

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**AUTOMATIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE PLASMA Y
EVAPORACIÓN EN LA ELABORACIÓN DE PELÍCULAS
SEMICONDUCTORAS DELGADAS**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Electrónico**, que presenta el bachiller:

Jorge Enrique Rojas Mendoza

ASESOR: Ing. Willy Carrera Soria

Lima, Marzo del 2014

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se realizó el diseño e implementación de un sistema que tiene como objetivo ofrecer al usuario la posibilidad de aumentar o disminuir el nivel de voltaje o corriente de los procesos de creación de Plasma y Evaporación mediante el control electrónico de tres transformadores de potencia (uno de voltaje y dos de corriente). Este trabajo representa un punto de partida para la automatización completa de la elaboración de películas delgadas en el Laboratorio de Películas Delgadas de la Sección de Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Anteriormente, los procesos de creación de Plasma y Evaporación eran efectuados manualmente por un operario, el cual debía permanecer cerca del sistema de alto vacío hasta el término del proceso. Por otro lado, el método de ejecución de estos procesos no era constante en su totalidad. Ello tenía un efecto negativo con respecto a la calidad y eficiencia en la elaboración de películas delgadas.

En principio el operario selecciona el proceso que se va a efectuar, ya sea el de creación de Plasma o el de Evaporación, a partir de ello el sistema detecta cuál se está realizando e inmediatamente lleva el voltaje o la corriente a su mínimo valor, enseguida comienza el sensado de la variable correspondiente, dependiendo del proceso. De acuerdo al valor en que se encuentre, se podrá aumentar o disminuir el nivel de voltaje o corriente, teniendo en cuenta los límites máximos y mínimos, a través de dos pulsadores ubicados en el tablero de control. Como resultado se pudo llegar a obtener un rango de error menor al 2% en la medición de voltaje para el proceso de creación de Plasma y menor al 3% en la medición de corriente para el proceso de Evaporación.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. ELABORACIÓN DE PELÍCULAS SEMICONDUCTORAS DELGADAS	
1.1 Películas Delgadas.....	2
1.2 Tecnología de Vacío.....	3
1.3 Sistemas de Alto Vacío.....	4
1.3.1 Bombas.....	4
1.3.2 Cámara de Vacío.....	5
1.3.3 Tubos y Válvulas.....	6
1.3.4 Procedimiento para llegar a Vacío.....	7
CAPÍTULO II. PROCESOS DE PLASMA Y EVAPORACIÓN EN LA ELABORACIÓN DE PELÍCULAS SEMICONDUCTORAS DELGADAS.	
2.1 Deposición de materiales sólidos por Evaporación Física (<i>Physical Vapor Deposition</i>).....	8
2.1.1 Deposición por Evaporación.....	8
2.1.2 Deposición por Sputtering.....	9
2.2 Descripción de los procesos de Creación de Plasma y Evaporación del Material... 10	10
2.3 Definición del problema.....	13
2.4 Objetivos.....	13
2.4.1 Objetivo principal.....	13
2.4.2 Objetivos secundarios.....	13
CAPÍTULO III. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO PROPUESTO	
3.1 Alcance.....	14
3.2 Diagrama de bloques.....	14
3.2.1 Planta.....	15
3.2.2 Sensores.....	15
3.2.2.1 Sensor de Voltaje.....	15
3.2.2.2 Sensor de Corriente.....	17
3.2.2.3 Detector de posición del selector.....	18
3.2.3 Acondicionador de Señal.....	19
3.2.4 Potencia (Motor)	24
3.2.5 Excitador.....	27
3.2.6 Visualización.....	29
3.2.7 Pulsadores.....	30

3.2.8	Controlador.....	30
3.2.8.1	Elección del microcontrolador.....	30
3.2.8.2	Diseño del software.....	32
3.2.9	Alimentación.....	35
3.2.10	Costo.....	37
3.2.11	Diseño e implementación del sistema en conjunto.....	37

CAPÍTULO IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1.1	Prueba del bloque Sensores.....	39
4.1.2	Sensor de Voltaje.....	39
4.1.3	Sensor de Corriente.....	41
4.2	Prueba del bloque: Acondicionador de Señal.....	42
4.3	Prueba del bloque: Potencia.....	43
4.4	Prueba del bloque: Excitador.....	43
4.5	Prueba del bloque: Controlador.....	44
4.6	Prueba de todo el sistema en conjunto.....	46

CONCLUSIONES	48
---------------------------	----

RECOMENDACIONES	49
------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA	50
---------------------------	----

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Películas Delgadas usadas en los filtros ópticos.....	2
Figura 1.2 Bomba mecánica en corte transversal.....	4
Figura 1.3 Representación del funcionamiento de la bomba difusora.....	5
Figura 1.4 Cámara de Vacío del Laboratorio de Películas Delgadas.....	6
Figura 1.5 Izquierda: Válvula de metal utilizado para aislar las bombas de la cámara de vacío. Derecha: Válvula para dosificar gas Argón o Nitrógeno dentro de la cámara de vacío.....	6
Figura 1.6 Esquema de un sistema de alto vacío para la elaboración de películas delgadas.....	7
Figura 2.1 Representación del proceso de Evaporación.....	8
Figura 2.2 Representación del proceso de <i>Sputtering</i>	9
Figura 2.3 Representación del proceso de <i>Sputtering</i> con Magnetrones.....	10
Figura 2.4 Sistema de alto vacío del Laboratorio de Películas Delgadas de la Sección de Física.....	10
Figura 2.5 Diagrama esquemático de conexión.....	11
Figura 2.6 Plasma formado por Argón y la aplicación de voltaje.....	12
Figura 2.7 Electrodo conectados al portamuestras.....	12
Figura 3.1 Diagrama de bloques del sistema completo.....	14
Figura 3.2 Sistema de alto vacío.....	15
Figura 3.3 Izquierda: Sonda de Voltaje Fluke 80k-6. Derecha: Transformador de Medición de Voltaje.....	16
Figura 3.4 Izquierda: Sensor de Corriente HBO 400. Derecha Sonda amperimétrica Fluke i410.....	17
Figura 3.5 Diagrama esquemático del selector.....	19
Figura 3.6 Etapas de conversión de voltaje de AC a DC.....	19
Figura 3.7 Amplificador no inversor.....	20
Figura 3.8 Amplificador de valor medio absoluto (MAV).....	20
Figura 3.9 Filtrado de la Señal.....	21
Figura 3.10 Circuito acondicionador de señal para el sensor de voltaje.....	23
Figura 3.11 Circuito acondicionador de señal para el sensor de corriente.....	24
Figura 3.12 Transformador variable (variac).....	25
Figura 3.13 Diagrama de la prueba realizada para hallar el torque.....	25
Figura 3.14 Mecanismo de transmisión “tornillo sinfín - corona”.....	27
Figura 3.15 Esquema simplificado del “Puente H”.....	27
Figura 3.16 Diagrama esquemático del “Puente H”.....	29
Figura 3.17 Espacio del tablero de control destinado para el control del variac.....	30

Figura 3.18 Circuito Esquemático del Bloque de Control.....	32
Figura 3.19 Diagrama de bloques del programa principal.....	33
Figura 3.20 Diagrama de bloques: Subrutina Detectar cambio de posición del selector..	33
Figura 3.21 Diagrama de bloques: Subrutina Conversión A/D.....	34
Figura 3.22 Diagrama de bloques: Subrutina Interrupción.....	35
Figura 3.23 Diagrama de circuito impreso del todo el sistema.....	37
Figura 3.24 Circuito implementado de todo el circuito.....	38
Figura 4.1 Gráfica de pruebas del sensor de voltaje.....	40
Figura 4.2 Gráfica de pruebas del sensor de corriente.....	41
Figura 4.2 Gráfica de pruebas del acondicionador de señal.....	42
Figura 4.3 Simulación del programa del bloque de control.....	44
Figura 4.4 Simulación del programa del bloque de control.....	45
Figura 4.5 Pruebas realizadas en conjunto al proceso de creación de Plasma.....	46
Figura 4.6 Pruebas realizadas en conjunto al proceso de Evaporación.....	47



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Comparación entre sensores de voltaje.....	16
Tabla 3.2 Comparación de los sensores de corriente.....	18
Tabla 3.3 Comparación de OPAMPS.....	23
Tabla 3.4 Resultados de las pruebas experimentales para hallar el torque.....	26
Tabla 3.5 Características del Motor.....	26
Tabla 3.6 Estados de funcionamiento del Puente H.....	28
Tabla 3.7 Comparación de alternativas del “Puente H”.....	28
Tabla 3.8 Comparación de visualizadores.....	29
Tabla 3.9 Comparación de microcontroladores.....	31
Tabla 3.10 Consumo de Energía.....	35
Tabla 3.11 Consumo de potencia para cada voltaje de alimentación.....	36
Tabla 3.12 Características de la Fuente de Voltaje PHOENIX CONTACT.....	36
Tabla 3.13 Costo de implementación de cada etapa.....	37
Tabla 4.1 Pruebas realizadas al sensor de voltaje.....	40
Tabla 4.2 Pruebas realizadas al sensor de corriente.....	41
Tabla 4.3 Pruebas realizadas al acondicionador de señal.....	42
Tabla 4.4 Pruebas realizadas al motor.....	43
Tabla 4.5 Pruebas realizadas al Puente H.....	43
Tabla 4.6 Pruebas realizadas en conjunto al proceso de creación de Plasma.....	46
Tabla 4.7 Pruebas realizadas en conjunto al proceso de Evaporación.....	47

INTRODUCCIÓN

Actualmente, diversos dispositivos tecnológicos manufacturados que se emplean en cualquier rama de la industria; como por ejemplo, la electrónica, óptica o mecánica, utilizan películas semiconductoras delgadas en su proceso de fabricación. En el laboratorio de Películas Delgadas de la Sección de Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú se elaboran algunos tipos de películas delgadas para analizar y estudiar sus propiedades ópticas y electrónicas. La preparación de éstas se realiza mediante la técnica de deposición por evaporación en vacío. En este laboratorio, los procesos de Plasma y Evaporación, necesarios para su correcta elaboración, se realizan manualmente mediante el ajuste del voltaje de un variac (transformador variable) que está conectado a los transformadores de voltaje y corriente.

El presente trabajo de tesis tiene el propósito de diseñar e implementar un circuito que pueda automatizar el control de los procesos de creación de Plasma y Evaporación en la elaboración de películas delgadas. De esa manera se busca que dichos procesos sean controlados desde el tablero de control del sistema

El documento de tesis se divide en cuatro capítulos. En el primer capítulo se presenta una breve definición sobre las películas delgadas. Asimismo, se abarcan temas relacionados a los sistemas de alto vacío, necesarios para la elaboración de éstas. En el segundo capítulo se describen algunos métodos utilizados para la elaboración de películas delgadas, así como una breve explicación de los procesos de creación de Plasma y Evaporación. En el tercer capítulo se describe detalladamente la propuesta de diseño que se plantea. Finalmente, en el capítulo cuatro se muestran las pruebas y resultados obtenidos de funcionamiento del diseño.

CAPÍTULO I

ELABORACIÓN DE PELÍCULAS SEMICONDUCTORAS DELGADAS

1.1 Películas Delgadas

Se define como película delgada a una o múltiples capas de material de dimensiones pequeñas en el rango de las micras. Estas pueden ser creadas por diferentes técnicas como evaporación y condensación, electro-deposición, reacción y/o precipitación química, entre otras. La elección de la técnica a usar depende de distintos factores como el material que se desea depositar, la naturaleza y las propiedades del sustrato (superficie base), la estructura, el grosor y la distribución requerida [1].

Dichas capas son depositadas en superficies llamadas sustratos, con el objetivo de modificar las propiedades físicas y/o químicas. Además, se utilizan las películas delgadas para estudiar las diversas propiedades del material en sí, sin la necesidad de emplear grandes cantidades [2].

Asimismo, las películas delgadas poseen una variedad de aplicaciones como recubrimientos reflectivos y anti reflectivos, filtros de interferencia y otros en el área de la óptica (Figura 1.1). En relación al campo de la electrónica, se requieren en la fabricación de dispositivos de estado sólido como son los condensadores, los transistores, las resistencias, los circuitos electrónicos, entre otros. En el ámbito químico se utilizan para la protección de ciertos materiales contra la oxidación y/o corrosión.



Figura 1.1: Películas delgadas usadas en los filtros ópticos [3].

En relación al proceso de elaboración de las películas delgadas, estas se componen principalmente de cuatro fases. Dichas etapas son las siguientes: la fuente, el transporte, la deposición y el análisis [4].

En primer lugar, el material del cual se compone el recubrimiento delgado puede ser sólido, líquido, vapor o gas. En el caso que la fuente sea sólida se aplica el método de *Physical*

Vapor Deposition (PVD). Este puede consistir en la deposición del material en el sustrato mediante el uso de calor, haz de electrones, fotones, ionización catódica (*Sputtering*), entre otros. Asimismo, el método de *Chemical Vapor Deposition (CVD)*, este se utiliza en fuentes gaseosas y algunos materiales líquidos y sólidos que necesitan reaccionar químicamente para formar un nuevo compuesto. Este se condensa y se deposita en el sustrato formando la película delgada.

En segundo lugar, el transporte es una etapa relevante, ya que es indispensable para obtener una uniformidad adecuada cuando se deposite en el sustrato. Esta fase se puede realizar en sistemas de alto vacío o fluido. Referente al sistema de alto vacío, las moléculas viajan en línea recta de la fuente al sustrato, mientras que en el otro existen muchas colisiones entre las moléculas durante su recorrido. Usualmente, el transporte por alto vacío y el transporte por fluido están relacionados con el *PVD* y *CVD*, respectivamente.

En tercer lugar, la deposición correcta depende de tres factores: la condición de la superficie del sustrato, la reactividad del material del sustrato y la entrada de energía.

El primer factor incluye la aspereza, nivel de contaminación y grado de unión química con el material que se va a depositar. El segundo se refiere a la capacidad de incorporación de las moléculas al sustrato. El tercer está relacionado con la temperatura del sustrato. El conjunto de factores señalados determinan la estructura y composición de la película depositada.

Finalmente, el análisis de la muestra consiste en examinar las propiedades físicas y el correcto comportamiento para la cual ha sido creada esta película delgada.

1.2 Tecnología de Vacío:

De acuerdo con la definición de *The American Vacuum Society* (1958), el término vacío se refiere a un espacio establecido lleno de gas que se encuentra a una presión menor a la presión atmosférica [5]. Mientras más se disminuye la presión, mayor vacío se puede obtener; por lo tanto, se puede clasificar al vacío en varios rangos que se describen a continuación:

- Bajo Vacío: Se encuentra en el intervalo de presiones desde 1013 hasta 1 mbar.
- Medio Vacío: Abarca el intervalo de presiones desde 1 hasta 10^{-3} mbar.
- Alto Vacío: Se encuentra en el intervalo de presiones desde 10^{-3} hasta 10^{-7} mbar.
- Ultra Alto Vacío: Para presiones menores a 10^{-7} mbar.

Se ha podido llegar a valores de vacío con presiones que están en el rango de 10^{-13} mbar aproximadamente. El componente residual que se encuentra en este ambiente de ultra vacío es el gas hidrógeno, considerado como el más grande contaminante universal, permeando prácticamente en todos los materiales. No existe manera conocida de atraparlo o condensarlo en su totalidad [6].

Algunas aplicaciones de las técnicas del vacío se pueden encontrar en diversas áreas como en el ámbito espacial. Las técnicas de ultra vacío son muy importantes porque se necesita realizar simulaciones y pruebas con naves espaciales, trajes, materiales, satélites, equipos y herramientas en condiciones extremas de baja presión y gravedad casi nula. Asimismo, en el área industrial se utilizan para la manufactura, fabricación de recubrimientos con diferentes propiedades físicas, y la elaboración de circuitos integrados, sistemas conservadores de alimentos, etc. [7].

1.3 Sistemas de Alto Vacío:

La mayoría de sistemas de alto vacío están conformados por tres componentes: las bombas, la cámara de vacío, los tubos y válvulas que tiene como función conectar las dos primeras [6], [8].

1.3.1 Bombas

Son las encargadas de disminuir la presión de la cámara de vacío a través de métodos físicos, químicos o mecánicos. Éstas trabajan en un rango limitado de presiones de tal manera que la evacuación de los sistemas de vacío se realiza en varias etapas sucesivas usando diferentes tipos de bombas para cada una de ellas.

