



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENVÍO DE DATOS POR  
MEDIO DE SEÑALES CON ESPECTRO DE LUZ VISIBLE (LIFI)**

**Israel Alexander Valenzuela González**

Asesorado por el ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar

Guatemala, julio de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENVÍO DE DATOS POR  
MEDIO DE SEÑALES CON ESPECTRO DE LUZ VISIBLE (LIFI)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**ISRAEL ALEXANDER VALENZUELA GONZÁLEZ**

ASESORADO POR EL ING. CARLOS EDUARDO GUZMÁN SALAZAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA**

GUATEMALA, JULIO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**


DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Aníbal Silva de los Angeles
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
EXAMINADORA	Inga. María Magdalena Puente Romero
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENVÍO DE DATOS POR MEDIO DE SEÑALES CON ESPECTRO DE LUZ VISIBLE (LIFI)**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, con fecha 6 de junio de 2016.



**Israel Alexander Valenzuela González**

Guatemala, 17 de abril de 2018

Ingeniero

**Julio Solares Peñate**

Coordinador Área de Electrónica

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Facultad de Ingeniería

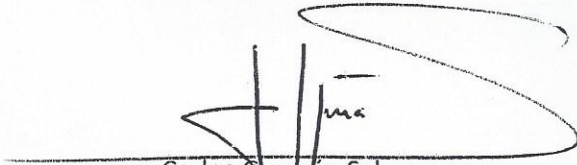
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado ingeniero Solares:

Hago de su conocimiento que he concluido la revisión del trabajo de graduación del estudiante de ingeniería electrónica **Israel Alexander Valenzuela González**, titulado "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENVIO DE DATOS POR MEDIO DE SEÑALES CON ESPECTRO DE LUS VISIBLE (LIFI)".

Indicando que el mismo cumple con los objetivos que fueron planteados para su autorización, por lo que, doy mi **APROBACIÓN**. Siendo el estudiante Valenzuela González y el suscrito únicos responsables del contenido del trabajo en referencia.

Reciba mis muestras de aprecio y un cordial saludo.



Carlos Guzmán Salazar

ASESOR

**CARLOS GUZMAN SALAZAR**  
Ingeniero Electricista  
Col. No. 2762



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 2 de mayo de 2018

**Señor Director**  
**Ing. Otto Fernando Andrino González**  
**Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica**  
**Facultad de Ingeniería, USAC.**


Señor Director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENVÍO DE DATOS POR MEDIO DE SEÑALES CON ESPECTRO DE LUZ VISIBLE (LIFI)**, desarrollado por el estudiante **Israel Alexander Valenzuela González**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

  
Ing. Julio César Solares Peñate  
**Coordinador de Electrónica**







REF. EIME 31.2018.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen el Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante: ISRAEL ALEXANDER VALENZUELA GONZÁLEZ titulado: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENVÍO DE DATOS POR MEDIO DE SEÑALES CON ESPECTRO DE LUZ VISIBLE (LIFI), procede a la autorización del mismo.

Ing. Otto Fernando Andriño González



GUATEMALA, 8 DE MAYO 2018.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENVÍO DE DATOS POR MEDIO DE SEÑALES CON ESPECTRO DE LUZ VISIBLE (LIFI)**, presentado por el estudiante universitario: **Israel Alexander Valenzuela González**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, julio de 2018

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Quien en su infinita gracia y sabiduría me ha guiado en mi camino, permitiéndome al mismo tiempo alcanzar mis metas y disfrutar de experiencias inimaginables.

### **Mis padres**

Carmen González e Israel Valenzuela, por su incondicional apoyo económico y moral, siempre alentándome para alcanzar mis objetivos.

### **Mis hermanos**

Hazel Valenzuela y Diego Valenzuela, por las experiencias compartidas, por apoyarme y estar a mi lado.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por ofrecer la oportunidad de formarse como profesionales a los ciudadanos de este país.

**Facultad de Ingeniería**

Por darme la posibilidad de expandir mis conocimientos y trazar el camino hacia mis objetivos.

**Amigos y compañeros  
de laboratorio**

Con quienes compartí grandes experiencias, así como largas noches de trabajo, siempre disfrutando la oportunidad de estudiar la carrera que elegimos.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. FUNDAMENTOS DEL PROYECTO.....	1
1.1. VLC.....	1
1.1.1. Lifi .....	2
1.2. Led.....	3
1.2.1. Iluminación de estado sólido.....	3
1.2.2. Bombillo led .....	4
1.3. Oscilador.....	5
1.3.1. Principio de funcionamiento .....	5
1.4. Transistor.....	7
1.4.1. MOSFET .....	7
1.4.2. Fototransistor .....	8
1.5. Transformador .....	8
1.5.1. Principios de operación de los transformadores monofásicos.....	9
1.6. Inversor de voltaje .....	10
1.7. Amplificador operacional.....	11
1.7.1. Circuito comparador.....	12
1.7.2. Amplificador inversor.....	12

1.7.3.	Seguidor de voltaje .....	13
1.8.	VCO.....	14
1.9.	Modulación .....	15
1.9.1.	Modulación ASK.....	16
1.10.	Microcontrolador.....	17
1.11.	FPGA.....	19
1.11.1.	Bloques integrados .....	19
1.11.2.	VHDL .....	20
1.12.	Aplicación del trabajo de investigación.....	20
1.12.1.	Condiciones del entorno para el proyecto .....	21
2.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO EMISOR DE LUZ.....	23
2.1.	Inversor de voltaje ac-ac, potencia.....	23
2.1.1.	Explicación del circuito .....	24
2.1.2.	Acople para alta y baja señal.....	24
2.2.	Emisor .....	28
2.2.1.	Oscilación, generador de FI.....	29
2.2.1.1.	Especificaciones y características de la tarjeta de desarrollo	29
2.2.1.2.	Detalle de pines del generador de FI	29
2.3.	Método utilizado en la modulación ASK .....	31
2.3.1.	Funciones de la FPGA como modulador en el transmisor.....	31
2.3.2.	Detalle del modulador sintetizado.....	31
2.3.2.1.	Detalle de pines del VCO sintetizado	32
2.3.2.2.	Detalle de pines del acople entre VCO y el generador de FI	33

3.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO RECEPTOR DE LUZ	35
3.1.	Circuito receptor .....	35
3.1.1.	Detalle del fototransistor utilizado .....	35
3.1.1.1.	Circuito para fototransistor	36
3.2.	Método utilizado para la demodulación ASK .....	37
3.2.1.	Funciones de la FPGA como demodulador en el receptor .....	38
3.2.2.	Detalle del hardware sintetizado .....	38
3.2.2.1.	Detalle de pines del VCO sintetizado	40
3.2.2.2.	Detalle de pines de la fsm	40
3.2.2.3.	Detalle de pines del temporizador	41
3.2.2.4.	Detalle de pines del top	42
3.2.2.5.	Mapeo de pines entre la fsm y el temporizador 1	44
3.3.	Acople entre circuito receptor y demodulador.....	44
4.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE DATOS A NIVEL SOFTWARE .....	47
4.1.	Receptor de datos .....	47
4.1.1.	Estándar RS-232.....	47
4.1.2.	Adaptador serial USB-TTL.....	48
4.2.	Programación en arduino.....	48
4.2.1.	Especificaciones y características de la tarjeta de desarrollo .....	48
4.2.2.	Módulos utilizados en conjunto con la tarjeta de desarrollo .....	49
4.2.3.	Estructura del programa.....	49
4.2.4.	Diseño del software de emisor.....	49



4.2.5.	Mapeo de pines del Arduino nano .....	50
5.	RESULTADOS DEL PROYECTO .....	51
5.1.	Distancia entre el receptor y el emisor .....	51
5.1.1.	Tasa de información .....	51
5.2.	Resultados en condiciones no ideales o de riesgo.....	52
5.2.1.	Primera propuesta para un circuito autocalibrador .....	53
5.2.2.	Segunda propuesta para un circuito autocalibrador .....	54
5.3.	Propuesta de optimización del sistema .....	54
	CONCLUSIONES.....	57
	RECOMENDACIONES .....	59
	BIBLIOGRAFÍA.....	61
	APÉNDICES.....	63
	ANEXOS.....	75

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Espectro de luz visible.....	2
2.	Bombillo led.....	5
3.	Sistema realimentado.....	6
4.	Simbología utilizada para los MOSFET.....	8
5.	Transformador monofásico como reductor de tensión.....	9
6.	Amplificador operacional.....	11
7.	Configuración inversora.....	13
8.	Circuito seguidor de voltaje.....	13
9.	Frecuencia vs voltaje.....	14
10.	Señal portadora, moduladora y modulada.....	16
11.	Esquema de la arquitectura Harvard.....	18
12.	Inversor de voltaje.....	24
13.	Señal resultante de la suma de la señal modulada con la de iluminación.....	25
14.	Señal resultante de la suma de la señal modulada con la de iluminación, con problema de desfase.....	26
15.	Acople entre señal de iluminación y señal modulada.....	27
16.	Circuito de acople junto con el inversor.....	28
17.	Vista del esquemático resultante del generador de FI sintetizado.....	30
18.	Vista del esquemático resultante del VCO sintetizado.....	33
19.	Vista del acople del VCO con FI.....	34
20.	Circuito receptor.....	36
21.	Vista del esquemático resultante de la FSM sintetizada.....	41

22.	Vista del esquemático resultante del temporizador sintetizado.....	42
23.	Vista del esquemático resultante del top sintetizado.....	43
24.	Primera propuesta para autocalibrador .....	53
25.	Propuesta de comunicación en paralelo .....	55

## **TABLAS**

I.	Disposición de pines de la fsm hacia el temporizador 1 .....	44
II.	Disposición de pines del arduino nano .....	50

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>B</b>	Ancho de banda
<b>F</b>	Frecuencia
<b>Fmax</b>	Freqmax
<b>Fmin</b>	Freqmin
<b>G</b>	Gamacia
<b>Av</b>	Gamacia de voltaje
<b>Hz</b>	Hertz
<b>KHZ</b>	Kilohertz
$\lambda$	Lambda
<b>MHZ</b>	Megahertz
<b>Kim</b>	Nanómetro
<b>R</b>	Resistencia
<b>THZ</b>	Terahertz
<b>GND</b>	Tierra
<b>C</b>	Velocidad luz
<b>V</b>	Voltage
<b>Vabt</b>	Voltage entrada
<b>Vat</b>	Voltage salida
<b>W</b>	Watts





## GLOSARIO

<b>Acoplar</b>	En electrónica, unir dos circuitos que por niveles de voltaje y/o lógica de operación no son compatibles directamente uno con el otro.
<b>Algoritmo</b>	Conjunto ordenado de instrucciones que describe cómo solucionar un problema predeterminado.
<b>Alimentación</b>	Término utilizado en electrónica para referirse a la fuente de voltaje positiva.
<b>Amplificador diferencial</b>	Amplificador que se caracteriza por producir a la salida la diferencia del voltaje en sus entradas.
<b>Antena</b>	Dispositivo conductor empleado para transmitir y/o recibir señales electromagnéticas.
<b>Arduino</b>	Plataforma de hardware abierto para prototipos que ofrece la posibilidad a los usuarios de crear objetos electrónicos interactivos.
<b>BJT</b>	Transistor de unión bipolar hecho a base de dos uniones pn, de los cuales pueden haber 2 tipos: npn y pnp (Bipolar Junction Transistor, en inglés).
<b>Bobina</b>	Componente pasivo eléctrico formado por un

alambre de cobre enrollado en una superficie que almacena energía en forma de campo magnético.

<b>Canal n</b>	Tipo de MOSFET que se caracteriza por polarizarse con el pin fuente conectado a tierra, y tanto drenaje como compuerta conectados a un voltaje positivo.
<b>Canal p</b>	Tipo de MOSFET que se polariza con el drenaje conectado a tierra y tanto fuente como compuerta conectados a un voltaje positivo.
<b>CI</b>	Circuito electrónico cuyos componentes se encuentran en una lámina semiconductora.
<b>Circuito</b>	Interconexión de dos o más componentes que posee al menos una trayectoria cerrada.
<b>CLB</b>	Es un arreglo de compuertas lógicas configurables a través de software (Configurable Logic Block en inglés).
<b>Componentes pasivos</b>	Aquellos componentes eléctricos que no amplifican la señal que pasa a través de ellos, mas sí la alteran/controlan para un mejor funcionamiento de los componentes activos.
<b>Corriente alterna</b>	Corriente eléctrica en la que su magnitud y sentido varían de forma periódica.

<b>Corriente eléctrica</b>	El flujo de carga que corre a través de un material.
<b>Corriente directa</b>	Corriente eléctrica cuya magnitud y sentido permanecen constantes en el tiempo.
<b>CPU</b>	Unidad de procesamiento que se encarga de controlar las acciones del dispositivo con base en la interacción con sus puertos de entrada.
<b>DCE</b>	El proveedor de un servicio, un <i>modem</i> , por ejemplo.
<b>Devanado</b>	Término utilizado en un transformador para referirse a la bobina ubicada en el hierro dulce del mismo.
<b>Dimmer</b>	Dispositivo que varía la intensidad de la luz.
<b>DLL</b>	Circuito de retraso de lazo cerrado, se diferencia del PLL porque este posee una línea de retraso en vez de un VCO.
<b>DSP</b>	Es un circuito a base de un microprocesador que recibe señales digitalizadas de audio, video, temperatura, entre otras, para manipularlas matemáticamente.
<b>DTE</b>	Equipo conectado a un sistema que inicia o controla una conexión en serie.

<b>Ecuaciones de Maxwell</b>	Leyes de electromagnetismo unificadas en una descripción coherente del campo electromagnético por James Maxwell.
<b>Espectro electromagnético</b>	Distribución energética del conjunto de ondas electromagnéticas que incluye todas las frecuencias, desde los rayos gamma y rayos x hasta los infrarrojos.
<b>Estándar</b>	Es un patrón o modelo para medir o valorar las cosas de su misma área de operación.
<b>Estándar RS-232</b>	Comunicación serial con tasa de datos, amplitud de voltaje y distancias determinadas entre los equipos.
<b>Filtros</b>	Circuito que discrimina las señales que lo atraviesan por su frecuencia, modificando su amplitud y/o fase.
<b>Flujo luminoso</b>	Contempla la sensibilidad variable del ojo humano a las diferentes longitudes de onda de la luz.
<b>FPAA</b>	Arreglo de circuitos análogos sintetizables.
<b>FPGA</b>	Arreglo de compuertas lógicas sintetizables.
<b>Frecuencia</b>	Magnitud que mide el número de veces que un suceso periódico ocurre.

<b>FSM</b>	Máquina de estados finitos utilizada para definir los procesos de un sistema en la electrónica secuencial.
<b>IEEE</b>	Asociación a nivel mundial dedicada a la estandarización de áreas técnicas (Institute of Electrical and Electronics Engineers, en inglés).
<b>Interferencia</b>	Dos señales ocupando el mismo espacio al mismo tiempo.
<b>Inversores</b>	Circuito cuya función es recibir un voltaje en corriente continua, para tener a la salida un voltaje en corriente alterna.
<b>Led</b>	Diodo que posee la capacidad de convertir electrones en fotones (Light Emitting Diode, en inglés).
<b>Lifi</b>	Un Sistema VLC de alta velocidad (Light Fidelity, en inglés).
<b>Línea viva</b>	El cable que lleva corriente con una fase en un circuito eléctrico.
<b>Lógica TTL</b>	Tecnología para construcción de circuitos electrónicos a base de transistores BJT que posee restricciones en cuanto a niveles de voltaje y velocidad de transmisión (Transistor-Transistor Logic, en inglés).



<b>Lumen</b>	Unidad del sistema internacional de medidas para medir el flujo luminoso.
<b>Memoria microSD</b>	Formato de tarjeta <i>flash</i> más pequeño que la mini SD.
<b>Microcontrolador</b>	Dispositivo programable compuesto de CPU, RAM, ROM y puertos de E/S. Diseñado para realizar aplicaciones específicas.
<b>Modulación</b>	Proceso que altera las características de una señal con el fin de enviarla a través de grandes distancias.
<b>Modulación ASK</b>	Modulación digital que envía una señal a una determinada frecuencia al enviar un “1” lógico y no envía datos para transmitir un “0” lógico (Amplitud Shift Keying, en inglés).
<b>Monofásico</b>	Sistema eléctrico que utiliza únicamente una línea viva y un neutro.
<b>MOSFET</b>	Transistor que posee un semiconductor de metal-óxido que le permite una mayor amplificación de corriente por medio de voltaje (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect).
<b>Neutro</b>	En un sistema eléctrico es la parte que cierra el circuito en la cual desemboca la corriente.

