



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons  
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ELECTROIMÁN Y ACTUADOR ELECTRÓNICO APLICADO A UN SISTEMA DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA

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

**Pedro Martín Zapata Sánchez**

**ASESOR: Luis Vilcahuamán Cajacuri**

Lima, marzo del 2010

## *Agradecimientos*

*Son tantas las personas a las que debo parte este triunfo, de lograr alcanzar mi culminación académica, la cual es el anhelo de todos los que así lo deseamos.*

*En primer lugar a Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar. A mis padres Pedro Zapata Barrientos y Blanca Sánchez Urdaniga, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Madre, serás siempre mi inspiración para alcanzar mis metas, por enseñarme que todo se aprende y que todo esfuerzo es al final recompensa. A mis hermanas y mis sobrinitos por darme la estabilidad emocional para poder llegar a este logro, que definitivamente no hubiese podido ser sin ustedes. A Evelyn Fernández por ser mi compañera inseparable de cada jornada, dándome fuerzas en los momentos de decline y cansancio.*

*Un agradecimiento especial al Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufacturas (CETAM). Al director del CETAM Benjamín Barriga, por confiar y darme la oportunidad de hacer realidad este trabajo. A Karol Muñoz, Omar Oshiro, Daniel Domínguez por su gran apoyo en la construcción del módulo y brindarme toda la información relevante. Al profesor Julio Tafur y Luis Vilcahuamán por todos los conocimientos y enseñanzas que me compartieron, los cuales fueron de gran ayuda para la culminación de esta tesis.*

*Un agradecimiento a mi compañero de tesis Toni Trigoso que compartió esta jornada conmigo, en los que juntos logramos esta meta. A mi amigo Ricardo Sánchez, quien con su ayuda desinteresada, nos brindó información para la investigación.*

*Y a todos aquellos, que han quedado en los recintos más escondidos de mi memoria, pero que fueron partícipes de mi triunfo*

**GRACIAS**

## Resumen

En esta tesis se presenta el diseño e implementación de un electroimán y un actuador electrónico por PWM para un módulo experimental de levitación magnética, para realizar pruebas en el área de control y automatización. Este módulo comprende 3 etapas: etapa de sensado, etapa de control y la etapa de potencia. En la construcción de la etapa de potencia destacan el electroimán, el cual es implementado por un núcleo cilíndrico de hierro enrollado con un cable de cobre y cubierto con un material aislante para su protección, además de un actuador electrónico por PWM implementado por un circuito generador de onda triangular y un circuito amplificador de la señal de control que son acoplados hacia el uso de un amplificador operacional en configuración de comparador para la generación de la señal PWM. Esta señal es utilizada para la activación y desactivación de un transistor de potencia. Con el cual es posible reducir el calentamiento que presenta la bobina y el transistor de potencia.

Múltiples pruebas de laboratorio se realizaron con el electroimán y el actuador electrónico así como también de todo el sistema. Se logró obtener resultados muy similares a los hallados en la teoría. Tanto en el electroimán como en el actuador electrónico se tuvo una respuesta bastante lineal frente a los cambios de posición de la esfera, este dato fue importante para el diseño del sistema en la etapa de control. Finalmente se logró que la etapa de potencia cumpla con la función de acondicionar la señal generada por el controlador del sistema para que interactue adecuadamente con el electroimán.

Este módulo se desarrolló en la sala de manufactura del Centro de Tecnología Avanzada de Manufactura (CETAM) del departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Este prototipo sirve como instrumento útil para realizar prácticas experimentales en el campo de control de sistemas, que puede ser tomado con fines educativos y a su vez pueda ser desarrollado para su aplicación a otros sistemas. Es por ello que el estudio de estos sistemas de levitación magnética presenta un futuro prometedor.

# Índice general

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. IMPACTO DE LOS SISTEMAS DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA</b>	<b>2</b>
1.1. Sistemas de levitación magnética en la tecnología . . . . .	2
1.2. Sistemas de levitación magnética en el Perú . . . . .	3
1.3. HIPÓTESIS . . . . .	5
1.3.1. Hipótesis principal . . . . .	5
1.3.2. Hipótesis secundarias . . . . .	5
1.4. OBJETIVOS . . . . .	6
1.4.1. Objetivo general . . . . .	6
1.4.2. Objetivos específicos . . . . .	6
<b>2. SISTEMAS DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA</b>	<b>7</b>
2.1. Estado de Arte . . . . .	7
2.1.1. El electromagnetismo y su influencia en el mundo moderno . . . . .	7
2.1.2. Aplicación de la técnica de la modulación por ancho de pulsos PWM . . . . .	8
2.2. Descripción del sistema de levitación magnética de una esfera metálica . . . . .	8
2.3. Principios electromagnéticos . . . . .	11
2.4. Marco conceptual del actuador electrónico por PWM . . . . .	15
2.4.1. Principios de funcionamiento del actuador electrónico . . . . .	15

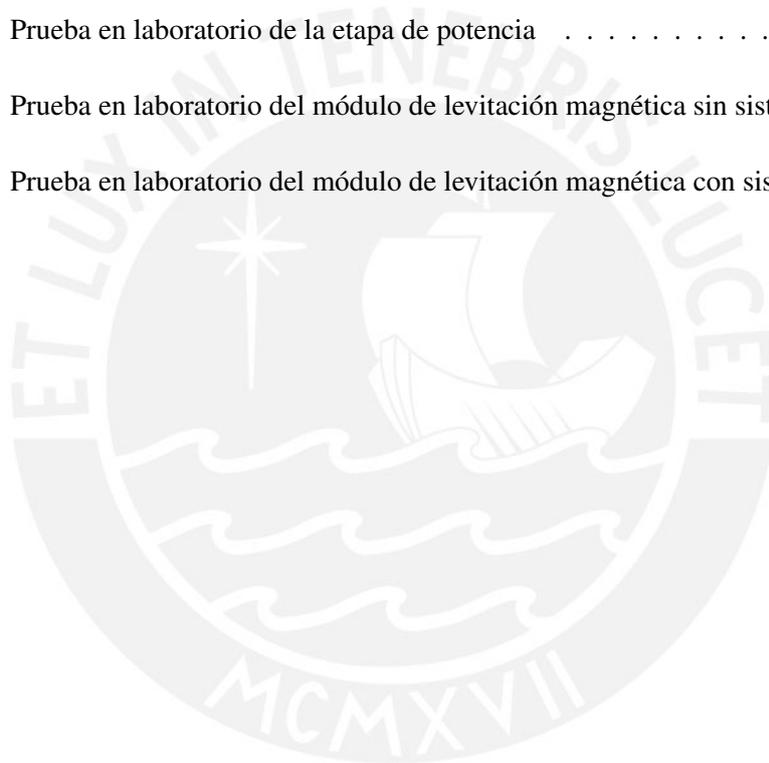
2.4.2.	Control por Modulación de Ancho de Pulso (PWM) . . . . .	16
2.4.2.1.	Frecuencia de operación . . . . .	18
2.4.3.	Circuito de Potencia . . . . .	19
2.4.3.1.	Conmutadores controlables . . . . .	19
2.4.3.2.	Cálculo del disipador térmico o aletas refrigeradoras . . . . .	20
2.5.	Estándares y consideraciones generales . . . . .	21
<b>3.</b>	<b>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ELECTROIMÁN Y UN ACTUADOR ELECTRÓNICO POR PWM</b>	<b>23</b>
3.1.	Diseño del electroimán para un sistema de levitación magnética de una esfera .	24
3.2.	Implementación del electroimán para un sistema de levitación magnética de una esfera . . . . .	26
3.3.	Diseño del actuador electrónico por PWM . . . . .	31
3.3.1.	Simulación del actuador electrónico por software . . . . .	37
3.4.	Implementación del actuador electrónico por PWM . . . . .	40
<b>4.</b>	<b>PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>44</b>
4.1.	Estructura mecánica . . . . .	45
4.2.	Etapa de potencia . . . . .	47
4.2.1.	Cálculos experimentales de la expresión de fuerza electromagnética en el electroimán . . . . .	47
4.2.2.	Respuesta del actuador electrónico con una carga de prueba . . . . .	50
4.2.3.	Respuesta de la etapa de potencia . . . . .	53
4.3.	Prueba experimental del módulo de levitación magnética . . . . .	55
4.4.	Costo de la implementación de la etapa de potencia . . . . .	56
	<b>Conclusiones</b>	<b>61</b>
	<b>Recomendaciones</b>	<b>63</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>64</b>

# Índice de figuras

2.1. Punto de equilibrio entre la fuerza de atracción magnética y la fuerza gravitacional . . . . .	9
2.2. Diagrama de bloques del sistema de levitación magnética de una esfera . . . . .	9
2.3. Diagrama del sistema de levitación magnética de una esfera . . . . .	10
2.4. Imantación de una barra de ferrita [1] . . . . .	11
2.5. Curva de magnetización y permeabilidad relativa del hierro [2] . . . . .	14
2.6. Curva de histéresis de un material ferromagnético [1] . . . . .	15
2.7. Diagrama de bloques del actuador electrónico . . . . .	15
2.8. Generador de PWM con 3 estados diferentes [2] . . . . .	16
2.9. Generador de onda triangular [3] . . . . .	17
2.10. Formas de onda del circuito generador de onda triangular [3] . . . . .	18
2.11. Comparación entre conmutadores controlables [4] . . . . .	20
2.12. Montaje del radiador [5] . . . . .	21
2.13. Resistencias térmicas cápsula-aleta para diferentes tipos de aislante [5] . . . . .	21
3.1. Esquema del actuador electrónico y el electroimán . . . . .	23
3.2. Circuito magnético . . . . .	24
3.3. Material aislante en el proceso de fabricación del electroimán . . . . .	30
3.4. Inicio del devanado en el proceso de fabricación del electroimán . . . . .	30
3.5. Primera capa de devanado . . . . .	30
3.6. Acabado final del proceso de fabricación del electroimán . . . . .	31

3.7. Diagrama de bloques del actuador electrónico por PWM . . . . .	31
3.8. Circuito actuador y el electroimán . . . . .	32
3.9. Curva de Potencia vs Temperatura Carcaza [6] . . . . .	34
3.10. Resistencia térmica en función de la longitud y perfil transversal del disipador [6] . . . . .	35
3.11. Diseño del generador de onda triangular . . . . .	36
3.12. Diseño del convertidor de corriente a voltaje . . . . .	37
3.13. Diseño del generador de la señal PWM . . . . .	37
3.14. Simulación del actuador electrónico en Electronic Worlbench . . . . .	38
3.15. Comparación de la señal triangular y el voltaje de control en simulación por E.Workbench . . . . .	39
3.16. Señal modulada por ancho de pulso en la simulación por E.Workbench . . . . .	40
3.17. Esquema del actuador electrónico por PWM . . . . .	41
3.18. Disposición física de las etapas en la tarjeta impresa . . . . .	42
3.19. Diseño de la tarjeta impresa . . . . .	42
3.20. Tarjeta impresa del actuador electrónico por PWM . . . . .	43
4.1. Módulo de levitación magnética de una esfera metálica . . . . .	44
4.2. Estructura mecánica . . . . .	45
4.3. Ubicación de la estructura mecánica para el sensor y la fuente emisora de luz (LEDS) . . . . .	46
4.4. Diagrama del dispositivo mecánico adicional . . . . .	46
4.5. Circuito para la medición de inductancia . . . . .	48
4.6. Desfasamiento de $45^\circ$ entre ambos canales . . . . .	48
4.7. Gráfica entre-hierro Vs I de sustentación . . . . .	49
4.8. Onda triangular ( $F_s = 2,466\text{KHz}$ ) . . . . .	50
4.9. Onda triangular y la señal de la PWM con un ciclo de trabajo del 49% . . . . .	51

4.10. Prueba en laboratorio del actuador electrónico por PWM con los diodos emisores de luz (LEDS) . . . . .	51
4.11. Configuración de la salida analógica del DAQ USB-6008 mediante el entorno del Measurement & Automation Explorer . . . . .	52
4.12. Señal triangular y la señal PWM para una modulación aproximada del 0% . . . . .	52
4.13. Señal triangular y la señal PWM para una modulación aproximada del 100% . . . . .	53
4.14. Prueba en laboratorio del proceso de calibración del actuador electrónico . . . . .	53
4.15. Curva de la señal de control versus corriente en el electroimán . . . . .	54
4.16. Prueba en laboratorio de la etapa de potencia . . . . .	54
4.17. Prueba en laboratorio del módulo de levitación magnética sin sistema de control . . . . .	55
4.18. Prueba en laboratorio del módulo de levitación magnética con sistema de control . . . . .	56



# Índice de tablas

3.1. Tabla para la selección del número de cable AWG [7] . . . . .	28
3.2. Densidad máxima de la corriente en función de la potencia en la bobina [7] . . . . .	28
3.3. Características de MOSFET IRFZ44 . . . . .	32
3.4. Lista de componentes para la implementación del actuador electrónico . . . . .	41
4.1. Parámetros del sistema físico del módulo de levitación magnética de una esfera metálica . . . . .	49
4.2. Costo de los materiales del electroimán . . . . .	57
4.3. Costo de la implementación del actuador electrónico por PWM . . . . .	58
4.4. Costo total del diseño electrónico de la etapa de potencia . . . . .	59
4.5. Costos por honorario . . . . .	59
4.6. Costos de instrumentos . . . . .	59
4.7. Costo de programas . . . . .	60
4.8. Costo total del trabajo de tesis . . . . .	60

# Introducción

El hecho de saber que un objeto levitado magnéticamente no presenta problemas de fricción ha hecho a un número de científicos, de diferentes países, interesarse por estos sistemas y aplicarlos sobre todo en el área de los sistemas de transporte. La aplicación más significativa se tiene en los trenes de levitación magnética, cuya tecnología trae ventajas sobre los sistemas tradicionales, como no emitir gases contaminantes, no provocar los desgastes mecánicos y ser silenciosa. Esta tecnología aún se sigue desarrollando y aplicando en distintos campos logrando importantes beneficios sobre otras tecnologías.