- Bomba Mecánica

También llamadas bombas previas, reducen la presión de la cámara desde la presión atmosférica (1013 mbar) hasta un intervalo de valores que se encuentra entre 10^{-2} y 10^{-1} mbar. Un adecuado modelo del funcionamiento de la bomba mecánica se refleja en la bomba de paletas rotatorias (Figura. 1.2). El giro del rotor produce que las paletas se deslicen por las paredes del estator, permitiendo la entrada del gas entre el éste y el rotor. Posteriormente, el volumen de gas contenido se desplaza hasta la salida del estator. Este tipo de bombas requiere evitar la condensación de vapores, en especial el del agua porque ocasionaría la descomposición del aceite.

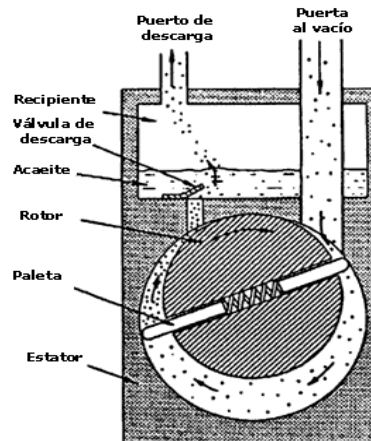


Figura 1.2: Bomba mecánica en corte transversal [9]

- Bomba Difusora:

Las bombas de difusión trabajan principalmente con aceite o mercurio. La acción de bombeo está basada en la difusión del aire por la colisión del chorro de aceite con éste a velocidades supersónicas. El aceite aumenta su temperatura hasta que se evapora mediante un calentador situado abajo y afuera de la bomba (llamado calderín). Es así que el vapor de aceite se eleva y es deflectado hacia abajo por las toberas, trayéndose consigo las moléculas de gas de la cámara (puntos negros). Dichas moléculas son desplazadas hacia la salida siendo expulsadas como se puede apreciar en la Figura 1.3. En las paredes de la bomba hay un sistema de refrigeración por agua, el cual permite la condensación del aceite para volver a ser calentado por el calderín.

La bomba difusora no puede operar de manera independiente ya que requiere de una bomba mecánica para reducir la presión de la cámara hasta el rango en donde ésta pueda operar. El funcionamiento de la bomba difusora puede llevar a la cámara de vacío a una presión de 10^{-6} mbar aproximadamente.

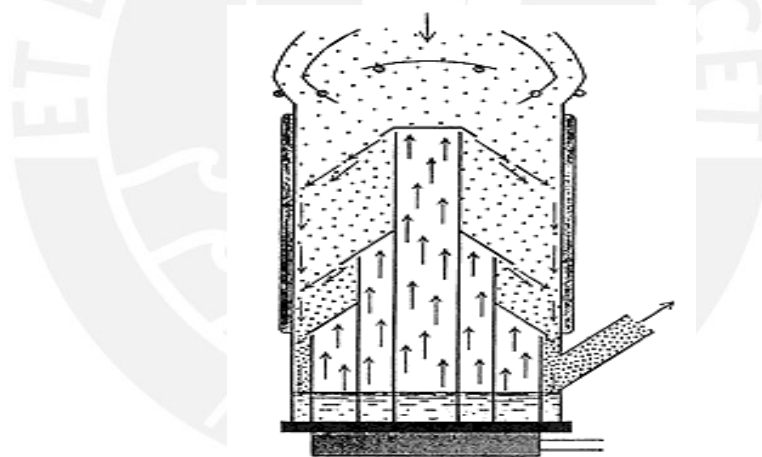


Figura 1.3: Representación del funcionamiento de la bomba difusora [9]

1.3.2 Cámara de Vacío

La gran mayoría de cámaras de vacío están fabricadas de acero inoxidable y tienen una o dos ventanas de observación. Según sea el caso, las paredes de la cámara pueden ser calentadas para apresurar la desgasificación de éstas y también enfriadas para evitar el sobrecalentamiento durante la elaboración de las películas delgadas



Figura 1.4: Cámara de Vacío del Laboratorio de Películas Delgadas

1.3.3 Tubos y Válvulas

Los tubos sirven como conexión entre las bombas y la cámara de vacío, como se mencionó anteriormente. Éstos se pueden clasificar en dos tipos: flexibles y rígidos. Los tubos flexibles permiten conexiones limpias entre dos elementos y pueden transportar un flujo viscoso. Además, se utilizan en la región de bajo y medio vacío. Los tubos rígidos son de área transversal grande y de longitud pequeña. Éstos pueden transportar flujo molecular y son utilizados en la región de alto vacío.

Las válvulas sirven para separar o comunicar dos ambientes adyacentes del sistema de vacío. Además, permiten el ingreso de algún gas inerte a la cámara. Existe poca variedad de modelos y sólo las compañías que trabajan con equipos de vacío son las que se encargan de fabricarlas.

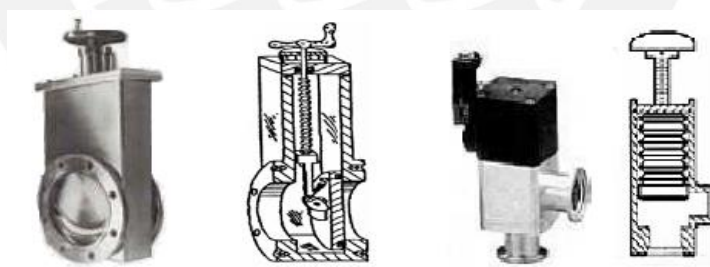


Figura 1.5. Izquierda: Válvula de metal utilizada para aislar las bombas de la cámara de vacío. Derecha: Válvula para dosificar gas Argón o Nitrógeno dentro de la cámara de vacío. [7]

Un sistema típico de alto vacío se puede apreciar en la Figura 1.6. Está compuesto de una bomba mecánica, una bomba difusora y la cámara de vacío. Estos tres elementos están interconectados por tubos rígidos y flexibles. Además, se posee una válvula de ventilación utilizada para poder degasificar la cámara y llevarla a la presión atmosférica cuando se terminen los procesos de creación de Plasma y Evaporación.

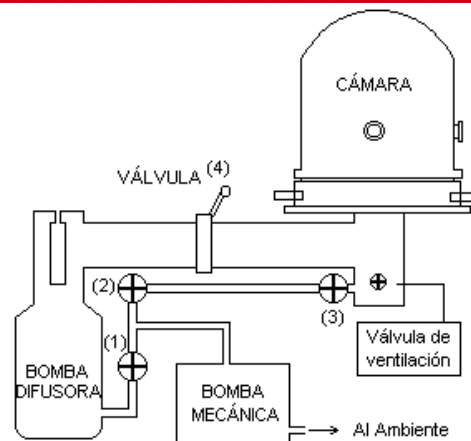


Figura 1.6: Esquema de un sistema de alto vacío para la elaboración de películas delgadas [6]

1.3.4 Procedimiento para llegar a Vacío

En principio la cámara se encuentra en condiciones ambientales; es decir, a presión atmosférica. Para lograr vacío se encienden la bomba difusora y mecánica. En esta etapa la bomba mecánica disminuye la presión al valor aproximado de 10^{-2} mbar transcurridos en cinco minutos aproximadamente. Una vez alcanzada esta presión, se cierra las válvulas (2) y (3) mostradas en la Figura 1.6. A continuación la bomba difusora disminuirá la presión de la cámara, hasta llegar a una presión alrededor de 10^{-6} mbar. Dicho proceso tiene una duración de veinte minutos aproximadamente. Mientras tanto, la bomba mecánica recibe y expulsa el gas que la bomba difusora extrae.

CAPÍTULO II

PROCESOS DE PLASMA Y EVAPORACIÓN EN LA ELABORACIÓN DE PELÍCULAS SEMICONDUCTORAS DELGADAS.

En el presente capítulo se detalla algunos métodos utilizados en la elaboración de películas delgadas. Además, se explican brevemente los procesos de creación de Plasma y Evaporación. Por último, se expone la problemática y se plantea una alternativa de solución, la cual incluye los objetivos a realizarse en el presente trabajo de tesis.

2.1 Deposición de materiales sólidos por Evaporación Física (*Physical Vapor Deposition*):

Como se mencionó en la sección 1.1, la deposición por Evaporación Física es un conjunto de procesos en los cuales se elaboran películas delgadas por medio de la evaporación y transferencia atómica del material utilizado para crear la película delgada hacia el sustrato donde va a ser depositado. Este es uno de los métodos más empleados para la deposición de materiales sólidos y posee diferentes sub-técnicas, algunas de las cuales serán descritas a continuación.

2.1.1 Deposición por Evaporación

Esta es la técnica más básica de la Deposición por Evaporación Física, la cual consiste en evaporar el material ubicado en un portamuestra mediante la inyección de alta corriente. Ello se genera por efecto Joule, de manera que el material eleva su temperatura hasta llegar a su punto de evaporación. Esto permite que el material evaporado se dirija hacia el sustrato en donde se deposita y se crea la película delgada. En la Figura 2.1 se observa la representación del proceso de Evaporación.



Figura 2.1. Representación del proceso de Evaporación [7]

Aunque esta técnica todavía es muy utilizada en aplicaciones de investigación, la deposición por evaporación está siendo reemplazada por técnicas como *Sputtering* o electrodeposición debido a que se obtienen mejores resultados. Ello se debe principalmente a dos razones, el factor uniformidad y la capacidad de producir aleaciones bien controladas [10].

2.1.2 Deposición por *Sputtering*:

Al dejar pasar una descarga eléctrica entre dos electrodos a una presión muy baja en un ambiente ionizado, el electrodo del cátodo comienza a desprender átomos de su superficie, desintegrándose lentamente. Ello se produce por el bombardeo de las moléculas de gas ionizadas. Asimismo, el material desintegrado deja la superficie del electrodo, ya sea como átomos libres o en combinación química con las moléculas de gas que se encuentran en la cámara [1].

La viabilidad de dicha técnica requiere crear un plasma o ambiente ionizado dentro de la cámara de vacío. Ello se logra mediante la inyección de Argón (Ar), un gas de adecuado peso molecular, y la aplicación de un campo eléctrico de gran magnitud.

La aplicación de alto voltaje entre el ánodo y el cátodo produce una ionización parcial del gas Argón, provocando que sus iones se aceleren y golpeen el cátodo o *target* (ubicación del material a evaporar) logrando así extraer átomos. Algunos átomos al ser golpeados por los iones adquieren la suficiente energía para abandonar la superficie, alcanzar el sustrato y adherirse a éste, como se puede apreciar en la figura 2.2.

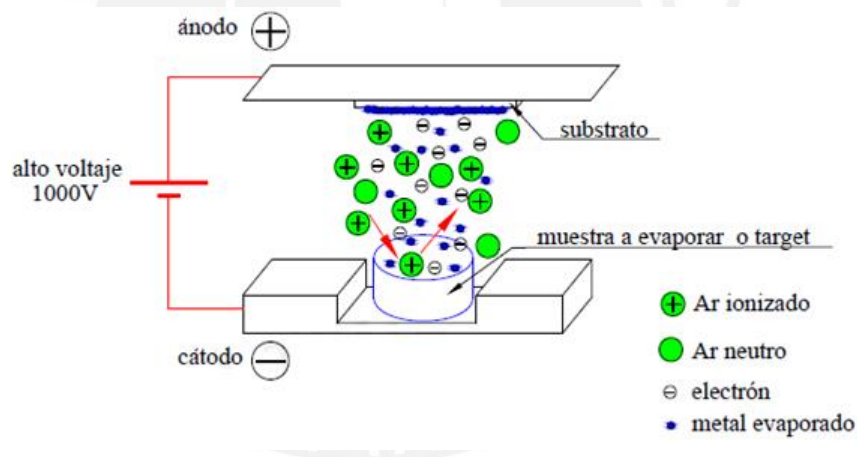


Figura 2.2: Representación del proceso de *Sputtering* [7]

Este método puede aplicarse en la evaporación de una variedad más amplia de materiales. Además, la rapidez en el proceso de deposición es más rápido.

Existen métodos alternativos que se basan en el proceso de *Sputtering*. Uno de ellos tiene un imán permanente ubicado en el cátodo el cual produce un campo magnético. La presencia de este hace que los electrones libres tengan un movimiento espiral y sigan un camino cicloidal hacia el sustrato logrando una mayor rapidez de deposición. Esta técnica se conoce como el proceso de *Sputtering* con Magnetrones (Figura 2.3).

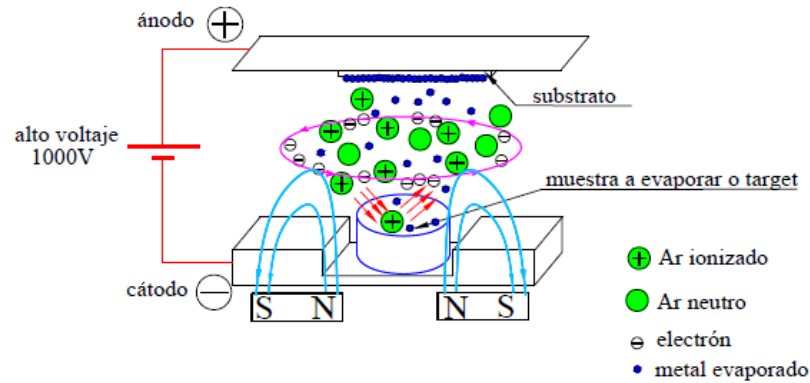


Figura 2.3. Representación del proceso de *Sputtering* con Magnetrones [7]

Para la deposición de materiales semiconductores y aislantes, se aplica una señal de radiofrecuencia (RF) al proceso de *Sputtering* con Magnetrones. Usualmente, se emplea una frecuencia de 13.56 MHz.

2.2 Descripción de los procesos de Creación de Plasma y Evaporación del Material

Actualmente, en el Laboratorio de Películas Delgadas de la Sección de Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú se elaboran películas semiconductoras delgadas, mediante el método de Evaporación, para analizar y estudiar propiedades electrónicas y ópticas. Los materiales semiconductores mayormente utilizados en el proceso de elaboración son el SiC (Carburo de Silicio) y AlN (Nitruro de Aluminio).

El laboratorio cuenta con un sistema de alto vacío compuesto por una bomba mecánica, una bomba difusora y una cámara de vacío, como se puede apreciar en la Figura 2.4.



Figura 2.4. Sistema de alto vacío del Laboratorio de Películas Delgadas de la Sección de Física [11]

Dentro de la cámara se encuentran electrodos estratégicamente ubicados para realizar adecuadamente los procesos de creación Plasma y Evaporación. Ambos procesos se realizan mediante el uso de un variac (transformador variable), cuya salida de voltaje está en el rango de 0 a 220 VAC. Éste es controlado manualmente por una perilla que regula el voltaje. El variac se conecta a través de una llave selectora a un transformador elevador de voltaje y dos transformadores de corriente, como se puede observar en la figura 2.5. El transformador de voltaje alcanza un máximo valor de 1000 VAC y los transformadores de corriente, 400 A AC.

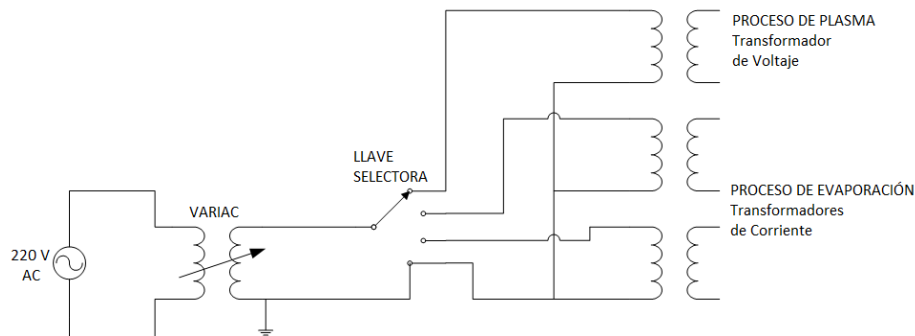


Figura 2.5. Diagrama esquemático de Conexión.

El plasma es el cuarto estado fundamental de la materia. Éste posee características similares al estado gaseoso con la diferencia que sus partículas se encuentran cargadas eléctricamente (iones). En relación a la elaboración de películas delgadas, el plasma ayuda a limpiar el ambiente de cualquier tipo de contaminación que pueda existir en la cámara de vacío. Además, se utiliza para hacer rugosa la superficie del sustrato con el objetivo de mejorar su capacidad de unión y adhesión [12].

