

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO / INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**TÍTULO DE LA TESIS**

Control electrónico de láser para aplicación en celda fotoacústica

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**PRESENTA:**

Ing. Luis Miguel Mendoza Hernández

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. José de Jesús Agustín Flores Cuautle

Fecha: Agosto 2021

## Contenido

Índice de figuras .....	5
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	6
1.1 INTRODUCCIÓN .....	6
1.2 PROBLEMÁTICA .....	7
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	9
1.4 HIPÓTESIS .....	11
1.5 OBJETIVO GENERAL.....	11
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
1.7 LÍMITES Y ALCANCES .....	11
1.7.1 LÍMITES .....	11
1.7.8 ALCANCES.....	12
1.8 METODOLOGÍA.....	12
1.8.1 ANALIZAR LA PROBLEMÁTICA .....	12
1.8.2 ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN .....	12
1.8.3 EFECTO FOTOACÚSTICO.....	13
1.8.4 INVESTIGACIÓN DE PROYECTOS O TRABAJOS SIMILARES .....	13
1.8.5 DELIMITAR EL TRABAJO.....	13
1.8.6 DEFINIR VARIABLES .....	13
1.8.7 DISEÑO .....	14
1.8.8 DEFINIR MATERIALES A UTILIZAR.....	14
1.8.9 COTIZACIÓN DE MATERIALES.....	14
1.8.10 CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO .....	15
1.8.11 PRUEBAS FINALES.....	15
1.9 ESTADO DEL ARTE .....	16

1.9.1 CHARACTERIZATION OF THE LINEAR-ACOUSTIC MATERIAL BEHAVIOR OF FIBER-REINFORCED COMPOSITES USING LAMB WAVES.....	16
1.9.2 SISTEMA DE CALENTAMIENTO ESCALONADO PARA LA MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....	16
1.9.3 THERMAL DIFFUSIVITY OF Si (100) AND GaSb SINGLE CRYSTALS .....	17
1.9.4 DESARROLLO DE UN SISTEMA FOTOPIROELECTRICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES.....	18
1.9.5 Sistema de control de láser semiconductor con fines docentes para prácticas de laboratorio.....	19
1.9.6 SISTEMA DE CONTROL PARA LÁSER SEMICONDUCTOR DE ALT POTENCIA .....	19
1.9.7 Diseño de fuentes de corriente directa.....	20
1.10 ESTADO DEL CAMPO .....	21
1.10.1 Controlador de diodo láser HPLDD-60 A-24 V-F .....	22
1.10.2 Controlador de diodo láser LPLDD-5A-24V-PID .....	22
1.10.3 LD1255 Controlador láser de corriente de precisión de 250 mA.....	23
1.10.4 LD3000R Controlador de diodo láser .....	24
1.11 MARCO TEÓRICO.....	25
1.11.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA .....	25
1.11.2 EFECTO FOTOACÚSTICO .....	26
1.11.3 Ondas sonoras.....	29
1.11.4 Amplificador Lock-in.....	32
1.11.5 Micrófono electret .....	32
1.11.6 Láser .....	33
Capítulo 2 Desarrollo.....	35
Resultados .....	42
Conclusiones .....	45
Producto.....	45

Anexo .....	46
REFERENCIAS.....	50

## Índice de figuras

Figura 1 Configuración de dispositivo óptico para generar ondas ultrasónicas mediante un láser obtenida de [6].	16
Figura 2 Sistema de medición fotoacústico tomada de [8].	18
Figura 3 Prototipo del control láser de alta potencia terminado, tomada de [11].	20
Figura 4 Fuente de voltaje de 10 A. Tomada de [12].	21
Figura 5 Controlador HPLDD-60A-24V-F tomada de [13].	22
Figura 6 Driver LPLDD-5 <sup>a</sup> -24V-PID. Tomada de [13].	23
Figura 7 Driver LD1255R. Imagen tomada de [14].	24
Figura 8 Controlador de corriente constante de 2.5 A. Tomada de [14].	24
Figura 9 Esquema de una celda fotoacústica tomada de [16].	27
Figura 10 Vista transversal de una cámara fotoacústica cerrada [17].	27
Figura 11 Cámara fotoacústica abierta [17].	28
Figura 12 Comparación entre rayos X, imagen combinada e imagen fotoacústica, tomada de [13].	29
Figura 13 Simulación de circuito estable en Multisim 13.0	37
Figura 14 Prueba de circuito modulador de frecuencia.	38
Figura 15 Simulación de fuente de corriente de 9.45 a 37.94 mA.	40
Figura 16 Fuente de corriente.	40
Figura 17 Prueba de fuente de corriente.	41
Figura 18 Diagrama del control.	42
Figura 19 Pruebas físicas del controlador.	43
Figura 20 Grafica comparativa de valores experimentales y ecuación propuesta.	44

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 INTRODUCCIÓN

En el presente contenido se muestra el trabajo de investigación y la construcción de un control electrónico con fines de ayuda para un sistema de medición de conductividad térmica para diferentes materiales mediante técnicas fototérmicas haciendo uso de una celda fotoacústica.

Las técnicas fototérmicas se basan en la detección de ondas generadas por un material como consecuencia de la interacción con un haz de luz modulado o pulsado a diferentes frecuencias, las cuales son captadas por medio de un micrófono, estas ondas llevan información sobre las propiedades térmicas de los materiales[1].

La importancia de crear un control electrónico para que un láser pueda ser utilizado en este tipo de técnicas recae en la parte de la modulación de la luz, no solo en poder modificar la frecuencia de encendido y apagado, sino también en controlar la corriente y por consiguiente la intensidad del haz luminoso.

A pesar de no ser técnicas recientes su aplicación y variantes no dejan de dar resultados importantes, por ende, es que actualmente se ha retomado el uso de estas técnicas para buscar nuevos conocimientos.

En este trabajo se crea un control electrónico para que un láser pueda ser capaz de adaptarse a una celda fotoacústica, que tenga un rango de trabajo controlado tanto de frecuencia como de corriente, todo esto con la finalidad crear un trabajo en conjunto para la medición de la conductividad térmica de diferentes materiales y así poder adquirir y analizar datos experimentales necesarios para la fiabilidad de diferentes materiales en distintos usos.

Así mismo se abordan temas importantes para la comprensión de dicho trabajo como el por qué es necesario obtener datos mediante este tipo de técnicas, por lo cual es necesario contestar a las siguientes preguntas de investigación y que dan pie a este trabajo: ¿qué es una técnica fototérmica?, ¿en qué consiste una celda fotoacústica?, ¿para qué sirve saber la conductividad térmica de los materiales? Y ¿por qué tener control sobre un diodo láser?

## 1.2 PROBLEMÁTICA

El estudio de las propiedades de los materiales es indispensable para poder determinar diferentes aspectos como lo son su tiempo de vida, su utilidad en diferentes campos, su flexibilidad, su conductividad térmica, etc. siendo este último una de las propiedades más importantes hoy en día.

El uso cada vez más extendido de fuentes de energía térmica hace necesario el conocimiento de las propiedades térmicas, especialmente en sólidos cuando estos son utilizados en aplicaciones tales como recubrimientos, materiales aislantes, etc.

La determinación de la conductividad térmica en líquidos es necesaria para conocer de mejor manera el comportamiento térmico de los mismos al ser utilizados en aplicaciones que requieran de transferencia térmica.

Para el estudio de la conductividad térmica en líquidos se han utilizado diversas técnicas entre las que sobresalen las técnicas fototérmicas, en donde, la interacción de la luz con la materia proporciona una forma eficaz y no destructiva para el estudio de las propiedades térmicas en general.

Las técnicas fototérmicas están basadas en un haz de luz modulada que se hace incidir sobre una muestra o sobre un detector piroeléctrico, ambos en íntimo contacto térmico.

La modulación del haz de luz en este tipo de técnicas debe de ser en frecuencia y/o intensidad dependiendo el material a analizar y la técnica de análisis seleccionada, anteriormente se empleaban interruptores físicos del haz de luz (chopper) y con la ayuda de un amplificador Lock-in se generan los pulsos.

La modulación del haz de luz en este tipo de técnicas debe de ser en frecuencia y/o intensidad dependiendo el material a analizar y la técnica de análisis seleccionada, anteriormente se empleaban interruptores físicos del haz de luz (chopper) y con la ayuda de un amplificador Lock-in se generan los pulsos.

En grandes laboratorios se utilizan láser muy sofisticados los cuales incluyen un control electrónico, sin embargo, el precio de este tipo de equipo los convierte en algo prohibitivo para pequeños laboratorios.

Por otro lado, la aparición de láser de estado sólido de bajo costo permite que se pueda tener fácil acceso a este tipo de tecnología, teniendo como desventaja el hecho de que este tipo de dispositivos carecen de un control que permita modificar su intensidad o encendido y apagado.

Por lo cual el desarrollo de un control electrónico para láseres de bajo costo permitiría desarrollar montajes de técnicas fototérmicas de una manera más económica y accesible para pequeños laboratorios, y al mismo tiempo proporciona una herramienta para aplicaciones en las que el uso de fuentes de luz moduladas en intensidad o frecuencia sea necesario.



### 1.3 JUSTIFICACIÓN

El crecimiento del uso de energías alternativas se ha incrementado en los últimos años, energías renovables como la biomasa, el biogás, energía solar térmica y geotermia son las más consideradas en estos días, siendo la biomasa la que produce la mayor parte de energía térmica en el mundo, este tipo de energías requieren de materiales especiales para poder soportar o guardar los cambios de temperatura que se provocan [2].

El análisis de los materiales se consigue mediante diferentes técnicas, una de ellas es la técnica fotoacústica, la cual la constituyen diferentes elementos. Uno de ellos es un haz de luz modulado el cual genera la excitación de la muestra, es por ello que es importante tener el control de las pulsaciones de esa luz, así como también controlar su corriente dado que los materiales a analizar pueden llegar a tener diferentes características.

El estudio de materiales para este tipo de energías alternativas suele requerir características muy específicas, para ello se deben analizar sus diferentes propiedades físicas para poder determinar si es viable o no para este tipo de aplicaciones.

Una de las propiedades más importantes de los materiales es la conducción térmica, esta es indispensable en aspectos tales como cuestiones de recubrimiento, aislantes, etc. Es por ello que, se debe medir dicha capacidad para obtener información objetiva que ayude a la confiabilidad de uno o varios materiales para ser usados en procesos de energías alternativas.

De igual forma la aparición de nuevas técnicas en el área de la medicina que hacen uso de transferencia térmica hacen necesario el conocimiento de las propiedades térmicas de los materiales. La hipertermia que consiste en el calentamiento de tejidos hasta el punto de ablación o la microscopía fotoacústica son algunos de los ejemplos recientes en el ámbito de la medicina cuyos principios de funcionamiento están basados en fenómenos térmicos, para los cuales es necesario conocer las propiedades térmicas de todos los elementos usados en este tipo de técnicas[3]–[5].

El poder controlar tanto la frecuencia como la corriente del láser resulta muy importante en las técnicas fotoacústicas dado que gracias a ello es posible analizar diferentes muestras desde películas delgadas o de mayor volumen.

## 1.4 HIPÓTESIS

Es posible diseñar y construir un sistema electrónico capaz de controlar de manera mecánica la frecuencia y la corriente de un láser de estado sólido, con la finalidad de ser utilizado en sistemas de medición fotoacústicos.

## 1.5 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema electrónico capaz de manipular la corriente y frecuencia de un láser de estado sólido.

## 1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer el funcionamiento de un sistema de medición fotoacústico.
- Diseñar y construir una fuente de corriente variable de 5mA a 40mA.
- Diseñar y construir un circuito variador de frecuencia.
- Desarrollar un controlador de láser que pueda adecuarse a una celda fotoacústica.
- Realizar un control para un láser que contenga la fuente de corriente y el variador de frecuencia.

## 1.7 LÍMITES Y ALCANCES

### 1.7.1 LÍMITES

El controlador solo será capaz de funcionar a frecuencias definidas por lo cual sólo servirá para analizar materiales que cumplan ciertas características.