<b>Periférico</b>	Unidad independiente que permite una comunicación con el CPU.
<b>PLL</b>	Lazo de seguimiento de fase, diseñado para mantener la frecuencia en su entrada o crear múltiplos de la misma.
<b>Portadora</b>	Onda modificada en alguno de sus parámetros como amplitud, frecuencia o fase, con el fin de transportar una señal sobre la misma.
<b>Procesador</b>	Componente electrónico donde se realizan los procesos lógicos, es la unidad por la que atraviesan todas las solicitudes que se realizan a un CPU.
<b>Procesador embebido</b>	Procesador diseñado para realizar funciones específicas, usualmente en un sistema de computación en tiempo real.
<b>Puertos E/S</b>	Puertos que pueden ser configurados en una tarjeta programable para ser entrada o salida de voltaje.
<b>PuTTY</b>	Programa cliente emulador y consola serial.
<b>RAM</b>	Memoria de acceso aleatorio que asiste al CPU para obtener la información que necesita; pierde la misma al perder su alimentación. (Random Access Memory, en inglés).

<b>Realimentación</b>	En electrónica es cuando parte de la señal de salida ingresa nuevamente al sistema formando un bucle cerrado, permitiendo al sistema la capacidad de control y/o autocorrección.
<b>Reloj</b>	Circuito utilizado en lógica secuencial cuyo fin es proporcionar un pulso a una determinada frecuencia.
<b>Resonancia</b>	Fenómeno que se manifiesta cuando una señal en corriente alterna atraviesa un circuito de componentes pasivos, y debido a las características de los mismos, la señal sale sin pérdidas a través de este.
<b>ROM</b>	Memoria de solo lectura que no depende de la alimentación para obtener su información (Reading Only Memory, en inglés).
<b>Ruido</b>	Toda señal no deseada presente en nuestra señal de interés.
<b>Sensor infrarrojo</b>	Dispositivo fotosensible capaz de medir la radiación electromagnética infrarroja en su campo de visión.
<b>Señal electromagnética</b>	Toda señal que pueda ser representada en el espectro electromagnético.

<b>Sintetización de hardware</b>	Arreglo de compuertas interno que se genera en una FPGA a través de una descripción de hardware realizada por software.
<b>SPI</b>	Protocolo de comunicación por interface serial, ampliamente utilizado en muchos dispositivos electrónicos por su simplicidad y alta velocidad de transmisión.
<b>Tasa de información</b>	Número de bits promedio en un segundo.
<b>Tierra</b>	Se le llama así en electrónica al neutro o voltaje de referencia del circuito.
<b>Top</b>	Se nombra así al módulo utilizado para unir todos los módulos en un solo bloque en la descripción de hardware.
<b>Transistor NPN</b>	Transistor que se polariza con el emisor conectado a tierra y tanto base como colector a un voltaje positivo.
<b>Transistor PNP</b>	Transistor que se polariza con el colector conectado a positivo y tanto base como emisor a tierra.
<b>USB</b>	Bus universal serial, tipo de puerto en que se utilizan diversos adaptadores, memorias y dispositivos por su fiabilidad y velocidad de transmisión.

<b>VCC</b>	La parte positiva de una fuente de voltaje que alimenta un circuito.
<b>VCO</b>	Oscilador que varía su frecuencia con base en el voltaje que recibe a su entrada.
<b>VGA</b>	Estándar de video con una resolución de 640 x 480 pixeles (Video Graphics Array, en inglés).
<b>VHDL</b>	Lenguaje definido por el IEEE utilizado para describir circuitos digitales y para la automatización de diseño electrónico (Very High Speed Integrated Circuits).
<b>VLC</b>	Sistema de comunicación por medio de luz visible (Visible Light Communication-system, en inglés).
<b>Wi-Fi</b>	Una marca comercial perteneciente a Wi-Fi Alliance que certifica a los equipos que cumplen con los estándares 802.11 de las redes inalámbricas de área local.



## RESUMEN

El lifi es una tecnología que en su mayor parte se encuentra en etapa de investigación. En la búsqueda del método más eficiente se han realizado varias pruebas para aprovechar este medio. En el presente trabajo de graduación se aplica este medio de transmisión en instalaciones en las cuales, por precauciones para las personas que trabajan allí o por la infraestructura, no es posible utilizar medios más tradicionales como el WI-FI, para así mismo ofrecer un medio más económico con igual y/o superior eficiencia que las transmisiones alámbricas. Otro propósito es demostrar las ventajas del espectro de luz visible como medio de transmisión y su importancia a futuro en las comunicaciones mundiales aplicadas a múltiples entornos, en el futuro con dispositivos móviles de uso diario.

Con el fin de obtener los resultados óptimos se aplican tecnologías de descripción de hardware por medio de software, como lo es la FPGA, así como dispositivos de electrónica digital que se acoplarán a los circuitos de potencia con el fin de reducir la circuitería física en el proyecto y las fuentes que puedan aumentar la probabilidad de error en el mismo.

Con los resultados obtenidos, utilizando un bombillo LED de bajo costo y consumo en watts, se determina que la distancia máxima para la recepción de datos estará determinada por la máxima distancia que pueda cubrir el bombillo con su luz. La tasa de información influirá en la probabilidad de error únicamente si el receptor está al alcance de una fuente de luz natural. Con base en pruebas en condiciones ideales y no ideales se obtienen las recomendaciones para la implementación del proyecto, así como sugerencias

dependiendo del área en la que el lector se interese, indicando si estas tendrán acceso a la iluminación natural o no.

# OBJETIVOS

## General

Diseñar e implementar un sistema de envío y recepción de datos por medio de señales con espectro de luz visible.

## Específicos

1. Determinar los conceptos fundamentales sobre el lifi y los dispositivos electrónicos útiles en la comunicación a través de una lógica TTL.
2. Diseñar e implementar un transmisor con espectro de luz visible utilizando un bombillo de corriente alterna, controlado por un control lógico digital.
3. Diseñar e implementar un receptor de espectro de luz visible que sea capaz de detectar toda la información enviada.
4. Desarrollar el software necesario para la transmisión y recepción de los datos.
5. Con base en los resultados obtenidos, proponer un método que optimice el intercambio de información en escenarios ideales y no ideales.



## INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones inalámbricas en la actualidad proponen una buena relación rendimiento/costo para satisfacer las necesidades cotidianas mediante envío de señales a altas frecuencias imperceptibles para el ser humano, que permiten un ancho de banda considerable para la demanda de hoy en día.

En la actualidad existen aplicaciones que no pueden permitirse el lujo de trabajar con una comunicación inalámbrica, ni de tener señales electromagnéticas en el ambiente. Esto puede ser debido al material de sus instalaciones, en caso de instalaciones subterráneas y de concreto reforzado. Asimismo, estas señales pueden crear interferencia en sus equipos como en la cabina de un avión u hospitales, así como en lugares que demanden una mayor seguridad en su red como oficinas gubernamentales o instituciones financieras. Esto genera altos costos y crea grandes restricciones que ralentizan en algunas ocasiones los trabajos y procesos realizados en estas áreas.

En este trabajo de graduación se presenta una solución a estos casos, con la transferencia de información a través del espectro de luz visible, el cual no crea ningún riesgo en los escenarios mencionados y se muestra de igual forma como una opción más económica que los medios alámbricos, con una eficiencia similar a los mismos, debido al ancho de banda disponible en el espectro. Cabe la posibilidad de obtener mejores resultados que utilizando tecnologías como el Wi-Fi, utilizando las instalaciones de iluminación existentes. Fácilmente puede hacerse una analogía, comparando la importancia del lifi, a futuro, con lo que es la fibra óptica para los medios alámbricos, en la actualidad.

En el capítulo 1 se detallan los dispositivos análogos y digitales que tendrán una influencia en el proyecto, así como los conceptos relacionados con la luz, la longitud de onda en los distintos tipos de color de luz y los detalles relacionados a los ambientes en los cuales se desarrolla el proyecto. En el capítulo 2 se muestra la descripción de hardware necesaria para el diseño e implementación de un transmisor de luz, así como su acople con los circuitos de potencia. En el capítulo 3 se observa el diseño e implementación del receptor de luz mediante la descripción de hardware y su acople con el circuito del fotosensor. En el capítulo 4 se detalla el software utilizado para obtener la información y posterior envío a la etapa moduladora, así como los conceptos y dispositivos utilizados para la recepción de la información mediante una computadora portátil. Y en el capítulo 5 se comentan los resultados que ha brindado el proyecto, así como distintas propuestas para su implementación bajo las condiciones de prueba del presente trabajo.

# 1. FUNDAMENTOS DEL PROYECTO

Es necesario describir los fundamentos teóricos del proyecto en general, con énfasis en el funcionamiento de un VLC, así como los dispositivos y circuitos involucrados en un sistema de transmisión y recepción de datos.

## 1.1. VLC

Al hablar de un VLC (Visible Light Communication) se tiene que tomar en cuenta que la luz a utilizar para lograr una transferencia de datos entre un emisor y receptor es la luz utilizada para iluminación. Si alguien enciende y apaga una linterna para comunicarse por medio de código Morse, es un ejemplo de lo que no es un VLC, debido a que la intermitencia de la luz es notoria para las personas cercanas a la misma, por lo tanto su propósito de iluminación se pierde al ser necesaria otra fuente de luz para ello. Si la intermitencia de la luz fuera debida a señales de alta frecuencia, emitidas por un sistema digital como una computadora, la luz luciría normalmente encendida en todo momento para el ojo humano. Esto es una clara demostración de lo que es un sistema de este tipo. Las personas deben poder percibir la luz, pero no la variación de la misma debido a la información que envía. Teóricamente se puede utilizar un ancho de banda que abarque todo el espectro de luz visible. Según se observa en la figura 1 se puede apreciar que la longitud de onda para este caso se encuentra en un rango de 400 a 700 nm. Tomando en cuenta la ecuación que relaciona la longitud de onda con la frecuencia y la velocidad de la luz:

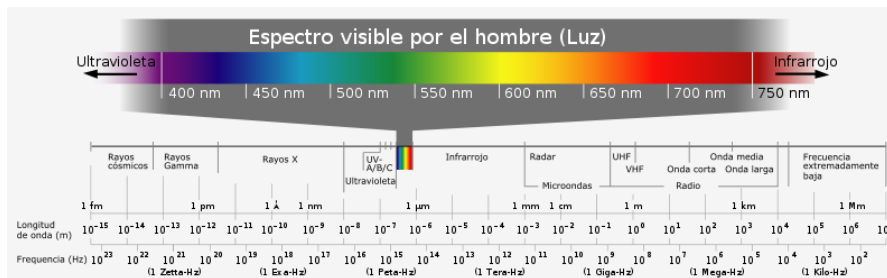
$$C = \lambda F$$

Con lo que se puede concluir, luego de obtener la frecuencia máxima y mínima, el ancho de banda según la ecuación:

$$B = F_{max} - F_{min}$$

Se tiene teóricamente disponible un ancho de banda posible de 321,42 THz, lo que lo hace muy superior a las tecnologías inalámbricas de hoy en día.

Figura 1. Espectro de luz visible



Fuente: PINO, Fernando. *El espectro de luz visible*. <http://www.vix.com/es/btg/curiosidades/2011/10/02/el-espectro-visible-de-luz>. Consulta: 23 de octubre de 2016.

### 1.1.1. Lifi

Es un término utilizado para describir un VLC de alta velocidad aplicado en escenarios donde el Wi-Fi podría ser utilizado, con la diferencia de que en lugar de utilizar señales electromagnéticas desplazándose en el medio, se utilizan señales por medio de luz visible. Es una tecnología que a nivel de implementación se encuentra todavía en sus primeros pasos y le faltan varios años para ser utilizada por el público en general, por el momento se le utiliza como complemento al Wi-Fi. Esto es debido a que se necesita que los dispositivos involucrados sean emisores/receptores, lo que en el caso del lifi es



más difícil, debido a que esto requiere que el *router* y el teléfono emitan y reciban pulsos de luz, por dar un ejemplo de la vida cotidiana. En el futuro se plantea que estos dispositivos se comuniquen al transmisor por medio de WI-FI o emitiendo luces infrarrojas, indetectables para el ojo humano.

En este trabajo de investigación se presenta la situación de que solo hay un emisor, que puede utilizar o no varias fuentes de luz para su propósito (todas transmitiendo la misma información a la vez), con la posibilidad de tener más de un receptor a la vez.

## **1.2. Led**

El led (Diodo Emisor de Luz, por sus siglas en español) es un diodo semiconductor con la característica de emitir luz al estar polarizado directamente. Su consumo de corriente depende del color que emite el dispositivo, utiliza corriente directa para su funcionamiento, es utilizado en una gran cantidad de aplicaciones, se caracteriza por conectarse en serie, aunque también se puede utilizar en paralelo. Su durabilidad no depende de la cantidad de veces que se utilice, tiene un gran tiempo de vida, por lo que se le aplica hoy en día en los bombillos de uso doméstico, llegando a ser utilizados por más de una década sin necesidad de reemplazo.

### **1.2.1. Iluminación de estado sólido**

El término sólido se refiere a que la luz es producida por un objeto de estado sólido (generalmente un semiconductor), caso opuesto al de los tubos de vacío o gas donde la luz emitida se da por otro elemento en otro estado, como el caso de las lámparas fluorescentes. Los dispositivos que iluminan de esta forma obtienen un menor calentamiento y una mayor eficiencia energética,

además de poseer una mayor fiabilidad y resistencia en diferentes condiciones de operación.

### **1.2.2. Bombillo led**

Es una lámpara de estado sólido que utiliza el Led como fuente lumínica. Según la intensidad de luz deseada se coloca una cierta cantidad de led por bombillo. Como se mencionó anteriormente, este semiconductor está diseñado para funcionar con corriente directa, por lo que necesita una circuitería adicional para funcionar en corriente alterna, que luego va cubierta con un plástico blanco, como se observa en la figura 2. Estos dispositivos se dañan a altas temperaturas, por lo que poseen disipadores y aletas de refrigeración como protección.

El costo de fabricación es más alto que el de una lámpara fluorescente, por ejemplo, pero su tiempo de vida es mucho más alto y lo proporciona el fabricante en horas. Una gran ventaja es que el envejecimiento o agotamiento de este dispositivo no depende de la cantidad de veces que se le conmute, como era el caso de los bombillos incandescentes. En la figura 2 se muestra un bombillo led que puede ser adquirido en cualquier ferretería para aplicaciones domésticas. En la sección de apéndices se encuentra el bombillo led utilizado para este trabajo de graduación.

Figura 2. **Bombillo led**



Fuente: Penalva, Javier. *Cómo elegir un bombillo led para ahorrar en la factura de la luz.*  
<http://www.xataka.com/especiales/como-elegir-una-bombilla-led-para-ahorrar-en-la-factura-de-la-luz>. Consulta: 25 de octubre de 2015.

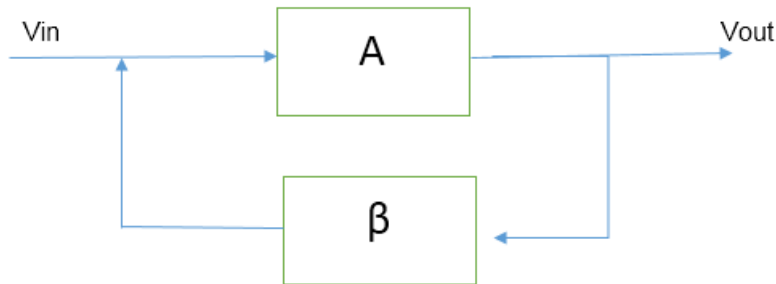
### **1.3. Oscilador**

Es un dispositivo o circuito capaz de convertir energía de corriente directa a corriente alterna a una frecuencia específica y una forma de onda determinada, que puede ser sinusoidal, cuadrada, triangular, etc. Se les utiliza para: relojes (en circuitos digitales), transmisores, receptores de radio y televisión, inversores, etc.

#### **1.3.1. Principio de funcionamiento**

Usualmente un oscilador está compuesto por un circuito oscilante, un amplificador y una red de realimentación. Un sistema realimentado se observa en la figura 3.

Figura 3. **Sistema realimentado**



Fuente: elaboración propia.

La ganancia de este sistema tiene la forma:

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + A\beta}$$

Al momento de tener  $|A\beta| = 1$  y con fase de  $180^\circ$ , conocida como la condición de arranque, se tiene un cero en el denominador, lo que genera una ganancia que tiende a infinito, debido al ruido que está presente en todas las frecuencias. Al momento de pasar la frecuencia que entre en resonancia con el circuito oscilante el sistema comenzará la oscilación, luego es necesario que  $A\beta > 1$ , condición de mantenimiento, para que el sistema se mantenga oscilando, debido a que los componentes pueden cambiar sus características por calor, uso, etc. Esto puede provocar que  $A\beta < 1$  si se diseña específicamente para que trabaje en  $A\beta = 1$ . Lo recomendable sería trabajar con un sistema que permita cambiar sus valores durante el funcionamiento para variar fácilmente  $A\beta$ .

