

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA INTERFAZ DE CONTROL DE UN
MICROSCOPIO SCM (SCANNING CONFOCAL MICROSCOPY)

NELSON ALFREDO JIMÉNEZ CABALLERO
MARCOS PAUL MONSALVE VARGAS

GOTs



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2014

Diseño y construcción de una interfaz de control de un microscopio
SCM (Scanning Confocal Microscopy)

NELSON ALFREDO JIMÉNEZ CABALLERO
MARCOS PAUL MONSALVE VARGAS

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero electrónico

Director
Ph.D Arturo Plata Gómez
Físico

Codirector
Mle. Jaime Guillermo Barrero Pérez
Ingeniero Electricista

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2014

Agradezco de todo corazón:

A mi padre celestial quien siempre está atento a las intercesiones que Jesús hace por mí y a mis oraciones.

A mi amado Jesús, quien lo dio todo por mí, que no dudo en ningún momento en dar su vida por mí.

A mi precioso Espíritu Santo, quien me ha acompañado siempre, que siempre me fortalece, que siempre me guía, que siempre me ha dado las fuerzas para continuar cuando todo parece acabar, quien nunca me deja de aconsejar, te agradezco amado Dios por ser todo para mí.

A mi mamita hermosa Luz Nelly Vargas, que lo ha dado todo por nosotros sus hijos, que siempre me ha aconsejado, quien estuvo a mi lado cuando no quería continuar, que siempre me ha brindado su amor incondicional, sin ella esto no sería una realidad.

A mi padre, Martin Monsalve que a pesar de las circunstancias adversas que se pudieran presentar durante todo el proceso, siempre estuvo a mi lado dándome su apoyo y su amor.

A mis tres hermanos, Ricardo, Sara y Josue, que siempre me han acompañado, sin importar lo que se pueda presentar.

A mi novia, Rosa Milena Pestana, quien estuvo a mi lado cuando me toco llorar, pero también estuvo a mi lado en los momentos de felicidad, quien me ha acompañado toda la carrera, y quien me sigue esperando.

Y por supuesto a mis profesores de la escuela, por enseñarme a ser un ingeniero, al Profesor Arturo Plata por su incondicional apoyo y grandes aportes en este propósito, al profe Jaime Barrero, por guiarnos en todos los diseños necesarios en este proyecto, a mi compañero de batalla Nelson Jiménez, a todos muchas gracias.

A mis pastores, por su apoyo, y por sus grandes consejos de vida.

MARCOS PAUL MONSALVE VARGAS

*Deseo agradecer primeramente a Dios por su grandeza, bondad y misericordia,
por darme fuerza en mis debilidades.*

*A mis padres Raúl y Argelia, por quererme y apoyarme decididamente en mi
carrera.*

*A mis padres y a mis hermanas, hermanos y hermanas en cristo por su amor,
comprensión, sabiduría y sus oraciones.*

*A mi hermana Lina, mi negris, por el esfuerzo que hace para estudiar y brindarme
su desinteresado apoyo.*

A mi prima Dora, por ayudarme a iniciar esta carrera.

A mis amigos, por brindarme su incondicional amistad.

*Al edificio de Residencias Universitarias y a sus ocupantes por ayudarme, a ellos
por estar siempre dispuestos a colaborar.*

*A mi tío y hermano en la fe Horacio Jiménez, por ayudarme en mi edificación
espiritual, por sus oraciones mientras estoy fuera de Barrancabermeja.*

*Al hermano en la fe, Juan Gallego por brindarme su apoyo, colaboración y
alimento espiritual mientras estuve en Bucaramanga.*

*Al profesor Arturo Plata por brindarnos la oportunidad de conocer un nuevo país
con este proyecto, a él por compartir sus valiosos conocimientos, por estar
siempre pendiente de nuestro bienestar y por brindar incondicionalmente su
amistad.*

*Al profesor Jaime Barrero, por su imparcialidad a la hora de tomar decisiones, a él
por sus asesorías y su gran ayuda.*

*A los trabajadores, profesores y alumnos del centro de investigaciones (CIOP) de
la Universidad Nacional de la Plata, Argentina.*

Y a mi compañero Marcos por su colaboración y amistad cuando se necesita.

Que Dios, grande y misericordioso, sea brindándoles de su amor, compañía y bendiciones.

NELSON ALFREDO JIMÉNEZ CABALLERO

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	21
<hr/>	
DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	23
<hr/>	
1.1 OBJETIVO GENERAL	23
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.3 ALCANCES DEL PROYECTO	23
<hr/>	
MICROSCOPIA DE ESCANEAMIENTO CONFOCAL	25
<hr/>	
1.4 INTRODUCCIÓN	25
1.5 CONCEPTOS BÁSICOS DE MICROSCOPIA DE ESCANEAMIENTO CONFOCAL	26
1.6 MICROSCOPIA DE ESCANEAMIENTO CONFOCAL (COMO FUNCIONA)	26
1.7 LÁSER	27
1.8 FOTOMULTIPLICADORES	28
1.8.1 INTRODUCCIÓN	28
1.8.2 FOTOMULTIPLICADOR BÁSICO	28
1.8.3 FOTOMULTIPLICADOR CON ETAPA INTERNA	29
1.8.4 APLICACIONES	29
1.9 ESPEJOS GALVANOMÉTRICOS [7]	32
1.9.1 ¿QUÉ ES UN GALVANÓMETRO?	32
1.9.2 ESCÁNER XY	32
<hr/>	
HARDWARE	34
<hr/>	
1.10 INTRODUCCIÓN	34
1.11 MOTOR PASO A PASO BIPOLAR DE 5 FASES	34
1.12 TARJETA DE DESARROLLO	38
1.12.1 CRITERIO DE SELECCIÓN	38
1.12.2 SELECCIÓN [10]	38
1.12.3 ARDUINO	40
1.12.4 ARDUINO DUE	40
1.12.5 SOFTWARE DE ARDUINO DUE	41
1.12.6 VENTAJAS	42
<hr/>	
CONSTRUCCIÓN DE LA ETAPA DE AMPLIFICACIÓN DE LA SEÑAL DEL FOTOMULTIPLICADOR (AMPLIFICADOR DE TRANSRESISTENCIA)	43
<hr/>	

1.13	INTRODUCCIÓN	43
1.14	AMPLIFICADOR DE TRANSRESISTENCIA	44
1.15	CONDICIONES DE DISEÑO	44
1.15.1	CARACTERÍSTICAS DEL AMPLIFICADOR	45
1.15.2	SEÑAL DE SALIDA	46
1.15.3	SEÑAL DE ENTRADA	47
1.15.4	CÁLCULOS E IMPLEMENTACIÓN	47
1.15.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DE RUIDO	50
ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL		53
1.16	INTRODUCCIÓN	53
1.17	SEÑAL X	53
1.18	SEÑAL Y	55
1.19	BARRIDO LÁSER	55
1.20	DISEÑO	56
1.20.1	ETAPA 1 (AMPLIFICACIÓN DE LA SEÑAL)	56
1.20.2	ETAPA 2 (CORRECCIÓN DEL <i>OFFSET</i>)	58
1.20.3	ETAPA 3 (INVERSOR)	60
1.21	FILTRO	62
1.21.1	FILTRO ELECTRÓNICO	62
1.21.2	ESPECIFICACIONES DEL FILTRO	63
1.21.3	FILTRO <i>SALLEN-KEY</i> [12]	63
SISTEMA DE CONTROL IMLEMENTADO PUENTE H		66
1.22	INTRODUCCIÓN	66
1.23	PUENTE H	66
1.24	FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL IMPLEMENTADO	69
IMPLEMENTACION DEL HARDWARE		71
1.25	INTRODUCCIÓN	71
1.26	PROCEDIMIENTO	72
INTERFAZ DE USUARIO		73
1.27	INTRODUCCIÓN	73
1.28	INTERFAZ	74

CONCLUSIONES	78
RECOMENDACIONES	79
BIBLIOGRAFÍA	80
ANEXOS	82

LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura 1 Interfaz antigua	FUENTE: AUTORES...24
Figura 2 Interfaz nueva	FUENTE AUTORES...24
Figura 3 Funcionamiento de la microscopia confocal. FUENTE: Universidad de Oviedo	27
Figura 4 Tubo fotomultiplicador.....	FUENTE: Shimadzu...29
Figura 5 Fotomultiplicador con etapas internas	FUENTE: hamamatsu...29
Figura 6 Espectroscopia de fluorescencia de correlación FUENTE: Hamamatsu..	30
Figura 7 Microscopio Multi-Photon.....	FUENTE: HAMAMATSU...31
Figura 8 Rayos X, lectura de imagen.....	FUENTE: Hamamatsu...32
Figura 9 Scanner XY.....	FUENTE:[7]...33
Figura 10: Representación esquemática de un motor paso a paso bipolar. Fuente: Motor paso a paso.	35
Figura 11 Bornes de un motor paso a paso bipolar de 5 fases.FUENTE: [9]	36
Figura 12 Foto similar al motor del microscopio.....	FUENTE: eBay...37
Figura 13 Logotipo de Arduino.....	FUENTE: Arduino.cc...40
Figura 14 Arduino DUE	FUENTE: Arduino.cc...40
Figura 15 Tareas del Arduino DUE	FUENTE: Autores...41
Figura 16 Amplificador básico de transresistencia.....	FUENTE: Autores...44
Figura 17 Amplificador de transresistencia con 1 etapa de ganancia. FUENTE:Autores	48
Figura 18 Amplificador de transresistencia con las 4 etapas de amplificación. FUENTE: Autores	49
Figura 19 Señal X	FUENTE: Autores...54
Figura 20 Señal X sumada con la duración de la transmisión de datos.... FUENTE: Autores	54
Figura 21 Espacio donde el microscopio guarda su electrónica interna. FUENTE: Autores	55
Figura 22 Amplificador no inversor	FUENTE: Autores...57

Figura 23 Diseño etapa 1.....	FUENTE: Autores...58
Figura 24 Circuito restador	FUENTE: Autores...58
Figura 25 Diseño etapa 2.....	FUENTE: Autores...59
Figura 26 Circuito etapa 3.....	FUENTE: Autores...60
Figura 27 Etapas del acondicionamiento de la señal diente sierra. FUENTE: Autores	61
Figura 28 Resultados simulación etapa 3, en verde la señal de entrada y en roja la señal de salida. FUENTE: Autores	61
Figura 29 Señal digital (azul) y señal filtrada idealmente (negra)	FUENTE: Autores...62
<i>Figura 30 Filtro Sallen-Key orden 2</i>	<i>FUENTE: [12]...63</i>
<i>Figura 31 Filtro pasa bajas Sallen-Key orden 2</i>	<i>FUENTE: Autores...64</i>
Figura 32 Diagrama de bode para el filtro. Frec=12.7Krad/s, Mag=-3dB y Phase=-116°. FUENTE: Autores.....	65
<i>Figura 33 Señal Filtrada. FUENTE: Autores</i>	<i>65</i>
Figura 34 Sistema Arduino- Motor,simplificado.....	FUENTE: Autores...66
Figura 35 Diagrama interno del integrado L298.....	FUENTE: Autores...68
Figura 36 Esquema del controlador del motor	FUENTE: Autores...68
Figura 37 Foto del driver del motor de 5 fases FUENTE: Autores.....	70
Figura 38 Ssecuencia sugerida para mover el motor [16].....	71
Figura 39 La caja muestra el tamaño de la interfaz. FUENTE AUTORES.....	71
Figura 40 Esquemático interfaz FUENTE: AUTORES	72
Figura 41 Diagrama de operación del software FUENTE: Autores.....	74
Figura 42 Interfaz en Matlab.	FUENTE: Autores...75
Figura 43 Ventana de selección del puerto COM	FUENTE: Autores...75
Figura 44 Ventana del sentido de giro	FUENTE: Autores...75
Figura 45 Ventana de sólo giro	FUENTE: Autores...76
Figura 46 Ventana de un solo escaneo	FUENTE: Autores...76
Figura 47 Ventana del botón cerrar	FUENTE: Autores...76
Figura 48 Reinicio del puerto COM FUENTE: Autores	76

Figura 49 Ventana del gráfico FUENTE: Autores	77
Figura 50 Diagrama de bloques de una fuente de alimentación de DC. FUENTE: Autores	83
Figura 51 Rectificador en puente	FUENTE: [11]...84
Figura 52 Comportamiento de la señal de salida con un condensador de filtro FUENTE: [11]	86
Figura 53 Circuito modelo para el cálculo del divisor de tensión. FUENTE: Autores...	88
Figura 54 Curva característica i-v de un diodo que trabaja en la región de ruptura. FUENTE: [11].....	90
Figura 55 Divisor de tensión para fuente controlada. FUENTE: Autores	90
Figura 56 Fuente controlada para alimentación del fotomultiplicador HC125 FUENTE: Autores	92
Figura 57 Fuente terminada.....	FUENTE: Autores...93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Características del motor	37
Tabla 2 Resultados del amplificador transresistencia AD820.....		50
Tabla 3 Características del L298N	67
Tabla 4 Programación del motor para giro horario	69
Tabla 5 Programación del motor para giro anti horario	70

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. FUENTE	82
ANEXO B. DIAGRAMA DE LA CAPA INFERIOR	94
ANEXO C. DIAGRAMA DE LA CAPA SUPERIOR	95
ANEXO D. DIAGRAMA DE LOS DISPOSITIVOS	96

RESUMEN

TÍTULO: Diseño y construcción de una interfaz de control de un microscopio SCM (*Scanning Confocal Microscopy*)¹.

AUTORES: Nelson Alfredo Jiménez Caballero², Marcos Paul Monsalve Vargas².

PALABRAS CLAVES: Interfaz, Microscopio, Confocal, PMT, Galvanómetro, Motor paso a paso.

DESCRIPCIÓN:

El lector de este proyecto encontrará la descripción del proceso que se llevó a cabo durante el diseño y construcción de una interfaz de control de un microscopio SCM (*Scanning Confocal Microscopy*) incluyéndose su desarrollo en hardware y en software.

Se pretende actualizar esta herramienta (Microscopio) importante para investigaciones, específicamente el que se encuentra ubicado en los Laboratorios del Centro de Investigaciones Ópticas de la Universidad Nacional de la Plata (CIOP) en Argentina, ya que dado su tiempo de fabricación (hace 20 años) sus sistemas de adquisición de datos son obsoletos en comparación a la electrónica actual utilizada para dichos propósitos. De una manera global se muestra la forma en que se desarrollan los procesos de microscopía confocal, los cuales fueron objeto de estudio para la elaboración de la interfaz propuesta.

Detalladamente se pueden ver los diseños llevados a cabo para la elaboración de diferentes etapas de adquisición de datos y de amplificación de señales, control de un motor paso a paso el cual hará movimientos con ángulos de 0.36° , en esta descripción se exponen los procedimientos llevados a cabo para realizar las diferentes etapas tanto en Hardware como en Software. Todo esto con el propósito de hacer más fácil el proceso de escaneo de muestras.

Finalmente se describe la manera en que se creó una interfaz gráfica diseñada en Matlab, la que le permite al usuario final interactuar con el hardware.

Se deja abierta la posibilidad de actualizaciones tanto en Hardware como en Software, dado que se utilizan sistemas de acceso libre para futuros estudiantes y profesores que deseen implementar este proyecto en los microscopios que los requieran ubicados en los diferentes laboratorios de la Universidad Industrial de Santander.

¹ Proyecto de Grado

² Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica electrónica y telecomunicaciones. Director Ph. D. Arturo Plata Gómez. Codirector MIE Jaime Guillermo Barrero Pérez.

ABSTRACT

TITLE: Design and Construction of a Microscope Control Interface SCM (Scanning Confocal Microscopy)³.

AUTHORS: Marcos Paul Monsalve Vargas⁴, Nelson Alfredo Jiménez Caballero⁴.

KEYWORDS: Interface, Confocal, Microscope, PMT, Galvanometer, Stepper motor.

DESCRIPTION:

The reader of this project will find the description of the process that was carried out during the design and construction of a Microscope Control Interface SCM (Scanning Confocal Microscopy) including its hardware and software development.

Our aim is to update this important tool (Microscope) for research, which is specifically located in the CIOP (*Centro de Investigaciones Ópticas de la Plata*), of the National University of La Plata in Argentina, since its manufacturing given time (20 years ago), its data acquisition systems are obsolete compared to the current technology for such purposes. Overall, it is shown the way that confocal microscopy processes are developed, which were the object of the study for the making of the proposed interface.

You can see in detail the designs carried out for the development of the different stages of data acquisition and signal amplifications, all of them with the purpose of making easier the sample scanning process.

On the other hand, controlling a stepper motor which will move in one-hundred-nanometer order, this description includes the procedures made for the different stages, both Hardware and Software.

Finally, we describe the way in which we created a graphical interface designed in Matlab, which allows the end user to interact with the hardware.

It remains open the possibility to upgrade both, hardware and software, since open access systems are utilized and accessible to prospective students and professors who want to implement this project in the Microscopes of the Industrial University of Santander.

³ Proyecto de Grado

⁴ Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica electrónica y telecomunicaciones. Director Ph. D. Arturo Plata Gómez. Codirector MIE Jaime Guillermo Barrero Pérez.

INTRODUCCIÓN

El estudio de fenómenos físicos y biológicos ha sido fundamental en el desarrollo de la humanidad. La creación de nuevas tecnologías y nuevos materiales le han permitido al hombre avanzar en el conocimiento de campos desconocidos. Estas tecnologías se han enfocado en buscar soluciones ante diversas situaciones que se van presentando conforme a la necesidad de avanzar en los diferentes campos de investigación y al mejoramiento en la productividad de las empresas, ya sea actualizando un instrumento que se tiene o adquiriendo uno actualizado que permita optimizar el proceso de fabricación y ejecución de tareas. En este estudio ha sido fundamental el uso del microscopio.

En este proyecto se dará a conocer los procedimientos llevados a cabo para actualizar los sistemas de interacción con el usuario con un microscopio confocal, pasando de sistemas operativos obsoletos como lo es Windows 95 a sistemas operativos vigentes como lo son Windows 7 o Windows 8.

La generación y adquisición de señales se realiza con la tarjeta de desarrollo Arduino Due, la cual también permite realizar una etapa de control de un motor paso a paso de cinco fases a través de una interfaz gráfica desarrollada en Matlab, con la cual el usuario pueda tener control total sobre el sistema desde el computador sin tener la necesidad de manipular su hardware.

En este proyecto se podrá tener acceso a todos los diseños utilizados para llevar a cabo dicha actualización entre las que se encuentran etapas de control de motor, acondicionamiento de señal, adquisición y amplificación de señales y selección de integrados conforme a las necesidades que el proyecto requiera.

La mencionada actualización se propuso para ser implementada en un microscopio confocal Bio-Rad MRC-600, ubicado en las instalaciones de los Laboratorios del Centro de Investigaciones Ópticas (CIOP) de la ciudad de la Plata, en Argentina.