Los parámetros de diseño serán definidos para controlar un láser que cumpla con dichas características. Con ello este sistema funcionará con dispositivos que se adecuen a ciertos parámetros.

El circuito debe de cumplir con ciertos requisitos de alimentación, también se debe de tener cuidado en el manejo del mismo, por ejemplo, primero se debe de conectar el láser antes de encender la fuente de alimentación, de ninguna manera de forma contraria, ya que esto dañaría severamente el dispositivo emisor de luz.

El ajuste de los parámetros a controlar será manual, dado que el circuito se regulará mediante dos potenciómetros.

### 1.7.8 ALCANCES

El circuito electrónico será capaz de trabajar en un rango definido, sin embargo, podrá ser regulado con la ayuda de dos potenciómetros, uno que regulará la corriente y otro que se encargará de la frecuencia, dichos elementos tendrán un apoyo visual el cual ayude al operador a saber el rango de funcionamiento y en qué frecuencia y a qué corriente se encuentra trabajando.

Al ser un circuito ajustable tendrá un rango de medición en cuanto a longitud de onda y servirá para analizar diferentes muestras con distintas características.

Los elementos que influyen directamente en la frecuencia (resistencias) serán fáciles de desmontar, para así poder cambiarlos y tener nuevos rangos de frecuencia calculable mediante cálculos, esto con la finalidad de tener un rango más amplio en cuanto a muestras a analizar se refiere.

Así mismo el control podrá ser ajustable en cuanto a corriente para poder utilizar diferentes láseres que puedan adaptarse a estas características de funcionamiento haciendo el control multimodo en este aspecto.

## 1.8 METODOLOGÍA

### 1.8.1 ANALIZAR LA PROBLEMÁTICA

Se toman en cuenta las diferentes problemáticas o trabajos en curso sugeridos por el asesor y se analizarán conforme al conocimiento y herramientas que se tengan.

Una vez elegido el problema a resolver, se realizará una investigación vía web para verificar la importancia de tratar dicho tema y por qué no se ha podido resolver, con esto se obtendrá una idea más clara en donde comenzar a trabajar.

### 1.8.2 ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN

Ya teniendo el problema a resolver elegido, se buscarán las alternativas de solución mediante el uso de una celda fotoacústica, a las soluciones que se encuentren se les comparará para determinar la que sea más acorde al trabajo.

### 1.8.3 EFECTO FOTOACÚSTICO

Se deberá tener conocimiento de diferentes temas para poder abordar el proyecto, en especial el funcionamiento de un efecto fotoacústico para ello se recurrirá a la literatura y a los diferentes medios en los cuales se pueda obtener información (vídeos, profesores, compañeros, etc.).

Otro tema importante del cual se debe tener un amplio conocimiento es el funcionamiento de una celda fotoacústica al igual que se menciona en el párrafo anterior se deberá recurrir a los diferentes medios ya antes mencionados.

### 1.8.4 INVESTIGACIÓN DE PROYECTOS O TRABAJOS SIMILARES

Se busca en la región sistemas o trabajos parecidos que den o intentar dar solución a la problemática elegida.

También se hará el uso de la web para investigar proyectos similares que se hayan o estén dando en diferentes partes del mundo, con esto mismo se analizará si existen patentes o alguna solicitud.

Al realizar la comparación de trabajos similares se tendrá un mejor panorama de dónde y en que se debe comenzar a trabajar, así se podrán fijar los alcances y hasta el mismo costo del trabajo a realizar.

### 1.8.5 DELIMITAR EL TRABAJO

Ya conociendo el estado del arte se puede saber en qué se comenzará a trabajar, una parte muy importante que se debe tener en cuenta son las limitaciones de proyecto, en esta parte se debe considerar aspectos como los son el tiempo en el que se deberá concluir, los costos, la dificultad para conseguir ciertos materiales, las variables con las que se trabajarán, el tamaño ya que de este dependerá el tipo de muestras, etc.

### 1.8.6 DEFINIR VARIABLES

Uno de los puntos más importantes a tomar en cuenta son las variables, en este punto se deberá saber cuáles se tendrán que medir o manipular en el sistema, definir cuáles serán las variables dependientes, independientes o/e intervinientes.

### 1.8.7 DISEÑO

El diseño se comenzará con un bosquejo el cual se hará a lápiz y papel, en esta parte se podrán tomar en cuenta las dimensiones, después se realizará un dibujo en algún software el cual ayude a dividir el equipo en partes para su fácil construcción.

Se dividirá el trabajo en tres partes principales: diseño mecánico, electrónica y programación.

En el diseño mecánico se tomará en cuenta que material ocupará, el dibujo y diseño, dimensiones, etc. En la parte electrónica se propondrá un circuito al igual que en la parte de programación un lenguaje, mismos que pueden o no ser cambiados en el transcurso del trabajo.

### 1.8.8 DEFINIR MATERIALES A UTILIZAR

Los materiales que se deberán elegir estarán sujetos a las limitaciones antes mencionadas tomando en cuenta costos y disponibilidad. Como en el diseño, este apartado también se dividirá en tres partes fundamentales: por parte de la estructura se definirán el o los materiales de los cuales estará hecha, así mismo se tomará en cuenta si estará sellada o atornillada.

En la parte electrónica se tendrá que contemplar si se ocupará un microcontrolador o algún arreglo electrónico, también se toma en cuenta si es indispensable hacer una placa o complementar con un equipo externo, de tal modo que el equipo sea austero.

Por último, si se llegase a ocupar una tarjeta programable para el control o captación de variables, se definirá el lenguaje en el que se llevará a cabo la programación del sistema.

### 1.8.9 COTIZACIÓN DE MATERIALES

Para tener una idea del costo del sistema se deberá hacer un estudio de mercado para cotizar todos los materiales que se ocuparán, se acudirán a diferentes tiendas locales e incluso proveedores extranjeros con el fin de conseguir el mejor precio

disponible en la actualidad, tomando en cuenta el tiempo de envío y el costo como los factores principales.

#### 1.8.10 CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO

Teniendo la teoría necesaria y los materiales ya definidos se comenzará a hacer diferentes pruebas del funcionamiento del sistema, esto con la finalidad de reducir errores en el trabajo final.

Cuando se logre la mejor respuesta posible o la deseada se concluirá el armado del sistema, para ello se debe tomar en cuenta las normas que puedan contribuir al sistema (en caso de ser necesario).

#### 1.8.11 PRUEBAS FINALES

Una vez concluido el armado del proyecto, se realizarán las pruebas y mediciones correspondientes en diferentes materiales, en esta parte se podrán hacer ajustes para mejorar el sistema como la sustitución de algún componente, la integración de elementos o incluso la reducción del sistema si así se requiriera.

## 1.9 ESTADO DEL ARTE

A continuación, se muestran los diferentes trabajos relacionados con los temas que se abordan en el presente trabajo, muchos de ellos están enfocados a diferentes apartados del tema, principalmente con la medición de la conductividad térmica de materiales por distintos métodos, diseño de controladores láser, fuentes de corriente y el efecto fotoacústico.

### 1.9.1 CHARACTERIZATION OF THE LINEAR-ACOUSTIC MATERIAL BEHAVIOR OF FIBER-REINFORCED COMPOSITES USING LAMB WAVES

En este trabajo se presenta la medición de ondas *Lamb* en compuestos reforzados de fibra, y aunque pareciera que no tiene mucho que ver con el trabajo aquí presentado, utilizan el efecto fotoacústico para provocar ondas ultrasónicas provocadas por una muestra en forma de placa, que es lo que aquí se pretende.

La configuración que se muestra en la siguiente figura (que se muestra en la investigación estudiada) está diseñada precisamente para muestras como en las que se pretenden trabajar, en la figura se muestra un dispositivo óptico junto con un espejo que están montados en un actuador lineal que con el movimiento enfoca pulsos láser que excita a la muestra a genera las ondas ultrasónicas [6].

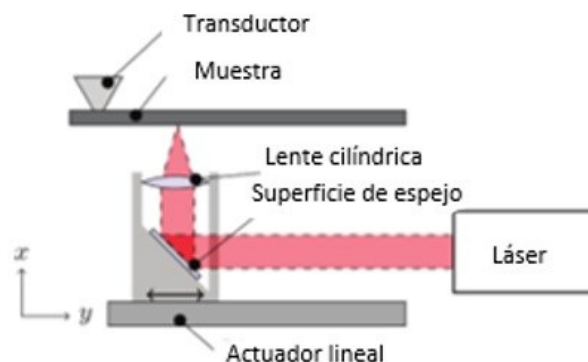


Figura 1 Configuración de dispositivo óptico para generar ondas ultrasónicas mediante un láser obtenida de [6].

### 1.9.2 SISTEMA DE CALENTAMIENTO ESCALONADO PARA LA MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Este trabajo detalla un sistema escalonado para la medición de la conductividad térmica, éste utiliza las ventajas de los métodos dinámicos y los métodos



estacionarios. Según el autor y los resultados obtenidos este sistema obtiene mediciones rápidas y confiables.

A pesar de que no utiliza el efecto fotoacústico como punto principal para la medición si menciona que la conductividad térmica proporciona relación de las propiedades dinámicas en los portadores de carga, en la interacción mutua y con el medio al que están expuestos. Por otra parte, menciona que existen varias técnicas que funcionan para la medición de conductividad térmica pero que estas cambian según el tipo de muestras o a la clase de materiales que se desean analizar, se debe tomar en cuenta principalmente la temperatura a la que se desea realizar mediciones, las propiedades físicas de la muestra y el tamaño [7].

### 1.9.3 THERMAL DIFFUSIVITY OF Si (100) AND GaSb SINGLE CRYSTALS

Los autores de esta investigación utilizan principalmente la fotoacústica en configuración abierta y cerrada para la caracterización de monocristales para compuestos semiconductores. Para la determinación de la difusividad térmica en los materiales utilizaron láseres con longitud de onda distintos.

La implementación experimental de esta investigación se muestra a continuación en la figura 2, consiste principalmente en la excitación de la muestra por medio de láseres de estado sólido modulados a diferentes frecuencias mediante un obturador mecánico (chopper) que va colocado antes de que el láser haga contacto con la muestra. Las señales obtenidas son detectadas por un micrófono (transductor) y amplificadas por un amplificador *lock-in* digital, finalmente llega a una computadora vía *USB* donde registran la fase y la amplitud fotoacústica mediante un programa realizado en *LabView* [8].

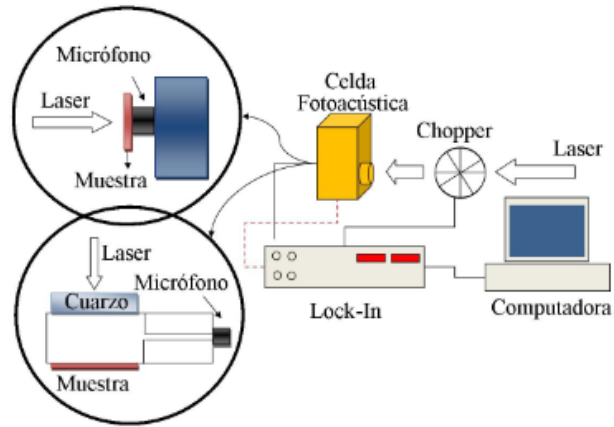


Figura 2 Sistema de medición fotoacústico tomada de [8].

Después del análisis que implementó el autor en el presente trabajo deduce que, si existe diferencia entre una configuración fotoacústica abierta y una cerrada, pero la atribuye a fenómenos de recombinación no radiativa superficial y volumétrica, pero la recomienda ambos métodos para determinar parámetros como la difusividad térmica.

#### 1.9.4 DESARROLLO DE UN SISTEMA FOTOPIROELECTRICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES

El trabajo revisado muestra otro tipo de configuración para una celda fotoacústica no muy diferente a los anteriores ya mencionados, pero no deja de utilizar la técnica fotoacústica. El autor explica que somete la muestra a variaciones de temperaturas (ondas térmicas) para poder medir la atenuación de pulsos a través de la muestra.