Existen distintos tipos de osciladores, los cuales tienen en mayoría un nombre basado en el nombre de su creador, los hay de distintas formas de onda, por lo que depende de la aplicación el oscilador más conveniente a utilizar.

#### **1.4. Transistor**

Un transistor es un dispositivo de 3 pines (base, colector, emisor) cuyo fin es controlar la corriente en uno de ellos; tiene un colector, con base en la correcta polarización de base, y un emisor. Tiene 3 regiones de operación: corte, saturación y activa. En el modo corte no hay flujo de corriente entre el colector y el emisor. En el modo saturación se llega un punto de corriente máximo en el colector, donde los aumentos en la base ya no tienen un gran cambio en la corriente de colector. En la región activa se trabaja en condiciones óptimas, por lo que se le utiliza como amplificador.

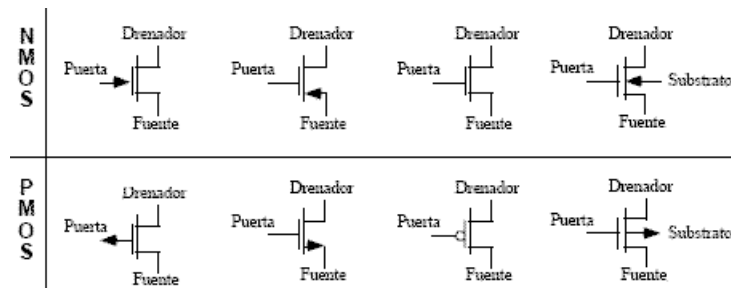
Es usual escuchar la analogía entre lo que significó la invención de la rueda para la humanidad y lo que es el transistor para la electrónica, puesto que la electrónica digital se basó en este dispositivo para realizar todos sus componentes, todos los microprocesadores que se utilizan en dispositivos de uso diario, como *tablets*, celulares y computadoras están hechos a base de millones de transistores, por ejemplo.

##### **1.4.1. MOSFET**

El MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) es el transistor más utilizado en la industria microelectrónica, ya sea para circuitos análogos o digitales. En el BJT había transistores NPN y PNP, análogamente se tiene para los MOSFET canal N y canal P, utilizados en la electrónica de

potencia para conmutar o amplificar señales, manejando grandes corrientes, controladas a través de su compuerta. Es capaz de soportar corrientes más altas que el BJT y disipa menos corriente, debido a una resistencia interna muy pequeña, además de poseer un tiempo de reacción mucho más rápido. En la figura 4 se puede apreciar la simbología utilizada para los MOSFET.

Figura 4. **Simbología utilizada para los MOSFET**



Fuente: DURÁN, Marcel. *Transistores MOSFET*. [http://www.unicrom.com/Tut\\_transistores\\_MOSFET.asp](http://www.unicrom.com/Tut_transistores_MOSFET.asp). Consulta: 26 de octubre de 2015.

#### 1.4.2. Fototransistor

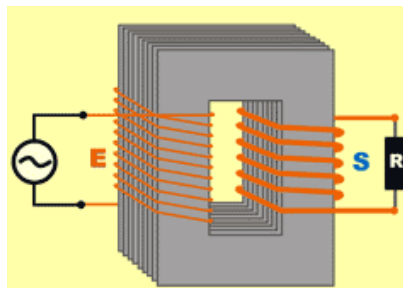
El fototransistor es un transistor, físicamente con la forma de un led común, con dos terminales (colector y emisor), mientras la base se activa mediante luz (que puede ser visible o infrarroja), por lo que recibir la cantidad suficiente de luz en su base equivale a tener adecuadamente polarizada la unión base-emisor y así lograr una conducción entre colector y emisor.

#### 1.5. Transformador

Los transformadores monofásicos constan de 2 devanados, llamados primario y secundario, que están alrededor de un núcleo de acero al silicio que

forma parte del cuerpo del transformador. En la mayoría de transformadores el devanado que posee mayor número de vueltas corresponde al enrollado primario o de entrada “E” de la corriente que se va a transformar y corresponde al voltaje más alto. El devanado que posee menos vueltas, y por lo tanto menos resistencia, es el enrollado secundario o de entrada “S” de la corriente ya transformada o modificada y corresponde al voltaje más bajo. En este caso el transformador trabaja como “reductor de tensión”. En la figura 5 se muestra cómo se conecta un transformador monofásico como reductor.

Figura 5. **Transformador monofásico como reductor de tensión**



Fuente: GARCÍA, José. *Qué es un transformador eléctrico monofásico.*

[http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke\\_trafo\\_mono/ke\\_trafo\\_mono\\_2.htm](http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke_trafo_mono/ke_trafo_mono_2.htm). Consulta: 26 de octubre de 2015.

### **1.5.1. Principios de operación de los transformadores monofásicos**

Los transformadores funcionan según las ecuaciones de Maxwell, ya que, al polarizar un devanado del dispositivo con corriente alterna, se crea un campo magnético que a su vez induce un flujo magnético que recorre todo el hierro dulce que, al llegar al otro embobinado, realiza el proceso inverso induciendo un campo magnético que de igual manera genera un voltaje en el devanado.

El voltaje en el secundario dependerá de la relación de vueltas de ambos devanados por la amplitud del voltaje en el primario, mientras la corriente dependerá de la inversa de dicha relación por la amplitud de la corriente también en el primario. Esto quiere decir que el voltaje en el secundario será menor que en el primario, mientras hablando de la corriente será caso contrario. Lo que dice esto es que, si bien las amplitudes varían, la potencia se mantiene igual en ambos devanados.

### **1.6. Inversor de voltaje**

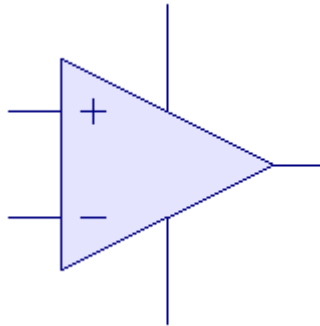
Es un dispositivo/circuito que convierte la corriente continua en su entrada en corriente alterna a su salida, generalmente de una amplitud de voltaje distinta. La corriente directa tiene un valor constante y fluye en una sola dirección, mientras la corriente alterna varía su voltaje y dirección de forma periódica. Hay algunos inversores, incluso, que mediante filtros cambian la forma de la señal dependiendo de las necesidades que tengan. Estos dispositivos se aplican por ejemplo en los UPS que almacenan la energía en una batería y luego quiere utilizarla en dispositivos conectados a la fuente eléctrica de la infraestructura, ya que los electrodomésticos trabajan con corriente alterna. Se puede ver un escenario similar en los sistemas que almacenan energía por medio de paneles solares que la almacenan en baterías en forma de corriente directa (ya que no hay forma de almacenarla en alterna) y luego para su uso en las instalaciones debe pasar antes por un inversor. En este proyecto se aplica al convertir voltaje de una fuente de corriente directa, que alimentará el bombillo LED en corriente alterna, mediante la frecuencia que se genera por medios propios.



## 1.7. Amplificador operacional

Está basado en el amplificador diferencial, es un dispositivo activo que posee una resistencia alta de entrada y baja en su salida. Cuenta con dos entradas y una salida, una alimentación positiva y negativa, +vcc y -vcc, como se observa en la figura 6. Tiene dos modos principales de configuración, como amplificador de lazo abierto y lazo cerrado. Como lazo abierto funciona como amplificador diferencial, es utilizado como comparador y posee una alta ganancia, aproximadamente vcc.

Figura 6. Amplificador operacional



Fuente: elaboración propia, empleando Livewire 1.11.

En el caso del lazo cerrado, posee retroalimentación, que puede ser negativa o positiva, esto genera una salida estable en frecuencia y ganancia más baja que en lazo abierto, que es determinada por los elementos del circuito. En esta configuración se pueden tener diversas aplicaciones como amplificador, oscilador o filtro, e incluso tiene la posibilidad, mediante componentes pasivos y activos, el poder realizar operaciones matemáticas a las señales que pasan a través de él, entre otras aplicaciones.

### **1.7.1. Circuito comparador**

Este circuito permite comparar qué voltaje en la entrada del amplificador es mayor, por ejemplo, si el voltaje a la entrada inversora (-) es mayor al de la no inversora (+) a la salida, se tendrá el valor correspondiente a -vcc conectado al operacional. De forma opuesta se tendrá una salida igual a +vcc. Al momento de tener el mismo valor en ambas entradas, idealmente debería mostrar un cero a la salida, esto en la práctica depende del amplificador que se use, por lo que es posible hallar una pequeña diferencia de potencial a la salida.

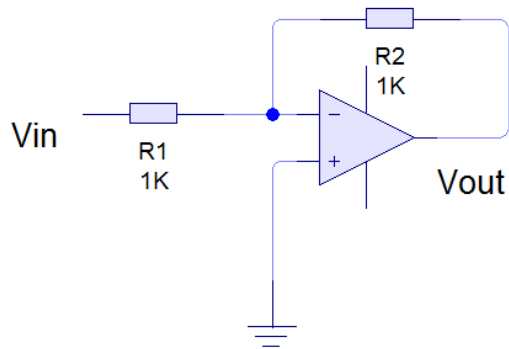
### **1.7.2. Amplificador inversor**

Este circuito se caracteriza por tener elementos pasivos y/o activos que formen una retroalimentación negativa y controlen la ganancia mediante estos, se utiliza con el fin de amplificar el voltaje a la entrada y es hecho a base de resistencias, como se muestra en la figura 7. Mediante la siguiente ecuación se obtiene la ganancia:

$$Av = \frac{R2}{R1}$$

También existe un amplificador no inversor, más se descarta el uso de este para el caso, debido a una mayor estabilidad en frecuencia en el amplificador inversor, que no es conveniente debido a las frecuencias a las que se trabaja en el proyecto.

Figura 7. **Configuración inversora**

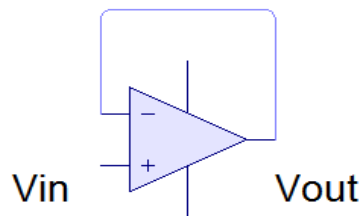


Fuente: elaboración propia, empleando Livewire 1.11.

### 1.7.3. **Seguidor de voltaje**

Este circuito se caracteriza por poseer una realimentación pero sin involucrar a ningún componente más que el amplificador en el mismo. El propósito es dar una ganancia alta en corriente a la señal entrante, manteniendo el voltaje de entrada igual al de la salida. Se utiliza para eliminar el efecto de carga, también se aplica como acople de impedancias. En la figura 8 se puede observar un seguidor de voltaje utilizando el amplificador operacional:

Figura 8. **Circuito seguidor de voltaje**

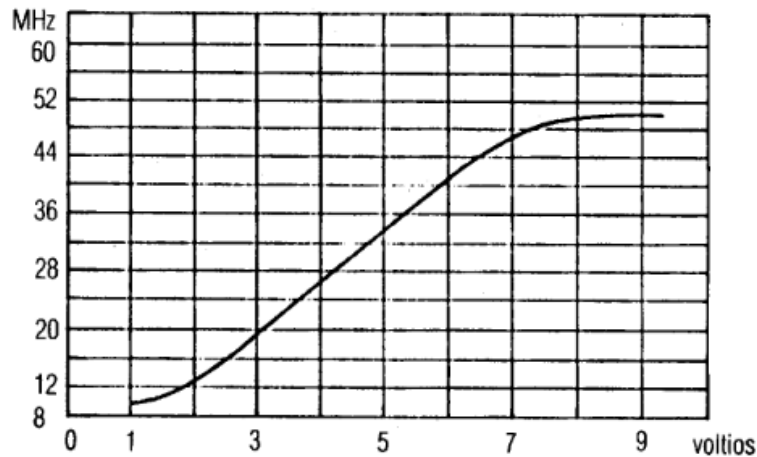


Fuente: elaboración propia, empleando Livewire 1.11.

## 1.8. VCO

El VCO (Voltage Controlled Oscillator) también conocido como oscilador controlado por voltaje, la finalidad de este circuito es obtener a la salida un voltaje constante, con una frecuencia variable, dependiendo del voltaje de entrada. En la figura 9 puede observarse el comportamiento de este tipo de circuito. Usualmente se posee una relación lineal entre el voltaje de entrada y la frecuencia de salida, como se observa en la parte central de la gráfica:

Figura 9. **Frecuencia vs voltaje**



Fuente: GAZQUEZ, José Antonio. Osciladores controlados por tensión (VCO).<http://www2.ual.es/te/icons/cqvco1.pdf>. Consulta: 27 de febrero de 2017.

Un VCO puede obtenerse mediante un diseño de circuitos con elementos pasivos y activos, utilizando únicamente un CI dedicado a esta función o generándolo mediante la sintetización de hardware con una FPGA o FPAA.

## 1.9. Modulación

La modulación está presente en todas las transmisiones inalámbricas utilizadas hoy en día, el objetivo principal de esta es emitir una señal a una distancia lo más lejana posible, variando la amplitud o frecuencia de la misma (más nunca su información) para enviar la señal sobre una onda portadora. Así se aprovecha más el canal enviando más información, además de incrementar la inmunidad contra ruidos e interferencias. Esto también posibilita utilizar una antena lo más pequeña posible, y por lo tanto reducir costos. Cuando se analiza la ecuación:

$$\lambda = \frac{C}{F}$$

Siendo C la velocidad de la luz constante con valor:  $3 \times 10^8$  m/s, y siendo F la frecuencia de la señal, resulta que  $\lambda$  es la longitud de la antena, por lo que a mayores frecuencias se tendrá una antena más pequeña. La modulación se divide en:

- Analógica
- Digital

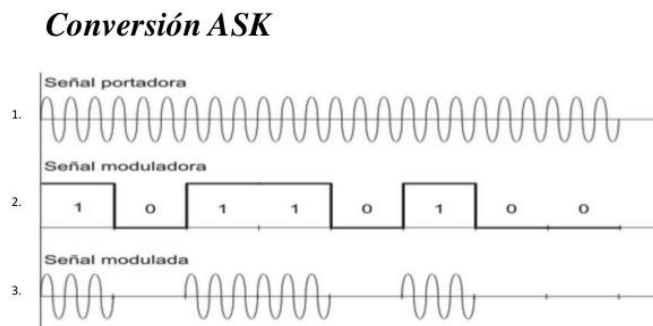
En el caso de la primera, quiere decir básicamente que la señal transmitida puede tener una cantidad de valores de amplitud infinitos a lo largo del tiempo. La ventaja es que en algunos casos la circuitería lleva menos etapas que la digital. Se poseen los valores exactos en el demodulador, por lo que la señal es exactamente igual a la original. Para la modulación digital se tiene la característica de que solo puede tomar valores de amplitud finitos en una cantidad de tiempo definida. Esto presenta la ventaja de que la señal puede ser

reconstruida y amplificada mediante sistemas de regeneración de señales. Se pueden tener sistemas de detección y corrección de errores, es más fácil procesar este tipo de señales y permite además una generación infinita sin pérdidas de calidad.

### 1.9.1. Modulación ASK

ASK (Amplitude shift keying) es conocida como modulación por corrimiento de amplitud, es una modulación digital que varía la amplitud de la señal dependiendo del valor de la misma. Su diferencia con respecto de AM es que esta última es análoga. En otras palabras, en ASK los valores de amplitud son limitados en valor y tiempo. Si se modula una señal digital con este método, se tendrán únicamente dos valores distintos para la amplitud, que representa un cero lógico con el mismo valor en voltios (figura 10).

Figura 10. Señal portadora, moduladora y modulada



Fuente: PEÑA, César; DEL ROSARIO, José; HERRERA, Juan. *Técnicas de modulación*.  
<https://es.slideshare.net/JuanHerreraBenitez/digital-analogo>. Consulta: 23 de febrero de 2017.

Es utilizada para radiocomunicaciones en radiodifusión pública. Entre sus ventajas están:

- Reducción en la cantidad de energía necesaria para transmitir la información.

Entre sus desventajas están:

- Es susceptible al ruido (voltajes introducidos en el sistema debido al calor e inducción electromagnética, provocando alteraciones en la amplitud de la señal).
- Utiliza únicamente dos variaciones en la señal, lo que provoca que el ruido altere fácilmente la información.
- La velocidad de transmisión es altamente susceptible a la interferencia del ruido, probablemente la modulación digital más afectada por el ruido.

A pesar de sus desventajas esta es la modulación a utilizar en este proyecto, debido a que más adelante se observa que el medio en el que se trabaja no induce ruido y la forma en que se relacionan las frecuencias del bombillo, la frecuencia modulada y la tasa de bits a utilizar generan una casi nula posibilidad de interferencia en el sistema. Además, su simpleza, en un sistema tan complejo, permite obtener frecuencias altas con las cuales trabajar.

#### **1.10. Microcontrolador**

El microcontrolador es un circuito integrado que contiene una unidad de procesamiento (CPU), memorias (RAM y ROM) y puertos de entrada y salida

(periféricos). Básicamente posee los mismos elementos que una computadora pero con una capacidad bastante limitada comparada con la misma. Posee un bus distinto para comunicar la CPU con los registros y las memorias, y utiliza la arquitectura Harvard.

