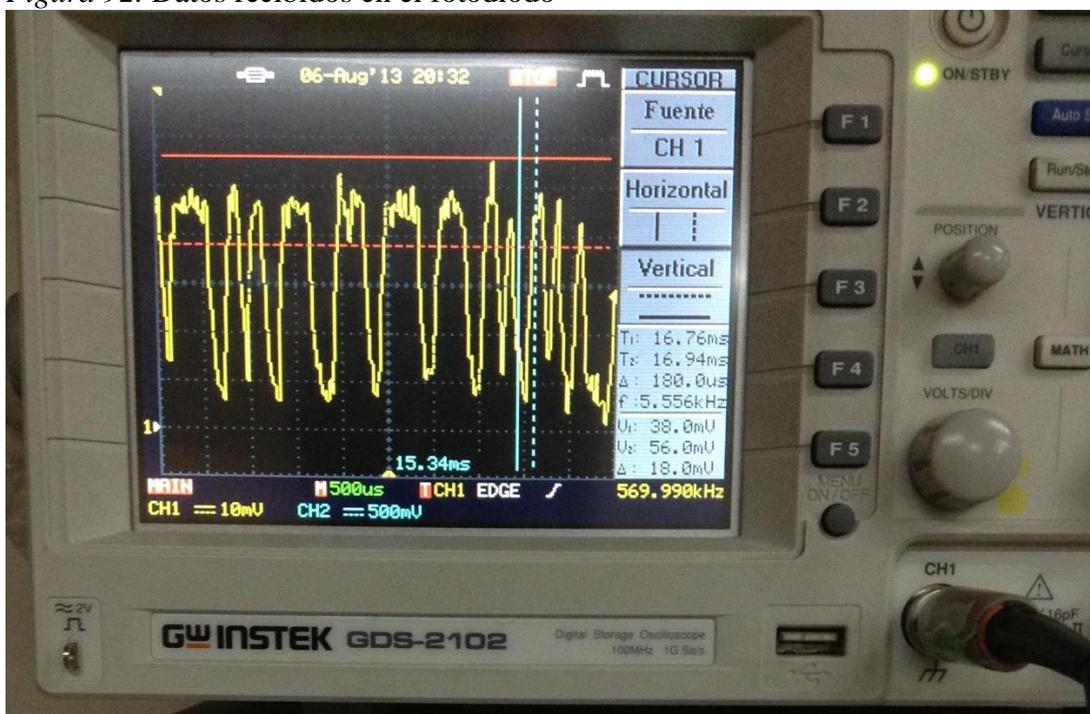
Elaborado por: Erick Peñaherrera

Figura 91. Datos sincronizados a) señal amarilla datos enviados de la FPGA b) señal azul datos recibidos por comunicación por luz visible



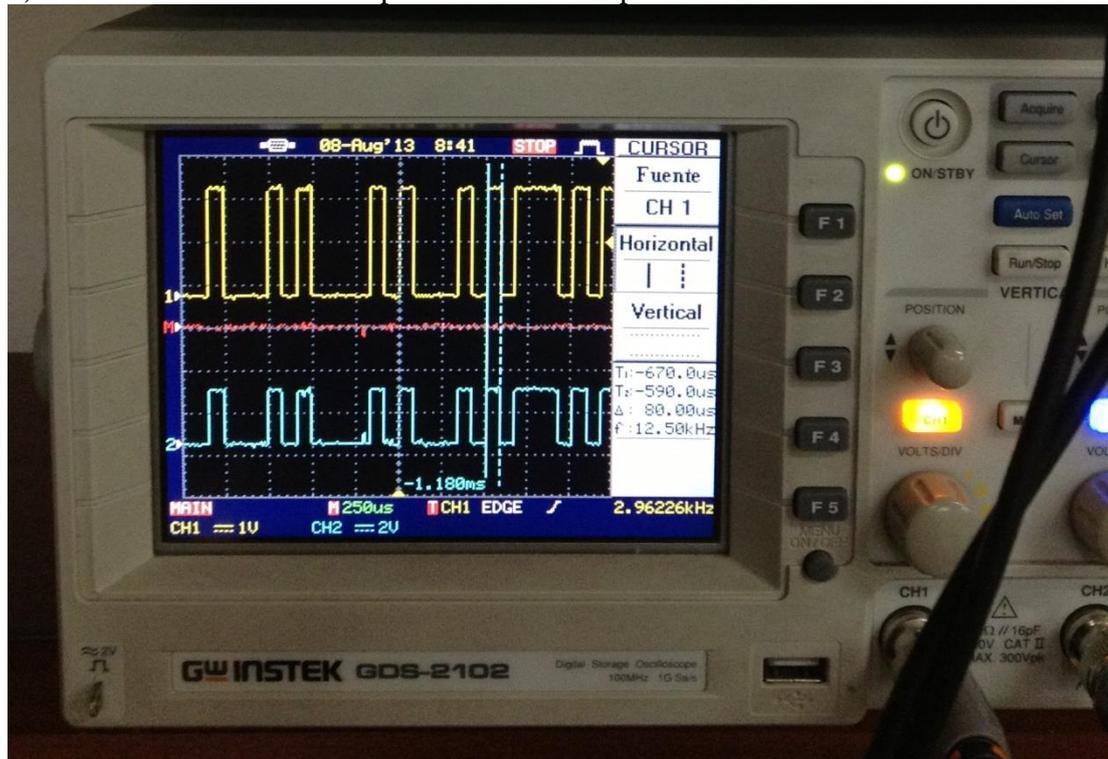
Elaborado por: Erick Peñaherrera

Figura 92. Datos recibidos en el fotodiodo



Elaborado por: Erick Peñaherrera

Figura 93. Datos sincronizados a) señal amarilla datos enviados de la FPGA b) señal azul datos recibidos por comunicación por luz visible



Elaborado por: Erick Peñaherrera

4.5.2 Análisis de potencia vs distancia.

Las mediciones de potencia en el receptor se realizaron con filtro azul y lente y sin ellos, a través de un medidor de potencia óptica. Cuando se utiliza filtro azul con lente y la potencia recibida se mantiene por encima de $12 \mu\text{W}$ a distancias menores a 20 cm los datos se sincronizan fácilmente, sin embargo, cuando la distancia es superior a 70cm la potencia recibida cae por debajo de $5 \mu\text{W}$ y la sincronización no es posible, debido a que no llega la potencia requerida por lo que se debe reducir la distancia para lograr la sincronización, la cual es verificable visualmente en el osciloscopio, comparando la señal recibida con la de referencia y a través de un LED de la FPGA el cual se enciende una vez que se sincroniza la señal recibida.