El Perú aún no se encuentra enmarcado dentro de un nivel tecnológico de competencia internacional. Por ende es importante la implementación de bases tecnológicas de alta calidad que sirvan para el posterior desarrollo de sistemas cada vez más complejos. Por ello la implementación de un módulo de levitación magnética sirve como plataforma para las experimentaciones e investigaciones en el área de control y la automatización. De esta manera se fomenta al desarrollo de esta tecnología.

Por lo anterior, el Centro de Tecnología Avanzada de Manufactura (CETAM) apuesta con contribuir al desarrollo tecnológico del país mediante la puesta en marcha de proyectos de investigación. Este trabajo de investigación se encuentra dentro de la línea de investigación del CETAM, cuyo aporte es importante para que sea base de desarrollo de más proyectos.

La aportación fundamental de esta tesis consiste en el análisis, diseño e implementación de un electroimán y su respectivo manejador, mejor conocido como actuador electrónico; los cuales forman parte de un módulo de posicionamiento automático de una esfera metálica, en la posición estable de levitación, sin el operador humano. Este sistema comprende 3 etapas: etapa de sensado, etapa de control y la etapa de potencia con el actuador del sistema, en este caso el electroimán. Cada etapa representa a una tesis que ha sido desarrollada de manera independiente cumpliendo con sus objetivos. Cuyos objetivos finalmente se enfocan hacia la implementación del módulo de levitación magnética.

Como parte de la metodología de estudio de esta tesis fue el estudio de los trabajos de investigación afines a ella, con lo cual se logró obtener información relevante para el funcionamiento de este sistema. Finalmente se deja un prototipo en la sala de manufactura del CETAM para futuras investigaciones.

## Capítulo 1

# IMPACTO DE LOS SISTEMAS DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA

### 1.1. Sistemas de levitación magnética en la tecnología

El avance tecnológico de los sistemas de levitación magnética hoy en día ha logrado un impacto internacional siendo de múltiples aplicaciones como en la industria, el comercio, el transporte, la medicina y el entretenimiento. La sociedad actual se encuentra ante una tecnología revolucionaria e innovadora cuyos beneficios primordiales son el ahorro de energía y el cuidado del medio ambiente, siendo su desarrollo más significativo la implementación de trenes de levitación magnética en los medios de transporte. Este sistema ya es una realidad en países como Alemania y Japón quienes han realizado significativos proyectos e investigaciones al respecto, cada uno de ellos desarrolló sus investigaciones y tecnologías de forma bastante independiente. Pero a pesar de contar con múltiples ventajas sobre otros sistemas de transporte masivos no se ha extendido en el mundo porque requiere de un costo muy elevado para su construcción, desarrollo e implementación. Por esta razón se sigue usando los sistemas tradicionales. En la actualidad la aportación de la levitación magnética ha llegado a varios campos de la tecnología, como contar con sistemas de almacenamiento y generación de energía más efectivos girando una rueda superconductor inmersa dentro de un campo magnético, llamados la rueda volante, permitiendo almacenar energía mecánica [8]. Así vemos también las tendencias informáticas para el futuro aplicando los principios de la levitación magnética. Científicos de la Universidad de Carnegie Mellon en los Estados Unidos crearon un dispositivo llamado Maglev Haptic Control [9], el cual permite a los usuarios sentir la textura de los objetos en pantalla gracias a la aplicación de la levitación magnética. Este dispositivo da a los usuarios una experiencia lo más real posible; percibiendo texturas, sintiendo contactos duros o notar pequeños cambios de posición; además responde rápidamente a sus movimientos.

Se presenta también los teléfonos móviles del futuro. Una compañía de celulares Pantech en Corea apuesta por el uso de esta tecnología sustituyendo los resortes mecánicos que impulsan

con la bandeja del teclado por un sistema basado en la levitación magnética. Logrando que este dispositivo sea mucho más delgado, fiable y sin delicados mecanismos [10]. En el 2008 se informó la aplicación de la tecnología de la levitación magnética en la medicina. Un grupo de científicos desarrollan corazones artificiales en una tecnología muy similar al sistema de levitación magnética. El nombre de este dispositivo es Centrimag de Levitronix y consiste en un dispositivo de asistencia ventricular mecánica que mejora otros ya existentes. Los pacientes pueden estar despiertos y con movimiento, mientras que el aparato permite una circulación de sangre de 9.9 litros por minuto en condiciones fisiológicas normales. La tecnología de levitación permite que el sistema trabaje de manera estable ya que no posee rodamientos, por lo que se reduce los riesgos de formación de coágulos sanguíneos [11]. De la misma manera la empresa Toshiba en Japón viene investigando el desarrollo de esta tecnología para ser aplicada en los ascensores. Toshiba ya anunció que equipará a Tokio con estos medios de transporte cuya función será mantener a los ascensores en el vacío sin tener contacto con ningún tipo de cable o riel. En un futuro tal vez Tokio se convierta en una ciudad vista antes en películas de ciencia ficción con trenes, ascensores, juguetes y autos levitadores encontrando una revolución de la ciencia y la tecnología.

Como vemos muchos países están invirtiendo en la investigación y desarrollo de esta tecnología ya que dadas las características actuales de la economía internacional, es necesario insertarse en ella con productos y servicios competitivos, obtenidos cada vez más por la acción del progreso técnico. Con ello beneficiar a un país, proyectando a una sociedad moderna y de competencia internacional con un alto nivel de productividad, generando más ingresos y puestos de trabajo.

## 1.2. Sistemas de levitación magnética en el Perú

La gran mayoría de los países del llamado Tercer Mundo no transitaron un camino similar al de Europa, Estados Unidos y Japón. Éste fue el último en llegar, por ello mismo, ejemplo señero y notable en la adopción de la ciencia y tecnología como base del desarrollo y creador de esperanzas en el mundo de entonces. El impacto de las tecnologías modernas en los sistemas de valores culturales de muchos de los países del Tercer Mundo ha sido y es objeto de reflexión, preocupación y fuerte polémica. Como profundizaba uno de los estudiosos de esta problemática para el continente africano en lo siguiente: La era tecnológica ha creado en el mundo determinadas condiciones a las que ningún pueblo puede sustraerse [12]. El Perú se encuentra dentro de estos países en subdesarrollo cuyo nivel tecnológico no es competitivo y depende de investigaciones o creaciones tecnológicas de los países en desarrollo. Aportar a la investigación y experimentación de nuevas tecnologías puede fomentar al avance tecnológico del país. Pero existen causas de nuestro pobre nivel tecnológico que se ven marcados en muchos aspectos, tales como: la carencia de políticas de incentivos para fomentar a la investigación, deficiente formación de recursos humanos para la investigación y desarrollo, débil capacidad de gestión de financiamiento y de cooperación, economía de subsistencia en universidades e instituciones, equipamiento para la investigación y desarrollo obsoleto o inexistente. El aporte a

las investigaciones de los sistemas de levitación magnética es de gran importancia ya que actualmente se está llegando a un gran avance y desarrollo a nivel internacional. En el Perú aún no ha alcanzado un desarrollo de esta tecnología por ello la contribución a esta investigación puede ser sustento para las aspiraciones de grupos de investigación y empresas interesadas en el desarrollo tecnológico del país. El propósito de elaborar el presente trabajo consiste en aplicar el principio de las nuevas metodologías relacionadas con la levitación magnética de los países desarrollados. Para así solucionar diversos problemas y sirva como plataforma para el entendimiento de nuevos conocimientos científicos y tecnológicos. De la misma manera se contribuye a que ingenieros y científicos continúen con la misma línea de investigación para que pueda llegar a todos los ámbitos posibles y sea de beneficio para la sociedad.



## 1.3. HIPÓTESIS

### 1.3.1. Hipótesis principal

La implementación de un sistema de levitación magnética sirve de base para futuras investigaciones permitiendo la ampliación de esta tecnología en distintos sistemas, así como también impulsa al desarrollo y avance tecnológico del país.

### 1.3.2. Hipótesis secundarias

- El hecho de fabricar un electroimán y un actuador electrónico para un sistema de levitación magnética permite ser aplicado e integrado a distintos procesos para lograr resolver determinadas tareas con una mayor eficiencia, mejor consumo de energía, mayor capacidad de carga, bajo costo de construcción y mayor facilidad de control. Esto se concluye según lo estudiado en los trabajos de investigación afines a esta tesis.
- El funcionamiento óptimo de un electroimán en un sistema de levitación magnética constituye una etapa importante para buscar una respuesta precisa y eficaz del sistema.
- Para la implementación del actuador electrónico se requiere de dispositivos de potencia con excelentes características de operación entre las cuales tenga un buen manejo de corriente.
- El acondicionamiento de la señal para el control del electroimán mediante la modulación por ancho de pulso permite una mayor estabilidad del sistema.

## 1.4. OBJETIVOS

### 1.4.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un electroimán y un actuador electrónico por PWM para un módulo de control de levitación magnética de una esfera metálica.

### 1.4.2. Objetivos específicos

- Diseño del electroimán.
- Implementación del electroimán y comprobar su funcionamiento con la esfera metálica previamente seleccionada.
- Diseño del actuador electrónico por PWM y comprobar su funcionamiento a través de programas de simulación.
- Implementación del actuador electrónico por PWM con los dispositivos electrónicos previamente seleccionados y comprobar su funcionamiento mediante tomas de mediciones.
- Enlazar el actuador electrónico por PWM con el electroimán y comprobar su funcionamiento en conjunto realizando un análisis y toma de mediciones de todo el sistema.
- Enlazar el actuador electrónico con el electroimán y la esfera con las demás etapas del sistema y verificar el funcionamiento en conjunto.

## Capítulo 2

# SISTEMAS DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA

### 2.1. Estado de Arte

#### 2.1.1. El electromagnetismo y su influencia en el mundo moderno

En esta parte del capítulo se presenta la aportación de la física de electromagnetismo en el mundo moderno. La aplicación de los principios del electromagnetismo en diversas áreas de la ciencia ha logrado una revolución en el campo de la tecnología, permitiendo que el ser humano lo utilice en su beneficio. Desde el descubrimiento del electromagnetismo por parte del físico danés Hans Christian Oersted en el siglo XIX, se estimuló a la investigación científica de los fenómenos eléctricos y magnéticos [13]. Aportaciones importantes por parte de físicos como Ampère, Faraday fueron unificados por James Clerk Maxwell en 1861 quien con sus famosas cuatro ecuaciones sistematizó todos los hallazgos que se habían producido en el campo de la Electricidad y del Magnetismo hasta aquel momento [14]. En el trabajo teórico de Maxwell se demostraba la existencia de un campo electromagnético, permitiendo explicar la naturaleza ondulatoria de la luz. Con el legado dejado por Maxwell, el físico Alemán Heinrich Hertz en 1887, logró determinar la longitud y la velocidad de la onda electromagnética reforzando el valor teórico de Maxwell. Estos descubrimientos fueron de plataforma para la aplicación del electromagnetismo en diferentes áreas de la tecnología desde sus orígenes. Descubrimientos como el del físico británico William Sturgeon, quien inventó el electroimán, estableció los cimientos para la invención de las comunicaciones electrónicas a gran escala como el teléfono y el telégrafo. Del mismo modo invenciones como el timbre, el motor eléctrico y la microelectrónica utilizaron como sustento los principios del electromagnetismo. Actualmente fabricación de transformadores, generadores de corriente y lo que hasta ahora parecía un sueño los trenes de levitación magnética utilizan la tecnología magnética, llegándose aplicar hasta en la medicina; aplicando campos magnéticos para arreglar arterias, sacar tumores, resonancias magnéticas y curar aneurismas sin cirugía.

### 2.1.2. Aplicación de la técnica de la modulación por ancho de pulsos PWM

Las aplicaciones de la modulación por ancho de pulsos son múltiples siendo útiles en distintos campos de la electrónica. Hoy en día vemos la aplicación de esta técnica en el control de fuentes conmutadas, controles de motores eléctricos para la variación de su velocidad, controles de elementos termoeléctricos, chopper para sensores en ambientes ruidosos y algunas otras aplicaciones, tales como el manejo de servos de modelismo[15]. En la actualidad existen muchos circuitos integrados que integran la función PWM, tales como los microcontroladores. La aplicación de la técnica de la PWM en distintos procesos trae consigo ventajas con respecto a otras técnicas; por ejemplo en los motores es utilizada esta técnica para regular la velocidad de giro de los motores eléctricos de inducción o asíncronos. Mantiene el par constante y no supone un desaprovechamiento de la energía eléctrica. Otros sistemas para regular la velocidad modifican la tensión eléctrica, con lo que disminuye el par del motor; o interponen una resistencia eléctrica, con lo que se pierde energía en forma de calor en esta resistencia. Otra ventaja de la técnica de PWM es en los sistemas de comunicación. Mediante esta técnica se puede comunicar de forma analógica con sistemas digitales. En los sistemas digitales, es relativamente más fácil medir el periodo de una onda cuadrada; sin embargo, si no se tiene un convertidor analógico digital no se puede obtener información de un valor analógico, ya que solo se puede determinar si hay una determinada tensión, 0 ó 5 voltios. Con la técnica de PWM y en conjunción con otros dispositivos se puede implementar un convertidor analógico digital.

Como vemos la aplicación de la técnica de la PWM es utilizada en distintos sistemas, aprovechando sus múltiples ventajas. Para el presente trabajo de investigación esta técnica será aplicada para el diseño y la implementación del actuador electrónico para luego verificar su funcionamiento con el electroimán y comprobar de esta manera el control de la potencia.

