

Universidad Autónoma de Baja California

FACULTAD DE INGENIERÍA



*“Controladores de voltaje y su aplicación en el ahorro de energía eléctrica a través de la regulación inteligente de la intensidad de luminarias.”*

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PRESENTA

Lizbeth Angelica Cordova Aguirre

DIRECTOR

Dra. Wendy Flores Fuentes

CODIRECTOR

Dr. Julio C. Rodríguez Quiñonez

Mexicali, B.C. a 18 de Febrero de 2022

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi universidad, la Universidad Autónoma de Baja California, por la formación académica que he recibido durante el transcurso de mi licenciatura.

Al programa educativo Ingeniero en electrónica, sobre todo a los profesores que lo conforman, por los conocimientos que me han dado a lo largo de estos años de carrera y en especial, por la oportunidad de practicar y mejorar constantemente los conocimientos de mi carrera en Ingeniería electrónica.

A mis amigos y compañeros, por hacer que la universidad sea aún mejor y por los momentos dentro del salón de clases y fuera de él.

Al Dr. Abraham Arias por sus consejos y enseñanzas y al Dr. Julio Cesar Rodríguez, co-director de la presente tesis, por sus comentarios y críticas constructivas para poder mejorarla.

Especialmente, quiero agradecer a la directora de mi tesis, la Dra. Wendy Flores Fuentes, por su paciencia, atención, por su constante apoyo y por guiarme en cada paso de este trabajo, gracias por la oportunidad.

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar este trabajo a mi familia, a mi papá por darme su apoyo para que estudie, a Diego que hace que los días sean más entretenidos, a Javi por ayudarme cuando lo necesito, y en especial a mi mamá, que siempre ha estado conmigo, cuidándome y apoyándome en cada paso que doy. Les agradezco todo.

## **RESUMEN**

Los controladores de voltaje permiten la entrega de potencia regulada a una carga. La regulación es posible a través del control del ángulo de disparo de dispositivos de potencia operando en modo de conmutación, así como de las distintas configuraciones de onda completa, media onda, o dual. La iluminación inteligente, consiste en luminarias con capacidades adaptativas a la iluminación ambiental variante, para el ahorro de energía eléctrica y la disminución del impacto ambiental. El objetivo de este trabajo de tesis es el desarrollo de un sistema lumínico adaptativo a la iluminación ambiental, y la medición de su impacto en términos de ahorro en el consumo de potencia eléctrica. Se realizó el sensado de la iluminación ambiental para controlar el ángulo de disparo de un regulador de voltaje alterna para mantener una iluminación constante en un escenario con iluminación ambiental variante.

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>I</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>II</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>III</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
<b>2. PROPÓSITO DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>3</b>
2.1. Planteamiento del problema . . . . .	3
2.2. Justificación . . . . .	4
2.3. Hipótesis . . . . .	4
2.4. Objetivos de la investigación . . . . .	4
2.4.1. Objetivo general . . . . .	4
2.4.2. Objetivos específicos . . . . .	4
<b>3. INVESTIGACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE</b>	<b>6</b>
<b>4. FUNDAMENTOS</b>	<b>8</b>
4.1. Conceptos de electrónica de potencia . . . . .	8
4.1.1. Sistemas electrónicos de potencia . . . . .	9
4.1.2. Convertidores de potencia . . . . .	12
4.1.3. Dispositivos electrónicos de potencia . . . . .	17
4.1.4. Conmutación . . . . .	19
4.2. Cálculos de potencia . . . . .	20
4.2.1. Parámetros de una señal de corriente alterna . . . . .	20
4.2.2. Potencia instantánea . . . . .	21
4.2.3. Trabajo . . . . .	21
4.2.4. Potencia media . . . . .	22
4.2.5. Valor eficaz . . . . .	22
4.2.6. Potencia aparente y factor de potencia . . . . .	22
4.2.7. Cálculos de potencia en circuitos de corriente alterna . . . . .	23
4.3. Controladores de voltaje alterno . . . . .	25
4.3.1. Características, modelo y operación del tiristor . . . . .	25
4.3.2. Control de disparo del tiristor . . . . .	27

4.3.3.	Principio de control de abrir y cerrar . . . . .	28
4.3.4.	Principio de control de fase . . . . .	30
4.3.5.	Controlador unidireccional . . . . .	31
4.3.6.	Controlador bidireccional . . . . .	32
4.4.	Optoelectrónica . . . . .	35
4.4.1.	Fotosensores . . . . .	35
4.4.2.	Fototransistor . . . . .	37
4.4.3.	Fotodiodo . . . . .	38
4.4.4.	Resistencia dependiente de la luz (LDR) . . . . .	40
4.4.5.	Acondicionamiento de señal óptica . . . . .	41
<b>5.</b>	<b>METODOLOGÍA Y RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN</b>	<b>43</b>
5.1.	Diseño del controlador de voltaje . . . . .	43
5.1.1.	Evaluación del circuito de control de fase unidireccional . . . . .	43
5.1.2.	Evaluación del circuito de control de fase bidireccional . . . . .	48
5.2.	Caracterización de los sensores ópticos . . . . .	53
5.2.1.	Experimentación con LDR's . . . . .	53
5.2.2.	Cálculo del ángulo de disparo del controlador de voltaje en respuesta a la luz ambiental, con LDR's . . . . .	55
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>64</b>
	REFERENCIAS . . . . .	67

# Índice de Figuras

4.1. Diagrama de bloques de un sistema de potencia. . . . .	10
4.2. Circuito rectificador de media onda con carga resistiva. . . . .	10
4.3. Voltaje afectado por el diodo rectificador. . . . .	11
4.4. Diagrama rectificador de onda completa. . . . .	11
4.5. Voltaje afectado por el rectificador de onda completa. . . . .	12
4.6. Voltaje afectado por el controlador de fase a un ángulo de $\pi/4$ . . . . .	14
4.7. Rectificador de media onda controlado. . . . .	15
4.8. Puente de Graetz. . . . .	15
4.9. Dispositivos electrónicos no controlados y sus símbolos. . . . .	18
4.10. Dispositivos electrónicos controlados y sus símbolos. . . . .	19
4.11. Simulación de una señal de corriente alterna . . . . .	21
4.12. Tiristor y su representación . . . . .	25
4.13. Circuito demostrativo de la aplicación del tiristor. . . . .	26
4.14. Representación y características de fabricación del tiristor. . . . .	26
4.15. Curva característica del tiristor. . . . .	27
4.16. Control de abrir y cerrar en el Tiristor. . . . .	29
4.17. Circuito controlado por fase. . . . .	30
4.18. Controlador monofásico de media onda. . . . .	31
4.19. Controlador monofásico de onda completa con carga resistiva. . . . .	33
4.20. Controlador monofásico de onda completa con carga RL . . . . .	34
4.21. Fotosensor de modelo reflectivo. . . . .	36
4.22. Fotosensor de modelo barrera. . . . .	36
4.23. Fotosensor de modelo retro reflectivo. . . . .	37
4.24. Símbolo del fototransistor. . . . .	37
4.25. Fototransistor de dos y tres terminales. . . . .	38
4.26. Símbolo del fotodiodo. . . . .	39
4.27. Fotodiodo PIN. . . . .	39
4.28. Fotodiodo APD. . . . .	40
4.29. Símbolo de LDR. . . . .	40
4.30. Resistencia dependiente de la luz (LDR). . . . .	41
4.31. Amplificador de transimpedancia. . . . .	42
5.1. Ecuaciones de control unidireccional realizadas en Matlab. . . . .	44
5.2. Ejemplo de los cálculos realizados en Matlab con ángulo de disparo alfa de 90 grados, voltaje de alimentación de 120 Vrms y resistencia de carga de 240 ohms. . . . .	46

5.3. Simulación de un rectificador controlado de media onda con alfa de 90 grados, voltaje de 120 Vrms y un foco equivalente a 240 ohms. . . . .	47
5.4. Simulación de un rectificador controlado de media onda con diodo de protección, con alfa de 90 grados, voltaje de 120 Vrms y un foco equivalente a 240 ohms. . . . .	48
5.5. Ecuaciones de control bidireccional programadas en Matlab. . . . .	48
5.6. Ejemplo de los cálculos realizados en Matlab con ángulo de disparo alfa de 90 grados, voltaje de alimentación de 120 Vrms y resistencia de carga de 240 ohms. . . . .	51
5.7. Simulación de un rectificador controlado de onda completa con alfa de 90 grados, voltaje de 120 Vrms y un foco equivalente a 240 ohms. . . . .	52
5.8. Simulación de un rectificador controlado de onda completa con alfa de 90 grados, voltaje de 120 Vrms y un foco equivalente a 240 ohms. . . . .	53
5.9. Imagen de las 4 LDR'S colocadas a una distancia de .5 metros del foco alimentado por el tiristor. . . . .	54
5.10. Linealidad del comportamiento de las LDR's . . . . .	55
5.11. Diagrama de conexión del circuito. . . . .	57
5.12. Código utilizado en la experimentación. . . . .	58
5.13. Circuito experimental con luz aplicada en las LDR. . . . .	59
5.14. Circuito experimental con luz exterior en la habitación. . . . .	60
5.15. Circuito experimental en condiciones normales. . . . .	61
5.16. Circuito experimental con un objeto pequeño. . . . .	62
5.17. Circuito experimental con un objeto grande. . . . .	63

# Índice de Tablas

4.1. Cronología de acontecimientos en el desarrollo de la Electrónica de Potencia. . . . .	9
4.2. Tipos de reguladores de conmutación. . . . .	16
4.3. Rango de longitud de onda según el material del fototransistor. . . . .	38
4.4. Rango de longitud de onda según el material del fotodiodo. . . . .	39
5.1. Resultados de la caracterización del circuito con ángulo de disparo que varía desde 5 hasta 180 grados. . . . .	45
5.2. Resultados de la caracterización del circuito de control bidireccional con ángulo de disparo que varía desde 5 hasta 180 grados. . . . .	50
5.3. Promedio de las LDR's y su potencia al variar el ángulo de disparo. . . . .	54
5.4. Cálculo de la potencia requerida para completar 60 Watts y el ángulo de disparo que corresponde a esa potencia. . . . .	56

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Introducción

Factores como el capital social, conocimiento y avance tecnológico son los que influyen en el comienzo de un centro urbano, pues contribuyen al ahorro de tiempo y energía.

Una ciudad inteligente posee capital humano, infraestructura de comunicaciones tradicional y moderna y su proceso se basa en el desarrollo sostenible, se busca que la ciudad funcione a largo plazo y se garantice mejor calidad de vida [1].

La implementación de programas que reducen los recursos energéticos y que representan un ahorro en el costo de funcionamiento de las ciudades es un fenómeno que ha estado tomando importancia en la Unión Europea en los últimos años. Desde el enfoque europeo, una ciudad inteligente es la que actúa para reducir las emisiones de dióxido de carbono y su objetivo radica en aprovechar la energía, todas estas acciones realizadas para mejorar las condiciones de vida de los habitantes.

Entre los criterios que debe cumplir una ciudad inteligente están los altos niveles de rentabilidad y competitividad, se requiere un aprendizaje continuo, cultura de innovación y cooperación, y capacidad de atraer y mantener grandes empresas.

Para que una ciudad se considere como inteligente debe tener los siguientes elementos: 1. Economía: debe destacar su alta productividad, soluciones innovadoras y adaptación con las condiciones variantes que se presentan, 2. Transporte y comunicación: Red de conexiones de alta velocidad que une los recursos de la ciudad, 3. Medio ambiente: optimizar el consumo de energía, optando por el desarrollo sostenible, 4. Personas: sociedad que aprende e inicia con acciones para cuidar recursos, 5. Calidad de vida: un entorno con amplio acceso a servicios públicos, cuidado de medio ambiente y mucha seguridad, 6. Gestión y administración inteligente: administración pública inteligente capaz de crear conocimientos y utilizarlos [1].

El uso de la tecnología optimiza los procesos de gestión, los hace más inteligentes y reduce costos. Un sistema de iluminación inteligente es un sistema que está conformado por elementos como sensores, luminarias eficientes, chips con GPS, cámaras, entre otros. Estos sistemas se

controlan y manejan por medio de Software que es parte de una base de datos [2].

Utilizar sistemas inteligentes no solo supone una reducción de costos para la población, también representa un aumento en la seguridad, conservación del medio ambiente y debido a los mecanismos que toman acciones correctivas al detectar luces prendidas innecesariamente, se produce una disminución del consumo de energía.

Los sistemas inteligentes se están aplicando en varios centros urbanos alrededor del mundo y aunque el costo de implementar este sistema es elevado, se ha demostrado que con el ahorro que producen, los gastos se compensan a mediano y largo plazo. Las calles más iluminadas provocan una mayor ocupación por parte de los ciudadanos, lo que a su vez causa un impulso en las actividades económicas locales.

Para demostrar los beneficios de implementar un sistema de este tipo, se puede mencionar el caso de San Diego (EU) y Bélem (Brasil). En San Diego se realizó un sistema inteligente de alumbrado público que consistía en la sustitución de lámparas de alumbrado urbano, también la conexión de dispositivos integrados como sensores, cámaras, entre otros elementos, y un software para su gestión. El sistema cuenta con sensores que miden la temperatura ambiente, calidad de aire, velocidad del viento, entre otros datos.

En el año 2015, en Belem, se instalaron luminarias LED en tres grandes carreteras, dando como resultado mayor luminosidad y una reducción del 50 % del consumo eléctrico anterior [3].

Mencionando más de lo que se puede lograr al implementar sistemas de iluminación inteligente, se puede aludir a la capacidad del alumbrado público de encender y apagar las lámparas de postes de acuerdo al paso de peatones o a la variación de luz ambiental.

La regulación es posible a través del control del ángulo de disparo de dispositivos de potencia operando en modo de conmutación, así como de las distintas configuraciones de onda completa, media onda, o dual. La iluminación inteligente, consiste en luminarias con capacidades adaptativas a la iluminación ambiental variante, a través del sensado de la iluminación ambiental para el ahorro de energía eléctrica y la disminución del impacto ambiental.

Los controladores de voltaje permiten la regulación del voltaje en una carga, dicha regulación se controla con la variación del ángulo de disparo. Como objetivo de la experimentación e investigación realizada, se busca lograr el desarrollo de un sistema luminario adaptable a la iluminación ambiental.

# CAPÍTULO 2

## PROPÓSITO DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.1. Planteamiento del problema

El derroche de energía luminiscente ya sea proveniente de luminarias en ambientes externos o en ambientes internos contribuye al desperdicio energético. La generación y distribución de la energía eléctrica requiere de una grande, compleja y costosa infraestructura, que parte desde la central eléctrica, las líneas de alta tensión, transformadores, baterías, convertidores, hasta el recurso humano involucrado en toda la logística de producción y distribución de dicha energía eléctrica. El mal uso de la energía eléctrica impacta al medio ambiente. Aunque avanzamos hacia un futuro de energía limpia, actualmente el abastecimiento de la mayoría de las luminarias proviene de fuentes que producen emisiones de carbono, lo cual contribuye a la contaminación ambiental y al calentamiento global.

Comúnmente, el impacto económico negativo de una incorrecta iluminación es infravalorado a nivel residencial, mientras que a nivel corporativo, industrial y municipal (desde el enfoque del gobierno), se empieza considerar. Se busca la generación, almacenamiento y consumo de energías limpias, se reemplazan lámparas de alto consumo de potencia por las de bajo consumo de potencia, se instalan tragaluces y se toman medidas drásticas que involucran calendarios y horarios de encendido y apagado de las luminarias.

Dichas medidas relacionadas con la generación y uso de energía limpia aportan a la disminución de emisiones de carbono y por lo tanto a la contaminación ambiental y al calentamiento global. Sin embargo, no garantizan la eliminación del derroche de energía eléctrica, ni el uso inteligente de las luminarias. Por otra parte, el ahorro de energía a través de calendarios y horarios de encendido y apagado de las luminarias, puede resultar en una solución drástica, donde usuarios y procesos son sacrificados. Ejemplos de estos serían, las luces de las calles apagadas en cierto número de colonias, o el uso de tragaluces en la industria sin medidas adaptativas a los cambios de iluminación debido al cambio del clima durante el día, es decir, si las nubes obstruyen la iluminación. Mientras que en la mayoría de las residencias se opta por el uso de sistemas de sensado de la ausencia de un nivel específico de luz para el encendido pleno de las luminarias externas, y el encendido manual y permanente de las luminarias internas durante el horario diurno.

## **2.2. Justificación**

En la era actual, en la medida que la sociedad es más desarrollada consume más energía eléctrica. La dinámica del día a día, produce un efecto en los individuos de falta de atención acerca del uso irracional que se le da al consumo de dicho recurso, el consumo de energía eléctrica se ha vuelto parte de la cotidianidad de la vida moderna. Esta se consume en la mayoría de los casos de forma ineficiente, como es el caso del derroche de energía luminiscente. Esto sucede debido a que las luminarias utilizadas tanto en el exterior como en el interior son encendidas para proveer una cantidad definida de luminiscencia, equivalente a un consumo de potencia también predeterminado y de forma continua mientras permanezcan encendidas, sin evaluar la necesidad real e instantánea de iluminación de un área específica en un determinado momento, debido a ambientes con iluminación natural variable.

Es por esto, que motivados por el deseo de contribuir al uso eficiente de la energía eléctrica, que a través del desarrollo de la presente tesis de investigación se propuso el hacer uso de los conocimientos adquiridos durante los estudios de licenciatura en Ingeniería en Electrónica, así como de la tecnología existente y disponible para desarrollar un sistema de potencia, un controlador de voltaje y su aplicación en el ahorro de energía eléctrica a través de la regulación inteligente de la intensidad de luminarias.

## **2.3. Hipótesis**

Es posible diseñar, modelar, simular, y construir un prototipo experimental para el ahorro de energía eléctrica a través del control del ángulo de disparo de dispositivos de potencia operando en modo de conmutación, así como de las distintas configuraciones de onda completa, media onda, o dual, además del sensado de la iluminación ambiental, para la regulación inteligente de la intensidad en luminarias.

## **2.4. Objetivos de la investigación**

### **2.4.1. Objetivo general**

El objetivo de la presente tesis de investigación es el desarrollo de un prototipo experimental para el ahorro de energía eléctrica a través de la regulación inteligente de la intensidad de luminarias.

### **2.4.2. Objetivos específicos**

Los objetivos específicos de la presente tesis de investigación son los siguientes:

- Realizar un estudio de los controladores de voltaje, para identificar sus principales configuraciones, así como su principio de operación y aplicación para el desarrollo del objetivo de la presente tesis de investigación.

- Investigar el estado del arte y temas relacionados con la propuesta presentada, a fin de conocer las novedades científicas y tecnológicas relacionadas con el uso de los controladores de voltaje, y la forma de regular de manera inteligente la intensidad de luminarias.
- Diseñar, modelar, simular, y construir un prototipo experimental para el ahorro de energía eléctrica a través de la regulación inteligente de la intensidad de luminarias.
- Escritura y defensa de la presente tesis de investigación.

# CAPÍTULO 3

## INVESTIGACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

El ahorro de energía eléctrica a través de la regulación inteligente de la intensidad de luminarias surge del requerimiento de un esquema de gestión de energía apropiado para un funcionamiento confiable y sostenible de cada uno de los dispositivos y sistemas que forman parte de la vida moderna.