Figura 11. **Esquema de la arquitectura Harvard**



Fuente: CARRASCO, Abraham. *Arquitectura Von Neumann vs Harvard*.<http://gpsk15.blogspot.com>. Consulta: 26 de octubre de 2016.

Se le usa para aplicaciones específicas, generalmente como elemento de control de una circuitería o sistema, también como elemento de muestreo en comunicaciones digitales. Posee un reloj interno para trabajar. Los microcontroladores (al igual que los microprocesadores) se clasifican de acuerdo al largo de las palabras que puede procesar (dadas en bits) que van desde los más sencillos, de 8 bits, hasta los más completos de 32 bits.

Posee diversos módulos como: temporizadores, adc, pwm y puede comunicarse de forma serial con otros dispositivos. Tiene la opción de hibernación, si no se encuentra trabajando un pulso en un determinado pin lo despertará de su estado y se pondrá a trabajar, mientras tanto su consumo de potencia será muy bajo, en micro watts, incluso nW para algunos modelos.



## 1.11. FPGA

La FPGA (Field Programmable Gate Array) es un arreglo de compuertas, estos CI están hechos a base de CLB's cuyo propósito es que el usuario pueda describir a través de software el comportamiento de este dispositivo en hardware, con lo que se pueden recrear varios componentes existentes o definir los propios a través de herramientas de software. Actualmente son utilizados por las compañías de CI's para realizar pruebas a sus prototipos antes de hacer mayores inversiones monetarias en los mismos.

### 1.11.1. Bloques integrados

Una FPGA contiene bloques de memoria dedicados a:

- Memoria
- Bloques DSP
- Procesadores embedidos
- Controladores de memoria
- Controladores Ethernet
- Controladores PCI-Express

Posee además PLL's, DLL's y una gran cantidad de pines de E/S, hasta 1200 en algunos casos. Posee impedancia y *output strenght* controlables, lo cual es una gran ventaja, ya que permite realizar acoples entre circuitos externos conectados a la FPGA.

### **1.11.2. VHDL**

El VHDL es el acrónimo utilizado para representar la unión de VHSIC y HDL, donde VHSIC viene de Very High Speed Integrated Circuit y HDL de Hardware Description Language. Es un lenguaje utilizado por científicos e ingenieros para describir circuitos digitales. Utiliza instrucciones de alto nivel y se implementa por módulos. Cuando se compila el código este se sintetiza, lo que significa que se crea un modelo en hardware a base del mismo, esto no quiere decir que no se puedan crear algoritmos con el mismo, y por lo mismo no todas las sentencias son sintetizables.

### **1.12. Aplicación del trabajo de investigación**

El sistema VLC realizado en este proyecto tiene como fin ser de una opción económica y útil en entornos donde no es posible utilizar el Wi-Fi, como por ejemplo:

- Aeronaves.
- Hospitales.
- Instituciones gubernamentales y/o financieras.
- Complejas infraestructuras bajo tierra o de acero reforzado que no permiten a las señales de radio atravesarlas.

Si bien el proyecto está recomendado inicialmente para lugares con poco acceso a luz natural, esto no es del todo una restricción y se ahonda más sobre el tema en el capítulo 5.

### **1.12.1. Condiciones del entorno para el proyecto**

El sistema VLC realizado en este proyecto tiene como fin ser una opción económica y fiable que pueda ser rival de los métodos alámbricos, en ambientes donde el Wi-Fi no puede ser aplicado por diversas causas. Se deben cumplir ciertas condiciones referentes al entorno para utilizar el método propuesto en este trabajo de investigación:

- Fuente de luz: la posición de esta no debe cambiar con respecto al receptor.
- Receptor: no debe ser móvil, a menos que funcione a base de instrucciones y reciba las mismas en lugares predeterminados, con más de una fuente de luz.
- Luz externa: está permitida pero se recomienda que no existan fuentes de luz ajenas en el área de trabajo, con la excepción que se trabaje en horas predeterminadas.



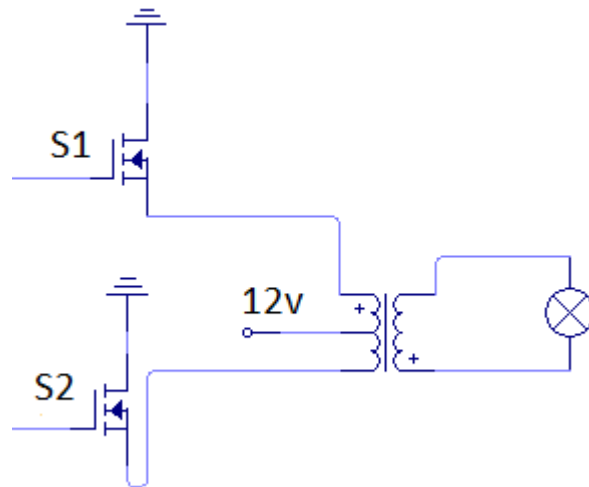
## **2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO EMISOR DE LUZ**

Se deben tomar ciertas consideraciones para realizar los circuitos que transmiten por luz, ya que no solo es necesario emitirla sino también poder trabajar a las frecuencias de la portadora de la señal, sin añadir ningún tipo de ruido o interferencia, al menos no lo suficiente para ralentizar o disminuir la eficacia del sistema. De igual forma hay que considerar cómo se acopla la señal en las distintas etapas de la amplificación, así como el tipo y forma en que se modulará esta.

### **2.1. Inversor de voltaje ac-ac, potencia**

El bombillo led utilizado es de 6W, como muchos de su tipo, no funciona con un *dimmer*, por lo que se necesita cumplir con las especificaciones de voltaje y potencia específicos. Para tal caso se utilizará un MOSFET IRFZ44N, hoja de datos en apéndices de alta potencia acoplados al transformador para dar una ganancia en corriente necesaria para alimentar el transformador y el bombillo a su vez (que se conectará al primario), como se observa en la figura 12.

Figura 12. **Inversor de voltaje**



Fuente: elaboración propia empleando livewire 1.1.

### 2.1.1. **Explicación del circuito**

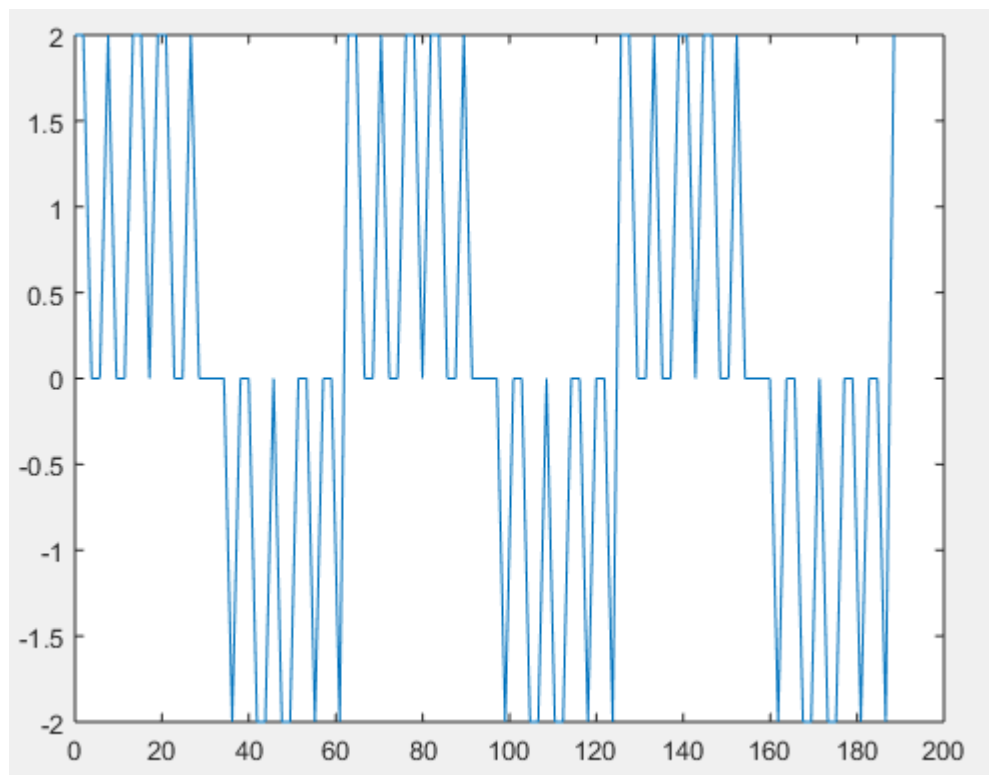
En la figura 12 puede observarse también el devanado central conectado a vcc, mientras los MOSFETS están conectados a los extremos del devanado secundario que de acuerdo a las señales S1 y S2 conectarán los mismos a tierra para crear una corriente alterna. De esta forma, y de acuerdo a la relación de vueltas del transformador, se tendrá en el devanado primario una tensión de 120V. Cabe destacar que la frecuencia de iluminación en este proyecto fue de 50 y 60 Hz para las distintas pruebas realizadas.

### 2.1.2. **Acople para alta y baja señal**

Teniendo en cuenta que la señal que llegará al bombillo debe ser de 60 Hz, que de ahora en adelante se llamará FI (frecuencia de iluminación), como la de modulación, se tiene que tomar en cuenta que esta señal debe pasar tanto

por  $s_2$  como  $s_3$ , como se observa en la figura 12, para esto se tiene que garantizar que ambas señales pasen a través del transformador cuando sea conveniente. Para esto será necesario sumar ambas señales del generador, de forma separada con la señal moduladora. Esto implica que la salida contendrá ambas señales, como se observa en la figura 13, en este caso se muestra una parte negativa en la señal, para fines ilustrativos únicamente, en la práctica esta tendrá un valor mínimo de cero voltios, como valor más bajo de amplitud. Los picos que se observan poseen una forma cuadrada que no se aprecia por la calidad de la imagen.

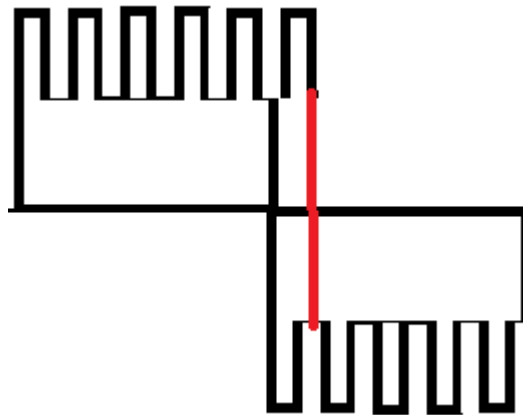
Figura 13. **Señal resultante de la suma de la señal modulada con la de iluminación**



Fuente: elaboración propia, empleando MatLab R2015a.

Se halla una situación interesante, puesto que la señal modulada tomará el valor negativo obligatoriamente cuando la señal de 60 Hz tome dicho valor. Esto implica que los datos podrían perderse en el último bit enviado si este no termina antes que la señal de iluminación cambie de estado, de igual manera no puede aparecer otro bit en ese mismo instante, por lo cual hay que asegurar, en hardware, que no ocurran esos escenarios, lo que puede observarse en la figura 14. Con una línea roja se muestra el error que causa un bit desfasado, el cual no solo perjudica los datos a enviar sino también daña a corto plazo los componentes en el inversor, ya que ambos MOSFET se encuentran polarizados al mismo tiempo, por lo que la luz tampoco cumple su propósito de iluminar.

Figura 14. **Señal resultante de la suma de la señal modulada con la de iluminación, con problema de desfase**



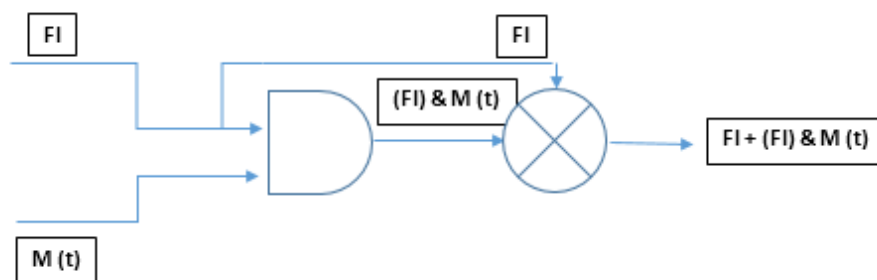
Fuente: elaboración propia empleando Paint.

Una solución a esta problemática es utilizar una frecuencia portadora que sea múltiplo de la señal del bombillo. En la figura 13 se tomó en cuenta una señal portadora de 600 Hz, 10 veces la señal lumínica, por lo que debe haber 5 pulsos en cada semiciclo de la señal sumada, que se corrobora en imagen. De



esta forma se envía una cantidad de bits exacta en cada semiciclo de la señal del bombillo. Esto a su vez obliga a diseñar un hardware con resultados exactos, para una nula posibilidad de envíos erróneos o fallidos de datos que introduzcan ruido al sistema. Se presenta otro caso de interés en la unión del circuito emisor con la etapa de amplificación. Para que la luz encienda y apague de acuerdo a FI es necesario que la señal modulada no influya en esta parte, y viceversa, para esto se agrega una compuerta AND, como en la figura 15.

Figura 15. **Acople entre señal de iluminación y señal modulada**

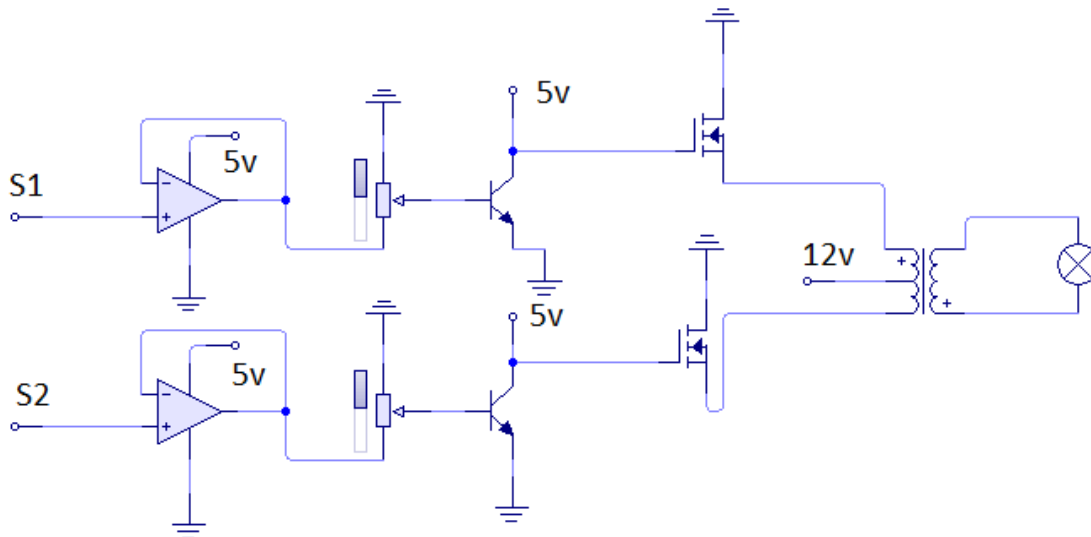


Fuente: elaboración propia utilizando Microsoft Word 2013.

Se añade también una etapa sumadora representada con el símbolo de circunferencia e implementada con un amplificador operacional como sumador. De esta forma se garantiza que a la salida solo se tendrá una señal modulada cuando FI sea distinta de cero. De lo contrario los MOSFETS podrían quemarse si se encienden al mismo tiempo, uno correctamente debido a FI y el otro erróneamente por M(t) de la señal modulada.

El análisis realizado anteriormente conduce a la investigación al circuito mostrado en la figura 16.

Figura 16. **Circuito de acople junto con el inversor**



Fuente: elaboración propia utilizando livewire 1.1.

De acuerdo a la figura 16 se observa la señal que contiene la frecuencia de iluminación y los datos a enviar, representada por S1 y S2, que a su vez están conectados a la salida del circuito mostrado en la figura 15, y se conectan a un amplificador operacional en condición de emisor seguidor para no exigirle corriente a los dispositivos que envían la señal, a manera de aislar ambas partes del proyecto como precaución. La salida de los amplificadores está conectada a un potenciómetro de precisión que varía la amplitud del voltaje que llega a la compuerta de los MOSFETS, con el propósito de no exigir más corriente de la que se necesita para los 6 W que consume el bombillo LED.

## 2.2. Emisor

Antes del diseño de este circuito es necesario tomar en cuenta las características mínimas de este, ya que la luz debe funcionar no solo cuando se

envíe la información sino también debe cumplir su propósito principal de iluminación. El bombillo LED, al igual que todos sus componentes, debe trabajar normalmente en las frecuencias de la portadora, así como la FI utilizada para su propósito principal.

### **2.2.1. Oscilación, generador de FI**

El método utilizado para generar la FI es mediante la sintetización de hardware por medio de una FPGA. Para llevar a cabo este fin se trabaja con una Xilinx spartan 3A en la tarjeta de desarrollo Elbert V2.