## 2.2. Descripción del sistema de levitación magnética de una esfera metálica

El sistema de levitación magnética de una esfera consiste en la suspensión de una pequeña esfera metálica en el aire, mediante la acción de un electroimán sin ningún tipo de soporte que la sustente. Se hace circular una corriente por el solenoide; este induce un campo magnético, que junto con la imantación de la esfera produce una fuerza sobre la esfera hacia el núcleo del electroimán. La resultante de las fuerzas electromagnética y gravitacional provoca el movimiento ascendente o descendente de la esfera, logrando un punto de equilibrio entre la fuerza de atracción y el peso de la masa de la esfera. Como se puede apreciar en la figura (2.1).

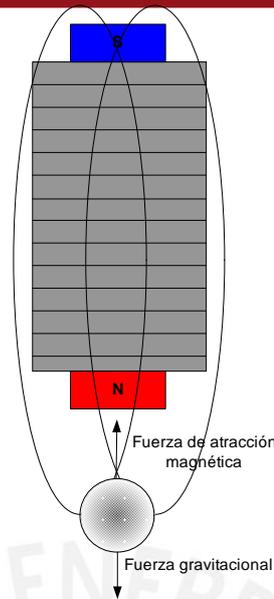


Figura 2.1: Punto de equilibrio entre la fuerza de atracción magnética y la fuerza gravitacional

Las líneas de campo magnético hacen que el sistema sea estable en el plano horizontal. En efecto, si consideramos las componentes horizontales de la fuerza, se puede comprobar que ésta está dirigida hacia el eje del electroimán por lo cual, suponiendo que hay simetría con respecto a este eje, existe sobre el mismo punto un punto de equilibrio estable. Por este motivo el problema de estabilizar el sistema se reduce a controlar la fuerza únicamente en sentido vertical [16].

Para lograr el control de la esfera en la posición estable de levitación, es necesario contar con un sistema realimentado como se observa en la figura (2.2). El funcionamiento del sistema se puede explicar de la siguiente manera: En el controlador el usuario ingresa una posición de referencia de la esfera, con lo cual su objetivo será lograr que la posición real esté lo más próxima a la posición de referencia. El controlador recibirá continuamente información sobre la posición real en la que se encuentra la esfera, esta información será dada por el sensor. Dependiendo de que la posición sea mayor o menor a la deseada, se reducirá o aumentará la intensidad de corriente aplicada al electroimán, esto se logra con la ayuda de un actuador electrónico encargado de acondicionar la señal de corriente.

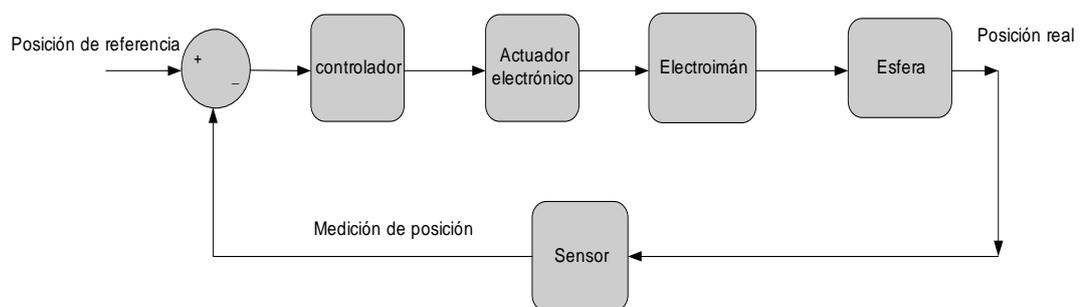


Figura 2.2: Diagrama de bloques del sistema de levitación magnética de una esfera

El sistema cuenta con 3 etapas que son importantes para el objetivo del proceso, llegar a estabilizar un sistema de levitación magnética de una esfera metálica. Estas tres etapas se pueden clasificar:

- Etapa de sensado

Es la etapa donde se realiza el monitoreo continuo de la posición de la esfera y transmite la información a la etapa de control.

- Etapa de control

Es aquel elemento que mediante algoritmos de control, trata de aproximar la posición de referencia con la posición real dada por la etapa de sensado. De esta manera determina la acción que debe ejecutar el actuador electrónico.

- Etapa de potencia

Es la etapa que recibe la señal generada por el controlador e interactúa con el electroimán.

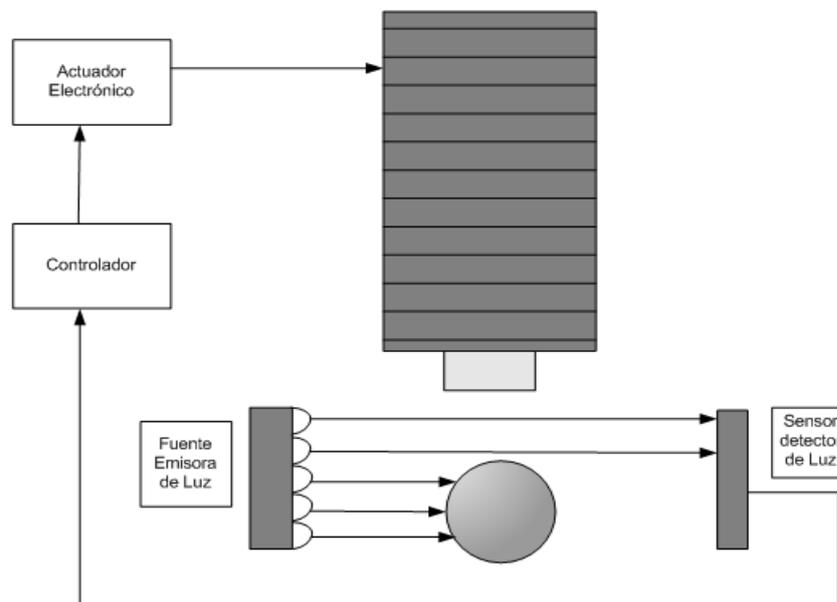


Figura 2.3: Diagrama del sistema de levitación magnética de una esfera

### 2.3. Principios electromagnéticos

En esta sección se presentan algunas características básicas sobre electromagnetismo las cuales serán importantes en el diseño del electroimán. Comprensión de ecuaciones que involucran fuerza entre un magneto y un metal, la inducción magnética, intensidad magnética y la elección adecuada del electroimán, son algunas cuestiones que hacen necesarios esta sección. Los siguientes conceptos han sido tomados de [17], [18], [2], [19], [1].

#### – FLUJO MAGNÉTICO

El flujo magnético es el producto de la inducción magnética o densidad de flujo magnético por la superficie polar del imán. Por tanto la unidad de flujo magnético es igual al producto de las unidades de inducción y de superficie.

El flujo magnético de un imán expresa el valor total de su efecto magnético.

$$\phi = B.A \quad (2.1)$$

La unidad de flujo magnético es el weber (wb).

$$1 \text{wb} = 1 \text{VS}$$

$$[\phi] = \text{VS}$$

#### – ELECTROIMÁN

Si un material ferromagnético se coloca dentro del solenoide y se aplica una corriente por el solenoide, el campo magnético aumenta enormemente porque el material se convierte en imán. El campo magnético resultante es la suma de los campos debido a la corriente y del material, puede ser cientos o miles de veces el campo debido a la corriente sola. Tal solenoide con núcleo ferromagnético es un electroimán.

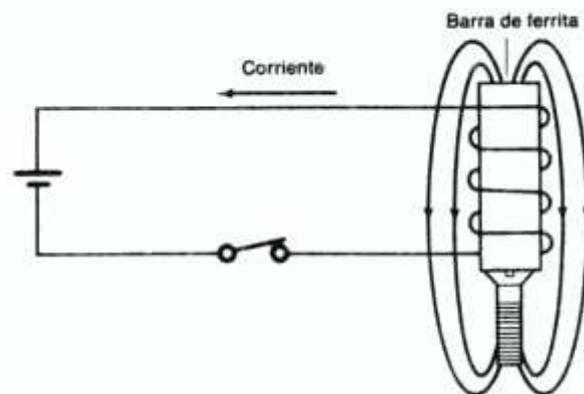


Figura 2.4: Imantación de una barra de ferrita [1]

La fuerza de un electroimán depende de cuatro factores:

- ▷ El tipo de material del núcleo.

- Tamaño y forma del material del núcleo.
- El número de vueltas de la bobina.
- El valor de la corriente en la bobina.

En general, el imán será más potente cuando:

- El material del núcleo tenga la permeabilidad más elevada.
- El material del núcleo tenga la mayor área de la sección recta y más corta longitud para las líneas de flujo, esto dará lugar a una reluctancia baja.
- El número de vueltas y la corriente sea lo más grande posible. Esto da lugar a una gran fuerza magnetomotriz [1].

#### ◇ FUERZA PORTANTE DE UN ELECTROIMÁN

Estando fijo un electroimán, la fuerza portante se mide por la fuerza más intensa que puede ejercerse normalmente sobre materiales ferromagnéticos sin que estos se desprendan.

Designando por  $B$  la inducción magnética (en teslas),  $A$  el área de la superficie de las caras de los polos (en metros cuadrados),  $\mu_0$  como la permeabilidad magnética en el vacío y la fuerza portante viene dada en Newton por la formula:

$$F = \frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad (2.2)$$

#### – AUTOINDUCTANCIA

Ocurre en una bobina cuando varía la corriente que circula por ella, induciendo una fuerza electromotriz sobre sí misma. En una bobina de  $N$  espiras, a través de la cual circula una corriente  $I$ , tenemos que la inductancia está dada por:

$$L = \frac{N \cdot \phi H}{l} \quad (2.3)$$

Donde  $l$  es la longitud de la bobina,  $\phi$  el flujo magnético que presenta en ella y  $H$  la intensidad de campo magnético[2].

#### – FUERZA MAGNETOMOTRIZ

El esfuerzo ejercido en la creación de un campo y flujo magnético se llama fuerza magnetomotriz. La fuerza magnetomotriz se abrevia fmm. Al igual que un imán permanente también una bobina recorrida por una corriente puede originar un campo magnético. Aumentando el número de vueltas o la corriente en una bobina aumentará la fmm de donde fmm está dada por:

$$fmm = N \cdot I \quad (2.4)$$

Siendo  $N$  el numero de espiras de la bobina e  $I$  la corriente circulante.

Su unidad ampére-espira.

– CIRCUITO MAGNÉTICO

Básicamente a un circuito magnético lo representa el camino que siguen las líneas de fuerza del magnetismo de un imán al cerrar su circuito de un polo a otro. Así pues, el circuito magnético queda constituido por el propio imán y el aire o los elementos que se dispongan entre los polos del mismo. De forma análoga a la ley de los circuitos de Ohm y siendo  $\phi$  el flujo magnético tenemos que:

$$fmm = \phi \mathfrak{R} \quad (2.5)$$

De donde  $\mathfrak{R}$  es la reluctancia y se define como:

$\mathfrak{R} = \int \frac{dl}{\mu A}$  donde  $dl$  es la diferencial de longitud y  $A$  es el área transversal.

– RELACIÓN ENTRE LA INDUCCIÓN MAGNÉTICA Y LA INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO

La inducción magnética o densidad de flujo magnético  $B$  nos expresa el valor del efecto magnético. Aparece como consecuencia de una corriente eléctrica.

Como la intensidad del campo magnético  $H$  depende de la intensidad de corriente  $I$ , del número de espiras  $N$  y de la longitud de las líneas de campo  $L$ . Entre la intensidad de campo  $H$  y la inducción magnética  $B$  debe existir una relación.

La intensidad de campo magnético  $H$  en función a la corriente está expresado como:

$$H = \frac{NI}{L} \quad (2.6)$$

Podemos sustituir  $B \sim \frac{NI}{L}$ . Por tanto, la inducción magnética  $B$  es proporcional a la intensidad de campo magnético  $H$ .

No obstante, si comparamos las unidades de ambas magnitudes

( $[B] = \frac{VS}{m^2}; [H] = \frac{A}{m}$ ), veremos que son diferentes.

Ambas magnitudes deben, pues estar relacionadas a través de una constante  $K$ , que tiene una determinada unidad.

$$B = K.H \quad (2.7)$$

La constante entre la inducción magnética y la intensidad de campo magnético es la constante denominada permeabilidad magnética.

### Características del hierro dulce

El hierro (Fe) es una de los mejores materiales magnéticos, conduce fácilmente una corriente magnética por medio de sus electrones libres, además de que sus iones fijos en el cristal contienen corrientes atómicas que se orientan fácilmente para producir una magnetización intensa. El hierro se caracteriza por mantener una magnetización permanente y por causar un efecto profundo sobre la inducción magnética.

El hierro dulce o hierro al silicio se obtiene agregando un pequeño porcentaje de silicio. La composición de éste es de 96% Fe y 3% Si. La intensidad magnética (H) necesaria para saturación es de  $56 \frac{A}{m}$  y su permeabilidad relativa máxima es de 8000 [2].

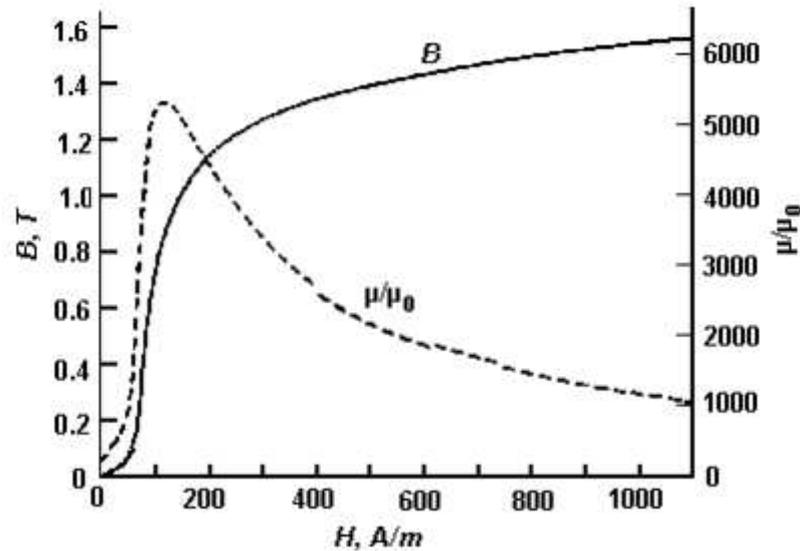


Figura 2.5: Curva de magnetización y permeabilidad relativa del hierro [2]

Como puede observarse en la figura (2.5) la permeabilidad máxima ocurre en el máximo de la curva (codo). La razón de este codo es que la magnetización  $M$  se aproxima a un valor máximo en el material. Dado que  $B = \mu_0(H + M)$ ,  $M$  alcanza su máximo valor y éste se llama magnetización de saturación del material.