Esto fue posible gracias a la pasantía que se realizó de 5 semanas en dicha ciudad y a la disposición, asignación de recursos e interés de la Universidad Industrial de Santander (UIS) y a la Universidad Nacional de la Plata (UNLP) de llevar a cabo trabajos de investigación que conjuntamente les permitan realizar intercambios y avanzar en la obtención de nuevas tecnologías que les dé la posibilidad de tener en sus laboratorios equipos conforme a la tecnología actual.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVO GENERAL

Construir una interfaz de comunicación entre el microscopio de escaneo confocal BIO-RAD MRC600 y una computadora actual, que permita la adquisición de datos y el control de los movimientos necesarios para la toma de muestras.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adecuar las señales provenientes del fotomultiplicador que permitan adquirir los datos por un microcontrolador.
- Construir las señales X Y que nos permitan controlar el movimiento de los galvanómetros.
- Desarrollar un sistema de control hardware y software para el nano-desplazamiento en el eje Z de las muestras del microscopio, accionado por un motor paso a paso de 5 fases.
- Desarrollar una interfaz gráfica amigable con el usuario final, que permita el control de las señales X Y Z, como la adquisición de los datos.

1.3 ALCANCES DEL PROYECTO

Entregar una interfaz de comunicación de un microscopio confocal BIO-RAD MRC 600 que permita hacer un escaneo de muestras a través de la reflexión de luz con una resolución de 9 bits, lo cual implica diseñar y construir una etapa de amplificación de las señales provenientes del fotomultiplicador, adquirir estas señales a través del DAC del microcontrolador para posteriormente ser almacenadas en un matriz de datos en el computador, diseñar las señales de control XY que permitan dar movimiento a los galvanómetros, controlar un motor paso a paso que permita controlar el eje Z en el proceso de escaneo y diseñar una interfaz gráfica amigable que le permita al usuario final controlar los procesos anteriormente mencionados. Los componentes de hardware, software y de comunicación deben permitir la portabilidad a sistemas de cómputo modernos, así como la fácil obtención

de resultados durante su funcionamiento, y que su hardware permita realizar mejoras y actualizaciones de software y hardware.

La implementación del hardware de la interfaz, como se describió anteriormente, consta de diferentes etapas que tienen como propósito principal reemplazar el equipo de comunicación anterior, que permite la adquisición de datos y procesamiento de imágenes, por una etapa mucho más pequeña que realice las mismas tareas con integrados y software más actuales permitiéndole de esta manera al microscopio, efectuar las tareas de una manera más eficiente, y con mucho menos espacio del que ocupa la interfaz actual, como se puede observar en las figuras 1 y 2.



Figura 1 Interfaz antigua FUENTE: AUTORES

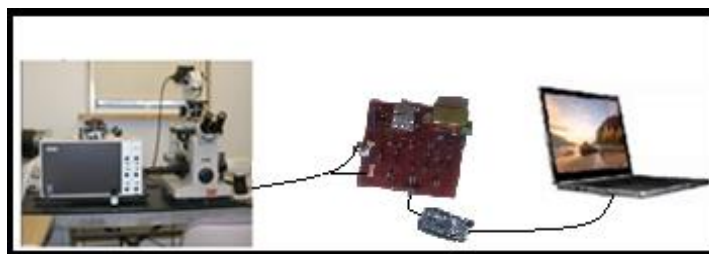


Figura 2 Interfaz nueva FUENTE AUTORES

La figura 1 muestra la interfaz que tenía el microscopio anteriormente, en la figura 2 se puede observar el tamaño de la interfaz comparada con el tamaño de la interfaz diseñada viendo así el avance que ha tenido la electrónica.

MICROSCOPÍA DE ESCANEEO CONFOCAL

1.4 INTRODUCCIÓN

En 1957 Marvin Minsky padre de la inteligencia artificial, estudiando el sistema nervioso pensó que si él pudiera verlo en sus diferentes niveles podría entender cómo funcionaban los circuitos neuronales, entonces fue así como desarrolló esta técnica llamada por el microscopio de barrido por etapas, de doble enfoque”[1].

Marvin Minsky en los años cincuenta construyó y patentó un microscopio de barrido por etapas de doble enfoque que permitía observar con claridad capas sucesivas de una muestra sin tener que rebanar el espécimen en finos cortes. Treinta años después su método es llamado microscopia de barrido confocal, proceso de microscopia óptica más notable en nuestro siglo [1].

El microscopio de barrido confocal combina el microscopio de fluorescencia con imagen digital a partir de luz suministrada por un láser dirigido al espécimen en particular para obtener imágenes tridimensionales [2].

En los microscopios ópticos cuando el objetivo enfoca luz tomada de planos por encima y por debajo de la superficie que se observa, la imagen se hace rápidamente borrosa, entonces, Minsky pensó que lo ideal sería recoger la luz reflejada del plano de interés solamente, pero sin embargo los tejidos ubicados por encima y por debajo de ese plano también refleja luz mostrando imágenes borrosas. La dispersión disminuye el contraste y se produce cuando la luz incide sobre las partículas y estas la reflejan a otras partículas adyacentes hasta alcanzar la superficie del detector.

Entonces Minsky hizo pasar la luz de iluminación a través de un objetivo pinhole, que enfoca los rayos garantizando un punto de luz nítido e intenso sobre una porción mínima de la muestra a la profundidad deseada.

Sin embargo de esta manera no garantizaba que la luz devuelta por los tejidos que estaban por encima y por debajo del punto que él quería observar, no llegaran a la superficie del detector. Entonces realizó un segundo ajuste, impidiendo también que

la luz que el tejido encima y debajo del plano focal reflejaba alcanzara la superficie receptora, por medio de una máscara con una apertura pequeña, de modo que solo la luz de regreso reflejada por el plano focal pasara a través del orificio hasta la superficie detectora [1].

1.5 CONCEPTOS BÁSICOS DE MICROSCOPIA DE ESCANEEO CONFOCAL

- **Pinhole o diafragma:** Dispositivo mecánico, con una abertura, que al abrirse o cerrarse permite o impide el paso de la luz.
- **Espejo dicroico:** Espejo que refleja unas determinadas longitudes de onda y transmite otras.
- **Epiluminación:** Sistema de iluminación en el que la luz atraviesa el objetivo para iluminar la muestra.
- **Espejo galvanométrico:** Espejo con un sistema de movimiento de alta precisión que permite el barrido del láser por la muestra.
- **Fluorescencia:** Propiedad que tienen determinadas moléculas de absorber luz de una determinada longitud de onda y emitir luz de una longitud de onda diferente.
- **Plano focal:** Plano imaginario de una muestra en el que todos los puntos están enfocados.
- **Secciones ópticas:** Cortes virtuales que podemos tomar de una muestra variando la posición del plano focal.

1.6 MICROSCOPIA DE ESCANEEO CONFOCAL (COMO FUNCIONA)

Entre las distintas líneas de láser que tiene el equipo el selector de excitación (A.O.T.F) selecciona el que vamos a utilizar. El haz de láser seleccionado atraviesa el divisor de haz A.O.B.S (*Acousto-Optical Beam Splitter*) y mediante un conjunto de espejos galvanométricos y un objetivo es enfocado en un punto de la muestra.

La señal luminosa emitida por la muestra vuelve por el mismo camino óptico, atraviesa el A.O.B.S siguiendo un camino distinto al del haz incidente y llega al sistema de detección espectral donde es dividida en función de sus longitudes de

onda. Un diafragma o pinhole delante del detector espectral permite seleccionar la luz procedente del plano focal.

La luz procedente del plano focal es recogida en un fotomultiplicador donde se transforma en una señal eléctrica que se digitaliza y almacena en un ordenador visualizándose a través de un monitor. Todo este proceso se puede visualizar en la figura 3.

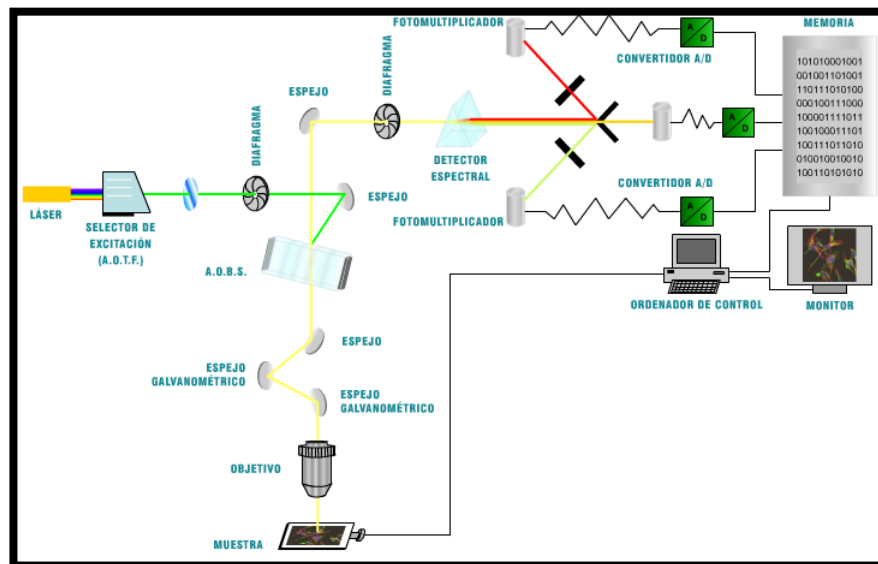


Figura 3 Funcionamiento de la microscopía confocal. FUENTE: Universidad de Oviedo⁵

1.7 LÁSER

Antes de comenzar hay que saber que la palabra LÁSER es un acrónimo de la expresión en inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Con este acrónimo se resume perfectamente el concepto láser. La traducción al español sería Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación. En esta definición se da a entender que el fenómeno láser es una amplificación de luz gracias al empleo de sistemas ópticos y del fenómeno de la emisión estimulada el cual

⁵www10.uniovi.es

provoca que de un fotón incidente en un átomo a un nivel de energía superior genere un fotón más [3].

1.8 FOTOMULTIPLICADORES

1.8.1 Introducción

Un fotomultiplicador es una célula provista de una serie de diez electrodos adicionales (llamados dinodos) que se mantienen alrededor de 100 V, 200 V, 300 V de potencial positivo respecto del fotocátodo. Los fotoelectrones procedentes del cátodo inciden sobre el primer dinodo y allí liberan más electrones por emisiones secundarias. Esto mismo se repite en cadena, multiplicándose la fotocorriente original varios miles de veces. La corriente se recoge, como siempre, en el ánodo que se mantiene unos 100 V por encima del último dinodo. La gran ventaja del fotomultiplicador es que la amplificación se puede incrementar en varios órdenes de magnitud, cambiando el potencial entre dinodos [4].

El primer detector de este tipo fue el *spintroscope de Crookes* (1903), usado por Geiger y Marsden (el famoso experimento de difusión $\alpha + Au$ de Rutherford). El material era SZn. Pero con el descubrimiento del fotomultiplicador (PM), por Curran y Baker en 1944, se impuso extraordinariamente el uso de centelladores. Su fiabilidad pronto se excedió a la de los contadores gaseosos [5].

En términos generales un fotomultiplicador se puede separar en dos etapas.

1.8.2 Fotomultiplicador básico

Se compone básicamente de un tubo fotomultiplicador, (ver figura 4) el cual es utilizado para convertir la luz en señales eléctricas, su principio de funcionamiento es el descrito anteriormente al comienzo de este capítulo.

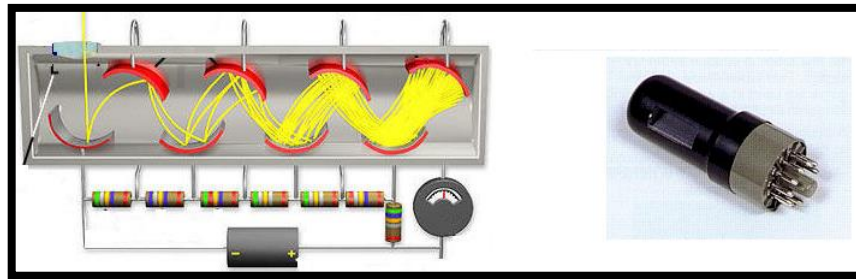


Figura 4 Tubo fotomultiplicador FUENTE: Shimadzu⁶

1.8.3 Fotomultiplicador con etapa interna

Al igual que el fotomultiplicador básico este posee un tubo fotomultiplicador pero adicional a este posee un circuito de alimentación de alta tensión, y un circuito divisor de tensión para distribuir la tensión adecuada a cada dinodo, todo reunido en una sola carcasa compacta. Adicional a esto poseen módulos que tienen funciones de procesamiento de la señal, enfriamiento y la interfaz al PC, internas en la carcasa (ver figura 5) [6].



Figura 5 Fotomultiplicador con etapas internas FUENTE: hamamatsu

1.8.4 Aplicaciones

Entre muchas otras aplicaciones podemos encontrar las siguientes.

- Espectroscopia de fluorescencia de correlación

⁶ www.shimadzu.com.br/analitica/productos/spectro/fluorescence/rf5301pcountros.shtml

La espectroscopia de fluorescencia de correlación es una técnica para la medición de moléculas individuales. El principio de la espectroscopia de fluorescencia de correlación fue concebido en la década de 1970, pero no fue hasta la década de 1990 que se adecuó el equipo para su uso. La estructura del equipo es en gran medida el mismo que el del microscopio láser confocal, pero no hay espejo galvanométrico, y sólo se observa una pequeña área de la solución. Las moléculas fluorescentes entran y salen de la zona sometida a observación y la intensidad de fluorescencia se mide por el algoritmo de correlación automática. Figura 6.

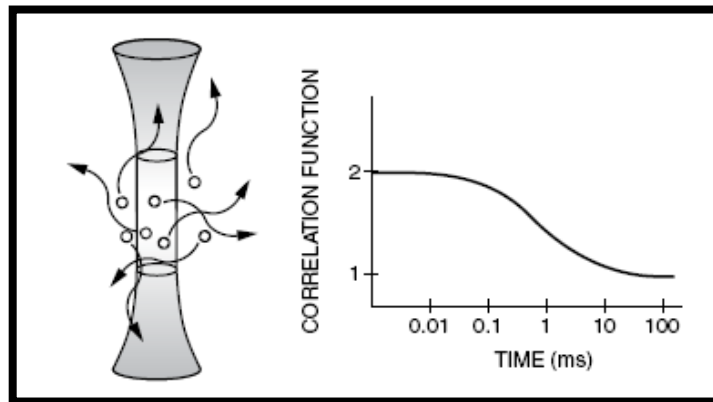


Figura 6 Espectroscopia de fluorescencia de correlación FUENTE: Hamamatsu

➤ Microscopio *Multi-Photon*

En este método, las moléculas fluorescentes se pueden excitar con luz del infrarrojo, cercano a permitir que las moléculas absorban casi simultáneamente dos fotones, y el resultado será que se podrá observar la fluorescencia UV. El área de la sección transversal de absorción de los dos fotones es extremadamente pequeña, por lo que casi toda la fluorescencia debe ser detectada como señal en cualquier posición desde el punto focal. Otras ventajas es que casi el doble de la longitud de onda que se utiliza en comparación con la excitación por un fotón. Esto no sólo significa que los efectos no deseados de la dispersión y el ruido de fondo dentro de la muestra debido a la luz de excitación se reducen drásticamente, sino también que los daños en las células de la luz UV se reduce al mínimo.

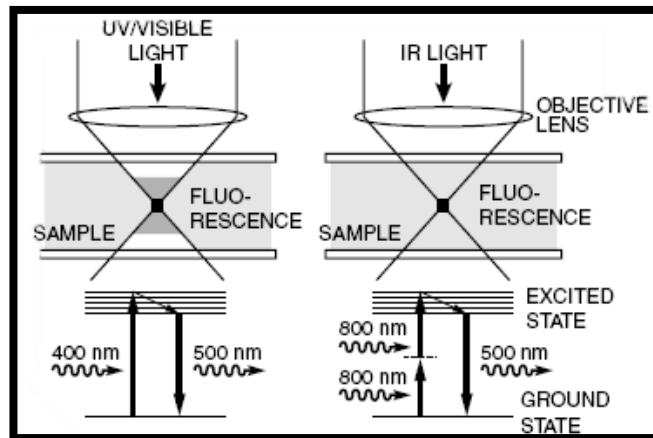


Figura 7 Microscopio Multi-Photon

FUENTE: HAMAMATSU

➤ Rayos X, lectura de imagen

Los dispositivos utilizados para leer las imágenes de rayos X consisten en un método que utiliza una placa de almacenamiento de fósforo y el método para la lectura de brillo directamente de una película de rayos X. En la placa de fósforo de almacenamiento de brillo, se puede almacenar temporalmente la información de los rayos X que se ha detectado. La información almacenada en la placa es explorada por un haz de láser y después se extrae mediante la medición de la intensidad fluorescente con módulos de PMT (*Fotomultiplicador*). La película de rayos X también es explorada por un haz de láser de la misma manera y la luz transmitida es detectada como una señal eléctrica, que luego se convierte en una señal digital. Estos dispositivos pueden mostrar la imagen de rayos X en un monitor CRT y ser enviados a través de forma digital.

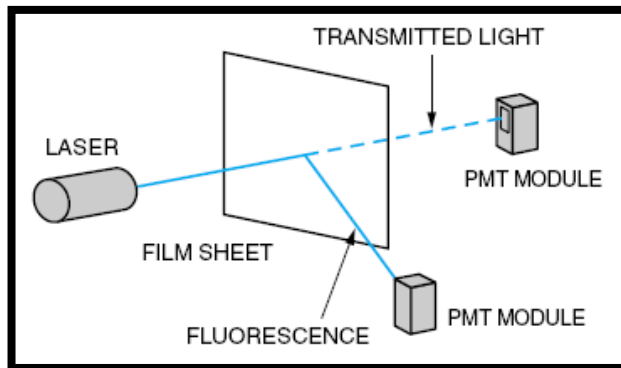


Figura 8 Rayos X, lectura de imagen FUENTE: Hamamatsu

1.9 ESPEJOS GALVANOMÉTRICOS [7]

1.9.1 ¿Qué es un galvanómetro?

El galvanómetro es uno de los instrumentos usados para detectar pequeñas corrientes, su símbolo esquemático es (G). Cuando se detectaban corrientes muy pequeñas, el galvanómetro había sido usado con un espejo adjunto y una fuente de luz en vez de una aguja, para agrandar la deformación, los galvanómetros que existen actualmente también heredan este principio. Los galvanómetros tienen un rotor muy delgado para minimizar la inercia del mismo para un movimiento rápido. La bobina móvil es reemplazada por un rotor de alta rigidez sólida, tales como el imán móvil y el hierro móvil, la armadura de hierro es movida al estator para incrementar la radiación de calor. Esta estructura puede ser dicha: "Servo Motor" en lugar de galvanómetro.

1.9.2 Escáner XY

El escáner X-Y es el componente más genérico el cual puede controlar el rayo láser a voluntad. La figura 9 muestra el principio del escáner X-Y. Dos galvanómetros son montados perpendicularmente, el rayo láser entrante es rebotado por el espejo galvanométrico del eje X y rebotado de nuevo al espejo galvanométrico del eje Y, el haz entra al espacio de representación. La dirección del haz puede ser determinada por la combinación del ángulo de deflexión de dos espejos. El barrido del haz de láser, crea hojas o túnel láser como efecto del rayo, o dibuja gráficos láser sobre la

pantalla. Para el efecto de pantalla, la velocidad del escaneo del escáner X-Y es particularmente requerida, porque esto debe escanear tan rápido y exactamente como sea posible para una buena calidad de la imagen. En este proyecto se fija una velocidad de 241Hz, necesarios para una imagen de un objeto metálico. Solamente el galvanómetro de laso cerrado es el usado actualmente para efectos de pantalla y gráficos abstractos simples, los galvanómetros de laso abierto y galvanómetros resonantes son algunas veces usados.