Los controladores de voltaje juegan un papel muy importante en la gestión de la energía eléctrica, son dispositivos indispensables para despachar determinados niveles de voltaje de manera sostenible incluso ante variaciones de cargas, y de la misma manera para proveer de voltajes fluctuantes en la adaptación del funcionamiento de los dispositivos que alimentan ante circunstancias y condiciones de operación variantes.

El desarrollo de controladores de voltaje se encuentra en el estado del arte, tanto en todos aquellos temas relacionados con la integración de las fuentes de energía renovable y las distintas cargas a las redes de distribución de energía, como en la integración y adaptación de dispositivos y sistemas que consumen energía eléctrica en las ciudades inteligentes [4].

Un enfoque de las ciudades inteligentes se basa en el estudio del confort y el consumo de energía eléctrica de los ocupantes de interiores, se busca la optimización y automatización por medio del control de las variables que influyen en el ambiente [5].

En [6] se realiza un análisis del impacto del control automático de escenarios en el confort y el consumo de energía eléctrica. Se observa que el clima produce variaciones no lineales en la iluminación de interiores debido a cambios en la radiación solar y en la cobertura del cielo por las nubes, debido a esto, acoplar los controles de iluminación eléctrica con la disponibilidad de luz natural es un método esencial para reducir la demanda de energía eléctrica automáticamente cuando hay suficiente luz natural.

En la literatura se encuentran varios estudios donde se proponen diversos esquemas de control para la iluminación de interiores en el que se mide la iluminación exterior e interior para retroalimentar al sistema de control y enviar instrucciones al sistema automático de persianas para abrirlas o cerrarlas conforme se requiera [7]. Sin embargo, este enfoque no es suficiente, ya

que no tiene la suficiente resolución para regular la iluminación en el interior al variar el acceso de la luz exterior, ni es útil cuando no se cuenta con suficiente luz natural.

En otro intento por reducir el consumo de energía eléctrica por la iluminación, la cual representa un 20 % de toda la energía utilizada en el mundo, mucho de los sistemas de iluminación de interiores recurren al uso de diodos emisores de luz para obtener a la mejor conocida como luz LED, aunque la idea central de las técnicas de aprovechamiento de la luz del día es ajustar los niveles de atenuación de los dispositivos de iluminación en función de los cambios en los niveles de luz del día y los puntos de ajuste del usuario para ahorrar energía [8].

La mayoría de los sistemas de luz que buscan el ahorro de energía eléctrica se basan en alguna de las siguientes estrategias:

- Detección de ocupación, en la que las luces se encienden y apagan o atenuado según la ocupación;
- Programación, en la que las luces se apagan de acuerdo con un calendario;
- Afinación, en el que se reduce la iluminación para satisfacer las necesidades actuales de los usuarios;
- Recolección de luz diurna (control de luz diurna), en la que la iluminación se atenúa o apaga en respuesta a la presencia de luz diurna;
- Respuesta a la demanda, en la que la iluminación se reduce en respuesta a las señales de restricción de servicios públicos o para reducir los picos de carga de energía en una instalación;
- Compensación adaptativa, en la que se bajan los niveles de luz durante la noche para aprovechar el hecho de que las personas necesitan y prefieren menos luz durante la noche que durante el día.

Estas estrategias se pueden lograr por medio de varios dispositivos de control, pero cualquier sistema de control de iluminación debe contener al menos tres componentes principales: (1) un controlador de voltaje, (2) un circuito lógico y (3) un dispositivo sensor.

El dispositivo sensor es capaz de medir o detectar un parámetro físico de interés (por ejemplo, nivel de iluminancia) y traducirlo en una señal eléctrica (resistencia, corriente o voltaje); el circuito lógico acepta esta señal eléctrica y, mediante un algoritmo específico, la convierte en una señal eléctrica adecuada para el controlador de voltaje; el controlador de voltaje actúa sobre la fuente de iluminación artificial para lograr el objetivo propuesto.

Estos sistemas pueden ser bastante sofisticados, y el equipo utilizado para lograr las funciones de control requeridas varía en complejidad. Es así como cada una de estas estrategias se puede aplicar individualmente con mucho beneficio, pero al combinarlas creativamente, se puede obtener un mayor beneficio [9].

# CAPÍTULO 4

## FUNDAMENTOS

### 4.1. Conceptos de electrónica de potencia

La electrónica es una parte esencial de la vida de todas las personas, es algo que esta intrínseco en nuestras vidas, pero no muchos saben cómo funciona, tan así que, si algún lector pueda pensar en computadoras, celulares, radios, televisores, entre otras cosas. Todo lo anterior mencionado se basan en la electrónica digital, pero también existe otra rama de la electrónica que es muy importante para que la digital funcione, esta se llama electrónica de potencia.

La electrónica de potencia combina varias áreas, en este caso podemos encontrar en esta la energía, la electrónica y el control. Este ultimo se encarga de controlar el sistema en lazo cerrado, en el caso de la energía se encarga de la distribución, transmisión y generación de energía eléctrica. Teniendo así, un área de la electrónica la cual tiene como fundamento la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia.

Por definición, Muhammad Rashid, dice que la electrónica de potencia es “La aplicación de la electrónica de estado solido para el control y conversión de energía eléctrica” [10].

Su historia se remonta a principio del año 1900, con la invención del diodo, el cual se le atribuye a sir John Ambrose Fleming, tiempo después se crearon diferentes dispositivos, como son los dispositivos de estado sólido, los cuales eran mucho mejores que las válvulas de vacío que se utilizaban en esos tiempos.

Tiempo después, se tuvo una revolución en la electrónica con la invención del transistor bipolar BJT y el SCR, los cuales fueron un avance importante ya que estos aportaban un sinfín de capacidades para diseño.

La compañía General Electric tenía un laboratorio, llamado Laboratorios Bell, los cuales fueron los que inventaron el SCR, y desde esta invención, se han creado bastantes dispositivos, de los cuales, gracias al SCR, pueden operar a una mayor potencia ver Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Cronología de acontecimientos en el desarrollo de la Electrónica de Potencia.

Fecha	Acontecimiento
1900	Rectificador de arco de Hg. Rectificador de tanque metálico. Rectificador de tubo de alto vacío de rejilla controlada. Ignitrón. Fanotrón. Tiratrón.
1948	Se inventa el transistor bipolar BJT.
1956	Se inventa el SCR.
1958	General Electric Comercializa el primer SCR
1970	Primeros transistores unipolares (FET) de potencia.

Gracias a la revolución electrónica, esta nos permitió tener las herramientas necesarias para poder crear instrumentos y equipos los cuales nos de la posibilidad de controlar energía de manera eficaz y optima.

#### 4.1.1. Sistemas electrónicos de potencia

Normalmente un sistema de potencia tiene características específicas, y es que estos siempre tienen una entrada de potencia, la cual dirige a un procesador de potencia, para después ser entregada a la carga a través de la salida de potencia, pero dentro de esta salida también tenemos un sistema de retroalimentación, el cual toma mediciones para poder mandarlos al controlador y se cierre la retroalimentación enviando la información al procesador de potencia. Todo lo anterior puede verse en la Figura 4.1, tomada de [11] donde se muestra el funcionamiento del sistema. Donde  $v_e$ , es el voltaje de entrada,  $i_e$ , es la corriente de entrada,  $v_o$ , es el voltaje de salida,  $i_o$ , es la corriente de salida.

Debido a este avance en la electrónica, en los últimos años se logró un crecimiento en el campo de la electrónica de potencia, se obtuvo un progreso considerable en la fabricación de estos sistemas, obteniéndose así, sistemas más efectivos y óptimos. Con esto, se puede entender porque los procesos de manufactura de semiconductores de potencia en masa se volvieron más económicos. Es importante recalcar que la electrónica de potencia se utiliza mucho en el transporte de energía generándose así la infraestructura necesaria para poder entregar esa energía, con la ventaja de no tener que gastar tantos recursos.

Dentro de los sistemas electrónicos de potencia podemos empezar con los más sencillos pero útiles, que son los rectificadores de media onda y de onda completa, estos rectificadores funcionan con el uso de un circuito que tiene diodos, ya que como veremos en los componentes electrónicos, los diodos tienen la característica de pasar corriente en una polaridad, y inversamente no conducen, por eso se utilizan para poder rectificar ondas senoidales.

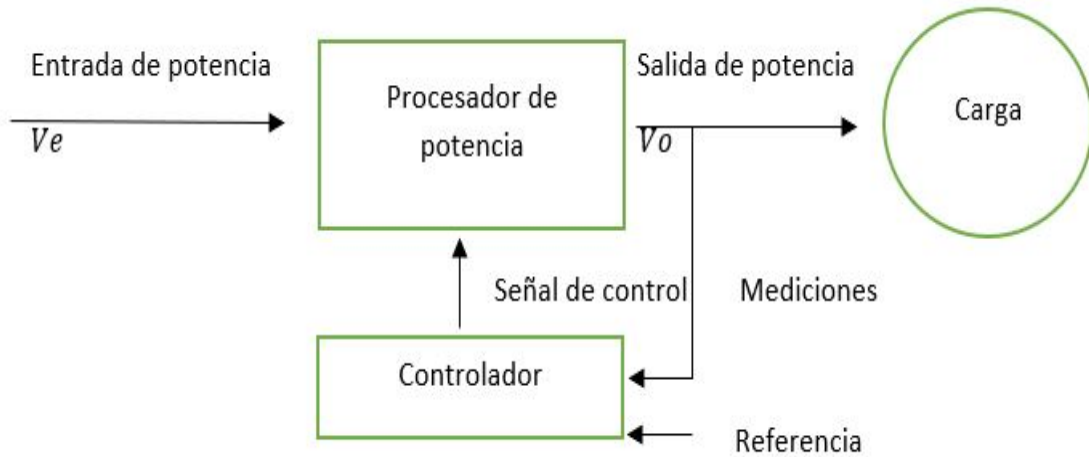


Figura 4.1: Diagrama de bloques de un sistema de potencia.

Teniendo en cuenta lo anterior, podemos ver en la Figura 4.2 un circuito el cual corresponde a un rectificador de media onda, solo que en este caso tenemos una resistencia para poder entender que este voltaje  $v_o$  se puede entregar hacia una carga, teniendo en cuenta que el voltaje de entrada  $v_e = V1$  es una corriente alterna, el objetivo de este circuito es crear un voltaje que llegue a la carga que no tenga componentes “negativos”, por eso es necesario el uso del diodo con su respectivo  $v_d$ .

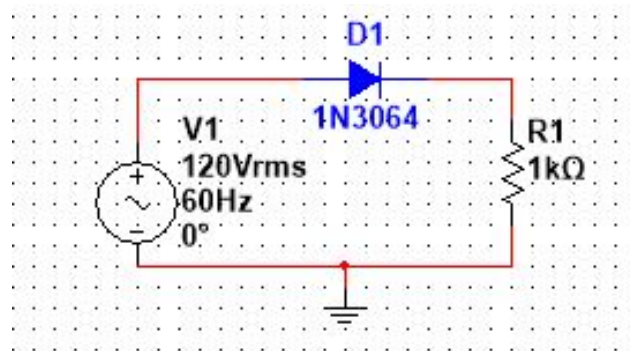


Figura 4.2: Circuito rectificador de media onda con carga resistiva.

Se observa que el voltaje de entrada es una senoidal, pero después, con el paso de este voltaje en el diodo, podemos ver (vease Figura 4.3) como solo se conserva la parte positiva de la senoidal.

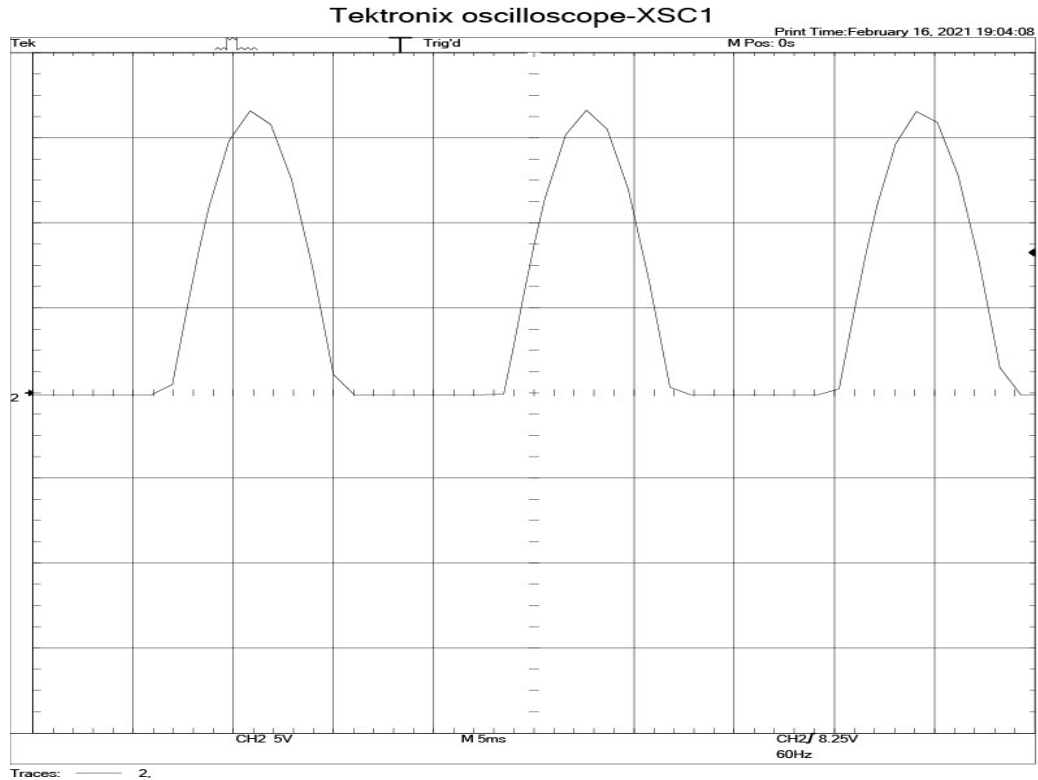


Figura 4.3: Voltaje afectado por el diodo rectificador.

Por otra parte, el rectificador de onda completa, aunque tiene el mismo propósito del rectificador de media onda, tiene diferentes ventajas, ya que busca crear un voltaje completamente positivo, y eso es uno de los fundamentos que se utiliza en los transformadores que existen, ya que muchas de las cosas que se utilizan necesitan corriente directa, y con este rectificador se puede tratar el voltaje para poder convertirla en puramente corriente directa.

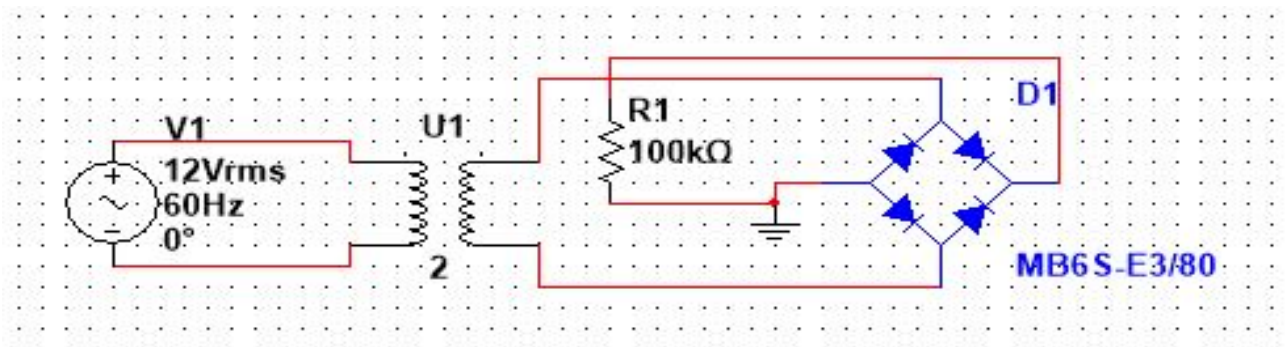


Figura 4.4: Diagrama rectificador de onda completa.

Como se puede ver en la Figura 4.4, hay un circuito con cuatro diodos, en donde se observa que todos están conectados hacia la resistencia de carga, donde se espera tener el voltaje rectificado como se puede apreciar en la Figura 4.5, donde se tiene una senoidal  $v_e = V1$ , y después de ser afectada por el rectificador de onda completa, los semiciclos negativos de este circuito, se convirtieron en positivos, explicándose así el funcionamiento del rectificador de onda completa.

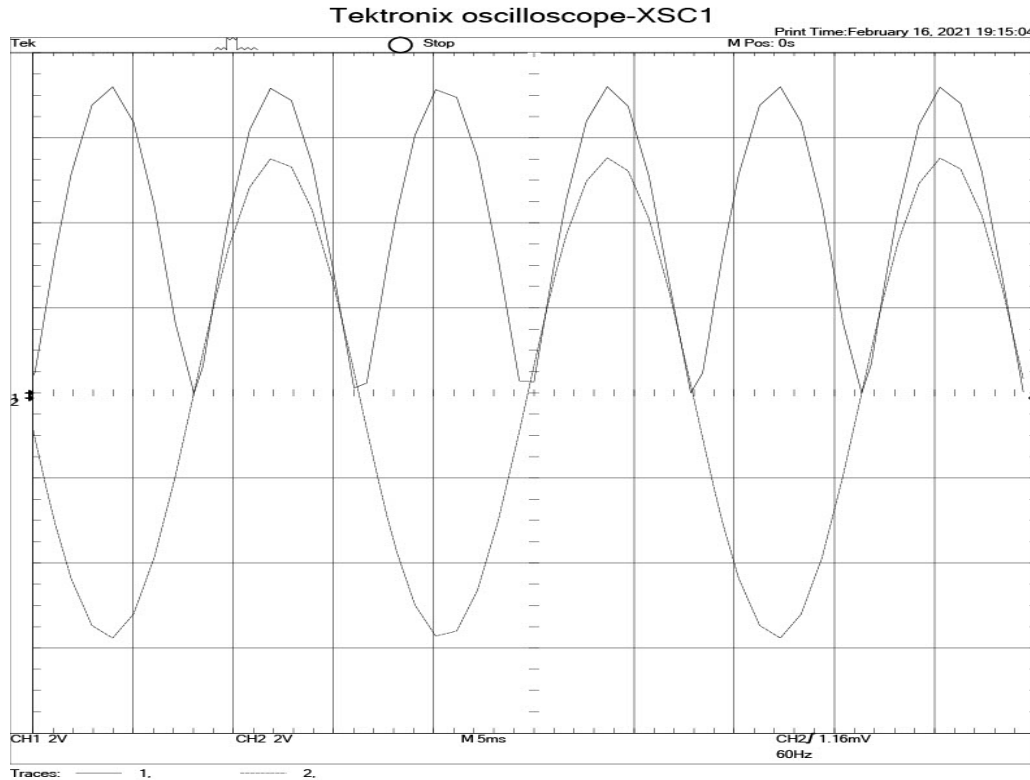


Figura 4.5: Voltaje afectado por el rectificador de onda completa.