#### **2.2.1.1. Especificaciones y características de la tarjeta de desarrollo**

La tarjeta de aprendizaje ofrece una programadora integrada, accesible por puerto USB para sintetizar el hardware en el integrado. Una serie de LED's, *switches*, botones para realizar distintas pruebas, puerto VGA, salida de estéreo, 3 displays de 7 segmentos, así como 39 pines de E/S. Posee un reloj interno de 12 MHz y es posible alimentarla mediante un puerto USB o una fuente dc de 5v.

#### **2.2.1.2. Detalle de pines del generador de FI**

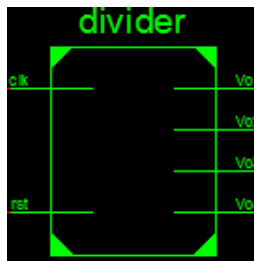
Para una correcta operación del generador sintetizado (figura 17) es necesario definir los pines para la correcta operación del mismo:

- Reloj (Clk): para generar señales de distintas frecuencias es necesario basarse en una frecuencia fundamental, por lo que se utiliza el reloj interno de la FPGA para este objetivo.

- Reset (rst): se utiliza para habilitar el funcionamiento del circuito, si posee un 0 lógico en su entrada funcionará de forma usual, de lo contrario tendrá una salida nula en todo momento.
- Vo: por medio de este pin se obtiene una variación de 1's y 0's lógicos a la salida de acuerdo a la FI y se dirige hacia el módulo Cand.
- Vo2: es el otro pin de salida, básicamente posee el valor opuesto a Vo, al momento de funcionar normalmente, y este se dirige al módulo Cand2.
- Vo3: es la misma salida que Vo pero esta se sintetiza en un pin físico de la FPGA e irá conectada directamente al circuito inversor.
- Vo4: es la misma salida que Vo2 pero esta se sintetiza en un pin físico de la FPGA e irá conectada directamente al circuito inversor.

Una descripción ilustrada del generador descrito puede observarse en la figura 17.

Figura 17. **Vista del esquemático resultante del generador de FI sintetizado**



Fuente: elaboración propia utilizando ISE Design Suite 2013.

El lector familiarizado con el tema podrá notar que este es un generador inusual, por tener 2 salidas que se complementan para alcanzar la FI. En este caso es un diseño específico definido por los componentes que involucran el sistema en particular, debido al funcionamiento del transformador, sección 1.6, y el diseño de la etapa de amplificación, sección 2.1.

### **2.3. Método utilizado en la modulación ASK**

Para el caso de la modulación se utiliza una FPGA como VCO para realizar la variación en frecuencia de los pulsos binarios. En la práctica se trabaja con una Xilinx spartan 3A en la tarjeta de desarrollo Elbert V2.

#### **2.3.1. Funciones de la FPGA como modulador en el transmisor**

Para realizar la modulación, y por lo tanto el VCO, con éxito, es necesario considerar los puertos E/S necesarios para llevarlo a cabo, esto se puede realizar fácilmente planteando los objetivos que tendrá el mismo, los cuales son:

- Recibir la información proveniente del microcontrolador
- Proporcionar la señal con el cambio de frecuencia a la salida

#### **2.3.2. Detalle del modulador sintetizado**

Al cumplir los objetivos propuestos en el inciso anterior se debe crear un VCO que trabaje de acuerdo a un CI de control.

### 2.3.2.1. Detalle de pines del VCO sintetizado

Para una correcta operación del VCO sintetizado es necesario definir algunos pines para el control del mismo:

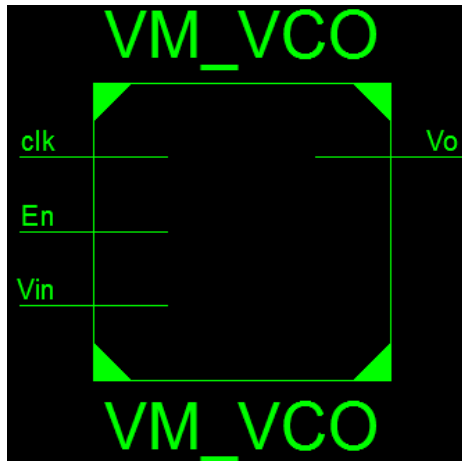
- *Clock*: para generar señales de distintas frecuencias es necesario basarse en una frecuencia fundamental, por lo que se utiliza el reloj interno de la FPGA para este objetivo.
- *Enable*: se utiliza para habilitar el funcionamiento del VCO, si posee un 0 lógico en su entrada funcionará de forma usual, de lo contrario tendrá un salida nula en todo momento.

También hay que mencionar a los pines que reciben y emiten los datos:

- *Vin*: por este medio ingresa la información, tomando en cuenta los niveles de voltaje necesarios en la FPGA.
- *Vo*: es la única salida del circuito, donde fluye la señal ya modulada.

Una descripción ilustrada de este VCO puede verse en la figura 18:

Figura 18. **Vista del esquemático resultante del VCO sintetizado**



Fuente: elaboración propia utilizando ISE Design Suite 2013.

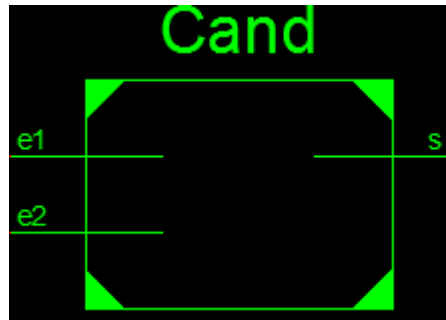
Ya con el hardware sintetizado se tiene la posibilidad de producir la señal modulada en ASK, así como la FI por dos salidas diferentes cada una, en este punto únicamente falta unir ambas.

#### **2.3.2.2. Detalle de pines del acople entre VCO y el generador de FI**

Con el fin de realizar un acople como en la figura 15, se realiza este módulo que básicamente es una compuerta AND, la cual permitirá obtener una salida modulada únicamente cuando FI lo permita, tal y como se discutió en la sección 2.1.2. Los pines de este módulo se hallan a continuación:

- E1: pin donde ingresa la señal del VCO
- E2: pin donde ingresa FI
- S: salida correctamente modulada para la implementación

Figura 19. Vista del acople del VCO con FI



Fuente: elaboración propia utilizando ISE Design Suite 2013.



### **3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO RECEPTOR DE LUZ**

Al llevar a cabo la recepción de datos a través de luz visible, el fotoreceptor debe estar acoplado a un circuito mediante el cual pueda calibrarse y trabajar a una distancia específica o mínima, y de igual forma debe proveer una respuesta, en amplitud, útil para la etapa demoduladora.

#### **3.1. Circuito receptor**

Para el caso del circuito receptor es necesario tomar en cuenta un sensor que tenga la capacidad de trabajar a las frecuencias de la transmisión por ASK, además de no agregar ruido o interferencia al mismo, de igual manera hay que considerar una salida tanto en voltaje y corriente aceptables, para no crear ninguna complicación en la etapa de demodulación, tomando como prioridad una distancia mínima a la que se detecte la luz de interés.

##### **3.1.1. Detalle del fototransistor utilizado**

En este proyecto se ha utilizado el fototransistor PT334, con dos pines para colector y emisor, siendo el fotosensor para la base se le utiliza para las siguientes aplicaciones:

- *Switch* óptico
- Detector óptico
- Sensor infrarrojo
- Lectores de discos

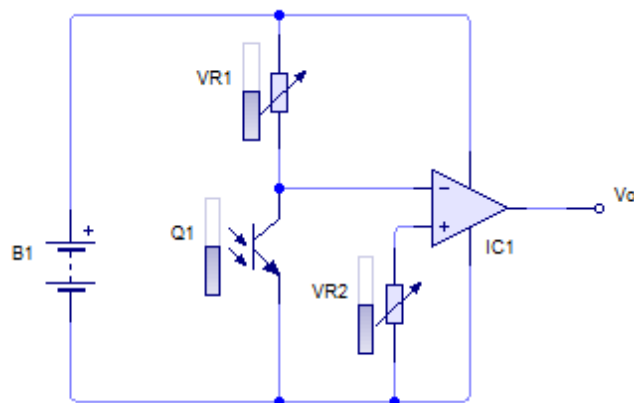
- Cámaras

Es utilizado debido a su alto tiempo de respuesta y alta fotosensibilidad. Cabe resaltar que estos sensores no responden de igual forma a la luz a cualquier ángulo, depende del fabricante esta respuesta, en este caso posee un amplio ángulo de respuesta, conveniente para este proyecto. La hoja de datos de este componente está disponible en la sección de apéndices.

### 3.1.1.1. Circuito para fototransistor

Debido a las exigencias de este circuito, mencionadas en el inciso anterior, se necesita obtener un rango mínimo que alcance la luz al circuito en cuestión, por lo que se toma ventaja de esta situación con la configuración de un circuito comparador en el amplificador operacional para, mediante una calibración de un potenciómetro (figura 20), se obtiene un funcionamiento eficiente a una distancia adecuada.

Figura 20. Circuito receptor



Fuente: elaboración propia utilizando livewire 1.1.

El lector quizá encuentre curioso ver al fototransistor conectado en la entrada inversora del amplificador operacional, la razón de esto es que el sensor está recibiendo luz permanentemente debido a FI, por lo que muestra un valor de voltaje en la entrada inversora más bajo que el esperado en el colector, que en realidad es el valor usual que posee el sensor, cuando el sistema está trabajando en condiciones normales.

Se coloca la entrada no inversora con un valor más bajo que el mencionado y así se obtiene cero voltios a la salida. Una vez el mensaje sea transmitido el sensor presentará un valor más bajo de voltaje en la entrada inversora, por lo que al momento de llegar los bits como 1's y 0's se podrán apreciar en  $V_o$ .

Hay que mencionar que es aconsejable que R1 sea un potenciómetro, ya que no es conveniente que el colector esté conectado a vcc, por un efecto de rebote presentado en el sensor, que al momento de recibir una mayor cantidad de luz baja su intensidad, pero al regresar a su condición anterior su valor de voltaje sube más de lo normal hasta estabilizarse (esto sucede en milisegundos), lo cual es una ventaja en circuitos comparadores que no buscan accionarse con un valor en específico sino con un rango en sí. Una vez se han realizado las pruebas necesarias es posible cambiar R2 por una resistencia normal. La hoja de datos del amplificador operacional está disponible en la sección de apéndices.

### **3.2. Método utilizado para la demodulación ASK**

Al igual que en la modulación, se utiliza una FPGA para realizar este procedimiento, utilizando la ya detallada tarjeta de desarrollo en el capítulo anterior.

### **3.2.1. Funciones de la FPGA como demodulador en el receptor**

Para realizar la demodulación con éxito es necesario considerar los puertos E/S necesarios para llevarlo a cabo, esto se puede realizar fácilmente planteando los objetivos que tendrá el mismo:

- Recibir la señal modulada proveniente del circuito receptor.
- Verificar la frecuencia a la que vienen los pulsos, para proporcionar o no un “1 lógico” a la salida.
- Corroborar que no haya pulsos a la entrada para proporcionar un “0 lógico a la salida”.

### **3.2.2. Detalle del hardware sintetizado**

Los objetivos podrían hacer parecer que con un simple CI sintetizado bastará, pero la pregunta esencial acá es: ¿cómo se realizara esta función? Y es donde la complejidad pueda ser mayor con respecto a la modulación. No se realizará de la forma clásica, ya que no se usa un integrador a la salida ni un divisor de frecuencia, que sí habría sido posible de implementar, pero al contar con la posibilidad de un hardware sintetizado con resultados exactos (o ideales). Existe la posibilidad de crear un dispositivo que revise los estados de la señal de entrada a la frecuencia de modulación, realizando básicamente un muestreo. Se da un detalle del funcionamiento de los módulos que conforman el demodulador a continuación:

- Demodulador mediante fsm: el propósito en este módulo es verificar los estados lógicos de la señal proveniente del receptor y si corresponden con los esperados a la frecuencia de modulación se obtiene un ‘1’; de no

cumplirse estas condiciones se obtiene un '0'. La máquina posee 3 estados que son descritos a continuación:

- Idle: en este instante tanto la salida como la entrada posee un cero, y se está a la espera de tener un cambio en la entrada del componente (que se espera sea un uno lógico), lo que llevará al siguiente estado.
- Demod1: en este caso se verifica que el estado se mantenga en '1' para pasar al siguiente estado. Mientras se mantenga en este estado se envía en todo momento un pulso al otro componente del demodulador.
- Demod2: similar al anterior se verifica que la entrada ahora se encuentre en '0'. De igual forma se envía un pulso al otro componente en todo momento durante este estado.
- Temporizador, regreso al estado idle: este módulo se activa al recibir un pulso, ya sea de Demod1 o Demod2 (hay un dispositivo para cada uno). Básicamente empieza a tomar un tiempo, que es ligeramente mayor a un semiciclo, lo que quiere decir que si la señal de entrada no posee la frecuencia de modulación, al cumplirse envía un pulso a un pin de *reset* del componente correspondiente a la máquina de estados. Esto es para evitar que el dispositivo se quede estancado en un estado y acto seguido la FSM regresa al estado idle.

### 3.2.2.1. Detalle de pines del VCO sintetizado

Para una correcta operación del demodulador hay que definir, antes, los pines que conforman a los módulos que lo componen.

### 3.2.2.2. Detalle de pines de la fsm

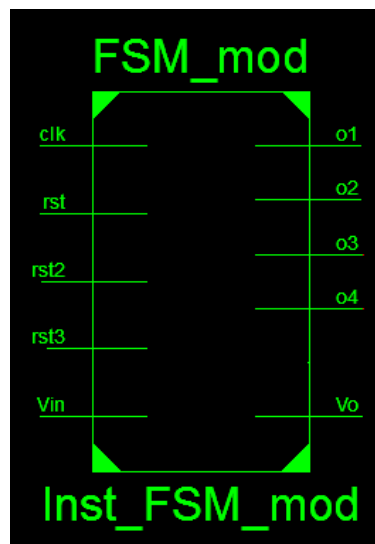
La distribución de pines para la máquina de estados finitos se muestra a continuación:

- *Clock(clk)*: para generar señales de distintas frecuencias es necesaria una frecuencia fundamental, por lo que se utiliza el reloj interno de la FPGA para este objetivo.
- *Reset (rst,rst2 y rst3)*: se utiliza para habilitar el funcionamiento de la fsm, el primero es general y está conectado (junto con los *reset* de los otros 2 módulos) al *reset* del componente (demodulador). Los otros dos pines están conectados a los otros dos módulos que resetean la fsm si la señal de entrada no es la modulada. Si posee un 0 lógico en su entrada, entrará en el estado idle, de lo contrario podrá cambiar de estado dependiendo de la señal de entrada y los tiempos.
- *Vin*: por este medio ingresa la señal de entrada, tomando en cuenta los niveles de voltaje necesarios en la FPGA.
- Puertos de salida general (o1,o2,o3 y o4): estos son para controlar los módulos que regresan al estado idle, o1 y o3 son utilizados para el reset y o2 y o4 para habilitar la salida en el módulo temporizador.

- Vo: es la salida general del demodulador, donde ya fluye la información en tiempo discreto.

Una descripción ilustrada de este VCO puede verse en la figura 21:

Figura 21. **Vista del esquemático resultante de la FSM sintetizada**



Fuente: elaboración propia utilizando ISE Design Suite 2013.

### 3.2.2.3. Detalle de pines del temporizador

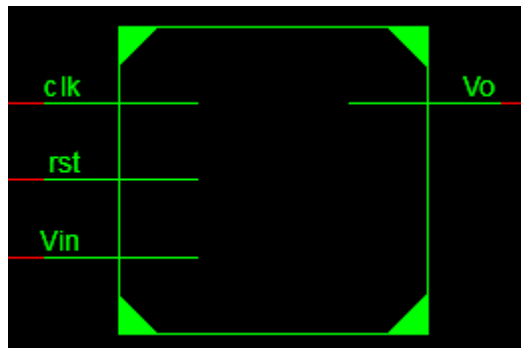
La distribución de pines para el temporizador, que regresa al estado idle, se muestra a continuación. Es necesario remarcar que en el componente a sintetizar habrá dos módulos de este tipo, ya que se utiliza uno para los estados Demod1 y Demod2, para la fsm.

- *Clock(clk)*: para generar el conteo de tiempo mayor a un semiciclo se utiliza el reloj interno de la fpga.

- *Reset(rst)*: es usado para activar y desactivar el componente.
- *Vin*: por este medio ingresa la señal de entrada que activa el conteo.
- *Vo*: sale el pulso cuyo propósito es desactivar la fsm.

Una descripción ilustrada del temporizador puede verse en la figura 22:

Figura 22. **Vista del esquemático resultante del temporizador sintetizado**



Fuente: elaboración propia utilizando ISE Design Suite 2013.