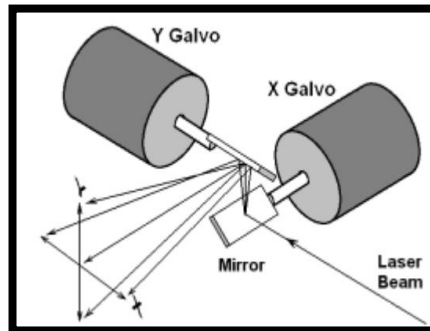


Figura 9 Scanner XY FUENTE: [7]

HARDWARE

1.10 INTRODUCCIÓN

Dentro del hardware a controlar con el presente proyecto, se encuentra un motor, un fotomultiplicador y los espejos galvanométricos, éstos a su vez son controlados por la tarjeta de desarrollo Arduino DUE.

Un motor es un conversor de energía eléctrica a energía mecánica. Un motor paso a paso, es un motor de reluctancia [8] que, para este trabajo define cada uno de los movimientos verticales en el eje Z. Este motor es de 5 fases, por cada una de sus bobinas deben pasar 0.95 A y presenta una resistencia de 1.7Ω . Éste necesita de una etapa de control para ser operado.

Los espejos galvanométricos necesitan de voltajes de -5 a 5v; de la tarjeta de desarrollo de Arduino DUE salen estos voltajes que son adaptados por medio de una etapa de acoplamiento.

Las tarjetas de desarrollo son pequeñas tarjetas donde el usuario pueda llevar a cabo de forma rápida y cómoda todo tipo de trabajos o experimentos electrónicos. Estas tarjetas disponen del circuito de estabilización de tensión de forma que se puedan alimentar directamente desde baterías o por una fuente de alimentación externa. Dichas tarjetas traen un software con el que se puedan comunicar por medio de un computador.

1.11 MOTOR PASO A PASO BIPOLAR DE 5 FASES

Un motor paso a paso se puede comparar con uno síncrono en lo que se refiere al principio de funcionamiento: un campo magnético rotativo, generado por el control magnético. Los motores se diferencian entre sí por la forma en que se genera el campo magnético (los unipolares permiten el paso de corriente en un mismo sentido por cada una de sus bobinas y los bipolares cambian el sentido de la corriente en

sus bobinas, todo esto para cambiar el sentido de giro del motor) y por el material con que se ha construido el rotor: imán permanente o hierro dulce.

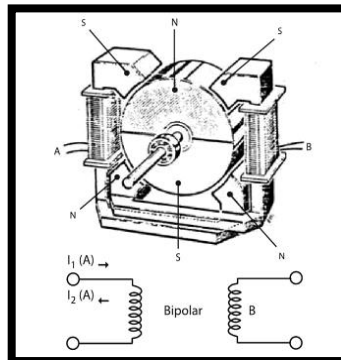


Figura 10: Representación esquemática de un motor paso a paso bipolar. Fuente: Motor paso a paso⁷.

La figura 10 muestra la representación esquemática de un motor paso a paso bipolar. La polaridad del campo magnético cambia al invertir el sentido de la corriente.

Los motores paso a paso bipolares, como el que se usó en este proyecto, poseen dos terminales por cada uno de sus devanados, como se muestra en la figura 10. Se llama bipolar debido a que por cada una de sus bobinas se puede invertir el sentido de la corriente al contrario del motor unipolar el cual sólo admite un sentido para la corriente.

⁷ Francisco Conti, Motores Paso a Paso. Alsina. 2005

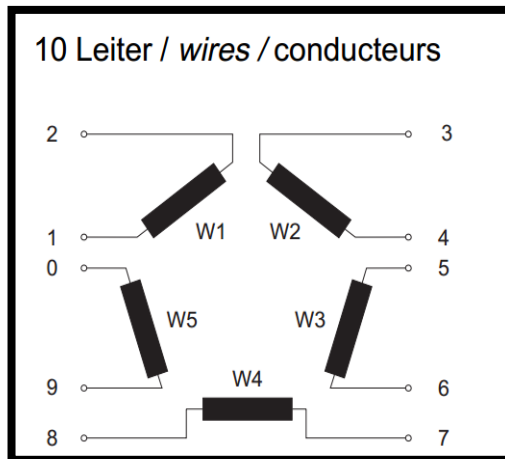


Figura 11 Bornes de un motor paso a paso bipolar de 5 fases. FUENTE: [9]

La figura 11, muestra la conexión en caja de bornes de un motor paso a paso bipolar de 5 fases, con 10 cables de conexión. Esta es la configuración del motor que maneja los movimientos en el eje Z del microscopio.

Características del motor paso a paso bipolar de 5 fases:

- modelo VRDM 564/50 LNA
- soporta una corriente de 0.95 A por sus devanados
- tiene una resistencia eléctrica de 1.7Ω.

En la siguiente imagen (ver figura 12) se pueden ver las especificaciones del motor, VRDM 564/50 LNA.

Size			VRDM 60						
Motor type			564		566		568		
			LN.	LH.	LT.	LN.	LH.	LN.	LH.
Number of steps (FS/HS)	z		1,000/500						
Step angle (FS/HS)	α	$^{\circ}$							
max. torque	Mm	Ncm	30				90		
Holding moment	M	Ncm	33		66		99		
Moment of inertia of rotor	J	kgcm ²	0.08		0.16		0.24		
Positioning error per step	$\Delta\alpha_s$	$^{\circ}$	3'						
max. start frequency (FS/HS)	f_{Aom}	kHz	8.0/4.0						
Nominal current/winding	I_w	A	0.95	1.50	0.95	1.20	1.90	1.50	2.40
Resistance/winding	R_w	Ω	1.70	0.75	2.80	1.80	0.80	1.60	0.70
Time constant of current rise	τ	ms	~4		~5		~6		
Max. shaft load*	axial radial	N	~7 ~20						
Weight: approx.: Leads other version	G	kg	0.45 0.53		0.70 0.78		0.95 1.03		

* at half shaft length (from mounting flange), please inquire about different loads

Tabla 1 Especificaciones del motor Fuente: Berger Lahr –System Solution.

En la figura 12 mostrada abajo se puede ver un motor igual al utilizado en el proyecto.



Figura 12 Foto similar al motor del microscopio FUENTE: eBay

Angulo por paso $0.72^{\circ}/0.36^{\circ}$ (full step/half step)

Alta resolución de 500 o 1000 pasos por revolución

Torque de 30 Ncm aproximadamente.

La frecuencia es de 8khz, para *full step* lo que nos deja el movimiento de cada paso del motor en 125 us/paso. En este proyecto no es necesaria la velocidad ya que el motor se moverá paso a paso. Se ha dado un tiempo estimado de acuerdo con la tabla de datos mostrada arriba en la tabla 1.

1.12 TARJETA DE DESARROLLO

1.12.1 Criterio de selección

A la hora de elegir la tarjeta se tuvieron algunos aspectos importantes, como lo siguiente:

1. Posibilidad de conectarse y tener comunicación bidireccional por medio del puerto USB, ya que es un puerto común en Computadores. Esto con el fin de controlar el motor, la generación de la señal diente sierra y al tiempo recibir los datos del amplificador de transresistencia o del fotomultiplicador HC125.
2. Para entregar un par de señales digitales (XY), necesita dos DAC's.
3. Resolución para las señales de salida X-Y, de 8 bits o superior. Esto con el fin de obtener una imagen de igual calidad o superior.
4. La velocidad del DAC, debe permitirle la creación de las dos señales con una frecuencia de mínimo 200Hz, para la señal X y para la "Y" no es necesario, debido a que ésta aumentará en uno su valor cada que termine la "X" de hacer el barrido, además, la imagen se enviará cada que termine un barrido horizontal.
5. La velocidad del ADC (241Hz). Para adquirir los datos provenientes del *PMT*.
6. Debe tener pines digitales para controlar el motor. Con mínimo 12 pines digitales
7. Mínimo un pin analógico para recibir la señal del fotomultiplicador.
8. Conexión en caliente para conectar y desconectar la tarjeta mientras el computador esté encendido.

1.12.2 Selección [10]

Las siguientes son 2 opciones de tarjetas para desarrollar el proyecto.

Espartan 3E XC3S500E:

1. Posibilidad de crear comunicación bidireccional por el puerto USB
2. Posibilidad de crear un DAC mayor a 8 bits
3. Posibilidad de crear un ADC mayor a 8 bits

Arduino DUE:

1. Procesador de 32bits.
2. Tiene comunicación bidireccional USB, por medio del puerto COM.
3. Tiene 2 DAC con resolución ajustable hasta un máximo 12 bits
4. La velocidad del DAC, es de 1MSPS.
5. Tiene 54 pines digitales que se pueden usar como entradas o salidas, 6 de los cuales son PWM.
6. Tiene 12 pines de entradas analógicas.
7. Tiene conexión en caliente.

El Arduino DUE, también tiene una interfaz de usuario, lo que facilita la programación de su microcontrolador. Además de lo anterior su software es libre lo que lo hace masivo, permite tener una mayor ayuda y evita gastos por licencias.

Además de lo anterior, el Arduino cuenta con 2 memorias:

-Memoria Flash de 512 KB, donde Arduino almacena el *sketch*. Memoria no volátil.

-Memoria SRAM de 96 KB, donde el *sketch* almacena y manipula variables al ejecutarse. Esta memoria es volátil.

La memoria Flash es no-volátil (la información se mantiene en ellas luego de cortar la alimentación). SRAM es volátil y se perderá al reiniciar la unidad.

1.12.3 Arduino



Figura 13 Logotipo de Arduino

FUENTE: Arduino.cc

Arduino es una plataforma de hardware de código abierto, basada en una sencilla placa con entradas y salidas, analógicas y digitales, en un entorno de desarrollo que está basado en el lenguaje de programación *Processing*. Es un dispositivo que conecta el mundo físico con el mundo virtual, o el mundo analógico con el digital.

Sus creadores son el zaragozano David Cuartielles, ingeniero electrónico y docente de la Universidad de Mälmo, Suecia y Massimo Banzi, italiano, diseñador y desarrollador Web. El proyecto fue concebido en Italia en el año 2005⁸.

1.12.4 Arduino Due

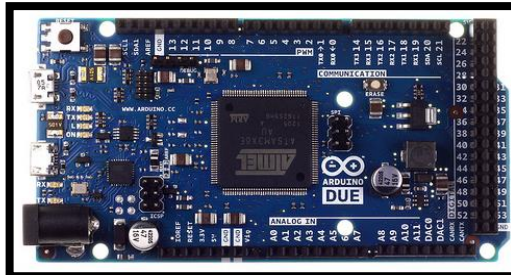


Figura 14 Arduino DUE

FUENTE: Arduino.cc

El Arduino Due es una placa electrónica basada en el procesador ARM Cortex-M3 AT91SAM3X8E CPU Atmel. Es la primera placa Arduino basado en un microcontrolador ARM núcleo de 32 bits. Tiene 54 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 12 se pueden utilizar como salidas PWM), 12 entradas analógicas, 4 *UARTs* (puertos serie de hardware), un reloj de 84 MHz, una conexión capaz OTG

⁸<http://proyectoarduino.wordpress.com/%C2%BFque-es-arduino/>

USB, 2 DAC (de digital a analógico), 2 TWI, un conector de alimentación, una cabecera de SPI, un encabezado JTAG, un botón de reinicio y un botón de borrado.

En la figura 14 se muestra la tarjeta usada en este trabajo, el Arduino DUE.

1.12.5 Software de Arduino DUE

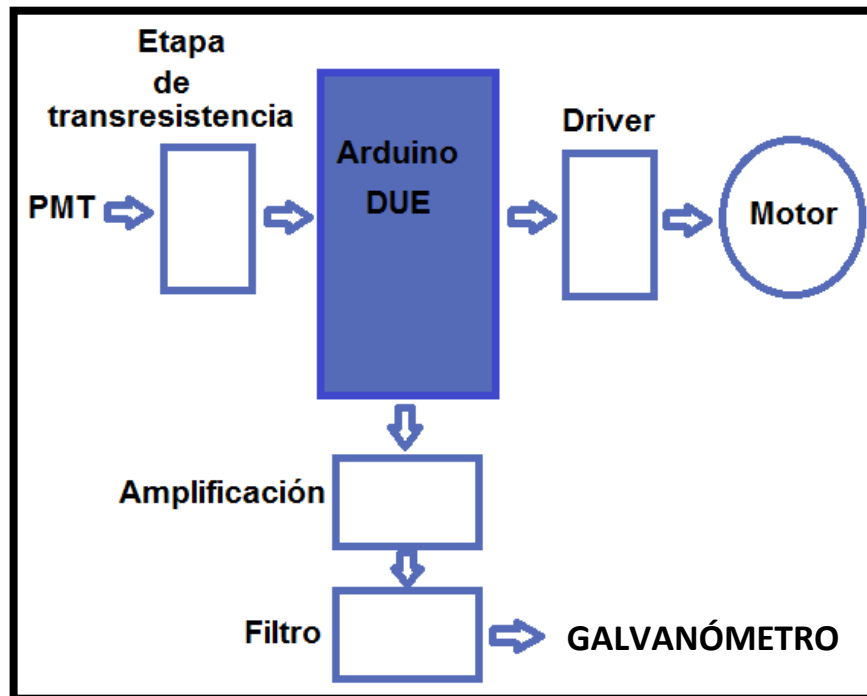


Figura 15 Tareas del Arduino DUE FUENTE: Autores

La figura 15 muestra las tareas que debe realizar el Arduino DUE. Por una parte, tiene la recepción de la señal proveniente del *PMT*, por medio de la etapa de transresistencia, estos datos recibidos son almacenados en el computador lo cual permite que se pueda almacenar mayor cantidad de datos; luego está la etapa de amplificación y filtrado de la señal XY, la cual llegará a los espejos galvanométricos; termina con el *driver* del motor que controla el movimiento en Z.

Desde la página principal de Arduino se puede descargar el software con el que se programa el microcontrolador de la tarjeta de Arduino. En la página anteriormente mencionada se puede ver (a la fecha 24/10/2013) la última versión del software

llamado “Arduino 1.5.4”; se encuentra para los sistemas operativos Windows, Mac OS X y Linux 32 bit, 64 bit.

En esta programación (la del motor) para el movimiento de la porta-muestra en el eje Z, se ha establecido que el motor dé un paso completo; este movimiento da un giro de 0.72° en el eje del motor. Las tablas 4 y 5 muestran la secuencia para el giro del motor con un paso completo (0.72°). Por este motivo se deja la opción para que en un futuro se pueda hacer un cambio en el código del *Sketch* de Arduino o desde Matlab, ya sea para que el motor gire a medio paso (0.36°) o a pasos completos (0.72° cada paso completo), las veces que sea necesario con el fin de dar con la resolución de 100nm.

La adquisición de las imágenes va incluida en el código. A medida que se va aumentando la señal X, también se va recogiendo la señal proveniente del fotomultiplicador. Ver numeral 5.4 (Barrido Láser).

Esta plataforma es simple de usar, cualquier persona con conocimientos básicos en C lo puede hacer. Con esto se quiere decir, que el sistema no es fijo, se puede reprogramar cuantas veces sea necesario.

1.12.6 Ventajas

Multi-Plataforma - El software de Arduino funciona en los sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y Linux.

Entorno de programación simple y directo - El entorno de programación de Arduino es fácil de usar para principiantes y lo suficientemente flexible para los usuarios avanzados.

Software ampliable y de código abierto- El software Arduino está publicado bajo una licencia libre y preparado para ser ampliado por programadores experimentados. El lenguaje puede ampliarse a través de librerías de C++.

Arduino está basado en los microcontroladores ATMEGA168, ATMEGA328 y ATMEGA1280. Los planos de los módulos están publicados bajo licencia *Creative*

Commons, por lo que diseñadores de circuitos con experiencia pueden hacer su propia versión del módulo, ampliándolo u optimizándolo.

CONSTRUCCIÓN DE LA ETAPA DE AMPLIFICACIÓN DE LA SEÑAL DEL FOTOMULTIPLICADOR (AMPLIFICADOR DE TRANSRESISTENCIA)

1.13 INTRODUCCIÓN

El microscopio confocal MCR 600 es un sistema de instrumentación de precisión que permite visualizar muestras a través de la luz reflejada en las mismas, por medio de un fotomultiplicador con una pequeña salida de corriente. Para adquirir esta señal se requiere de una etapa que nos permita amplificar la señal de salida del fotomultiplicador y convertirla en una señal de tensión y así obtenerla y procesarla mediante un microcontrolador. Para lograr este objetivo se implementó un amplificador de transresistencia basado en amplificadores operacionales el cual permite recibir la señal de corriente, amplificarla y transformarla en una señal de tensión.

Los amplificadores operacionales (op amp) han estado en uso durante mucho tiempo, sus aplicaciones fueron inicialmente en los campos de computación analógica e instrumentación. Los primeros op amp estaban contruidos a partir de componentes discretos (tubos de vacío y luego transistores y resistores), y sus costos eran bastante altos (decenas de dólares).

A mediados de la década de 1960 se fabricó el primer op amp de circuito integrado (IC). Esta unidad (la μA 709) está formado por un número relativamente grande de transistores y resistores, todos en el mismo chip de silicio. Aun cuando sus características eran deficientes (en comparación con los estándares actuales) y su precio era bastante alto, su aspecto marco una nueva era en el diseño de circuitos electrónicos. Los ingenieros electrónicos empezaron a usar los op amps en grandes cantidades, lo que hizo que su precio se redujera considerablemente; también

demandaron op amp de mejor calidad y por supuesto los fabricantes dieron rápida respuesta; en un lapso de muy pocos años, ya existían op amps de alta calidad a precios sumamente bajos (decenas de centavos de dólares) que ofrecían varios fabricantes [12].

Una de las cosas que hicieron que los op amp fueran bastante demandados, fue que los op amp de IC se aproximaran bastante al ideal supuesto, esto significó que se hiciera más fácil diseñar circuitos a través del comportamiento ideal del op amp.

1.14 AMPLIFICADOR DE TRANSRESISTENCIA

El amplificador de transresistencia más conocido como convertor de corriente a voltaje permite amplificar la señal de corriente de entrada a voltaje en la salida del amplificador. Con el resistor R1 de la figura 16 como factor de proporcionalidad, la relación resultante entre la corriente de entrada y el voltaje de salida es:

$$V_{out} = -R \times I_{in} \quad (4.1)$$

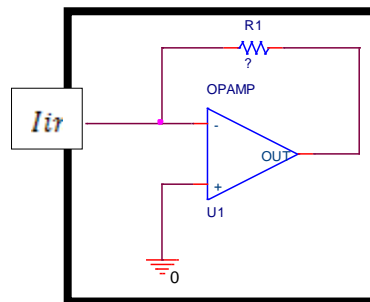


Figura 16 Amplificador básico de transresistencia. FUENTE: Autores

1.15 CONDICIONES DE DISEÑO

El amplificador mostrado en la figura 16, es el circuito básico utilizado en aplicaciones que no requieren condiciones de un estudio profundo del amplificador. Para la elaboración del amplificador de transresistencia implementado se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones de diseño.