Las mediciones realizadas fueron de baja frecuencia ya que comentan que en esta tuvieron más variaciones en las características térmicas. Para lograr tener un punto de referencia utilizaron un líquido con características térmicas conocidas sometido a la misma atenuación y pulsación del láser, con ello se logra obtener la difusividad térmica de las muestras.

Este sistema contiene menos elementos que los citados anteriormente, pero funciona de forma similar, uno de los componentes principales es el micrófono que lo utilizan con el mismo motivo, el captar las ondas emitidas por la muestra. Existen dos configuraciones para este sistema:

La configuración trasera consiste en irradiar la muestra directamente con el láser con el fin de generar mayor temperatura en la muestra.

La otra configuración es la inversa, al contrario de la anterior, aquí el láser incide directamente sobre el sensor que se encuentra en contacto con la muestra.

El autor le da preferencia a la técnica de celda fotoacústica abierta asumiendo que tiene una mayor ventaja que la cerrada y que una de las ventajas es que la señal aumenta con respecto al ruido y la medición para la difusividad térmica es más precisa [9].

#### 1.9.5 Sistema de control de láser semiconductor con fines docentes para prácticas de laboratorio

La importancia de controlar la corriente suministrada a cualquier diodo láser es fundamental para el funcionamiento óptimo del mismo, con ello se evita principalmente que el láser pueda quemarse. Aquí se menciona que no importando que los láseres sean de un mismo tipo cada fabricante le proporciona características propias como lo es la potencia de radiación o la corriente de operación, por lo cual, cada dispositivo se debe de controlar de manera diferente por esta razón cada fabricante o la mayoría proporciona los drivers para sus productos, sin embargo, estos elevan considerablemente el costo.

Los autores de este artículo desarrollaron un control para un láser semiconductor con fines didácticos, entre las funciones que cumple el control se encuentra el de poder controlar la potencia de emisión por lo cual manipularon la corriente mediante un potenciómetro digital, un transistor, un amplificador operacional, un microcontrolador y un teclado con el cual aumentan o disminuyen la potencia.

Los resultados son satisfactorios para medios didácticos logrando la familiarización de los usuarios con estos tipos de láseres y mediante el método de manera directa lograron medir la corriente de operación y la de ruptura [10].

#### 1.9.6 SISTEMA DE CONTROL PARA LÁSER SEMICONDUCTOR DE ALT POTENCIA

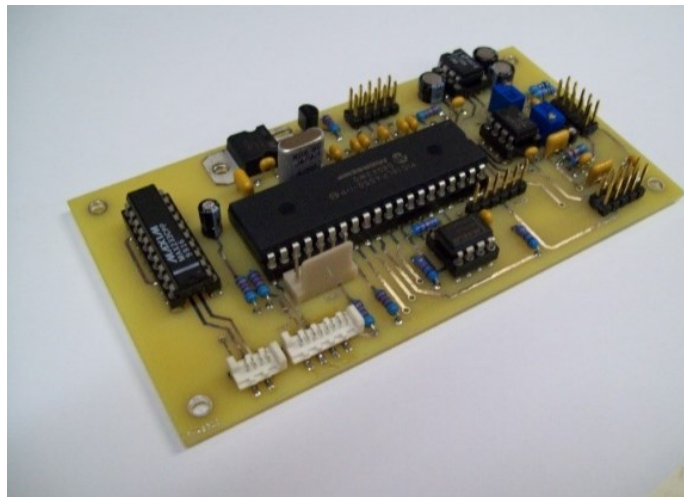
El presente artículo realza la utilidad que tienen los láseres semiconductores tanto en la medicina como en la industria debido a diferentes ventajas donde se

encuentran su bajo consumo energético, su eficiencia, su tiempo de vida, su costo y características físicas como peso y volumen.

Se enfocan en un láser de alta potencia ya que su finalidad es el ser utilizado en aplicaciones quirúrgicas, sin embargo, el objetivo es casi el mismo que se pretende (control de potencia de emisión).

En este caso el control está diseñado para un diodo de longitud de onda de 976 nm y con una potencia de 10 W, su sistema está compuesto por dos tarjetas que comprenden microcontroladores, circuitos que trabajan en conjunto y un driver, cada parte del sistema realiza una cierta función, la parte que interesa de este trabajo es la tarjeta de control debido a que en ella se controla la potencia de emisión del láser [11].

En la siguiente figura se muestra el prototipo terminado del control.



*Figura 3 Prototipo del control láser de alta potencia terminado, tomada de [11].*

#### 1.9.7 Diseño de fuentes de corriente directa

Los elementos principales de una fuente casi siempre son los mismos, rectificación, filtrado y regulación, sin embargo, hay otros puntos en los cuales hay que enfocarse si se quiere una fuente eficaz.

En [12] se mencionan elementos de referencia, muestreo, error y de control con la finalidad de darle entrada a los temas de los cuales se apoyaron para concluir su trabajo.

El circuito integrado principal que utilizan es el TL594 ya que cumple con los requerimientos solicitados y cumple con la función que se le quiere dar a la fuente, argumentando que la señal PWM, el voltaje de referencia y amplificadores que utilizan los contiene el mismo integrado, solo integrando algunos componentes externos.

Dentro de los arreglos que le proporcionan al circuito integrado se encuentra la parte limitante de corriente en la cual utilizan un amplificador operacional, en este caso la salida máxima de corriente es de 10 A, esto lo logran con una resistencia de carga de  $0.1 \Omega$  [12]. En la figura 4 se muestra el esquema electrónico final de la fuente.

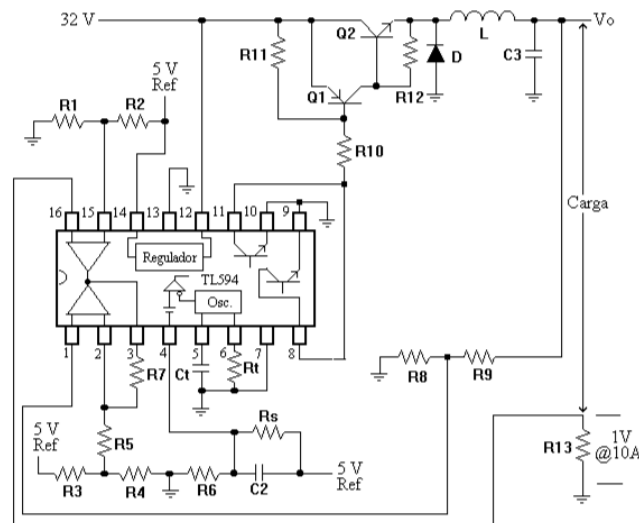


Figura 4 Fuente de voltaje de 10 A. Tomada de [12].

### 1.10 ESTADO DEL CAMPO

En el mercado ya existen productos encargados de controlar dispositivos láser, sin embargo, la mayoría están diseñados para dispositivos específicos que por lo general vienen en conjunto con el driver, por lo cual, su precio se convierte en un problema cuando se requieren en aplicaciones en las cuales el presupuesto es bajo o cuando no se requiere tanta precisión en su control.

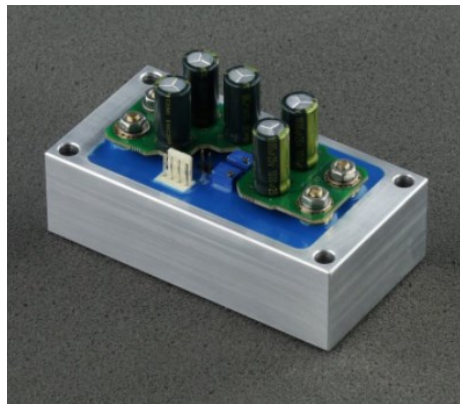
Controlar láseres con diferentes características es otro factor de desventaja que se tiene con los drivers del mercado, a continuación, se mencionan diferentes productos encontrados en el mercado.

#### 1.10.1 Controlador de diodo láser HPLDD-60 A-24 V-F

Este controlador tiene un costo aproximado de \$7980.00 está diseñado para láser de alta potencia tipo NIR, su fabricante es Opt Láseres, dentro de sus principales características se encuentra el poder controlar varios dispositivos en serie, tiene un ancho de banda de modulación de hasta 20 kHz, la potencia que tolera es de hasta 60W.

Requiere un voltaje de alimentación es de 12 volts, además requiere de otra alimentación que depende proporcionalmente al voltaje requerido por los diodos y este debe de ser un máximo de 3 v de diferencia, es decir, si un diodo láser requiere 2 v para funcionar, dicha entrada deberá ser de 5 v [13].

En la siguiente figura se muestra el driver y en la imagen se puede apreciar su disipador el cual está hecho de cobre en su interior.

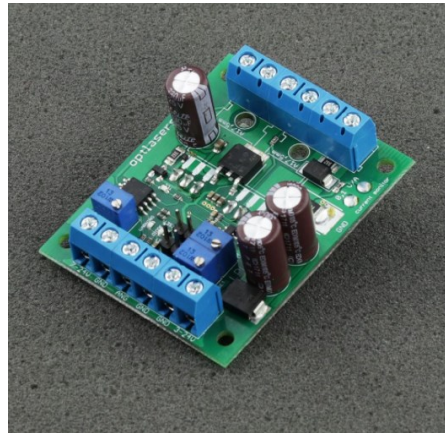


*Figura 5 Controlador HPLDD-60A-24V-F tomada de[13].*

#### 1.10.2 Controlador de diodo láser LPLDD-5A-24V-PID

Este controlador está diseñado para diodos láser de baja potencia ya que entrega como corriente de salida máxima 15 A y solo tiene un solo canal de salida, dentro de las ventajas con las que cuenta este driver es que tiene incluido un control de temperatura digital que está basado en un PID.

Su precio ronda alrededor de \$1340.00, sus salidas también son reguladas por potenciómetros, su tamaño es razonablemente pequeño y la entrada de alimentación para los diodos va desde los 3 hasta los 24 V. A continuación, se muestra la imagen del driver [13].



*Figura 6 Driver LPLDD-5<sup>o</sup>-24V-PID. Tomada de [13].*

#### 1.10.3 LD1255 Controlador láser de corriente de precisión de 250 mA

Este controlador de bajo costo está diseñado para dispositivos que consuman hasta 250 miliamperios, la regulación de corriente depende de un potenciómetro de ajuste de 12 vueltas, el precio aproximado de este drive es de \$3289.60 (sin envío). Dentro de sus principales ventajas se encuentra un pin de encendido/apagado para el láser, con esto ayuda a no tener que apagar o encender la fuente de alimentación directamente [14].

La placa del drive se compone mayormente por elementos smd y no cuenta con disipador por lo cual tiene un tamaño pequeño de 6.22 cm por 2.61 cm, en la siguiente figura se muestra el dispositivo.



Figura 7 Driver LD1255R. Imagen tomada de [14].

#### 1.10.4 LD3000R Controlador de diodo láser

Dentro de los controladores con los que cuentan los desarrolladores de THORLABS se encuentra este driver que soporta una corriente constante de hasta 2.5 A, el fabricante comenta que es un dispositivo de bajo ruido y muy estable. Como se puede ver en la siguiente figura, este controlador está protegido por una carcasa de aluminio que funciona a su vez como disipador.

El driver además de su tamaño tiene como ventaja que no solo sirve para diodos láser sino también para LED, está controlado por un trimpot de 12 vueltas, sin embargo, su costo es considerablemente alto para el uso que se requiere en el presente estudio ya que ronda alrededor de los \$3549.40 [14].



Figura 8 Controlador de corriente constante de 2.5 A. Tomada de [14].



## 1.11 MARCO TEÓRICO

### 1.11.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor, en otras palabras, es la capacidad para transferir energía cinética entre moléculas que estén en contacto.

Los tipos de transmisión de calor son los siguientes:

- Conducción: se genera mediante el contacto de materiales con diferentes temperaturas.
- Convección: este tipo de transmisión ocurre solo en líquidos o gases y ocurre mediante el movimiento del fluido ya sea de manera forzada o natural.
- Radiación: a diferencias de las anteriores en este caso no se necesita contacto entre los materiales, este tipo de transferencia sucede mediante ondas electromagnéticas.