También se observa que el comportamiento de  $B$  al ir disminuyendo  $H$  no es el mismo que el caso en que  $H$  fue incrementándose, en lugar de esto la curva sigue otro camino, incluso la magnetización no desaparece con la desaparición de  $H$ , para poder eliminar esto es necesario invertir la intensidad de campo magnético aplicada. A esta acción se le denomina histéresis, el cual se refiere al retardo de la magnetización respecto a la intensidad del campo magnético.

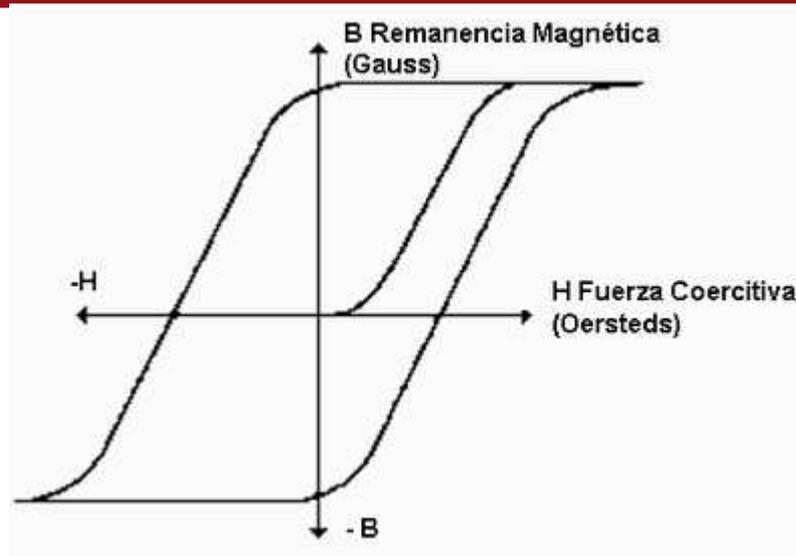


Figura 2.6: Curva de histéresis de un material ferromagnético [1]

En la figura (2.6) se observa la curva de histéresis de donde el valor de  $B$  en  $H = 0$  se llama remanencia y la magnitud de  $H$  para  $B = 0$  se llama fuerza coercitiva.

## 2.4. Marco conceptual del actuador electrónico por PWM

### 2.4.1. Principios de funcionamiento del actuador electrónico

El actuador electrónico es el encargado de suministrar la energía eléctrica necesaria al electroimán, para que éste establezca la fuerza magnética sobre la esfera metálica. Por lo tanto se debe tomar en cuenta ciertas consideraciones importantes para su diseño. Se describirá mediante un diagrama de bloques el funcionamiento de este dispositivo.

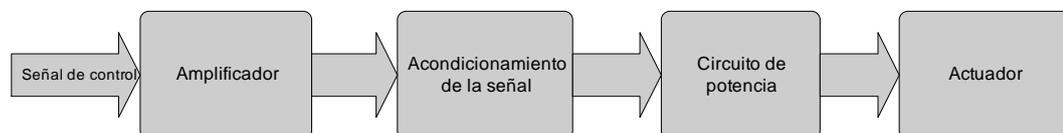


Figura 2.7: Diagrama de bloques del actuador electrónico

#### – Señal de control

Es la señal de referencia dada por la etapa de control y constituye en forma proporcional a la potencia que debe generar el actuador electrónico.

- Amplificador  
Encargado de amplificar la señal de control y sirve de referencia en la etapa de acondicionamiento de la señal.
- Acondicionamiento de la señal:  
Encargado de controlar o manejar la señal de control ya sea por modulación de ancho de pulso o por voltaje.
- Circuito de potencia  
Constituye el conmutador de potencia, la cual se encargará de dar la potencia necesaria al actuador.
- Actuador  
Constituye a la carga del actuador electrónico. En el presente trabajo el actuador será el electroimán.

#### 2.4.2. Control por Modulación de Ancho de Pulso (PWM)

La modulación de ancho de pulso es una técnica utilizada para controlar dispositivos, dando un voltaje variable de corriente continua. La señal generada tendrá frecuencia fija y tiempos de encendido y apagado variables. En otras palabras el periodo de la señal se mantendrá constante, pero la cantidad de tiempo se mantendrá en alto y bajo dentro de un periodo.

Las ventajas de utilizar un control por Modulación de Ancho de Pulso es la estabilidad ante cambios de temperatura, además que el consumo de corriente es menor que en un control por corriente [2].

En la siguiente figura se muestra un diagrama de un generador analógico de PWM:

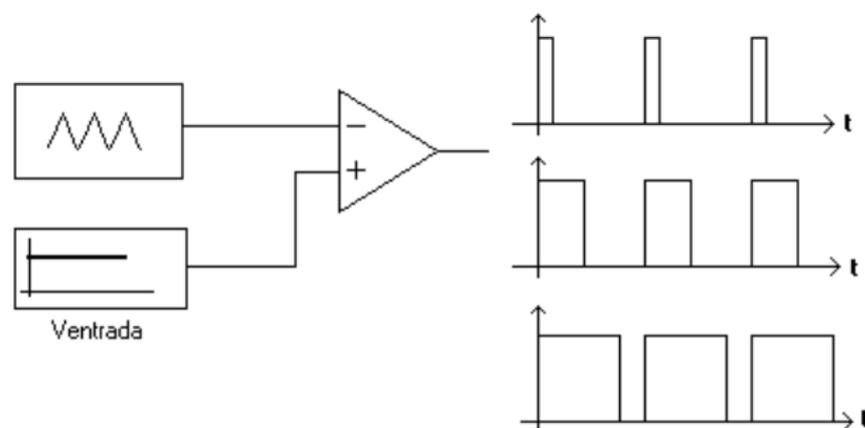


Figura 2.8: Generador de PWM con 3 estados diferentes [2]

Se observa la comparación entre una señal triangular de una frecuencia fija con una señal de entrada como referencia, lo cual produce la secuencia de pulsos. Mientras se va variando la señal de entrada el ancho de pulso en alta va cambiando, pero manteniendo el mismo periodo. Por lo tanto el ciclo de trabajo de la señal PWM sera variable.

– GENERADOR DE ONDA TRIANGULAR ANALÓGICO

La figura (2.9) muestra un circuito generador de onda triangular con amplificadores operacionales. Este circuito está formado por una etapa con un circuito integrador y una segunda etapa con un amplificador con realimentación positiva conocido como disparador Schmitt no inversor.

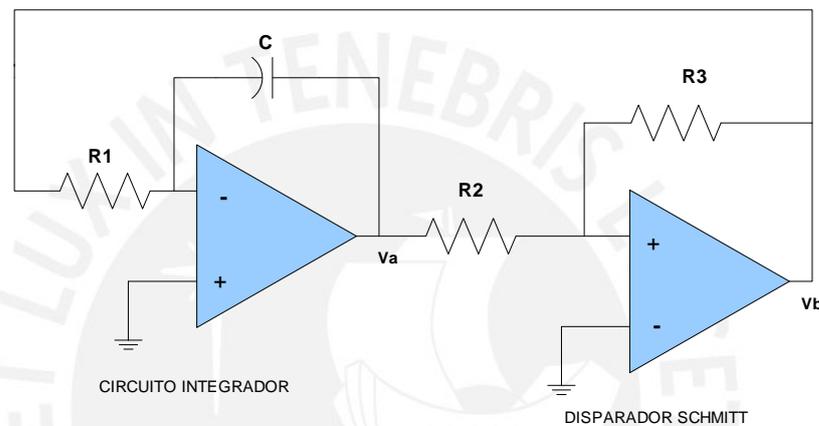


Figura 2.9: Generador de onda triangular [3]

Este circuito al tener como señal de salida del disparador Schmitt una onda cuadrada, y la salida del integrador una señal con pendiente en función del estado del disparador, se obtiene por lo tanto una señal triangular en un periodo determinado.

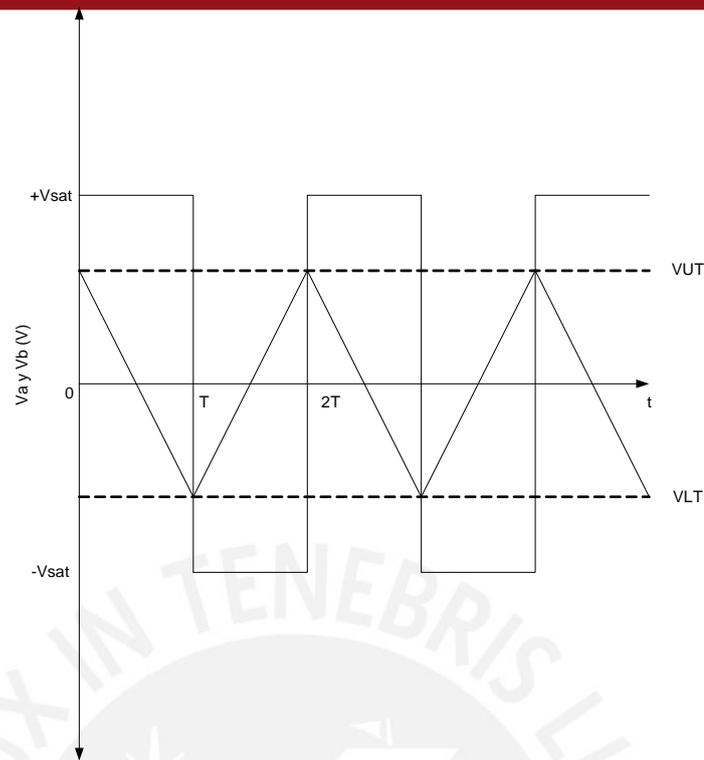


Figura 2.10: Formas de onda del circuito generador de onda triangular [3]

Para comprender cómo funciona el circuito, observe el intervalo comprendido entre 0 y T de la figura (2.10). Suponga que  $V_b$  está en nivel alto en el valor  $+V_{sat}$ . En estas condiciones se provoca el flujo de una corriente constante ( $V_{sat}/R_1$ ) a través del condensador C (de izquierda a derecha), volviendo  $V_a$  negativo, que pasa de  $V_{UT}$  a  $V_{LT}$ . Cuando  $V_a$  llega a ese valor, la conexión positiva del circuito disparador Schmitt se vuelve negativa y  $V_b$  cambia súbitamente al valor  $-V_{sat}$  y  $t = T$ .

Cuando el valor de  $V_b$  es  $-V_{sat}$ , se produce un flujo de corriente constante (de derecha a izquierda) a través de C, convirtiendo a  $V_a$  en positivo, desde el valor  $V_{LT}$  hasta  $V_{UT}$ . En cuanto  $V_a$  alcanza el valor  $V_{UT}$ , cuando  $t = 2T$ , la conexión positiva del circuito disparador Schmitt se vuelve positiva y  $V_b$  cambia a  $+V_{sat}$  [3].

#### 2.4.2.1. Frecuencia de operación

Los valores pico de la onda triangular se calculan a partir de la relación que existe entre las resistencias  $R_3$  y  $R_2$  y los voltajes de saturación. Todos ellos se calculan de la siguiente manera:

$$V_{UT} = -\frac{-V_{sat}}{\rho} \quad (2.8)$$

$$V_{LT} = -\frac{+V_{sat}}{\rho} \quad (2.9)$$

En donde

$$\rho = \frac{R3}{R2} \quad (2.10)$$

Si los voltajes de saturación son razonablemente iguales, la frecuencia de operación estará dada por:

$$F = \frac{\rho}{4R1C} \quad (2.11)$$

### 2.4.3. Circuito de Potencia

El objetivo principal del circuito de potencia es conseguir un elevado rendimiento en la transformación de la energía. Para ello, se utilizan dispositivos semiconductores que trabajan en conmutación, a modo de interruptores.

Los dispositivos de potencia se clasifican en tres grupos de acuerdo a su grado de controlabilidad: diodos, tiristores y conmutadores controlables. De acuerdo al funcionamiento del actuador electrónico para el sistema de levitación magnética, se utilizó los dispositivos de potencia denominados conmutadores controlables, ya que estos se activan mediante señales de control. De esta manera se facilita el control de actuador electrónico, variando la potencia que llega al electroimán de acuerdo a la señal ingresada.

#### 2.4.3.1. Conmutadores controlables

En este grupo se encuentran todos los dispositivos semiconductores de potencia, los cuales pueden ser conmutados a conducción y a corte mediante señales de control. Entre los principales se encuentran: BJTs, GTOs, IGBTs y MOSFETs.

Un conmutador ideal tiene las siguientes características:

- Bloquea cualquier tensión directa o inversa sin que circule a través suya ninguna corriente.
- Conduce con cero voltios de caída entre sus terminales.
- Conmuta de conducción a corte o viceversa instantáneamente cuando es disparado.
- No consume potencia para su control.

Sin embargo, los componentes reales no disponen de todas las características mencionadas. En la figura (2.11) se compara las capacidades de tensión, corriente y frecuencias de los conmutadores controlables. De esta manera se podrá seleccionar el dispositivo de potencia que se acerca mejor a los requerimientos del actuador electrónico.