Por otro lado cuando “no” se utiliza el filtro azul ni lente, se tiene una mayor potencia. Sin embargo la señal no logra sincronizarse, debido a que el fotodiodo no reconoce los pulsos ópticos, ya que está receptando todas las longitudes de onda del espectro de luz visible. Para evitar aquello se utiliza el filtro azul y el lente los cuales

consiguen concentrar toda la potencia recibida en un solo punto, en el que se encuentra la mayor componente espectral del pulso del LED (430 nm – 500 nm).

4.5.3 Análisis de voltaje vs distancia.

Los valores de voltaje encontrados se los tomó variando la distancia del fotodiodo tal como lo indica la tabla 6, lo cual demuestra que la intensidad luminosa es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, demostrando de esta manera que se cumple la Ley Cuadrática Inversa.

Tabla 6. Datos distancia vs voltaje

Distancia [m]	Voltaje [mV]
0,12	101
0,2	93,6
0,3	80
0,4	68
0,5	60,8
0,6	52,8
0,7	45,6

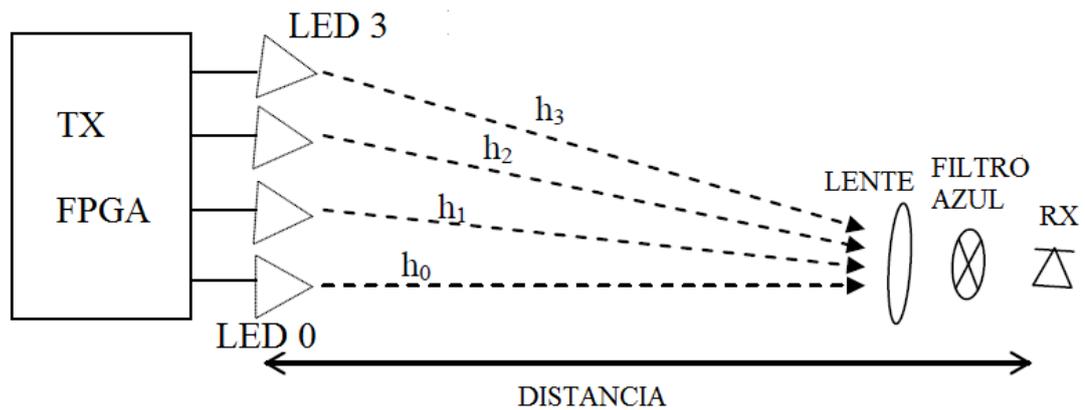
Elaborado por: Erick Peñaherrera

4.5.4 Sistema de comunicación MISO

Para simular las características que presentan los diodos LED se utilizará el circuito implementado en el proyecto VLC. El circuito permite dar una ganancia diferente a cada canal para así obtener una señal multinivel.

El valor de ganancia depende de la distancia y ángulo que tenga cada diodo transmisor respecto al receptor. El transmisor que se encuentre más cercano al receptor tendrá un valor más alto de ganancia y el que se encuentre a mayor distancia tendrá un valor menor de ganancia respecto a los demás diodos transmisores (figura 94).

Figura 94. Ubicación de los diodos transmisores respecto al diodo receptor



Elaborado por: Erick Peñaherrera
Adaptado de: (CARDENAS, 2011)

Luego se debe obtener la curva característica que presenta cada canal, para lo cual se midió los valores de voltaje que llegan al receptor a diferentes distancias y los datos obtenidos.

Tabla 7. Valores de voltajes medidos que llegan al receptor

Distancia (cm)	Voltaje D0 (v)	Voltaje D1 (v)	Voltaje D2 (v)	Voltaje D3 (v)
15	7.5	5.8	4.6	3.8
20	5.2	4.3	3.9	3.2
25	3.9	3.4	3	2.7
30	3	2.6	2.3	2.1
35	2.5	2.3	2	1.85
40	2	1.8	1.6	1.5
45	1.7	1.5	1.4	1.3
50	1.5	1.25	1.2	1

Elaborado por: Erick Peñaherrera

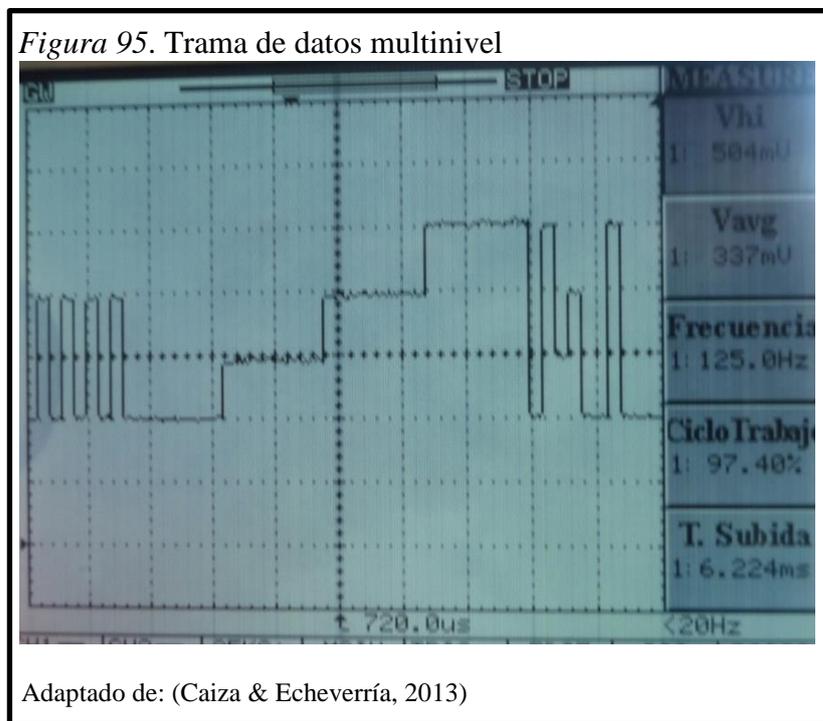
En la tabla 7 se observa que la transmisión puede darse hasta llegar a una distancia máxima de 50 cm teniendo en los diodos D1 y D2 con voltajes de 1.25 y 1.2 respectivamente, produce una interferencia entre los canales D1 y D2 o la diferencia de voltaje es muy pequeña porque la distancia que hay entre ellos es muy corta y el ángulo de incidencia al fotodiodo pequeña.