Es esencial para los cálculos en balance de energía en aplicaciones de transferencia de calor, aunque existen varios manuales o libros que ya especifican las propiedades de algunos materiales, es indispensable conocer la conductividad térmica de nuevos materiales o de algunos que no se encuentren en la literatura [15].

En los materiales sólidos se define la ecuación de Fourier para la transferencia de calor por conducción la cual se muestra en la siguiente fórmula:

$$J = -K \frac{\partial T}{\partial x}$$

En donde:

J = flujo de calor.

K = es la conductividad térmica del material.

$\partial T$  = Diferencia de temperatura.

$\partial x$  = Distancia recorrida por el flujo.

De acuerdo con el sistema internacional de medida la conductividad térmica se mide en watts sobre Kelvin por metro ( $\frac{W}{K} * m$ ) y es equivalente a Joules sobre metro por segundo por Kelvin ( $\frac{J}{m} * s * K$ ).

#### 1.11.2 EFECTO FOTOACÚSTICO

El efecto fotoacústico consiste básicamente en variación de volumen del cuerpo, regularmente un gas, como consecuencia directa variaciones de temperatura en el cuerpo debidas a una luz de excitación. La absorción de la radiación causa cambios de temperatura del medio y un aumento local de la presión, lo que produce las vibraciones de sonido.

Su descubrimiento data hace más de 100 años cuando Alexander Graham Bell descubrió que se puede crear una señal acústica mediante la iluminación radiativa, modulada periódicamente, a una muestra colocada en una celda cerrada, en ese momento no tuvo mucho enfoque científico, pero recientemente se le han encontrado diferentes aplicaciones [16].

El efecto fotoacústico se basa en las técnicas experimentales conocidas como fototérmicas. Prácticamente su funcionamiento se basa en inducir energía luminosa, pulsada o modulada, a la muestra que se quiera investigar, la muestra absorbe parte de la energía y la transforma en calor. La muestra cambia su temperatura de forma proporcional a las pulsaciones de la radiación a la que está expuesta, es ahí donde se pueden obtener información de la muestra bajo investigación. En esta técnica se debe encapsular la muestra dentro de una cámara con gas o aire como se muestra en la figura 3, este gas al estar en contacto con la muestra sufre también cambios de temperatura y comienza a contraerse y expandirse y comienza a formar ondas acústicas que pueden ser detectadas por un micrófono.

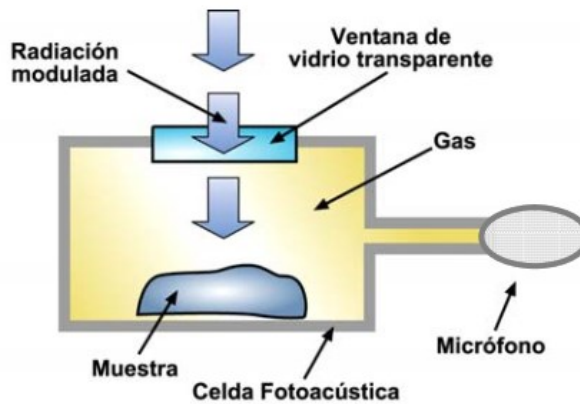


Figura 9 Esquema de una celda fotoacústica tomada de [16].

De acuerdo a este efecto existen dos tipos de cámaras fotoacústicas acorde a su funcionamiento: cámara cerrada y abierta.

#### 1.11.2.1 Cámara fotoacústica cerrada

Se le conoce de esta manera porque la muestra es analizada en el interior de la cámara. La principal característica de este tipo de cámaras es que la muestra puede llegar a absorber la radiación de la luz incidente a frecuencias oscilantes entre 1 Hz y 20 KHz. Este tipo de configuración también permite analizar muestras opacas o transparentes y su espesor puede ser grueso o delgado [17].

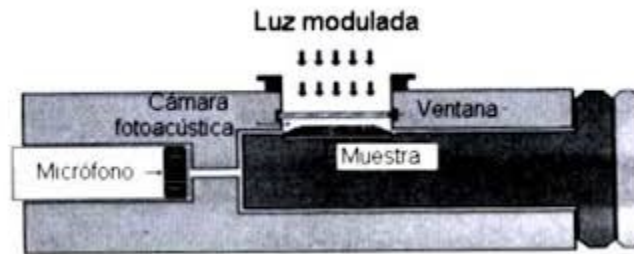


Figura 10 Vista transversal de una cámara fotoacústica cerrada [17].

#### 1.11.2.2 Cámara fotoacústica abierta

En esta configuración la muestra se encuentra fuera de la cámara fotoacústica, la radiación que puede absorber la pieza oscila en frecuencias de 10 Hz hasta 500 Hz. A diferencia de la cerrada, la radiación causada por el haz de luz debe pasar por la muestra para producir los cambios en el gas que se encuentra dentro, es por ello

que este último sufre cambios de presión que van en relación a las pulsaciones emitidas por la luz [17].

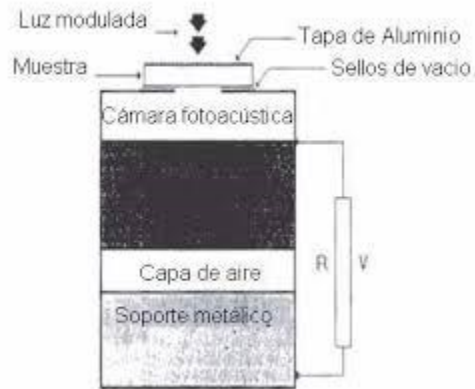


Figura 11 Cámara fotoacústica abierta[17].

#### 1.11.2.3 Efecto fotoacústico en la medicina

En el campo de la medicina existen diversos métodos para obtener imágenes del interior del cuerpo, algunos pueden causar daños o molestias al paciente en su uso continuo como lo son los rayos X, otros muestran imágenes borrosas o generales como lo es el ultrasonido.

Actualmente se está implementando el uso de la tecnología fotoacústica en la medicina, que al igual que el ultrasonido utiliza ondas para obtener imágenes internas del cuerpo humano, pero esta muestra una amplia ventaja en comparación de otros métodos, ya que es posible conseguir imágenes mucho más claras y precisas.

Gracias a que las estructuras de los elementos biológicos son diferentes químicamente son capaces de absorber diferentes cantidades de energía, esto último es aprovechado por el método fotoacústico debido a que es posible manipular la longitud de onda del láser emisor a la misma longitud de absorción de cualquier tejido a estudiar, posteriormente el tejido se calienta y genera ondas que son captadas por sensores y posteriormente mandadas a un software para ser procesadas y convertidas en imágenes.

Algunas de las muchas aplicaciones de esta técnica en la medicina es la detección de tumores, un ejemplo de ello son los tumores mamarios, debido a que cuando un

tumor crece reorganizan los vasos sanguíneos que lo rodean y forman vasos nuevos (neovascularización). La hemoglobina en la sangre es la parte fundamental para este proceso ya que es la encargada de absorber y generar las ondas. A continuación se muestra una imagen comparativa sobre los tipos de imágenes que se pueden obtener con diferentes métodos [18].

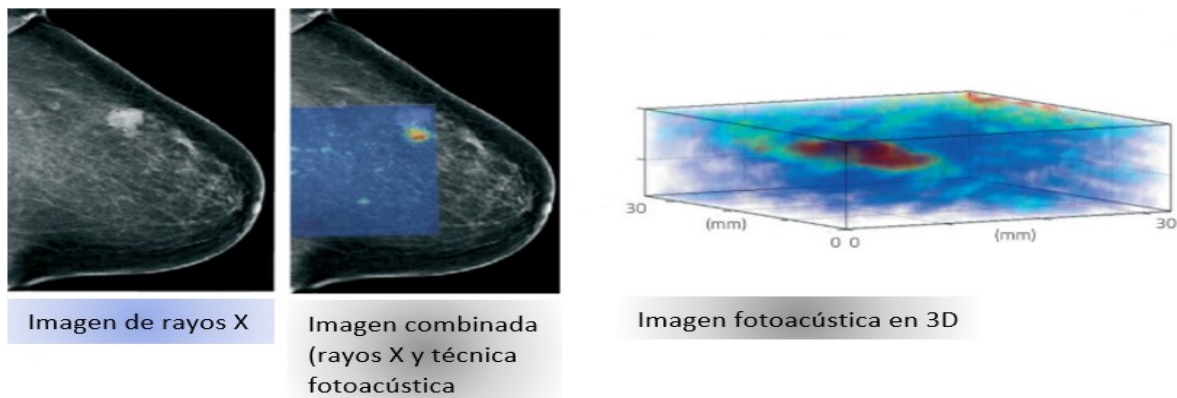


Figura 12 Comparación entre rayos X, imagen combinada e imagen fotoacústica, tomada de [13].

### 1.11.3 Ondas sonoras

Las ondas sonoras deberán tener un medio en el cual viajar dentro de la celda fotoacústica, el componente que se utilizará dentro de la cámara será un gas y dado que el medio más usual para la propagación del sonido en la comunicación es el aire, se utilizará este último. Es por ello que se deben tomar en cuenta varios factores que se mencionan a continuación [19].

#### 1.11.3.1 Propagación del sonido

Una onda es una oscilación que se dispersa a través de un medio, ya sea un gas, un líquido o un sólido, con relación a lo que se utilizará las ondas serán longitudinales. Algunas características que presenta el aire que servirán en este proyecto son:

- Homogéneo: es decir que las ondas se pueden propagar en todas las direcciones, esto ayuda dentro de la cámara ya que la posición del micrófono podrá ser casi en cualquier lugar.
- Lineal: la propagación puede ser simultánea, dado que en él pueden viajar diferentes ondas a la vez, lo cual permitirá tener dos tipos de ondas dentro

del sistema, una será la referencia y la otra será la cual nos mande los diferentes cambios que presente la muestra.

- No dispersivo: al tener esta cualidad las ondas que se propaguen dentro de la cámara tendrán la misma velocidad.

La velocidad de las ondas dependerá principalmente de las propiedades del medio por donde viajarán, el traslado se da mediante la interacción de las moléculas del aire (en este caso), es decir, en este proyecto la muestra generará vibraciones las cuales afectarán con el mismo movimiento a las moléculas que estén en contacto con esta y ellas a su vez con las siguientes y así sucesivamente hasta llegar en contacto con las que se encuentren en contacto con el micrófono. De esta manera se logra la relación que tiene la velocidad de transmisión de la onda con la propiedad del aire.

Otro fenómeno que sucede en este proceso es el de la presión sonora que es la variación de presión estática en el aire, esto sucede debido a que en el transcurso de transferencia de vibración entre las moléculas se crean zonas con mayor concentración de estas y zonas con menor. En este sistema se generará un movimiento armónico mediante la interacción del láser que emite pulsaciones constantes a la muestra, lo cual dará como resultado cambios en la presión del aire que podrán representarse como una onda sinusoidal.

Al tratarse de una onda se deben de tomar en cuenta sus características, una de ellas es la longitud de onda ( $\lambda$ ) la cual se puede definir como la distancia que recorre una onda en un determinado tiempo, viéndolo como una cadena de moléculas en las cuales cada una tendrá un movimiento diferente en relación a la vibración inicial y en algún momento se repetirá un patrón, es ahí donde se presenta esta característica.

La velocidad de la onda también dependerá del material que esté hecha la celda fotoacústica dado que lleva relación la densidad del medio y la comprensibilidad de dicho material, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Donde:

$v$  = es la velocidad de la onda

$B$  = es el módulo volumétrico

$\rho$  = es la densidad del medio de propagación

Otro factor importante a tomar en cuenta es la temperatura en la cual se encuentre el medio de transmisión, el aire a 0° tiene una velocidad de  $331 \frac{m}{s}$  y la relación que presenta con la velocidad de la onda se representa en la siguiente ecuación:

$$v = \left(331 \frac{m}{s}\right) \sqrt{1 + \frac{T_c}{273^\circ C}}$$

Donde  $T_c$  es la temperatura del aire, con esta ecuación se obtiene que a una temperatura de 20°, el sonido viaja a  $343 \frac{m}{s}$  a través del aire, por lo cual se puede deducir que entre más elevada la temperatura del aire aumenta la velocidad de propagación de la onda. Aquí se debe de tomar en cuenta las ventajas y desventajas que pueda ocasionar esta relación.