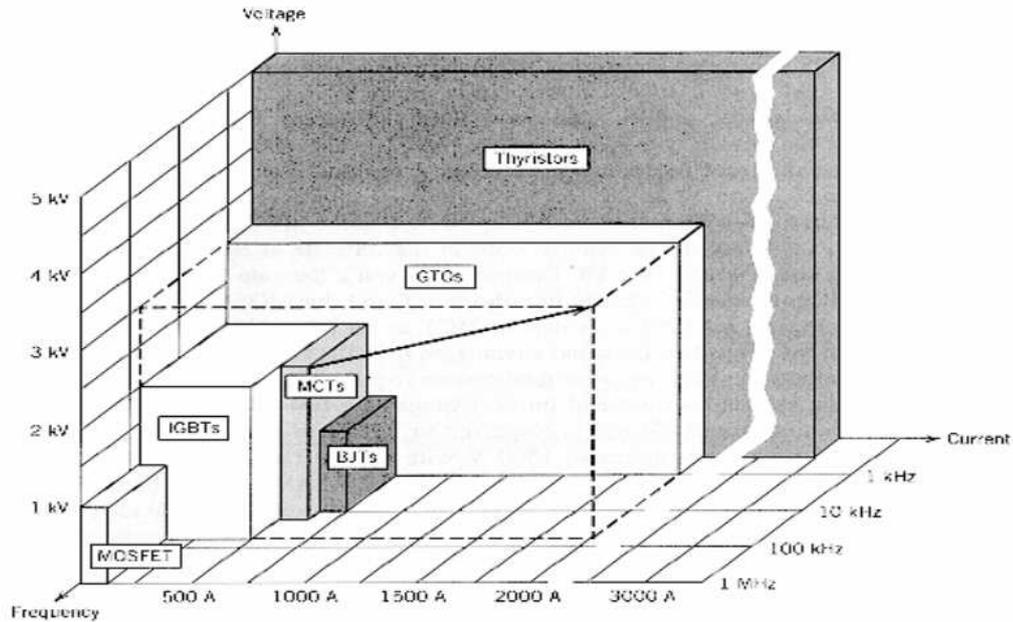


Figura 2.11: Comparación entre conmutadores controlables [4]

### 2.4.3.2. Cálculo del disipador térmico o aletas refrigeradoras

La disminución de la resistencia térmica de los dispositivos se realiza utilizando aletas refrigeradoras, también denominados radiadores, que se adhieren al dispositivo a través de mica o pasta silicona. En la figura (2.12) se presenta el sistema de fijación de una aleta a un dispositivo. La ecuación de disipación de calor en este tipo de estructura es:

$$T_j - T_a = P_j(\theta_{jc} + \theta_{cr} + \theta_{ra}) \tag{2.12}$$

$\theta_{jc}$  es un parámetro fijado por el encapsulado proporcionado por el fabricante,  $\theta_{cr}$  es la resistencia térmica entre el dispositivo y la aleta refrigeradora y  $\theta_{ra}$  es la resistencia térmica de la aleta.

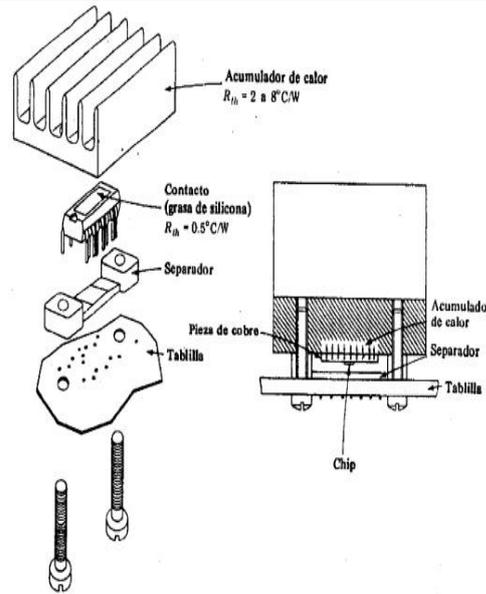


Figura 2.12: Montaje del radiador [5]

Tipo contenedor	Contacto directo	Contacto directo más pasta de silicona	Contacto con mica	Contacto con mica más pasta de silicona
TO.39-TO.5	1	0.7	–	–
TO.126	1.4	1	2	1.5
TO.220	0.8	0.5	1.4	1.2
TO.202	0.8	0.5	1.4	1.2
TO.152	0.8	0.5	1.4	1.2
TO.90	0.5	0.3	1.2	0.9
TO.3 (Plástico)	0.4	0.2	1	0.7
TO.59	1.2	0.7	2.1	1.5
TO.117	2	1.7	–	–
SOT.48	1.8	1.5	–	–
DIAL.4L	1.1	0.7	–	–
TO.66	1.1	0.65	1.8	1.4
TO.3	0.25	0.12	0.8	0.4

Figura 2.13: Resistencias térmicas cápsula-aleta para diferentes tipos de aislante [5]

## 2.5. Estándares y consideraciones generales

Para el diseño del electroimán y el actuador electrónico por PWM debemos tener ciertas consideraciones importantes que van a influir en el proceso de diseño y fabricación. Los criterios más importantes a tomar en cuenta son aquellos referidos a la potencia del electroimán y al rango de corriente a la que va ser sometido.

### – NÚMERO DE ESPIRAS DEL ELECTROIMÁN

Se refiere al número de espiras de cobre que tendrá el electroimán en estudio. Es de gran importancia ya que tanto el número de espiras como la corriente permiten establecer la fuerza de atracción magnética máxima en el electroimán.

### – CANTIDAD DE CORRIENTE QUE CIRCULA POR EL ELECTROIMÁN

Indica el rango de corriente que circulará por las espiras del electroimán. Es de gran

importancia ya que la fuerza de atracción del electroimán depende de la corriente a la cual va ser sometido. Del mismo modo, la cantidad de corriente determinará la elección de los componentes electrónicos en el actuador electrónico.

– DISTANCIA MÁXIMA DE LEVITACIÓN

Es la distancia máxima donde la esfera metálica se mantendrá en levitación, por lo tanto es la máxima distancia en la cual llegarán las líneas de campo magnético. Esta distancia se determinó a partir de los requerimientos del controlador del sistema y de las dimensiones de la esfera seleccionada. Como requerimiento del control la posición inicial de reposo debe llegar a una distancia de un diámetro de la esfera, para luego permitir un desplazamiento de un radio por encima y un radio por debajo de ella. La distancia máxima que se determinó fue de 2.25 cm ó 22.5mm.

– PESO DE LA ESFERA METÁLICA

Corresponde al peso de la esfera metálica que se encontrará en el experimento de la levitación. Es un factor importante, pues la fuerza de atracción del electroimán será determinado por la carga a la cual va someter la fuerza magnética. Para ello se estableció la fuerza mínima de sustentación de 0.3N, lo que representa al peso de la esfera elegida para la levitación.

– ESTÁNDARES DE DISEÑO

Se refiere a la normalización que se estableció desde un inicio para el desarrollo de cada etapa del sistema de levitación magnética de una esfera. Se planteó como estándar de diseño un rango de corriente entre [4-20]mA ó [1-5]VDC como la señal de control.

– RECURSOS UTILIZADOS

Corresponde a todos los dispositivos utilizados para el diseño y fabricación tanto electrónicos como otros, tales como: cantidad de dispositivos de potencia, resistencias, fuente de alimentación, materiales de hierro y cobre, etc.

## Capítulo 3

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ELECTROIMÁN Y UN ACTUADOR ELECTRÓNICO POR PWM

En el presente capítulo se desarrollará el sistema físico del módulo de levitación magnética de una esfera metálica, conformado por un electroimán y su respectivo manejador o actuador electrónico. Este sistema está representado por una función de transferencia que nos indica cómo varía la altura de la pieza ante variaciones de la intensidad de corriente eléctrica en el electroimán.

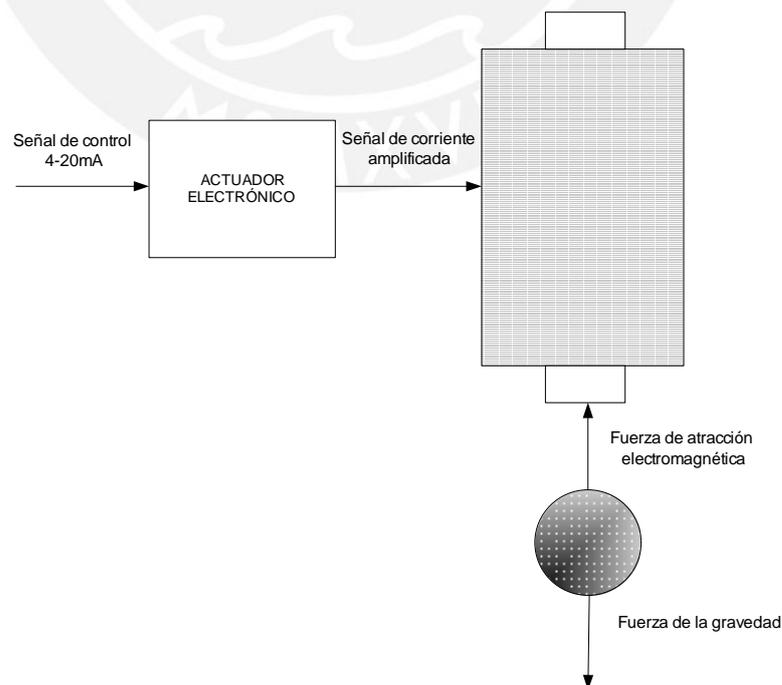


Figura 3.1: Esquema del actuador electrónico y el electroimán

### 3.1. Diseño del electroimán para un sistema de levitación magnética de una esfera

#### Fuerza atractiva en un electroimán recto

Para el diseño del electroimán, se ha considerado un electroimán tipo recto formado por un núcleo cilíndrico de hierro dulce rodeado de una sola bobina. Se puede considerar un circuito magnético con el electroimán cilíndrico, el entre-hierro y la esfera metálica. En este circuito magnético circula un flujo magnético cada vez que al electroimán se le suministra una corriente eléctrica produciéndose una imantación temporal. Este flujo magnético circula por el interior del núcleo y sale por sus extremos como se puede ver en la figura (3.2).

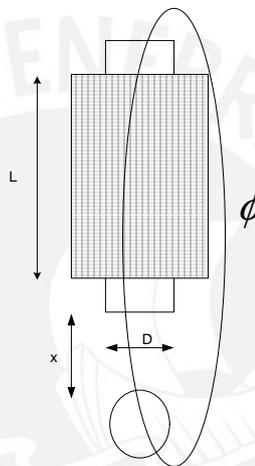


Figura 3.2: Circuito magnético

Se calcula el flujo magnético aplicando la ecuación (2,5) a lo largo del circuito magnético, se obtiene

$$IN = \phi \left( \frac{L}{\mu_{hierro} A} + \frac{x}{\mu_0 A} \right)$$

Como la permeabilidad magnética máxima del hierro dulce es 8000 veces la permeabilidad del aire, podemos aproximar a

$$IN = \phi \frac{x}{\mu_0 A}$$

Despejando  $\phi$

$$\phi = \frac{IN\mu_0 A}{X} \quad (3.1)$$

Con ecuación (2.2) de la fuerza portante de un electroimán igual a

$$F = \frac{B^2 A}{2\mu_0}$$

y la ecuación (2.1) de flujo magnético

$$\phi = BA$$

Podemos combinarlas con la ecuación (3.1) obtenida. Con lo que la fuerza total del electroimán resulta,

$$F = \frac{1}{2} \mu_0 AN^2 \left(\frac{I}{X}\right)^2 \quad (3.2)$$

Donde  $A = \frac{D\pi^2}{4}$

La fuerza se expresa en Newton cuando todas las demás unidades están en el sistema internacional (SI).

#### – ANÁLISIS TEÓRICO ALTERNATIVO

Como análisis teórico alternativo, la fuerza de atracción del electroimán también puede calcularse mediante la ecuación (2.6) de la intensidad de campo magnético en función de la corriente dado por

$$H = \frac{NI}{l}$$

de donde  $l$  representa la longitud de las líneas de campo. Para este caso en particular  $l$  representará la distancia máxima de atracción entre la esfera y el electroimán, con lo que resulta  $l = x$ ;

y de la ecuación de la inducción magnética en el vacío dada por,

$$B = \mu_0 H$$

el análisis se enfoca en determinar la cantidad de líneas de campo magnético entre el electroimán y la esfera metálica. Dado la ecuación (2.2) de la fuerza portante de un electroimán y en combinación con las ecuaciones enunciadas, se puede concluir que la fuerza resultante es la misma obtenida por el circuito magnético.

$$F = \frac{1}{2} \mu_0 AN^2 \left(\frac{I}{x}\right)^2$$

## Fenómenos magnéticos en el electroimán recto

### – SATURACIÓN DEL NÚCLEO

A partir de la ecuación (3.1) se puede comprobar, que el flujo magnético incrementa a medida que se disminuye la distancia entre el electroimán y la esfera metálica, conocida como el entre-hierro. Por lo tanto existe un valor de distancia pequeña, para lo cual el flujo se hace lo suficientemente grande como para saturar el núcleo. Concluyendo que para este valor o inferiores la ecuación de fuerza deducida anteriormente deja de ser válida, ya que un incremento de corriente no le corresponde un incremento de flujo.

### – INDUCCIÓN MAGNÉTICA

A partir de la ecuación (2.3) de la inductancia, podemos comprobar que a un valor de distancia pequeña se incrementa el valor de la inductancia por lo que también se obtiene un mayor potencial eléctrico contra-electromotriz inducido en la bobina. Esto hace que el control sea complicado para valores de entre-hierro pequeños.

De esta manera con lo visto en estos dos fenómenos magnéticos, se concluye que la elección de la distancia máxima de levitación de la esfera metálica es muy importante para la etapa de control, porque a distancias pequeñas de entre-hierro es difícil el control del campo magnético.