El proceso de creación de Plasma se inicia después de que el ambiente de la cámara ha sido llevado al vacío (ver sección 1.3.4). En primer lugar, se gasifica el ambiente con Argón (Ar) mediante la apertura de una válvula conectada a la cámara. Luego, por medio de la llave selectora se activa en primer lugar el transformador de voltaje, conectado al variac, para energizar dos electrodos dentro de la cámara. Finalmente, se aumenta de manera gradual el voltaje, tratando de que el incremento sea lo más lineal posible, hasta llegar a 700 VAC aproximadamente. Es así que a partir de los 150 VAC se empieza a crear el plasma (Figura 2.6) y una vez realizado dicho proceso, el voltaje del transformador se disminuye hasta el mínimo posible mediante el variac.



Figura 2.6. Plasma formado por Argón y la aplicación de voltaje [7]

En relación al proceso de evaporación del material, debe verificarse que el transformador elevador de voltaje se encuentre en su mínimo valor. Una vez comprobado, se elige el transformador de corriente mediante la llave selectora. Éste se encuentra conectado al portamuestras (ubicación del material a evaporar) por medio de dos electrodos como se puede observar en la figura 2.7. De la misma manera que el proceso de creación del Plasma, se eleva lentamente el valor de la corriente por medio del variac.

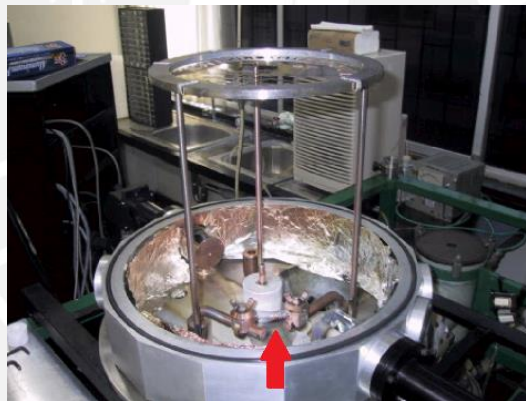


Figura 2.7. Electrodo conectado al portamuestras [11]

Los valores de corriente a los que se deben llegar varían entre 70 y 250 amperios, a una temperatura desde los 700°C hasta 2500°C, de acuerdo al material utilizado para la evaporación. El tiempo de duración del proceso toma entre 10 a 40 minutos, esto dependerá del espesor que se desee para la película delgada. Dicha característica es medida a través el sensor óptico constituido por una lámpara de luz blanca con un detector de filtro.

2.3 Definición del problema

Como se mencionó anteriormente, los procesos de creación de Plasma y Evaporación son realizados manualmente mediante el control de la posición de la perilla del variac y son monitoreados mediante un multímetro. El aumento o disminución del voltaje no alcanza a ser constante, ello tiene un efecto negativo en la calidad y eficiencia en la elaboración de películas delgadas. Asimismo, es necesario que un operario se encuentre presente controlando el variac al realizar los procesos de creación de Plasma y Evaporación. Cabe resaltar que el variac se encuentra fuera del tablero de control del sistema de alto vacío.

2.4 Objetivos:

2.4.1 Objetivo principal:

Se tiene como objetivo principal controlar electrónicamente tres transformadores de potencia (uno de voltaje y dos de corriente) y ofrecer al usuario la posibilidad de aumentar o disminuir el nivel de voltaje o corriente a través de dos pulsadores ubicados en el tablero de control. Lo mencionado depende de la necesidad requerida por el proceso que se esté llevando a cabo.

2.5.2 Objetivos secundarios:

- Elegir adecuadamente los sensores de corriente y voltaje.
- Diseñar e implementar un circuito acondicionador de señal, de tal manera que pueda ser procesada por el bloque de control.
- Diseñar e implementar el circuito excitador del motor DC acoplado al variac para controlar el aumento o disminución del voltaje.
- Diseñar e implementar el bloque de control y desarrollar el programa de control.
- Comprobar el correcto funcionamiento de todo el sistema en conjunto.

CAPÍTULO III

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO PROPUESTO

3.1 Alcance

En el presente capítulo se describe de forma detallada la propuesta de diseño que será utilizada para controlar el incremento o disminución del voltaje con saltos de 10 voltios en el proceso de creación de Plasma. De la misma manera, controlar la corriente con saltos de 4 amperios para el proceso de Evaporación.

En principio, se debe detectar el proceso que se va a realizar por medio de un selector y con qué transformador se está trabajando. Una vez realizado, se comienza a sensar en tiempo real el valor de voltaje o de corriente, el cual se mostrará mediante tres visualizadores de 7 segmentos. De acuerdo al valor en el que se encuentre se podrá aumentar o disminuir a través de dos pulsadores. De existir un cambio en la posición del selector, se efectúa el reinicio del variac; es decir, llevar el voltaje al valor mínimo. Esto se realiza como medida de seguridad cuando se desee cambiar de proceso, pues es obligatorio comenzar cualquiera de estos con valores mínimos.

3.2 Diagrama de bloques:

En el siguiente diagrama (Figura 3.1) se muestra los bloques que se utilizarán para el diseño del sistema. A continuación se explica y desarrolla cada uno de ellos.

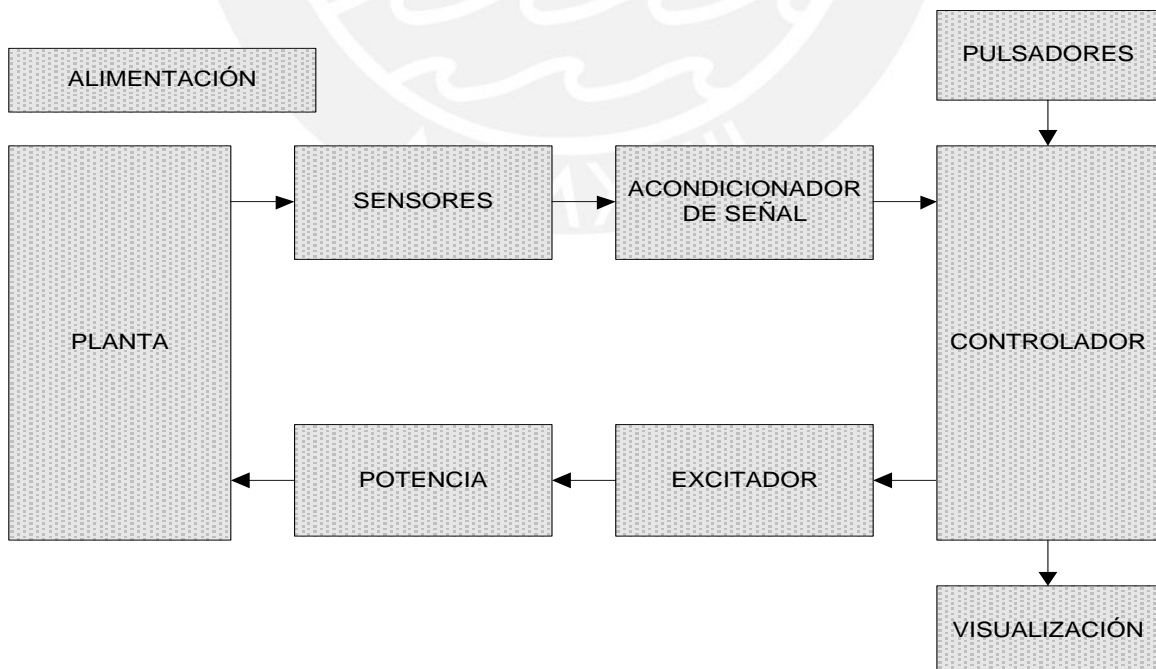


Figura 3.1. Diagrama de bloques del sistema completo

3.2.1 Planta

Como se mencionó en la sección 2.2, la planta consta de un sistema de alto vacío compuesto por una bomba mecánica, una bomba difusora y una cámara de vacío. Se debe tener en consideración que el variac se encuentra cerca al sistema; por lo tanto, la presencia de un operario es necesaria para el control de los procesos de creación de Plasma y Evaporación.



Figura 3.2. Sistema de alto vacío [11]

3.2.2 Sensores

Es necesario sensor los valores de voltaje y corriente en tiempo real para controlar adecuadamente los procesos antes mencionados. Por lo tanto, se requiere de un sensor de voltaje y uno de corriente. Asimismo, es importante saber con qué transformador se está trabajando. Por ello, se necesita detectar la posición en la que el selector se encuentre.

3.2.2.1 Sensor de Voltaje

El sensor de voltaje debe cumplir con los siguientes requerimientos de funcionamiento:

- Rango de medición de 0 – 1000 VAC.
- Precisión de 2%.
- Poseer aislamiento eléctrico.

Se plantean dos alternativas que pueden cumplir con los requerimientos antes mencionados. Ellas serán presentadas en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Comparación entre sensores de voltaje

Requerimientos	Alternativas	
	Sonda de Voltaje Fluke Relación 1000:1	Transformador de Medida de Tensión Relación 1000:5
Rango de medición adecuado	SI	SI
Relación de atenuación adecuada	SI	SI
Aislamiento Eléctrico	NO	SI
Precisión (2%)	SI	SI
Disponibilidad Mercado Local	NO	SI

Fuente: Propia

La sonda de voltaje Fluke 80k-6 funciona como un divisor resistivo que atenúa la señal medida de acuerdo a la relación que tenga con respecto a sus impedancias. En este caso, la relación es 1000:1.

El transformador de medida es un transformador reductor que atenúa el voltaje por medio de inducción electromagnética, de acuerdo a la relación de transformación con la que ha sido fabricado. Éste se compone de dos bobinas devanadas sobre un núcleo cerrado de material ferromagnético. Para este caso, el transformador presenta una relación de transformación de 1000:5. Asimismo, se debe cumplir que la potencia en ambos lados de los bobinados tiene que ser la misma.

En la Figura 3.3 se muestra la sonda de voltaje y el transformador de medición.

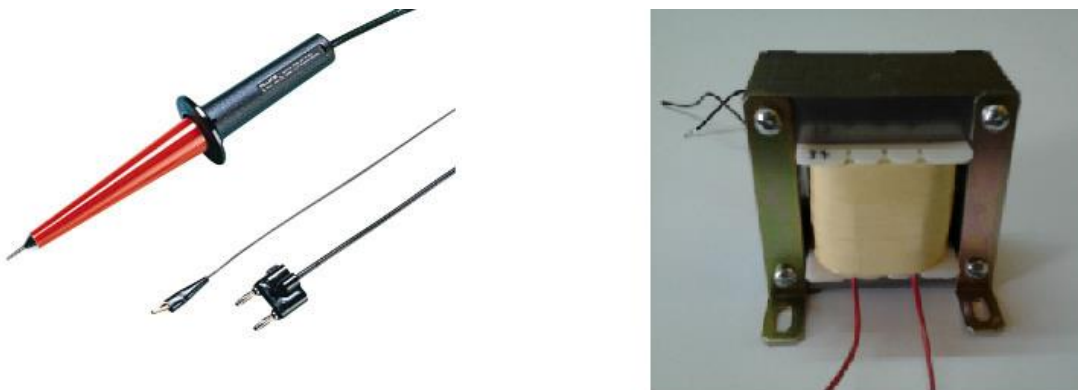


Figura 3.3. Izquierda: Sonda de Voltaje Fluke 80k-6. Derecha: Transformador de Medición de Voltaje.

De acuerdo a las características mencionadas anteriormente y a la comparación hecha en el cuadro anterior, se elige el transformador de medida como alternativa a utilizar debido principalmente al aislamiento eléctrico que posee. Dicha característica es relevante pues de ocurrir alguna falla en la etapa de potencia se limita el daño que puede ocasionar. En relación al precio, el transformador es una buena elección debido a que es más económico (S/. 60.00) en comparación de la sonda de voltaje (€. 168.00). El transformador de medida trabajará con valores de 0 V a 1000 V para el sensado de voltaje.

3.2.2.2 Sensor de Corriente

El sensor de corriente debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Rango de medición de 0 a 400 A AC.
- Poseer aislamiento eléctrico.
- Precisión de 2%.

Debido a que se está trabajando con alta corriente, la medición directa es una alternativa de solución poco factible ya que la manipulación en la medición probablemente sea peligrosa por tener el circuito abierto. Por lo tanto, se deben considerar otras opciones de medición de corriente, como por ejemplo, la medición por efecto Hall. Dicha es muy utilizada en estos casos.

En ese sentido, se cuentan con dos opciones que cumplen con los requerimientos antes mencionados y pueden ser utilizados para el sensado de corriente.

La primera alternativa es un sensor de la marca ABB, el modelo es el HBO 400 mostrado en la Figura 3.4. Este es un sensor de efecto Hall de lazo abierto que puede medir corrientes de hasta 400 A AC. Asimismo, posee una precisión de $\pm 1\%$ y la señal de salida es un voltaje que varía de 0 hasta 4 VAC según el valor de corriente sensado. En relación a su funcionamiento, necesita ser energizado con ± 12 V DC.



Figura 3.4. Izquierda: Sensor de Corriente HBO 400. Derecha: Sonda amperimétrica Fluke i410.

La segunda alternativa es una sonda amperimétrica FLUKE i410, la cual posee un rango de medición de 400 A AC. Este dispositivo tiene como relación de sensado 1mV/1A y tiene una precisión de 3%. Según la hoja de instrucciones de uso, el dispositivo que va a medir al sensor requiere una impedancia de entrada mayor a 1 MΩ. Otra característica de este dispositivo es no necesitar de alimentación, pues cuenta con una batería incorporada. Cabe resaltar que actualmente el Laboratorio de Películas Delgadas cuenta con este instrumento para medir la corriente que circula por el transformador.

A continuación, en la tabla 3.2 se muestra la comparación de las dos alternativas de sensores de corriente.

Tabla 3.2. Comparación de los sensores de corriente

Requerimientos	Alternativas	
	ABB - HBO400	FLUKE i410
Rango de medición adecuado	SI	SI
Aislamiento Eléctrico	SI	SI
Precisión (2%)	SI	NO

Fuente: Propia

Según lo mencionado anteriormente y de acuerdo al cuadro comparativo, se puede optar por elegir a la sonda amperimétrica. Además de ser un sensor de medida de corriente indirecta (efecto Hall) y por tanto, contar con aislamiento eléctrico y no necesitar una fuente de alimentación externa, este sensor se encuentra en el Laboratorio de Películas Delgadas. Dicho sensor siempre ha sido utilizado para hacer las mediciones de corriente, entonces no habría ningún inconveniente en poder emplearlo. Se debe recordar que el sensor brinda valores de salida desde 0 hasta 400 mV. Sin embargo, el rango de interés de corriente para realizar un correcto proceso de Evaporación se encuentra entre los 70 A (70 mV) hasta los 250 A (250 mV).

3.2.2.3 Detector de posición del selector

De acuerdo a la posición del selector, éste activa a uno de los tres contactores, los cuales están conectados a los tres transformadores, respectivamente. La detección de la ubicación es importante para el diseño del sistema, debido a que se verificará constantemente si existe algún cambio. Si esto ocurriese, el voltaje del variac tiene que disminuir hasta su valor mínimo, como una medida de seguridad.

En la siguiente Figura 3.5 se muestra el diagrama esquemático de las conexiones del selector.

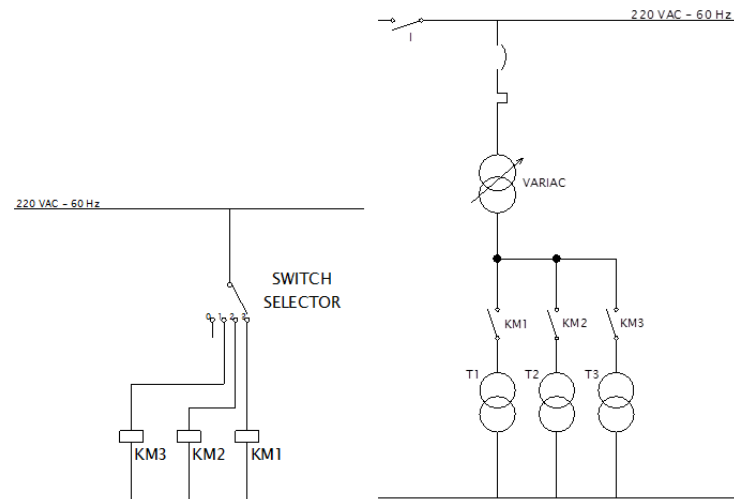


Figura 3.5. Diagrama esquemático del selector.

Se puede observar que los contactores poseen adicionalmente una conexión normalmente abierta (NA) que no está siendo utilizada. Entonces, se pueden emplear para detectar el cambio del selector. El comportamiento del contacto NA es cerrarse cuando se energiza el electroimán; es decir, entra en conducción. Por lo tanto, es posible configurar estos contactos como interruptores que se activarán cuando el selector se encuentre en una posición específica. Cabe mencionar que nunca se va a dar el caso en que dos transformadores estén funcionando simultáneamente.