El proyecto maneja una modulación de amplitud, por lo tanto cada canal tiene una amplitud de voltaje diferente.

Tabla 8. Voltajes obtenidos en cada canal utilizando medio guiado

Canal	Voltaje (mV)
0	200
1	300
2	400
3	500

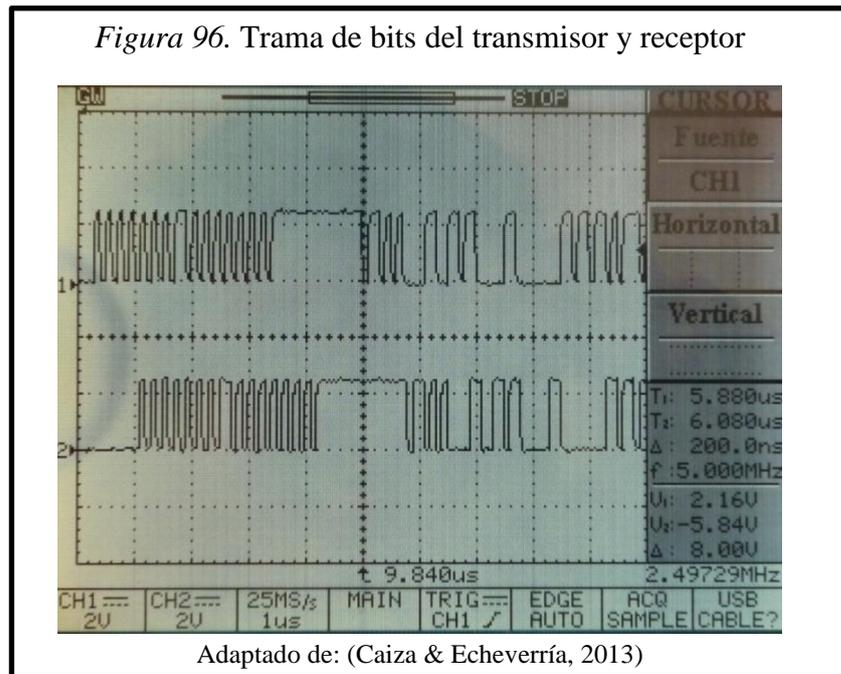
Elaborado por: Erick Peñaherrera



En la figura 95 se observa la transmisión de los cuatro canales y se puede apreciar que cada canal tiene un nivel diferente de voltaje que a su vez presentan características similares a las obtenidas en la simulación.

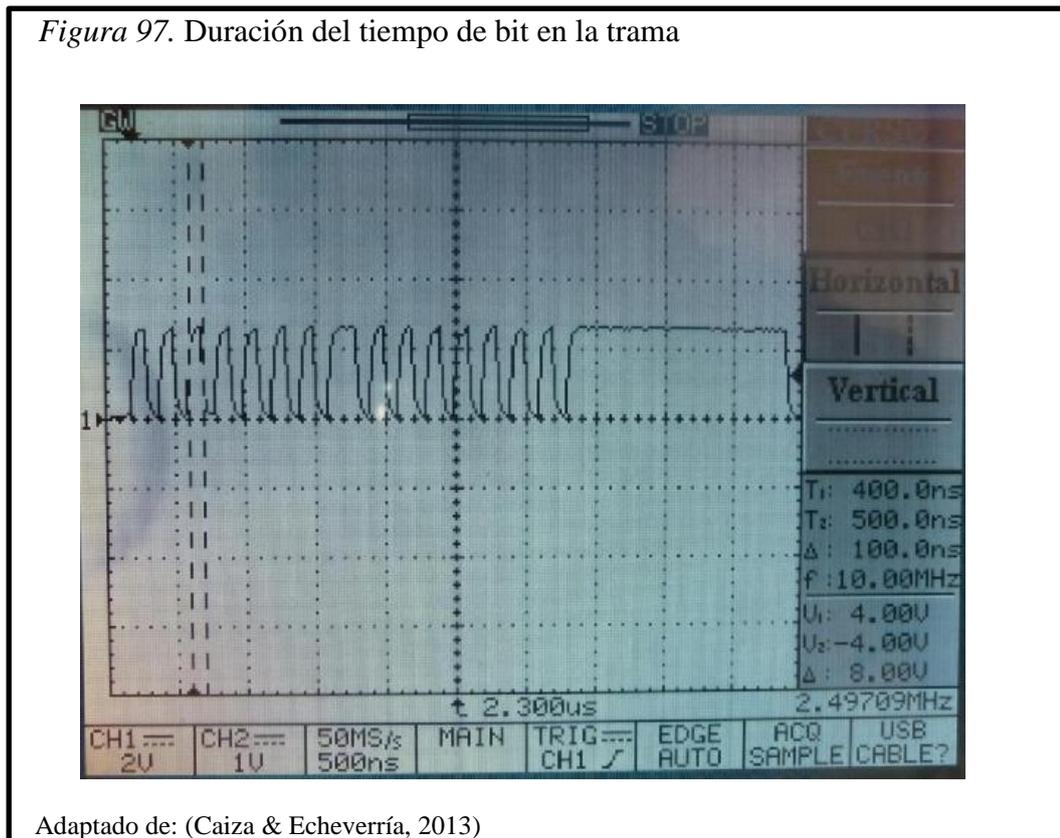
En la figura 96 se muestra la parte del análisis se procede a observar la trama de bits que es transmitida.

Figura 96. Trama de bits del transmisor y receptor



Luego se procede a realizar a comprobar de la duración del tiempo de bit como lo muestra la figura 97.

Figura 97. Duración del tiempo de bit en la trama



En este caso se observa que el tiempo de bit es de 100ns o frecuencia de 10MHz que es el tiempo que se configuró en la tarjeta FPGA.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE COSTOS

Todos los costos que se detallan a continuación han sido divididos en partes: desarrollo matemático y desarrollo de software.

Cabe recalcar que los costos que se presentan a continuación en las tablas vienen dados en dólares. Se mostrarán valores con 0 dólares, estos valores se los describen así porque ya se los tiene en los laboratorios de electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana y no fueron adquiridos exclusivamente para el proyecto.