En la tabla 1 se muestra la relación entre el medio de propagación y la velocidad resultante.

Tabla 1 Velocidad del sonido en diferentes medios basada en [20]

<b>Velocidad del sonido en diferentes medios</b>					
<b>Medio</b>	$v\left(\frac{m}{s}\right)$	<b>Medio</b>	$v\left(\frac{m}{s}\right)$	<b>Medio</b>	$v\left(\frac{m}{s}\right)$
<b>Gases</b>		<b>Líquidos a 25°C</b>		<b>Sólidos</b>	
Hidrógeno 0°C	1286	Agua de mar	1533	Hierro	5950
Helio 0°C	972	Agua	1493	Aluminio	6420
Aire 20°C	343	Mercurio	1450	Latón	4700
Aire 0°C	331	Queroseno	1324	Cobre	5010
Oxígeno °C	317	Alcohol metílico	1143	Oro	3240

#### 1.11.4 Amplificador Lock-in

Para la medición de las ondas dentro de la celda se ocupará un micrófono, como se mencionó anteriormente, sin embargo, al tratarse de señales pequeñas pueden ser confundidas con ruido, para evitar señales no requeridas será necesario insertar al sistema un amplificador de señal.

Para este caso el más adecuado será un amplificador Lock-in cuya función principal es separar las señales, de las cuales extrae las más débiles y pasa por alto las más irregulares (ruido). Para lograr lo anterior es necesario tener una frecuencia de referencia, generalmente un generador senoidal.

Los principales componentes de un amplificador de este tipo son:

- Un multiplicador.
- Un filtro pasabajos RC o integrador.
- Un circuito desfasador.

Lo que internamente hace dicho amplificador es multiplicar la referencia por la señal detectada e integrar con una constante de tiempo, el desfasador desplaza la referencia con respecto a la señal de entrada y se ajusta entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$  para obtener la salida máxima [21].

#### 1.11.5 Micrófono electret

Se ha estudiado los diferentes tipos de micrófonos entre los cuales se encuentran: electrostáticos, de carbón, de cristal o piezoeléctricos, dinámicos o de bobina móvil, de cinta, de presión, combinados y electret, este último es un micrófono de condensador, su nombre lo tiene gracias a que está creado por un material dieléctrico.

Este tipo de micrófono fue creado en el año 1970, gracias a su fabricación no necesita alimentación ya que cuenta con una polarización eléctrica permanente, lo que si se debe alimentar es el preamplificador interno.

Los micrófonos electret alcanzan una respuesta entre los 50 Hz y los 15 kHz y tienen una sensibilidad entre -50 dB y -70 dB, gracias a que no tienen respuestas a tonos



altos y a su favorable respuesta a sonidos débiles es el que se utiliza en este proyecto [22].

#### 1.11.6 Láser

##### 1.11.6.1 Láser de estado sólido

Una de las partes importantes del sistema fotoacústico es la excitación de la muestra, para ello es necesario un láser de estado sólido el cual de manera pulsante impactará directamente sobre ella provocando cambios internos los cuales a su vez generarán ondas.

Entre las ventajas que cuentan los láseres en comparación a otros emisores de luz se encuentra que el láser emana una luz cuyas ondas conservan relación en su fase (luz coherente).

Existen diferentes configuraciones para este instrumento entre las que se encuentran:

- Continuo: el disparo es igual de inicio a fin.
- Pulsado simple: la luz que emite es continua pero solo por un tiempo determinado.
- Pulsado repetido: el disparo es una cadena de pulsos.

La configuración en la que se ocupará dicho componente será de forma pulsado repetido ya que de esta manera libera más energía la cual será transformada en energía térmica por la muestra, la cual podrá emitir ondas relacionadas a la temperatura que logre alcanzar [23].

##### 1.11.6.2 Tipos de láser de estado sólido

Dentro de los tipos de láser más comunes que se pueden encontrar en este ramo se encuentran los siguientes:

- Neodimio-YAG: este tipo de láser opera en espectro infrarrojo a 1.06 micras sin embargo puede cambiar su frecuencia generando un segundo armónico, puede ser usado de manera continua o pulsada, puede tener una potencia máxima de 1GW, su principal utilidad es en la medicina, es

utilizado para cirugías ya que produce efectos de coagulación a profundidades que va de los 5mm a 10mm.

- Láser de Rubí: como su nombre lo indica este tipo de dispositivo utiliza un cristal de rubí sintético, su rango de frecuencia de emisión es el rojo, tiene una potencia máxima de 1kW y su principal utilidad es en medios de investigación.
- Semiconductor: este tipo de láser es uno de los más utilizados actualmente gracias a sus diferentes características con las que cuentan, su longitud de onda va desde el orden infrarrojo hasta el visible, por lo general son de tamaño pequeño, su potencia va desde los mW hasta los kW y sus dentro de sus principales usos se encuentra en las comunicaciones, como lector de discos, punteros e investigación [24].

## Capítulo 2 Desarrollo

Las fuentes de alimentación son los dispositivos electrónicos encargados de proporcionar la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de los diferentes dispositivos electrónicos, estas se encargan de controlar el voltaje y la corriente para el dispositivo a controlar, las fuentes de corriente directa (DC) prácticamente constan de 3 partes que se explican a grandes rasgos a continuación:

- La rectificación: regularmente aquí va un transformador de primera instancia que es el encargado de bajar la tensión de entrada (CA), seguido de diodos encargados de transformar un voltaje de corriente alterna a un voltaje de corriente directa.
- El filtrado: para esta parte el encargado de estabilizar el voltaje obtenido de los diodos es el capacitor, esta parte es la encargada de disminuir o incluso evitar rizos en el voltaje obtenido.
- Y la regulación: la última parte de las fuentes de corriente es el regulador, este es el encargado de convertir un voltaje de entrada en uno de salida específico, en diferentes configuraciones se puede obtener un voltaje fijo o uno variable, esta parte también es la encargada de limitar la corriente de la fuente.

Existen fuentes de corriente conmutadas y lineales cada una de diferentes características y funciones, la complejidad de estas depende totalmente de la utilidad que se le quiera dar, entre mayor sea la precisión que se requiera mayor serán los componentes y la calidad de los mismos.

Aunque los láseres de estado sólido pertenecen a una misma división, los fabricantes los crean con diferentes características por lo cual no todos funcionan de la misma manera, de tal forma que un control estará limitado para cierto tipo de láser.

En este caso se realiza un control que será utilizado en celdas fotoacústicas, por lo cual deberá cubrir ciertos criterios, las dos características más importantes que cubre el control son la modulación de frecuencia la cual crea parpadeos en el diodo

láser, esto ayudará a excitar las muestras dentro de la cámara de manera que los pulsos provoque una expansión y contracción de las moléculas del medio (aire u otro gas) que se encuentra en contacto con el material a analizar, la segunda parte importante de este control es la corriente variable con la cual trabaja el láser de esta manera la intensidad lumínica que llegue a la muestra podrá ser variable para poder obtener diferentes valores en la salida del sistema fotoacústico.

Para las primeras pruebas se trabaja con un módulo emisor láser KY-008 el cual consta principalmente de las siguientes características:

- Dimensiones: 24mm x 15mm x 8mm
- Alimentación: hasta 5v
- Longitud de onda: 650nm
- Corriente: 40mA

Como se mencionó anteriormente, la primera parte del control se encarga de manipular la frecuencia de encendido y apagado del láser, para ello se utiliza un circuito electrónico intermitente con el integrado NE555 configurado de manera estable, se elige esta configuración ya que no necesita de pulsos para activarse y se mantiene con tiempo constante de encendido y apagado.

En primera instancia se realiza la simulación en el software Multisim 13.0 para asegurarse de que el circuito realizado funcione correctamente, en la siguiente figura se muestra el circuito utilizado en esta parte del control.

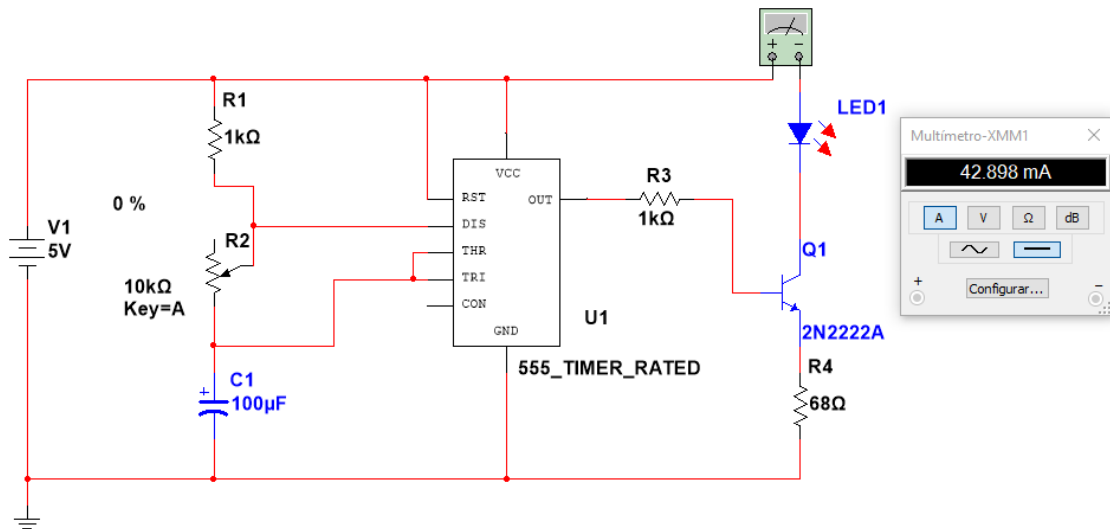


Figura 13 Simulación de circuito astable en Multisim 13.0

El circuito consta de dos resistencias fijas de 1 kΩ, un potenciómetro encargado de variar la frecuencia, un capacitor electrolítico de 100 μF, un transistor 2N2222 que opera como interruptor de tierra para el diodo, una resistencia de 68 Ω que limita la corriente que transita por el láser, una fuente de voltaje de 5 v y el circuito integrado NE555.

Para poder configurar el circuito a una frecuencia deseada es necesario basarse en la siguiente ecuación, basta con establecer la frecuencia de trabajo deseada y proponer el valor de dos de los componentes pasivos (resistencias o capacitor y una resistencia) y calcular el valor del elemento restante.

$$F = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C_1}$$

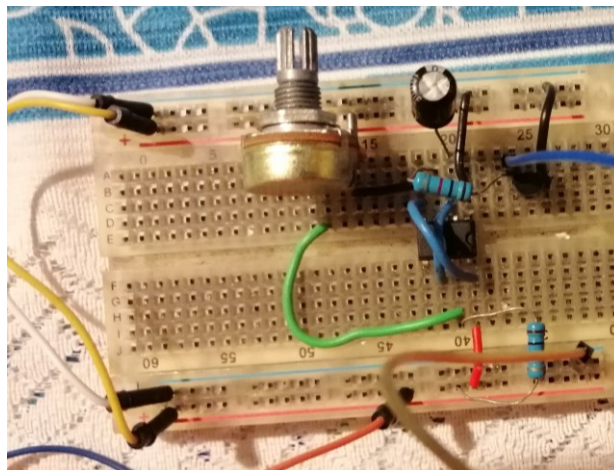
Para esta primera prueba se fijan dos componentes, una resistencia fija de 1kΩ y un capacitor de 100μF y se utiliza un elemento variante (potenciómetro). Con los valores de los componentes que se utilizaron y con la ayuda de la fórmula anterior se realiza la simulación y se encuentra que la frecuencia máxima del circuito mostrado es de 14.4 Hz y la mínima es de 0.685 Hz, la variación de la frecuencia se realiza manualmente con el potenciómetro.