3.2.3 Acondicionador de Señal

Debido a que las salidas de los sensores de voltaje y de corriente son señales de voltaje alternas, es requerimiento que éstas sean acondicionadas y convertidas a voltaje continuo. Asimismo, se deben encontrar en un rango que pueda ser admitido en la conversión analógica-digital.

Básicamente el circuito consta de tres etapas que se muestran en la Figura 3.6

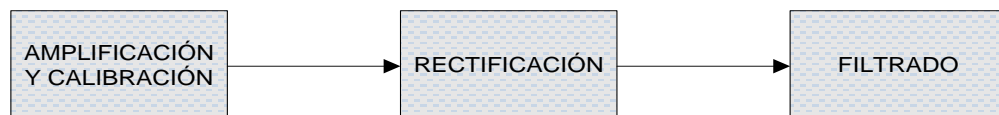
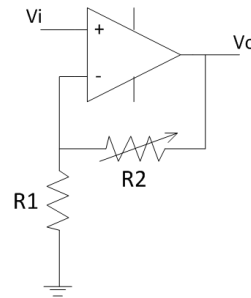


Figura 3.6. Etapas de conversión de voltaje AC a DC.

Se sabe que la señal sensada siempre posee un margen de error en la medición. Por otro lado, todos los componentes electrónicos tienen un porcentaje de precisión; es decir, no poseen valores exactos. En ese sentido, para el diseño de las etapas de rectificación y filtrado, no se logrará obtener exactamente la salida deseada si se emplean valores de resistencias y condensadores fijos, ya que siempre existirá un rango de error. En relación a dicho problema se plantea diseñar un amplificador con una ganancia variable (por medio de

un potenciómetro) para calibrar la salida al valor que se desee. En esta primera etapa se utilizará un amplificador no inversor como el que se observa en la figura 3.7.



$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Figura 3.7. Amplificador no inversor

Una ventaja importante que posee el amplificador no inversor es que tiene una impedancia de entrada muy elevada. Debido a esta característica el efecto de carga que podría producirse en la entrada ya no sería un problema, pues está siendo anulada.

Para procesar la señal de los sensores y ser utilizados por el bloque de control, es necesario digitalizar esta señal en un rango de valores que puedan ser válidos. Dado que hasta este punto las señales que proporcionan los sensores son alternas, estas deben de ser convertidas a señales continuas. Para ello se utilizará un circuito rectificador de precisión de onda completa. Este transmite una polaridad de la señal de entrada e invierte la otra. Por lo tanto, ambos medios ciclos del voltaje alterno se transmiten y se convierten en una polaridad única a la salida del circuito. Dicho circuito también es llamado amplificador de valor medio absoluto (MAV). En la Figura 3.8 se muestra el circuito del MAV.

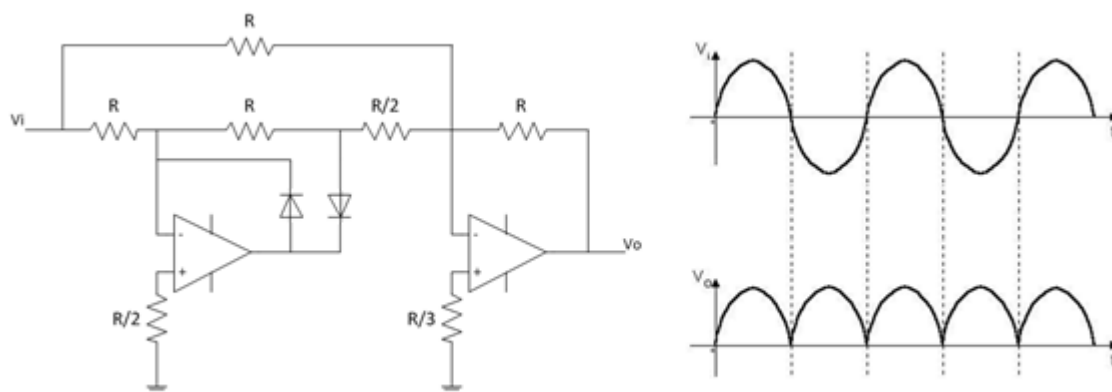


Figura 3.8. Amplificador de valor medio absoluto (MAV). [13]

Como la etapa de rectificación no elimina la forma AC de la señal entrante, es necesaria una etapa de filtrado, ella se realiza mediante capacitores. Estos se cargan hasta valor máximo de la etapa de rectificación; entonces, cuando disminuye la tensión, estos se descargarán lentamente y se vuelven a cargar cuando el voltaje se eleve. De esta manera se logra asemejarse a una señal DC. Se debe tomar en cuenta, que es muy difícil eliminar del todo la componente AC, quedando siempre un residuo conocido como voltaje de rizado, como se observa en la figura 3.9.

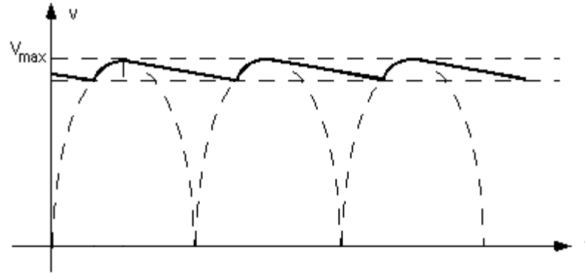
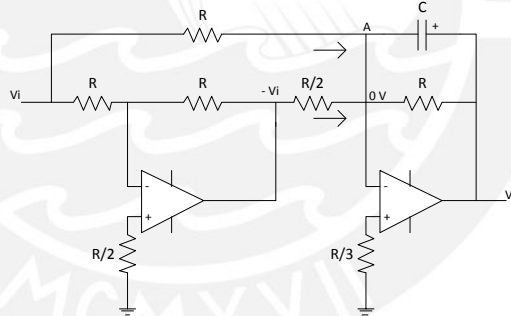


Figura 3.9. Filtrado de la Señal

A continuación se realiza el análisis de la función de transferencia de la etapa de rectificación y filtrado.

Para $V_i > 0$



En el nodo A:

$$\frac{-V_i}{R/2} + \frac{V_i}{R} = \frac{-V_o}{\frac{R}{sC}}$$

$$R + \frac{1}{sC}$$

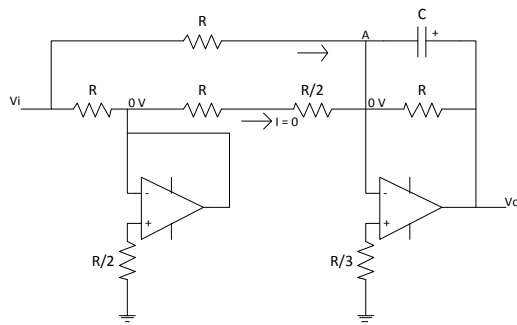
$$-2V_i + V_i = -V_o(1 + sCR)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + sCR}$$

Hallando la Frecuencia de Corte (f), donde $S = j\omega$, $\omega = 2\pi f$

$$\sqrt{2} = |1 + j\omega RC| \qquad f = \frac{1}{2\pi RC}$$

Para $V_i < 0$



En el nodo A:

$$\frac{V_i}{R} = \frac{-V_o}{\frac{R}{\frac{SC}{R + \frac{1}{SC}}}}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{1}{1 + SCR}$$

Hallando la Frecuencia de Corte (f), donde $S = j\omega$, $\omega = 2\pi f$

$$\sqrt{2} = |1 + j\omega RC| \quad f = \frac{1}{2\pi RC}$$

El MAV (valor medio absoluto) de una onda de voltaje es aproximadamente igual a su valor eficaz (RMS); por lo tanto, este circuito MAV puede ser utilizado como un circuito calculador de valor eficaz (RMS). La relación entrada-salida que nos brinda será de 1 VAC - 1 VDC [13].

Es necesario elegir los componentes apropiados, como son los OPAMPS, resistencias, condensadores y diodos, para asegurar un correcto funcionamiento. Para la selección del OPAMP, se requiere:

- Tener una impedancia de entrada alta.
- Trabajar con señales alternas.

En la tabla 3.3 se muestra algunas características importantes de tres OPAMPS diferentes.

Tabla 3.3. Comparación de OPAMPS

Requerimientos	Alternativas		
	uA741CN	LM101A	AD711
Voltaje de alimentación	V _{cc+} = 15V, V _{cc-} = -15V	V _{cc+} = 15V, V _{cc-} = -15V	V _{cc+} = 15V, V _{cc-} = -15V
Impedancia de Entrada	2 MΩ	4 MΩ	3 TΩ
Impedancia de Salida	-	-	0.01 Ω @ 1 KHz
Corriente Offset de Entrada	2 nA	1.5 nA	10 pA
Voltaje Offset de Entrada	1 mV	0.6 mV	0.3 mV
Corriente de Bias Entrada	10nA	30nA	20 pA

Fuente: Propia

De acuerdo a la tabla comparativa se puede apreciar que las tres alternativas cumplen con los requisitos mencionados, entonces se optó por elegir el OPAMP UA741CN. Por otro lado, se debe tener en cuenta que el rango de interés para la medición del sensor de corriente comienza desde los 70 mV (ver sección 3.2.2.2). Por ello, el voltaje offset de entrada de este componente no producirá ningún problema.

Con respecto a los otros componentes como son las resistencias, condensadores y diodos; se utilizarán los habituales de estos tipos dependiendo del diseño del circuito.

La Figura 3.10 presenta el acondicionador de señal para el sensor de voltaje. La salida máxima de este sensor es 5 VAC_{RMS}; por lo tanto, la relación de salida es adecuada para la posterior conversión analógica-digital debe ser de 5 VAC_{RMS}/ 5 VDC. En la etapa de amplificación y calibración se diseñará el amplificador no inversor con el objetivo de tener una ganancia unitaria con un margen de 20% y de esa forma calibrar la señal si fuera necesario. De acuerdo a la fórmula antes mencionada, se elige un potenciómetro de 2 KΩ para R2 y una resistencia de 10 KΩ para R1. Referente a la etapa de rectificación y filtrado se sigue el modelo antes descrito. Por último, se calcula la frecuencia de corte de 1.59 Hz.

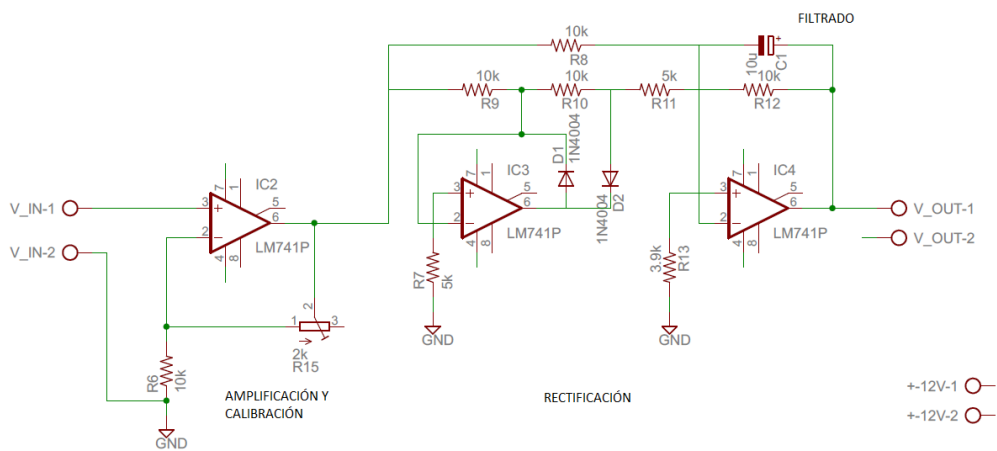


Figura 3.10. Circuito acondicionador de señal para el sensor de voltaje [13].

En la Figura 3.11 se muestra el circuito acondicionador para el sensor de corriente. Como se mencionó con anterioridad (sección 3.2.1.2), dicho sensor nos proporciona una relación de salida de 1mV/1A. Debido a que se trabajará con corrientes de hasta 400 A, el valor máximo que proporciona el sensor es de 400 mV AC, el cual debe a ser amplificado a 5 VAC. En ese sentido, se calculará los valores de acuerdo a la fórmula.

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 12.5 = \frac{5 V}{0.4 V}$$

Para efectos de calibración, se calcula que R_1 sea de 1 K Ω y R_2 sea una resistencia y un potenciómetro en serie de valores de 10 K Ω y 2 K Ω . Además Se obtiene una frecuencia de corte de 1.59 Hz.

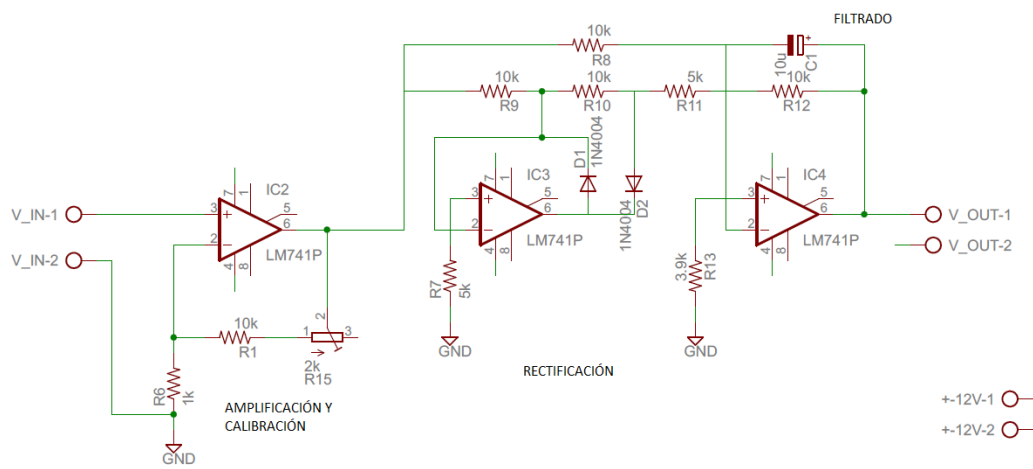


Figura 3.11. Circuito acondicionador de señal para el sensor de corriente [13].

3.2.4 Potencia (Motor)

Para automatizar el aumento y/o disminución del voltaje del variac es necesario el uso de un motor que se encuentre acoplado al eje de éste con la finalidad de hacerlo girar y lograr un adecuado control.

El motor debe de cumplir los siguientes requerimientos:

- Poseer el torque suficiente para hacer girar el eje del variac.
- El sentido de giro debe ser reversible.
- Tener bajo consumo de potencia.

En ese sentido, es necesario saber cuál es el torque que se necesita para rotar el eje del variac. Previamente se explicará en modo general como funciona un variac.

El variac es un auto transformador variable del cual se puede obtener una tensión de salida entre 0V y la tensión de alimentación, que generalmente es de 220V a 60Hz. Está constituido

por un núcleo en forma toroidal sobre el que está arrollado una de las bobinas del transformador. Mediante un eje central discurre una escobilla con una rueda la cual proporcionará el voltaje de salida de acuerdo al número de espiras que se tenga en esa posición. En la figura 3.12 se muestra el variac que se utiliza en el Laboratorio.



Figura 3.12. Transformador variable (variac).

El torque necesario para girar el eje del variac se halló mediante cálculos experimentales por medio del acople de una varilla al eje, la cual va a estar sometida a un peso como se puede observar en la figura 3.13. Para hallar el torque o momento se utiliza la siguiente fórmula:

$$M_o = \vec{r} \times \vec{F} = r \cdot F \cdot \text{sen}\theta = r \cdot F$$

Donde r es la distancia del punto de origen hasta el punto donde es aplicada la fuerza, F es la fuerza aplicada (en este caso sería el peso W). Cabe resaltar que θ es el ángulo que forman los vectores r y F , el cual es 90° ; por lo tanto el $\text{sen}\theta$ es 1.

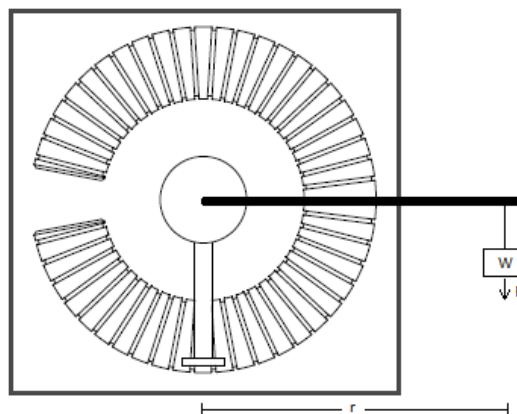


Figura 3.13. Diagrama de la prueba realizada para hallar el torque

En la tabla 3.4 se muestran los resultados experimentales del mínimo torque necesario para hacer girar la perilla. ($g=9.81 \text{ m/s}^2$)

Tabla 3.4. Resultados de la pruebas experimentales para hallar el torque

Masa (kg)	Peso W (N)	Distancia r (m)	Torque (N.m)
0.6	5.886	0.185	1.089
0.65	6.376	0.175	1.116
0.7	6.867	0.16	1.099
0.75	7.357	0.142	1.045
0.8	7.848	0.134	1.052

Fuente: Propia

Se halla el promedio de los valores obtenidos, el cual es 1.08 N.m.