5.1 Costos de desarrollo matemático

Los costos de desarrollo matemático para el análisis, diseño e implementación proyecto VLC en la caracterización del LED son los que se detalla a continuación:

Tabla 9. Rubros del análisis y diseño

Descripción	Costo \$
Transmisor	80
Receptor	80
Filtro y Lente	10
Software para caracterización	30
Curvas características	50
Ecuaciones	30
TOTAL	280

Elaborado por: Erick Peñaherrera

5.2 Costos de software

Los costos del diseño de PCBs y caracterización en software de diseño y construcción para el proyecto de VLC, se detalla a continuación:

El programa Labview no tiene costo porque gracias a la Universidad Politecnica “Salesiana” facilitó el software.

Tabla 10. Rubros de software

Descripción	Costo \$
CircuitCAM	110
BoardMaster	150
Labview	0
Proteus ISI	50
Proteus Ares	50
ThorLabs	60
TOTAL	420

Elaborado por: Erick Peñaherrera

5.3 Costos de desarrollo de hardware

Los costos de desarrollo de hardware para el proyecto de VLC en su parte de SSK en la FPGA Cyclone III de Altera, se detalla a continuación:

Tabla 11. Rubros desarrollo de hardware

Descripción	Costo \$
FPGA Cyclone III	3000
Osciloscopio	0
Diodos Led	26
Fotodiodo	112
Soportes	50
Puntas con escala x10	25
Elementos para PCBs normales	40
Cables	8
Elementos para PCBs SMD	200
Sensor Optico PM100A	880
Soporte para los PCBs	20
Multímetro	250
Luxómetro	120
Caja de madera	75
Candados caja	10
TOTAL	4816

Elaborado por: Erick Peñaherrera

5.4 Costo total de proyecto

El costo total del proyecto de VLC en su parte a la caracterización del LED de luz blanca se detallado a continuación es el total de todos los costos antes mencionados en los que se incluye los costos de desarrollo, matemático, software y hardware.

Tabla 12. Rubros totales del proyecto

Descripción	Costo \$
Desarrollo Matemático	280
Desarrollo Software	420
Desarrollo Hardware	4816
TOTAL	5516

Elaborado por: Erick Peñaherrera

Cabe recalcar que el proyecto es financiado en su totalidad por la Universidad Politécnica Salesiana.

CONCLUSIONES

- Mediante la caracterización dinámica del LED se pudo observar en la curva característica voltaje vs corriente que la corriente de umbral es de 1.5V y la corriente máxima de 20mA se da a 2.5V; voltajes y corrientes que pueden ser suministrados sin ningún inconveniente por la FPGA.
- Se determinó que la función de transferencia en frecuencia del LED puede ser interpolada a una ecuación polinómica de sexto grado; además se encontró que a la frecuencia de 900 Hz se tiene una ganancia máxima de 9.1150, a esta frecuencia se tendrían las mejores condiciones de eficiencia en las cuales el sistema trabajaría a una distancia de 5cm, al variar la distancia la ganancia sufre una degradación proporcional al inverso de la distancia.
- Al comparar la transmisión utilizando filtro azul con lente y cuando no se utiliza filtro azul ni lente, se observó que a la distancia de 70 cm existe una diferencia de potencia de 2 μ W y que conforme se incrementa la distancia ésta va disminuyendo por lo que para mayores distancias de transmisión es posible utilizar o no filtro azul y lente.
- En la comunicación MISO se logró implementar un circuito que permite simular la comunicación SSK obteniéndose una señal multinivel simulando un valor diferente para cada canal con valores de 200, 300, 400, 500 [mV] logrando transmitir a una velocidad de 25 Mbps utilizando medio guiado.
- En la comunicación SISO se logró implementar un circuito que permite trabajar en las condiciones óptimas de voltaje y corriente encontradas al caracterizar el LED consiguiéndose una velocidad máxima de 25 Kbps, la baja potencia de este tipo de led limito la velocidad alcanzada debido a que su ancho de banda es de 2.25 KHz que es menor con respecto a los diodos de mayor potencia.

RECOMENDACIONES

- Para que el alcance y la velocidad de transmisión sean mayores es recomendable usar diodos LED de mayor potencia, dispositivos de mayor ancho de banda.
- Se podría implementar un control automático de ganancia para el sistema SISO en el fotodiodo, lo que permitiría calibrar automáticamente el comparador cuando se varíe la distancia.
- Para lograr menos porcentaje de error se puede conseguir elementos con mejor tolerancia y evitar puentes para eliminar efectos EMI.
- Se recomienda colocar una fuente independiente para cada módulo transmisor para de esta manera obtener mayor corriente en cada módulo.
- Se debe investigar las comunicaciones ópticas inalámbricas para diferentes modulaciones tales como: OFDM, PAM-4, para mejorar sus características de transmisión.
- Se hace necesario un estudio del ambiente en donde se realizara la comunicación por luz visible y esta tendrá un impacto directo sobre el desempeño del sistema, esto permitirá aprovechar todas sus características de comunicación.

LISTA DE REFERENCIAS

- Academia de Networking de Cisco System. (2006). *Fundamentos de Redes Inalámbricas*. Pearson Education S.A.
- Altera. (20 de mayo de 2013). *Altera Measurable Advantage*. Recuperado de <http://www.altera.com/products/software/products/dsp/dsp-builder.html>
- Altera. (25 de mayo de 2013). *Altera Measurable Advantage*. Recuperado de <http://www.altera.com/products/software/quartus-ii/about/qts-performance-productivity.html>
- Altera Corporation. (2008). *Data Conversion HSMC*.
- Altera Corporation. (2009). *High Speed Mezzanine Card (HSMC)*.
- Altera, C. (29 de mayo de 2013). *Altera*. Recuperado de <http://www.altera.com/products/fpga.html>
- Altera, C. (25 de mayo de 2013). *Altera Measurable Advantage*. Recuperado de <http://www.altera.com/products/devkits/altera/kit-cyc3.html>
- Anónimo. (29 de mayo de 2013). *Elektro*. Recuperado de <http://www.elektor.es/products/cds-dvds/electronics/fpga-course.368274.lynkx>
- Barcell, M. F. (2008/2009). *Medios de transmisión*. Cádiz, Cádiz, España.
- Blake, R. (2004). *Sistemas electrónicos de comunicaciones*. Cengage Learning.
- Bolton, W. (1995). *Mediciones y pruebas eléctricas y electrónicas*. Barcelona: Marcombo.
- Boquera, M. C. (2005). *Comunicaciones Ópticas Conceptos esenciales y resolución de ejercicios*. Madrid: Díaz de Santos.
- Boylestad, R. (2004). *Introducción al análisis de circuitos*. México: Pearson Educación.
- Boylestad, R. L. (2003). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. México: Pearson Educación.
- Briceño Márquez, J. E. (2005). *Transmisión de Datos* (Tercera ed.). Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería.
- Caiza Méndez, D. G., & Pérez Insuasti, J. J. (2011). *Implementación de un Prototipo de Grabación Automatizado de Señal de Televisión Abierta*. Riobamba: ESPOCH.