## 3.2. Implementación del electroimán para un sistema de levitación magnética de una esfera

Para la implementación del electroimán se tomó en cuenta el análisis teórico del diseño del electroimán. Para lo cual también se estableció una serie de consideraciones importantes para su fabricación:

- El electroimán estará alimentado por 12 voltios en corriente continua.
- Máximo de corriente que circulará en la bobina de 4A.
- Resistencia máxima de la bobina  $3\Omega$
- Distancia máxima deseada de levitación 22.5mm, dando un margen de seguridad para el diseño de 30 mm.
- Fuerza mínima de sustentación requerida 0.3N, dando un margen de seguridad para el diseño de 1N como máximo.
- Núcleo cilíndrico de hierro dulce de diámetro 22mm y 60mm de largo.

### Cálculo del número de espiras

Partiendo de los requerimientos anteriores y a partir de la ecuación (3.2) se puede determinar el número de espiras en el electroimán.

De la ecuación (3.2) de la fuerza de atracción del electroimán se puede despejar N, obteniéndose

$$N = \sqrt{\frac{2F}{\mu_0 A} * \left(\frac{X}{I}\right)} \quad (3.3)$$

de lo datos definidos y dando los márgenes de seguridad de diseño, se concluye:

$$F = 1N$$

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \frac{N}{A^2}$$

$$A = 38 * 10^{-5} m^2$$

$$X = 30mm$$

$$I = 4A$$

Se ingresa los datos a la ecuación (3.3)

$$N = \sqrt{\frac{2(1N)}{(4\pi * 10^{-7} \frac{N}{A^2}) * (38 * 10^{-5} m^2)} \frac{(30 * 10^{-3} m)}{4}}$$

se calcula el valor de N

$$N = 482,38 \sim 483$$

por lo tanto se requiere una bobina de 483 espiras como mínimo, pero se escogió unas 600 espiras .

### Tipo de alambre para el bobinado

El espesor de los alambres usados depende directamente de la intensidad de la corriente que los recorre. Esta corriente puede calcularse fácilmente a partir de la tensión y la potencia en el caso de que no tengamos el dato.

El alambre de cobre admite una densidad máxima de corriente dada su resistividad. Es así que si se supera esa densidad, existe el peligro de sobrecalentamiento, que hasta puede quemarlo. Del mismo modo se debe considerar que el espesor del alambre más la longitud del bobinado,

dada por el número de espiras, son responsables de una resistencia, la del bobinado que podría tener pérdidas de potencia.

Tabla 3.1: Tabla para la selección del número de cable AWG [7]

(1) AWG	(2) diámetro	(3) sección	(4) Nº espiras	(5) kg por km	(6) Resistencia	(7) Cap.
0000	11,86	107,2	-	-	0,158	319
000	10,40	85,3	-	-	0,197	240
00	9,226	67,43	-	-	0,252	190
0	8,252	53,48	-	-	0,317	150
1	7,348	42,41	-	375	0,40	120
2	6,544	33,63	-	295	0,50	96
3	5,827	26,67	-	237	0,63	78
4	5,189	21,15	-	188	0,80	60
5	4,621	16,77	-	149	1,01	48
6	4,115	13,30	-	118	1,27	38
7	3,665	10,55	-	94	1,70	30
8	3,264	8,36	-	74	2,03	24
9	2,906	6,63	-	58,9	2,56	19
10	2,588	5,26	-	46,8	3,23	15
11	2,305	4,17	-	32,1	4,07	12
12	2,053	3,31	-	29,4	5,13	9,5
13	1,828	2,63	-	23,3	6,49	7,5
14	1,628	2,08	5,6	18,5	8,17	6,0
15	1,450	1,65	6,4	14,7	10,3	4,8
16	1,291	1,31	7,2	11,6	12,9	3,7
17	1,150	1,04	8,4	9,26	16,34	3,2
18	1,024	0,82	9,2	7,3	20,73	2,05
19	0,9116	0,65	10,2	5,79	26,15	2,0
20	0,8118	0,52	11,6	4,61	32,69	1,6
21	0,7230	0,41	12,8	3,64	41,46	1,2
22	0,6438	0,33	14,4	2,89	51,5	0,92
23	0,5733	0,26	16,0	2,29	64,4	0,73
24	0,5106	0,20	18,0	1,82	80,0	0,58
25	0,4547	0,16	20,0	1,44	100,0	0,46
26	0,4049	0,13	22,8	1,14	130,0	0,37
27	0,3606	0,10	25,6	0,91	170,0	0,29
28	0,3211	0,08	28,4	0,72	212,5	0,23
29	0,2859	0,064	32,4	0,57	265,6	0,18

- (1) Número AWG (American Wire Gauge)
- (2) Diámetro en milímetros.
- (3) Sección en milímetros cuadrados.
- (4) Número de espiras por centímetros.
- (5) Kg. por kilómetro.
- (6) Resistencia en ohm por kilómetro.
- (7) Capacidad de corriente en amperes.

En la siguiente tabla (3.2) se observa una aproximación de la densidad máxima de la corriente determinada por la potencia en la bobina.

Tabla 3.2: Densidad máxima de la corriente en función de la potencia en la bobina [7]

Potencia (W)	Densidad máx. en $A \times mm^2$
hasta 50	4
50-100	3.5
100-200	3
200-400	2.5

Aplicamos ahora la siguiente fórmula para determinar la sección de los alambres esmaltados que deben usarse para cada bobinado:

$$S = \frac{I}{D} \quad (3.4)$$

Donde:

S es la sección del alambre en  $mm^2$

I es la intensidad de la corriente en A

D es la densidad de la corriente (según la tabla) en  $A/mm^2$

Para el electroimán, tenemos:

$$I = 4A$$

$$D = 4 \frac{A}{mm^2} \text{ (de tabla, dado que la potencia máxima es de 48 W )}$$

$$S = \frac{4}{4}$$

$$S = 1 \text{ mm}^2$$

La tabla (3.1) nos permite elegir los alambres a partir de la numeración AWG. Tenemos entonces que el alambre de sección  $1 \text{ mm}^2$  más próximo es el número AWG 17.

### Proceso de Fabricación del Electroimán <sup>1</sup>

Para el proceso de fabricación del electroimán fue necesaria una máquina para bobinar. Esta máquina fue encontrada en un taller de fabricación de transformadores, motores eléctricos y de otros aparatos eléctricos. Este devanador de bobinas es casi automático, ya que dispone de un contador que da a conocer el número de vueltas de alambre, y puede ser impulsado por un motor eléctrico de velocidad variable, regulado por un pedal como los de las máquinas de coser. También cuenta con un tornillo y una tuerca para asegurar firmemente la bobina sobre la cual se efectúa el devanado. Para la fabricación del electroimán fue necesario el uso de materiales no magnéticos para el aislamiento del devanado, como mica de plástico o papel de pescado. El aislamiento es muy importante ya que de esto depende que la parte eléctrica no tenga un contacto directo con el núcleo de hierro del electroimán, lo que provocarían cortocircuitos que serían peligrosos para el operador. Este material es formado a las mismas dimensiones del núcleo del electroimán, para luego efectuar el devanado con la ayuda del alambre o cable conductor calculado, del tipo calibre Americano (en inglés AWG) número 17.

<sup>1</sup>La fabricación se realizó en el local Laser FC Electronic S.R.L Jirón Paruro, Tda. 222, 2do piso - El cercado-Lima



Figura 3.3: Material aislante en el proceso de fabricación del electroimán



Figura 3.4: Inicio del devanado en el proceso de fabricación del electroimán

El cable conductor está provisto de un barniz aislante que evita los cortocircuitos entre un cable con otro; este tipo de cable conductor cumple con los requerimientos especificados anteriormente, como se comprobó a través de tablas.

Se da inicio el proceso del devanado asegurando que las espiras estén lo más juntas y firmes posibles como se aprecia en la figura (3.5)



Figura 3.5: Primera capa de devanado

Una vez terminado el proceso del devanado de la primera capa se cubre la bobina con el material aislante, sujetándolo con un adhesivo, para luego iniciar nuevamente el proceso del bobinado. Este proceso se realiza hasta cubrir con todas las espiras especificadas en la etapa de diseño, para finalmente introducir el núcleo de hierro a la bobina. Se utiliza barniz de aislamiento para el acabado, esto se usa cuando se está seguro que el electroimán se encuentra listo para trabajar y ya se ha hecho las pruebas correspondientes que comprueben su buen funcionamiento, ya que este barniz al secar hace que los alambres queden sujetos entre sí endureciendo la bobina con el núcleo de hierro. Este aislamiento evita ruidos por alambres sueltos, vibración de un embobinado y actúa como una capa protectora dando una buena presentación en el electroimán.



Figura 3.6: Acabado final del proceso de fabricación del electroimán

### 3.3. Diseño del actuador electrónico por PWM

En esta parte del capítulo se enfocará en el diseño de un actuador electrónico de corriente, constituido por un modulador de ancho de pulso. Este equipo electrónico tiene la función de acondicionar la señal de control para que esta señal sea proporcional a la potencia generada en el electroimán, el cual representa el medio físico del proceso.

La idea del presente trabajo se basó en la propuesta descrita en [2], en la que se plantearon dos propuestas de control para un sistema de levitación magnética de una plataforma. Donde se realizaron una serie de experimentos con un control por Modulación de ancho de Pulso y un control por corriente; concluyendo que el control por PWM era el más factible para este proceso.

#### Diagrama de bloques del actuador electrónico por PWM

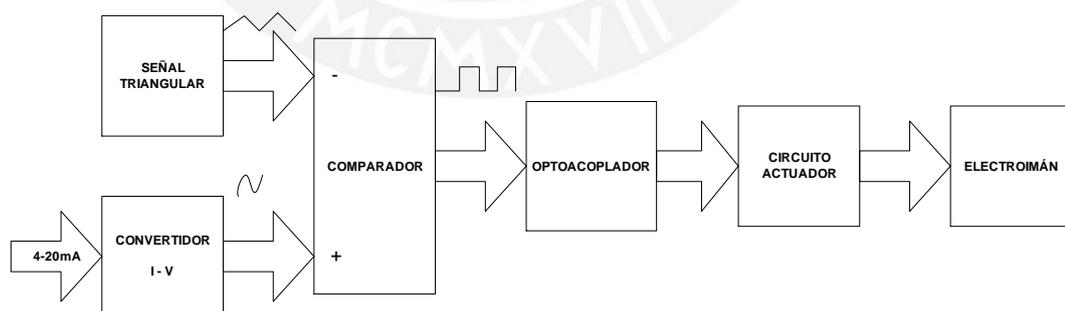


Figura 3.7: Diagrama de bloques del actuador electrónico por PWM

La figura (3.7) describe el funcionamiento del actuador electrónico por modulación de ancho de pulso o PWM. En donde se describe una señal triangular periódica comparada con la señal de control variable previamente convertida de corriente a voltaje. El resultado de la comparación es una señal de modulación por ancho de pulso, cuyo ciclo de trabajo es variable en proporción a la variación de la señal de control dada. Luego el opto-acoplador se encarga de aislar la

electrónica de baja potencia del resto de la circuitería de la electrónica de mayor potencia que controla al electroimán. El circuito actuador para el electroimán, como puede observarse en la figura (3.8), consiste en un transistor de efecto de campo basado en la estructura MOS (MOS-FET, del inglés Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) en serie con el electroimán y éstos entre la fuente de alimentación. Un diodo es colocado en paralelo con el electroimán para eliminar las corrientes inversas por la bobina. Es este diodo lo que vuelve controlable a la bobina, pues de otra forma la bobina presenta un comportamiento inestable debido a los picos de corriente que se generan por la conmutación del voltaje aplicado así como por la histéresis y la autoinductancia presentes en la bobina .

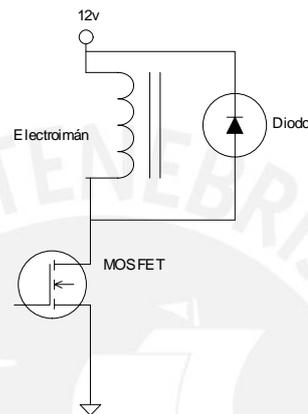


Figura 3.8: Circuito actuador y el electroimán

### Transistor de potencia

El diseño utiliza un MOSFET de canal N, para simplificar el diseño del circuito de excitación y para minimizar el número de componentes. Se utilizan MOSFETS porque son transistores de potencia controlados por voltaje y además porque consumen poca energía debido a su resistencia dinámica, la cual es muy baja.

Se eligió el transistor IRFZ44 que posee las siguientes características:

Tabla 3.3: Características de MOSFET IRFZ44

VDSS	60V
RDS	0.028Ω
Id max	50 Amp
Vgs	20 V
Pot max	150 W
Tj max	175 °C
$\theta_{jc}$	1 $\frac{^{\circ}C}{W}$
$\theta_{ja}$	62 $\frac{^{\circ}C}{W}$
$\theta_{cd}$	0.5 $\frac{^{\circ}C}{W}$
$T_r$	110nseg
$T_f$	92nseg

Potencia disipada por el transistor, incluye la de conducción y las pérdidas de conmutación:

$$P_d = I_0^2 \cdot (R_{ds}(on) \cdot K) \cdot D + 0,5 \cdot VI \cdot I_0 (T_r + T_f) \cdot f_s \quad (3.5)$$

- $P_d$ : Potencia disipada por el transistor MOSFET.
- $I_0$ : Corriente de salida nominal.
- $VI$ : Tensión de entrada de alimentación.
- $R_{ds}(on)$ : Resistencia de drenaje-fuente en estado de conducción del MOSFET.
- $T_r + T_f$ : Tiempo de conmutación total del MOSFET (tiempo de subida y tiempo de bajada). Asumiendo que el circuito de excitación es adecuado para efectuar tiempos de conmutación de de:  $T_r + T_f = 282ns$ . Se ha adoptado tiempos mayores comparados a los disponibles del MOSFET de  $T_r = 110n$  y  $T_f = 92n$ .
- $K$ : Factor de ajuste de  $R_{ds}$  del MOSFET por efectos de la temperatura. Como adoptamos una temperatura ambiente de  $55^\circ C$  y suponiendo el peor de los casos, en que la  $R_{ds}$  se incrementa un 60% al alcanzar esta temperatura, entonces  $K$  es igual a 1,6.
- $D$ : Valor estimativo de PWM, adoptamos el valor de 3KHZ.