Los diodos láser son muy delicados en cuestión a su alimentación ya que si trabajan con una tensión o corriente mayor a la que necesitan es altamente probable

provocarles daños irreparables, es por ello que se utiliza la resistencia de  $68 \Omega$  como protección.

Se utiliza un transistor 2N2222 para poder integrar la segunda parte del control que es la encargada de modificar la intensidad con la que encenderá el láser, de esta manera la entrada positiva del componente no vendrá de la fuente que alimenta el circuito de frecuencia sino de la fuente de corriente. El transistor hará la función de corte de tierra para el láser de esta manera se respetará la señal de control de frecuencia que salga del integrado.

Al tener los parámetros listos en la simulación se procede a realizar las primeras pruebas físicas de dicho circuito, al ser las primeras pruebas físicas se realizan en un protoboard como se muestra a continuación.



*Figura 14 Prueba de circuito modulador de frecuencia.*

La siguiente parte del control consta de un limitador de corriente que funcione para el láser con características antes mencionadas, la función principal de esta parte es que además de limitar la corriente máxima del dispositivo esta se podrá ajustar dentro de un rango definido. La intención de tener un rango de funcionamiento en cuanto a corriente es que al estar integrado a una celda fotoacústica la intensidad lumínica del láser pueda variar permitiendo tener diferentes excitaciones en la muestra.

A pesar de que existen fuentes de voltaje estables muchas de ellas no limitan su corriente es por ello que, al conectar un láser a una pila, por ejemplo, este funciona

solo por un breve instante a pesar de estar recibiendo el voltaje adecuado, esto es debido a que la corriente no está limitada.

Al igual que en la primera parte y las primeras pruebas del control, se procede a realizar la simulación en el software donde se realiza el primer circuito. En esta simulación se cuentan con tres partes principales: regulación de voltaje, limitador de corriente y protección.

Al tener una fuente de 12v para realizar el circuito la primera etapa consta de un circuito integrado LM317 que se utiliza para regular el voltaje de entrada ya que la siguiente etapa del circuito tiene un óptimo funcionamiento entre 6 y 8 volts.

La siguiente parte del segundo circuito es la parte que limita la corriente, al igual que en la parte anterior cuenta con un integrado LM317, pero éste está configurado como regulador y limitador de corriente, en la simulación se utiliza una resistencia fija (R1) de 33 ohms y una variable (R2) de 100 ohms, la primera es la encargada de limitar la corriente cuando la variable esté en su mínimo valor y R2 es la encargada de variar la corriente que llega al dispositivo semiconductor.

En la parte final se coloca como protección un diodo 1N4001 y con condensador de 47 $\mu$ F encargados de dar protección final en cuanto a corriente y voltaje al láser.

A continuación, se muestra la parte de simulación es su estado máximo la cual nos permite observar que la corriente máxima que se obtendrá no pasa de los 40mA que tolera el dispositivo láser que se utiliza, los rangos que arroja la simulación es de 9.45mA a 37.94mA.

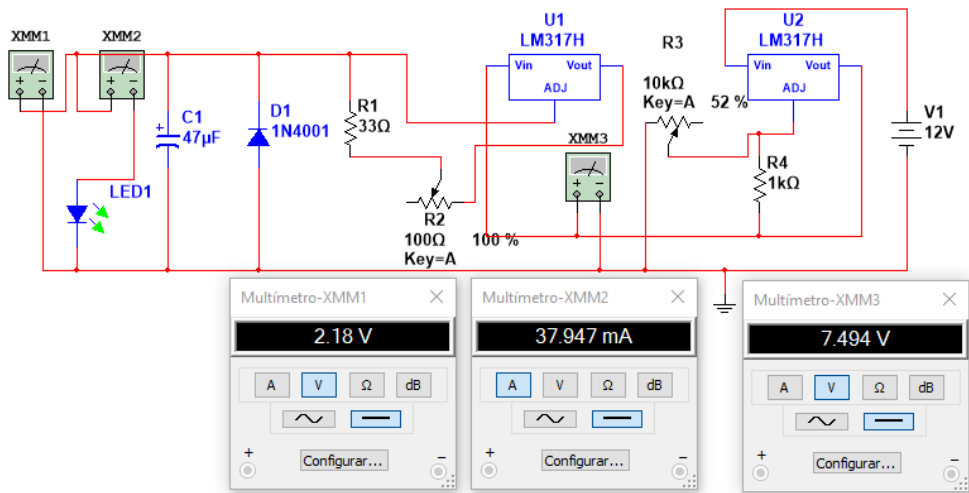


Figura 15 Simulación de fuente de corriente de 9.45 a 37.94 mA.

Una vez realizada la simulación se procede a efectuar el montaje del circuito para las pruebas físicas, al igual que la parte anterior estas pruebas se realizan en un protoboard.

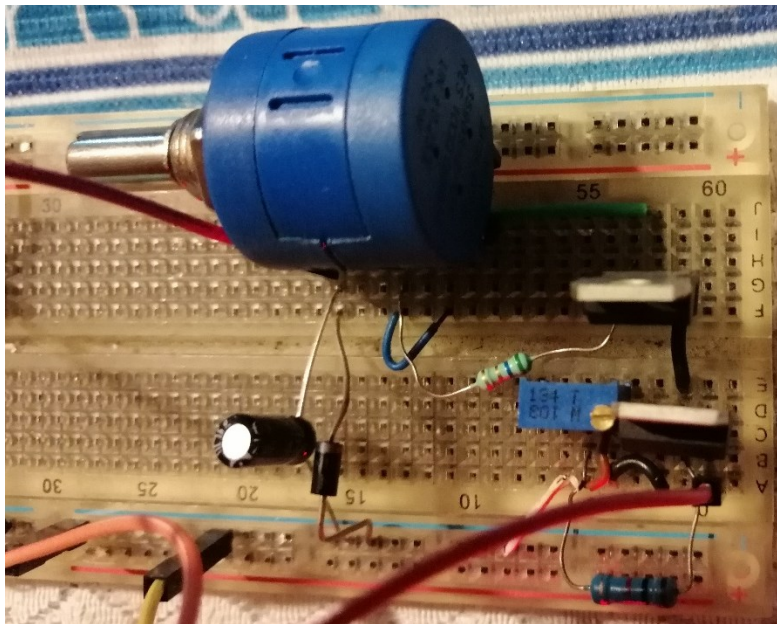
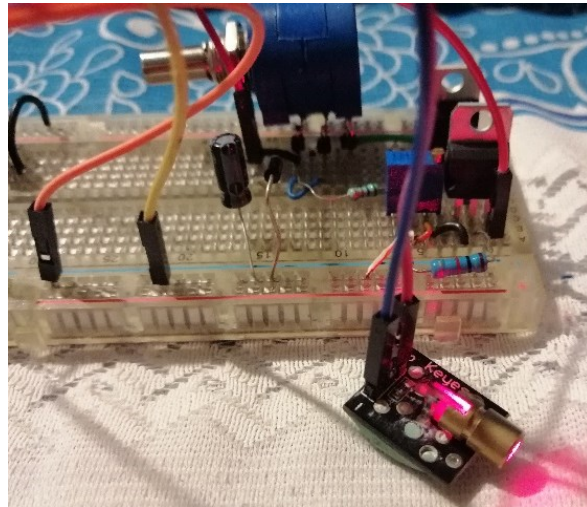


Figura 16 Fuente de corriente.

Cabe mencionar que para las pruebas realizadas se utiliza un potenciómetro de precisión de 100 ohms para que los cambios de corriente sean paulatinos para no afectar al dispositivo láser.





*Figura 17 Prueba de fuente de corriente.*

## Resultados

Se crea un control para un módulo láser KY-008 el cual tiene dos funciones principales, el primero es modificar la intensidad luminosa del diodo láser debido que es posible regular la corriente de trabajo en un rango de 9.45 a 37.94mA; y la segunda parte modifica la frecuencia de encendido y apagado del diodo láser en un rango de 0.685 Hz a 14.4 Hz.

Con lo antes mencionado el controlador se puede adaptar a diversas aplicaciones de laboratorio, dentro de ellas se encuentra las técnicas fotoacústicas ya que cumple con los dos principales requerimientos de control para este tipo de trabajos, aunado a lo anterior es posible cambiar los intervalos de operación mediante el cambio de componentes pasivos, como resistencias o capacitores.

En la figura 18 se puede observar el diagrama electrónico del controlador.

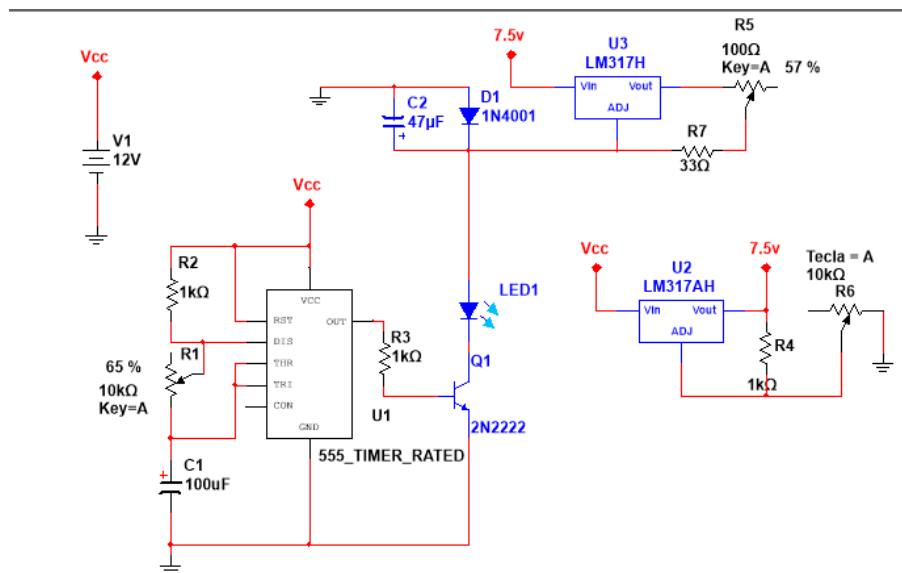


Figura 18 Diagrama del control.

En la siguiente figura se muestra el montaje de las pruebas del control.

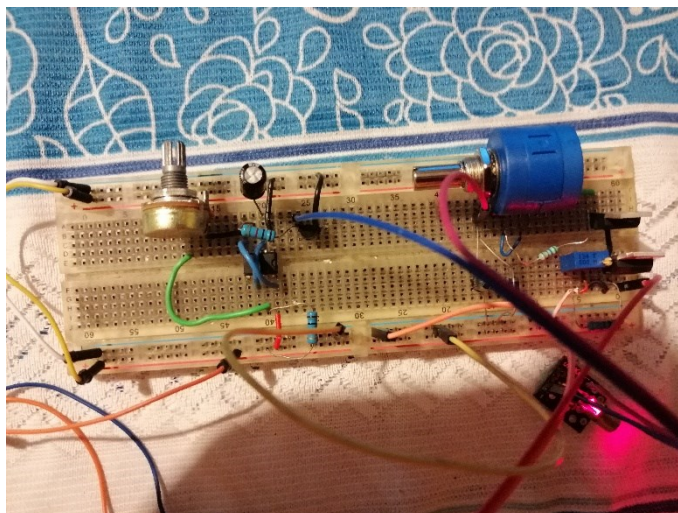


Figura 19 Pruebas físicas del controlador.

Un punto importante de este control es que se puede ajustar para controlar otros láseres con otras características diferentes al que se ocupa, para modificar el rango de corriente de trabajo es necesario cambiar la resistencia R7, para saber el valor se debe obtener el cociente de 1.25 y el valor de la corriente que se requiera; por ejemplo, para tener una corriente máxima de 250mA se divide 1.25/0.25 dando como resultado 5  $\Omega$ .