- Caiza, G., & Echeverría, J. (2013). Diseño e implementación de un modulador y un demodulador ssk (space shift keying) para comunicación por luz visible (vlc) utilizando la fpga (field programmable gate array) cyclone iii de altera. Quito.
- Calle Plaza, J. (2009/2010). *Sistema inalámbrico y multicanal para monitorización de señales biológicas en tiempo real*. Escuela Superior de Ingeniería Informática.
- Cardells, R. J. (2009). Iluminación con LEDs blancos. *Iluminación con LEDs blancos*, 1, 2 y 3.
- CARDENAS, D. (2011). *Spatial modulation project*. University of Edinburgh, Edinburgh.
- Cardona Fernández, J., & Fernández Campos, L. (2009). *Estudio de técnicas de modulación para enlaces ópticos*. Catalunya: Escola Politècnica Superior de Castelldefels, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Cen L, B. S. (2010). *Enabling Vehicular Visible Light Communication (V²LC)*.
- Chau, Y., & Yu, S.-H. (2001). Space modulation on wireless fading channels. *Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Fall. IEEE VTS 54th*.
- Chiurtu, N., Rimoldi, B., & Telatar, E. (2001). On the capacity of multi-antenna Gaussian channels. *Information Theory, 2001. Proceedings. 2001 IEEE International Symposium on*, 585–595.
- Concurso espacial*. (14 de marzo de 2013). Recuperado de http://www.concursoespacial.com/tematicoLaTierra6_1.asp
- Condliffe, J. (2011). Will Li-Fi be the new Wi-Fi? *NewScientist*, 2822.
- Cromer, A. H. (2007). *Física para las ciencias de la vida*. Barcelona: Alvagraf.
- Di Renzo, M., & Haas, H. (2010). On the performance of Space Shift Keying MIMO systems over correlated Rician fading channels. *IEEE, Smart Antennas (WSA), 2010 International ITG Workshop on*.
- Di Renzo, M., & Haas, H. (2010). A General Framework for Performance Analysis of Space Shift Keying (SSK) Modulation for MISO Correlated Nakagami-m Fading Channels. *IEEE*.
- Di Renzo, M., & Haas, H. (2011). Space Shift Keying (SSK-) MIMO over Correlated Rician Fading Channels: Performance Analysis And a New Method for Transmit-Diversity. *Communications, IEEE Transactions on*, 116-129.

- Direct Industry*. (01 de agosto de 2013). Recuperado de Direct Industry:
<http://www.directindustry.es/prod/tecpel-co-ltd/oscilloscopios-digitales-35126-396556.html>
- Donate, A. H. (1999). Principios de Electricidad y Electronica II. En A. H. Donate, *Principios de Electricidad y Electronica II* (págs. 181,182). Barcelona: Marcombo.
- Dreamstime*. (02 de septiembre de 2013). Recuperado de Dreamstime:
<http://es.dreamstime.com/fotos-de-archivo-libres-de-regal%C3%ADAs-espectro-de-la-luz-blanca-con-longitudes-de-onda-image28890868>
- Elgala, H., Mesleh, R., & Hass, H. (2010). *An LED Model for Intensity-Modulated Optical Communication Systems*. IEEE PHOTONICS.
- Espinoza Rea, R. F., & Coronel León, M. I. (2011). *Implementación, Análisis y Comparación de métodos de filtrado de señales de audio afectadas por ruido blanco Gaussiano aditivo y ruido tipo pulsos*. Guayaquil: ESPOL.
- Fath, T., Di Renzo, M., & Haas, H. (2010). On the performance of Space Shift Keying for optical wireless communications. *IEEE*.
- Flores, N., & Figueroa, J. (2007). *Física Moderna*. México: Pearson Educación.
- Foschini, G., & Gans, M. (1998). On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Mutiple Antennas. *IEEE, Wireless Personal Communications*, 311-335.
- García, E. (11 de julio de 2013). *Eveliux*. Obtenido de Noise Wave Corporation:
<http://www.eveliux.com/mx/que-es-el-ruido.php>
- Gómez, J., Majón, J., Estellés, J., Mesefuer, J., Olmos, J., Pinci, A., . . . Cabanilles, C. (s.f.). *Fundamentos Físicos de la Informática*. Valencia: UPV.
- González, O., Rodríguez, S., & Ayala, A. (s.f.). *Sistema OFDM adaptativo sobre el canal óptico no guiado en interiores*. Tenerife: Universidad de La Laguna, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Greenpeace. (2006). LED: Diodos Emisores de Luz Información de la Tecnología. *Evolución Energética*, 6-9.
- Haas, H. (Dirección). (2011). *Datos inalámbricos en cada foco incandescente* [Película].
- Haas, H., Costa, E., & Schulz, E. (2002). Increasing spectral efficiency by data multiplexing using antenna arrays. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2002. The 13th IEEE International Symposium on*.
- Hranilovic, S. (1996). *Wireless Optical Communication Systems*. Springer.