Una vez conocido el mínimo valor del torque necesario para hacer girar el eje del variac, se elegirá un motor adecuado que cumpla los requerimientos solicitados. Es recomendable usar un motor DC debido a que puede invertir el sentido de giro del motor y tener un control adecuado de la velocidad. Se dispone de un motor de características mencionadas en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Características del Motor

Características	Motor DC J-Miniserries UGJMEE-02EIB42
Voltaje Nominal	24 V
Torque Nominal	0.23 N*m
Corriente Pico	10 A
Velocidad Nominal	4000 RPM

Fuente: Propia

Se debe tener en cuenta que es necesario un acople que conecte el motor al eje del variac. Además, éste puede funcionar como un mecanismo reductor de velocidad dado que el giro del variac debe ser lento para controlarlo adecuadamente. Se puede utilizar uno del tipo "sin fin - corona" como se muestra en la Figura 3.14. Un tornillo sin fin, conocido como elemento motriz, engrana una rueda dentada, llamada también elemento de conducción o corona, haciendo girar un diente de la corona por cada vuelta que dé el tornillo. La relación de transmisión es la siguiente:

$$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\tau_1}{\tau_2}$$

Dónde: z_1 = número de dientes de la corona
 ω_1 = velocidad angular del engranaje de entrada
 ω_2 = velocidad angular del engranaje de salida
 τ_1 = momento o torque transmitido a ω_1
 τ_2 = momento o torque transmitido a ω_2



Figura 3.14. Mecanismo de transmisión "tornillo sinfín - corona" [14]

En el laboratorio de Física se cuenta con un reductor de velocidad similar al descrito anteriormente el cual tiene una relación de transmisión de $i = \frac{6}{65} = \frac{1}{10.83}$. Por lo tanto, el torque y la velocidad angular aumentan y disminuyen en una relación de 10.83, respectivamente.

Por consiguiente, debido a que el acople reductor de velocidad hace que el torque aumente considerablemente y además reduzca la velocidad, el motor DC J-Miniserries UGJMEE-02EIB42 funcionará de manera adecuada.

3.2.5 Excitador

Es importante controlar el sentido de giro del motor que se encuentra acoplado al variac ya que es un requerimiento aumentar o disminuir el voltaje o corriente según la acción que se desee realizar.

Los circuitos electrónicos más utilizados para realizar dicha labor son los llamados "Puente H". Estos circuitos se constituyen de cuatro conmutadores, que al ser activados de manera apropiada hacen que el motor pueda girar en un sentido u otro. A continuación, en la Figura 3.15 se muestra un esquema simplificado del "Puente H". Para hacer girar el motor hacia un sentido se cierran el SW1 y SW4 y se mantienen abiertos el SW2 y SW3. Para hacerlo girar en el sentido contrario se realiza exactamente la acción inversa.

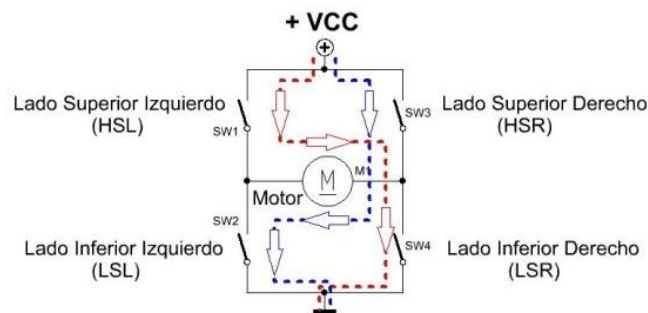


Figura 3.15. Esquema simplificado del "Puente H" [15]

Existen cuatro estados en los que puede trabajar el Puente H.

Tabla 3.6. Estados de funcionamiento del Puente H.

Entradas		Funcionamiento
b0	b1	
0	0	El motor está parado o frena bajo su propia inercia.
0	1	Giro hacia atrás.
1	0	Giro hacia adelante.
1	1	Frenado rápido.

Fuente: Propia

Los requerimientos que necesita cumplir el “Puente H” son los siguientes:

- Poseer aislamiento eléctrico.
- Soportar la corriente máxima (10 A) con la que trabaja el motor.

Se tienen dos alternativas que pueden cumplir los requerimientos antes mencionados, los cuales van a ser comparados en la tabla 3.6

Tabla 3.7. Comparación de alternativas de “Puente H”

Características	Puente H integrado (L298)	Puente H discreto (diseño)
Voltaje de Alimentación	5 V	5 V
Corriente que soporta	2 A	De acuerdo al dispositivo de potencia que se utilice
Voltaje de Carga	0 – 46 V	Voltaje Nominal del Motor

Fuente: Propia

Debido a que el circuito integrado no cumple con el requerimiento de corriente de salida ya que el motor elegido tiene una corriente pico de 10 A, es necesario optar por un diseño del circuito de Puente H.

El motor requiere ser controlado por el bloque de control, por lo que es necesario tener aislamiento eléctrico para evitar posibles daños entre la etapa de control y de potencia. Para este propósito se utilizarán optocopladores (PC817 [Anexo 1]). Por otro lado, los contactos serán implementados con transistores MOSFET de Potencia (IRF540 [Anexo 2] e IRF9540 [Anexo 3]). Estos se caracterizan por ser controlados por voltaje, su velocidad de conmutación es alta (nanosegundos) y la corriente que soporta el drenador es elevada (28A y -19A).

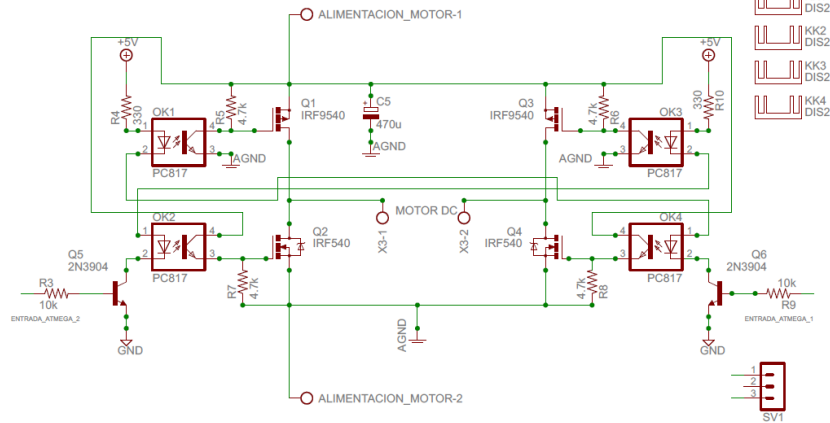


Figura 3.16. Diagrama esquemático del “Puente H” [16]

En la figura anterior (Figura 3.16) se muestra el diagrama esquemático del Puente H. Al inyectar corriente a la base del transistor 2N3904 [Anexo 4], éste se satura haciendo que se activen los optocopladores; los cuales provocarán la polarización de los transistores MOSFET que funcionan como conmutadores.

3.2.6 Visualización

Para observar la corriente o el voltaje que se está sensando, es necesario contar con un dispositivo de visualización que debe cumplir las siguientes especificaciones:

- Debe ser muy compacto.
- Se pueda visualizar tres dígitos de la medición.
- Bajo consumo de potencia.

Se tienen dos opciones que pueden ser utilizadas en este bloque. Ellos son el visualizador de 7 segmentos y el Display LCD, los cuales son comparados en la tabla 3.7.

Tabla 3.8. Comparación de visualizadores

Características	(Visualizador de 7 Segmentos LTS-2301) x 3	Display LCD 16x2 LK162-12
Voltaje de Alimentación	5 VDC	4.75 – 5.25 VDC
Dimensiones	10x8mm	23x51mm
Número de dígitos que se pueden visualizar	1 x 3	32
Potencia Consumida	280mW x 3	750mW

Fuente: Propia

De acuerdo al espacio que se ha destinado en el tablero de control para la visualización (15x25mm) como se puede observar en la Figura 3.17, no es posible usar el Display LCD por las dimensiones que posee. Por lo tanto, se trabajará con tres visualizadores de 7 segmentos LTS-2301AP [Anexo 5], el cual tiene una conexión de cátodo común.



Figura 3.17. Espacio del tablero de control destinado para el control del variac.

Debido a que se necesitará veintiún pines de salida para controlar a los tres visualizadores, se optará por utilizar un driver decodificador que pueda convertir un valor del número hexadecimal (4 bits) al formato del visualizador de 7 segmentos. Este controlador es el HD74LS48 [Anexo 6]. Entonces solo se usarán doce pines de salida para la visualización.

3.2.7 Pulsadores

Es necesario el uso de dos pulsadores ya que servirán para activar el aumento y la disminución del voltaje o la corriente, según el proceso que se esté realizando. Debido al espacio que se dispone (Figura 3.17), el uso de estos tipos de pulsadores es mandatorio.

3.2.8 Controlador

Esta etapa se encarga de procesar las señales del bloque de acondicionamiento y a partir de estas generar un control adecuado del voltaje o corriente, según el proceso con el que se esté trabajando.

3.2.8.1 Elección del microcontrolador

Los requerimientos que se necesitan son los siguientes:

- Poseer 3 conversores analógico-digital (ADC).
- Contar con 2 interrupciones externas.
- Tener bajo consumo de potencia.
- Debe de tener puertos de E/S descritos a continuación:

Entradas:

- 3 pines de entrada ADC que van a estar conectadas a los acondicionadores de señal.
- 3 pines de entrada para detectar el selector de posición.
- 2 pines de entrada para el pulsador de subida y de bajada de voltaje o corriente.

Salidas:

- 12 pines de salida para los controladores de los tres visualizadores de 7 segmentos que se utilizarán para la visualización de voltaje y corriente
- 2 pines de salida que controlen el giro del motor que se va a encontrar acoplado al variac.
- 2 pines de salida a dos LED's para diferenciar si se trabaja con voltaje o corriente.

Teniendo en cuenta los requerimientos antes mencionados, se presenta un cuadro (Tabla 3.8) con dos propuestas de microcontroladores que podrían ser utilizados.

Tabla 3.9 Comparación de microcontroladores

Características	Microcontrolador	
	ATMEGA16A	PIC16F914
Poseer conversor A/D	1 Puerto, 10 bits resolución	1 Puerto, 10 bits resolución
Interrupciones Externas	2	1
Velocidad	8MHz	8MHz
Puertos E/S	32	35
Voltaje de Alimentación	2.7 V – 5.5 V	2 V – 5.5 V

Fuente: Propia

De acuerdo al cuadro comparativo se puede observar que ambos microcontroladores cumplen los requisitos antes mencionados. Por tener un mejor conocimiento y poseer un poco más de experiencia en la programación de microcontroladores ATMEL, se elige el microcontrolador ATMEGA16. Éste cuenta con suficientes pines E/S, tiene dos interrupciones externas y además cuentan con un puerto de conversión analógica-digital conformado por 8 pines de entrada con una resolución de 10 bits.

En la figura 3.18 se muestra el circuito esquemático que se utilizará para esta etapa. Se debe notar que se implementó un regulador de voltaje LM7805 [Anexo 7] para utilizarlo como el voltaje de referencia (V_{ref}) en la conversión A/D y además, alimentar al microcontrolador.

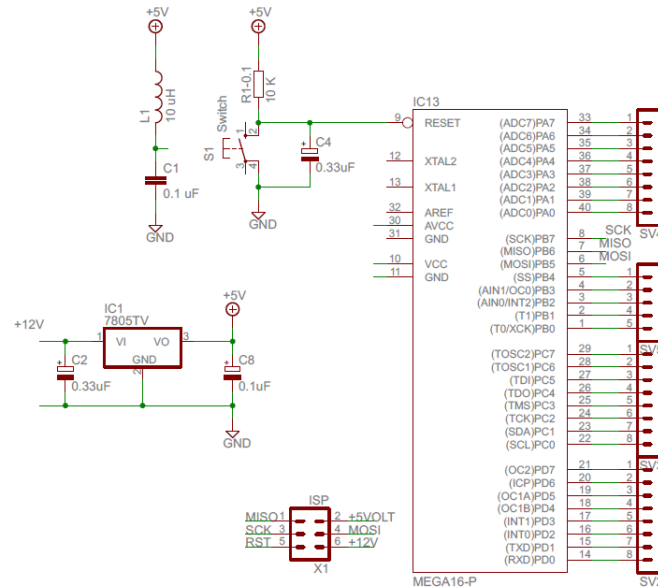


Figura 3.18. Circuito Esquemático del Bloque de Control

3.2.8.2 Diseño del software

Una vez realizada la conversión analógica- digital, se tienen que procesar estos datos para que puedan ser visualizados por medio de 3 *Displays* de 7 segmentos. Además, se debe de verificar constantemente en qué posición se encuentra el selector.

Si el valor de voltaje o corriente se encuentra en un rango admisible, se va a poder aumentar o disminuir por medio de los pulsadores que se van a encontrar ubicados en el panel de control. Estos pulsadores van a activar el giro horario o anti horario del motor acoplado al variac para subir o bajar el voltaje o corriente, según el proceso que se esté efectuando.

A continuación se presenta el diagrama de flujos del programa principal y de las subrutinas que se utilizaron en el desarrollo.

En el programa principal, que se muestra en la Figura 3.19, se hace el llamado a varias subrutinas de manera que la programación sea ordenada. Asimismo, se configuran e inicializan las interrupciones externas, la cuales nos van a informar si se ha presionado o no algún pulsador.

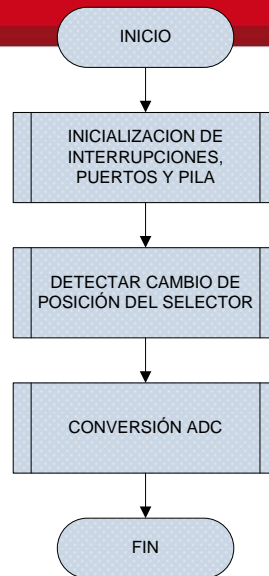


Figura 3.19. Diagrama de bloques del programa principal

La primera subrutina inicializa las interrupciones, los puertos y la pila. En la subrutina “Detectar cambio de posición del selector”, se analiza constantemente los tres pines de entrada que están conectados a las posiciones del selector, como se mencionó en la sección 3.2.1.3. Inicialmente, cuando se ingrese a esta subrutina, se llama a la subrutina “reseteo”, el cual genera que el motor acoplado al variac gire de modo que lleve el voltaje al mínimo posible. Esto se realiza como una medida de seguridad, para cerciorarse que cualquiera de los dos procesos se inicie con voltaje o corriente mínimo. Por otro lado, cada vez que exista un cambio en el selector se va a llamar a la subrutina “reseteo” para que reinicie el variac. En la figura 3.20 se muestra el diagrama de bloques de la subrutina antes descrita.

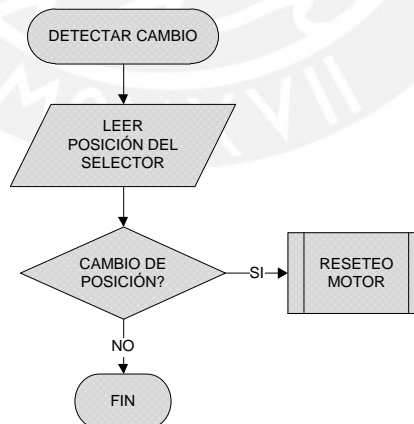


Figura 3.20. Diagrama de bloques: Subrutina Detectar cambio de posición del selector.

En la subrutina “Conversión A/D”, se convierte la señal analógica a digital. Cabe resaltar que el ADC cuenta con 10 bits de resolución (0-1023). De esta manera se puede calcular la resolución en la medición de voltaje y corriente como se muestra a continuación:

Para el voltaje: $\frac{V_{max}}{\# \text{ bits}} = \frac{1000 \text{ V}}{1023} = 0.978 \text{ V}$

Para la corriente: $\frac{A_{max}}{\# \text{ bits}} = \frac{400 \text{ A}}{1023} = 0.39 \text{ A}$

El valor de la conversión es guardado en un registro de 16 bits, el cual será importante para el funcionamiento adecuado de las siguientes subrutinas.