#### 4.1.2. Convertidores de potencia

Los convertidores de potencia son de gran ayuda en el campo de la ingeniería, y específicamente en la electrónica de potencia, ya que muchas de estas aplicaciones necesitan convertidores para funcionar, teniendo en cuenta que el suministro de energía es de corriente alterna a 50 o 60 Hz, es importante conocer las especificaciones de los equipos para saber si se utiliza un convertidor CC o CA.

Una de las aplicaciones más notorias en la vida cotidiana es el uso de los rectificadores de CC, los cuales son indispensables ya que la mayoría de los electrodomésticos necesitan corriente continua para funcionar. Esto también se ve en la necesidad de realizar diseños cada vez mas eficientes y económicos, para poder producir a gran escala.

### AC-AC

Uno de los tipos de convertidores son los de corriente alterna a corriente alterna, estos sirven para controlar el voltaje, la corriente y la potencia promedio que se entrega hacia una RL. Pueden ser de diferentes configuraciones, ya que se tiene la que es por medio de interruptores, los cuales se conectan y desconectan, haciendo que se tenga un control de fase, esto ayudando a que afecte al circuito cada ciclo, teniendo un impacto en la señal, removiendo parte de esta y así controlando su potencia.

El otro tipo es el de control de fase, el cual es el principio de los reguladores de luz (también conocidos como dimmers) y la velocidad de la inducción en los motores, este tiene la peculiaridad de que se puede afectar a través de varios dispositivos semiconductores, afectando la señal y por ende recortando esta, aunque son principios muy diferentes a la configuración anterior, esta es muy efectiva en el uso de dispositivos que necesiten ser controlados por algún sistema para recortar la senoidal.

En la Figura 4.6, se muestra como funciona un convertidor de este tipo, en este caso es un circuito que tiene un circuito de ángulo de disparo, afectando un SCR, y se observa como esta recorta su señal, controlando así la potencia de esta.

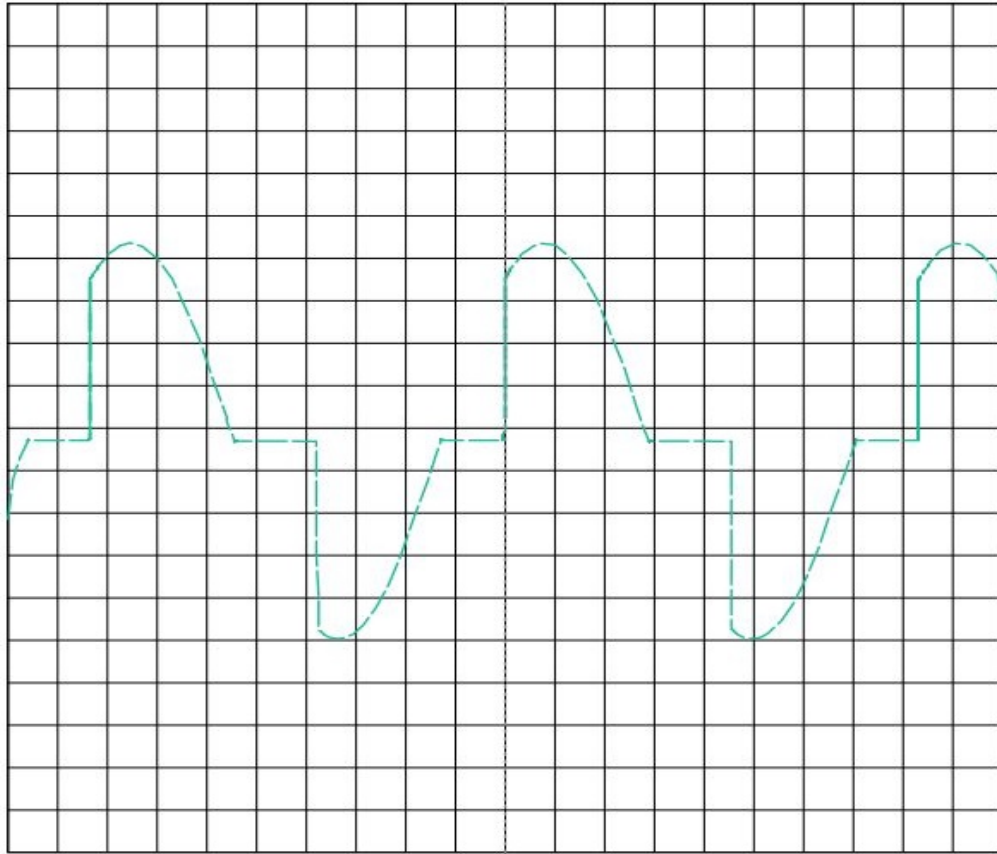


Figura 4.6: Voltaje afectado por el controlador de fase a un ángulo de  $\pi/4$ .

## AC-DC

Este circuito tiene la función de transformar el voltaje de entrada, que es corriente alterna, a una de corriente directa en la salida, aunque también se tienen rectificadores de media onda, y estos tienen la función de tener en la salida una determinada frecuencia. Dependiendo de los componentes del convertidor se puede definir como convertidor controlado o no controlado, si el convertidor utiliza diodos se va a denominar convertidor no controlado ya que empieza a funcionar en cuanto hay voltaje, por otra parte, si hay un componente como el SCR en donde el funcionamiento depende de un ángulo de disparo, decimos que es un convertidor controlable. Los controlados normalmente tienen un voltaje en corriente continua variable, mientras que los de onda completa, tienen solamente un voltaje de salida puramente directa.

### ■ Rectificador de media onda controlado

En el caso del rectificador de la Figura 4.8, se tiene un SCR el cual, por su naturaleza, no permite el paso del semiciclo negativo, y al utilizar un SCR se puede controlar la potencia de la señal que se entrega a la carga.

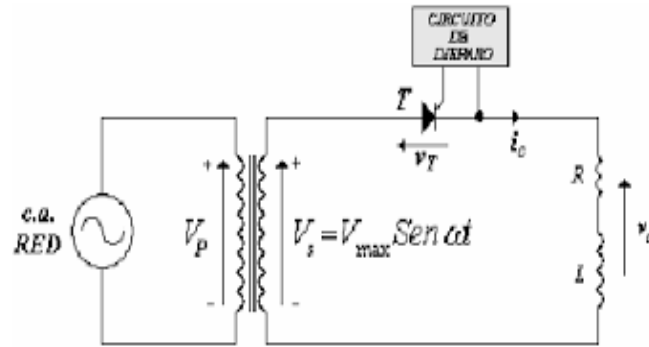


Figura 4.7: Rectificador de media onda controlado.

■ **Rectificador de media onda no controlado**

Para el rectificador no controlado, o de onda completa, se utilizan otros elementos (vease 4.8), en este caso son cuatro diodos, los cuales funcionan como un puente rectificador, y siempre funcionarían de manera constante ya que estos solo pueden afectar a la señal de una manera. Este rectificador tiene también el nombre de puente de Graetz.

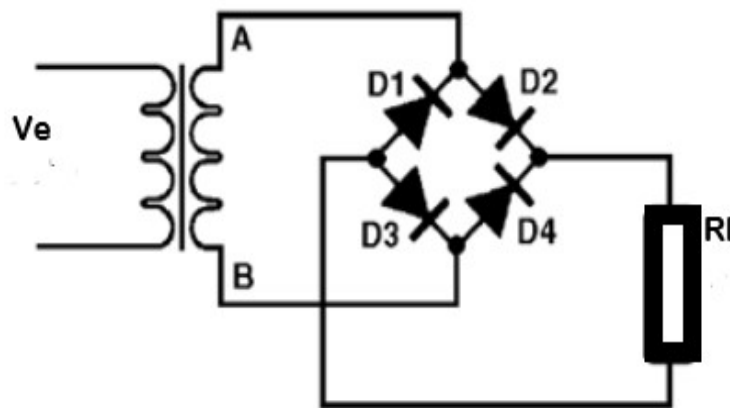


Figura 4.8: Puente de Graetz.

**DC-DC**

Estos convertidores se utilizan en sistemas de suministro de energía que sea de tipo corriente continua, estos son regulados por conmutación, y tiene la característica de transformar la corriente continua de un nivel de voltaje a otro.

El funcionamiento de los conmutados se basan en el almacenamiento de la energía, para después entregarse en otro voltaje diferente, haciendo uso de capacitores o inductores para finalmente utilizar la conmutación a través de dispositivos semiconductores.

Estos convertidores tienen diferentes aplicaciones, podemos entender entonces que cada uno de estos convertidores son necesarios para diferentes circunstancias, en la Tabla 4.2 se pueden observar los diferentes tipos de convertidores y sus aplicaciones.

Tabla 4.2: Tipos de reguladores de conmutación.

Tipo de convertidor	Propiedades	Ventaja	Desventaja
Elevadores	La salida es mayor que su voltaje, este puede subir su voltaje sin la necesidad de un transformador.	Tiene una alta eficiencia porque solo tiene un transistor.	Puede tener una corriente de pico alta, sensible a cambios del ciclo de trabajo.
Reductor	El voltaje de salida es menor a la de entrada, tiene corriente de entrada discontinua.	Tiene alta eficiencia, mayor al 90 por ciento.	La corriente de entrada es discontinua, necesitando un filtro suavizante de entrada.
Reductor-Elevador	Suministra voltaje de salida, que puede ser mayor o menor al voltaje de entrada. Tiene polaridad diferente a la salida. Suministra una inversión sin necesidad de utilizar un transformador.	Alta eficiencia, la corriente queda limitada por un inductor L, tiene una protección contra corto circuito.	La corriente es discontinua, y a través del transistor Q1 existe una corriente de pico alta.
Cuk	Proporciona un voltaje de salida que puede ser menor o mayor al voltaje de entrada, pero la polaridad del voltaje de salida es opuesta a la de entrada. Solo que este si tiene corriente de entrada continua.	Bajas perdidas de conmutación y alta eficiencia.	Alta corriente ondulatoria en el capacitor C1. Requiere un capacitor e inductor adicional.

## DC-AC

En la conversión de corriente directa a corriente alterna hay un tipo de circuito que se llama inversor, el cual tiene como función principal convertir la corriente directa a corriente alterna, además de regular el voltaje y proteger los diferentes aparatos que se conecten a este. Existen

dos tipos de inversores, los cuales se clasifican de la siguiente manera:

- **Inversores de conmutación brusca**

La conmutación se produce en puntos arbitrarios de las formas de onda de corriente y voltaje, a consecuencia de lo cual las pérdidas por conmutación pueden ser elevadas.

- **Inversores resonantes**

Se incluyen en el circuito elementos que causan resonancias en serie o en paralelo, de manera que las conmutaciones se producen en los momentos en los que la forma de onda de tensión o de corriente cruza por cero, anulando las pérdidas por conmutación.

### 4.1.3. Dispositivos electrónicos de potencia

En los dispositivos electrónicos de potencia, la diferencia más notoria suele ser que existen dispositivos que son controlados y los que no lo son. Un dispositivo que no se controla es el diodo, pues se activa y entra en estado de corte dependiendo del valor de voltaje que le proporciona el circuito. Cuenta con dos terminales, ánodo y cátodo; el diodo de potencia tiene distintas características dependiendo de qué tipo es, los principales tres tipos son: rectificador, de recuperación rápida y Schottky.

El diodo rectificador tiene características de operación de hasta 3000 Volts y 3500 Amperes, además sólo conduce en un sentido y se opone al paso de las corrientes en sentido contrario. La principal aplicación de este diodo la vemos en las fuentes de alimentación.

El diodo de recuperación rápida se utiliza principalmente para interrumpir a los convertidores de potencia que trabajan a altas frecuencias, entre sus especificaciones están los límites de voltaje y corriente con el que puede trabajar este diodo, los cuales son 3000 Volts y 1000 Amperes, respectivamente.

El diodo Schottky tiene un tiempo de recuperación muy corto y se limita a los 100 Volts y 300 Amperes, la ventaja de este diodo es su rápida conmutación y recuperación, por lo que podemos observar sus aplicaciones en rectificadores de alta frecuencia o en circuitos integrados lógicos TTL.

Otro dispositivo no controlado, es un tipo de tiristor llamado DIAC, aunque se conoce a los tiristores como dispositivos controlados este tipo de tiristor no tiene puerta, por lo que no se puede dar una corriente que active al componente, sino que al igual que el diodo se activa por las condiciones expuestas en el circuito. En la Figura 4.9 se aprecian sus respectivos símbolos.




Dispositivo no controlado	Símbolo
Diodo rectificador	
Diodo Schottky	
Tiristor DIAC	

Figura 4.9: Dispositivos electrónicos no controlados y sus símbolos.

Los transistores son dispositivos controlados, entre sus usos más comunes se encuentra el de ser utilizados como amplificadores de señales dependientes del tiempo, también funcionan como interruptores en circuitos de potencia. Los tipos de transistores se dividen en: Transistor de unión bipolar (Conocido por las siglas BJT), transistor MOSFET, transistor de inducción estática (SIT) y transistor de unión bipolar de puerta aislada (IGBT).

El transistor BJT tiene valores nominales de hasta 1200 Volts y 400 Amperes. Entre alguna de las funciones podemos incluir la amplificación, oscilación, conmutación y la conversión de frecuencias. Por otro lado, el transistor MOSFET tiene valores de operación de hasta 1000 Volts y 50 Amperes, podemos encontrar entre sus ventajas la rapidez de conmutación superior a la de un BJT de potencia, y que pueden utilizarse en convertidores que trabajan a más de 100kHz, a diferencia del BJT que tiene un límite de frecuencia de 10kHz.

El transistor IGBT se puede definir como una combinación entre el transistor BJT y MOSFET, puesto que las características de conducción son iguales al del BJT y el circuito de excitación es igual al utilizado en el MOSFET. Este transistor funciona con velocidades de conmutación de hasta 20kHz, por lo que en muchas aplicaciones podemos sustituir al transistor BJT por el IGBT. El transistor SIT es un dispositivo de alta potencia y de alta frecuencia, las especificaciones de operación de este dispositivo alcanzan un límite de 1200 Volts y 300 Amperes, con una frecuencia máxima de 100kHz. Podemos aplicarlo en sistemas de alta frecuencia, como lo son sistemas de audio o amplificadores de microondas.

Los tiristores son dispositivos controlados (excepto el tipo DIAC como anteriormente se mencionó), tiene tres terminales, ánodo, cátodo y una puerta, que es donde se activa el tiristor, pues al pasar una corriente por esta terminal el tiristor empieza a conducir. Para desactivarlo es necesario que el voltaje del ánodo sea igual o menor que el de cátodo.

El TRIAC se utiliza en aplicaciones de corriente alterna de baja potencia, se pueden usar como reguladores de luz, también como controladores de motores pequeños. El SCR funciona como un diodo rectificador controlado, permitiendo circular la corriente en un solo sentido. Mientras no se aplique ninguna tensión en la puerta no se inicia la conducción. Una de las principales formas en la que podemos aplicarlo es en el control de motores, de iluminación y de calor. Los tiristores GTO se activan con un pulso positivo en la compuerta y, a diferencia

de los otros tipos ya mencionados, se desactiva aplicando un pulso corto negativo en la misma terminal donde se activó. Sus límites de operación van hasta los 4000 Volts y 3000 Amperes, por lo que son muy utilizados en circuitos de altas potencias. En la Figura 4.10 se aprecian sus respectivos símbolos.

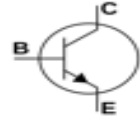
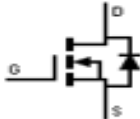
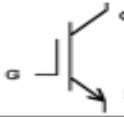


Dispositivo controlado	Símbolo
Transistor BJT	
Transistor MOSFET	
Transistor IGBT	
Tiristor SCR	
Tiristor TRIAC	

Figura 4.10: Dispositivos electrónicos controlados y sus símbolos.

#### 4.1.4. Conmutación

Un circuito de conmutación está compuesto por variables lógicas de entrada y cargas que son las salidas. Estos circuitos se basan en interruptores que permiten o no el paso de la corriente eléctrica.

La conmutación natural se da por sí sola y sucede cuando la corriente del ánodo está por debajo de un valor muy cercano a cero, lo que causa el corte del tiristor. Por otro lado, la conmutación forzada necesita otro pequeño circuito para provocar que la corriente tenga un valor de cero y el tiristor se corte. Una de las razones por las que se usa la conmutación forzada es porque tarda menos tiempo en bloquearse el tiristor.

En lo que se refiere al estado de conmutación del tiristor, se deben considerar ciertos parámetros para el correcto desempeño del dispositivo, como lo es la limitación de la variación de la corriente respecto al tiempo.

Se debe limitar la velocidad de subida de la corriente en estado activo porque la lenta extensión del plasma durante el transitorio de encendido produce un acumulamiento de corriente que

puede provocar la falla del dispositivo si  $di/dt$  es demasiado grande.

Debe limitarse la velocidad de subida de la tensión aplicada de nuevo de bloqueo directo después de la desconexión, o el dispositivo puede dispararse de regreso al estado activo por corrientes de desplazamiento inducidas. Además, no se debe aplicar de nuevo la tensión directa demasiado pronto o el dispositivo se volverá a encender.

Las modificaciones especiales de estructura, como disposiciones de compuerta-cátodo muy interdigitados y los cortocircuitos del cátodo, mejoran las especificaciones de  $di/dt$  y  $dv/dt$  de manera considerable.

## 4.2. Cálculos de potencia

En la aplicación de circuitos electrónicos de potencia se realiza una conversión de energía eléctrica de un tipo en otro a través dispositivos electrónicos que acondicionan las señales eléctricas a fin de obtener los resultados deseados.

Para el diseño, y caracterización de los distintos circuitos electrónicos de potencia se requieren conocimientos de diversas disciplinas, entre ellas la teoría de circuitos, la electrónica analógica y digital, para lo cual se requiere dominar los conceptos básicos sobre los parámetros de las señales eléctricas, y en especial los cálculos de potencia en circuitos de corriente y voltaje alterno.

### 4.2.1. Parámetros de una señal de corriente alterna

Una señal de corriente alterna es una señal que varía con el tiempo, pues alterna el sentido; en un período la mitad del tiempo el voltaje es positivo y la otra mitad negativo lo que causa que la corriente circule en un sentido en el semiciclo positivo y circule en el sentido contrario en el otro semiciclo.

$$V(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + \beta) \quad (4.1)$$

En la ecuación (4.1) se calcula el voltaje de una señal alterna. En dicha ecuación podemos observar los más importantes parámetros de una señal de corriente alterna como la amplitud, frecuencia y fase de la señal.

La amplitud se define como la suma de la distancia vertical del punto máximo del semiciclo positivo hasta llegar a cero y de la distancia vertical del punto máximo del semiciclo negativo hasta llegar a cero.

La frecuencia es la cantidad de ciclos de la señal en una unidad de tiempo y se calcula con la ecuación (4.2).

$$f = \frac{1}{T} \quad (4.2)$$

La fase es la medida de la diferencia de tiempo entre dos ondas senoidales y se mide en grados o radianes. Otros parámetros que se obtienen de la amplitud son el valor instantáneo, valor eficaz

y valor medio.