- Hubscher, H., Klaue, J., Pfluger, W., & Appelt, S. (1991). *Electrotecnia*. Barcelona: Reverté.
- Instruments, T. (2011). Operational Transconductance Amplifier (OTA). Dallas: Texas Instruments Incorporated.
- Javaudin, J.-P. (1 de septiembre de 2013). *Home Gigabit Access*. Recuperado de Omega: <http://www.ict-omega.eu/contact.html>
- Jeganathan, J., Ghayeb, A., Szczecinski, L., & Ceron, A. (2009). Space shift keying modulation for MIMO channels. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 3692-3703.
- Jiao, Y., & Yang, B. (2008). Information-guided channel-hopping for high data rate wireless communication. *Communications Letters, IEEE*, 225-227.
- Kontorovich Mazover, V., Ramos Alarcón, F. L., & Parra Michel, R. (2009). *Fundamentos de Comunicaciones Digitales* (Vol. Uno). Limusa S.A. de C.V.
- Lazalde, A. (25 de mayo de 2013). *Diario Turing*. Recuperado de http://www.eldiario.es/turing/Li-Fi-luz-comunicaciones-Wi-fi_0_120038864.html
- Maloney, T. J. (2006). *Electrónica Industrial Moderna*. En T. J. Maloney, *Electrónica Industrial Moderna* (pág. 433). Mexico D.F.: Pearson Educación.
- Maloney, T. J. (2006). *Electrónica Industrial Moderna*. México: Pearson Educación.
- Martínez, M., Gómez, L., Serrano, A., Villa, J., & Gómez, J. (2010). *Filtros Digitales*. Valencia: Universidad de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- MathWorks. (25 de mayo de 2013). *MathWorks*. Recuperado de <http://www.mathworks.com/products/simulink/>
- MathWorks. (25 de mayo de 2013). *MathWorks*. Recuperado de <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- Microelectrónica, G. d. (2005). Amplificador Operacional de Transconductancia. *Operacionales de Transconductancia*, 1-4.
- Moreno, J. (2010). Reglamento De Eficiencia Energenitica en Instalaciones de Alumbrado Exterior. En J. M. Minassian, *REEAE* (pág. 62). Madrid: Paraninfo.
- Ne555. (02 de septiembre de 2013). *Circuits Today*. Recuperado de Circuits Today: <http://www.circuitstoday.com/how-a-led-works-light-emitting-diode-working>

- Pascual, G. (03 de septiembre de 2013). *Reflexiones Fotográficas*. Recuperado de Blogger: <http://reflexionesfotograficas.blogspot.com/2011/02/formas-de-las-lentes-positivas.html>
- Pohlmann, C. (19 de junio de 2013). *Visible Light Communication*. Recuperado de http://www-old.itm.uniluebeck.de/teaching/ss10/sem_kim/ausarbeitungen/2010-06-29%20Pohlmann.%20Visible%20Light%20Communication.pdf
- Pradas Silvestre, J. (s.f.). *Valoración Densito-Foto-Gravimétrica Digital (VDFG) su utilización en la valoración de los trastorno trafoestáticos del Raquis*. Centro de Medicina Física y Rehabilitación.
- Prieto, J., Ramos, O., & Delgado, A. (2007). *Diseño de un gene digital en FPGA y matlab con aplicaciones en robótica móvil*. Bogotá: Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
- Priwer, S., & Cynthia, P. (2005). *Todo sobre Einstein*. Barcelona: Robinbook.
- RHS Linux User*. (09 de 09 de 2013). Obtenido de Efecto Fotoeléctrico: <http://www.nucleares.unam.mx/~vieyra/node9.html>
- Robert F., C. F. (1999). *Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales*. México: Prentice Hall.
- Rodriguez Torres, O. (s.f.). *Diseño de un controlador de video para procesamiento digital de imágenes basado en un FPGA*. México D.F.: Centro de Investigación en Computación-IPN.
- Rufino Alcocer, J. (2005). *Aproximación y Síntesis de Filtros Elípticos*. Cholula, Puebla: Universidad de las Américas Puebla.
- Ruiz García de Dionisio, S. (2007). *intef*. Obtenido de Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado: <http://serbal.pntic.mec.es/srug0007/archivos/radiocomunicaciones/TEMA%203%20DIGITALIACION/ber.pdf>
- S. Camatel, A. N. (2008). LED NON-LINEARITY CHARACTERIZATION AND COMPENSATION. *IEEE*.
- Sánchez Brea, L. M. (24 de Mayo de 2013). *El Modulador Espacial de Luz en prácticas de laboratorio para Grado y Máster de Física*. Recuperado de <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/aocg/PIMCD2009-255/slm.html>
- Sanchis, E. (2004). *Fundamentos y electrónica de las comunaciones*. Valencia: GUADA Impresores SL.

- Saucke, K., Pausch, G., Stein, J., Hans-Georg, O., & Schotanus, P. (2005). *Stabilizing Scintillation Detector Systems With Pulsed LEDs: A Method to Derive the LED Temperature From Pulse Height Spectra*. IEEE.
- Suárez, F. (24 de Enero de 2008). *Circuitos Digitales Configurables*. Obtenido de <http://legamedia.blogspot.com/>
- Sun, T.-P., & Wang, C.-H. (2012). *Specially Designed Driver Circuits to Stabilize LED*. IEEE.
- Tets Equipment Depot*. (2 de agosto de 2013). Obtenido de Fotronic Corporation: <http://www.testequipmentdepot.com/instek/frequencycounters/gfc-8010gandgfc-8055.htm>
- Texas Instruments. (2011). Wide Bandwidth OPERATIONAL TRANSCONDUCTANCE AMPLIFIER (OTA). *OPA861*.
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. México: Pearson.
- Tomasí, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas* (4 ed.). Pearson Education.
- Vega, D. P.-L. (2006). *Fundamentos de Electrónica Digital*. Salamanca: Kadmos.
- Wikimedia Commons*. (02 de septiembre de 2013). Recuperado de Wikimedia Project: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blue_LED.jpg

Anexo 1. Hoja técnica para la asignación de pines de la FPGA

Table 2–47. HSMC Port A Interface Signal Name, Description, and Type (Part 3 of 3)