#### 3.2.2.4. **Detalle de pines del top**

El top es el componente final, el demodulador, que contiene dos módulos de temporización y la fsm, se observa abajo cómo está conformado:

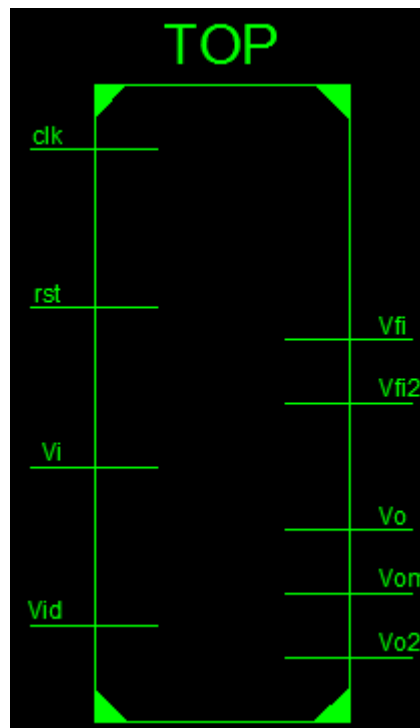
- *Clock (clk)*: para generar el conteo de tiempo mayor a un semiciclo se utiliza el reloj interno de la fpga.
- *Reset (rst)*: es usado para activar y desactivar el componente.
- *Vi*: en este pin entra la señal a modular.
- *Vid*: por este medio ingresa la señal proveniente del receptor.



- Vom: se halla la señal modulada ya acoplada a FI.
- Vo2: muy similar al anterior, la señal modulada se acopla con la señal opuesta a FI.
- Vo: la salida de la señal demodulada.

Una descripción ilustrada del top puede verse en la figura 23:

Figura 23. **Vista del esquemático resultante del top sintetizado**



Fuente: elaboración propia utilizando ISE Design Suite 2013.

Cabe destacar que en la práctica las pruebas se realizaron con una sola FPGA, por lo que se implementó un top que contuviera tanto al demodulador como al modulador, interactuando entre ellos con los circuitos externos mediante sus puertos de E/S.

### 3.2.2.5. Mapeo de pines entre la fsm y el temporizador 1

En la tabla I se muestran los pines involucrados en la conexión entre la fsm y el temporizador 1, temporizador 2 y el top. Esta descripción es útil para comprender el funcionamiento del demodulador, así como para realizar modificaciones al diseño en el futuro.

Tabla I. Disposición de pines de la fsm hacia el temporizador 1

Pines	Función
Clk	Se conecta al reloj de la fpga
Rst	Pin de <i>reset</i> general conectado al <i>reset</i> del top
Rst2	Conectado al Vo del temporizador 1
Rst3	Conectado al Vo del temporizador 2
Vin	Recibe la señal del receptor de vid en el top
O1	Activa/desactiva el <i>reset</i> del temporizador 1
O2	Activa/desactiva el Vin del temporizador 1
O3	Activa/desactiva el <i>reset</i> del temporizador 2
O4	Activa/desactiva el Vin del temporizador 2
Vo	Salida demodulada, conectada al pin Vo del top

Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Acople entre circuito receptor y demodulador

En un inicio podría parecer que el uso de filtros sería lo usual en estos casos, pensando en las comunicaciones inalámbricas ordinarias. Durante el transcurso de este trabajo se hicieron pruebas con filtros de hasta 4 etapas y de 5to. orden, no se obtuvieron los resultados deseados y se concluyó que harían falta filtros de por lo menos orden 10 para realizarlo de esta manera, sin

embargo, por el uso del circuito en la figura 20, se está discriminando por amplitud y en un entorno controlado no es necesario realizar ningún acople, puesto que la salida debe ser en una lógica TTL, de no tener una salida en amplitud adecuada se puede colocar un amplificador operacional como inversor, o una compuerta lógica para adecuar la salida al módulo serial. Si el lector se interesa por un sistema en condiciones lumínicas variables (por la luz del día) es necesario un autocalibrador, el cual se detalla en la sección 5.2.1 y 5.2.2.



## **4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE DATOS A NIVEL SOFTWARE**

Al momento de manipular los datos a nivel software, es obligatorio realizar una serie de algoritmos que no solo cumplan con su objetivo sino que al mismo tiempo no interfieran o reduzcan, de ninguna forma, el rendimiento del hardware en el proyecto. Para eso deben ser seleccionadas las herramientas más adecuadas para cada proceso, de igual forma con los protocolos a utilizar para un flujo de datos sincronizado.

### **4.1. Receptor de datos**

En este caso se utilizó el software libre PuTTY, el cual es un cliente SSH, Telnet, rlogin y TCP raw. Permite realizar una comunicación por el puerto serial (Estándar RS-232), para este trabajo se le utiliza únicamente como receptor, aunque permite trabajar como emisor de igual forma, por lo que acá se observaron los datos que provenían del transmisor.

#### **4.1.1. Estándar RS-232**

Es una comunicación serial para intercambio de datos en forma de bits entre un DTE (Data Terminal Equipment) y un DCE (Data Communication Equipment). En esta forma de comunicación se establecen las velocidades de transferencia de datos, la forma de control que utiliza dicha transferencia, las amplitudes de voltaje utilizadas, las distancias entre los equipos y los conectores a utilizar.

#### **4.1.2. Adaptador serial USB-TTL**

Para recibir la información en la computadora es necesario contar con un módulo que pueda interpretar los pulsos lógicos TTL y enviarlos en forma serial a través de un puerto, en este caso USB. Este adaptador es el CNT-003, es usual en el mercado, posee un pin para recibir y otro para enviar datos, así como uno para tierra y alimentación, adicionalmente posee pines de entrada y salida de voltaje que no son de interés en esta aplicación. Únicamente se utiliza el pin que recibe datos, el cual se conecta a la señal demodulada, proveniente de la FPGA, así como la tierra que se conecta con la tierra lógica de la circuitería.

#### **4.2. Programación en arduino**

Finalmente, el dispositivo utilizado para el emisor será uno perteneciente a la plataforma de hardware abierto Arduino, que consiste en una placa con un circuito de alimentación y un circuito que programa al microcontrolador, los cuales se conectan a la computadora por medio de un cable USB. El microcontrolador permite utilizar sus pines de entrada y salida de propósito general para diversas aplicaciones. Para este proyecto se utilizó el ATmega328 en la placa de desarrollo arduino nano (genérica).

##### **4.2.1. Especificaciones y características de la tarjeta de desarrollo**

La tarjeta del Arduino nano posee un pin digital de E/S, 8 entradas análogas, 14 pines digitales, un voltaje de operación de 5v y un reloj interno de 16 MHz. Contiene una programadora interna, con la cual es posible configurar el microcontrolador con la computadora por medio de un cable USB.

#### **4.2.2. Módulos utilizados en conjunto con la tarjeta de desarrollo**

Para realizar su propósito el Arduino se auxilia con un módulo que consiste en una interfaz entre la tarjeta micro sd y el microcontrolador. La función del hardware es de acoplar la salida de la micro sd y así poder comunicarse por SPI para la transferencia de información. El fabricante, Catalex, lo describe simplemente como adaptador y posee los pines necesarios para llevar a cabo la comunicación por SPI, además de 2 adicionales para alimentación y tierra.

#### **4.2.3. Estructura del programa**

El funcionamiento de este programa esta detallado en esta serie de pasos:

- Mantener un estado *idle* hasta recibir una señal por hardware
- Obtener los datos a enviar de una memoria micro SD
- Enviar toda la información hacia la pc
- Regresar al estado *idle*

Debido a que se trabaja por comunicación serial, se utiliza un estándar en hardware, mientras en software se manejan librerías, como en Arduino, las cuales generan los bits de sincronización, como consecuencia no habrá ningún problema de desfases de tiempo en la comunicación entre ambas partes, en lo que refiere a este procedimiento.

#### **4.2.4. Diseño del software de emisor**

El microcontrolador recibe una señal por medio de un botón a uno de sus pines digitales, configurado como entrada, esto lo lleva a realizar el proceso de

cargar los datos de la memoria microSD, para luego enviarlos a través de sus pines digitales como puerto serial hacia la FPGA y acto seguido regresar a un estado *idle*. Para este caso se utilizan dos botones para mostrar dos mensajes diferentes y se permite la posibilidad de agregar un mensaje a uno de ellos desde el compilador del fabricante sin necesidad de acceder a la memoria. Puede encontrarse el código utilizado para esta plataforma en la sección de apéndices.

#### 4.2.5. Mapeo de pines del Arduino nano

Los pines utilizados en el arduino para realizar las conexiones entre este, los módulos y la FPGA se observan en la tabla 2:

Tabla II. Disposición de pines del arduino nano

Pin del Arduino	Funcionalidad
5V	Fuente de alimentación para la circuitería externa
GND	Referencia para la alimentación
D4	Pin receptor para la comunicación serial
D5	Pin emisor para la comunicación serial
D8	Activa y desactiva el módulo de la tarjeta sd, archivo 2
D9	Activa y desactiva el módulo de la tarjeta sd, archivo 1
D11	Envía datos a la SD
D12	Recibe datos de la SD
D13	Envía el pulso de la sincronización

Fuente: elaboración propia.



## **5. RESULTADOS DEL PROYECTO**

Luego de llevar a la práctica el trabajo descrito en los capítulos anteriores (imagen de la maqueta en la sección apéndices) ya es posible comentar los alcances del mismo, así como detallar en la parte técnica el rendimiento del sistema y las inferencias que pueden tener las condiciones descritas en el capítulo 1, así como recomendaciones para la mayor efectividad en la transferencia de datos por este método.

### **5.1. Distancia entre el receptor y el emisor**

Hay que recordar que entre los objetivos de este trabajo de investigación está demostrar la ventaja del ancho de banda que posee la luz, al utilizarla como medio para una transferencia de información. Tomando en cuenta que se utilizarían los bombillos ya instalados en las posibles áreas de implementación, se determinó que no hay problema en un límite de distancia máxima, por lo que la capacidad máxima de iluminación del bombillo también será la capacidad en longitud de alcance para un receptor. En la práctica se alcanzaron más de 2 metros de distancia, sin problema alguno con el ruido, mientras que en distancias cortas se recomienda mantener por lo menos 20 cm. entre receptor y emisor, ya que de lo contrario la probabilidad de error aumenta al punto de ser visible por el usuario.

#### **5.1.1. Tasa de información**

Para las pruebas en este proyecto se trabajó a unas tasas de información bajas y altas, a distintas distancias y en escenarios donde el ruido estaba

presente como luz de fuente natural. Se encontró que era posible trabajar a velocidades elevadas, sin embargo, la probabilidad de error se elevó levemente, en algunos casos se recomienda utilizar frecuencias de modulación de por lo menos 4 veces la tasa de información que se utiliza, y superando los 20,000 b/s esta distancia puede ser de hasta 16 veces mayor, conforme aumenta la tasa de información puede aumentar también la dificultad de calibrar el circuito, puesto que durante la calibración del circuito (figura 20) a 300 baudios se encontró que había una diferencia, en algunos escenarios, de incluso 0.1 V entre la entrada inversora y la no inversora, por lo que habría que utilizar potenciómetros de mayor resistencia o considerar otro circuito de recepción. Hay que resaltar que no hay problema alguno en aumentar la frecuencia de modulación hasta su máximo, para este proyecto a 12 MHz, debido a que esta era la capacidad máxima de la FPGA utilizada, pero siempre se recomienda no utilizar la frecuencia máxima de modulación a menos que la tasa de información lo requiera.

Hay que recordar que los CI utilizados deben soportar las frecuencias con las que se trabaje en el proyecto, de lo contrario pueden ser la fuente de origen de la interferencia durante la transferencia de datos. Esta es una de las razones por las que se presenta el ruido al aumentar los baudios en este trabajo de investigación, pues con los componentes particulares la tasa de errores es mínima, casi nula.

## **5.2. Resultados en condiciones no ideales o de riesgo**

Condición de riesgo o no ideal es toda aquella condición distinta de las condiciones ideales de este proyecto que es planteado para instalaciones bajo techo, idealmente con ninguna clase de fuente de luz natural, por lo que toda ventana u orificio en las instalaciones por los que penetre la luz de día podría

ser un obstáculo para una correcta transferencia de información. La razón de esto último no es que esta añada ruido directamente en la información enviada, sino que el sensor se descalibra cuando la luz que lo alcanza es variable, y dado que por condiciones climáticas los lúmenes provenientes de una fuente natural son cambiantes en el tiempo, crean esa inconsistencia en los datos recibidos.

### 5.2.1. Primera propuesta para un circuito autocalibrador

Un circuito autocalibrador sugerido serían una serie de receptores idénticos al utilizado, formando un círculo alrededor del mismo cuyo valor en voltaje promediado se compare con el sensor que recibe la información. En la figura 24 se observa el diseño sugerido, en donde el punto central es el receptor, el anillo azul representa una serie de sensores que promediarán la luz calculada y la circunferencia verde, que está formada de sensores que trabajan para darle más prioridad a los sensores de su lado en el cálculo del promedio, por ejemplo, si entra más luz del lado izquierdo, los sensores de esa parte del círculo tendrán una mayor prioridad en el voltaje a ser comparado con el sensor receptor.

Figura 24. **Primera propuesta para autocalibrador**



Fuente: elaboración propia utilizando Paint.

La cantidad de sensores en los anillos externos aumenta la precisión en la calibración, lo que reduce el tiempo de la misma.

### **5.2.2. Segunda propuesta para un circuito autocalibrador**

Es recomendable el uso de filtros para un sistema que se encuentre expuesto a luz natural. Si bien en la sección 3.3 se discute la dificultad de aplicar un filtro, en este caso sí se sugiere un filtro de orden mayor a 8, para vislumbrar los resultados esperados. Influirá el tipo de filtro a utilizar, así como qué tan directo es el contacto del sensor con la luz del exterior. Es posible que la combinación del primer y segundo método brinde un resultado mejor que aplicar ambos métodos por separado.

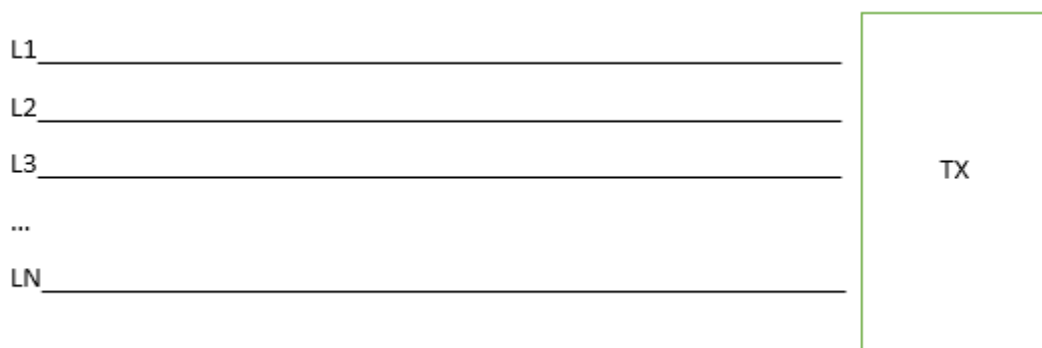
### **5.3. Propuesta de optimización del sistema**

Debido a los resultados hallados y tomando en cuenta que si las condiciones de una implementación requieren sea realizado bajo condiciones riesgosas combinadas con altas tasas de transferencia, es de considerar que la probabilidad de error aumente con los factores mencionados, por lo que es recomendable tomar prioridades entre ellos para obtener un sistema de transferencia eficiente, lo que conlleva bajar la tasa de información y encontrar la pregunta, con tasas tan bajas en baudios, ¿es realmente viable una solución de este tipo? De la forma en que se ha presentado anteriormente, no lo es, para las cantidades de información que se manejan hoy en día, es por ello que se propone enviar la información de forma paralela, de modo que se aproveche el ancho de banda de la luz.

Es posible, debido a lo anterior, separar el archivo en partes iguales a las líneas de transmisión que se poseen y enviar al mismo tiempo sobre todas

ellas, para aprovechar el ancho de banda. En otras palabras esta n cantidad de medios de transmisión son en realidad canales que tendrán una separación igual entre cada uno de ellos, como se observa en la figura 25, en el caso que se pueda utilizar un ancho de banda de 12 MHz para modulación. Es factible tener canales de 10 KHz cada uno, con una separación igualmente de 10 KHz, pues se halla de esta forma un ancho de banda útil de 6 MHz, por lo que ya es posible realizar tareas de mayor demanda.

Figura 25. **Propuesta de comunicación en paralelo**



Fuente: elaboración propia utilizando Microsoft Word 2016.