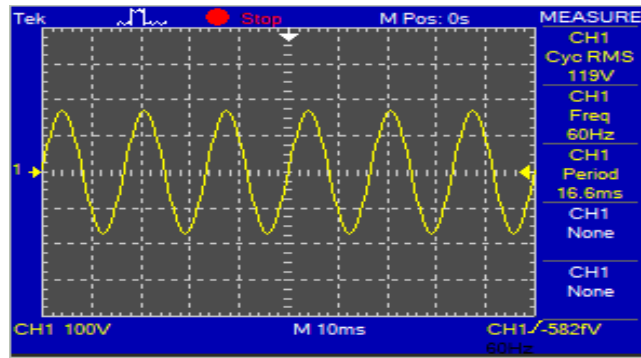


Figura 4.11: Simulación de una señal de corriente alterna

En la Figura (4.11) podemos observar una simulación de una señal de CA, donde se encuentran las mediciones de algunos de sus parámetros.

#### 4.2.2. Potencia instantánea

La potencia instantánea es una multiplicación, la cual es el producto del voltaje en el dominio del tiempo en un instante, por la corriente también en el dominio del tiempo, en un instante dado, como podemos ver en la siguiente ecuación:

$$P = v(t)i(t) \quad (4.3)$$

También tenemos los valores de el voltaje y la corriente, en función del tiempo, más su fase:

$$v(t) = V_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \theta) \quad (4.4)$$

$$i(t) = I_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi) \quad (4.5)$$

Sustituyendo las ecuaciones de voltaje y corriente, se puede obtener la ecuación general de la potencia instantánea:

$$P = \frac{1}{2}I_m \cdot V_m \cdot \cos(\theta - \phi) + \frac{1}{2}I_m \cdot V_m \cdot \cos(2\omega + \theta + \phi) \quad (4.6)$$

#### 4.2.3. Trabajo

El trabajo es una integral definida instantánea del poder que se utiliza en algún instante, en este caso se observa la energía que absorbe algún circuito en un intervalo  $t_1$  a  $t_2$ :

$$W = \int_{t_2}^{t_1} p(t) dt \quad (4.7)$$

#### 4.2.4. Potencia media

La potencia media se define como el promedio de las potencias de  $p(t)$  a través del tiempo durante un período o más y se calcula con la siguiente expresión:

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t)i(t) dt \quad (4.8)$$

donde  $T$  es el período de la señal de potencia,  $i(t)$  y  $v(t)$  son la corriente y el voltaje que varía respecto al tiempo.

Con la ecuación (4.9) también se puede calcular la potencia, y se define como la energía proporcionada en cada período.

$$P = \frac{W}{T} \quad (4.9)$$

Se debe mencionar que la potencia media total absorbida en un circuito es igual a la potencia media total suministrada.

#### 4.2.5. Valor eficaz

El valor eficaz de una onda de voltaje periódica se basa en la potencia media entregada a una resistencia. Para obtener el voltaje eficaz o rms se utiliza la fórmula de la ecuación (4.10).

$$V_{ef} = V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (4.10)$$

La corriente eficaz se calcula con la siguiente expresión:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (4.11)$$

El valor eficaz sirve para poder calcular la potencia que absorbe una resistencia, comúnmente estos valores eficaces son los que se utilizan cuando se habla de energía eléctrica, un ejemplo es el voltaje que entregan los toma corrientes.

#### 4.2.6. Potencia aparente y factor de potencia

La potencia aparente es la multiplicación de la corriente eficaz con el voltaje eficaz, y se usa principalmente para saber el valor nominal de equipos de potencia y se expresa como en la ecuación (4.12).

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (4.12)$$

donde  $I_{rms}$  y  $V_{rms}$  son la corriente y voltaje eficaz, respectivamente.

El factor de potencia se obtiene del cociente de la potencia media y la potencia aparente

como se muestra en la ecuación (4.13).

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} \cdot I_{rms}} \quad (4.13)$$

Otra manera de calcular el factor de potencia es utilizando la ecuación (4.14), pero su aplicación está limitada pues solo se utiliza si las señales de voltaje y corriente son senoidales, siendo  $\theta$  el ángulo de fase que hay entre la señal de voltaje y corriente.

$$fp = \cos(\theta) \quad (4.14)$$

Idealmente, el valor del factor de potencia debería ser uno, sin embargo, en los sistemas de potencia reales no es así, pues se presentan pérdidas de potencia, por lo que generalmente el factor de potencia solo alcanza un valor por debajo de la unidad. El factor de potencia puede modificarse para acercarlo a la unidad, por ejemplo con capacitores, lo cual mejoraría el funcionamiento del sistema.

#### 4.2.7. Cálculos de potencia en circuitos de corriente alterna

Para calcular voltaje eficaz en corriente alterna se utilizan las siguientes ecuaciones.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_m^2 \sin^2(\omega t) dt} \quad (4.15)$$

Donde  $T = \frac{2\pi}{\omega}$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_m^2 \sin^2(\omega t) dt} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (4.16)$$

Para obtener la corriente eficaz en circuitos de corriente alterna se emplea la ecuación 4.17.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t) dt} \quad (4.17)$$

Donde  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  y al realizar la sustitución se obtiene lo siguiente.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_m^2 \sin^2(\omega t) dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (4.18)$$

Cualquier circuito se puede analizar a través fórmulas que se basan en voltajes y corrientes en el tiempo, como en la ecuación 4.4 y 4.5, estas dos fórmulas tienen valores en el tiempo. En la ecuación 4.6 se encuentra la fórmula de la potencia instantánea, tomando las ecuaciones anteriormente mencionadas la potencia instantánea en el dominio del tiempo se representa con la siguiente ecuación.

$$p(t) = \frac{I_m \cdot V_m}{2} \cdot [\cos(2\omega t + \theta + \phi) + \cos(\theta + \phi)] \quad (4.19)$$

Para el cálculo de la potencia media se aplica una integral a la potencia instantánea, evaluando la integral en un periodo como se muestra en la ecuación 4.20.

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t)dt = \frac{I_m \cdot V_m}{2T} \cdot \int_0^T [\cos(2\omega t + \theta + \phi) + \cos(\theta - \phi)]dt \quad (4.20)$$

Para explicar esta integral se puede ver que el primer termino de esa integral es una función cosenoidal, esta tiene la característica de que en un período tiene el valor de cero, ya que tiene el mismo valor tanto en la parte positiva, como la parte negativa si se evalúa en el dominio del tiempo.

Tomando en cuenta lo anterior, podemos analizar el segundo término, en el cual tenemos una constante  $\cos(\theta - \phi)$ , el cual tiene un promedio de valor de  $\cos(\theta - \phi)$ , entonces, teniendo en cuenta estos factores, podemos decir que el valor de promedio de cualquier sistema electrónico es el siguiente:

$$P = \frac{I_m \cdot V_m}{2} \cdot \cos(\theta - \phi) \quad (4.21)$$

Pero también se puede expresar de la siguiente manera, la cual es más utilizada:

$$P = V_{rms} I_{rms} \cdot \cos(\theta - \phi) \quad (4.22)$$

Donde  $V_{rms}$  y  $I_{rms}$ , y la diferencia de los ángulos es tomada de el ángulo de desfase que se tiene entre voltaje y corriente.

La potencia reactiva se define como la energía que se almacena en una parte del período de la senoidal (normalmente la primera mitad), y la energía que se emite después de haber sido almacenada, para esto podemos definir una relación con el cálculo de potencia, y es que la fórmula para el cálculo de potencia reactiva, es la siguiente:

$$Q = V_{rms} I_{rms} \cdot \text{sen}(\theta - \phi) \quad (4.23)$$

Los capacitores absorben potencia reactiva negativa, y por otra parte, las bobinas absorben potencia reactiva positiva, para calcular la potencia compleja se combina potencia real y reactiva, dando así, la ecuación de la potencia compleja:

$$\mathbf{S} = P + iQ \quad (4.24)$$

Esta ecuación de la potencia compleja también se puede expresar de manera de magnitud, como podemos ver en la siguiente ecuación:

$$\mathbf{S} = |S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4.25)$$

En la ecuación 4.25 tenemos que tener en cuenta que este es un caso especial ya que solamente se puede realizar ese análisis estrictamente en circuitos de corriente alterna.

### 4.3. Controladores de voltaje alterno

A los controladores de voltaje alterno se les conoce también como convertidores de AC-AC. Son circuitos electrónicos que controlan el voltaje, la corriente y la potencia media que entrega una fuente de alterna a una carga de alterna. Su principio de funcionamiento se basa en el uso de interruptores electrónicos, para la conexión y desconexión de la fuente a la carga en intervalos regulares, ya sea por el método de control de fase o por el método de control de ciclo integral (abrir o cerrar durante cierta cantidad de ciclos).

#### 4.3.1. Características, modelo y operación del tiristor

Un tiristor es un semiconductor que se utiliza en el campo de la electrónica de potencia, el cual tiene el uso de interruptor, específicamente, para conducir o interrumpir la corriente eléctrica en un circuito, también se le conoce como de potencia, ya que puede manejar voltajes muy altos, gracias al tipo de fabricación que este tiene. Como se puede ver en la Figura 4.12, un tiristor tiene tres nodos, de los cuales dos de ellos son los que normalmente se tienen en un diodo, ánodo y cátodo, pero el tercero es el que hace la diferencia para convertirlo en un tiristor, es una compuerta, la cual sirve para poder manipular los voltajes y corrientes en un circuito.

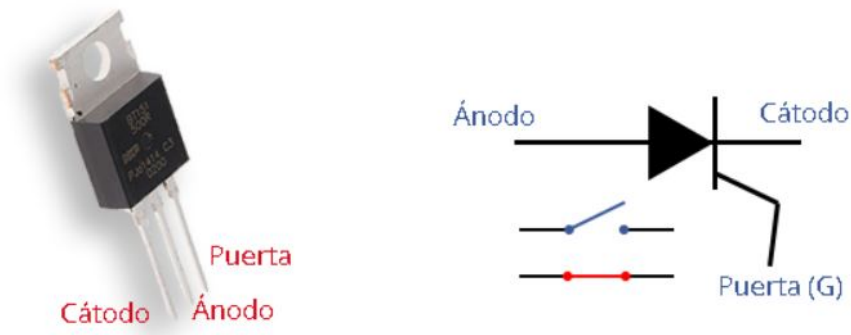


Figura 4.12: Tiristor y su representación .

El funcionamiento de este es muy interesante, ya que, como se había tratado antes, el hecho de que este conformado por tres terminales tiene una razón, y esto se debe a que la compuerta de puerta (gate) permite que su funcionamiento se asemeje a un interruptor mecánico, ya que, al momento de aplicar una corriente por este medio, esta compuerta se activa y tiene la característica de no dejar, o limitar, el paso de corriente o voltaje sobre el circuito. En la Figura 4.13, se puede ver un circuito de ejemplo, en el cual se utiliza un tiristor para poder afectar la corriente que alimenta la lámpara.

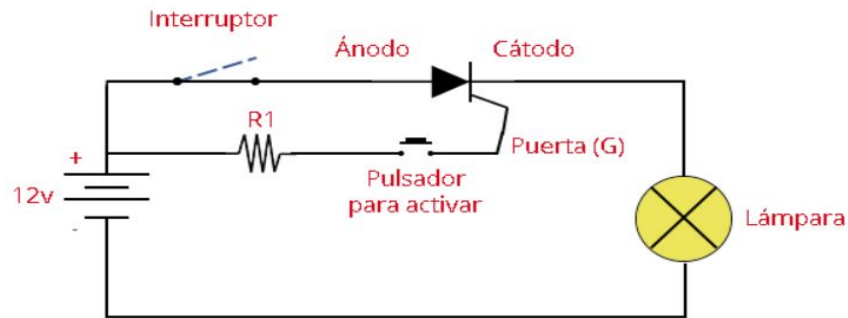


Figura 4.13: Circuito demostrativo de la aplicación del tiristor.

Entrando en detalle, se puede ver como se ve afectado por el voltaje, y es que, podemos comprender que existen varias uniones en el tiristor, por eso se puede hacer un análisis a través del voltaje. Para esto se utiliza la Figura 4.14 como ejemplo para poder contextualizar estos próximos ejemplos.

Cuando el voltaje del ánodo se hace positivo con respecto al cátodo, las uniones  $pn$  que están cerca del ánodo tienen polarización directa, y la unión que se tiene en  $np$  tiene una polarización inversa, y solo fluiría poca corriente de fuga de ánodo a cátodo, y debido a esto se puede decir que el tiristor está en una condición de bloqueo directo o estado desactivado, llamado a la corriente de fuga corriente de estado inactivo  $I_D$ . Si el voltaje del ánodo a cátodo  $V_e$  se incrementa a un valor suficientemente grande, la unión  $np$  entrará en ruptura, debido a esto ese voltaje se le llama voltaje de ruptura directa  $V_{BO}$ , y gracias a que la polarización de  $pn$  y  $pn$  será directa, habrá un movimiento libre de electrones a través de estas uniones.

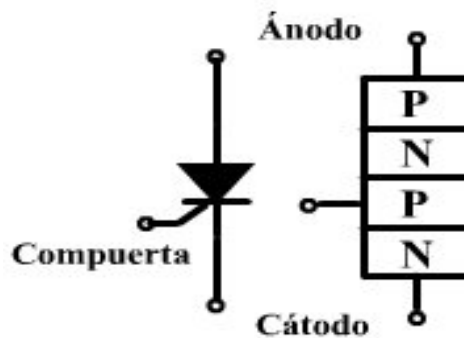


Figura 4.14: Representación y características de fabricación del tiristor.

En la Figura 4.15 se observa la curva característica del tiristor, en la cual se está comparando con la curva característica de un diodo para poder comprender mejor. Existe inicialmente una característica de bloquear el paso de corriente en el sentido directo, que viene representado en la línea A, de aquí se crea una corriente o tensión directa pero el tiristor no conduce aun, pero en el momento que este alcanza un determinado valor, entra en estado de ruptura, y el tiristor permite el paso de corriente en el sentido directo, el cual viene representado con la línea ascendente B.

Cuando la corriente desciende de valor, se mantiene en un estado de corriente de mantenimiento que lo podemos ver con C, y si esta baja debajo de ese valor, se interrumpe el sentido o la corriente. En el sentido inverso, el tiristor se comporta como un diodo normal, impidiendo el paso de la corriente, aunque también tiene una curva la cual se puede conducir, pero es muy difícil llegar a estimular hasta ese punto al tiristor.

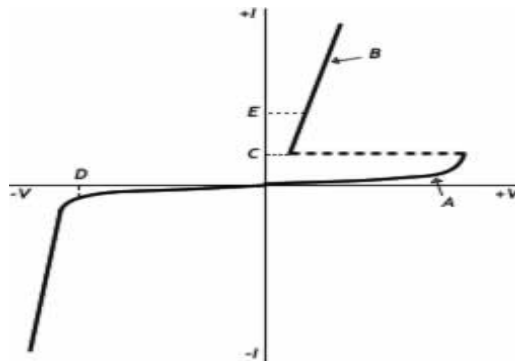


Figura 4.15: Curva característica del tiristor.

Recapitulando, se puede decir lo siguiente del tiristor:

- Para que el tiristor entre en conducción, hay que aplicar una corriente de puerta cuando la tensión ánodo-cátodo sea positiva.
- Una vez que el dispositivo haya entrado en conducción, la señal de puerta deja de ser necesaria para mantener la corriente de ánodo.
- El tiristor continuará conduciendo mientras la corriente de ánodo siga siendo positiva y esté por encima de un valor mínimo, denominado nivel de mantenimiento.
- La desconexión del tiristor se puede dar de dos maneras, la primera es por conmutación natural, en la cual la corriente de ánodo es menor que la corriente de mantenimiento. En un circuito de corriente continua se puede reducir la corriente de ánodo haciendo un cortocircuito en el dispositivo, generando una alta impedancia en la carga, abriendo el interruptor de línea. Y por corte por la puerta, donde una corriente de puerta negativa aumenta la corriente de mantenimiento, bloqueando el dispositivo.

### 4.3.2. Control de disparo del tiristor

Existen diferentes tipos de activación del tiristor, y es que este se activa incrementando la corriente del ánodo, y puede llevarse a cabo con diferentes tipos de efectos.

- **Luz**

Una de las más interesantes, ya que, si se permite que la luz llegue a las uniones del tiristor, se puede estimular por el efecto fotoeléctrico, los pares electrones-hueco que se tienen pudiendo activar el tiristor. Esta activación se logra al permitir que la luz llegue a los discos de silicio.

- **Térmica**

Si la temperatura del tiristor es alta, se tendrá un aumento de números de electrón-hueco, lo que aumentará las corrientes de fuga.

- **Alto voltaje**

Si el voltaje con la que se polariza el diodo es mayor que el voltaje de ruptura  $V_{BO}$ , entonces fluirá corriente suficiente para iniciar una activación generativa, este tipo de activación puede resultar destructiva, así que se debe de evitar.

- $dv/dt$

Con una velocidad de elevación del voltaje en el tiristor muy alta, se puede hacer que la corriente de carga de las uniones capacitivas pueda ser suficiente para activar el tiristor.

- **Corriente compuerta**

Si el tiristor está polarizado en directa, la inyección de una corriente entre la compuerta y las terminales del cátodo activará al tiristor [11].

### 4.3.3. Principio de control de abrir y cerrar

En el principio de control de abrir y cerrar se tiene un circuito como en la Figura 4.16 , en este caso el tiristor conecta la alimentación de corriente alterna a la carga durante un tiempo determinado, denominado  $t_n$ , y un pulso inhibidor de compuerta abre el interruptor un tiempo  $t_0$ , y el tiempo activo  $t_n$  normalmente está formado por un número entero de ciclos.

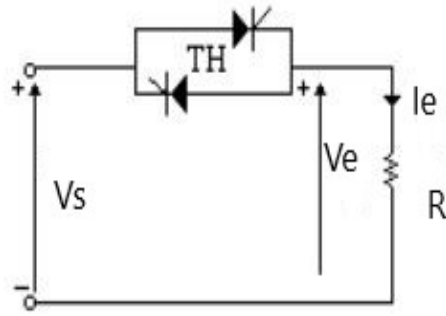


Figura 4.16: Control de abrir y cerrar en el Tiristor.

Se tiene el siguiente análisis matemático:

$$V_s = V_m \cdot \sin(\omega t) = \sqrt{2}V_s \cdot \sin(\omega t) \quad (4.26)$$

Para calcular el voltaje rms en la carga se utiliza lo siguiente:

$$V_o = V_s \sqrt{\frac{n}{n+m}} = V_s \cdot \sqrt{k} \quad (4.27)$$

Donde  $n$  son ciclos conectados;  $m$  son ciclos desconectados.

Mientras que el ciclo de trabajo es:

$$k = \frac{n}{n+m} \quad (4.28)$$

Se tiene que la corriente de la carga es:

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (4.29)$$

Y la potencia de la carga es:

$$P_o = I_o^2 \cdot R \quad (4.30)$$

Se tiene el factor de potencia de entrada:

$$PF = \frac{P_o}{VA} = \frac{n}{m+n} = \sqrt{k} \quad (4.31)$$

Donde VA es:

$$VA = V_s \cdot I_s = V_s \cdot I_o \quad (4.32)$$

Para tener el valor de las corrientes se hace el siguiente procedimiento, primero empezando por la corriente promedio:

$$I_A = \frac{n}{2\pi(n+m)} \int_0^\pi I_m^2 \cdot \sin^2 \omega t d(\omega t) = \frac{I_m \cdot n}{\pi(m+n)} = \frac{kI_m}{\pi} \quad (4.33)$$

Y la corriente RMS de los tiristores [12]:

$$I_R = \frac{I_m}{2} \sqrt{\frac{n}{m+n}} = \frac{I_m \cdot \sqrt{k}}{2} \quad (4.34)$$

#### 4.3.4. Principio de control de fase

En el control de ángulo de fase los tiristores conectan la carga a la fuente de CA durante una parte de cada ciclo del voltaje de entrada.