Cabe resaltar que la resistencia antes mencionada juega un punto muy importante en el control, ya que esta es la encargada de limitar el flujo de corriente cuando R5 (potenciómetro de ajuste de corriente) valga 0 y así evitar que el láser pudiera sufrir daños.

En la figura 20 se observa el comportamiento de la corriente del control como función del valor del potenciómetro (R5), se puede apreciar que la corriente tiene un comportamiento de tipo exponencial por lo cual se propone una ecuación de tipo exponencial para obtener el modelo matemático de dicho comportamiento

$$i = 8.53 + 1.35e^{\frac{R}{32.94}}$$

Donde R es el valor de resistencia del potenciómetro de control expresado en Ohms.

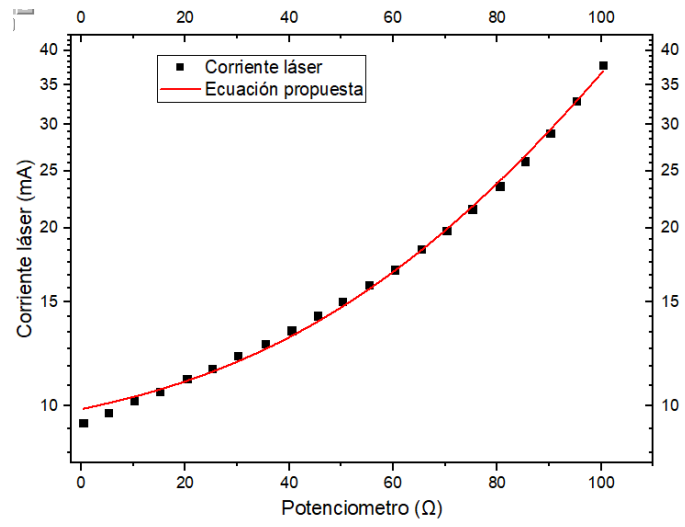


Figura 20 Gráfica comparativa de valores experimentales y ecuación propuesta.

## Conclusiones

Los diodos láser, en específico los de estado sólido, suelen ser eficientes para diferentes proyectos y aplicaciones gracias a su bajo costo y muchas otras características con las que cuentan, sin embargo, en el mercado suelen encontrarse sin ningún tipo de controlador y los que se venden con algún driver se elevan considerablemente en costo debido a que suelen ser globalizados para diferentes tipos de diodos. No obstante, existen maneras de crear controladores que se puedan adecuar a diferentes aplicaciones específicas como se detalla en esta investigación.

Es posible controlar el flujo luminoso y la frecuencia de encendido y apagado de un diodo láser de estado sólido para ello se crea un controlador de bajo costo y aplicable en un sistema fotoacústico, gracias a que el controlador fue diseñado para una función en especial es posible disminuir considerablemente el costo, sin embargo, el control se diseña para que pueda adaptarse en diferentes láseres cambiando el valor de algunos componentes como se menciona en el escrito.

El controlador es capaz de variar su frecuencia en un rango de 0.685 Hz y 14.4 Hz y su corriente de 9.45 a 37.94mA esto de manera manual con la ayuda de dos potenciómetros, con ello ayuda al operador del sistema fotoacústico a variar ambas magnitudes según sea su necesidad.

## Producto

Se realiza un artículo basado en el presente trabajo el cual se envía a la Revista Científica UTCJ Theorema de la Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez, el cual fue aprobado el 6 de Marzo del presente año para su publicación el día 18 de Agosto del 2021 en su edición número 16. Dicho artículo se agrega a continuación en los anexos.

## CONTROL ELECTRÓNICO AJUSTABLE PARA DIODO LASER


### NOTA TÉCNICA



Luis Miguel Mendoza Hernández<sup>1</sup> y José de Jesús Agustín Flores Cuautle<sup>2</sup>

<sup>1</sup> TecNM-IT Ortizaba Oriente 9,  
Ortizaba, México  
C.P. 94320

<sup>2</sup> CONACYT/ TecNM-IT  
Ortizaba Oriente 9,  
Ortizaba, México  
C.P. 94320

  
luismh486@gmail.com  
jflores\_cuautle@hotmail.com

Recibido: Marzo 8, 2021.  
Recibido en forma revisada: Mayo 18, 2021.  
Aceptado: Junio 8 2021.

**Resumen:** Existen diferentes maneras de controlar y manejar un láser de estado sólido, desde circuitos simples hasta controladores de alto costo. En el presente artículo se presenta el diseño y desarrollo de un controlador para este tipo de láser, con la finalidad de poder ser usado en un sistema fotoacústico, no descartando que puede llegar a tener otras funciones. El control se centra en una fuente de corriente cuya finalidad es modificar la intensidad luminosa del láser de estado sólido y protegerlo de sobrecargas, además cuenta con un modulador de frecuencia ajustable a diferentes rangos, todo esto con la opción de poder ser ajustado para láseres de diferentes características. Además, se muestra la manera de modificar algunos componentes para cambiar la condición de trabajo en cuanto a modulación en frecuencia.

**Palabras clave:** Láser, fuente de corriente, modulación en frecuencia, intensidad luminosa.

**Abstract:** There are different ways to control and operate a solid-state laser, from simple circuits to high-cost controllers. This article presents the design and development of a controller for this type of laser, intending to be used in a photoacoustic system, not ruling out that it may have other functions. The control focuses on a current source

whose purpose is to modify the light intensity of the laser-diode and protect it from overloads; it also has a frequency modulator adjustable to different ranges, all this with the option of being able to be adjusted for lasers of different characteristics. Besides, it shows how to modify some components to change the working condition in terms of frequency modulation.

+ **Keywords:** Laser, current source, frequency modulation, light intensity.

## Introducción

Un láser es un tipo particular de fuente de luz llamada coherente que posee características especiales, tales como emisión coherente, monocromática (en una longitud de onda específica) y colimada (potencia luminosa concentrada en un área limitada) (Aboites, 2018).

Existen diversos tipos de láser los cuales se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de materia utilizada para la emisión láser, estos pueden ser de gas (CO<sub>2</sub>, He-Ne, Ar), moleculares (eximer, colorante) o sólidos (rubí, Neodimio-vidrio, semiconductores) (Aboites, 2018). La Figura 1, muestra la clasificación antes descrita.



Figura 1. Clasificación general de láser basado en el estado de agregación del cual se hace uso para el láser (Aboites, 2018).

Las características tan particulares del láser hacen que el uso de este tipo de fuentes luminosas sea de uso extendido para muchas aplicaciones no solo en investigación, sino en aplicaciones de uso diario, entre las diferentes aplicaciones se pueden mencionar: holografía, comunicaciones, lectores de código de barras, soldadura, espectroscopia.

Existen diversas aplicaciones en las cuales es de vital importancia poder controlar la intensidad luminosa emitida por el láser, así como de la frecuencia de emisión; entre las diversas aplicaciones en las cuales es necesario controlar estas características podemos mencionar: comunicaciones, espectroscopia, medicina, medición e inspección de materiales, entre otras (Goldman y Goldman, 2018).

En particular los láseres de estado sólido basados en semiconductores resultan de especial aplicación en investigación a nivel laboratorio, sin embargo, los equipos que cuentan con un control electrónico suelen ser equipos muy sofisticados y su precio se convierte en el principal problema para laboratorios pequeños. Por otra parte, existen láser de estados sólido de bajo costo, pero su principal desventaja es que estos equipos carecen de un control que permita modificar su intensidad o

encendido y apagado. La Figura 2, muestra un esquema básico de un láser semiconductor.

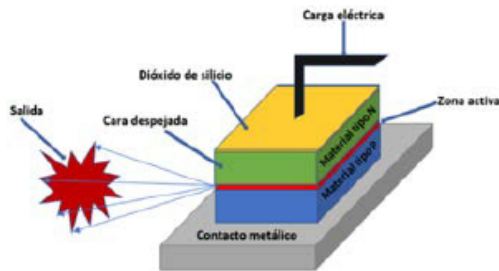


Figura 2. Esquema de un láser semiconductor.

Una de las principales características de los láseres basados en semiconductores es que los mismos funcionan mediante una corriente controlada, esto es contrario a muchos de los dispositivos electrónicos convencionales, en los cuales es necesario controlar el voltaje; en los láseres de semiconductor es necesario el uso de fuentes de corriente para su control. En el presente trabajo se propone el diseño de un circuito electrónico genérico para controlar este tipo de láseres.

## Metodología

Las fuentes de alimentación son los dispositivos electrónicos encargados de proporcionar la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de los diferentes dispositivos electrónicos, estas se encargan de controlar el voltaje y la corriente para el dispositivo a controlar, las fuentes de corriente directa (DC) prácticamente constan de tres partes principales que se explican a grandes rasgos a continuación (Hernández, 2000):

- **La rectificación:** regularmente va un transformador en primera instancia que es el encargado de bajar la tensión de entrada (CA), seguido de diodos encargados de transformar un voltaje de corriente alterna a un voltaje de corriente directa.
- **El filtrado:** para esta parte el encargado de estabilizar el voltaje obtenido de los diodos es el capacitor, esta parte es la encargada de disminuir o incluso evitar rizos en el voltaje obtenido.
- **Y la regulación:** la última parte de las fuentes de corriente es el regulador, este es el encargado de convertir un voltaje de entrada en uno de salida específico, en diferentes configuraciones se puede obtener un voltaje fijo o uno variable, esta parte también es la encargada de limitar la corriente de la fuente.

Existen fuentes de corriente conmutadas y lineales cada una de diferentes características y funciones, la complejidad de estas depende totalmente de la utilidad que se le quiera dar, entre mayor sea la precisión que se requiera mayor serán los componentes y la calidad de los mismos (Maiti y Bidinger, 1981).

Aunque los láseres de estado sólido pertenecen a una misma división, los fabricantes los crean con diferentes características por lo cual no todos funcionan de la misma manera, de tal forma que un control estará limitado para cierto tipo de láser (Martínez, 2009).

Para este caso se trabaja con un módulo emisor láser KY-008 el cual consta de las siguientes características (Microchip, 2017):

- Dimensiones: 24mm x 15mm x 8mm
- Alimentación: hasta 5v
- Longitud de onda: 650nm
- Corriente: 40mA

El siguiente control se construye con la intención de incorporarse a una celda fotoacústica por lo cual no solo dependerá de una fuente de corriente si no también incluye un variador de frecuencia el cual está basado en un circuito integrado NE555 configurado de manera estable (Morgan, 2011).

La primera parte del control se encarga de manipular la frecuencia de encendido y apagado del láser, para ello se utiliza un circuito intermitente de manera estable con el integrado antes mencionado, se elige esta configuración ya que no necesita de pulsos para activarse y se mantiene con tiempo constante de encendido y apagado.

En la Figura 3, se muestra el circuito utilizado en esta parte del control.

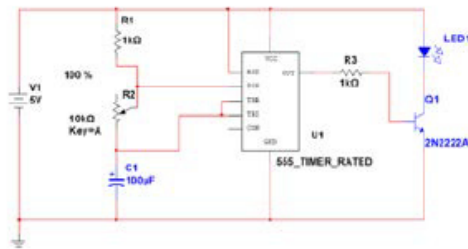


Figura 3. Circuito estable con circuito integrado NE555.  
Fuente: Elaboración Propia.

Para poder configurar el circuito a una frecuencia deseada es necesario basarse en Ecuación (1), basta con establecer la frecuencia de trabajo deseada y proponer el valor de uno de los componentes pasivos (resistencia o capacitor) y calcular el valor del elemento restante (Morgan, 2011).

$$F = 1.44 / ((R_1 + 2R_2) C_1) \quad (1)$$

Con el valor de los componentes que se utilizaron y con la ayuda de la fórmula anterior se encuentra que la frecuencia máxima del circuito (Figura 3) es de 14.4 Hz y la mínima de 0.685 Hz, el circuito consta de un potenciómetro que sirve para modificar la frecuencia de trabajo por una que se encuentre en este rango.