La recepción se realiza de igual forma por los n canales utilizados, que luego pueden ser separados por filtros, lo que haría innecesario el uso de un etiquetado adicional en los paquetes enviados. La propuesta anterior en una implementación de nivel comercial es totalmente factible, ya que los filtros, que hoy en día pueden ser llevados a cabo de diversas formas, son la única parte del sistema que no ha sido objeto de estudio en esta investigación y queda a discreción del lector el tomar esta idea con propósitos de implementación a nivel empresarial. Un *router*, por ejemplo, sería, idealmente, el que contenga

estos filtros y realice el proceso de receptor anteriormente descrito, que podría ser también un *modem* en una computadora.

La anterior propuesta es sugerida en casos donde se aplique el lifi en condiciones riesgosas, se posea una gran necesidad en ancho de banda y se tengan problemas con una autocalibración diferente a la de los filtros. Esto no quiere decir que el presente trabajo de investigación no pueda ser aplicado con grandes anchos de banda en el orden de los MHz, aunque siempre se sugiere trabajar en entorno lo más alejado de las condiciones no ideales para que la calibración de los circuitos no sea más lenta y compleja. Siempre se aclara que las fuentes de luz artificiales no provocan ningún inconveniente en el proyecto, siempre y cuando estas sean constantes. Una nueva instalación de luces de iluminación luego que el proyecto sea implementado requerirá una calibración del mismo.

## CONCLUSIONES

1. Se debe considerar la frecuencia a la que trabaja la luz de iluminación para poder seleccionar un múltiplo de la misma como frecuencia moduladora, para que no sea necesaria una etapa de filtros en el sistema.
2. El uso de una FPGA hizo posible la realización del proyecto, reduciendo la circuitería al mínimo, debido a su desempeño casi ideal que permitió trabajar con los márgenes de frecuencia especificados, tanto en la emisión como en la recepción de datos.
3. El uso de un sistema de transmisión/recepción de información por medio de luz visible permite aprovechar recursos ya existentes de iluminación, trabajando con una efectividad similar y/o superior al Wi-Fi.
4. En este trabajo solo se han modificado variables relacionadas al medio de transmisión pero todos los conceptos y procedimientos relacionados a la emisión y transmisión de datos pueden seguir siendo los mismos que los usados en comunicaciones por medios tradicionales.
5. En áreas donde se aplique el proyecto que estén expuestas a condiciones que creen una interferencia en los datos y el ruido sea inevitable se sugiere trabajar con tasas de transferencia de información bajas y crear canales que envíen la misma de forma paralela, para luego ser tratados en el receptor para una correcta lectura de los mismos y aprovechar así el ancho de banda de la luz.





## RECOMENDACIONES

1. Al momento de implementar este proyecto hay que tomar en cuenta que todos los componentes de la circuitería externa deben poder operar a la frecuencia que se desea modular, esto incluye la etapa de amplificación y el sensor óptico, así como utilizar potenciómetros de precisión para calibrar los circuitos comparadores.
2. Antes de implementar el proyecto se sugiere considerar una ubicación alejada de fuentes de ruido como la luz natural o, en su caso, que el receptor esté expuesto en la menor medida posible a las mismas.
3. En el caso de implementar en ambientes con iluminación natural, hay que considerar el uso de filtros y/u otro autocalibrador.
4. En la implementación se debe considerar la superficie máxima que cubre la luz, puesto que esta será la máxima a la que un fotosensor pueda recibir la información. En caso de que el fabricante no provea esta información, los watts del bombillo influyen en la distancia que puede haber entre este y el receptor.
5. Para aplicar este trabajo a un dispositivo de uso diario, es necesario complementar la comunicación con otro medio, o bien colocar un emisor infrarrojo en el dispositivo para una comunicación de dos vías.
6. En la implementación, al momento de acoplar FI con el inversor de voltaje, es posible sustituir los transistores en las compuertas de los

MOSFETS por optoacopladores, pero tomando en cuenta las frecuencias de umbral en las compuertas que deben ser respetadas para evitar un efecto rebote que aumente el ruido en los datos a enviar.

7. En una implementación con exposición a la luz natural con alta demanda de tasas de información, podría ser una opción enviar la información por canales paralelos con anchos de banda reducidos, enviando los datos a tasas más bajas que permitirán aprovechar el ancho de banda del medio y reducir la probabilidad de error al mínimo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. *A Begginer's Guide to Digital Signal Processing (DSP)*. [en línea]. <<http://www.analog.com/en/design-center/landing-pages/001/beginners-guide-to-dsp.html>>. [Consulta: 5 de noviembre de 2016].
2. *Amplificadores operacionales*. [en línea] <[https://www.ecured.cu/Amplificadores\\_operacionales](https://www.ecured.cu/Amplificadores_operacionales)>. [Consulta: 14 de noviembre de 2016].
3. ASK Modulación por desplazamiento de amplitud. [en línea]. <<http://ctagonzalez.blogspot.com/2011/04/ventajas-de-la-modulacion-ask.html>>. [Consulta: 20 de octubre de 2015].
4. *Cómo elegir una bombilla LED para ahorrar en la facture de la luz*. [en línea]. <<http://www.xataka.com/especiales/como-elegir-una-bombilla-led-para-ahorrar-en-la-factura-de-la-luz>>. [Consulta: 20 de octubre de 2016].
5. *Experiments with LM358*. [en línea]. <<http://www.buildcircuit.com/experiment-with-lm358/>>. [Consulta: 30 de octubre de 2016].
6. FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. 5a. ed. McGraw-Hill, 2003. 145 p.
7. HERNÁNDEZ, Roberto. FERNÁNDEZ, Carlos. BAPTISTA, Pilar. *Metodología de la investigación*. 5a ed. McGraw-Hill, 2010. 350 p.

8. *LiFi, el Wi-Fi del futuro con conexión a velocidad de la luz*. [en línea]. <<https://elcomercio.pe/tecnologia/ciencias/LiFi-Wi-Fi-futuro-conexion-velocidad-luz-noticia-508548>>. [Consulta: 2 de abril de 2018].
9. *Osciladores*. [en línea]. <<http://www.angelfire.com/al2/Comunicaciones/Laboratorio/oscilad.html>>. [Consulta: 25 de octubre de 2016].
10. *Osciladores controlados por tensión (VCO)*. [en línea]. <<http://www2.ual.es/te/icons/cqvco1.pdf>>. [Consulta: 3 de noviembre de 2016].
11. *Question: state and explain Barkhausen's criterion for oscillations*. [en línea]. <<http://www.ques10.com/p/7116/state-and-explain-barkhausens-criterion-for-osci-1/>>. [Consulta: 25 de octubre de 2016].
12. SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. *Microelectronic circuits*. 4a ed. Londres, Inglaterra: Oxford University Press, 2009. 380 p.
13. TAUB, Herbert.; SCHILLING, Donald L. *Principles of communication systems*. 2a. ed. McGraw-Hill Book Company, 1986. 516 p.
14. *Transistor*. [en línea]. <<http://www.areatecnologia.com/TUTORIALES/EL%20TRANSISTOR.htm>>. [Consulta: 28 de octubre de 2016].
15. *Visible Light Communications*. [en línea]. <[visiblelightcomm.com/what-is-visible-light-communicationvlc/](http://visiblelightcomm.com/what-is-visible-light-communicationvlc/)>. [Consulta: 20 de octubre de 2016].

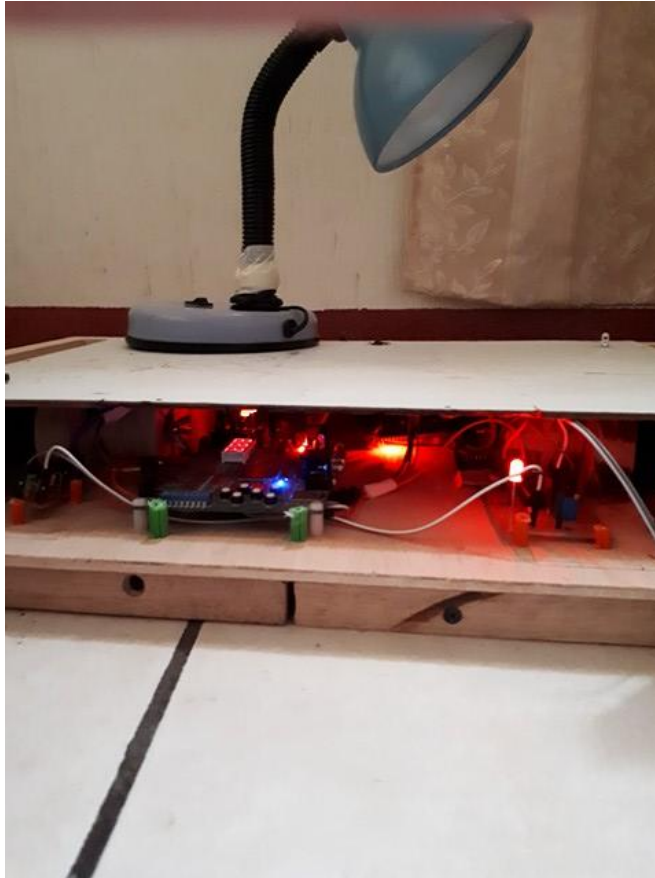
# APÉNDICES

## Apéndice 1. **Bombillo led**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Maqueta implementada**



Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 3. Programa para envío de datos desde Arduino

- Código 1. Envío de datos a través de Arduino

```
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
#include <SoftwareSerial.h>
/* SD card attached to SPI bus as follows:
** MOSI - pin 11
** MISO - pin 12
** CLK - pin 13
** CS - pin 9
This example code is in the public domain.
*/
SoftwareSerial mySerial(4, 5); // RX, TX
File photoFile;
const int buttonPin = 7;
const int buttonPin2 = 8;
const int ledPin = 5;
int f=0;
int buttonState = 0;
int buttonState2 = 0;

void setup(){
    Serial.begin(300);//pruebas exitosas con 300 baudios

    pinMode(buttonPin, INPUT);
    pinMode(buttonPin2, INPUT);
    pinMode(ledPin, OUTPUT);

    //Serial.println("initializing sd card");
    pinMode(9, OUTPUT); // CS pin of SD Card Shield
    mySerial.begin(300);
    if (!SD.begin(9)) {
        mySerial.print("sd initialization failed");
        return;
    }
    //Serial.println("sd initialization done");
}

void loop(){
    while(1){
        buttonState= digitalRead(buttonPin);
        buttonState2= digitalRead(buttonPin2);
        // Serial.println("press the button to send picture");
        mySerial.flush();
    }
}
```

### Continuación del apéndice 3.

```
// Boton 1
  if(buttonState== HIGH){
    delay(200);
    File photoFile = SD.open("test.txt");

    if (photoFile) {
      while (photoFile.position() < photoFile.size()) {

        digitalWrite(ledPin,HIGH);
        mySerial.write(photoFile.read());
      }
      mySerial.println("Texto Añadido de prueba");
      photoFile.close();
      digitalWrite(ledPin,LOW);
    }

    else {
      mySerial.println("error sending photo");
    }
  }
  else{
    digitalWrite(ledPin,LOW);
    mySerial.flush();
  }
}
//-----

// Boton 2
  if(buttonState2== HIGH){
    delay(200);
    File photoFile = SD.open("test2.txt");
    if (photoFile) {
      while (photoFile.position() < photoFile.size()) {

        digitalWrite(ledPin,HIGH);
        mySerial.write(photoFile.read());
      }
      photoFile.close();
      digitalWrite(ledPin,LOW);
    }

    else {
      mySerial.println("error sending photo");
    }
  }
  else{
    digitalWrite(ledPin,LOW);
    mySerial.flush();
  }
}
}
```

Fuente: elaboración propia.



## Apéndice 4. Descripción de hardware para el modulador

- Código 2. VCO en VHDL

```
-----  
-- Company:  
-- Engineer: Israel Valenzuela  
--  
-- Create Date: 18:52:01 11/16/2016  
-- Design Name: VCO  
-- Module Name: VM_VCO - Behavioral  
-----  
  
library IEEE;  
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;  
entity VM_VCO is  
generic(  
    contador1: integer := 2;--2500 funciona para 300 baudios  
    contador2: integer := 11950000  
    --150 para 10kb, 16 para 93750b, 10 para 150000b  
);  
port(  
    clk:in std_logic;  
    Vin, En : in std_logic;  
    Vo : out std_logic);  
end VM_VCO;  
  
architecture Behavioral of VM_VCO is  
    signal c1 : integer:=0;  
    signal c2 : integer:=0;  
    signal v : std_logic;  
begin  
    uno:process(En,clk,Vin,c1,c2,v)  
    begin  
        if (En='0') then  
            c1<=0;  
            c2<=0;  
            Vo<='0';  
            v<='0';  
        elsif rising_edge(clk) then  
            if (Vin='1') then  
                if (c1=contador1-1) then  
  
                    c1 <=0;  
                    v <= not v;  
                else  
  
                    c1<= c1 + 1;  
                end if;  
            elsif (Vin='0') then  
  
                v <= '0';  
            end if;  
        end if;  
        Vo<=v;  
    end process uno;  
end Behavioral;
```

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 5. Generador de FI

- Código 3. Generador de FI

```
-----  
-- Company:  
-- Engineer:Israel Valenzuela  
--  
-- Create Date:    22:20:26 12/15/2016  
--  
-----  
  
library IEEE;  
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;  
  
entity divider is  
generic(  
    contador1: integer := 48000;  
    contador2: integer := 187500  
);  
port(  
    clk:in std_logic;  
    rst : in std_logic;  
    Vo,V02      : out std_logic);  
  
end divider;  
  
    architecture Behavioral of divider is  
-- declaracion de señales relacionadas al contador  
    signal c1 : integer:=0;  
    signal v : std_logic;  
    signal v2 : std_logic;  
  
begin  
    uno:process(rst,clk,c1,v,v2)  
    begin  
        if rst='0' then  
            c1<=0;  
            Vo<='0';  
            v<='0';  
            v2<='1';  
        elsif rising_edge(clk) then  
            if (c1=contador1-1) then  
                c1 <=0;  
                v <= not v;  
                v2<= v nand v;  
            else  
                c1<= c1 + 1;  
            end if;  
        end if;  
        Vo<=v;  
        V02<=v2;  
    end process uno;  
end Behavioral;
```

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 6. Acople entre modulador y generador de FI

- Código 4. Acople entre modulador y generador de FI descrito en VHDL

```
-----  
library IEEE;  
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;  
  
-- Uncomment the following library declaration if using  
-- arithmetic functions with Signed or Unsigned values  
--use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;  
  
-- Uncomment the following library declaration if instantiating  
-- any Xilinx primitives in this code.  
--library UNISIM;  
--use UNISIM.VComponents.all;  
  
entity Cand is  
Port (  
    e1: in std_logic;  
    e2: in std_logic;  
    s: out std_logic);  
end Cand;  
  
|architecture Behavioral of Cand is  
  
begin  
    s<=e1 and e2;  
  
end Behavioral;
```

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 7. Temporizador

- Código 5. Temporizador descrito en VHDL

```
-----  
-- Company:  
-- Engineer:Israel Valenzuela  
--  
-- Create Date:    17:54:03 12/15/2016  
-----  
  
library IEEE;  
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;  
  
entity Ask is  
generic(  
    contador1: integer := 4--funciono interno con 1230 para 300 baudios--f  
);  
port(  
    clk,rst,Vin:in std_logic;  
    Vo:out std_logic);  
end Ask;  
  
architecture Behavioral of Ask is  
-- declarando las señales relaciondas al conteo  
    signal c1 : integer:=0;  
--declarando la señales relacionadas a los puertos  
    signal v : std_logic;  
begin  
uno:process(rst,clk,Vin,c1,v)  
begin  
    if (rst='0') then  
        c1<=0;  
        Vo<='0';  
        v<='1';  
    elsif rising_edge(clk) then  
        if (Vin='0') then  
            if (c1=contador1-1) or (c1 > contador1-1) then  
                v <= '0';  
            else  
                v <='1';  
                c1<= c1 + 1;  
            end if;  
        elsif (Vin='1') then  
            v<='1';  
            c1<=0;  
        end if;  
    end if;  
    Vo<=v;  
end process uno;  
end Behavioral;
```

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 8. FSM

- Código 6. FSM realizada en VHDL

```
-----  
-- Company:  
-- Engineer: Israel Valenzuela  
--  
-- Create Date: 18:52:01 11/16/2016  
-----  
  
library IEEE;  
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;  
  
entity VM_VCO is  
generic(  
    contador1: integer := 2;--2500 funciona para 300 baudios  
    contador2: integer := 11950000  
    --150 para 10kb, 16 para 93750b, 10 para 150000b  
);  
port(  
    clk:in std_logic;  
    Vin, En : in std_logic;  
    Vo : out std_logic);  
end VM_VCO;  
  
architecture Behavioral of VM_VCO is  
    signal c1 : integer:=0;  
    signal c2 : integer:=0;  
    signal v : std_logic;  
  
begin  
    uno:process(En,clk,Vin,c1,c2,v)  
    begin  
        if (En='0') then  
            c1<=0;  
            c2<=0;  
            Vo<='0';  
            v<='0';  
        elsif rising_edge(clk) then  
            if (Vin='1') then  
                if (c1=contador1-1) then  
                    c1 <=0;  
                    v <= not v;  
                else  
                    c1<= c1 + 1;  
                end if;  
            elsif (Vin='0') then  
                v <= '0';  
            end if;  
        end if;  
        Vo<=v;  
    end process uno;  
end Behavioral;
```