- Características del amplificador.

- Señal de salida.
- Señal de entrada.
- Cálculos e implementación.

1.15.1 Características del amplificador

Dada la importancia en la adquisición de datos durante el proceso de visualización de imágenes y el procesamiento de las mismas, el amplificador operacional debe cumplir con ciertas características que lo hagan apto para la aplicación. Estas características básicas son.

- **Voltaje de *offset*:** La tensión de *offset*, es la tensión continua que aparece en la salida cuando la diferencia de tensión entre el terminal inversor y el terminal no inversor es cero. Esto se debe a que los transistores internos del amplificador operacional no son exactamente iguales y se produce una señal diferencial interior, que amplificada aparecerá en la salida.

Este valor de tensión es erróneo y no debe aparecer en la salida. En aplicaciones como el amplificador de transresistencia donde se requiere un alto grado de precisión, la tensión *offset* de entrada produce un error bastante significativo, sobre todo si se trabaja con etapas de alta ganancia.

- **Respuesta en frecuencia:** El análisis de la frecuencia juega un papel determinante en el amplificador operacional ya que esta puede ocasionar variaciones a la salida, es decir puede alterar los valores máximos de tensión pico positiva o negativa sin recorte de señal.
- **Ganancia de lazo abierto:** Esta ganancia es proporcionada por el amplificador operacional sin que se le conecte algún lazo de realimentación. En el análisis ideal esta ganancia se considera infinita. Este parámetro nos permite revisar que tanta ganancia suministra el amplificador operacional con respecto a otros circuitos integrados.

- **Nivel de ruido:** El ruido es toda aquella señal que se encuentra con la señal censada, obtenida o medida que no hace parte del proceso. En el amplificador de transresistencia es de suma importancia que el circuito integrado que se utilice sea de bajo ruido, dado que la señales que va a amplificar son extremadamente pequeñas, y si el amplificador operacional suministra señales de ruido por encima de las censadas, se obtendrán valores erróneos en la salida.

1.15.1.1 Selección del amplificador operacional

Durante el proceso de selección se tuvieron en cuenta los parámetros anteriormente mencionados y se analizaron los parámetros con base a las hojas de datos de los fabricantes, de esta selección se escogió para la implementación el amplificador operacional AD820 de *ANALOG DEVICES* para la implementación por las siguientes características.

- Ganancia de lazo abierto 1000 V/mV
- Respuesta en frecuencia 1.8 MHz
- Voltaje de *offset* 2 μ V
- Voltaje de ruido de 0.1 Hz a 10 Hz ruido de 13 nV, 100 Hz ruido de 45 nV / $\sqrt{\text{Hz}}$

Aunque el anterior amplificador operacional según especificaciones del fabricante fue diseñado para otras aplicaciones, sus características lo hicieron un buen candidato para la implementación del amplificador de transresistencia.

1.15.2 Señal de salida

El diseño se realizó con el fin de garantizar a la salida una ganancia alta, es decir, que permitiera ser leída por el microcontrolador (Valor de tensión máxima de entrada al microcontrolador 3.3 V), con muy poco error y ruido que no influenciaran en los datos adquiridos. Para poder obtener un dispositivo con estas características se realizó la etapa de amplificación con 4 lazos de ganancia a través de un

switchon/off de cuatro terminales, que permitiera tener a la salida opciones seleccionables.

1.15.3 Señal de entrada

La señal de entrada al amplificador de transresistencia, proviene del fotomultiplicador instalado en el microscopio MRC 600, el cual suministra una corriente variable en el orden de los micro-amperes, donde su valor máximo es de 600uA a una frecuencia de 241Hz.

1.15.4 Cálculos e implementación

Tomando como punto de partida la figura 16, se debe establecer los valores de las resistencias en cada etapa de ganancia, las cuales determinaran el valor de amplificación.

De la figura 16 tenemos que;

$$I1 = 0 \quad \text{Y que} \quad I2 = 0$$

Entonces

$$Vd = V1 - V2 = 0 \tag{4.2}$$

Por tanto

$$V1 = V2 \tag{4.3}$$

De esta manera el valor de R de la figura 16 será:

$$-R = \frac{Vo}{I1} \tag{4.4}$$

Por tanto si alimentamos el circuito con una corriente $I1$ de 600uA, el valor de la tensión de salida, con una resistencia R de 10KΩ será:

$$Vo = (600uA)(10K\Omega) = 6V$$

Así una primera etapa del circuito quedaría como se muestra en la figura 17.

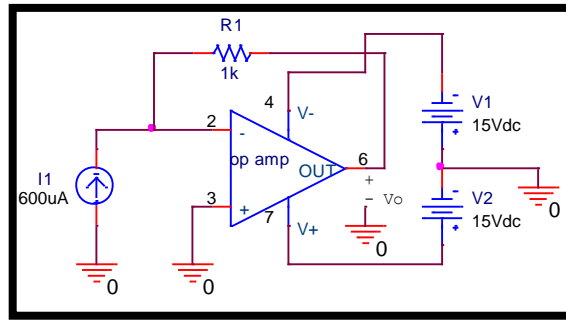


Figura 17 Amplificador de transresistencia con 1 etapa de ganancia. FUENTE:
Autores

Pero de esta manera se podrían producir errores de saturación de ganancia en la medición debido a la capacitancia interna del fotodiodo, con un condensador con un valor adecuado se podría disminuir este error. De la hoja de datos del AD820 podemos obtener el valor aproximado para el condensador el cual puede ser de aproximadamente del orden de los pico faradios. Para corregir el error de *offset* se adiciona un potenciómetro de 20K Ω entre los terminales de *offset* que nos permitirá variar esta señal al nivel deseado.

Con estos parámetros definidos solo quedaría acondicionar las otras etapas seleccionables para posibles valores de entrada a diversos microcontroladores corrientes.

Etapa 1

- Con $I_1 = 3.3mA$ y $R = 1K\Omega$ el valor de V_o será:

$$V_o = (3.3mA)(1K\Omega) = 3.3V$$

Etapa 2

- Con $I_1 = 600uA$ y $R = 5.5K\Omega$ el valor de V_o será:

$$V_o = (600uA)(5.5K\Omega) = 3.3V$$

Etapa 3

- Con $I_1 = 330uA$ y $R = 1K\Omega$ el valor de V_o será:

$$V_o = (330\mu A)(10K\Omega) = 3.3V$$

Etapas 4

- Con $I_1 = 165\mu A$ y $R = 1K\Omega$ el valor de V_o será:

$$V_o = (165\mu A)(20K\Omega) = 3.3V$$

De esta manera se tendrían diferentes etapas de amplificación, esto con el propósito de que el proyecto cuente con una entrada para diferentes posibles fotomultiplicadores.

Para la implementación que se está llevando a cabo se seleccionara la opción 2 dado que el microcontrolador Arduino DUE recibe señales analógicas de máximo 3.3 V

Así el amplificador de transresistencia quedaría como se muestra en la figura 18.

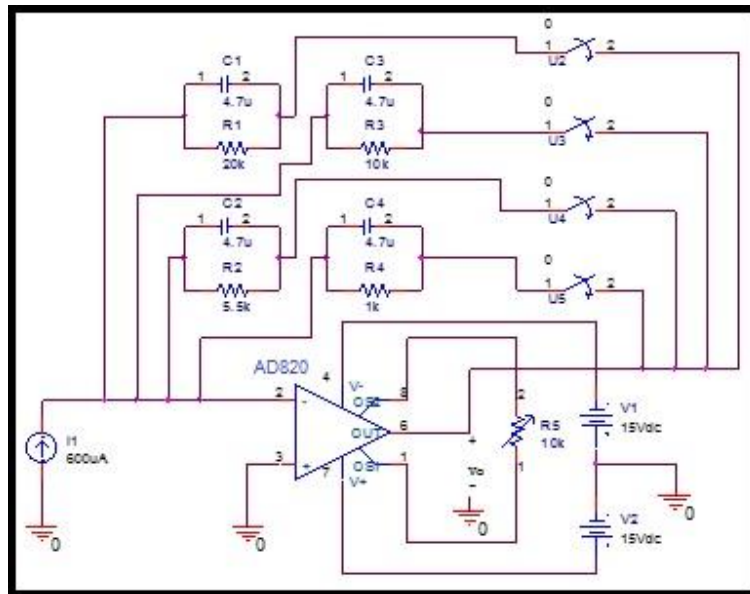


Figura 18 Amplificador de transresistencia con las 4 etapas de amplificación.

FUENTE: Autores

1.15.5 Análisis de resultados y de ruido

Voltaje	Resistencia	Corriente	Voltaje	Ideal
5.8	9.83k	600	3.3	3.3
4.9	9.83k	500	2.77	2.75
3.9	9.83k	400	2.2	2.2
2.9	9.83k	300	1.6	1.65
1.9	9.83k	200	1.04	1.1
0.9	9.83k	100	0.51	0.55
0	9.83k	0	0	0

Tabla 2 Resultados del amplificador transresistencia AD820

FUENTE:

Autores

En la tabla 2 se tomaron los resultados con la implementación del amplificador operacional AD820, el cual es el que se incorpora en el diseño de la PCB mostrado en el capítulo 8 de este documento.

Para calcular el ruido proporcionado por el amplificador operacional se acude al *Datasheet* del fabricante, en ella se puede apreciar en la página 3 que la densidad de ruido viene dado por la ecuación 4.5

$$Vn^2 = \frac{nV}{\sqrt{Hz}} \quad (4.5)$$

Para la aplicación que se llevó a cabo se tiene una señal de entrada con una frecuencia de 241Hz, así el ruido del amplificador operacional será.

$$\begin{aligned} Vno &= \sqrt{Vn^2} * \sqrt{\Delta f} = 16 \left(\frac{nV}{\sqrt{Hz}} \right) * \sqrt{241} = 248.38(nV \text{ r. m. s}) \\ &= 0.24838(\mu V \text{ r. m. s}) \end{aligned} \quad (4.6)$$

El ruido proporcionado por las resistencias, conocido como ruido térmico o ruido de Johnson está dado por la ecuación 4.6

$$V_R^2 = 4K_B T R \quad (4.7)$$

Donde k_B es la constante de Boltzmann en Julios por Kelvin, T es la temperatura de la resistencia en Kelvin y R en su valor en ohmios.

De esta manera para una temperatura ambiente de 25°C (298.15°K≈300°K), el ruido proporcionado por la resistencia de 5.5KΩ será.

$$V_R^2(f) = 4k_BTR = 4 * 1,38 * 10^{-23} * 300 * 5500 = 9.108 * 10^{-17}$$

$$V_R^2(f) = \sqrt{V_R^2(f)} = \sqrt{9.108 * 10^{-17} \left(\frac{V^2}{Hz}\right)} = 9.5435 * 10^{-9} \left(\frac{V}{\sqrt{Hz}}\right) = 9.5435 * \left(\frac{nV}{\sqrt{Hz}}\right)$$

$$V_R^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} V_R^2(f)df = 9.108 * 10^{-17} \left(\frac{V^2}{Hz}\right) * \Delta f(Hz) = 9.108 * 10^{-17} * \Delta f(V^2)$$

$$V_R = \sqrt{V_R^2} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} V_R^2(f)df} = 9.5435 * \sqrt{\Delta f}(nV r. m. s)$$

$$V_R = 9.5435nV * \sqrt{241} = 148.15(nV r. m. s) \quad (4.8)$$

Aunque los capacitores no suministran ruido a los circuitos electrónicos, estos si almacenan ruido proveniente de las fuentes de ruido del sistema. Del análisis de ruido Johnson se puede obtener la ecuación para determinar el valor de dicho ruido almacenado.

$$V_{nc} = \sqrt{\frac{K_B * T}{C}} \quad (4.9)$$

De esta manera para una temperatura ambiente de 25°C (298.15°K), el ruido proporcionado por la capacitancia de 4.7uF será.

$$V_{nc} = \sqrt{\frac{(1.38 * 10^{-23})(298.15)}{4.7 * 4.7^{-6}}} = 29.58nV \quad (4.10)$$

De esta manera el ruido total viene dado por

$$V_T^2 = V_{no}^2 + V_R^2 + V_{nc}^2 \quad (4.11)$$

$$V_T = \sqrt{0.258nV^2 + 153.88nV^2 + 29.58^2} = 156.7nV$$

Tomando los tres valores de ruido tenemos que el ruido total suministrado por toda la etapa de transresistencia es de 156.7nV; el cual no interfiere con los valores tomados por la tarjeta de desarrollo ya que esta recibirá datos de tensión entre 0 y 3.3V.

ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

1.16 INTRODUCCIÓN

La muestra metálica debe ser barrida por un rayo láser. Para que el rayo láser tenga los movimientos necesarios para hacer el barrido, éste pasa a través de dos espejos galvanométricos.

Estos espejos galvanómetros necesitan voltajes de -5 a 5v, los cuales serán generados en forma de señales diente sierra por el microcontrolador del Arduino DUE.

La señal diente sierra es un tipo de función que sube en forma de rampa hasta un punto determinado y después baja rectamente asemejándose de esta manera a los dientes de una sierra. Sus aplicaciones son diversas en la electrónica, pero en este proyecto se aplicara para dar movimiento a los espejos galvanométricos, dado que este tipo de señal le permita al espejo hacer un movimiento adecuado para el escaneo de muestras.

Las señales diente sierra se diseñan en la tarjeta de desarrollo Arduino Due, de donde salen a través de los puertos DAC0 o DAC1. Pero esta señal de salida va desde 0.55Volt hasta 2.75Volt y los espejos galvanométricos necesitan voltajes que van desde -5Volt hasta +5Volt, por ello se hace necesario diseñar unas etapas de acondicionamiento de señal que nos permitan adecuar la señal de salida a los parámetros requeridos, incluyendo su etapa de filtro para suavizar la señal.

1.17 SEÑAL X

Cada una de las señales programadas en el Arduino DUE tiene una resolución de 9 bits. La señal horizontal se filtrará para obtener una señal más suave a la hora de mover el haz del rayo láser, esto con el fin de obtener una mejor imagen al momento de adquirir los datos y dejar más suave el movimiento de los galvanómetros. Ésta es la señal X.

La señal X es la de mayor frecuencia además de ser la señal que se filtrará. Esta señal es la que hace el barrido horizontal del haz de rayo láser. La frecuencia de esta señal es de 241Hz (ver figura 19). A la par de su barrido se lee el puerto analógico y al terminar dicho barrido se envían los datos a Matlab por medio del puerto serial. La cantidad de datos recolectados es de 512 por cada línea.

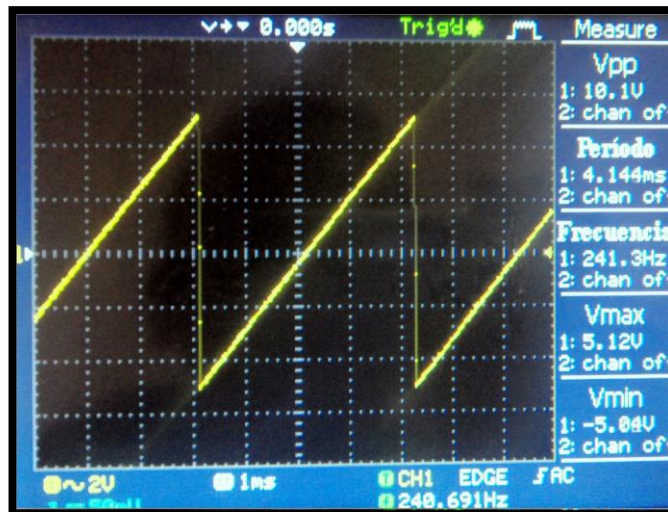


Figura 19 Señal X FUENTE: Autores



Figura 20 Señal X sumada con la duración de la transmisión de datos FUENTE: Autores

1.18 SEÑAL Y

Es la señal con menor frecuencia y la que mantiene su valor mientras la señal “X” hace su barrido horizontal, adicional a esto debe esperar la lectura de los datos en el puerto analógico para realizar su siguiente desplazamiento. La demora en la señal se puede ver en la figura 20, donde se muestra la señal X más el tiempo que demora la señal en ser transmitida hacia el puerto COM del computador; la frecuencia como se puede ver en la misma figura es de 7 Hz.

La frecuencia de esta señal depende de la transferencia de los datos, ya que éstos se envían línea por línea.



Figura 21 Espacio donde el microscopio guarda su electrónica interna. FUENTE: Autores

1.19 BARRIDO LÁSER

El barrido láser del microscopio anteriormente contaba con una resolución de 320x240, con el proyecto queda de 512x512.

Como se mencionó anteriormente la señal diente sierra se genera a 241Hz con una resolución de 9 bits, de esta manera las dos señales (“X” y “Y”) harán un barrido de 512 movimientos. Ésta posteriormente es enviada como señal de entrada a los espejos galvanométricos los cuales dirigen el láser para realizar el escaneo de las muestras.

La luz reflejada por las muestras es recibida por el fotomultiplicador el cual envía los datos a una corriente máxima de 600uA a la misma velocidad de las señales diente sierra y la cual es tomada por el amplificador de transresistencia, transformándola en una señal de tensión y enviándola a los puertos analógicos de la tarjeta de desarrollo Arduino Due donde inmediatamente son almacenadas en la memoria SRAM de ella y luego enviada línea por línea (512 datos) por medio del puerto serial configurado con 115200 baudios a la interfaz de usuario en Matlab. Los 512 datos enviados línea por línea van almacenándose en la matriz llamada "Y" hasta completar los 262144 datos y luego guardarlos en un archivo llamado "datos.txt".

1.20 DISEÑO

El diseño se dividió en tres etapas que nos permitieran ir acondicionando la señal a las tensiones requeridas.

1.20.1 Etapa 1 (Amplificación de la señal)

La señal de salida va desde -5Volt hasta +5Volt por lo tanto se necesita de una señal con amplitud de 10Volt, la señal actual va desde 0.55Volt hasta 2.75Volt es decir que tiene una amplitud de 2.2, por lo tanto se necesita de una etapa amplificadora que eleve la amplitud de la señal.

1.20.1.1 Cálculos

Para la primera etapa se diseña un amplificador no inversor (figura 22) que nos de la ganancia necesaria para elevar la amplitud de la señal.

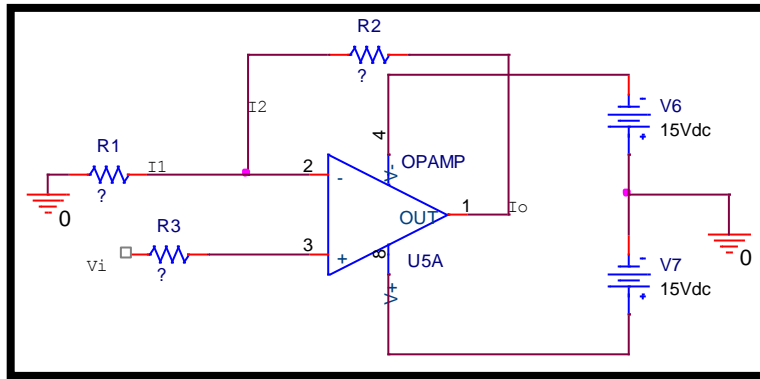


Figura 22 Amplificador no inversor FUENTE: Autores

Si se analiza la figura 22 tenemos que:

$$I1 = I2 \quad (5.1)$$

$$I1 = \frac{Vi}{R1} \quad (5.2)$$

Por lo tanto

$$Vo = I1(R1 + R2) \quad (5.3)$$

Ahora se reemplaza el valor de $I1$ en la ecuación 5.3

$$Vo = \frac{R1 + R2}{R1} * Vi \quad (5.4)$$

De la ecuación 5.4 tenemos que $Vo = 12.75, Vi = 2.75$ y asumiendo un valor comercial, $R1 = 470\Omega$.