Board Reference	Description	I/O Standard	Schematic Signal Name	Cyclone III Device Pin Number
J8 pin 137	LVDS TX 14p or CMOS I/O data bit 64	LVDS or 2.5 V	HSMA_RX_D_P14	F5
J8 pin 138	LVDS TX 14n or CMOS I/O data bit 65	LVDS or 2.5 V	HSMA_TX_D_N14	G4
J8 pin 139	LVDS RX 14n or CMOS I/O data bit 66	LVDS or 2.5 V	HSMA_TX_D_P14	F4
J8 pin 140	LVDS RX 14n or CMOS I/O data bit 67	LVDS or 2.5 V	HSMA_RX_D_N14	G3
J8 pin 143	LVDS RX 15p or CMOS I/O data bit 68	LVDS or 2.5 V	HSMA_TX_D_P15	E2
J8 pin 144	LVDS TX 15p or CMOS I/O data bit 69	LVDS or 2.5 V	HSMA_RX_D_P15	F2
J8 pin 145	LVDS RX 15n or CMOS I/O data bit 70	LVDS or 2.5 V	HSMA_TX_D_N15	E1
J8 pin 146	LVDS TX 15n or CMOS I/O data bit 71	LVDS or 2.5 V	HSMA_RX_D_N15	F1
J8 pin 149	LVDS RX 16p or CMOS I/O data bit 72	LVDS or 2.5 V	HSMA_TX_D_P16	D3
J8 pin 150	LVDS TX 16p or CMOS I/O data bit 73	LVDS or 2.5 V	HSMA_RX_D_P16	E3
J8 pin 151	LVDS TX 16n or CMOS I/O data bit 74	LVDS or 2.5 V	HSMA_TX_D_N16	C2
J8 pin 152	LVDS RX 16n or CMOS I/O data bit 75	LVDS or 2.5 V	HSMA_RX_D_N16	F3
J8 pin 155	LVDS or CMOS clock out	LVDS	HSMA_CLK_OUT_P2	D2
J8 pin 156	LVDS or CMOS clock in	LVDS	HSMA_CLK_IN_P2	J2
J8 pin 157	LVDS or CMOS clock out	2.5 V	HSMA_CLK_OUT_N2	D1
J8 pin 158	LVDS or CMOS clock in	2.5 V	HSMA_CLK_IN_N2	J1
N/A	User LED intended to show RX data activity on the HSMC interface	2.5 V	HSMA_RX_D_LED	AE1
N/A	User LED intended to show TX data activity on the HSMC interface	2.5 V	HSMA_TX_D_LED	AA3

Table 2–48 lists the HSMC Port B interface signal name, description, and I/O standard. Signal name and direction are relative to the Cyclone III FPGA, which is the HSMC host.

Table 2–48. HSMC Port B Interface Signal Name, Description, and Type (Part 1 of 4)

Board Reference	Description	I/O Standard	Schematic Signal Name	Cyclone III Device Pin Number
J9 pin 33	Management serial data	2.5 V	HSMB_SDA	H26
J9 pin 34	Management serial clock	2.5 V	HSMB_SCL	H25
J9 pin 35	JTAG clock signal	2.5 V	FPGA_JTAG_TCK	P5
J9 pin 36	JTAG mode select signal	2.5 V	FPGA_JTAG_TMS	P8
J9 pin 39	Dedicated CMOS clock out	2.5 V	HSMB_CLK_OUT0	J22
J9 pin 40	Dedicated CMOS clock in	2.5 V	HSMB_CLK_IN0	A15
J9 pin 41	Dedicated CMOS I/O bit 0	2.5 V	HSMB_D0	G24
J9 pin 42	Dedicated CMOS I/O bit 1	2.5 V	HSMB_D1	H23
J9 pin 43	Dedicated CMOS I/O bit 2	2.5 V	HSMB_D2	G25
J9 pin 44	Dedicated CMOS I/O bit 3	2.5 V	HSMB_D3	H24
J9 pin 47	LVDS TX 0p or CMOS I/O data bit 4	LVDS or 2.5 V	HSMB_TX_D_P0	J25
J9 pin 48	LVDS RX 0p or CMOS I/O data bit 5	LVDS or 2.5 V	HSMB_RX_D_P0	F27

Anexo 2. Hoja técnica del circuito integrado OPA861

OPA861



SBOG338F – AUGUST 2005 – REVISED MAY 2011

www.ti.com

APPLICATION INFORMATION

The OPA861 is a versatile monolithic transconductance amplifier designed for wide-bandwidth systems, including high-performance video, RF, and IF circuitry. The operation of the OPA861 is discussed in the OTA (Operational Transconductance Amplifier) section of this data sheet. Over the years and depending on the writer, the OTA section of an op amp has been referred to as a Diamond Transistor, Voltage-Controlled Current source, Transconductor, Macro Transistor, or positive second-generation current conveyor (CCII+). Corresponding symbols for these terms are shown in Figure 29.

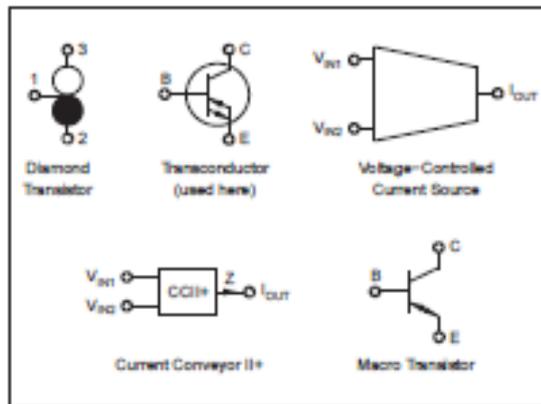


Figure 29. Symbols and Terms

Regardless of its depiction, the OTA section has a high-input impedance (B-input), a low-input/output impedance (E-input), and a high-impedance current source output (C-output).

TRANSCONDUCTANCE (OTA) SECTION—AN OVERVIEW

The symbol for the OTA section is similar to a transistor (see Figure 29). Applications circuits for the OTA look and operate much like transistor circuits—the transistor is also a voltage-controlled current source. Not only does this characteristic simplify the understanding of application circuits, it aids the circuit optimization process as well. Many of the same intuitive techniques used with transistor designs apply to OTA circuits. The three terminals of the OTA are labeled B, E, and C. This labeling calls attention to its similarity to a transistor, yet draws distinction for clarity. While the OTA is similar to a transistor, one essential difference is the sense of the C-output current: It flows out the C terminal for positive B-to-E input voltage and in the C terminal for negative B-to-E input voltage. The OTA offers many advantages over a discrete transistor. The OTA is self-biased, simplifying the design process and reducing component count. In addition, the OTA is far more linear than a transistor. Transconductance of the OTA is constant over a wide range of collector currents—this feature implies a fundamental improvement of linearity.

BASIC CONNECTIONS

Figure 30 shows basic connections required for operation. These connections are not shown in subsequent circuit diagrams. Power-supply bypass capacitors should be located as close as possible to the device pins. Solid tantalum capacitors are generally best.