Durante el semiciclo positivo del voltaje de entrada, el ánodo del tiristor es positivo con respecto al cátodo por lo que el tiristor está polarizado directamente. Cuando el tiristor  $T_1$  se dispara en  $\omega t = \alpha$ , el tiristor  $T_1$  conduce, por lo que el voltaje de entrada se muestra en la carga.

Al contrario de lo que se mencionó anteriormente, cuando en el voltaje de entrada se pasa al semiciclo negativo, el ánodo del tiristor es negativo con respecto al cátodo y se dice que el tiristor  $T_1$  tiene polarización inversa, así que se desactiva.

El tiempo desde que el voltaje de entrada empieza a hacerse positivo hasta que se dispara el tiristor en  $\omega t = \alpha$ , tiene como nombre ángulo de retraso o de disparo.

En la Figura (4.17) se puede observar un ejemplo de un circuito controlado por fase.

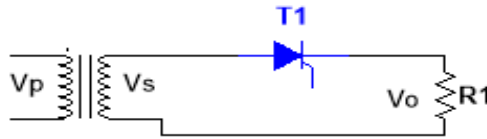


Figura 4.17: Circuito controlado por fase.

Al ser  $V_m$  el voltaje pico de entrada, el voltaje promedio de salida  $V_{cd}$  se calcula con la ecuación (4.35)

$$V_{cd} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos(\alpha)) \quad (4.35)$$

donde  $\omega t$  es el ángulo de retraso y donde  $V_{cd}$  puede tomar valores de  $V_m/\pi$  hasta 0, alcanzando su valor máximo cuando el ángulo de retraso es 0.

Para determinar el voltaje de salida máximo se utiliza la ecuación (4.36), donde se divide el voltaje pico de entrada entre  $\pi$ .

$$V_{dm} = \frac{V_m}{\pi} \quad (4.36)$$

A partir de la ecuación (4.37) se obtiene el voltaje de salida normalizado respecto a  $V_{dm}$

$$V_n = \frac{V_{cd}}{V_{dm}} = 0,5(1 + \cos(\alpha)) \quad (4.37)$$

El voltaje de salida rms se determina a partir de las siguientes expresiones matemáticas (4.38)

$$V_{rms} = \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \sin^2(\omega t) d(\omega t) \right]^{1/2} = \left[ \frac{V_m^2}{4\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (1 - \cos(2\omega t)) d(\omega t) \right]^{1/2} \quad (4.38)$$

Finalmente, después de realizar la integral definida, la expresión queda simplificada como se muestra en la ecuación (4.39)

$$V_{rms} = \frac{V_m}{2} \left[ \frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right) \right]^{1/2} \quad (4.39)$$

### 4.3.5. Controlador unidireccional

El controlador unidireccional se utiliza en aplicaciones para cargas resistivas de baja potencia, un ejemplo de esto sería la iluminación. Para explicar el funcionamiento del control unidireccional, se puede analizar el circuito de un controlador monofásico de media onda que se observa en la Figura 4.18.

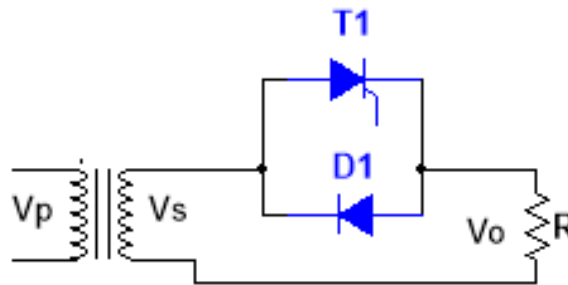


Figura 4.18: Controlador monofásico de media onda.

En el circuito se puede observar que el flujo de potencia en la carga se controla retrasando el ángulo de disparo del tiristor  $T_1$ . A causa del diodo  $D_1$ , se limita el rango de control y el  $V_{rms}$  de salida varía de 70.7 a 100 %.

Para calcular el voltaje de entrada se utiliza la ecuación (4.40).

$$V_s = V_m \cdot \sin(\omega t) = \sqrt{2}V_s \cdot \sin(\omega t) \quad (4.40)$$

donde  $\omega t$  es el ángulo de retraso del tiristor.

Si se busca calcular el voltaje de salida se usa la ecuación (4.41).

$$V_o = V_s \cdot \left[ \frac{1}{2\pi} (2\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}) \right]^{1/2} \quad (4.41)$$

donde  $V_s$  es el voltaje de entrada y  $\alpha$  es el ángulo de retraso del tiristor.

En la ecuación (4.42) se calcula el valor promedio del voltaje de salida.

$$V_{cd} = \frac{\sqrt{2}V_s}{2\pi} (\cos(\alpha) - 1) \quad (4.42)$$

Con la ecuación (4.43) se calcula la corriente rms en la carga ( $I_o$ ), donde  $I_o$  es el resultado de la división de  $V_o$  y el valor de la resistencia.

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (4.43)$$

La potencia de la carga se obtiene al utilizar la ecuación (4.44) y se calcula elevando la corriente rms al cuadrado y multiplicandolo por la resistencia.

$$P_o = I_o^2 R \quad (4.44)$$

El voltaje de entrada en volts-amperes se obtiene con la expresion matemática (4.45).

$$VA = V_s I_s = V_s I_o \quad (4.45)$$

El factor de potencia de entrada se obtiene diviendo el voltaje de salida entre el voltaje de entrada como se muestra en la ecuación (4.46).

$$PF = \frac{P_o}{VA} = \frac{V_o}{V_s} = \left[ \frac{1}{2\pi} (2\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}) \right]^{1/2} \quad (4.46)$$

Con la ecuación (4.47) se calcula la corriente promedio de entrada.

$$I_D = \frac{V_{cd}}{R} \quad (4.47)$$

### 4.3.6. Controlador bidireccional

Para explicar el funcionamiento del control bidireccional, podemos analizar el circuito de un controlador monofásico de onda completa con carga resistiva, el cual se observa en la Figura 4.19.

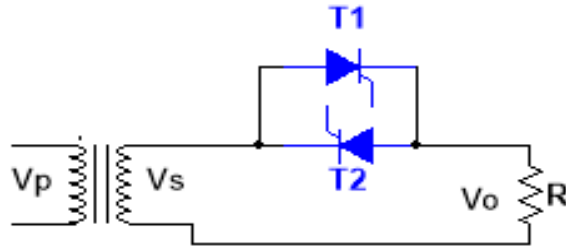


Figura 4.19: Controlador monofásico de onda completa con carga resistiva.

En este circuito los tiristores  $T_1$  y  $T_2$  se mantienen a 180 grados uno del otro.

Para calcular el voltaje de entrada se utiliza la expresión matemática (4.48).

$$V_s = V_m \cdot \sin(\omega t) = \sqrt{2}V_s \cdot \sin(\omega t) \quad (4.48)$$

donde  $\omega t$  es el ángulo de retraso del tiristor.

En la ecuación (4.49) se puede observar que el ángulo de retraso del tiristor  $\alpha$  es el mismo tanto en  $T_1$  como en  $T_2$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha \quad (4.49)$$

Para calcular el voltaje rms de salida se utiliza la ecuación (4.50).

$$V_o = V_s \left[ \frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.50)$$

Con la ecuación (4.51) se calcula la corriente RMS en la carga  $I_o$ , donde la corriente es el resultado de la división de  $V_o$  y el valor de la resistencia, al igual que en el controlador unidireccional.

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (4.51)$$

La potencia de la carga se obtiene al utilizar la ecuación (4.52) y se calcula elevando la corriente rms al cuadrado y multiplicándolo por la resistencia.

$$P_o = I_o^2 R \quad (4.52)$$

El voltaje de entrada en volts amperes se obtiene con la expresión matemática (4.53).

$$VA = V_s I_s = V_s I_o \quad (4.53)$$

El factor de potencia de entrada se obtiene dividiendo el voltaje de salida entre el voltaje de

entrada como se muestra en la ecuación (4.54).

$$PF = \frac{P_o}{VA} = \frac{V_o}{V_s} = \left[ \frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.54)$$

Para obtener la corriente promedio del tiristor se utiliza la expresión (4.55).

$$I_A = \frac{\sqrt{2}V_s}{2\pi R} [\cos(\alpha) + 1] \quad (4.55)$$

Otro circuito en el que se aplica el control bidireccional es en el controlador monofásico de onda completa con carga resistiva e inductiva, como se ilustra en la Figura 4.20.

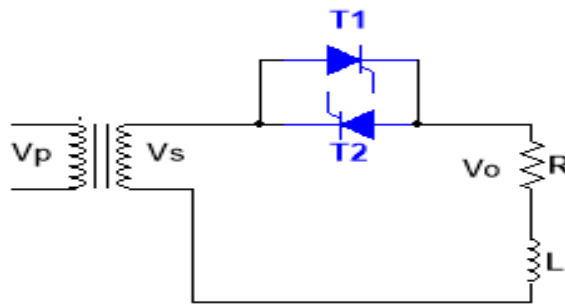


Figura 4.20: Controlador monofásico de onda completa con carga RL

En este circuito, cuando el voltaje de entrada empieza el semiciclo negativo, la corriente del tiristor  $T_1$  no se reduce a cero, el tiristor sigue conduciendo hasta que su corriente  $i_1$  llegue a cero, lo que sucede cuando  $\omega t = \beta$ .

Para calcular el voltaje de entrada se sigue utilizando la misma ecuación que en los circuitos anteriores, lo que puede verse en la siguiente ecuación (4.56).

$$V_s = V_m \cdot \sin(\omega t) = \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) \quad (4.56)$$

Con la ecuación (4.57) se obtiene la corriente en en el tiristor  $T_1$ .

$$i_1 = \frac{\sqrt{2}V_s}{Z} \left[ \sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{-(\frac{R}{L})(\frac{\alpha}{\omega} - t)} \right] \quad (4.57)$$

El ángulo de conducción del tiristor  $T_1$  es representado en la ecuación (4.58) y depende del ángulo de retraso  $\alpha$ .

$$\sigma = \beta - \alpha \quad (4.58)$$

Para calcular el voltaje rms de salida se utiliza la expresión matemática (4.59).

$$V_o = V_s \left[ \frac{1}{\pi} (\beta - \alpha) + \frac{\sin(2\alpha)}{2} + \frac{\sin(2\beta)}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.59)$$

De la expresión mostrada en la ecuación (4.60) se puede calcular la corriente rms del tiristor.

$$I_R = \frac{V_s}{Z} \left[ \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} [\sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{(\frac{R}{L})(\frac{\alpha}{\omega} - t)}] d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.60)$$

Con la ecuación (4.61) se calcula la corriente rms en la carga  $I_o$ , donde la corriente es el resultado de la raíz de 2 que multiplica a la corriente rms del tiristor.

$$I_o = (I_R^2 + I_R^2) = \sqrt{2} I_R \quad (4.61)$$

Con la ecuación (4.62) podemos calcular el valor promedio de la corriente del tiristor.

$$I_A = \frac{\sqrt{2} V_s}{2\pi Z} \int_{\alpha}^{\beta} [\sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{(\frac{R}{L})(\frac{\alpha}{\omega} - t)}] d(\omega t) \quad (4.62)$$

## 4.4. Optoelectrónica

El vínculo entre los sistemas ópticos y los sistemas electrónicos ha dado origen a la optoelectrónica. La optoelectrónica combina los beneficios del procesamiento de datos electrónicos con las ventajas de la luz como lo son su velocidad, y su naturaleza electromagnética para transmitirse. Debido a esto las señales eléctricas son convertidas y procesadas como señales ópticas y vice versa, donde la luz producida puede propagarse en espacio libre o en medios sólidos transmisores de luz. Debido a esto la historia de la optoelectrónica está conectada con el desarrollo de los sensores de luz y las comunicaciones ópticas [13].

### 4.4.1. Fotosensores

Un fotosensor es un dispositivo el cual detecta la presencia o alguna característica en particular de un objeto mediante la luz, la cual puede ser visible o no visible, se pueden aplicar para detectar presencia, tamaño, color o brillo de diferentes objetos.

Tienen ciertas características, entre ellas se pueden mencionar las siguientes:

1. Detección sin contacto gracias a que, por su naturaleza, la luz es algo que se puede detectar con un sensor, además de esto, evita daño en objetos al momento de diseñar ya que esto evita el contacto, alargando la vida útil de algún dispositivo.

2. También el sensor puede detectar materiales, basado en cuanto refleja, o la cantidad de luz interrumpida, por eso se dice que casi todos los materiales son detectables.
3. Los sensores fotoeléctricos pueden detectar a largas distancias, dependiendo de su potencia.

Existen diferentes tipos de fotosensores, uno de ellos es el modelo reflectivo, como se muestra en la Figura 4.21, este tiene el emisor de luz y el elemento receptor de luz en una sola carcasa, por eso el sensor recibe la luz reflejada desde el objeto.



Figura 4.21: Fotosensor de modelo reflectivo.

Tenemos el modelo de barrera (véase Figura 4.22), en el cual el transmisor y el receptor están separados, esperando que el objeto que se encuentra entre estos dos objetos interrumpa u obstruya el paso de la luz.

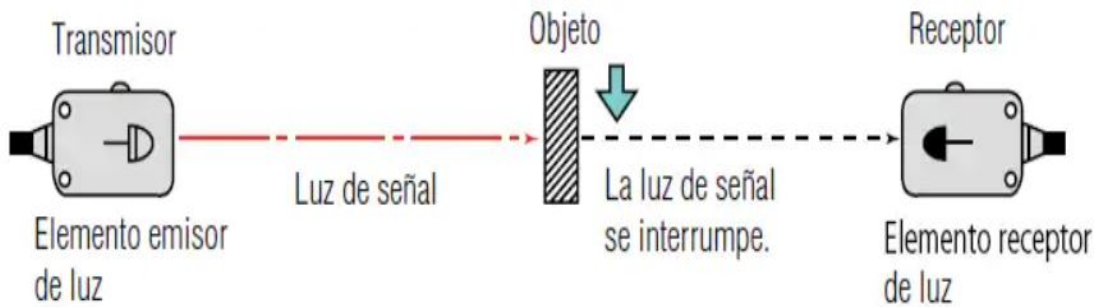


Figura 4.22: Fotosensor de modelo barrera.

El tercer modelo principal de fotosensor es el modelo retro reflectivo (véase Figura 4.23), en el cual tanto el emisor de luz como los elementos receptores están contenidas en el mismo recinto, solo que en este caso la luz del elemento incide en el reflector y regresa al elemento receptor de luz.

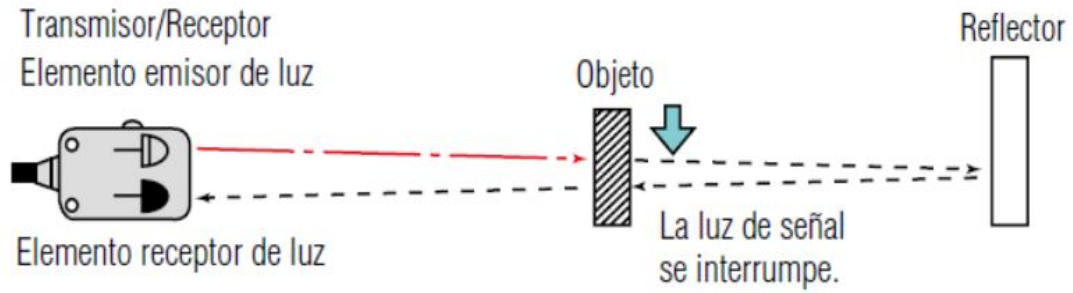


Figura 4.23: Fotosensor de modelo retro reflectivo.

#### 4.4.2. Fototransistor

Un fototransistor es un transistor que se activa a causa de la incidencia de luz en la región de base, lo que provoca la generación de portadores. El fototransistor puede convertir la luz que recibe en una tensión eléctrica de baja potencia, pero con la potencia suficiente para permitir la conducción de corriente en el colector y emisor. En la Figura 4.24 aparece el símbolo del fototransistor.



Figura 4.24: Símbolo del fototransistor.

El fototransistor está compuesto por dos junturas y tiene una cápsula que posee una ventana para dejar que la luz ingrese hasta las junturas de la pastilla semiconductor. La unión base-colector es más grande si se compara a la de un transistor normal y el objetivo de eso es captar más cantidad de luz.

Existen fototransistores de dos y tres terminales. El fototransistor de dos terminales se rige completamente por la luz que incide en él, en cambio, el de tres terminales funciona como un transistor normal si se le aplica voltaje a la base y actúa como fototransistor al no aplicar nada a la base. En la Figura 4.25 se pueden observar los fototransistores explicados anteriormente.



Figura 4.25: Fototransistor de dos y tres terminales.

Cada modelo de fototransistor maneja distintos rangos de longitudes de onda de luz, logrando abarcar rangos de luz visible, infrarroja o ultravioleta, entre otras.

En la Tabla 4.3 se muestran los rangos de longitud de onda del espectro electromagnético que abarca el fototransistor dependiendo del material con el que esta hecho.

Tabla 4.3: Rango de longitud de onda según el material del fototransistor.

Material	Rango de longitud de onda del espectro electromagnético (nm)
Silicio	190-1100
Germanio	400-1700
Indio galio arsénico (InGaAs)	800-2600
Sulfuro de plomo (II)	<1000-3500

Otras de sus características es su alto nivel de ganancia causado por ser un transistor y un nivel de ruido menor comparándolo con otros dispositivos.

Como desventaja, a causa del incremento de tamaño de la unión base-colector, la capacitancia aumenta, lo que ocasiona una baja respuesta en frecuencia y tiempos más lentos de transición entre estados de conducción y no conducción.

Entre las aplicaciones más comunes de los fototransistores se puede mencionar su amplio uso en control de iluminación, optoacopladores y en sistemas de seguridad.

### 4.4.3. Fotodiodo

Un fotodiodo es un dispositivo semiconductor construido con una unión PN que genera una corriente eléctrica al incidir luz visible o infrarroja en él. En la Figura 4.26 se puede observar el símbolo del fotodiodo.

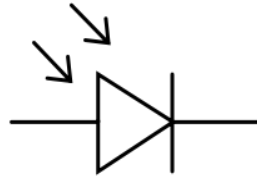


Figura 4.26: Símbolo del fotodiodo.

El fotodiodo se debe polarizar inversamente, lo cual permite el flujo de electrones en sentido inverso. En su estructura física cuentan con un lente que concentra la cantidad de luz que entra, provocando que se exciten los electrones, generando movimiento y creando huecos con carga positiva. La corriente que se genera varía dependiendo de la intensidad de la luz que incide, entre mayor sea la intensidad más grande es la corriente.

En la Figura 4.4 se pueden observar los rangos de longitud de onda del espectro electromagnético que abarca el fotodiodo dependiendo del material con el que está hecho.