Por lo tanto, se despeja el valor de $R2$.

$$R2 = \frac{R1(Vo - Vi)}{Vi} = 1709$$

La primera etapa queda de la siguiente forma:

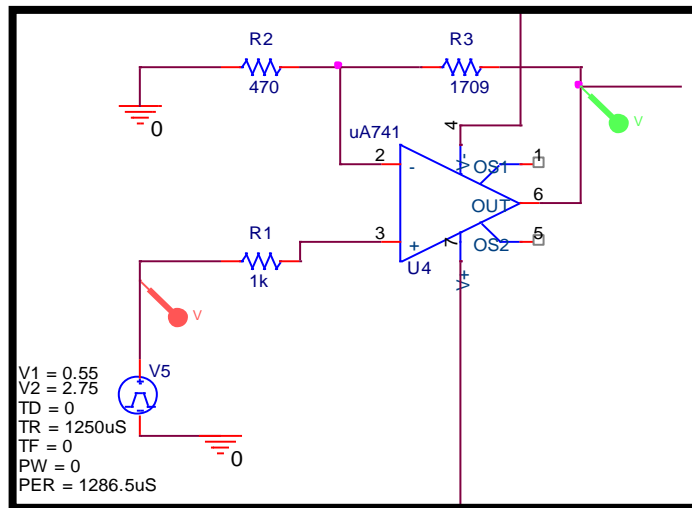


Figura 23 Diseño etapa 1 FUENTE: Autores

1.20.2 Etapa 2 (Corrección del offset)

En esta etapa se diseña un circuito restador que baje el valor mínimo de 2.75Volt a -5Volt.

1.20.2.1 Cálculos

Para lograr bajar la señal a los valores deseados se debe diseñar un circuito restador (figura 24).

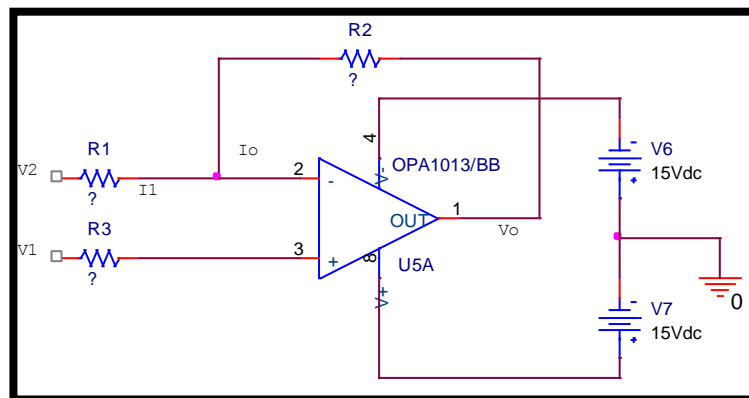


Figura 24 Circuito restador FUENTE: Autores

Al igual que el circuito amplificador no inversor

$$V_{o1} = \frac{R1 + R2}{R1} * V1 \quad (5.5)$$

Y si revisamos la entrada V2, tenemos que

$$V_{o2} = -\frac{R2}{R1} * V2 \quad (5.6)$$

Por lo tanto la salida V_o será:

$$V_o = \frac{R1 + R2}{R1} * V1 - \frac{R2}{R1} * V2 \quad (5.7)$$

Y si seguimos asumiendo el mismo valor comercial (470Ω) para $R2$ y $R1$, y que la señal de entrada $V2 = 2.75$, tenemos que

$$V_{o1} = \frac{V2 - V_o}{2} = \frac{2.75 - (-5)}{2} = 3.875Volt$$

Por lo tanto la etapa 2, quedaría así.

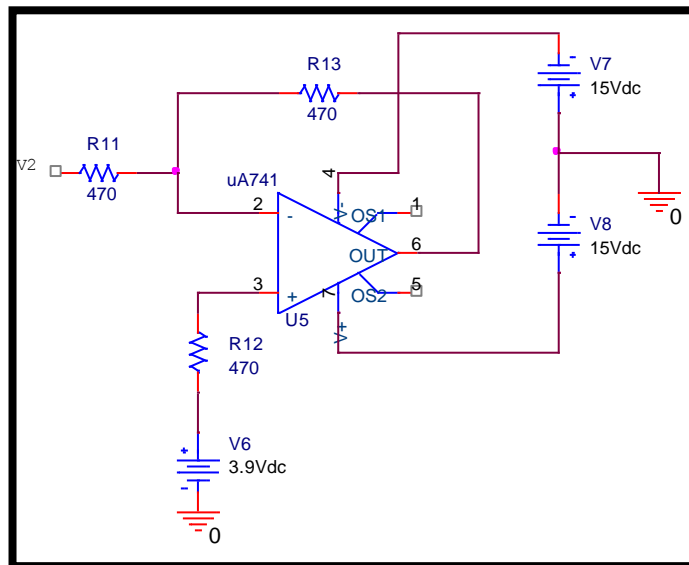


Figura 25 Diseño etapa 2 FUENTE: Autores

1.20.3 Etapa 3 (Inversor)

De los resultados de las etapas anteriores se logró amplificar y bajar la señal, pero resultado de esos diseños la señal queda inversa, por lo que se hace necesario hacer un diseño de amplificador inversor con ganancia 1.

1.20.3.1 Cálculos

Basado en los cálculos anteriores se tiene que del circuito amplificador inversor (figura 26), para que la ganancia sea 1, el valor de las resistencias debe de ser igual y por supuesto un valor comercial.

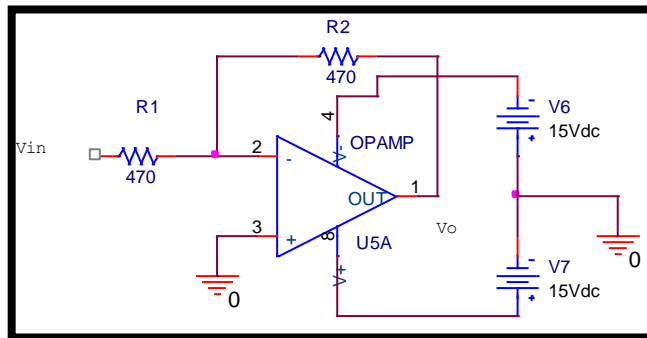


Figura 26 Circuito etapa 3 FUENTE: Autores

Con el valor de las resistencias iguales tenemos que

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1}V_{in} = -\frac{470}{470}V_{in} = -V_{in} \quad (5.8)$$

Una vez obtenido los tres diseños se unen las etapas anteriores como se muestra en la figura 27.

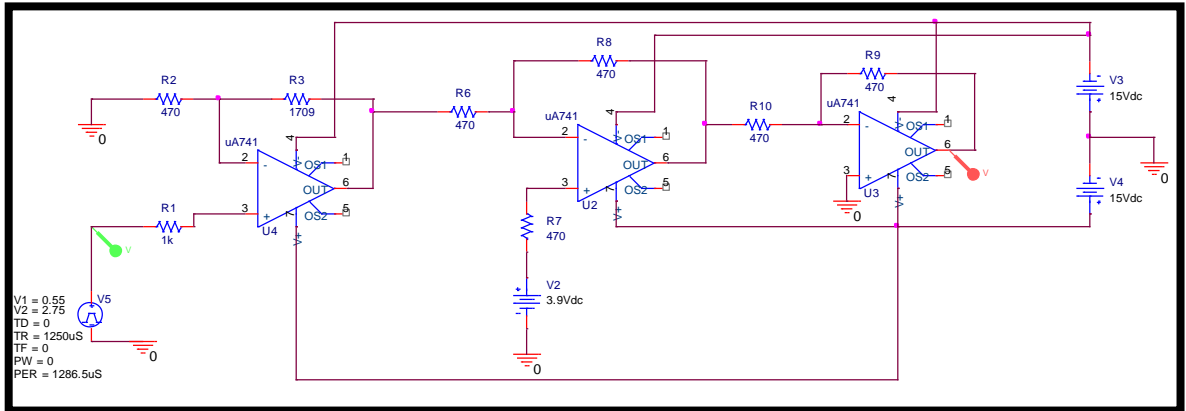


Figura 27 Etapas del acondicionamiento de la señal diente sierra. FUENTE: Autores

De la unión de las etapas anteriores se obtuvieron los siguientes datos simulados en los que se pueden apreciar la señal de salida con una amplificación de 10 Vpp y el ajuste del nivel de *offset* de -5 a 5 V como se muestra en la figura 28.

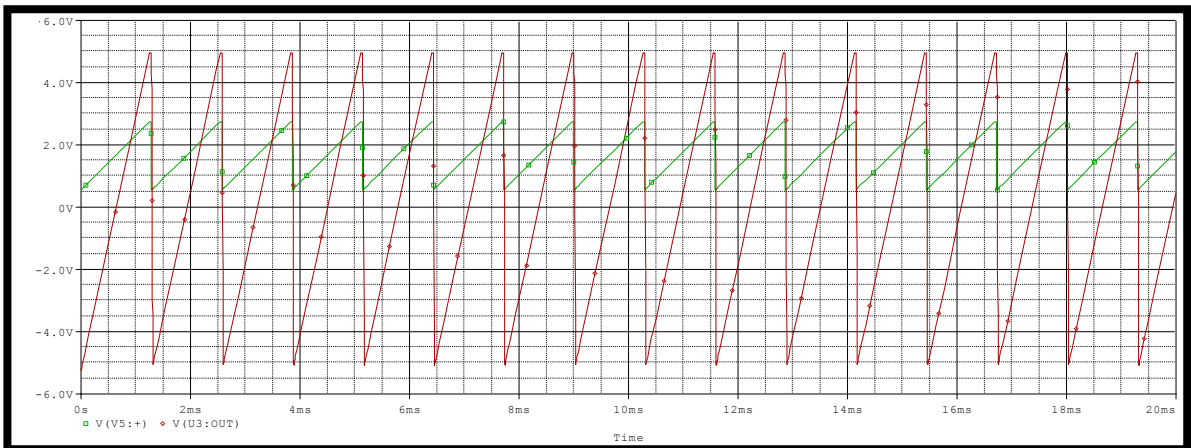


Figura 28 Resultados simulación etapa 3, en verde la señal de entrada y en roja la señal de salida. FUENTE: Autores

1.21 FILTRO

Al momento de crear las señales “X” & “Y” que controlaran los movimientos de los espejos, se debe tener en cuenta que estas señales están compuestas de escalones, lo que puede convertirse en movimientos bruscos para los galvanómetros.

El Arduino DUE puede generar señales con una resolución máxima de 12 bits, pero si se gana en resolución se pierde en velocidad, así tendríamos que la velocidad que necesitamos se bajaría considerablemente, para esto filtramos la señal que tenemos y con la suavidad que se tiene podemos obtener una mejor resolución en la adquisición de las imágenes. Con el filtro, el galvanómetro no hará movimientos bruscos.

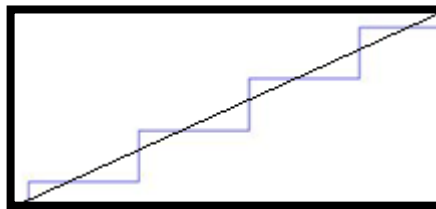


Figura 29 Señal digital (azul) y señal filtrada idealmente (negra) FUENTE:

Autores

1.21.1 Filtro electrónico

Un filtro es un sistema que permite el paso de señales eléctricas a un rango de frecuencias determinadas e impide el paso del resto. En este caso lo usaremos para el acondicionamiento de la señal producida.

Los primeros filtros usados, eran los filtros LC pasivos, pero éstos eran buenos para altas frecuencias (mayores a 100kHz), para obtener un filtro a una menor frecuencia, se necesita tener un inductor de gran capacidad, debido a esto aparecen los filtros RC activos y filtros de condensador conmutado; éstos últimos son los que requieren de elementos de mayor precisión, por lo cual utilizan un reloj.

Los filtros RC activos son los que utilizan op amps junto con resistores y condensadores que se fabrican utilizando tecnología discreta, película gruesa híbrida o película delgada híbrida [11].

Como es de destacar, un problema siempre tendrá varias soluciones y se debe elegir entre varias formas de hallarla; en el trabajo aquí descrito no se requiere de tanta precisión en los elementos que se usan. Por lo tanto se opta por el Filtro RC Activo.

1.21.2 Especificaciones del filtro

Las frecuencia de las señales “X” “Y” es de 241Hz, por lo tanto el filtro pasa bajas debe tener una frecuencia de corte por el orden de los 15000 Hz, aproximadamente, para que se vea una señal suave, el diseño de nuestro filtro debe garantizar una ganancia unitaria, para no interferir en el diseño de la etapa de ganancia.

1.21.3 Filtro *Sallen-Key* [12]

Se utilizan filtros activos estándar, ya que permiten diseñarlos de forma rápida y mecánica. Los más usados son las arquitecturas de *Sallen-Key* y las arquitecturas de *Rauch*. Diseñando de forma adecuada las impedancias de estas arquitecturas tendremos filtros: paso bajo, paso alto y paso banda. Se escogió la arquitectura *Sallen-Key* pasa bajo de segundo orden como se muestra en la siguiente figura:

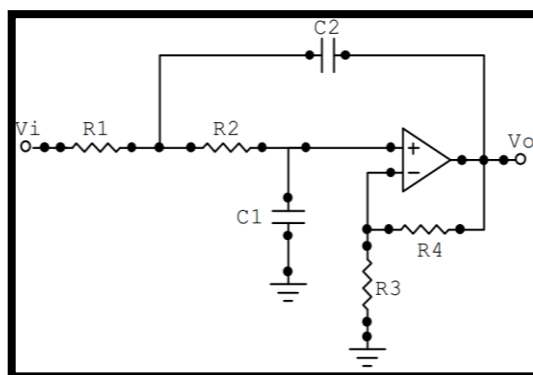


Figura 30 Filtro *Sallen-Key* orden 2 FUENTE: [12]

En la figura 30, se puede ver la arquitectura del filtro pasa bajas *Sallen-Key* de orden 2. Las fórmulas usadas en éste filtro se muestran a continuación:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} \quad (5.9)$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}{R_1C_1 + R_2C_2 + R_1C_2(1 - k)} \quad (5.10)$$

5.9 y 5.10 son las ecuaciones de la frecuencia de corte y del factor de calidad de la arquitectura *Sallen-Key*.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{mn}} \quad (5.11)$$

$$Q = \frac{\sqrt{mn}}{m + 1} \quad (5.12)$$

5.11 y 5.12 se obtienen a partir de 5.9 y 5.10 respectivamente, haciendo que los componentes del filtro sean proporcionales entre sí. Así tenemos que $R_1=mR$, $R_2=R$, $C_1=C$ y $C_2=nC$.

Luego de algunas pruebas y simulaciones se obtuvo el filtro con los siguientes elementos comerciales: $R_1=100k\Omega$, $R_2=10k\Omega$, $C_1=1nF$ y $C_2=10nF$. La frecuencia de corte igual a 15915Hz y un factor de calidad $Q=0,909$.

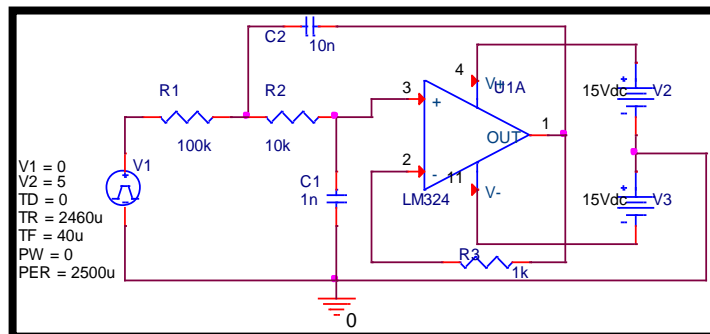


Figura 31 Filtro pasa bajas *Sallen-Key* orden 2 FUENTE: Autores

En la figura 31 se puede ver el esquema del filtro en el cual se eliminó la resistencia R3 para obtener, convenientemente, una ganancia unitaria.

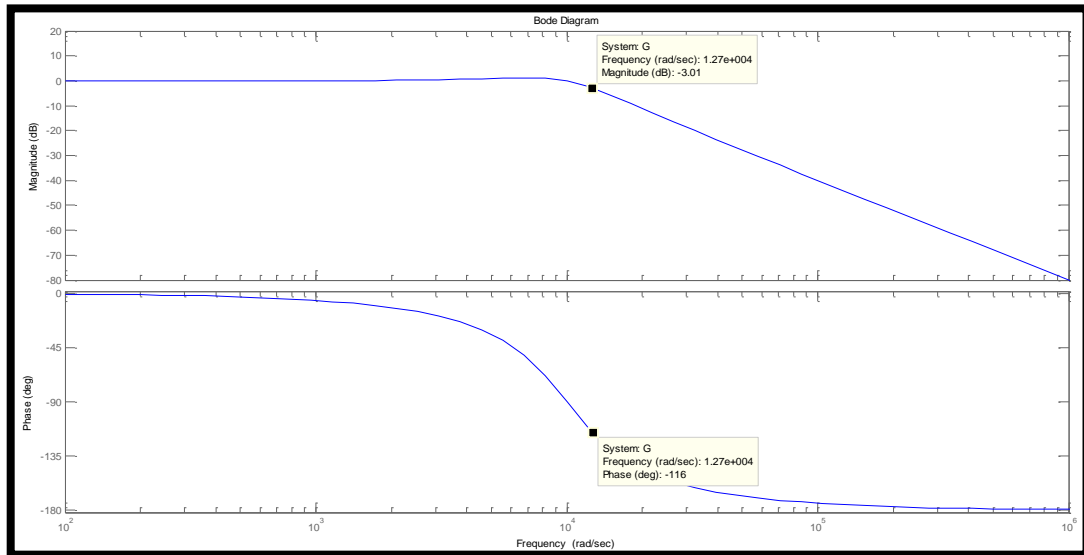


Figura 32 Diagrama de bode para el filtro. Frec=12.7Krad/s, Mag=-3dB y Phase=-116°. FUENTE: Autores

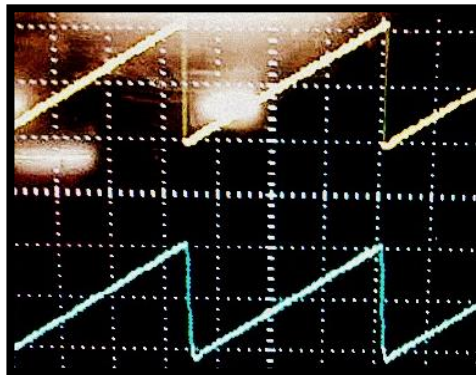


Figura 33 Señal Filtrada. FUENTE: Autores

En la figura 33 se muestra la señal rampa. En amarillo se muestra la señal que entrega Arduino y en Azul la señal filtrada con la arquitectura Sallen-Key.