Después de convertir el valor sensado y ser guardado, se llama a la subrutina “Convertir Valor” la cual se encarga de transformar éste al valor de voltaje o corriente correcto. Para saber a cuál de los dos se debe convertir se analiza la posición del selector. A continuación se llama a la subrutina “Descomponer Valor”. Esta se encarga de separar las unidades, decenas y centenas, y ser enviadas a los puertos de salida respectivos. Se tiene que tener en cuenta que los dígitos deben ser números hexadecimales ya que se está trabajando con el controlador HD74LS48, mencionado en la sección 3.2.5. En la Figura 3.21 se muestra el diagrama de bloques de la subrutina “Conversión A/D”.

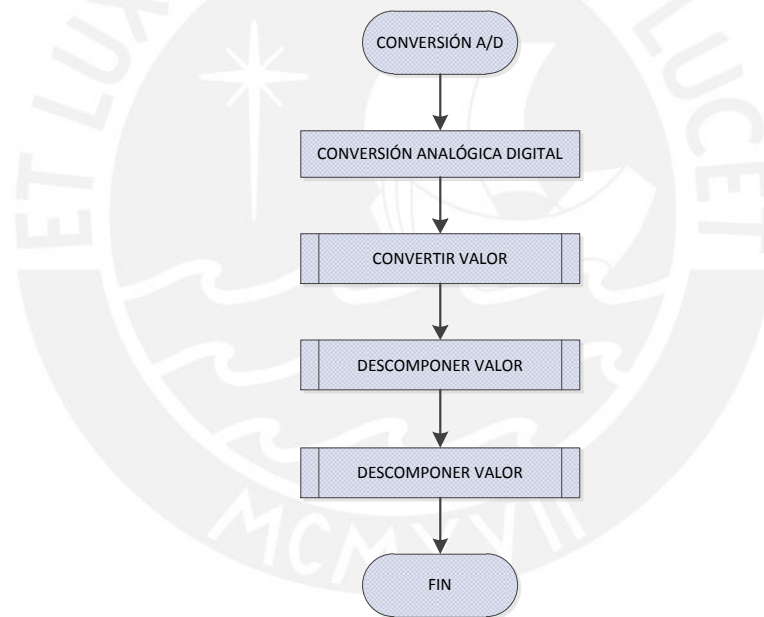


Figura 3.21. Diagrama de bloques: Subrutina Conversión A/D.

Los pulsadores configurados como interrupciones externas, activan dos bits para el aumento o disminución, los cuales controlan el “Puente H” para ajustar el giro del motor. Es importante mencionar que cada pulso emite una señal de alta (temporizada a 200ms) para obtener un aumento o disminución constante. Además se debe resaltar que por medida de seguridad se analizan los límites del valor sensado antes de efectuarse cualquier acción. A continuación se muestra el diagrama de la subrutina de interrupción en la figura 3.22.

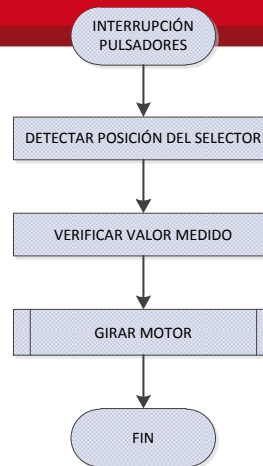


Figura 3.22. Diagrama de bloques: Subrutina Interrupción

3.2.9 Alimentación

De acuerdo a cada bloque descrito, se tiene que alimentar a cada uno de ellos por medio de la fuente de alimentación. En la tabla 3.9 a continuación se presenta el voltaje y corriente que se necesita para energizar los bloques descritos anteriormente.

Tabla 3.10 Consumo de Energía

Bloque	Voltaje Requerido	Corriente Requerida	Descripción adicional
Sensores	5 V	1.5 mA (3x0.5)	Interruptores de que se van a utilizar en el detección de la posición de selector
Acondicionador de Señal	12 V	18mA (6x3)	Alimentación de los OPAMPS
	-12 V	18mA (6x3)	Alimentación de los OPAMPS
Potencia	24 V	560 mA	Alimentación del motor
Excitador	5 V	15 mA (2x7.5)	Para activar a los optocopladores
Visualización	5 V	315 mA (3x105)	Para energizar los Displays de 7 segmentos
	5 V	90 mA (3x30)	Para alimentar los controladores de los Displays
Pulsadores	5 V	1 mA (2x0.5)	Pulsadores que van a aumentar y disminuir el voltaje
Controlador	5 V	15 mA	Corriente que consume el microcontrolador
	12 V	20 mA	Regulador que alimenta el microcontrolador

Fuente: Propia

De acuerdo a la tabla antes mencionada se puede calcular la potencia necesaria para cada voltaje requerido:

Tabla 3.11 Consumo de potencia para cada voltaje de alimentación

Voltaje de Alimentación	Corriente Requerida	Potencia Consumida
-12 V	18 mA	216 mW
+5 V	437.5 mA	2188 mW
+12 V	18 mA	216 mW
+ 24 V	560 mA	13920 mW

Fuente: Propia

Debido a los diferentes valores de voltajes que se precisan y además de no ser un requerimiento que sea portátil, una alternativa de solución adecuada es la fuente de alimentación de PC LiteOn PS-5241. Esta fuente brinda los voltajes necesarios para el funcionamiento del circuito y además posee la suficiente potencia requerida. Con respecto al precio, la fuente cuesta alrededor de S/. 35. Esta es una ventaja pues se garantiza que los voltajes requeridos sean los correspondientes y que brinde la potencia necesaria.

Por otro lado, para el caso de la alimentación del motor es obligatorio que sea alimentado por una fuente independiente. Ello se debe a que se tiene que aislar la etapa de potencia de la de control. Actualmente, el laboratorio cuenta con una fuente de voltaje de 24V y 10A la cual puede ser utilizada para alimentar el motor. A continuación se muestran sus características en la tabla 3.11.

Tabla 3.12 Características de la Fuente de Voltaje PHOENIX CONTACT

Características	Fuente de Voltaje PHOENIX CONTACT
Voltaje Entrada	110-240 VAC
Voltaje de Salida	24 VDC
Corriente de Salida	5 A

Fuente: Propia

3.2.10 Costo

En la siguiente tabla se presenta el costo de todo el sistema en conjunto detallado por cada bloque utilizado para su implementación.

Tabla 3.13 Costo de implementación de cada etapa

Etapa	Costo	Descripción adicional
Bloque Sensores	S/. 60.00	Transformador de Medida
Bloque Acondicionador de Señal	S/. 20.00	Para ambos circuitos acondicionadores
Bloque Potencia	S/. 0.00	El laboratorio contaba con el motor y el acople
Bloque Excitador	S/. 20.00	Circuito Puento H
Bloque Visualización	S/. 15.00	Visualizador de 7 segmentos y controlador
Bloque Pulsadores	S/. 0.00	Se disponía de pulsadores
Bloque Controlador	S/. 30.00	Circuito de Control
Bloque Alimentación	S/. 35.00	Fuente de Alimentación PC
Cableado y Conexiones	S/. 20.00	--
Tarjeta PCB	S/. 15.00	--
TOTAL	S/. 215.00	

Fuente: Propia

3.2.11 Diseño e implementación del sistema en conjunto

A continuación se muestra el diagrama de circuito impreso y el circuito implementado en las siguientes figuras.

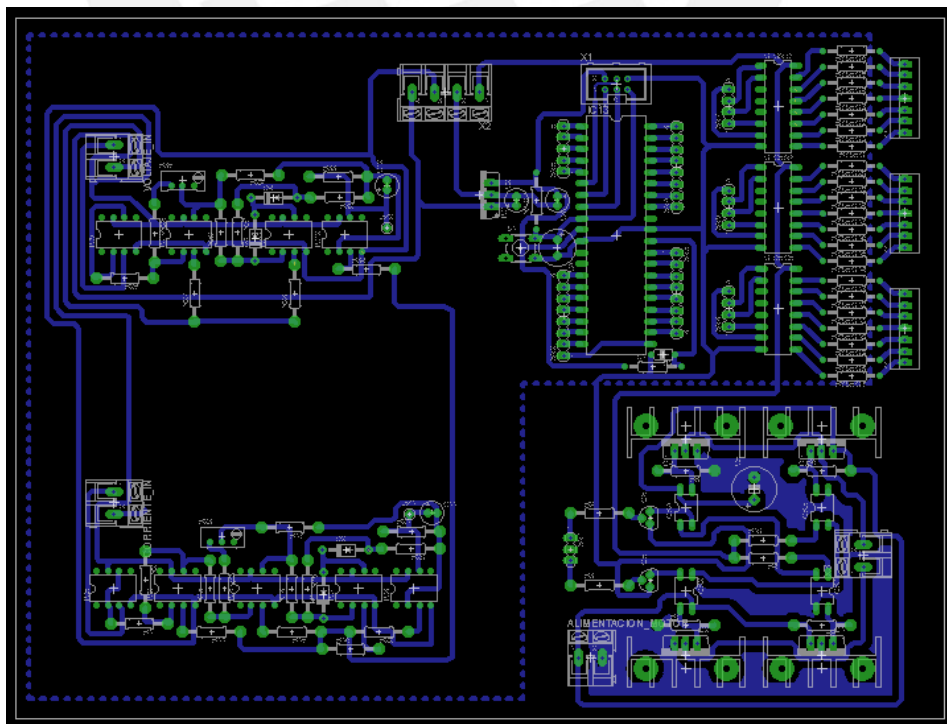


Figura 3.23. Diagrama de circuito impreso del todo el sistema

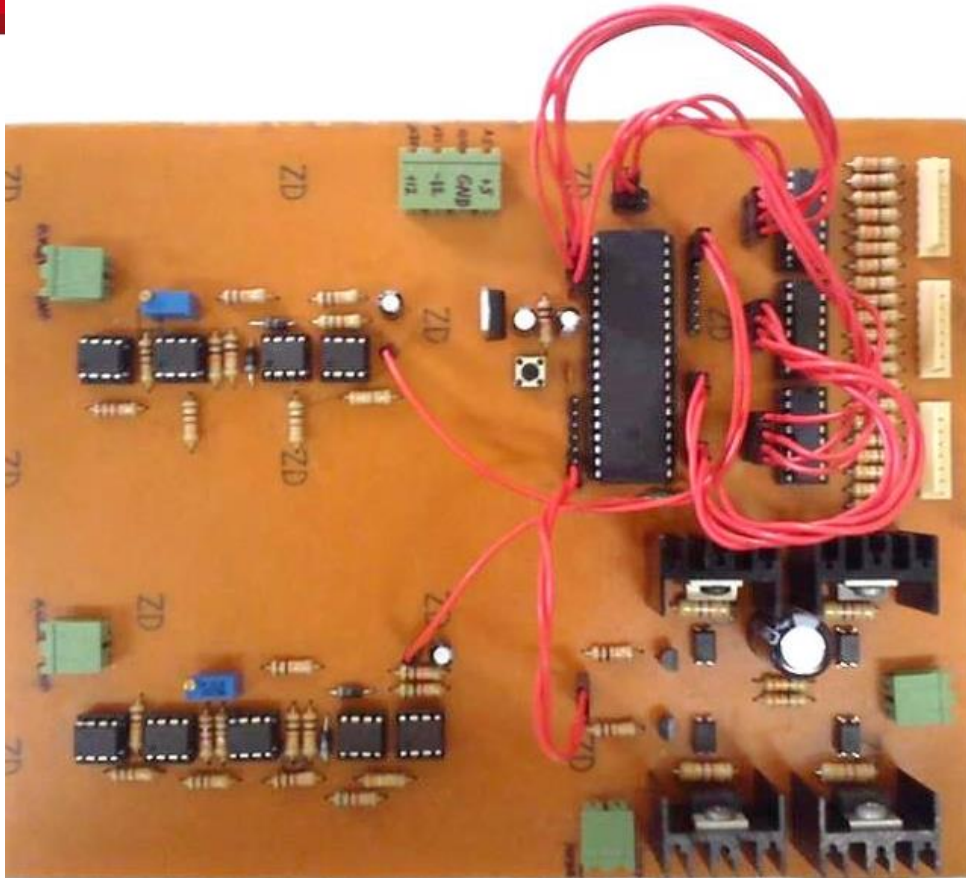
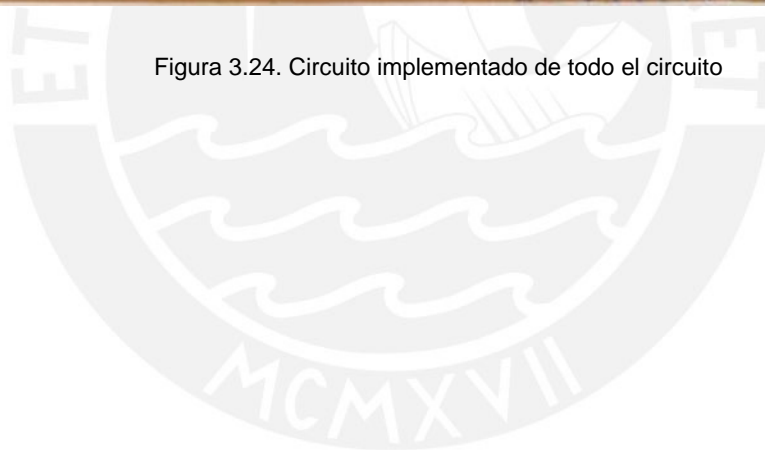


Figura 3.24. Circuito implementado de todo el circuito



CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentarán los resultados de las experiencias realizadas al sistema antes descrito. En primer lugar se mostrarán las pruebas efectuadas a cada etapa por separado. Luego se unirán todos los bloques para analizar el correcto funcionamiento del sistema en conjunto. Las pruebas que se realizaron fueron las siguientes:

- Pruebas del bloque Sensores.
- Pruebas del bloque Acondicionador de señal.
- Pruebas del bloque Potencia.
- Pruebas del bloque Excitador.
- Pruebas del bloque Control.
- Prueba de todo el sistema en conjunto.

4.1 Prueba del bloque Sensores

Con respecto a estas pruebas, se realizaron mediante el sensado de los transformadores de voltaje y de corriente. Se utilizaron los multímetros Fluke 89-IV y Fluke 179 para medir las salidas de los sensores en la prueba del sensor de voltaje. Adicionalmente, se empleó una pinza amperimétrica Fluke-30 para las experiencias con el sensor de corriente.