Tabla 4.4: Rango de longitud de onda según el material del fotodiodo.

Material	Rango de longitud de onda del espectro electromagnético (nm)
Silicio	190-1100
Germanio	400-1700
Indio galio arsénico (InGaAs)	800-2600
Sulfuro de plomo	<1000-3900

Entre las características del fotodiodo está su rápida respuesta a los cambios de intensidad lumínica y que al polarizarse directamente se comporta como un diodo normal.

Existen dos tipos de fotodiodos, PIN y APD. El fotodiodo PIN, que se observa en la Figura 4.27, posee una zona intermedia llamada intrínseca lo que permite que la eficiencia sea alta, la desventaja es que el tiempo de respuesta aumenta debido a esto.



Figura 4.27: Fotodiodo PIN.

El fotodiodo APD o también llamado avalancha, que se ver en la Figura 4.28, tiene una estructura parecida, pero a diferencia del fotodiodo PIN, tiene una sensibilidad superior lo cual permite detectar niveles de potencia menores y trabaja con voltajes mayores que aumentan la ganancia interna, lo que ocasiona la agilización de tiempo de respuesta, sin embargo, tiene desventajas como mayor ruido, mayor consumo de potencia y el efecto que tiene la temperatura sobre la ganancia.

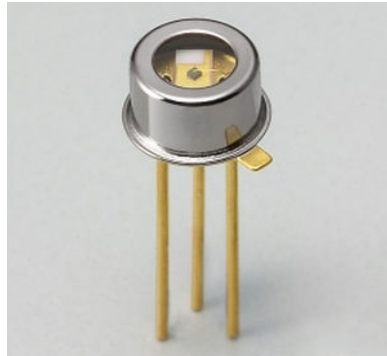


Figura 4.28: Fotodiodo APD.

Dentro de las aplicaciones más comunes de los fotodiodos está su uso en sensores de detección remota y proximidad, lectores de CD y en el control de iluminación, entre otros.

#### 4.4.4. Resistencia dependiente de la luz (LDR)

Es un componente electrónico que varía el valor de resistencia dependiendo de la intensidad lumínica que incide en él. El valor de la fotorresistencia en la oscuridad puede alcanzar valores de 1M ohm y al incidir la luz alcanza hasta valores de 50 ohm. En la Figura 4.29 se muestra el símbolo del componente LDR.

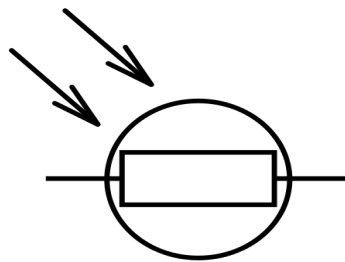


Figura 4.29: Símbolo de LDR.

Tiene una célula fotoreceptora que es capaz de reaccionar a un gran rango de frecuencias y tipos de luz, como la luz infrarroja, visible y ultravioleta (ver Figura 4.30).

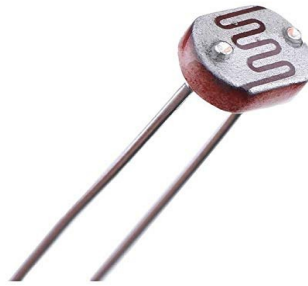


Figura 4.30: Resistencia dependiente de la luz (LDR).

Dentro de sus ventajas están la alta sensibilidad, bajo costo y fácil conexión. También se puede modificar el voltaje que entrega dependiendo del modo de conexión, entre mayor cantidad de luz más voltaje o entre menor cantidad de luz menor voltaje.

Como limitación de las fotorresistencias está su retardo cuando la luz varía de oscuro a iluminado o viceversa, por lo que no se utiliza mucho en aplicaciones que necesiten un tiempo muy rápido de respuesta.

Entre las aplicaciones de este componente se encuentran los medidores de luz, alarmas, sistemas de encendido y apagado de alumbrado de calles, entre otras.

#### 4.4.5. Acondicionamiento de señal óptica

Las señales que se tienen a partir de algún sensor o aparato se utilizan en gran variedad de aplicaciones, ya que estas nos proporcionan información que es valiosa, desde las celdas solares hasta las redes ópticas, son las diferentes áreas en las cuales podemos utilizar señales. Por eso es necesario el tratamiento de estas señales, para poder tener información precisa y concisa, con la necesidad de almacenar y dimensionar, se crearon diferentes métodos para poder procesar esta información, una de estas es la amplificación por transimpedancia. En la Figura 4.31 tenemos un circuito el cual es el amplificador de transimpedancia del cual podemos ver la etapa de amplificación de un fotodiodo (como ejemplo, ya que puede ser otra señal), en un OP AMP LTC6268, en ese caso podemos ver el capacitor, el cual esta colocado para poder asegurar estabilidad.

Tenemos la corriente  $I_{PD}$  la cual se amplifica en el amplificador de transimpedancia, y se convierte en una tensión de salida, mediante una ganancia con la resistencia ( $R_F$ ), en la cual se va toda la corriente sobre esa resistencia, teniendo así la expresión:

$$V_{out} = -I_{PD} \cdot R_F \quad (4.63)$$

Aunque en la práctica este amplificador utiliza parte de la corriente como una corriente de polarización, y da una tensión negativa a la salida, limitando el rango dinámico, por eso se dice

que cuanto mayor es la resistencia de ganancia, mayor es este efecto.

Es por eso que es necesario el uso de amplificadores con etapa de entrada FET, ya que su corriente de entrada inherente es mas baja, en el orden de los picos amperios, y disminuyen este efecto.

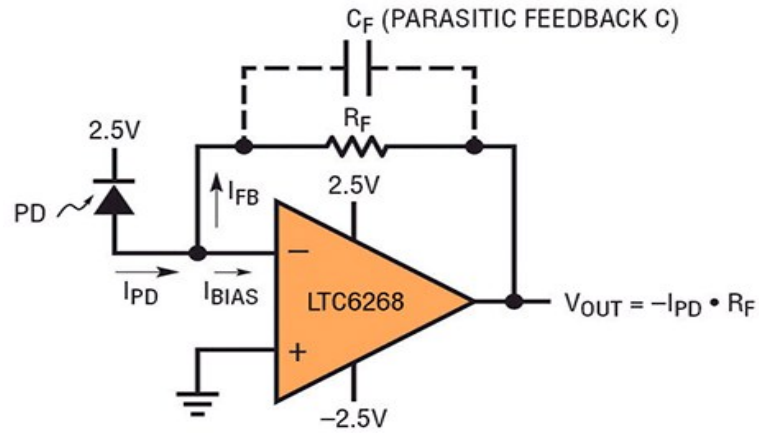


Figura 4.31: Amplificador de transimpedancia.

Donde:

$$PD : \textit{Fotodiodo} \quad (4.64)$$

$$I_{PD} : \textit{Corriente de Fotodiodo} \quad (4.65)$$

$$I_{BIAS} : \textit{Corriente de polarizacin} \quad (4.66)$$

$$I_{FB} : \textit{Corriente de retroalimentacin} \quad (4.67)$$

$$R_F : \textit{Resistencia de retroalimentacin} \quad (4.68)$$

$$V_{OUT} : \textit{Voltaje de salida} \quad (4.69)$$

[14]

# CAPÍTULO 5

## METODOLOGÍA Y RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN

### 5.1. Diseño del controlador de voltaje

Para definir el diseño del controlador de voltaje se procedió a evaluar el comportamiento de un circuito de “control de fase unidireccional”, y uno de “control de fase bidireccional”, a fin de seleccionar el que permita mayor sensibilidad en la variación de la potencia entregada en la carga.

#### 5.1.1. Evaluación del circuito de control de fase unidireccional

Para definir la resistencia de la carga se utilizó (5.1), a partir de un foco de consumo de 60 Watts que se alimenta con 120 Vrms, por lo que se calcula el valor en ohms que representa el foco para introducirlo en el proceso de simulación.

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{120v^2}{60w} = 240\Omega \quad (5.1)$$

Se programaron las ecuaciones que rigen el comportamiento del circuito en MATLAB como se muestra en la Figura 5.1.

```
ConUni2.m  X  +
1  function ConUni2(alfa, vs, R)
2  -  clc;
3  -  radAlfa=(alfa*pi)/180;%conversion angulo a radianes
4  -  Vo=(2.^(1/2))*vs/2*((1-(radAlfa/pi)+(sin(2*radAlfa)/(2*pi))).^(1/2));
5  -  Io=Vo/R;
6  -  Po=((Io).^2)*R;
7  -  VA=vs*Io;
8  -  PF=Po/VA;
9  -  end
```

Figura 5.1: Ecuaciones de control unidireccional realizadas en Matlab.

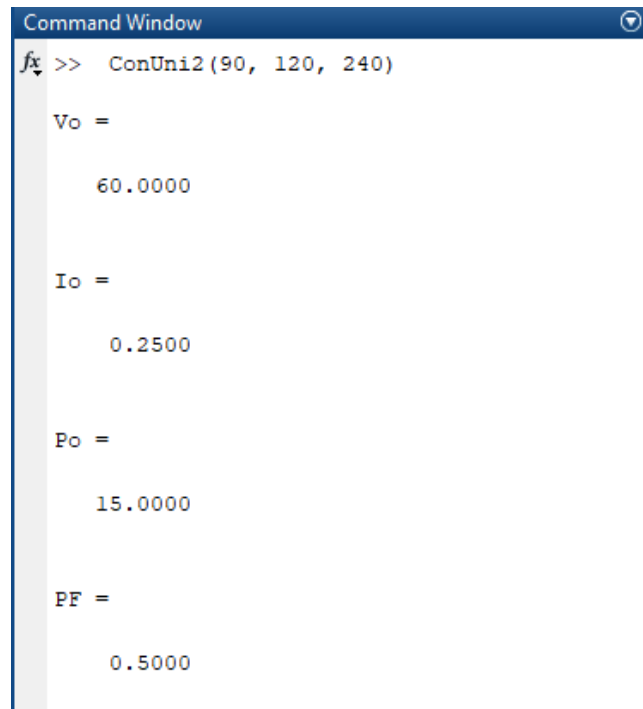
El cual requiere que se ingresen los valores de los parámetros (ángulo de disparo  $\alpha$ , voltaje  $V_{rms}$  de la fuente de alimentación y la resistencia de la carga), para entregar los parámetros de salida (voltaje en la carga  $V_o$ , corriente en la carga  $I_o$ , potencia en la carga  $P_o$ , y el factor de potencia  $PF$ ).

Tabla 5.1: Resultados de la caracterización del circuito con ángulo de disparo que varía desde 5 hasta 180 grados.

Ángulo de disparo	V <sub>o</sub>	I <sub>o</sub>	P <sub>o</sub>	PF
5	84.8468	.3535	29.9958	.7071
10	84.8052	.3534	29.9664	.7067
15	84.6933	.3529	29.8873	.7058
20	84.4783	.3520	29.7358	.7040
25	84.1298	.3505	29.4909	.7011
30	83.6205	.3484	29.1350	.6968
35	82.9265	.3455	28.6534	.6911
40	82.0275	.3418	28.0354	.6836
45	80.9068	.3371	27.2746	.6742
50	79.5519	.3315	26.3688	.6629
55	77.9539	.3248	25.3200	.6496
60	76.1078	.3171	24.1350	.6342
65	74.0123	.3084	22.8243	.6168
70	71.6699	.2986	21.4024	.5972
75	69.0866	.2879	19.8873	.5757
80	66.2716	.2761	18.2997	.5523
85	63.2375	.2635	16.6624	.5270
90	60.0000	.2500	15.0000	.5000
95	56.5775	.2357	13.3376	.4715
100	52.9913	.2208	11.7003	.4416
105	49.2650	.2053	10.1127	.4105
110	45.4249	.1893	8.5976	.3785
115	41.4991	.1729	7.1757	.3458
120	37.5181	.1563	5.8650	.3127
125	33.5141	.1396	4.68	.2793
130	29.5211	.1230	3.6312	.2460
135	25.5751	.1066	2.7254	.2131
140	21.7139	.0905	1.9646	.1809
145	17.9775	.0749	1.3466	.1498
150	14.4086	.0600	.8650	.1201
155	11.0534	.0461	.5091	.0921
160	7.9636	.0332	.2642	.0664
165	5.2002	.0217	.1127	.0433
170	2.8414	.0118	.0336	.0237
175	1.0069	.0042	.0042	.0084
180	0	0	0	0

En la Tabla 5.1 se muestran los resultados de la caracterización del circuito con distintos ángulos de disparo, mientras que en la Figura 5.2, se muestra un ejemplo de la evaluación del circuito con un ángulo de disparo  $\alpha$  de 90 grados, obteniéndose 15 WATTS en la carga, lo

que representa un 25 % de la potencia máxima. Mientras que en la Figura 5.3 se muestra la simulación en Multisim donde se puede apreciar el circuito, la señal de alimentación, la señal de disparo y la señal de salida en la carga. Se evaluó una variante del sistema el cual incluye un diodo de protección como se muestra en la Figura 5.4, obteniéndose los mismos resultados.



```

Command Window
>> ConUni2(90, 120, 240)

Vo =
    60.0000

Io =
    0.2500

Po =
    15.0000

PF =
    0.5000
    
```

Figura 5.2: Ejemplo de los cálculos realizados en Matlab con ángulo de disparo alfa de 90 grados, voltaje de alimentación de 120 Vrms y resistencia de carga de 240 ohms.

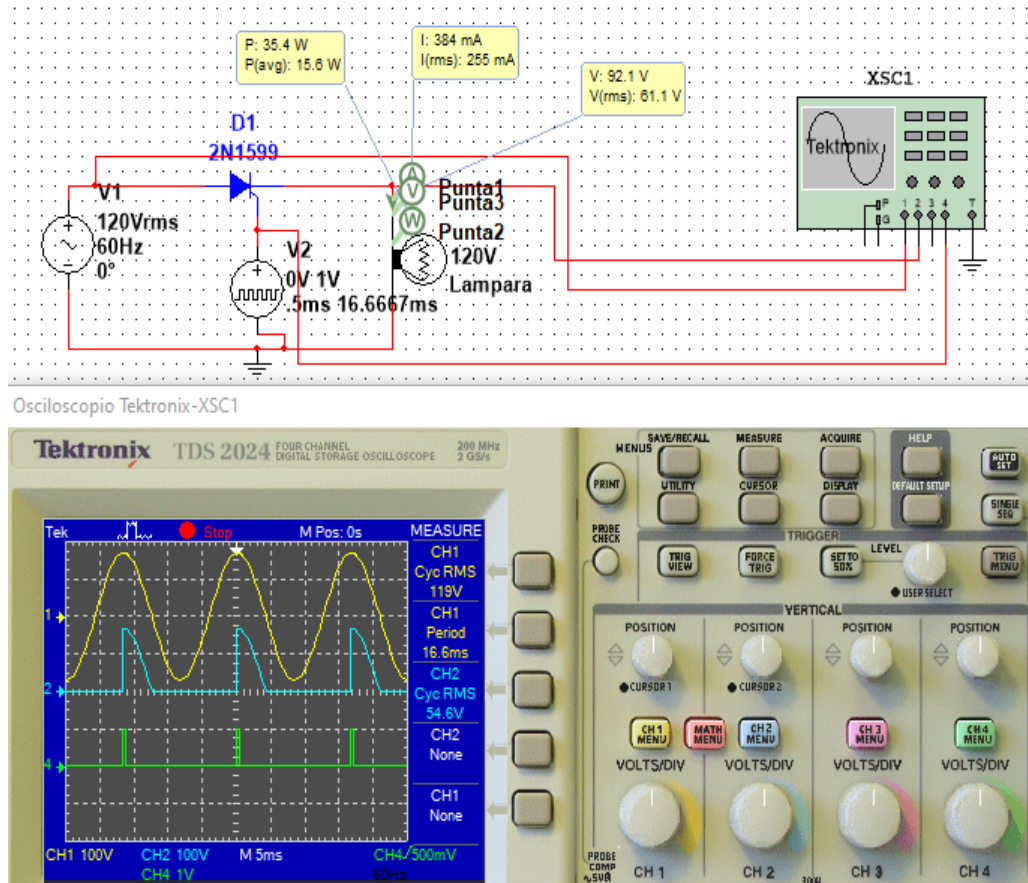


Figura 5.3: Simulación de un rectificador controlado de media onda con alfa de 90 grados, voltaje de 120 Vrms y un foco equivalente a 240 ohms.

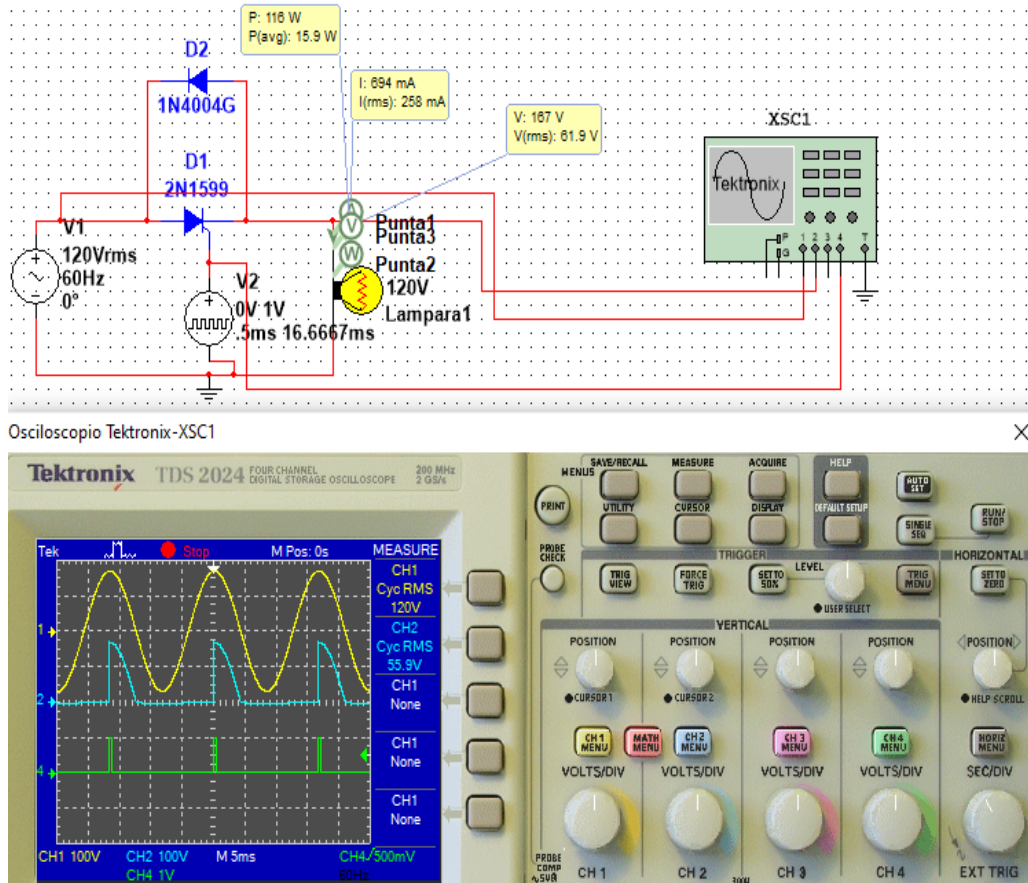


Figura 5.4: Simulación de un rectificador controlado de media onda con diodo de protección, con alfa de 90 grados, voltaje de 120 Vrms y un foco equivalente a 240 ohms.