SISTEMA DE CONTROL IMLEMENTADO PUENTE H

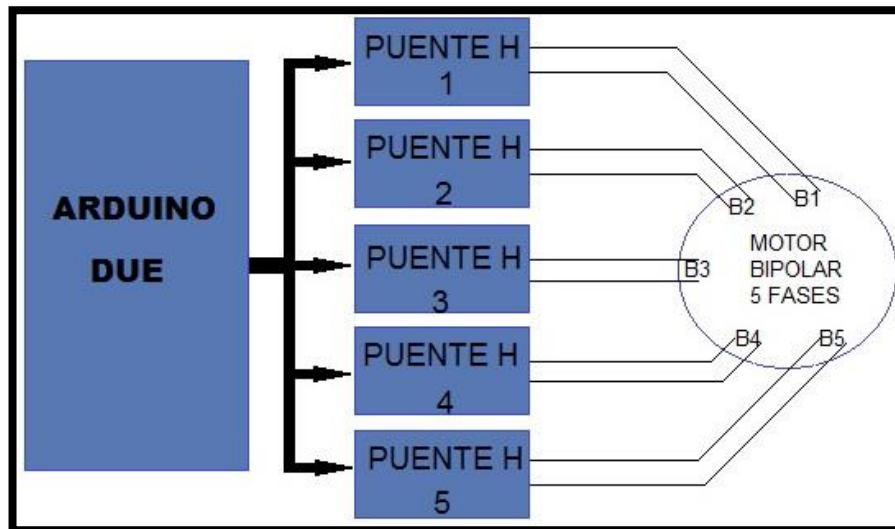


Figura 34 Sistema Arduino- Motor, simplificado

FUENTE: Autores

1.22 INTRODUCCIÓN

El cerebro de todo el proyecto es el microcontrolador de la tarjeta Arduino DUE, el cual se encargará de procesar todas las señales que salgan y que lleguen al computador.

Éste dispositivo cuenta con una corriente de salida limitada de 3 a 15 mA, y el proyecto implica controlar un motor Alemán *BERGER LARH* de 5 fases que funciona con una corriente de 0,95A, con lo que se hace necesario una etapa de acoplamiento con el puente H L298N. Algunas características del motor son: Modelo del motor vrdm 564/50 Ina, corriente $i_w=0,95$ A, $R_w=1,7$ Ω , serial 94260353 Fabricante Alemán: *Berger Larh* (Datos tomados de la placa del motor).

1.23 PUENTE H

El driver, se usa para suministrar la corriente necesaria en cada una de las fases del motor al tiempo que se controla el sentido de giro.

El *driver* L293D puede conducir una corriente de 1A, pero quedaría al límite de su capacidad, por lo que se optó por el driver L298N que puede soportar una corriente de 2A, tiene alta inmunidad al ruido, trabaja con temperaturas desde -25°C hasta 130°C y disipa una potencia de 25 Watts, suficiente para lo especificado anteriormente, además que de ser comercial en Argentina y el Colombia.

En la siguiente tabla 3 se muestran algunas especificaciones importantes del integrado usado (L298N) para controlar el motor.

Corriente de operación DC	Potencia de disipación	Fuente de voltaje mínimo	Fuente de voltaje máxima	Voltaje mínimo entrada para nivel alto
2Amp	25W	5.8v (ViH+2.5)	50v	2.3

Tabla 3 Características del L298N FUENTE: Autores

ViH es el voltaje de entrada de nivel alto para el L298N, éste voltaje lo entrega el Arduino al L298N y es de 3,3v que sumado con el 2,5 quedaría, $3,3+2,5=5,8v$.

En su hoja de datos especifica que está diseñado para manejar cargas inductivas como solenoides, relés y motores paso a paso. Tiene dos entradas “Enable”, las cuales activan o desactivan de forma independiente las señales de entrada. El terminal de salida marcado como “Sense” (como se puede ver en la figura 35), puede ser utilizado como sensor de la corriente que atraviesa al motor, para esta aplicación no se requiere.

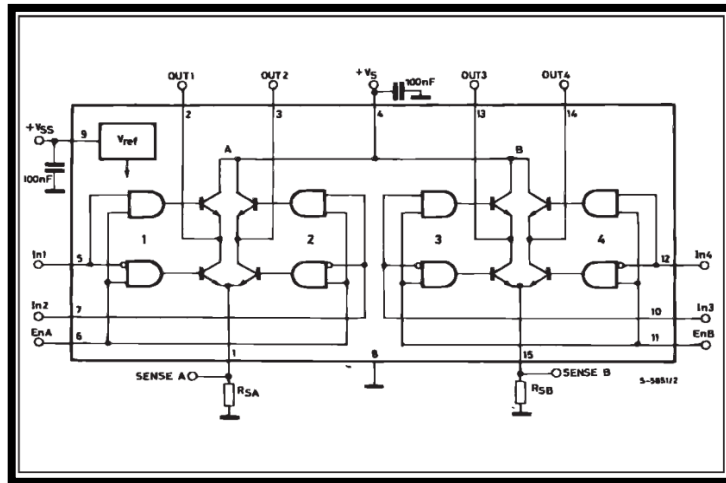


Figura 35 Diagrama interno del integrado L298

FUENTE: Autores

En la hoja de datos del integrado L298N recomiendan usar un puente de diodos *Shottky* (1N5822) para manejar cargas inductivas.

En la figura 36 se muestra en detalle el diseño del esquema utilizado para controlar el motor paso a paso de 5 fases.

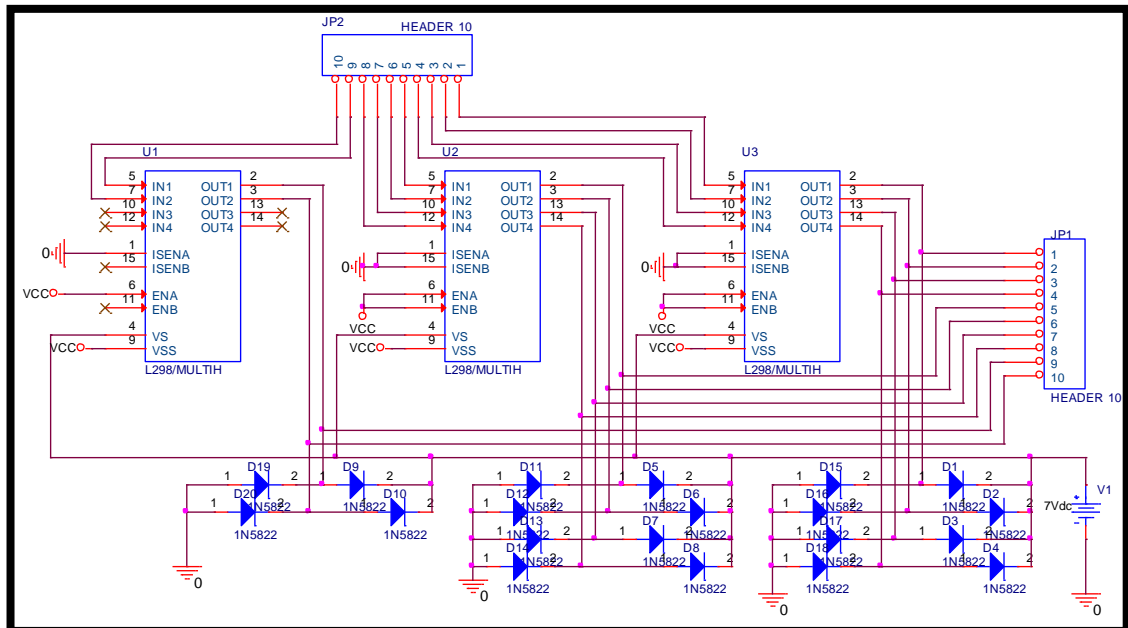


Figura 36 Esquema del controlador del motor FUENTE: Autores

1.24 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL IMPLEMENTADO

El usuario debe controlar el microscopio confocal desde su ordenador personal. En este numeral se expondrá el control del microscopio desde la perspectiva del hardware. Con lo anterior claro, el sistema de control funciona de la siguiente manera.

El usuario final será el encargado controlar el motor eligiendo la tarea que debe hacer por medio del software especificado, el cual las interpretará y convertirá en las señales necesarias para el funcionamiento del microscopio. Cuando se envían órdenes al hardware, las recibe la tarjeta Arduino. Ella envía la información necesaria a cada uno de los integrados dispuestos para tal fin.

W1	<u>W1</u>	W2	<u>W2</u>	W3	<u>W3</u>	W4	<u>W4</u>	W5	<u>W5</u>
0	0	0	1	1	0	0	1	1	0
0	1	0	0	1	0	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	0	0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0	0
0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
1	0	0	1	1	0	0	0	0	1
1	0	0	1	1	0	0	1	0	0

Tabla 4 Programación del motor para giro horario FUENTE: Autores

W1	<u>W1</u>	W2	<u>W2</u>	W3	<u>W3</u>	W4	<u>W4</u>	W5	<u>W5</u>
0	0	0	1	1	0	0	1	1	0
1	0	0	1	1	0	0	1	0	0
1	0	0	1	1	0	0	0	0	1
1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
0	1	1	0	0	1	1	0	0	0
0	1	1	0	0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
0	1	0	0	1	0	0	1	1	0

Tabla 5 Programación del motor para giro anti horario

FUENTE: Autores

En la tabla 4 y 5 se puede apreciar la programación del motor de 5 fases y en la figura 38 se puede observar la secuencia con la que el motor funciona.



Figura 37 Foto del driver del motor de 5 fases⁹ FUENTE: Autores

⁹ El driver del motor está montado sobre la placa donde se encuentra la fuente colocada en el primer anexo al final de este documento

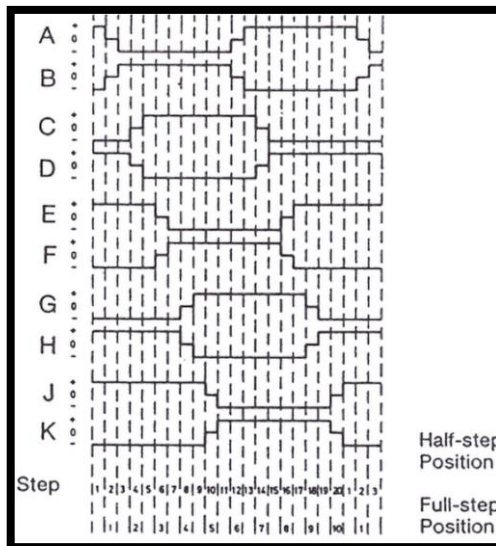


Figura 38 Ssecuencia sugerida para mover el motor [16]

En la figura 37 se puede ver el driver del motor terminado y su implementación.

IMPLEMENTACION DEL HARDWARE

1.25 INTRODUCCIÓN

La implementación del hardware consta de diferentes etapas, las cuales se agruparán en un solo conjunto para un mejor manejo del mismo. En la figura 39 se puede ver la caja el cual muestra el tamaño aproximado del hardware que se hizo.

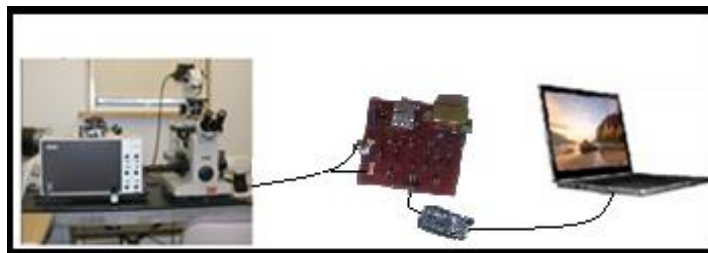


Figura 39 La caja muestra el tamaño de la interfaz. FUENTE AUTORES

1.26 PROCEDIMIENTO

Una vez diseñadas cada una de las etapas correspondientes a la adquisición de datos, alimentación de etapas, control de motor, acondicionamiento de señales y filtrado, se procedió a elaborar una PCB con todas las etapas incluyendo dentro del mismo diseño la fuente de alimentación y el microcontrolador Arduino Due.

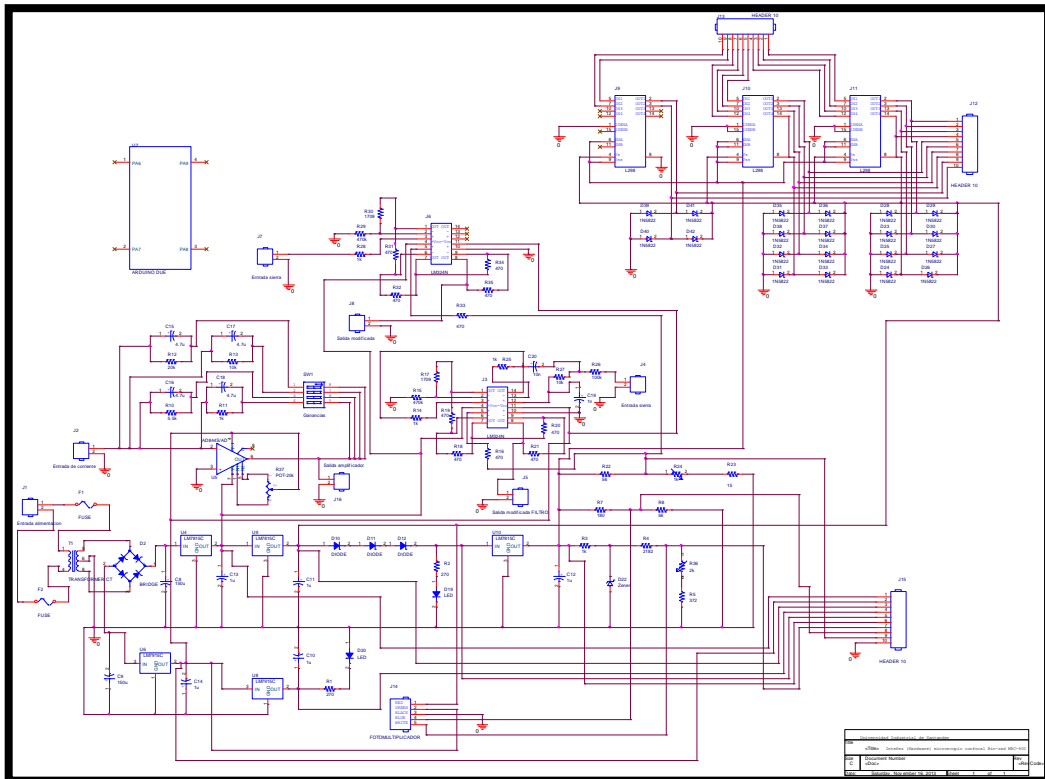


Figura 40 Esquemático interfaz FUENTE: AUTORES

En el diseño se incluye la alimentación del fotomultiplicador Hamamatsu HC125, y de la etapa del amplificador de transresistencia, esto con el propósito de tener un trabajo que nos permita sustentar ante la Universidad Industrial de Santander (UIS) la etapa de recepción de datos por adquisición de luz; posteriormente este diseño puede ser usado para transformar cualquier otro microscopio que se encuentre en condiciones similares. La etapa de transresistencia se incluye con el propósito de enviar los diseños vía web o físicos al centro de investigaciones ópticas (CIOP), con el propósito de cumplir con los compromisos adquiridos con dicha institución y que

hicieron posible que este proyecto se realizara con total satisfacción afianzando de esta manera los lazos inter-institucionales de ambas entidades educativas, abriendo la puerta para futuras pasantías que permitan el enriquecimiento científico, cultural y social, entre estudiantes universitarios.

Una vez que se obtuvo el plano esquemático de la interfaz se procedió a realizar el diseño de la PCB, la cual quedo como se muestra en los anexos A (Diagrama de la capa inferior), B (Diagrama de la capa superior) y C (Diagrama de los dispositivos).

INTERFAZ DE USUARIO

1.27 INTRODUCCIÓN

La interfaz de usuario es lo que los usuarios ven del funcionamiento del software. También se denomina interfaz hombre-máquina.

De la interfaz de usuario dependen en gran medida los factores siguientes:

- La comodidad del usuario. Afecta la ansiedad, frustración, confusión, fatiga.
- La productividad del usuario. Es mejor en la medida en que sea necesario seleccionar menos teclas y botones, y que los recorridos que deba realizar con el ratón sean más cortos y menos frecuentes.
- La imagen del software. Los usuarios juzgan la calidad del software a causa de lo que ven directamente, es decir, a causa de la interfaz no se dan cuenta de la calidad de la programación, mientras no afecte de manera perceptible al funcionamiento del software¹⁰.

¹⁰ Benet Campderrich Falgueras. Ingeniería del Software. Editorial UOC. 2003. Página 120

1.28 INTERFAZ

La interfaz se desarrolló en Matlab de una manera simple y fácil de usar. Apenas abre la interfaz el programa le pide el número del puerto COM, al que está conectado el Arduino DUE y lo demás se puede ver detalladamente en el siguiente diagrama de flujo (ver fig. 41).