4.1.1 Sensor de Voltaje

Como se mencionó en la sección 3.2.2.1, el sensor de voltaje utilizado es un transformador de medición que posee una relación de transformación ideal de 200 (1000:5). A continuación se muestran los valores experimentales medidos del transformador en la Tabla 4.1 y se realiza la comparación del voltaje del secundario del transformador ideal y real en la Figura 4.1

Tabla 4.1 Pruebas realizadas al sensor de voltaje

Voltaje Primario (V)	Voltaje Secundario Ideal (V)	Voltaje Secundario Medido (V)	Porcentaje de Error (%)	Voltaje Primario (V)	Voltaje Secundario Ideal (V)	Voltaje Secundario Medido (V)	Porcentaje de Error (%)
4.4	0.022	0.019	14.22	375.0	1.875	1.910	1.87
15.0	0.075	0.064	14.89	402.0	2.010	2.043	1.64
30.4	0.152	0.147	3.29	430.0	2.150	2.188	1.77
46.4	0.232	0.231	0.43	446.0	2.230	2.272	1.88
59.9	0.300	0.299	0.17	470.0	2.350	2.390	1.70
71.3	0.357	0.358	0.42	484.0	2.420	2.460	1.65
92.2	0.461	0.464	0.65	499.0	2.495	2.540	1.80
105.9	0.530	0.533	0.66	523.0	2.615	2.660	1.72
121.2	0.606	0.611	0.83	540.0	2.700	2.747	1.74
140.0	0.700	0.705	0.71	559.0	2.795	2.840	1.61
161.5	0.808	0.814	0.80	574.0	2.870	2.920	1.74
181.1	0.906	0.913	0.83	598.0	2.990	3.040	1.67
199.3	0.997	1.004	0.75	610.0	3.050	3.100	1.64
218.9	1.095	1.103	0.78	625.0	3.125	3.180	1.76
250.0	1.250	1.260	0.80	641.0	3.205	3.260	1.72
274.9	1.375	1.386	0.84	661.0	3.305	3.360	1.66
300.2	1.501	1.514	0.87	675.0	3.375	3.430	1.63
321.0	1.605	1.620	0.93	700.0	3.500	3.560	1.71
352.0	1.760	1.792	1.82				

Fuente: Propia

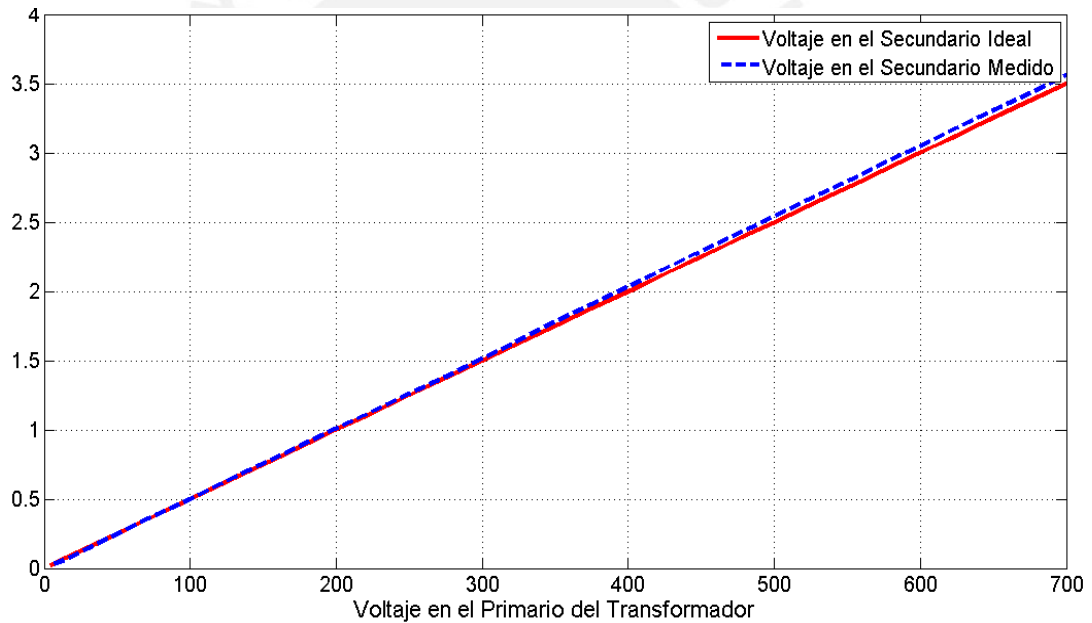


Figura 4.1. Gráfica de pruebas del sensor de voltaje

De acuerdo a las pruebas realizadas se obtuvo una relación de transformación real de 197.8. Además, como se puede observar en la gráfica 4.1, el transformador de medida presenta un porcentaje de error mayor a 10% para voltajes menores a 30 voltios. Sin embargo, para el proceso de creación de Plasma, el cual requiere de potenciales en el rango de 150V a 700V, los porcentajes errores no son relevantes para su correcto funcionamiento.

4.1.2 Sensor de Corriente

Para esta prueba se realizó la medición indirecta de la corriente del transformador mediante la sonda amperimétrica Fluke i410 conectada al multímetro Fluke 89-IV. Para cerciorarse de que el valor de corriente medido es el adecuado se incluye en la medición la pinza amperimétrica Fluke-30. En la Tabla 4.2 se presenta los valores medidos por ambos instrumentos.

Tabla 4.2 Pruebas realizadas al sensor de corriente

Sensor Corriente (1mV/1A)	Pinza Amperimétrica (Fluke 30)	Diferencia	Porcentaje de Error (%)	Sensor Corriente (1mV/1A)	Pinza Amperimétrica (Fluke 30)	Diferencia	Porcentaje de Error (%)
1.01	1.00	0.01	1.00	179.16	179.20	0.04	0.02
5.12	4.90	0.22	4.49	199.39	199.50	0.11	0.06
10.11	10.10	0.01	0.10	218.14	218.10	0.04	0.02
19.21	19.00	0.21	1.11	240.03	240.10	0.07	0.03
30.54	30.70	0.16	0.52	259.78	259.90	0.12	0.05
39.24	39.10	0.14	0.36	281.83	281.70	0.13	0.05
45.13	45.20	0.07	0.15	302.66	302.70	0.04	0.01
60.08	60.10	0.02	0.03	320.22	320.10	0.12	0.04
70.32	70.30	0.02	0.03	337.91	337.80	0.11	0.03
79.98	80.00	0.02	0.02	360.03	360.10	0.07	0.02
91.32	91.40	0.08	0.09	370.12	369.90	0.22	0.06
101.16	101.00	0.16	0.16	379.92	379.80	0.12	0.03
121.69	121.92	0.23	0.19	392.64	392.70	0.06	0.02
139.66	139.90	0.24	0.17	399.86	399.90	0.04	0.01
161.03	161.30	0.27	0.17				

Fuente: Propia

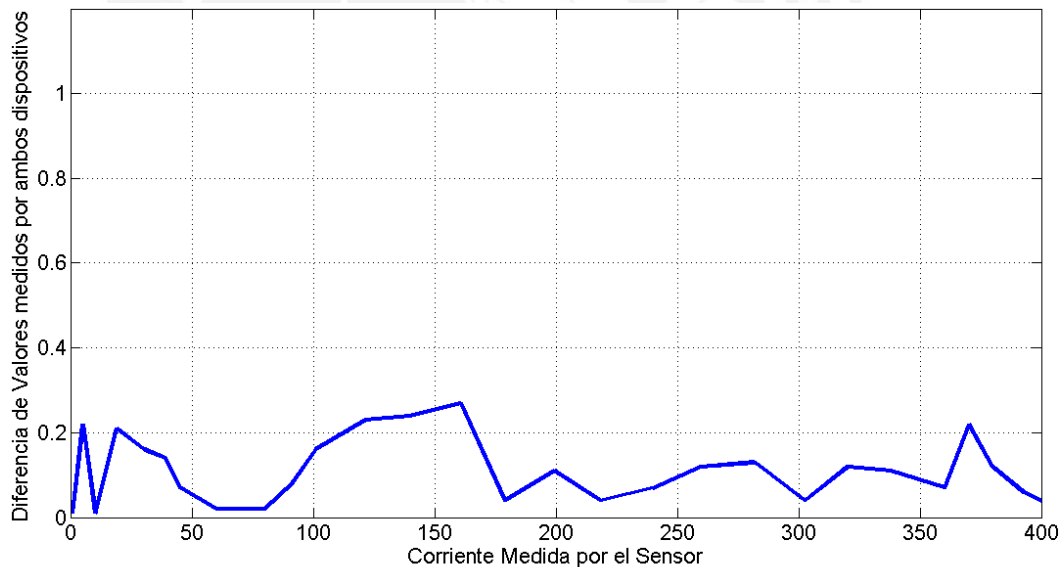


Figura 4.2. Gráfica de pruebas del sensor de corriente

Como se puede observar en la Gráfica 4.2, la diferencia que existe entre ambas mediciones tiene un valor máximo de 0.27A. Entonces se puede afirmar que el sensor de corriente muestra un valor adecuado en la medición.

4.2 Prueba del bloque: Acondicionador de Señal

De acuerdo a lo estipulado en la sección 3.3, se trata de verificar la relación entrada - salida 1 VAC - 1 VDC. Para esta prueba se utilizó el multímetro Fluke-179 con la finalidad de medir el voltaje.

Tabla 4.3 Pruebas realizadas al acondicionador de señal

Vin (V RMS)	Vout Teórico (V DC)	Vout Medido (V DC)	Porcentaje de Error (%)
0.07	0.07	0.070	0.00
0.08	0.08	0.079	1.25
0.09	0.09	0.089	1.11
0.10	0.10	0.099	1.00
0.20	0.20	0.198	1.00
0.30	0.30	0.297	1.00
0.40	0.40	0.398	0.50
0.50	0.50	0.499	0.20
0.75	0.75	0.749	0.13
1.00	1.00	1.002	0.20
1.25	1.25	1.249	0.08
1.50	1.50	1.497	0.20
1.75	1.75	1.747	0.17
2.00	2.00	1.993	0.35
2.25	2.25	2.249	0.04
2.50	2.50	2.498	0.08
2.75	2.75	2.748	0.07
3.00	3.00	2.988	0.40
3.25	3.25	3.246	0.12
3.50	3.50	3.490	0.29
3.75	3.75	3.744	0.16
4.00	4.00	3.998	0.05
4.25	4.25	4.240	0.24
4.50	4.50	4.490	0.22
4.75	4.75	4.740	0.21
5.00	5.00	4.990	0.20

Fuente: Propia

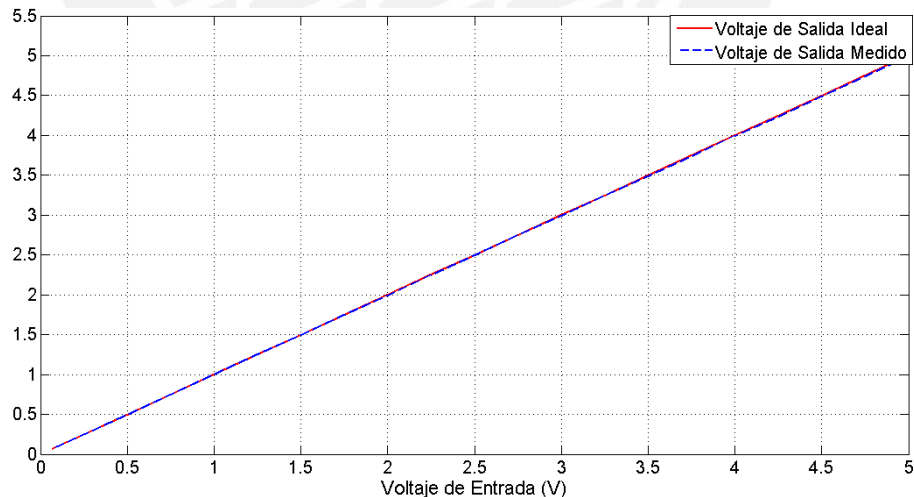


Figura 4.3. Gráfica de pruebas del acondicionador de señal

Como se puede observar en la Figura 4.3, el acondicionador de señal cumple con la función para la que fue diseñado, la cual es convertir la señal alterna de valor RMS a una continua DC con similar valor de voltaje RMS. Se tiene 1.25% como máximo porcentaje de error.

4.3 Prueba del bloque: Potencia

Con respecto al bloque potencia, se realizaron pruebas al motor mostradas en la siguiente tabla. Para esta prueba se utilizaron el multímetro Fluke 89-IV y el tacómetro modelo SHIMPO DT-205/7L.

Tabla 4.4. Pruebas realizadas al motor

MOTOR	Voltaje Entrada	Corriente
Prueba de Vacío	24 V	0.56 A
Prueba Rotor Bloqueado	24 V	2.6 A
Prueba Motor acoplado al variac	24 V	1.1 A
	RPM	
Entrada	328	
Salida	28.5	

Fuente: Propia

4.4 Prueba del bloque: Excitador

Para este bloque se realizaron pruebas de funcionamiento del “Puente H” en conjunto con el motor. Cabe resaltar que el motor se encuentra acoplado al variac. Teniendo en cuenta el circuito esquemático en la figura 3.15, se comprobó que el funcionamiento del circuito es el correcto.

Se energizó el transistor Q6 (2N3904), el cual activó los optocopladores OK1 y OK4, generando que los MOSFET’s Q1 y Q4 conmuten, respectivamente.

Tabla 4.5. Pruebas realizadas al Puente H

MOSFET	Vgs (V)	Vds (V)	Id (A)
Q1 IRF9540 (CONDUCE)	-22.28	-0.08	0.99
Q2 IRF540 (NO CONDUCE)	0	-22.29	0
Q3 IRF9540 (NO CONDUCE)	-0.01	22.53	0
Q4 IRF540 (CONDUCE)	22.28	0.03	0.99

OPTOCOPLADOR PC817 (CONDUCE)			TRANSISTOR Q6 2N3904 (CONDUCE)	
LED	V led	1.17 V	Vce sat	0.19 V
	I led	8.96 mA	Ice sat	4.84 mA
TRANSISTOR	V ce	0.189 V		
	I ce	4.84 mA		

Fuente: Propia

4.5 Prueba del bloque: Controlador

Para la simulación del programa descrito en la sección 3.2.8.2, se utilizó el software ISIS (*Intelligent Schematic Input System*). Este software permite diseñar el plano eléctrico del circuito que se desea realizar y poder ser simulado en tiempo real, mediante el módulo VSM (*Virtual System Modelling*).

En la figura 4.4 se muestra la simulación del programa. Los LED's D1 y D3 son los bits de activación del "Puente H" para el giro del motor. Los sensores y sus respectivos acondicionadores de señal están representados por potenciómetros con su respectivo voltímetro. De acuerdo a la posición en la que se encuentre el selector simulado por el SW1 se visualizará el valor de voltaje o corriente medido.

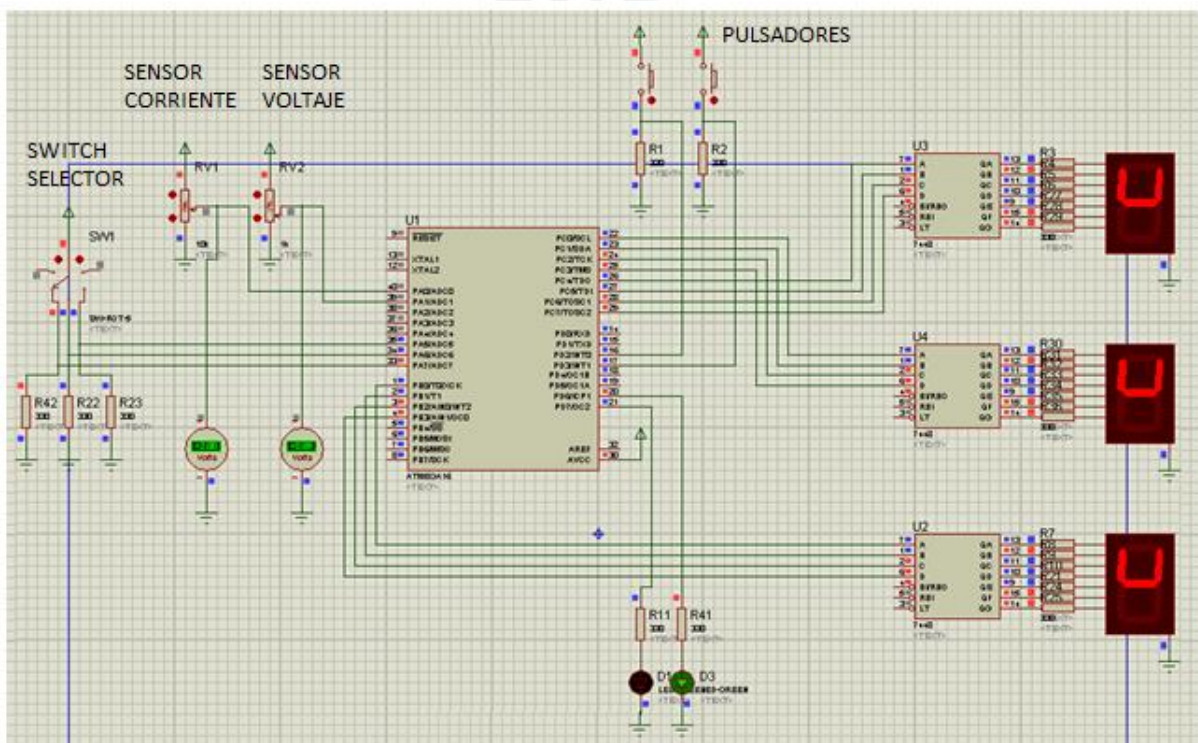


Figura 4.4. Simulación del programa del bloque de control

Una vez que el motor llegue a su valor mínimo, se mide constantemente el sensor con el que se esté trabajando y se puede aumentar y disminuir su valor mediante los pulsadores como se puede observar en simulación de la Figura 4.5.