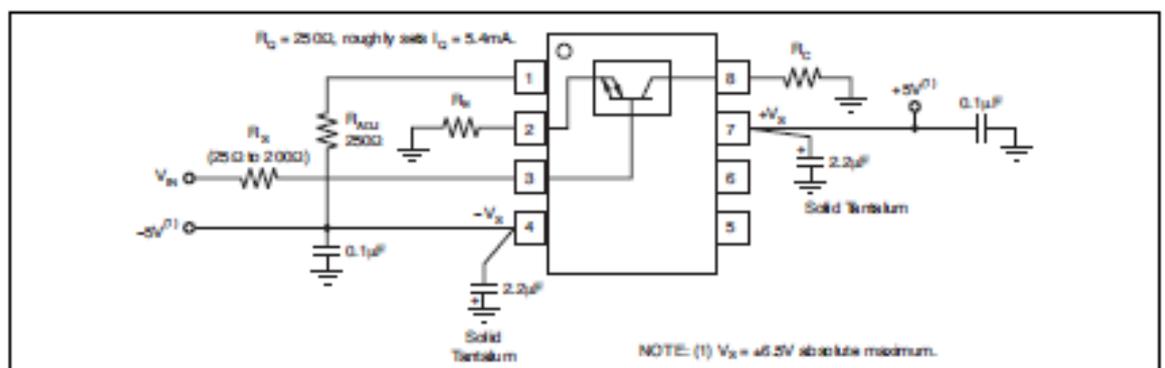


Figure 30. Basic Connections

Anexo 3. Hoja técnica del circuito integrado OPA861

OPA861



www.ti.com

SBOS338F – AUGUST 2005 – REVISED MAY 2011

ELECTRICAL CHARACTERISTICS: $V_S = \pm 5V$

$R_L = 500\Omega$ and $R_{ADJ} = 250\Omega$, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	OPA861D, IDBV				UNITS	MIN/ MAX	TEST LEVEL ⁽¹⁾
		TYP	MIN/MAX OVER TEMPERATURE					
		+25°C	+25°C ⁽²⁾	0°C to 70°C ⁽²⁾	-40°C to +85°C ⁽²⁾			
OTA—Open-Loop (see Figure 33)								
AC PERFORMANCE								
Bandwidth	$G = +5, V_O = 200mV_{pp}, R_L = 500\Omega$	80	77	75	74	MHz	min	B
	$G = +5, V_O = 1V_{pp}$	80				MHz	typ	C
	$G = +5, V_O = 5V_{pp}$	80				MHz	typ	C
Slew Rate	$G = +5, V_O = 5V$ Step	900	860	850	840	V/ μ s	min	B
Rise Time and Fall Time	$V_O = 1V$ Step	4.4				ns	typ	C
Harmonic Distortion	$G = +5, V_O = 2V_{pp}, 5MHz$							
2nd-Harmonic	$R_L = 500\Omega$	-88	-55	-54	-53	dB	max	B
3rd-Harmonic	$R_L = 500\Omega$	-57	-52	-51	-49	dB	max	B
Base Input Voltage Noise	$f > 100kHz$	2.4	3.0	3.3	3.4	nV/ \sqrt{Hz}	max	B
Base Input Current Noise	$f > 100kHz$	1.7	2.4	2.45	2.5	pA/ \sqrt{Hz}	max	B
Emitter Input Current Noise	$f > 100kHz$	5.2	15.3	16.6	17.5	pA/ \sqrt{Hz}	max	B
OTA DC PERFORMANCE⁽³⁾ (see Figure 33)								
Minimum OTA Transconductance (g_m)	$V_O = \pm 10mV, R_C = 50\Omega, R_E = 0\Omega$	95	80	77	75	mAV	min	A
Maximum OTA Transconductance (g_m)	$V_O = \pm 10mV, R_C = 50\Omega, R_E = 0\Omega$	95	150	155	180	mAV	max	A
B-Input Offset Voltage	$V_E = 0V, R_C = 0\Omega, R_E = 100\Omega$	± 3	± 12	± 15	± 20	mV	max	A
Average B-Input Offset Voltage Drift	$V_E = 0V, R_C = 0\Omega, R_E = 100\Omega$			± 87	± 120	μ V/°C	max	B
B-Input Bias Current	$V_E = 0V, R_C = 0\Omega, R_E = 100\Omega$	± 1	± 5	± 6	± 6.6	μ A	max	A
Average B-Input Bias Current Drift	$V_E = 0V, R_C = 0\Omega, R_E = 100\Omega$			± 20	± 25	nA/°C	max	B
E-Input Bias Current	$V_E = 0V, V_C = 0V$	± 30	± 100	± 125	± 140	μ A	max	A
Average E-Input Bias Current Drift	$V_E = 0V, V_C = 0V$			± 500	± 600	nA/°C	max	B
C-Output Bias Current	$V_E = 0V, V_C = 0V$	± 5	± 18	± 30	± 38	μ A	max	A
Average C-Output Bias Current Drift	$V_E = 0V, V_C = 0V$			± 250	± 300	nA/°C	max	B
OTA INPUT (see Figure 33)								
B-Input Voltage Range		± 4.2	± 3.7	± 3.6	± 3.6	V	min	B
B-Input Impedance		455 2.1				k Ω pF	typ	C
Min E-Input Resistance		10.5	12.5	13.0	13.3	Ω	max	B
Max E-Input Resistance		10.5	6.7	6.5	6.3	Ω	min	B
OTA OUTPUT								
E-Output Voltage Compliance	$I_E = \pm 1mA$	± 4.2	± 3.7	± 3.6	± 3.6	V	min	A
E-Output Current, Sinking/Sourcing	$V_E = 0$	± 15	± 10	± 9	± 9	mA	min	A
C-Output Voltage Compliance	$I_C = \pm 1mA$	± 4.7	± 4.0	± 3.9	± 3.9	V	min	A
C-Output Current, Sinking/Sourcing	$V_C = 0$	± 15	± 10	± 9	± 9	mA	min	A
C-Output Impedance		54 2				k Ω pF	typ	C

- (1) Test levels: (A) 100% tested at +25°C. Over temperature limits set by characterization and simulation. (B) Limits set by characterization and simulation. (C) Typical value only for information.
- (2) Junction temperature = ambient for +25°C specifications.
- (3) Junction temperature = ambient at low temperature limit; junction temperature = ambient + 7°C at high temperature limit for over temperature specifications.
- (4) Current is considered positive out of node.