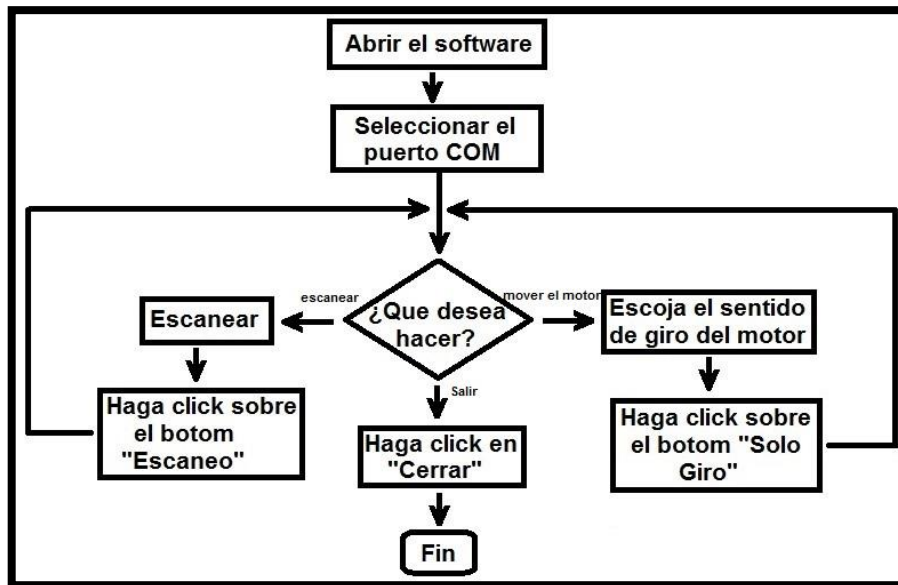


Figura 41 Diagrama de operación del software FUENTE: Autores

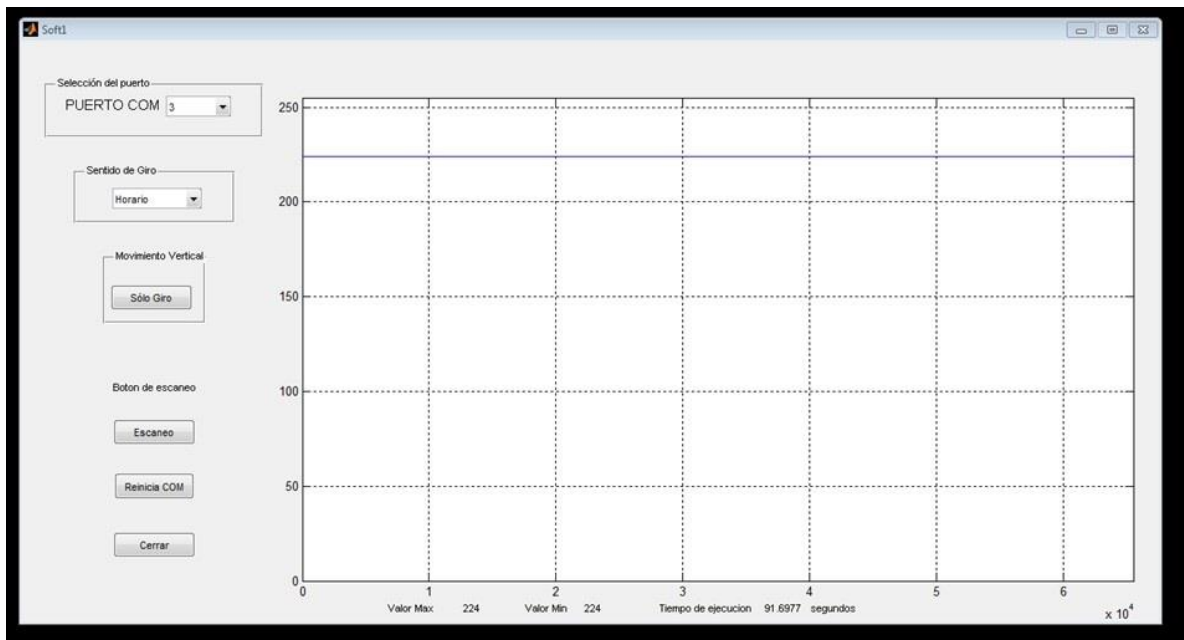


Figura 42 Interfaz en Matlab.

FUENTE: Autores

La figura 42, muestra la interfaz que tendrá el usuario final.



Figura 43 Ventana de selección del puerto COM

FUENTE: Autores

En la figura 43, podemos ver la ventana donde se debe seleccionar el puerto COM al que está conectado la tarjeta Arduino.



Figura 44 Ventana del sentido de giro

FUENTE: Autores

Con la ventana de la figura 44, se escoge el sentido de giro del motor (ya sea en el sentido horario o en el sentido anti-horario).



Figura 45 Ventana de sólo giro FUENTE: Autores

Con la ventana de la figura 45, se da la orden de girar al motor. Como se ha aclarado con anterioridad, estos pasos se pueden cambiar desde el *Sketch* de Arduino o desde Matlab.

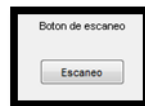


Figura 46 Ventana de un solo escaneo FUENTE: Autores

Con el botón de la figura 46, usted hará un solo escaneo cada vez que lo presione.



Figura 47 Ventana del botón cerrar FUENTE: Autores

Con el botón de la figura 47, usted cerrará la ventana que tiene abierta y además cerrará el puerto COM, por el cual se comunica con el Arduino DUE.



Figura 48 Reinicio del puerto COM

Este botón, de la figura 48, es para usarlo después de abierto el puerto COM y que aún no funcione. Con él puede cerrar el puerto COM de su computadora y volverlo a abrir.

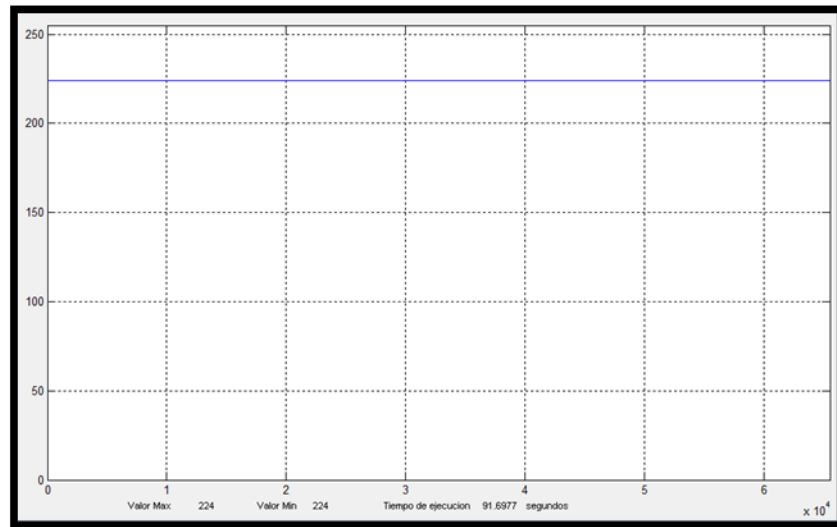


Figura 49 Ventana del gráfico FUENTE: Autores

En La figura 49, se mostrarán las imágenes que se adquieran desde el microscopio y por medio del amplificador de señal del PMT.

CONCLUSIONES

- Para la adquisición de datos de un fotomultiplicador, el diseño de un amplificador de transresistencia es la mejor opción, debido a que su sensibilidad a bajas señales de corriente y posterior transformación a una señal de tensión, lo hacen ideal para este tipo de tareas
- Para el diseño de fuentes, es de vital importancia el uso de un transformador de potencia, ya que estos brindan aislamiento eléctrico entre el circuito electrónico y el circuito de la línea de alimentación.
- Los diodos Zener son muy buenos reguladores de tensión, ya que su comportamiento en la región de ruptura bajo una adecuada alimentación de corriente, conforme a los requerimientos del fabricante, hacen que el nivel de tensión permanezca constante durante su operación.
- Los amplificadores operacionales, por sus propias características de fabricación, son buenos para realizar operaciones matemáticas, lo que los hace adecuados para ser implementados en etapas de amplificación y de corrección de la gran mayoría de las señales eléctricas.
- El control del motor de 5 fases depende de una secuencia de pasos sincronizados. Aquí se utiliza el movimiento en pasos completos donde siempre permanece una bobina sin corriente.
- Se puede programar una tabla diferente a las mostradas en las tablas 4 y 5.
- Con la interfaz hecha, se puede hacer uso del motor y tener control del manejo de los espejos galvanométricos además de recibir las señales que provienen del fotomultiplicador.
- El hecho de colocar al servicio de otras universidades nuestros conocimientos al aportarles tarjetas electrónicas que les permita poner en funcionamiento los microscopios instalados en sus edificaciones, favorece institucionalmente a las universidades involucradas fortaleciendo así el conocimiento de las personas implicadas.

RECOMENDACIONES

- El motor está programado en el *sketch* de Arduino para que trabaje a paso completo (*Full Step*), de ser necesario, este se puede ajustar para que trabaje a medio paso (*Half Step*) o inclusive con varios pasos a la vez para dar una resolución de 100nm.
- La interfaz puede hacer lo necesario para usar el microscopio. Se recomienda hacer la reconstrucción de las imágenes en dos dimensiones, la reconstrucción de las imágenes en tres dimensiones.
- El proyecto se puede implementar en el laboratorio de GOTS, en la UIS, con el fin de mejorar el microscopio Carl Zeiss Imager.Z1m.
- Aumentar e incentivar el intercambio de estudiantes y/o conocimientos entre las distintas universidades especialmente la Universidad Nacional de la Plata, en Argentina.

BIBLIOGRAFÍA

- A. Findlay, Química física practica de Findlay. Página 57. [4]
- A. F. Soria, Física nuclear y de partículas (2ª ed.). Página 172. [5]
- A. C. Arranz, Tecnología láser: Aplicaciones industriales. p. 1, 35. [3]
- A. Sedra y K. Smith, Circuitos microelectrónicos (4ª edición)., Mexico: Oxford University Press, 2002. [11]
- BERGER LAHR, Schneider Electric, «Schneider Electric,» 07 2001. [En línea]. Available: <http://www.global-download.schneider-electric.com/>. [Último acceso: 05 2013]. [9]
- Chan, «Electronic Lives Mfg,» 1 10 2004. [En línea]. Available: http://elm-chan.org/works/vlp/report_e.html. [Último acceso: 10 2013]. [7]
- C. M. Gilmore, Instrumentos de medida eléctrica. Página 13. [13]
- Dynamo Electronics, «Dynamo Electronics,» 2006. [En línea]. Available: <http://www.dynamoelectronics.com/>. [Último acceso: 5 2013]. [10]
- G. Cooper, The cell. London. Oxford University. p. 23-24., 1997. [2]
- G. E. Harper, Fundamentos de control de motores eléctricos en la industria. Página 15. [14]
- Hamamatsu, «Hamamatsu,» [En línea]. Available: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMTmodules_TPMO0010E02.pdf. [6]
- «<http://proyectoarduino.wordpress.com/%C2%BFque-es-arduino/>,» [En línea]. [15]
- Josep, Balcells; José Luis, Romeral, Autómatas programables. Marcombo 1997, Marcombo, 1997. [8]

L. J, Investigación y Ciencia. La ciencia de la luz. Microscopía confocal. [1]
29:36-41, 1994.

M. L. E. Avendaño, Análisis de la Arquitectura Sallen-Key, Universidad [12]
Tecnológica de Pereira.

ANEXOS

ANEXO A. FUENTE

FUENTE

Introducción

Las emisiones de luz provenientes de la reflexión en las muestras se desean capturar a través de un fotomultiplicador de referencia HC125 de Hamamatsu. Este fotomultiplicador reemplazaría el que está instalado en el microscopio confocal MRC 600, dado que el HC125 nos brinda la posibilidad de capturar las señales en forma de pulsos a través de una salida con conector BNC, controlable con una RL de 50 a 500 ohm, para obtener una salida ajustable de 2 a 8 volts, la cual se acondicionaría en 3.3 volts, como entrada en el DAC del microcontrolador, evitando de esta manera adherir a la implementación etapas amplificadoras que puedan inducir ruido a la adquisición de datos.

Justificación

La utilización del HC125 fue necesaria para realizar pruebas dentro de la Universidad Industrial de Santander y tener una idea aproximada de las señales que se recibirían antes de viajar a Argentina y realizar la implementación en el microscopio confocal MRC 600.

Para poder utilizar el fotomultiplicador HC125, fue necesario crear una fuente de DC, con las condiciones de conexión que se describen en la hoja de datos de dicho fotomultiplicador. Estas condiciones son:

- Conexión dual de +12 y -12 volts, como entrada.
- Señal de referencia de 1.22 volt.
- Señal de control *high-voltage* (HV) de 0.35 a 1.25 volts.

Diseño

Generalidades

La fuente está compuesta por cinco bloques, los cuales permiten obtener una salida de DC, de una entrada de AC, como se describe en el diagrama de bloques de la figura 50.

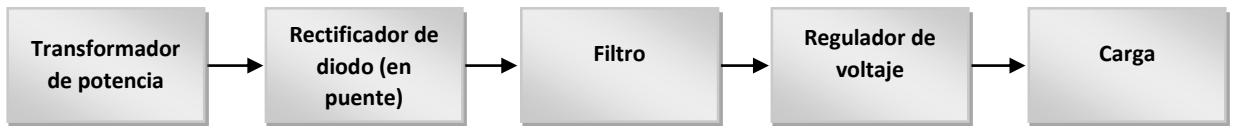


Figura 50 Diagrama de bloques de una fuente de alimentación de DC. FUENTE: Autores

- **Transformador de potencia:** Está formado por dos bobinas separadas y devanadas alrededor de un núcleo de hierro que acopla magnéticamente los dos devanados. El devanado primario, que tiene N_1 vueltas, se conecta a la fuente de alimentación de 120 V o 220 V de AC; el devanado secundario, con N_2 vueltas, se conecta al circuito de la fuente de alimentación de DC. Por tanto, se desarrolla voltaje V_s de AC de $120 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)$ o de $220 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)$ volts (rms) entre las dos terminales del devanado secundario. Al seleccionar una relación apropiada entre las vueltas $\left(\frac{N_2}{N_1}\right)$ del transformador, se reduce el voltaje de línea al valor requerido para una determinada salida de voltaje de DC de la fuente. Adicional a esto el transformador de potencia crea aislamiento eléctrico entre el equipo electrónico y el circuito de la línea de alimentación [11].
- **Rectificador en puente:** El puente rectificador de onda completa de la figura 51, utiliza ambas mitades de la senoide de entrada. Para proporcionar una salida unipolar, invierte las mitades negativas de la señal senoidal de la siguiente manera: durante los semiciclos positivos el voltaje de entrada, V_s es positivo y, por lo tanto, la corriente se conduce a través del diodo D1, el resistor R y el diodo D2. Mientras tanto, los diodos D3 y D4 tienen polarización inversa. Como hay dos diodos en serie en la ruta de conducción

y, por tanto, V_o será dos caídas de diodo menor que V_s . Durante los semiciclos negativos del voltaje de entrada, el voltaje secundario V_s será negativo y, por ello, $-V_s$ será positivo, forzando la corriente por D3, R y D4. Mientras tanto, los diodos D1 y D2 tendrán polarización inversa. Sin embargo, lo importante es que, durante ambos semiciclos, la corriente pasara por R en la misma dirección (de derecha a izquierda); por tanto, V_o siempre será positivo [11].

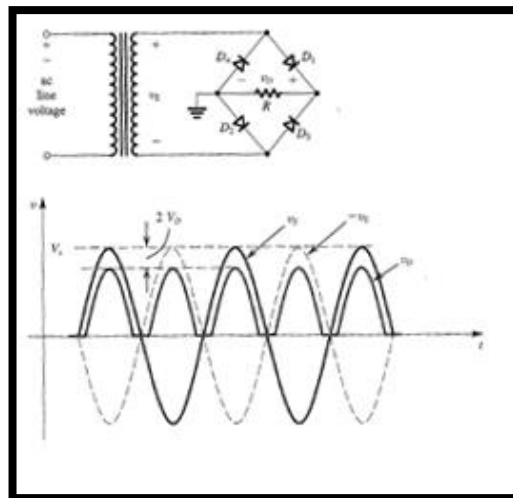


Figura 51 Rectificador en puente FUENTE: [11]

- **Filtro:** Aunque la señal de salida del bloque rectificador de diodo de la figura 51, tiene un promedio diferente de cero o un componente de DC, su naturaleza de pulsos la vuelve inadecuada como fuente de DC para circuitos electrónicos, de allí la necesidad de contar con un filtro. Dicho filtro reduce en gran medida las variaciones en la magnitud de la salida del rectificador [11].
- **Regulador de voltaje:** La salida del filtro rectificador es mucho más constante, pero todavía contiene un componente que depende del tiempo, conocido como rizo. Para reducirlo y estabilizar la magnitud del voltaje de salida de DC de la fuente contra variaciones debidas a cambios en la corriente de carga, se emplea un regulador de voltaje [11].

Cálculos y selección de implementos

Bloque 1

Para el primer bloque de la figura 50, se hace necesaria la utilización de un transformador para conexión dual con *tap* central que suministre una tensión en el devanado secundario de aproximadamente 16Volt. Dicho transformador debe suministrar una corriente mínima de 1.5 Amp y máxima de 3 Amp dado que según hoja de datos del fabricante el consumo del fotomultiplicador es del orden de los miliamperios (mA), el motor consume 950mA, más los consumos de las etapas implementadas es este proyecto. Estos transformadores se adquieren en el mercado con las especificaciones anteriormente mencionadas o bien se puede mandar a diseñar con las especificaciones requeridas.

Bloque 2

Para el bloque de rectificación de diodo en puente se adquirió el w06M porque resiste una corriente de 1.5 A y su tamaño es bastante pequeño lo cual es adecuado para no ocupar mucho espacio en el momento de diseñar la PCB.

Bloque 3

Como se mencionó anteriormente la señal de salida del puente rectificador por su naturaleza pulsante son inapropiados para ser utilizados como fuente de DC para circuitos electrónicos. La forma correcta de corregir este error es con un condensador de filtro el cual sirve para reducir considerablemente las variaciones de voltaje de salida del rectificador.

Para analizar el comportamiento del condensador revisemos la figura 52.

Asumiendo que el diodo es ideal y con una entrada senoidal (como la que tomamos de la red eléctrica domestica), el condensador se carga al valor pico de la entrada V_p .

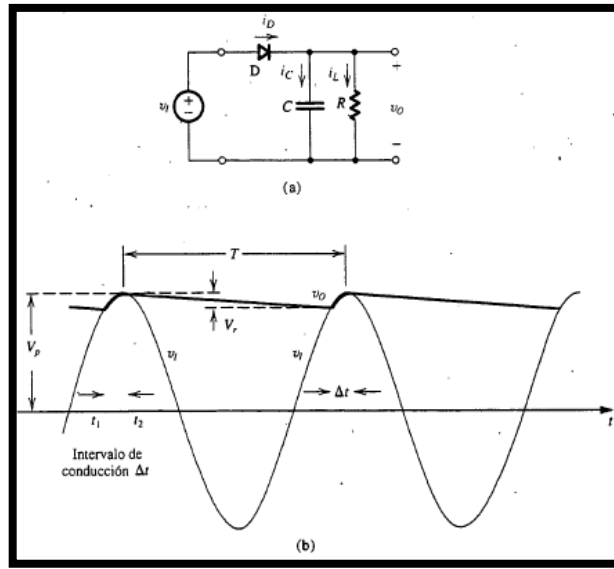


Figura 52 Comportamiento de la señal de salida con un condensador de filtro
FUENTE: [11]

Entonces el diodo está en corte, y el condensador se descarga a través de la resistencia de carga R . la descarga del condensador continua durante casi todo el ciclo, hasta el momento en que V_i exceda el voltaje del condensador. Entonces el diodo conduce otra vez, carga el condensador al pico de V_i y el proceso se repite. La clave para que el voltaje de salida no se reduzca demasiado durante la descarga del condensador se debe seleccionar un valor adecuado del condensador [11].

Para el análisis del cálculo del condensador recurrimos al ecuación 5.1 tomada de Circuitos microelectrónicos (4^a edición). Sedra/Smith. Página 188.

$$V_r = \frac{V_p}{fCR} \quad (5.1)$$

Donde V_r representa la caída de tensión que sufre la señal una que ha salido del puente rectificador, V_p el valor pico de la tensión de entrada, f la frecuencia y R el valor de la resistencia de carga.

De la ecuación 5.1 podemos despejar el valor del condensador C , que daría así.

$$C = \frac{V_p}{V_r f R} \quad (5.2)$$

V_r Es igual a la caída de tensión en los dos diodo que conducen por periodo, es decir que.

$$V_r = 0.7 + 0.7 = 1.4V$$

f Es igual a la frecuencia de la red (60Hz)-

R Representa el valor de la resistencia de carga, para hallarla tenemos que él fotomultiplicador HC125 tiene una conexión dual de 12 Volt y consume una corriente por terminal de entrada de 18 y 13 mA respectivamente. Lo que nos daría que R es igual a.

$$R = \frac{V_o}{I_i} = \frac{24}{31mA} = 774.19\Omega$$

De esta manera, con base en la ecuación 5.2 el valor del condensador C será.

$$C = \frac{V_p}{V_r f R} = \frac{18}{1.4 * 60 * 774.19} = 276.78\mu F$$

Para la implementación de la fuente se utilizara un valor comercial de condensador, alrededor de este valor (150, 220, y 330 uF).