Para mantener un margen de seguridad sumamos a la  $I$  nominal un 20%:

$$I_0 = I_{nominal} \cdot 1.2 = 4 \cdot 1.2 = 4.8 \text{ Amp}$$

$$P_d = 4,8^2 \cdot (0,028 \cdot 1,6) \cdot 1 + 0,5 \cdot 12 \cdot 4,8 (282 \cdot 10^{-9}) \cdot (3 \cdot 10^3)$$

$$P_d = 1,056558W$$

Verificación de la necesidad de utilizar o no un disipador, con una temperatura ambiente de  $55^\circ C$ :

$$T_j = T_a + (\theta_{ja} \cdot P_d) = 55 + (62 \cdot 1,056558) = 120,51^\circ C$$

Como la temperatura de juntura calculada no supera a la temperatura de juntura máxima de  $175^\circ C$ , no hace falta un disipador de calor.

Por lo tanto el actuador electrónico podrá trabajar a una corriente de 4A sin la necesidad de un disipador, pero por cuestiones de diseño a futuro se calcula un disipador para corrientes mayores a 4A. Se calcula la potencia disipada del transistor para una corriente nominal de 10A.

$$P_d = 10^2 \cdot (0,028 \cdot 1,6) \cdot 1 + 0,5 \cdot 12 \cdot 10 (282 \cdot 10^{-9}) \cdot (3 \cdot 10^3)$$

$$P_d = 4,5W$$

Verificación de la necesidad de utilizar o no un disipador, con una temperatura ambiente de  $55^{\circ}\text{C}$ :

$$T_j = T_a + (\theta_{ja} * P_d) = 55 + (62 * 4,5) = 334^{\circ}\text{C}$$

Como la temperatura de junta calculada supera a la temperatura de junta máxima de  $175^{\circ}\text{C}$ , hace falta un disipador de calor.

Cálculo de la resistencia térmica del disipador:

$$T_j - T_a = P_d \theta_{ja} = P_d (\theta_{jc} + \theta_{cd} + \theta_{da})$$

Adoptamos una temperatura de junta de compromiso de  $T_j = 130^{\circ}\text{C}$ .

Con este dato,  $T_j$ , calculamos la temperatura de carcasa para su posterior verificación en la curva de la figura (3.9) :

$$T_c = T_j - (\theta_{jc} * P_d) = 130 - 1 * 4,5 = 125,5^{\circ}\text{C}$$

Verificamos en la curva la potencia máxima de disipación disponible en el MOSFET para esta temperatura de carcasa de  $125,5^{\circ}\text{C}$  para una temperatura de junta de  $130^{\circ}\text{C}$ .

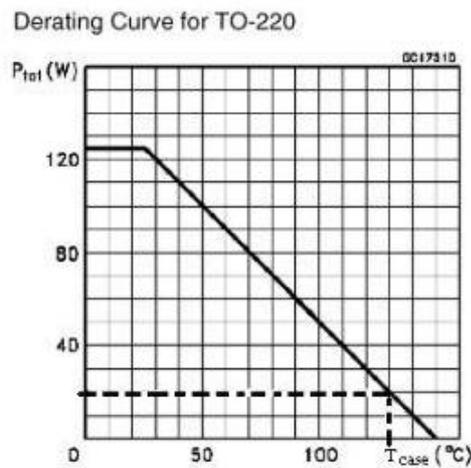


Figura 3.9: Curva de Potencia vs Temperatura Carcasa [6]

Se observa que la potencia de disipación máxima admisible es de aproximadamente 20W, la cual es mucho mayor a la potencia de disipación calculada de 4.5W. Entonces la temperatura de junta adoptada de  $130^{\circ}\text{C}$  es adecuada.

Cálculo de la resistencia térmica del disipador:

$$\theta_{da} \leq \frac{(T_j - T_a) - P_d * (\theta_{jc} + \theta_{cd})}{P_d} = \frac{(130 - 55) - 4,5(1 + 0,5)}{4,5} = 15,17^{\circ}\text{C}$$

Este valor de resistencia térmica sugiere que sólo hace falta un disipador de pequeñas dimensiones como la indicada en la siguiente figura:

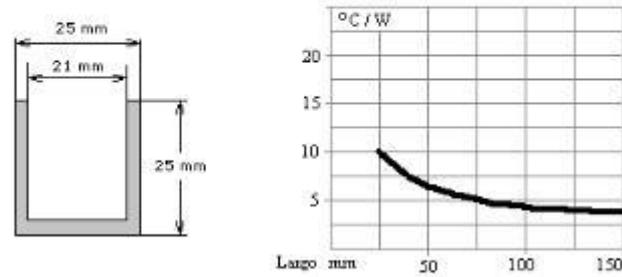


Figura 3.10: Resistencia térmica en función de la longitud y perfil transversal del dissipador [6]

### Diseño del generador de onda triangular

La frecuencia de operación de la señal PWM se estableció aproximadamente en 3 KHz. Cabe señalar que este valor de frecuencia es dada debido a que el sistema requiere una respuesta inmediata para la variación del campo magnético en el electroimán, además que esta frecuencia determina el tiempo en que el transistor de potencia se va encontrar en corte o en saturación. Por ello se debe seleccionar un tiempo adecuado conforme a las respuestas de cada una de las etapas del sistema. Aproximando los valores picos de la onda triangular a 4 V, se puede calcular los valores de las resistencias R1, R2 y R3 y del condensador C con la ecuación (2.11).

Se calcula primero la relación de  $\rho$  de las resistencias R3 y R2, las cuales controlan los voltajes de salida pico de la onda triangular  $V_{UT}$  y  $V_{LT}$ . El voltaje de saturación positiva  $+V_{sat}$  es aproximadamente 11.2 V y el valor común de  $-V_{sat}$  es de -10.8 V para una fuente de alimentación de  $\pm 12V$ . De la ecuación (2.8) se resuelve para  $\rho$ :

$$\rho = -\frac{-V_{sat}}{V_{UT}} = -\frac{10,8V}{4V} = 2,7$$

Se elige  $R = 100K\Omega$ . Ahora resolvemos la ecuación (2.10) para R3, de la siguiente manera:

$$R3 = (\rho)R2 = 2,7(100K\Omega) = 270K\Omega$$

Luego se elige el valor de R1 y C. Primero se escoge un valor tentativo para  $C = 22nF$ . Por último se calcula el valor de R1 de la ecuación (2.11):

$$R1 = \frac{\rho}{4fC} = \frac{2,7}{4(3000HZ)(22nF)} = 10,23K\Omega$$

Aproximando a valores comerciales tenemos:

$$C = 22nf$$

$$R1 = 10 k\Omega$$

$$R2 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R3 = 330 \text{ k}\Omega$$

$$f = \frac{R3}{4R2R1C}$$

Reemplazando los valores comerciales

$$f = \frac{330 \text{ k}\Omega}{4 * 100 \text{ k}\Omega * 10 \text{ k}\Omega * 22 \text{ nF}}$$

Resultando la frecuencia de operación aproximadamente 3.75 KHz.

Dado a que la señal de onda triangular debe estar formado por voltajes picos positivos, fue necesario establecer un voltaje de referencia positivo. De esta manera se logra desplazar la señal de onda triangular hacia el eje de los voltajes positivos. El voltaje de referencia es obtenido del resultado de un divisor de voltaje de 12V como se puede observar en la figura (3.11).

Este voltaje de referencia se da debido a que en la comparación con la señal de voltaje de control, el resultado de la modulación por ancho de pulso PWM debe ser positivo para lograr un control adecuado del conmutador electrónico de potencia.

Posteriormente se utilizó un amplificador inversor para obtener una mayor amplitud de la onda triangular y de este modo lograr un mayor rango de comparación con la señal de voltaje de control. En donde se utilizó un potenciómetro el cual permite variar la ganancia del amplificador.

En la siguiente figura se muestra el diseño del circuito generador de la señal triangular positiva.

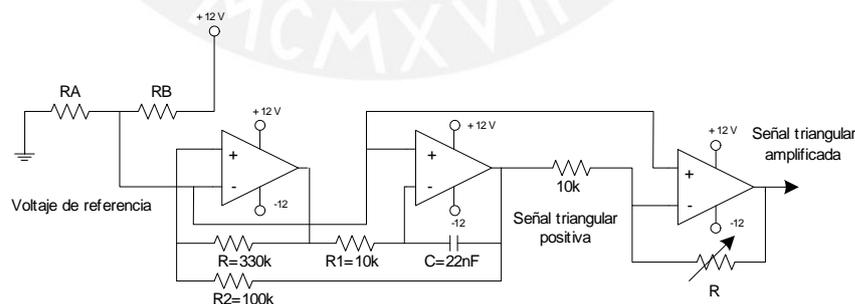


Figura 3.11: Diseño del generador de onda triangular

### Diseño del convertidor de corriente a voltaje

Para el diseño del convertidor I-v se utilizó los amplificadores operacionales en configuración de amplificador no inversor. La señal de corriente variable de 4-20mA es puesta en paralelo con una resistencia para su previa conversión a voltaje, para luego ingresar a un circuito seguidor

para eliminar efectos de carga. El amplificador no inversor incrementa el valor del voltaje ingresado, cuyo valor es regulado con un potenciómetro, como se puede apreciar en la figura (3.12).

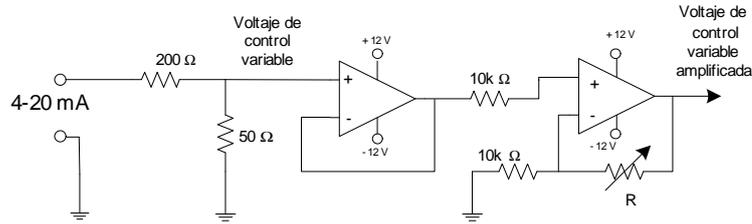


Figura 3.12: Diseño del convertidor de corriente a voltaje

### Diseño del generador de la señal PWM

En la comparación de la señal triangular y la señal dada por el convertidor de corriente a voltaje se obtiene la señal PWM. La comparación de estas dos señales se realiza con un amplificador operacional mediante su configuración como comparador. A continuación la figura (3.13) muestra el diseño del generador de la señal PWM.

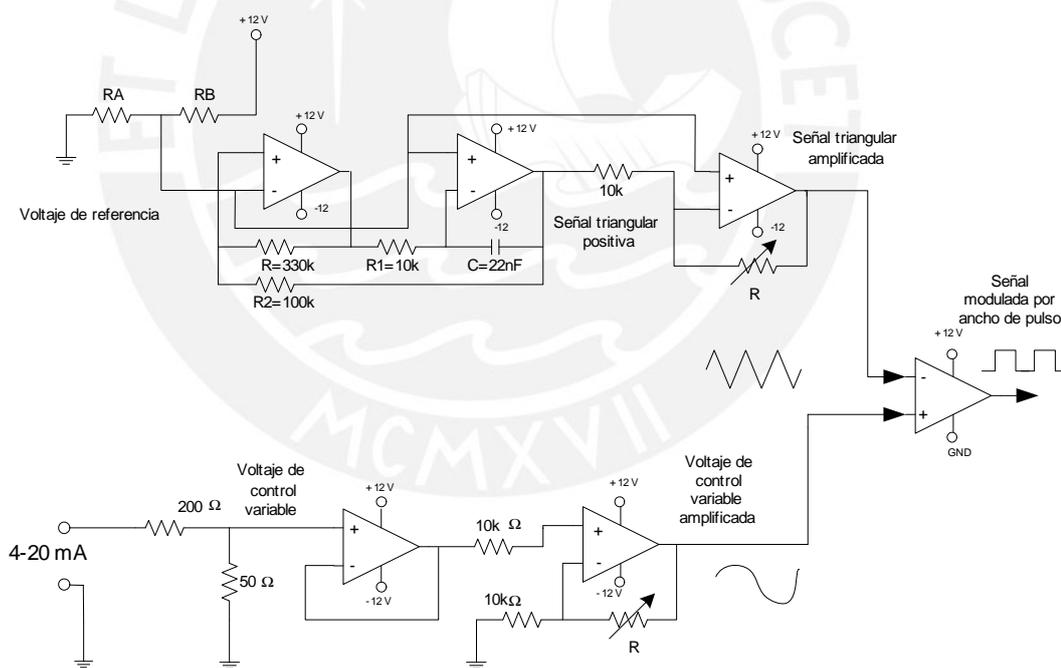


Figura 3.13: Diseño del generador de la señal PWM

### 3.3.1. Simulación del actuador electrónico por software

Luego de realizar el diseño del actuador electrónico, se analizó su funcionamiento a través de un programa de simulación de circuitos electrónicos. Para ello se utilizó el programa Electronics Workbench 5.12 de la National Instruments, el cual es un software capaz de simular circuitos

digitales o electrónicos a través de un laboratorio virtual compuesto por varios paneles donde se ofrecen instrumentos para el diseño de dispositivos electrónicos.

Se realizó mediciones en los puntos de entrada del comparador, tanto para la señal triangular como para la señal de voltaje variable cuya respuesta a esta comparación se observa en la figura (3.14).