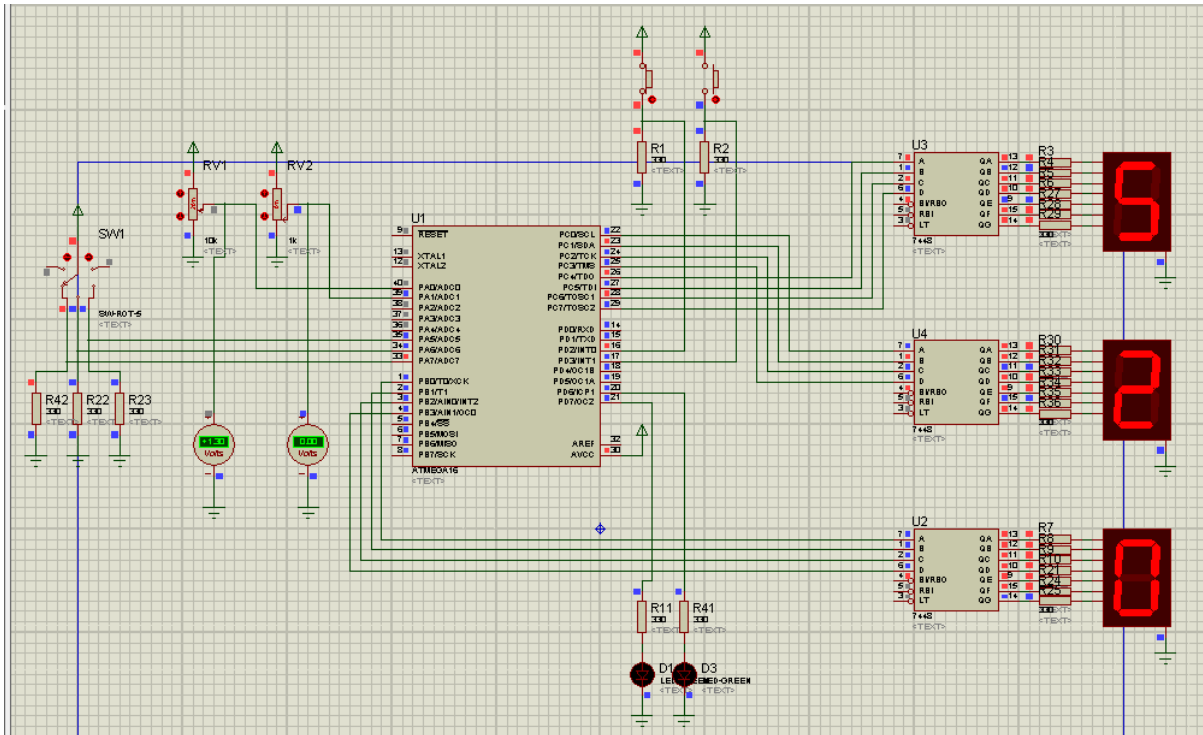


Figura 4.5. Simulación del programa del bloque de control

4.6 Prueba de todo el sistema en conjunto.

Aquí se muestra el funcionamiento de todo el sistema en conjunto con pruebas realizadas en el Laboratorio de Películas Delgadas de la sección de Física. A continuación se muestra en la Tabla 4.5 y en la Figura 4.6 las pruebas realizadas de medición de voltaje en el proceso de creación de Plasma.

Tabla 4.5. Pruebas realizadas en conjunto al proceso de creación de Plasma

Voltaje Medido en Primario del Transformador	Voltaje Visualizado en los displays de 7 segmentos	Diferencia	% Error	Voltaje Medido en Primario del Transformador	Voltaje Visualizado en los displays de 7 segmentos	Diferencia	% Error
6.2	1	5.2	83.87	381.1	381	0.1	0.03
21.6	17	4.6	21.30	407.4	408	0.6	0.15
33.2	29	4.2	12.65	436.2	437	0.8	0.18
50.1	46	4.1	8.18	450.5	452	1.5	0.33
74.2	71	3.2	4.31	470.4	472	1.6	0.34
87.5	85	2.5	2.86	499.2	501	1.8	0.36
101.7	98	3.7	3.64	520.4	522	1.6	0.31
117.2	114	3.2	2.73	543.5	545	1.5	0.28
146.3	144	2.3	1.57	566.2	568	1.8	0.32
177.5	175	2.5	1.41	589.2	592	2.8	0.48
188.6	187	1.6	0.85	626.6	629	2.4	0.38
206.7	205	1.7	0.82	645.7	648	2.3	0.36
222.9	221	1.9	0.85	674.3	677	2.7	0.40
243.2	241	2.2	0.90	690.3	693	2.7	0.39
270.6	270	0.6	0.22	710.8	713	2.2	0.31
293.8	293	0.8	0.27	727.7	730	2.3	0.32
318.5	318	0.5	0.16	742.6	745	2.4	0.32
340.7	340	0.7	0.21	750.9	753	2.1	0.28

Fuente: Propia

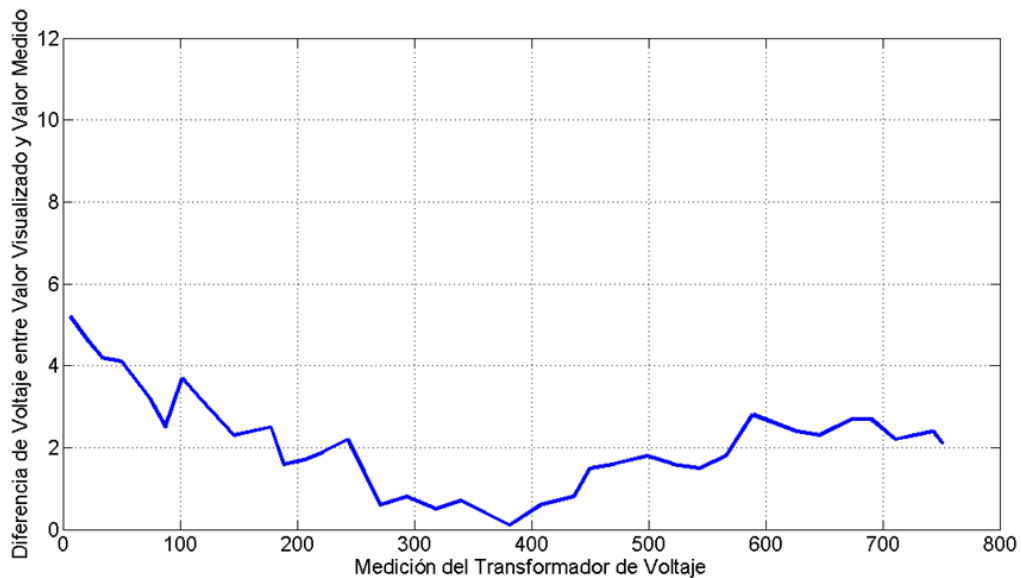


Tabla 4.6. Pruebas realizadas en conjunto al proceso de creación Plasma

Como se puede observar en la Tabla 4.5 los porcentajes de error para voltajes que se encuentran en el rango de trabajo del proceso (150 VAC a 700 VAC) no influyen en su funcionamiento. Además, se realizaron pruebas para la medición de corriente en el proceso de Evaporación, las cuales se muestran en Tabla 4.6 y la Gráfica 4.7

Tabla 4.6. Pruebas realizadas en conjunto al proceso de Evaporación

Corriente Medida (A)	Corriente Visualizada (A)	Diferencia	Rango de Error (%)	Corriente Medida (A)	Corriente Visualizada (A)	Diferencia	Rango de Error (%)
9.64	11	1.36	14.15	170.36	168	2.36	1.39
14.64	13	1.64	11.18	175.64	173	2.64	1.50
19.47	15	4.47	22.97	180.55	178	2.55	1.41
24.55	19	5.55	22.59	184.91	182	2.91	1.57
29.53	24	5.53	18.72	189.64	187	2.64	1.39
34.82	30	4.82	13.84	194.91	192	2.91	1.49
39.27	35	4.27	10.88	199.82	197	2.82	1.41
44.18	40	4.18	9.47	204.73	202	2.73	1.33
49.27	45	4.27	8.67	210.00	208	2.00	0.95
53.64	49	4.64	8.64	214.91	212	2.91	1.35
58.18	55	3.18	5.47	220.18	218	2.18	0.99
63.64	60	3.64	5.71	224.73	222	2.73	1.21
67.82	64	3.82	5.63	229.82	227	2.82	1.23
73.27	70	3.27	4.47	235.09	232	3.09	1.31
78.18	77	1.18	1.51	239.45	237	2.45	1.03
82.00	80	2.00	2.44	244.00	242	2.00	0.82
87.64	86	1.64	1.87	249.27	247	2.27	0.91
92.91	91	1.91	2.05	254.36	251	3.36	1.32
97.27	95	2.27	2.34	259.09	256	3.09	1.19
102.73	101	1.73	1.68	263.82	261	2.82	1.07
107.82	106	1.82	1.69	270.18	269	1.18	0.44
112.18	110	2.18	1.94	274.73	272	2.73	0.99
117.27	115	2.27	1.94	279.82	277	2.82	1.01
122.18	120	2.18	1.79	284.91	282	2.91	1.02
126.91	125	1.91	1.50	290.00	287	3.00	1.03
131.82	129	2.82	2.14	294.73	291	3.73	1.26
136.36	134	2.36	1.73	299.09	296	3.09	1.03
141.27	139	2.27	1.61	304.91	301	3.91	1.28
145.64	143	2.64	1.81	310.00	308	2.00	0.65
150.91	148	2.91	1.93	315.27	314	1.27	0.40
160.91	158	2.91	1.81	320.00	318	2.00	0.63
165.45	163	2.45	1.48				

Fuente: Propia

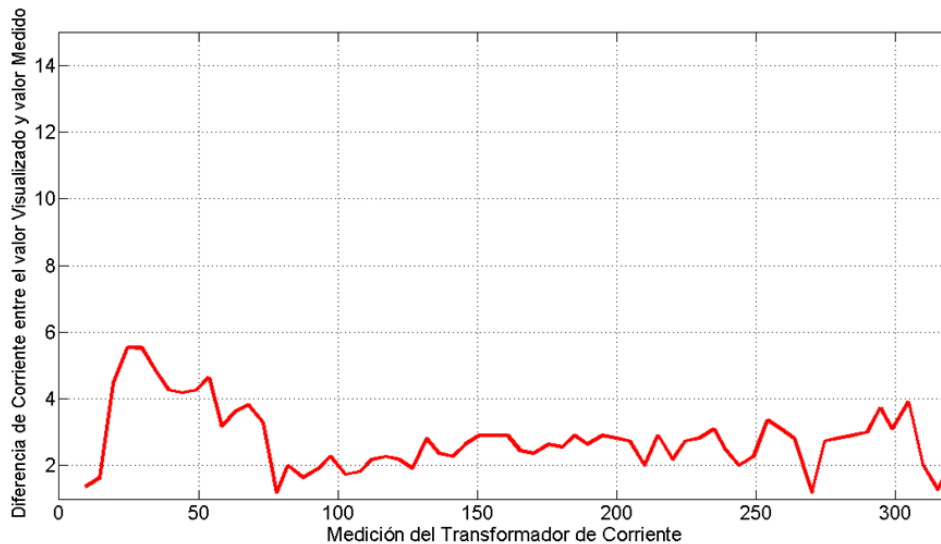


Tabla 4.7. Pruebas realizadas en conjunto al proceso de Evaporación

Como se pueden observar en los cuadros anteriores, los porcentajes de error son aceptables para el rango de trabajo en el proceso de Evaporación (70 AAC a 250 AAC).

CONCLUSIONES

A partir del diseño, desarrollo e implementación del sistema propuesto en el presente trabajo de tesis, se puede concluir:

Los sensores de voltaje y de corriente elegidos cumplen con los requerimientos propuestos. El sensor de voltaje presenta un porcentaje de error menor al 2% para voltajes mayores a 100V, rango en el cual se realiza el proceso de creación de Plasma. Por otro lado, el sensor de corriente brinda una medición correcta, esto ha sido demostrado mediante la comparación de dos instrumentos distintos, obteniendo una diferencia máxima de 0.26 A para una medición de corrientes mayores a 150A.

Asimismo, se logró diseñar adecuadamente el circuito acondicionador de señal, el cual presenta una relación entrada-salida de 1V AC-1V AC, con un porcentaje de error máximo de 1.25%.

El funcionamiento del circuito excitador que gobierna el control del motor es el adecuado. El diseño del “Puente H” discreto cumple con el requerimiento de soportar corrientes mayores a 10 A, siendo ésta la corriente pico del motor.

Por otro lado, el desarrollo, simulación e implementación de la etapa de control funciona correctamente en conjunto con los demás bloques. Cabe resaltar que cada vez que se presente un cambio en el switch selector, el sistema se reinicia llevando a su mínimo valor al variac.

Finalmente, en los resultados obtenidos de las pruebas de funcionamiento realizadas al sistema en conjunto, se verificó que los niveles de voltaje medidos en el proceso de creación de Plasma son los correctos para el rango de trabajo requerido. Para valores de voltaje mayores a 150 VAC, el porcentaje de error es menor al 2%. De la misma manera, los valores de corriente medidos para el proceso de Evaporación poseen un porcentaje de error menor al 3% para su respectivo rango de trabajo, el cual comienza desde los 70 AAC hasta los 400 AAC. Por lo tanto, el control del aumento y disminución de la corriente y voltaje para los rangos de trabajo requeridos en los procesos podrán ser realizados desde el tablero de control mediante los pulsadores, ya que se poseen una correcta medición.

RECOMENDACIONES

Para los posteriores trabajos relacionados con el presente tema, se recomiendan:

En relación al bloque Acondicionador de señal, es posible utilizar un OPAMP de instrumentación para obtener una mejor atenuación del ruido en la amplificación de los rangos de voltaje bajos que brinda el sensor de corriente (valores menores a 70 mV).

Respecto al bloque Excitador, es posible utilizar un “Puente H” integrado pues el consumo de corriente del motor acoplado al variac no sobrepasa los 3 A. Este valor se obtuvo mediante pruebas experimentales. Cabe notar que el diseño del “Puente H” discreto se realizó en base a la corriente pico que proporcionaba la hoja de datos del motor.

Resaltar que el trabajo de tesis realizado es un sistema modular; es decir, puede ser adaptado sin ningún problema en posteriores trabajos en el Laboratorio de Películas Delgadas en la Sección de Física. En efecto, es posible utilizar este trabajo de tesis como el comienzo de la automatización completa del proceso de elaboración de Películas Delgadas.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] HOLLAND, L.
1956 “Vacuum deposition of thin films / with a foreword by S. Tolansky”, New York: Wiley.
- [2] ESTRADA, Walter
1996 “Tecnología de películas delgadas: aplicaciones ópticas y eléctricas [videograbación]”, Lima: Juan Quiñe Vigil.
- [3] “Ocean Thin Films Opens Web Storefront for Custom Size Optical Filters” (en línea).
Consulta: Setiembre 2013. URL: <http://halmapr.com/news/pixelteq/2012/05/16/ocean-thin-films-opens-web-storefront-for-custom-size-optical-filters/>.
- [4] SMITH, Donald L.
1995 “Thin-film deposition: principles and practice”, New York: McGraw-Hill.
- [5] ROTH, Alexander.
1982 “Vacuum technology”, Amsterdam: Norh-Holland.
- [6] GÁLVEZ DE LA PUENTE, Gonzalo.
2003 “Estudio de la uniformidad de películas delgadas en grandes superficies”, Lima.
- [7] GÁLVEZ DEL VILLAR
2008 José Armando. “Diseño, fabricación e instalación de un equipo en alto vacío para preparar muestras de películas delgadas de semiconductores”, Lima.
- [8] GUTHRIE, Andrew
1963 “Vacuum technology”, New York: Wiley.
- [9] GÁLVEZ DE LA PUENTE, Gonzalo, Cortina, MENDOZA y CARRERA Soria W.
“Diseño de un sistema de control de la generación de alto vacío en el proceso de manufactura de películas delgadas para la industria opto electrónica”. Trabajo presentado en XV Congreso Latinoamericano de Control Automático. Octubre 2012.
- [10] CAMPBELL, Stephen A
2008 “Fabrication engineering at the micro and nanoscale”, New York, 3° Edición, pp. 323,324.
- [11] Diseño, manufactura y evaluación de recubrimientos ópticos en el Laboratorio de Películas Delgadas. Documento de trabajo. Sección Física – PUCP.

- [12] SZYMANSKI, Scott
2007 “Argon Plasma Cleaning of Fluorine, Organic and Oxide Contamination Using an Advanced Plasma Treatment System”, California.
- [13] COUGHLIN, Robert
1999 “Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales”, Pearson, 2° Edición.
- [14] “Imagen Tornillo sin Fin - Corona” (en línea) Consulta: Setiembre 2013. URL: http://3.bp.blogspot.com/_L9x7rDIS6I4/TAzfgZ2DcdI/AAAAAAAAABk/WGYaoq1ytz8/s1600/Worm-Gear.jpg.
- [15] ELECTRÓNICA DE POTENCIA
2013 “Algunas aplicaciones de Control de Potencia” [diapositiva]. Lima. PUCP.
- [16] NAKAMURA LAM, Jaime Ricardo. CHÁVEZ TAPIA, Miguel Antonio. OLIVERA SUSANÍBAR, César
2009 “Diseño e implementación de un brazo robot de dos grados de libertad para el trazado de diagramas en un plano”/ Tesis de licenciatura en Ciencia e Ingeniería con mención en Ingeniería Electrónica. Lima: PUCP. Facultad de Ciencias e Ingeniería.