Bloque 4

Del bloque anterior tendremos una salida aproximada de 16 Volt, pero necesitamos una salida estable dual de 12 Volt, para ello recurrimos a los reguladores de tensión LM7812 y LM7912, los cuales según hoja de datos del fabricante ofrecen tensiones de salida estables entre (11.5 y 12.5 en los casos más críticos). En paralelo a la salida de 12 Volt y -12Volt se agrega un condensador de 1uF, para evitar inconvenientes con las corrientes parasitas que puedan inducir en el circuito.

Señales adicionales

De esta manera se logró obtener hasta el momento, una señal de tensión dual de 12Volt. Aún falta continuar el diseño para obtener una tensión de referencia de 1.22Volt y una señal de control de 0.35 a 1.25Volt.

Con la tensión de +12Volt podemos diseñar las otras dos señales de la siguiente manera.

Conectamos en serie 3 diodos que nos bajen la tensión de entrada. Se recurre a bajar un poco la tensión para evitar calentamientos en los reguladores.

$$V_i - D1 - D2 - D3 = 12 - 0.7 - 0.7 - 0.7 = 9.9\text{Volt.}$$

Con este valor de tensión podemos conectar un regulador de tensión, que baje la tensión de 9.9Volt a 5Volt a través de un regulador de voltaje (LM7805). En paralelo a esta tensión de salida se pone otro condensador de 1uF para evitar corrientes parasitas adicionales producto del regulador.

Una vez obtenida una señal de 5Volt se procede al diseño de la tensión de referencia de 1.22Volt.

Para ello acudimos a la técnica de circuitos conocida como divisor de tensión. Ver figura 53.

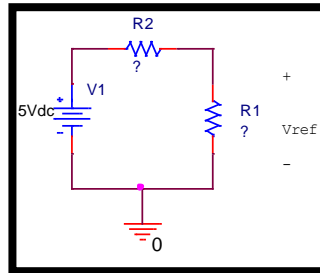


Figura 53 Circuito modelo para el cálculo del divisor de tensión. FUENTE: Autores

El primer paso es plantear la ecuación.

$$V_{ref} = R1 * \frac{V1}{R1 + R2} \quad (5.3)$$

Asumimos un valor comercial para R2, de esta manera solo nos queda despejar a R1 para encontrar un valor adecuado.

De esta manera si $R2 = 180$ entonces $R1 = (-V_{ref} * \frac{R2}{V_{ref}-V_1})=58.09\Omega$

El valor comercial más cercano a este valor es 56Ω .

Una vez resulto este valor, queda por diseñar la señal de control de 0.35 a 1.25Volt.

Para realizar el diseño adecuado se la señal de control regulamos la señal de 5Volt a un valor más pequeño de tal manera que se acerque más al valor especificado, para esto utilizamos un diodo Zener de 2.4Volt.

Los diodos Zener como se especifica en la figura 54 son diodos que operan en la región de ruptura, esto los hacen apropiados para ser utilizados como reguladores de voltaje en fuentes y otras aplicaciones. Esto quiere decir que para corrientes mayores que la corriente I_{zk} de rodilla, la curva característica $i-v$ es casi una línea recta [11].

Para evitar que se pierda la estabilidad del diodo se debe garantizar una corriente constante de acuerdo a los parámetros del diodo. En nuestro diseño se requiere de un diodo de 2.4Volt para ello se le debe suministrar una corriente de mínimo 5mA por recomendaciones de fabricantes, por lo tanto se conecta en serie una resistencia de $1K\Omega$ con el diodo Zener de 2.4Volt, de esta manera con la tensión de 5Volt tendremos una corriente de 500 mA, lo que nos garantizara el buen comportamiento del diodo.

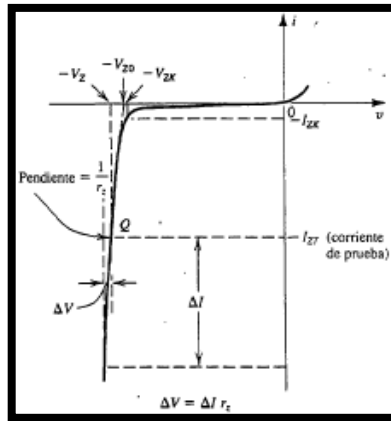


Figura 54 Curva característica $i-v$ de un diodo que trabaja en la región de ruptura.

FUENTE: [11]

Una vez reducida la tensión se continua con el diseño, se requiere de una tensión variable, por lo tanto ahora se debe diseñar un divisor de voltaje y que una de sus resistencias esté conectada en serie a un potenciómetro, que en su punto más bajo nos de 0.35Volt y en su mayor punto suministre 1.22Volt, como se muestra en la figura 55.

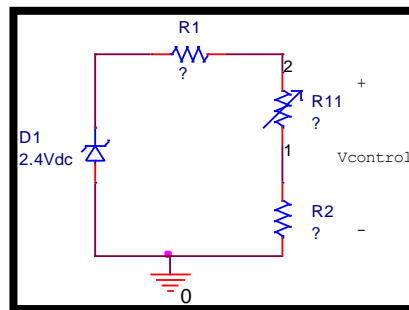


Figura 55 Divisor de tensión para fuente controlada. FUENTE: Autores

Ahora se debe calcular el valor de las dos resistencias y del potenciómetro, con las condiciones de tensión requeridas. Teniendo en cuenta estas condiciones se asume un valor comercial para el potenciómetro de $2K\Omega$.

Para encontrar el valor de las resistencias se plantean las siguientes ecuaciones. Para un valor cero del potenciómetro, se quiere una tensión de control de 0.35Volt, por lo tanto.

$$V_{c1} = V_d * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.4)$$

Donde $V_{c1} = 0.35\text{Volt}$ y V_d representa la tensión suministrada por el diodo Zener. De la ecuación 5.4 despejamos R_1 .

$$R_1 = \frac{R_2 * V_d - V_{c1} * R_2}{V_{c1}} \quad (5.5)$$

La otra ecuación se obtiene al tener el potenciómetro (Pt) en su máximo punto, y la tensión de control en 1.22Volt (V_{c2}).

$$V_{c2} = \frac{V_d(R_2 + Pt)}{R_1 + R_2 + Pt} \quad (5.6)$$

Ahora se reemplaza R_1 en la ecuación 5.6

$$V_{c2} = \frac{V_d(R_2 + Pt)}{\frac{R_2 * V_d - V_{c1} * R_2}{V_{c1}} + R_2 + Pt} \quad (5.7)$$

Y se despeja R_2

$$R_2 = \frac{V_d * V_{c1} * Pt - V_{c2} * V_{c1} * Pt}{V_{c2} * V_d - V_d * V_{c1}} \quad (5.8)$$

Reemplazando los valores en la ecuación 5.8 se tendría que.

$$R_2 = 372.68\Omega$$

Y reemplazando este valor en la ecuación de R_1 se tendría que.

$$R_1 = 2182.84\Omega$$

De esta manera se obtienen los valores de todos los implementos para elaborar la fuente de tensión necesaria para alimentar el fotomultiplicador HC125. De la fuente se sacaron borneras adicionales de 5Volt , 9.9Volt y 12Volt para alimentar posibles aplicaciones necesarias durante el desarrollo del proyecto y se introdujeron dos diodos leds para indicar el correcto funcionamiento de la fuente. Con todo terminado la fuente quedaría como se muestra en la figura 56.

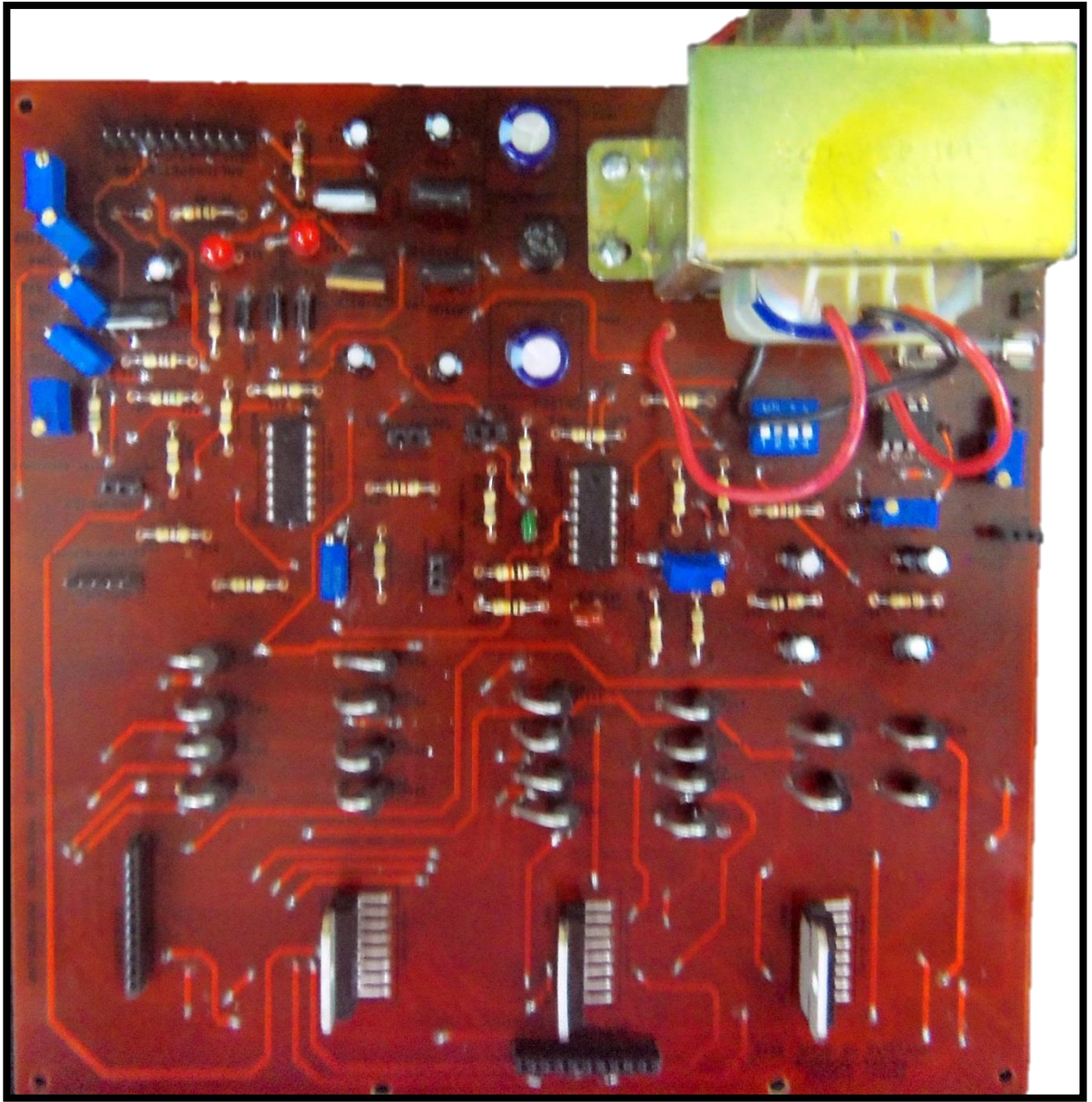
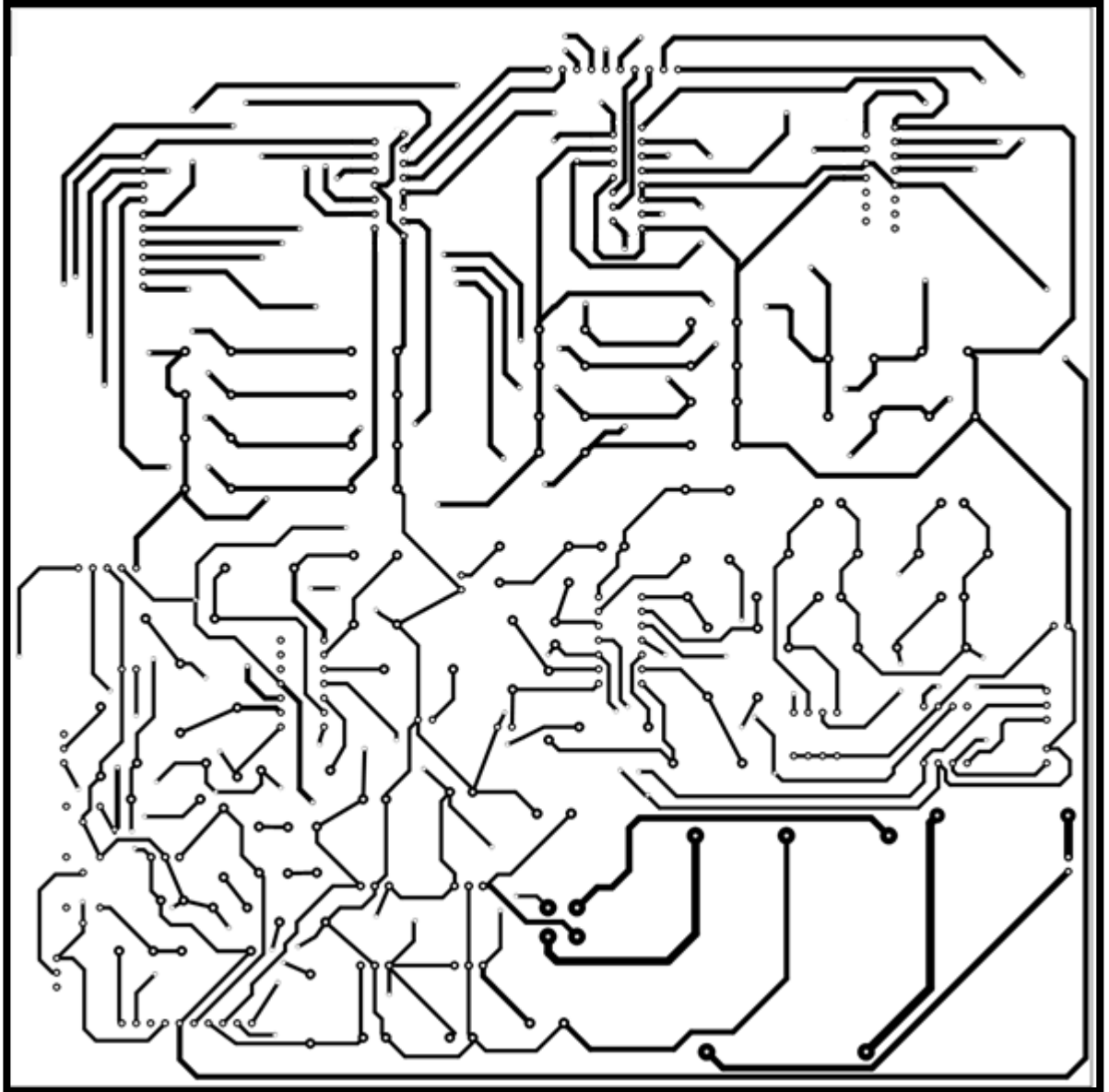


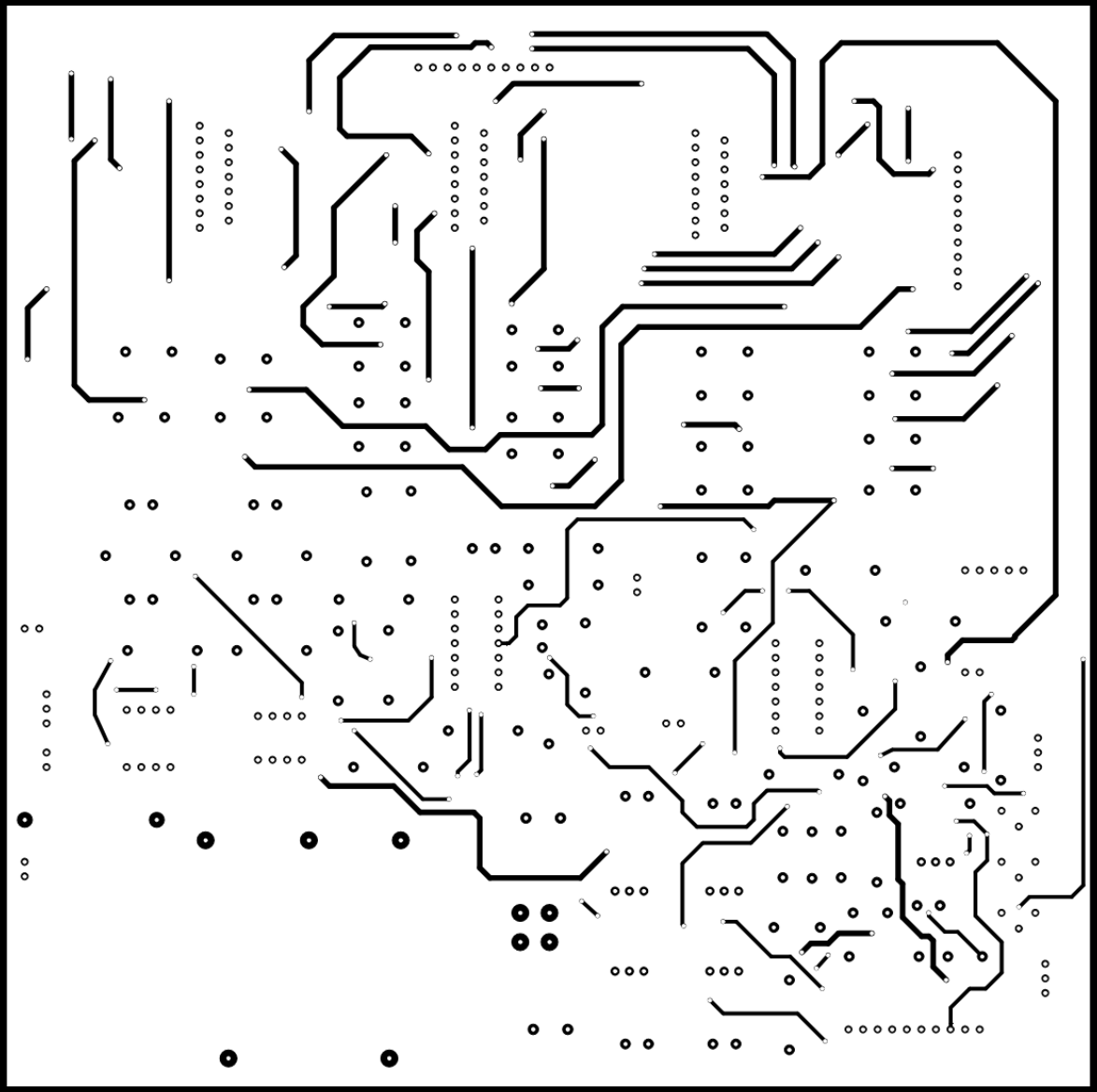
Figura 57 Fuente terminada

FUENTE: Autores

ANEXO B. DIAGRAMA DE LA CAPA INFERIOR



ANEXO C. DIAGRAMA DE LA CAPA SUPERIOR



ANEXO D. DIAGRAMA DE LOS DISPOSITIVOS