### 5.1.2. Evaluación del circuito de control de fase bidireccional

Se programaron las ecuaciones que rigen el comportamiento del circuito de control bidireccional en MATLAB como se muestra en la Figura 5.5.

```

ConBidi.m x +
1 function ConBidi(alfa, vs, R)
2   clc;
3   radAlfa=(alfa*pi)/180;%conversion angulo a radianes
4   Vo=vs*((1/pi)*(pi-radAlfa+(sin(2*radAlfa)/2))).^(1/2));
5   Io=Vo/R;
6   Po=((Io).^2)*R;
7   VA=vs*Io;
8   PF=Po/VA;
9   end
    
```

Figura 5.5: Ecuaciones de control bidireccional programadas en Matlab.

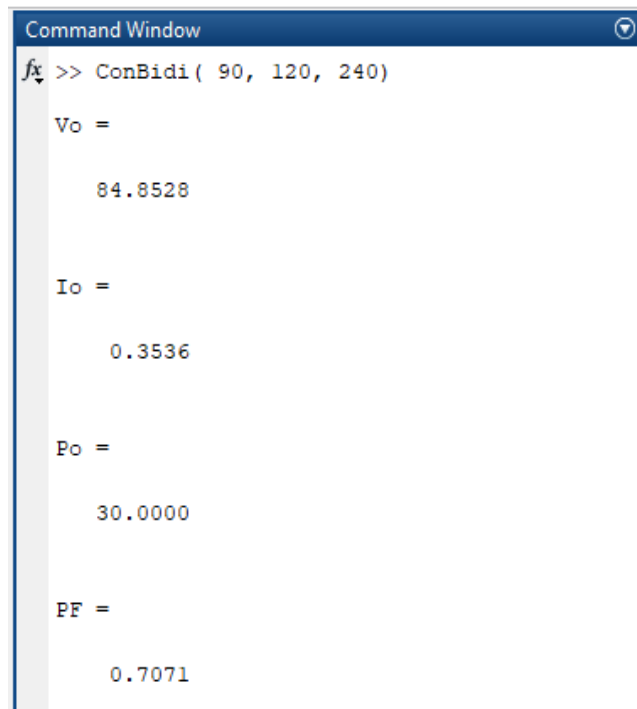
El cual requiere que se ingresen los valores de los parámetros (ángulo de disparo  $\alpha$ , voltaje  $V_{rms}$  de la fuente de alimentación y la resistencia de la carga), para entregar los parámetros de salida (voltaje en la carga  $V_o$ , corriente en la carga  $I_o$ , potencia en la carga  $P_o$ , y el factor de potencia  $PF$ ).

Tabla 5.2: Resultados de la caracterización del circuito de control bidireccional con ángulo de disparo que varía desde 5 hasta 180 grados.

Ángulo de disparo 1 y 2	V <sub>o</sub>	I <sub>o</sub>	P <sub>o</sub>	PF
5	119.9916	.5000	59.9916	.9999
10	119.9327	.4997	59.9327	.9994
15	119.7744	.4991	59.7746	.9981
20	119.4703	.4978	59.4715	.9956
25	118.9775	.4957	58.9819	.9915
30	118.2573	.4927	58.2699	.9855
35	117.2758	.4886	57.3067	.9773
40	116.0044	.4834	56.0709	.9667
45	114.4195	.4767	54.5493	.9535
50	112.5034	.4688	52.7376	.9375
55	110.2434	.4593	50.6401	.9187
60	107.6326	.4485	48.2699	.8969
65	104.6692	.4361	45.6485	.8722
70	101.3566	.4223	42.8048	.8446
75	97.7032	.4071	39.7746	.8142
80	93.7222	.3905	36.5994	.7810
85	89.4314	.3726	33.3249	.7453
90	84.8528	.3536	30.0000	.7071
95	80.0127	.3334	26.6751	.6668
100	74.9410	.3123	23.4006	.6245
105	69.6713	.2903	20.2254	.5806
110	64.2405	.2677	17.1952	.5353
115	58.6886	.2445	14.3515	.4891
120	53.0586	.2211	11.7301	.4422
125	47.3960	.1975	9.3599	.3950
130	41.7491	.1740	7.2624	.3479
135	36.1686	.1507	5.4507	.3014
140	30.7081	.1280	3.9291	.2559
145	25.4241	.1059	2.6933	.2119
150	20.3768	.0849	1.7301	.1698
155	15.6319	.0651	1.0181	.1303
160	11.2623	.0469	.5285	.0939
165	7.3542	.0306	.2254	.0613
170	4.0184	.0167	.0673	.0335
175	1.4240	.0059	.0084	.0119
180	0	0	0	0

En la Tabla 5.2 se muestran los resultados de la caracterización del circuito con distintos ángulos de disparo, en la Figura 5.6 se muestra un ejemplo de la evaluación del circuito con un ángulo de disparo alfa de 90 grados, obteniéndose 30 WATTS en la carga, lo que representa

un 50 % de la potencia máxima. Mientras que en la Figura 5.7 se muestra la simulación en Simulink donde se puede apreciar el circuito, la señal de alimentación, la señal de disparo y la señal de salida en la carga.



```
Command Window
fx >> ConBidi( 90, 120, 240)

Vo =

    84.8528

Io =

    0.3536

Po =

    30.0000

PF =

    0.7071
```

Figura 5.6: Ejemplo de los cálculos realizados en Matlab con ángulo de disparo alfa de 90 grados, voltaje de alimentación de 120 Vrms y resistencia de carga de 240 ohms.

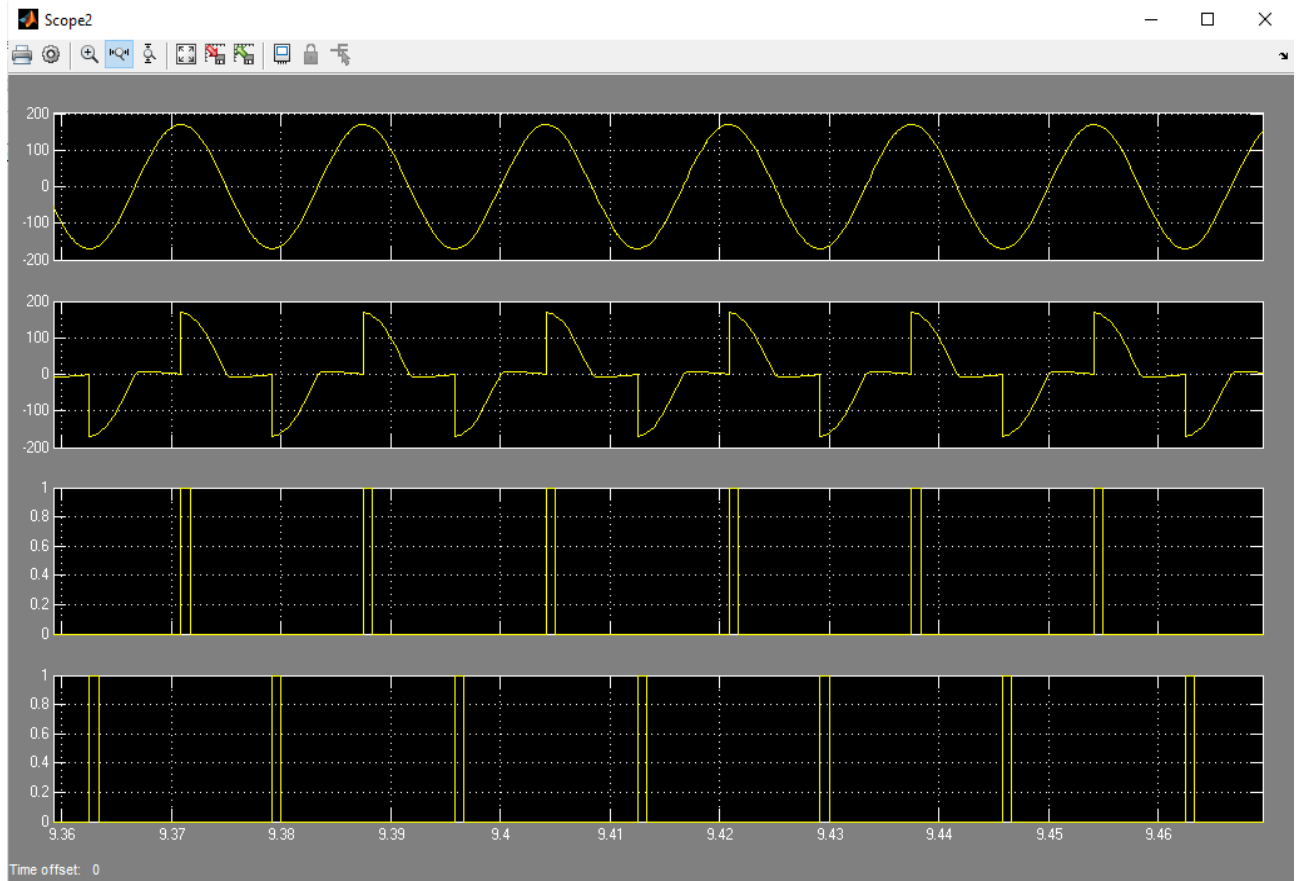


Figura 5.7: Simulación de un rectificador controlado de onda completa con alfa de 90 grados, voltaje de 120 Vrms y un foco equivalente a 240 ohms.

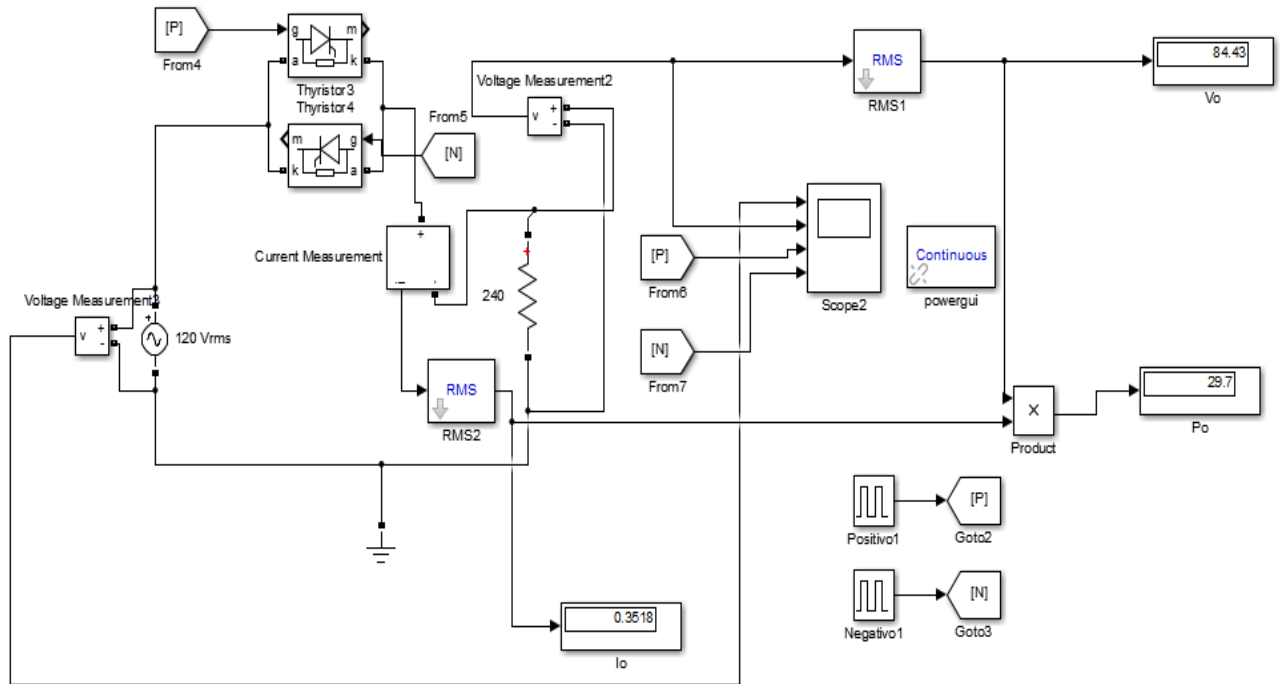


Figura 5.8: Simulación de un rectificador controlado de onda completa con alfa de 90 grados, voltaje de 120 Vrms y un foco equivalente a 240 ohms.

## 5.2. Caracterización de los sensores ópticos

### 5.2.1. Experimentación con LDR's

Para la experimentación se optó por el circuito de control de fase bidireccional, al revisar las Tablas 5.1 y 5.2 se pudo observar que en los cálculos del controlador bidireccional el factor de potencia empieza casi en la unidad, lo que indica que el circuito no sufre mucha pérdida de potencia como el controlador unidireccional, en el cual el primer cálculo del factor de potencia apenas alcanza el valor de .7071.

Otra ventaja es que en el circuito bidireccional se controlan ambos semiciclos, tanto el positivo como el negativo, a diferencia del controlador unidireccional que recorta el semiciclo negativo.

Se diseñó un experimento donde se colocó un controlador bidireccional para encender una luminaria con máxima capacidad de 60 Watts en una habitación oscura, con 4 LDR's en una configuración como la que se muestra en la Figura 5.9, esto para medir la respuesta de las LDR's al disparar el tiristor del controlador de voltaje en los distintos ángulos en los que se conoce su potencia de acuerdo a la Tabla 5.2, obteniéndose los resultados de la Tabla 5.3, donde se observa que ángulo de disparo se incrementó desde 0 hasta 90 grados, con separación de 10 grados entre cada medición, debido a que la sensibilidad de los LDR's no permitió incrementos

menores de 10 grados ni disparar a ángulos mayores de 90 grados, pues la resistencia de las LDR's se elevaba tanto que se comportaba como un circuito abierto.

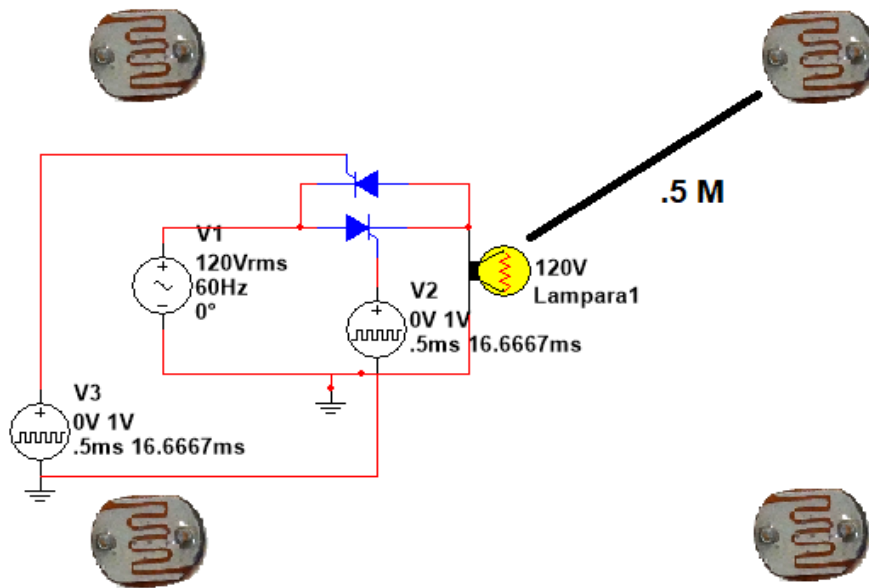


Figura 5.9: Imagen de las 4 LDR'S colocadas a una distancia de .5 metros del foco alimentado por el tiristor.

Tabla 5.3: Promedio de las LDR's y su potencia al variar el ángulo de disparo.

Ángulo de disparo	Potencia de la luminaria (Watts)	LDR1 (ohms)	LDR2 (ohms)	LDR3 (ohms)	LDR4 (ohms)	Promedio de LDR'S (ohms)
0	60.0000	31.2 K	29 K	92.4 K	35.1K	46.925 K
10	59.9327	34 K	30.1K	96 K	38 K	49.525 K
20	59.4715	36.8K	31 K	101K	40.1K	52.225 K
30	58.2699	37 K	32.8 K	108.2 K	44 K	55.5 K
40	56.0709	38.2K	36K	115K	47K	59.05 K
50	52.7376	41.5K	38.6K	131K	51.4K	65.625K
60	48.2699	48.3K	44.8K	161K	62.6K	79.175K
70	42.8048	52K	48.3K	182K	72.4K	88.675K
80	36.5994	56K	53.2K	198K	78.3K	96.375K
90	30.000	106K	112K	542K	135K	223.75K

### 5.2.2. Cálculo del ángulo de disparo del controlador de voltaje en respuesta a la luz ambiental, con LDR's

Con la Tabla 5.3 se evaluó la linealidad del comportamiento de las LDR's como se muestra en la Figura 5.10, donde se puede apreciar la potencia que alcanza el promedio de las mediciones en las LDR's.

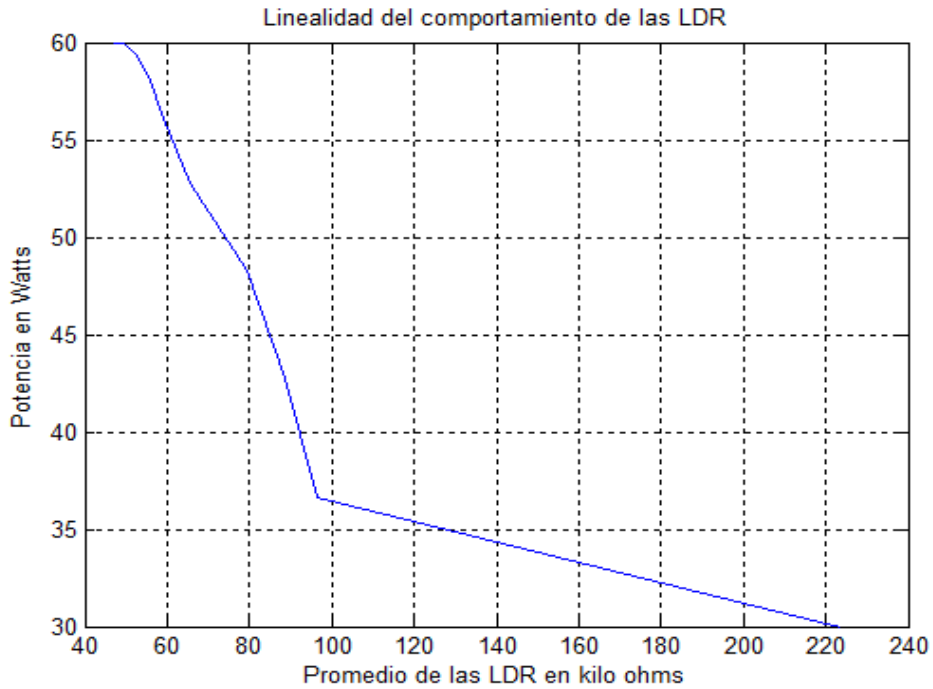


Figura 5.10: Linealidad del comportamiento de las LDR's

Con el objetivo de calcular el ángulo de disparo al que se deben de disparar los tiristores del controlador de voltaje bidireccional al estar operando en condiciones reales con iluminación ambiental variante para mantener siempre la misma iluminación como se muestra en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Cálculo de la potencia requerida para completar 60 Watts y el ángulo de disparo que corresponde a esa potencia.