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 9. TOP

- Código 7. TOP

```
-----  
-- Company:  
-- Engineer: Israel Valenzuela  
--  
-- Create Date:    19:33:21 12/26/2016  
-----  
  
library IEEE;  
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;  
  
entity TOP is  
port(  
    clk,rst,Vi,Vid: in std_logic ;  
    Vfi,Vfi2,Vom,Vo: out std_logic  
);  
end TOP;  
  
architecture Behavioral of TOP is  
    signal ac1: std_logic;  
    signal ac2: std_logic;  
    signal ca1: std_logic;  
    signal ca2: std_logic;  
    signal ca3: std_logic;  
    signal ca4: std_logic;  
    signal g:std_logic:='1';  
    signal ca5: std_logic;  
    signal sal : std_logic;  
    --Declarando las señales para el flujo VCO-->FSK  
    --signal vf: std_logic;  
    COMPONENT divider  
        PORT (  
            clk : IN std_logic;  
            rst : IN std_logic;  
            Vo  : OUT std_logic;  
            Vo2 : OUT std_logic  
        );  
    END COMPONENT;  
  
    COMPONENT Ask  
        PORT(  
            clk : IN std_logic;  
            rst : IN std_logic;  
  
            Vin : IN std_logic;  
            Vo  : OUT std_logic  
        );  
    END COMPONENT;  
  
    COMPONENT FSM_mod  
        PORT(  
            clk : IN std_logic;  
            rst : IN std_logic;  
            rst2: IN std_logic;  
            rst3: IN std_logic;  
            Vin : IN std_logic;  
            o1  : OUT std_logic;  
            o2  : OUT std_logic;  
            o3  : OUT std_logic;  
            o4  : OUT std_logic;  
            o5  : OUT std_logic;  
            sal: OUT std_logic;  
            Vo  : OUT std_logic  
        );  
end;
```

## Continuación del apéndice 9.

```
END COMPONENT;

COMPONENT VM_VCO
PORT (
  clk : IN std_logic;
  Vin : IN std_logic;
  En : IN std_logic;
  Vo : OUT std_logic
);
END COMPONENT;

begin

Inst_divider: divider PORT MAP (
  clk => clk,
  rst => ca5,
  Vo => Vfi,
  Vo2 => Vfi2
);

Inst_Ask: Ask PORT MAP (
  clk => clk,
  rst => ca1,

  Vin => ca3,
  Vo => ac1
);

Inst_Ask2: Ask PORT MAP (
  clk => clk,
  rst => ca2,

  Vin => ca4,
  Vo => ac2
);

Inst_FSM_mod: FSM_mod PORT MAP (
  clk => clk,
  rst => rst,
  rst2=> ac1,
  rst3=> ac2,
  Vin => Vid,
  o1 => ca1,
  o2 => ca2,
  o3 => ca3,
  o4 => ca4,
  o5 => ca5,
  sal => sal,
  Vo => Vo
);

Inst_VM_VCO: VM_VCO PORT MAP (
  clk => clk,
  Vin => Vi,
  En => rst,
  Vo => Vom
);
end Behavioral;
```

Fuente: elaboración propia.





# ANEXOS

## Anexo 1. Hoja de datos de IRFZ44N

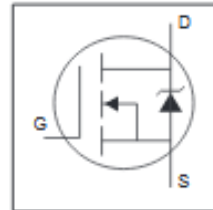
International  
IR Rectifier

PD - 94053

# IRFZ44N

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated

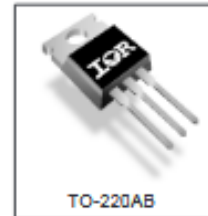


$V_{DS} = 55V$   
 $R_{DS(on)} = 17.5m\Omega$   
 $I_D = 49A$

### Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



### Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D$ @ $T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} = 10V$	49	A
$I_D$ @ $T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} = 10V$	35	
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current	160	
$P_D$ @ $T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	94	W
	Linear Derating Factor	0.63	W/°C
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V
$I_{AR}$	Avalanche Current	25	A
$E_{ASR}$	Repetitive Avalanche Energy	9.4	mJ
$dv/dt$	Peak Diode Recovery $dv/dt$	5.0	V/ns
$T_J$	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	°C
$T_{STG}$	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lb*in (1.1N*m)	

### Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.5	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

www.irf.com


1

Continuación del anexo 1.

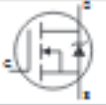
# IRFZ44N

International  
IGR Rectifier

## Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	---	---	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	---	0.058	---	V/°C	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	---	---	17.5	m $\Omega$	$V_{GS} = 10V, I_D = 25A$ ①
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	---	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
$g_{fs}$	Forward Transconductance	19	---	---	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 25A$ ②
$I_{DSS}$	Drain-to-Source Leakage Current	---	---	25	$\mu A$	$V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$
		---	---	250		$V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
$I_{GSS}$	Gate-to-Source Forward Leakage	---	---	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	---	---	-100		$V_{GS} = -20V$
$Q_g$	Total Gate Charge	---	---	63	nC	$I_D = 25A$
$Q_{gs}$	Gate-to-Source Charge	---	---	14		$V_{DS} = 44V$
$Q_{gd}$	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	---	---	23		$V_{GS} = 10V$ , See Fig. 6 and 13
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	---	12	---	ns	$V_{DD} = 28V$ $I_D = 25A$ $R_G = 12\Omega$ $V_{GS} = 10V$ , See Fig. 10 ③
$t_r$	Rise Time	---	60	---		
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	---	44	---		
$t_f$	Fall Time	---	45	---		
$L_D$	Internal Drain Inductance	---	4.5	---	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact 
$L_S$	Internal Source Inductance	---	7.5	---		
$C_{iss}$	Input Capacitance	---	1470	---	pF	$V_{DS} = 0V$ $V_{GS} = 25V$ $f = 1.0\text{MHz}$ , See Fig. 5
$C_{oss}$	Output Capacitance	---	360	---		
$C_{rss}$	Reverse Transfer Capacitance	---	88	---		
$E_{AS}$	Single Pulse Avalanche Energy ④	---	530 ⑤	150 ⑥	mJ	$I_{AS} = 25A, L = 0.47\text{mH}$

## Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$I_S$	Continuous Source Current (Body Diode)	---	---	49	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
$I_{SM}$	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	---	---	160		
$V_{SD}$	Diode Forward Voltage	---	---	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 25A, V_{GS} = 0V$ ②
$t_{rr}$	Reverse Recovery Time	---	63	95	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 25A$
$Q_{rr}$	Reverse Recovery Charge	---	170	260	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ③
$t_{on}$	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S + L_D$ )				

### Notes:

① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)

② Starting  $T_J = 25^\circ\text{C}$ ,  $L = 0.48\text{mH}$   
 $R_G = 25\Omega, I_{AS} = 25A$ . (See Figure 12)

③  $I_{SD} \leq 25A, di/dt \leq 230A/\mu s, V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$ ,  
 $T_J \leq 175^\circ\text{C}$

④ Pulse width  $\leq 400\mu s$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .

⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.

⑥ This is a calculated value limited to  $T_J = 175^\circ\text{C}$ .

Continuación del anexo 1.

International  
IR Rectifier

IRFZ44N

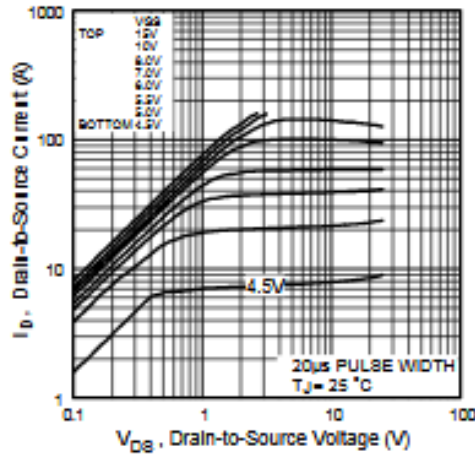


Fig 1. Typical Output Characteristics

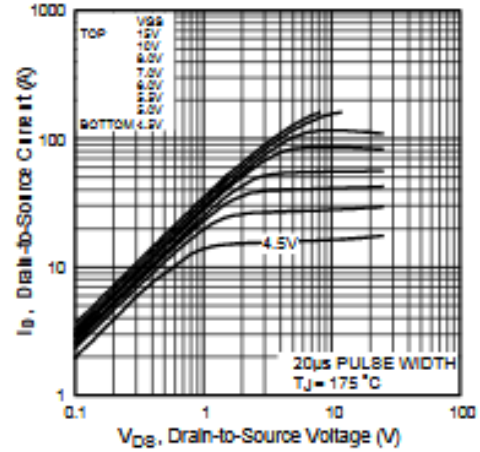


Fig 2. Typical Output Characteristics

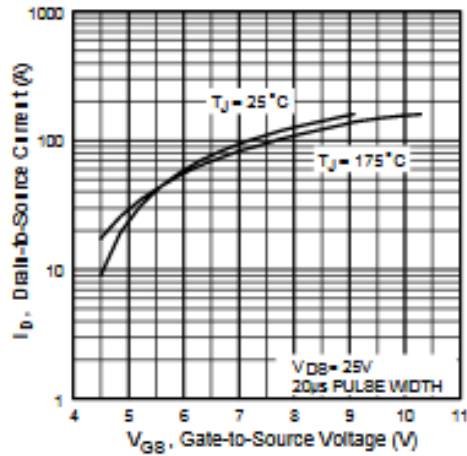


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

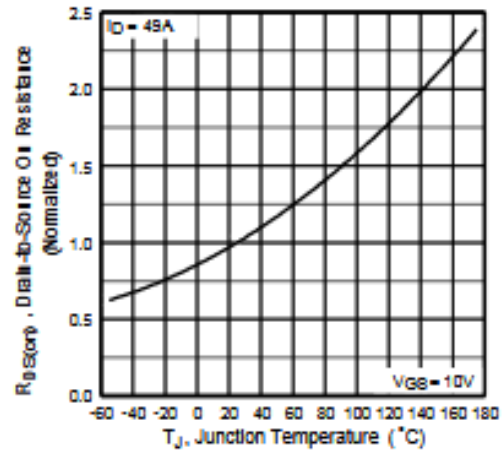


Fig 4. Normalized On-Resistance  
Vs. Temperature

Fuente: *International Rectifier*. IRFZ44N Datasheet. <https://www.infineon.com/dgdl/irfz44n.pdf?fileId=5546d462533600a40153563b3575220b>. Consulta: 26 de octubre de 2016.

Anexo 2. Hoja de datos PT334



5mm Phototransistor T-1 3/4  
PT334-6C



**Features**

- Fast response time
- High photo sensitivity
- Pb free
- The product itself will remain within RoHS compliant version.

**Description**

- PT334-6C is a high speed and high sensitive silicon NPN epitaxial planar phototransistor in a standard S(φ) package. Due to its water clear epoxy the device is sensitive to visible and near infrared radiation.

**Applications**

- Infrared applied system
- Floppy disk drive
- Camera

Continuación del anexo 2.

**DATASHEET**  
5mm Phototransistor T-1 3/4  
PT334-6C **EVERLIGHT**

**Device Selection Guide**

Chip Materials	Lens Color
Silicon	Water clear

**Absolute Maximum Ratings (Ta=25°C)**

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Collector-Emitter Voltage	$V_{CEO}$	30	V
Emitter-Collector Voltage	$V_{EC}$	5	V
Collector Current	$I_C$	20	mA
Operating Temperature	$T_{OP}$	-25~+85	°C
Storage Temperature	$T_{STG}$	-40~+100	°C
Lead Soldering Temperature	$T_{SOL}$	260	°C
Power Dissipation at (or below) 25°C Free Air Temperature	$P_C$	75	mW

Note: \*1: Soldering time  $\leq 5$  seconds.

**DATASHEET**  
5mm Phototransistor T-1 3/4  
PT334-6C **EVERLIGHT**

**Electro-Optical Characteristics (Ta=25°C)**

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Condition
Range Of Spectral Bandwidth	$\lambda_{0.5}$	400	—	1100	nm	—
Wavelength Of Peak Sensitivity	$\lambda_p$	—	940	—	nm	—
Collector - Emitter Breakdown Voltage	$BV_{CEO}$	30	—	—	V	$I_C=100 \mu A$ $E_e=0mW/cm^2$
Emitter-Collector Breakdown Voltage	$BV_{ECO}$	5	—	—	V	$I_C=100 \mu A$ $E_e=0mW/cm^2$
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	—	—	0.4	V	$I_C=2mA$ $E_e=1mW/cm^2$
Rise Time	$t_r$	—	15	—	$\mu s$	$V_{CE}=5V$ $I_C=1mA$ $R_L=1000 \Omega$
Fall Time	$t_f$	—	15	—		
Collector Dark Current	$I_{C(DK)}$	—	—	100	nA	$E_e=0mW/cm^2$ $V_{CE}=20V$
On State Collector Current	$I_{C(ON)}$	1.77	3.5	—	mA	$E_e=1mW/cm^2$ $V_{CE}=5V$

Fuente: EVERLIGHT. PT334 Datasheet. <http://www.everlight.com/file/productfile/pt334-6c.pdf>.

Consulta: 28 de octubre de 2016.

## Anexo 3. Hoja de datos OPA2350



OPA350, OPA2350, OPA4350

SBOS099D – SEPTEMBER 2000 – REVISED DECEMBER 2015

### OPAx350 High-Speed, Single-Supply, Rail-to-Rail Operational Amplifiers MicroAmplifier Series

#### 6 Specifications

##### 6.1 Absolute Maximum Ratings

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted) <sup>(1)</sup>

		MIN	MAX	UNIT
Supply voltage			7	V
Signal input terminals <sup>(2)</sup>	Voltage	(V-) - 0.3	(V+) + 0.3	V
	Current		10	mA
Open short circuit current <sup>(3)</sup>		Continuous		
Operating temperature		-55	150	°C
Lead temperature (soldering, 10 s)			300	°C
Junction temperature			150	°C
T <sub>stg</sub>	Storage temperature	-55	150	°C

(1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, which do not imply functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions*. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

(2) Input terminals are diode-clamped to the power-supply rails. Input signals that can swing more than 0.3 V beyond the supply rails should be current-limited to 10 mA or less.

(3) Short-circuit to ground, one amplifier per package.

##### 6.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

	MIN	NOM	MAX	UNIT
Power supply voltage, (V+)-(V-)	2.7 (±1.35)	5 (±2.5)	5.5 (±2.75)	V
Specified temperature	-40	25	85	°C
Operating temperature	-55	25	150	°C

Fuente: Texas Instruments. OPA360, OPA2350, Opa4350 Datasheet.

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa2350.pdf>. Consulta: 17 de octubre de 2016.

## Anexo 4. Hoja de datos TL074



TL071, TL071A, TL071B  
 TL072, TL072A, TL072B, TL074, TL074A, TL074B  
 SLOS080M – SEPTEMBER 1978 – REVISED JUNE 2015

### TL07xx Low-Noise JFET-Input Operational Amplifiers

#### 6.1 Absolute Maximum Ratings

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted) <sup>(1)</sup>

		MIN	MAX	UNIT
$V_{CC+} - V_{CC-}$	Supply voltage <sup>(2)</sup>	-18	18	V
$V_{ID}$	Differential input voltage <sup>(3)</sup>	-30	30	V
$V_I$	Input voltage <sup>(2)(4)</sup>	-15	15	V
	Duration of output short circuit <sup>(5)</sup>	Unlimited		
$T_J$	Operating Virtual Junction Temperature		150	°C
	Case temperature for 60 seconds - FK package		260	°C
	Lead temperature 1.8 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds		300	°C
$T_{stg}$	Storage temperature	-65	150	°C

(1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions* is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

(2) All voltage values, except differential voltages, are with respect to the midpoint between  $V_{CC+}$  and  $V_{CC-}$ .

(3) Differential voltages are at  $IN+$ , with respect to  $IN-$ .

(4) The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 V, whichever is less.

(5) The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure that the dissipation rating is not exceeded.

#### 6.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		MIN	MAX	UNIT	
$V_{CC+}$	Supply voltage	5	15	V	
$V_{CC-}$	Supply voltage	-5	-15	V	
$V_{CM}$	Common-mode voltage	$V_{CC-} + 4$	$V_{CC+} - 4$	V	
$T_A$	Operating free-air temperature	TL07xM	-55	125	°C
		TL08xQ	-40	125	
		TL07xl	-40	85	
		TL07xA, TL07xB, TL07xC	0	70	

Fuente: Texas Instruments. TL074 Datasheet. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl074.pdf>.

Consulta: 17 de octubre de 2016.