Los diodos láser son muy delicados en cuestión a su alimentación ya que si trabajan con una tensión o corriente mayor a la que necesitan es altamente probable provocarles daños irreparables. A pesar de que exist

ten fuentes de voltaje estables muchas de ellas no limitan su corriente es por ello que, al conectar un láser a una pila, por ejemplo, este funciona solo por un breve instante a pesar de estar recibiendo el voltaje adecuado, esto es debido a que la corriente no está limitada (Alberto, Corcho, y Fabelo, 2020).

Debido a lo antes mencionado es necesario integrar al control una fuente limitadora de corriente, en la Figura 4, se muestra el esquema electrónico de la parte de la fuente de corriente.

Se utiliza un transistor 2N2222 para poder integrar la segunda parte del control que es la encargada de modificar la intensidad con la que encenderá el láser, de esta manera la entrada positiva del componente no vendrá de la fuente que alimenta el circuito de frecuencia sino de la fuente de corriente. El transistor hará la función de corte de tierra para el láser de esta manera se respetará la señal de control de frecuencia que salga del integrado.

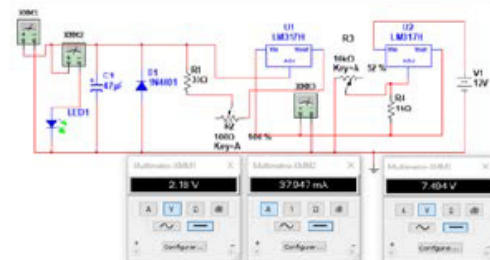


Figura 4. Diseño de fuente de corriente de 0.01 a 0.250 A.  
Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar el circuito depende principalmente de dos integrados LM317, este tipo de reguladores se pueden configurar de dos maneras, como regulador de tensión y como limitador de corriente, el primer integrado (U1) es utilizado para regular la tensión que entra de la fuente, esto es debido a que se utiliza una alimentación de voltaje constante de 12v y el voltaje requerido para que funcione la siguiente parte del circuito debe rondar entre 6 y 8 volts (Unicrom, 2018).

El segundo integrado (U2) está configurado como limitador de corriente y el capacitor es utilizado como regulador de voltaje ya que se encargará de suprimir los posibles picos provenientes de la fuente, la corriente estará controlada por un potenciómetro de precisión de 100 Ω y varía en un rango de 10 a 38 mA.

## Resultados

Se creó un control para un módulo láser KY-008 el cual tiene dos funciones principales, el primero es modificar la intensidad luminosa del diodo láser debido que es posible regular la corriente de trabajo; y la segunda parte modifica la frecuencia de encendido y apagado del diodo láser en un rango de 0.685 Hz a 14.4 Hz. Con lo antes mencionado el controlador se puede adaptar a diversas aplicaciones de laboratorio, ya que cumple con los dos principales requerimientos de control para este tipo de dispositivos, aunado a lo anterior es posible cambiar los intervalos de operación mediante el cambio de componentes pasivos, como resistencias o capacitores.



En la Figura 5, se puede observar el diagrama electrónico del controlador.

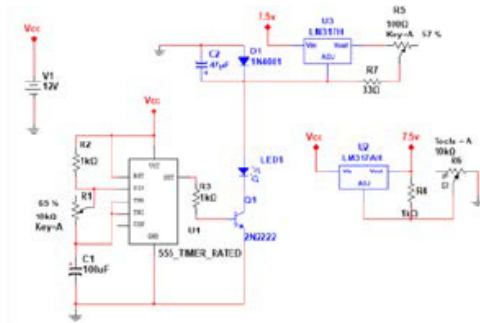


Figura 5. Control para láser terminado.  
Fuente: Elaboración Propia.

Un punto importante de este control es que se puede ajustar para controlar otros láseres con otras características diferentes al que se ocupa, para modificar el rango de corriente de trabajo es necesario cambiar la resistencia R7, para saber el valor se debe obtener el cociente de 1.25 y el valor de la corriente que se requiera; por ejemplo, para tener una corriente máxima de 250mA se divide 1.25/0.25 dando como resultado 5 Ω.

Cabe resaltar que la resistencia antes mencionada juega un punto muy importante en el control, ya que esta es la encargada de limitar el flujo de corriente cuando R5 (potenciómetro de ajuste de corriente) valga 0 y así evitar que el láser pudiera sufrir daños.

En la Figura 6, se observa el comportamiento de la corriente del control como función del valor del potenciómetro (R5), se puede apreciar que la corriente tiene un comportamiento de tipo exponencial por lo cual se propone una ecuación de tipo exponencial (Ecuación 2) para obtener el modelo matemático de dicho comportamiento

$$i = 8.53 + 1.35e^{R/32.94} \quad (2)$$

Donde R es el valor de resistencia del potenciómetro de control expresado en Ohms.

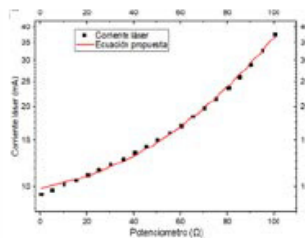


Figura 6. Gráfica de salida de la corriente, los cuadros son los valores experimentales, la línea roja es la ecuación propuesta.

## Conclusión

Los láser de estado sólido suelen ser eficientes en cuanto a costo se refiere, sin embargo, la mayoría no cuenta con un control y los equipos que cuentan con ello se elevan considerablemente en precio, no obstante, es posible controlar el flujo luminoso y la frecuencia de encendido y apagado de un láser de estado sólido a través de este controlador a bajo costo, logrando obtener una variación de corriente de hasta 28mA y en frecuencia de 13.7 Hz, además, estos rangos pueden ser modificados y adaptables a otros modelos o según lo requiera el usuario.

El contar con un modelo matemático de la corriente como función del potenciómetro de control permite poder implementar controles digitales para modificar la corriente laser mediante el uso de resistencias programables.

## Simbolos

- F Frecuencia (Hz)
- R Resistencia (Ω)
- C Capacitancia (F)
- i Corriente (A)

## Bibliografía

- + Aboites, V. (2018). Biblioteca digital. Retrieved from <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/105/hnn/ellaser.htm>
- + Alberto, C., Corcho, C., y Fabelo, A. R. (2020). Sistema de control de láser semiconductor con fines docentes para prácticas de laboratorio Semiconductor laser control system with teaching purposes for laboratory practices. *X(3)*, 11–19.
- + Goldman, L., y Goldman, L. (2018). *An Introduction to Lasers and Laser Systems. Applications of the Laser*, 1–15. <https://doi.org/10.1201/9781351069816-1>
- + Hernández, J. (2000). *Diseño de Fuentes de Corriente Directa*. Retrieved from [http://www.galeon.com/electrofacil/contenido\\_dc.htm](http://www.galeon.com/electrofacil/contenido_dc.htm)
- + Maiti, y Bidingex. (1981). *Fuente de corriente directa*. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- + Martínez, A. (2009). *La mecánica cuántica*. Retrieved from <http://la-mecanica-cuantica.blogspot.com/2009/08/el-laser.html>
- + Microchip (2017). *Datasheet*. Retrieved from <https://datasheetspdf.com/pdf/1415010/ETC/KY-008/1>
- + Morgan, M. (2011). *El circuito integrado 555 (p. 8)*, p. 8. Retrieved from <https://electronicaenfiles.wordpress.com/2011/04/c-i-555.pdf>
- + Unicrom (2018). *Electrónica Unicrom*. Retrieved from <https://unicrom.com/limitador-de-corriente-para-fuentes-de-voltaje/>

## REFERENCIAS

- [1] J. de J. A. Flores Cuautle, C. Hernández Aguilar, and G. Lara Hernández, "Técnicas fototérmicas: una visión suscita y su aplicación en el análisis de aceites vegetales." p. 15, 2018.
- [2] J. A. Valle and H. O. Ortega, "Prospectiva de Energías Renovables," México, 2012.
- [3] K. Joseph Francis, Y. E. Boink, M. Dantuma, M. K. Ajith Singh, S. Manohar, and W. Steenberg, "Tomographic imaging with an ultrasound and LED-based photoacoustic system," *Biomed. Opt. Express*, vol. 11, no. 4, p. 2152, 2020.
- [4] P. Farnia *et al.*, "Dictionary learning technique enhances signal in LED-based photoacoustic imaging," *Biomed. Opt. Express*, vol. 11, no. 5, p. 2533, 2020.
- [5] J. Yao and L. V. Wang, "Sensitivity of photoacoustic microscopy," *Photoacoustics*, vol. 2, no. 2, pp. 87–101, 2014.
- [6] S. Johannesmann, M. Webersen, J. Düchting, L. Claes, and B. Henning, "Characterization of the linear-acoustic material behavior of fiber-reinforced composites using lamb waves," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2102, no. May, 2019.
- [7] A. S. Gutierrez Martínez and J. E. Rodríguez, "Sistema De Calentamiento Escalonado Para La Medición De La Conductividad Térmica," *Momento*, no. 59, pp. 21–34, 2019.
- [8] R. Bernal-correa, "DIFUSIVIDAD T ÉRMICA DE MONO-CRISTALES DE GaSb Y Si ( 100 ) THERMAL DIFFUSIVITY OF Si ( 100 ) AND GaSb Introducci ó n En los u ´ ltimos a ~ nos la t ´ ecnica fotoac ´ ustica ha tomado gran inter ´ es debido a su alto potencial en el estudio de los materi," no. 51, pp. 31–44, 2015.
- [9] M. Elias, "DESARROLLO DE UN SISTEMA FOTOPIROELECTRICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES," Nuevo León, 2019.
- [10] C. Alberto, C. Corcho, and A. R. Fabelo, "Sistema de control de láser semiconductor con fines docentes para prácticas de laboratorio Semiconductor laser control system with teaching purposes for laboratory practices," vol. X, no. 3, pp. 11–19, 2020.
- [11] A. Bernardo, M. Pérezdz az, W. J. Echevarría-Torres, and R. Díaz-Amador, "Image quality optimization in breast digital radiography vs. patient dose," *Rev. Cuba. Fis.*, vol. 35, no. 1E,

pp. E17–E20, 2018.

- [12] J. Hernández, “Diseño de Fuentes de Corriente Directa,” 2000.
- [13] T. System, “Opt Láser,” 2014. [Online]. Available: <https://optlasers.com/high-power-drivers>.
- [14] A. Cable, “THORLABS,” 2021. [Online]. Available: <https://www.thorlabs.com/navigation.cfm>.
- [15] J. M. Carmona, “Conceptos fundamentales,” Tuxtla Gutierrez, 2018.
- [16] E. Marín, “Escuchando la luz: breve historia y aplicaciones del efecto fotoacústico,” *Latin-American J. Phys. Educ.*, vol. 2, no. 2, p. 17, 2008.
- [17] G. Gómez and R. Carlos, “Espectroscopia Fotoacústica: Una teoría antigua con nuevas aplicaciones,” *Concienc. Tecnológica*, no. 24, 2004.
- [18] R. P. Jakub Czuchnowski, “El efecto fotoacústico: ver a través del sonido,” *Science in School*, 2019. [Online]. Available: <https://www.scienceinschool.org/es/content/el-efecto-fotoacustico-ver-traves-del-sonido>.
- [19] R. Resnick, D. Halliday, and K. S. Krane, Eds., “Física - Resnick Haliday Krane - 5ª Edición - Volumen 1 - ( Pag. 254 ) ( Imprimido ).pdf,” in *Física*, Quinta., México, 2007, pp. 427–443.
- [20] R. A. Serway and L. D. Kirkpatrick, *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, Séptima., vol. 26, no. 4. 1988.
- [21] A. Teórico, I. Isidoro, P. Perez, I. C. Díaz, and I. A. A. Giordana, “Unidad temática 5 : AMPLIFICADORES LOCK IN,” in *Circuitos Electronicos 2*, .
- [22] Y. Sanso, “Micrófonos,” pp. 1–12, 2011.
- [23] G. Chaine, “Láser,” *EMC - Tratado Med.*, vol. 1–3, no. 2, pp. 1–2, 1999.
- [24] U. Led, F. Pin, and O. Introducci, “El láser semiconductor.”