Resistencia promedio sensada de las LDR's en condiciones de iluminación ambiental variante	Potencia equivalente de la luz ambiental sensada por las LDR's en Watts	Potencia requerida por la luminaria para completar la potencia máxima de 60 Watts	Ángulo de disparo requerido para proveer la potencia faltante de la luminaria para completar la potencia máxima de 60 Watts
47k	60	0	180
50k	59.85	0.15	167
60k	55.6	4.4	138.2
70k	51.3	8.7	126.5
80k	47.8	12.2	119
90k	41.7	18.3	108.1
100k	36.42	23.58	99.7
110k	35.88	24.12	98.9
120k	35.37	24.63	98.1
130k	34.86	25.14	97.3
140k	34.34	25.66	96.5
150k	33.82	26.18	95.8
160k	33.3	26.7	95
170k	32.78	27.22	94.2
180k	32.27	27.73	93.5
190k	31.75	28.25	92.6
200k	31.24	28.76	91.9
210k	30.72	29.28	91
220k	30.19	29.81	90.3
223k	30	30	90

Para el circuito experimental se utilizó un triac BT136b, un comparador LM393, optoacoplador MOC3020, resistencias de varios valores, un capacitor cerámico y dos diodos. Para dar el pulso a la puerta del triac se usó un microcontrolador Arduino que dependiendo del valor que se obtiene de las LDR, da un cierto retraso antes de mandar el pulso, consiguiendo así un voltaje en la lampara que es resultado de la iluminación captada.

Para proporcionar el pulso en los dos semiciclos de la corriente alterna, se conectó el voltaje de 120V al comparador LM393, conectando resistencias para disminuir la corriente y diodos de protección para el componente, con este comparador se pudo detectar cada vez que se cambiaba de semiciclo pues se utilizó una configuración que detecta cuando la señal alterna cruza por 0. El optoacoplador MOC3020 fue necesario para aislar la parte digital de la etapa de potencia y así no comprometer el funcionamiento del circuito.

En la Figura 5.11 se observa el diagrama de conexión del circuito anteriormente explicado.

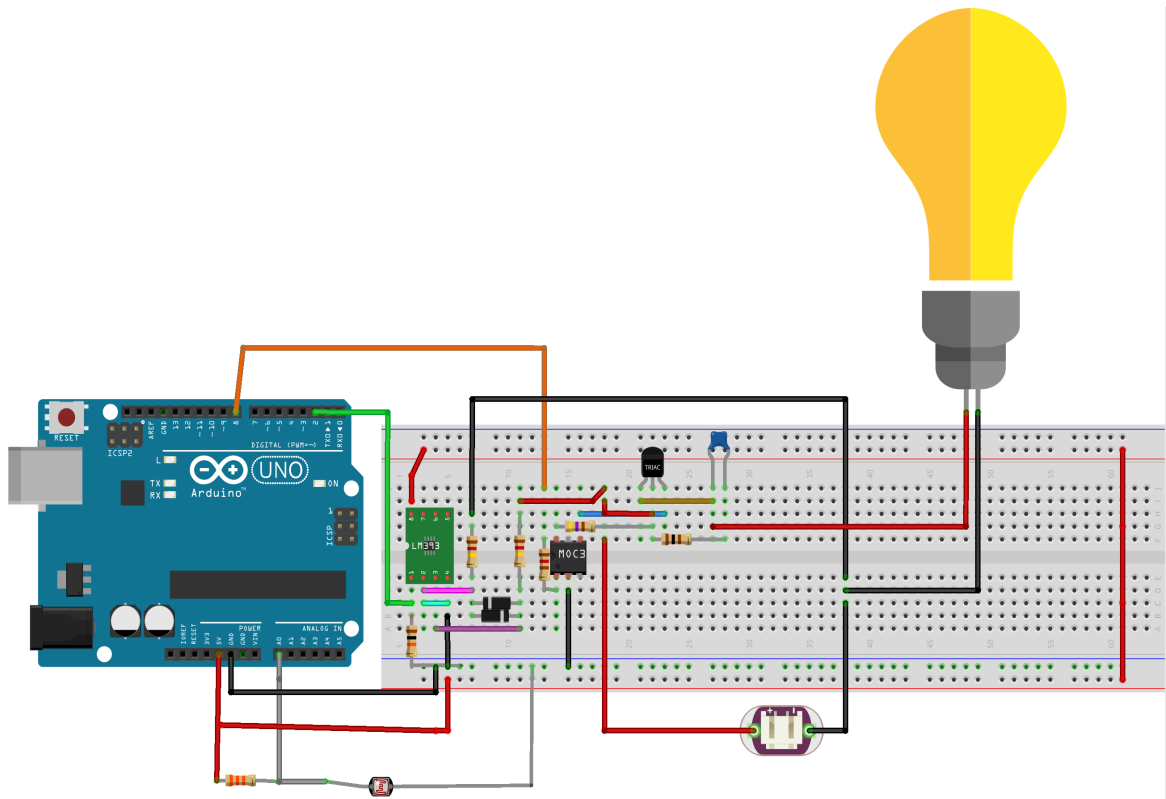


Figura 5.11: Diagrama de conexión del circuito.

Para la experimentación se realizó un código en el que por medio de los pines analógicos de arduino se lee el valor de voltaje promedio en las LDR, el cual puede variar entre 0 y 5 volts, lo que a causa del convertidor analógico-digital de 10 bits del microcontrolador se puede expresar como valores del 0 al 1023.

Para calcular el retraso del ángulo, se calcula el retardo restando al valor máximo 1023 el valor obtenido de la LDR y el resultado se multiplica por 8.33 que es la mitad del periodo de la fuente. Al detectarse el cruce por cero en la corriente, se manda el pulso al TRIAC en ambos semiciclos.

En la Figura 5.12 se muestra el código utilizado en el microcontrolador arduino para variar la iluminación de acuerdo al valor en la LDR.

```
Dimmer_Tesis
#define triac_pulso  8
#define LDR          A0

bool ZC = 0;
uint16_t alfa;

void setup(void) {
  pinMode(triac_pulso, OUTPUT);
  digitalWrite(triac_pulso, LOW);
  attachInterrupt(0, det_ZC, CHANGE);
}

void det_ZC() {
  ZC = 1;
}

void loop() {

  if( ZC){
    alfa = (1023 - analogRead(LDR))*10;
    if(alfa > 9700){
      alfa = 9699;}

    if(alfa < 9700) {

      delayMicroseconds(alfa);
      digitalWrite(triac_pulso, HIGH);
      delayMicroseconds(200);
      digitalWrite(triac_pulso, LOW);

    }
    ZC = 0;

  }
}
```

Figura 5.12: Código utilizado en la experimentación.

Para la demostración del funcionamiento del circuito experimental, se adjuntan imágenes bajo distintas condiciones de iluminación.

En la Figura 5.13 se aplicó luz a las LDR con una lámpara, en la cual se realizó la medición en el multímetro donde se observa que su voltaje es de 0.16 volts.



Figura 5.13: Circuito experimental con luz aplicada en las LDR.

La Figura 5.14 muestra el circuito en la misma habitación, pero con iluminación externa proveniente de la ventana, en la medición se observa que hay 1.62 volts que es el valor que llega al microcontrolador.

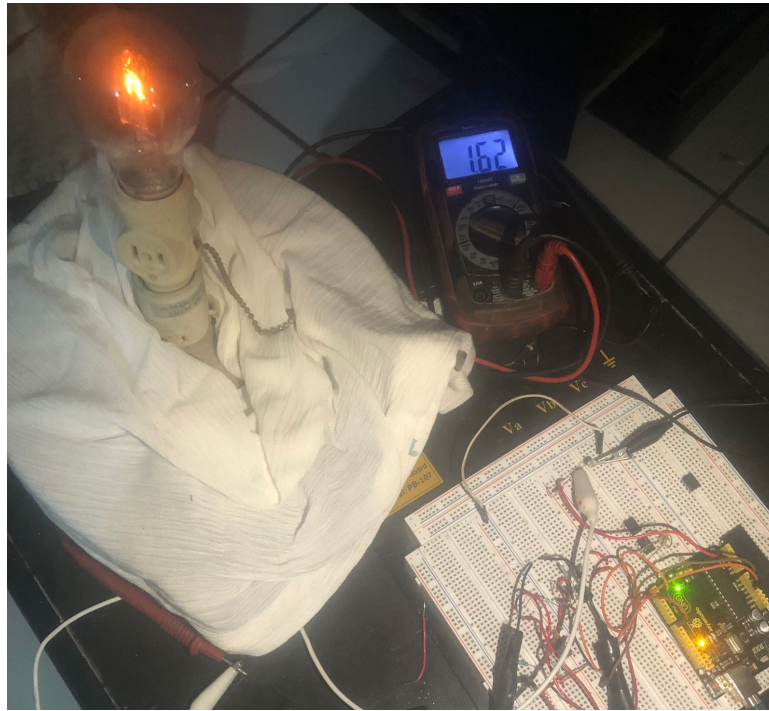


Figura 5.14: Circuito experimental con luz exterior en la habitación.

En la Figura 5.15 no se aplicó condición al circuito experimental, en la medición realizada se obtuvieron 2.33 volts.

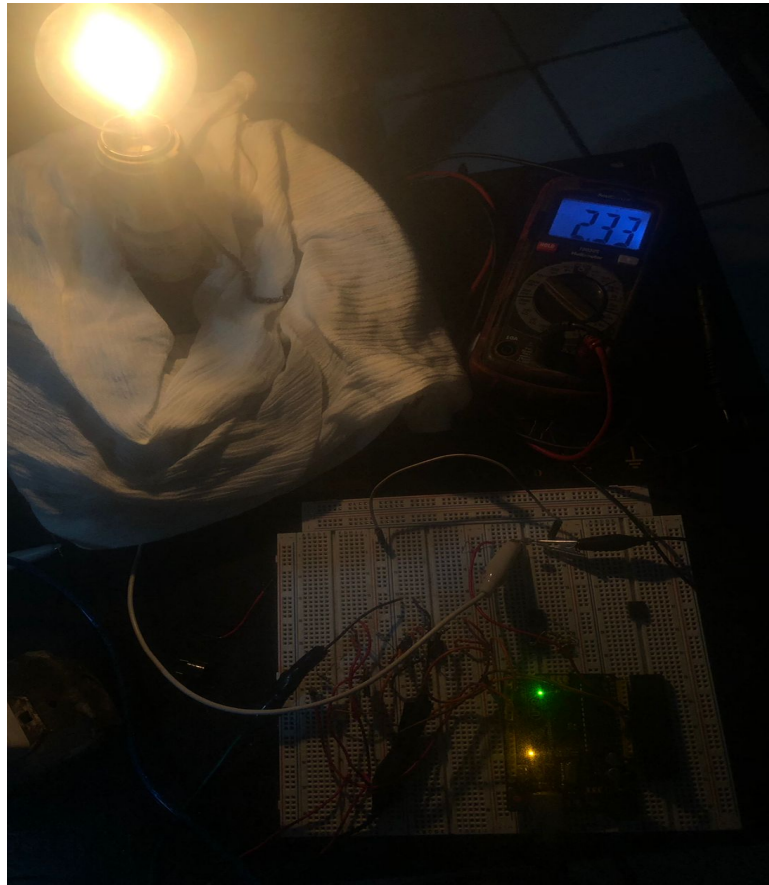


Figura 5.15: Circuito experimental en condiciones normales.

Para observar el comportamiento del circuito cuando hay mayor oscuridad, se colocó un objeto pequeño sobre las LDR para proporcionar sombra, en esta ocasión se midieron 2.95 volts como se muestra en la Figura 5.16.



Figura 5.16: Circuito experimental con un objeto pequeño.

Por ultimo, se utilizo un objeto mas grande para dar mas sombra sobre las LDR, en este caso se obtuvo una medicion de 3.39 volts como se observa en la Figura 5.17.

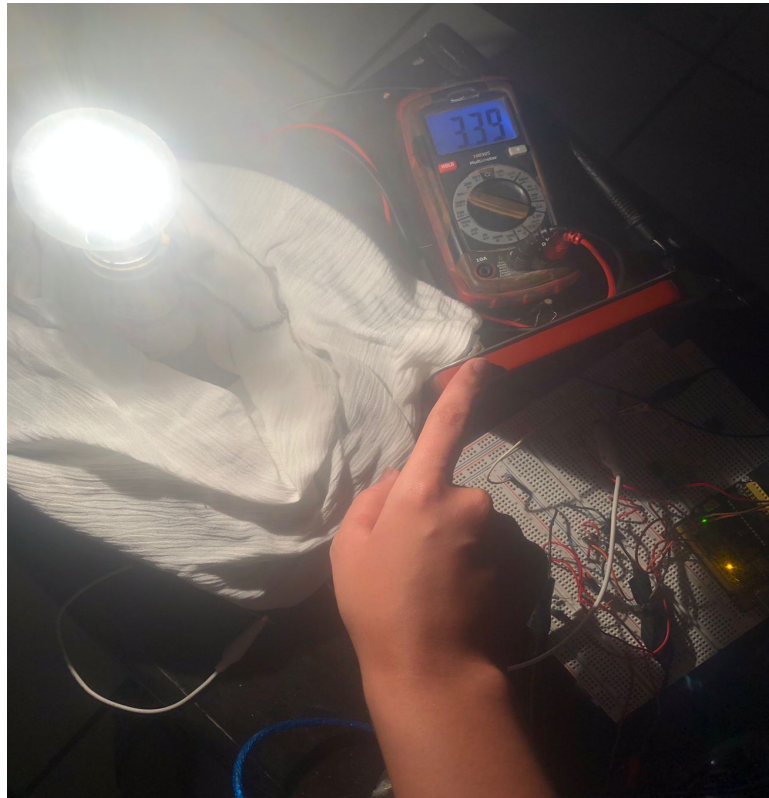


Figura 5.17: Circuito experimental con un objeto grande.

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSIONES

Para concluir, se pudo desarrollar el prototipo experimental para el ahorro de energía, dando como resultado un sistema que se autorregula dependiendo del sensado de la iluminación, variando el voltaje entregado a la carga, por lo cual no se entrega un voltaje constante de 120 Volts, sino un voltaje que puede variar de 0 a 120 Volts según los requerimientos dados por la iluminación ambiental.

Se realizó el estudio de los controladores de voltajes y las principales configuraciones que presentan, como el principio de abrir y cerrar y el principio de fase, este último dividiéndose en dos tipos de control, control unidireccional y control bidireccional, para llevar a cabo el prototipo se eligió la última configuración, donde se puede regular ambas partes del ciclo del voltaje. Gracias al estudio de las principales configuraciones se pudo calcular el voltaje, corriente y potencia de la carga al variar el ángulo de disparo, con estos cálculos posteriormente pudimos realizar la experimentación con las LDR's.

Por último, se diseñó, modeló y simuló el prototipo. Para la parte de diseño, se tuvo que implementar un circuito para separar la parte de potencia y la del microcontrolador, esto para aislar lo que funciona con corriente directa y con corriente alterna en el circuito. Para la simulación se simularon los dos tipos de controles del principio de fase, el controlador bidireccional y unidireccional, dichas simulaciones se hicieron en Multisim y Simulink, las cuales permitieron corroborar que los cálculos previamente realizados eran correctos y que la conexión del circuito era la correcta. Para verificar los valores medidos en los simuladores, se realizaron programas en Matlab con las ecuaciones de ambos controladores, y en ambos coincidían con lo medido.

Al realizar la investigación del estado del arte, se identificó en que se utilizan frecuentemente este tipo de circuitos, entre los temas relacionados con la tesis se pudo reflexionar el impacto que representa un sistema que se autorregula, pues no solo presenta un ahorro económico y mejoras ambientales, también la comodidad que se puede brindar para los usuarios.

Al desarrollar el sistema luminario adaptable a la iluminación ambiental se pudo observar en la experimentación que cuando se detecta mayor iluminación el voltaje recibido en el microcontrolador es menor, por lo que se envía un ángulo de retraso mayor al Triac y la iluminación en el foco es menor. Cuando se detecta menor iluminación sucede lo contrario y al enviarse el pulso con un ángulo de retraso más pequeño, la cantidad de luz en el foco es mayor.

Si este tipo de sistemas se aplicaran como en distintas ciudades que adoptaron el nombre de ciudades inteligentes representaría un avance tecnológico e implicaría ventajas significativas.

# Referencias

- [1] Dorota Sikora-Fernández. Factores de desarrollo de las ciudades inteligentes. *Revista Universitaria de Geografía*, 26(1):135–152, 2017.
- [2] Sara Ivars Bañuls. Diseño de sistemas de iluminación inteligente para el desarrollo de ciudades sostenibles. 2018.
- [3] Current Powered by GE. Iluminación inteligente en Áreas urbanas ventajas e beneficios de su aplicación en grandes centros. 2020.
- [4] K Raghavendra Naik, Bhooshan Rajpathak, Arghya Mitra, and Mohan Lal Kolhe. Assessment of energy management technique for achieving the sustainable voltage level during grid outage of hydro generator interfaced dc micro-grid. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46:101231, 2021.
- [5] Sunil Kumar Sansaniwal, Jyotirmay Mathur, and Sanjay Mathur. Quantifying occupant’s adaptive actions for controlling indoor environment in naturally ventilated buildings under composite climate of india. *Journal of Building Engineering*, 41:102399, 2021.
- [6] Amir Tabadkani, Astrid Roetzel, Hong Xian Li, Aris Tsangrassoulis, and Shady Attia. Analysis of the impact of automatic shading control scenarios on occupant’s comfort and energy load. *Applied Energy*, 294:116904, 2021.
- [7] Amir Tabadkani, Astrid Roetzel, Hong Xian Li, and Aris Tsangrassoulis. A review of automatic control strategies based on simulations for adaptive facades. *Building and Environment*, 175:106801, 2020.
- [8] Afagh Mohagheghi and Mehrdad Moallem. Intelligent spectrum controlled supplemental lighting for daylight harvesting. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020.
- [9] A Cziker, M Chindris, and Anca Miron. Implementation of fuzzy logic in daylighting control. In *2007 11th International Conference on Intelligent Engineering Systems*, pages 195–200. IEEE, 2007.
- [10] Muhammad H Rashid. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación, 2004.
- [11] NED UNDELAND MOHAN et al. *ELECTRONICA DE POTENCIA: CONVERTIDORES, APLICACIONES Y DISEÑO/NED MOHAN, TORE M. UNDELAND Y WILLIAM P. ROBBINS*. Number TK7881. 15. M64 2009. 2009.

- [12] Daniel W Hart, Vuelapluma, and Andrés Barrado Bautista. *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, España, 2001.
- [13] Oleg Sergiyenko, Julio C Rodríguez-Quiñonez, and Wendy Flores-Fuentes. *Examining Optoelectronics in Machine Vision and Applications in Industry 4.0*. IGI Global, 2021.
- [14] Jesus Elias Miranda Vega. *Minimización de efectos de intensidad de luz excesiva en el ambiente real de operación de un sistema de barrido para monitoreo de salud estructural*. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Baja California, 2019.