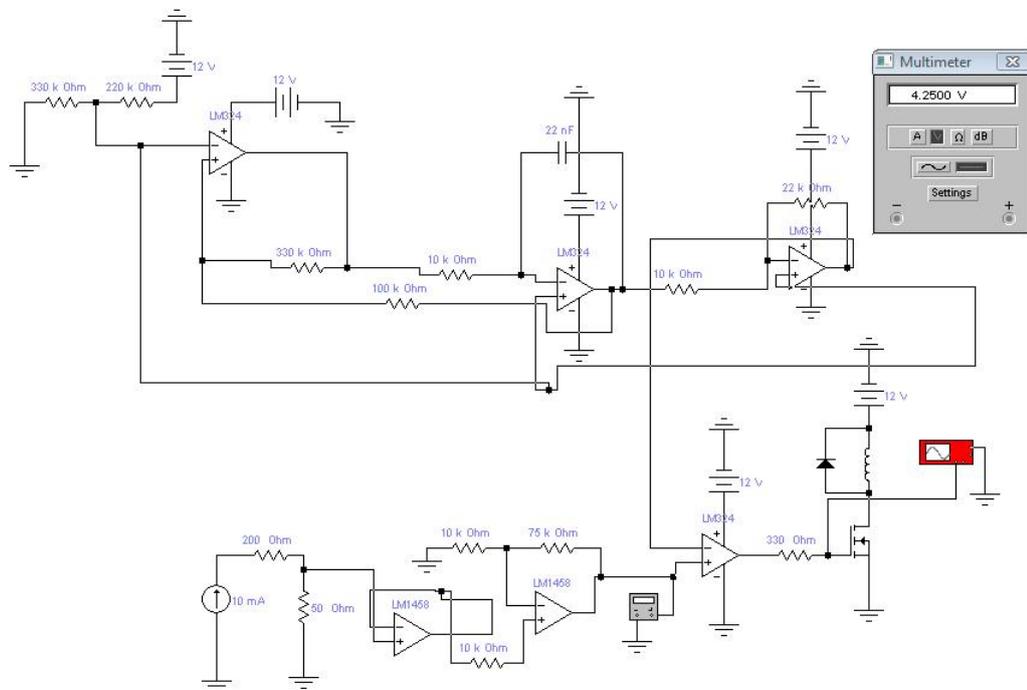


Figura 3.14: Simulación del actuador electrónico en Electronic Workbench

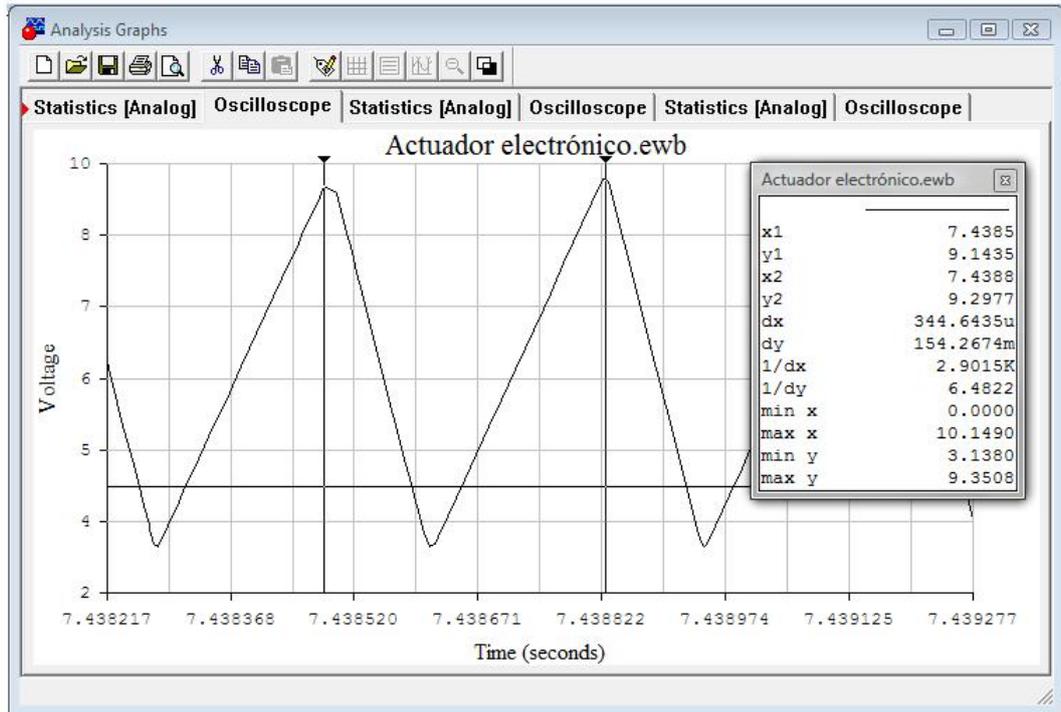


Figura 3.15: Comparación de la señal triangular y el voltaje de control en simulación por E.Workbench

Finalmente a la salida del comparador se obtiene la señal modulada por ancho de pulso PWM. Esta señal se aproxima a los diseños realizados previamente, por lo que será de importancia para el momento de la implementación. Se ajustaron algunos valores de resistencia, esto se hizo debido a que se requiere ajustar la señal de control de 4-20mA, para lograr con 4mA un ciclo de trabajo de 0% y con 20mA un ciclo de trabajo 100% de la PWM.

En esta forma de control todo o nada, el MOSFET de potencia trabaja únicamente en corte y saturación, función de interruptor, activándose de acuerdo al ciclo de trabajo dado por la señal PWM.

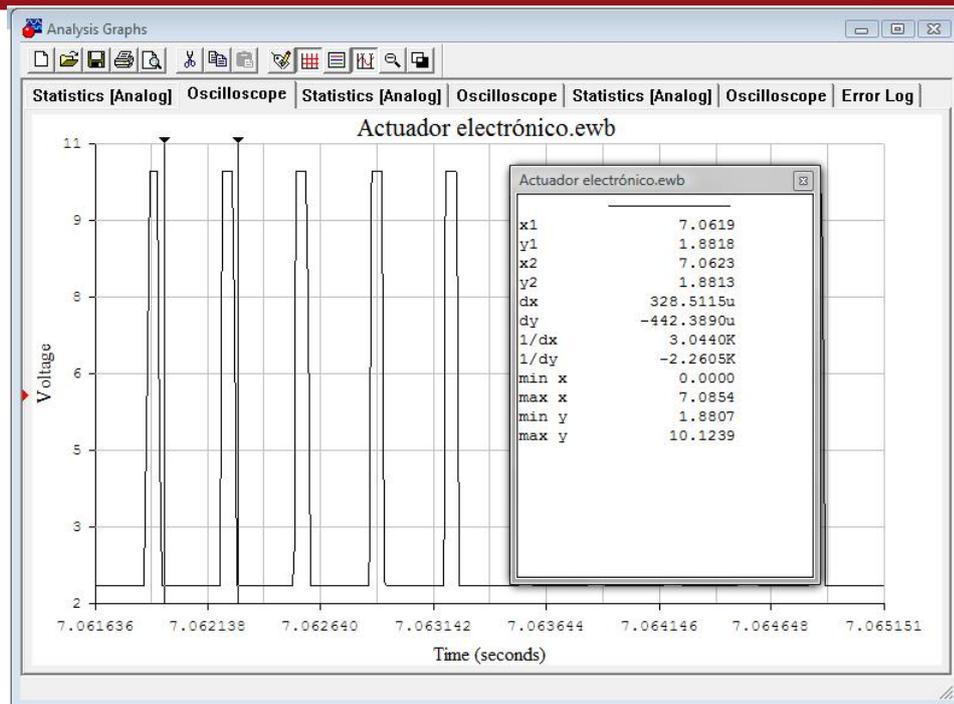


Figura 3.16: Señal modulada por ancho de pulso en la simulación por E.Workbench

### 3.4. Implementación del actuador electrónico por PWM

En esta parte del capítulo se muestra la implementación de la tarjeta electrónica del actuador electrónico por PWM basándose en el diseño hallado en el capítulo 3. Se observa en la figura (3.17) el circuito completo del actuador electrónico. Como vemos este circuito electrónico involucra varios amplificadores operacionales, por lo que se consideró un mejor diseño y una simplificación del circuito. Para ello se utilizó un circuito integrado como el LM324, el cual está conformado por cuatro amplificadores operacionales en un solo encapsulado. De los cuatro amplificadores operacionales, 3 fueron usados para el generador de onda triangular y uno para la etapa de comparación de la señal triangular con la señal de control. Del mismo modo se utilizó el circuito integrado LM1458, conformado por 2 amplificadores operacionales en un solo encapsulado, para la etapa del convertidor de corriente a voltaje. El funcionamiento de este circuito electrónico se verificó previamente en la parte de la simulación del actuador electrónico como se observa en la figura (3.16).

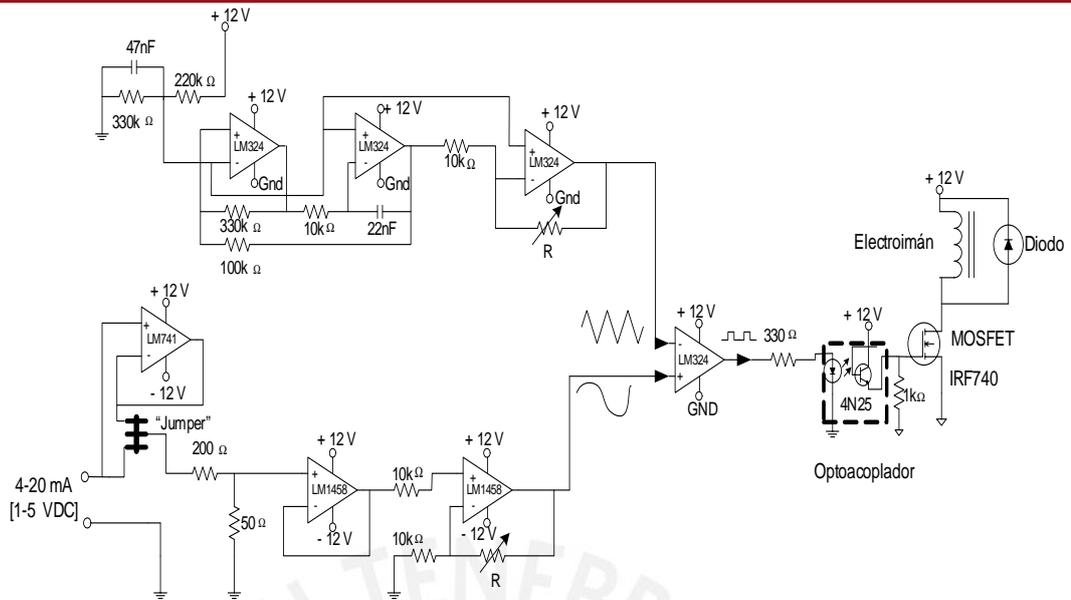


Figura 3.17: Esquema del actuador electrónico por PWM

Este circuito cuenta con la posibilidad de seleccionar la señal de control mediante la utilización de “jumper” (seleccionador). Es decir permite la entrada de una señal de control de [4-20]mA ó de [1-5]VDC. Para la entrada de 1 a 5VDC fue necesario la utilización de un seguidor de voltaje, para ello se eligió el circuito integrado LM741, conformado por un amplificador operacional. También se observa un condensador de 47nF en paralelo con el voltaje de referencia, cuya función es filtrar el ruido causado por la fuente de alimentación de 12 voltios.

En la siguiente tabla muestra la lista de componentes electrónicos utilizados para la implementación de la tarjeta impresa.

Componente	Valores
Resistencia*	330kΩ (x2), 220kΩ, 100kΩ, 10kΩ (x4), 1kΩ, 330Ω, 200Ω, 50Ω
Potenciómetro de Precisión	100kΩ(x2)
Condensador	47nF, 22nF
Circuito Integrado	LM324N
Circuito Integrado	LM1458N
Circuito Integrado	LM741
Opto acoplador	4N35
MOSFET de potencia	IRFZ44
Diodo	FR307

Tabla 3.4: Lista de componentes para la implementación del actuador electrónico

\* Todas las resistencias utilizadas son de un cuarto de vatio

### Diseño e implementación de la tarjeta impresa

Los circuitos impresos son una parte constitutiva de fundamental importancia de los sistemas electrónicos de potencia. Por ello luego de haber comprobado el funcionamiento del actuador electrónico por PWM se continuó con el diseño e implementación de la tarjeta impresa. Un punto importante es la distribución de los componentes del circuito impreso. Como criterio de diseño se tomó el que se muestra en la figura (3.18). En la misma se observa una secuencia ordenada en función de la potencia de trabajo. En todo momento se debe tratar de no mezclar señales de distinta frecuencia y potencia, evitando posibles interferencias entre ellas.

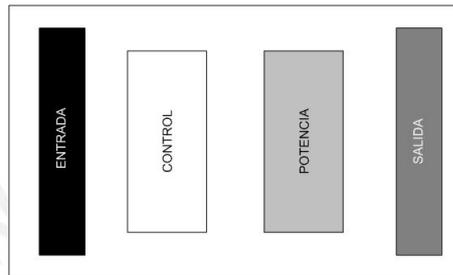


Figura 3.18: Disposición física de las etapas en la tarjeta impresa

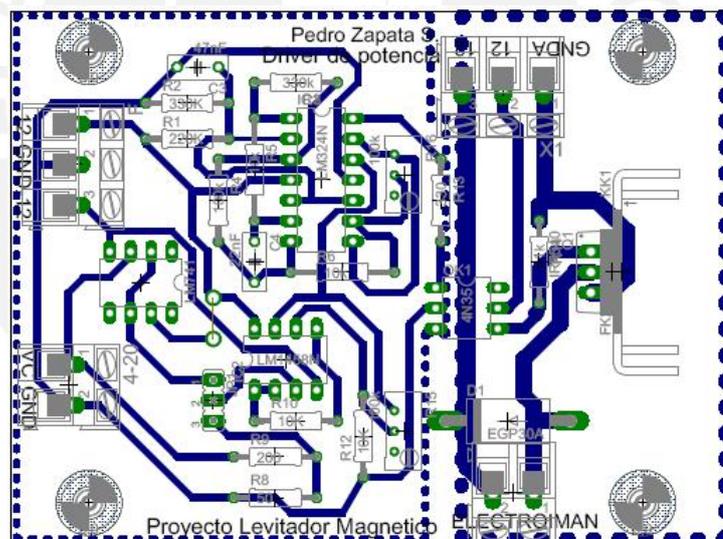


Figura 3.19: Diseño de la tarjeta impresa

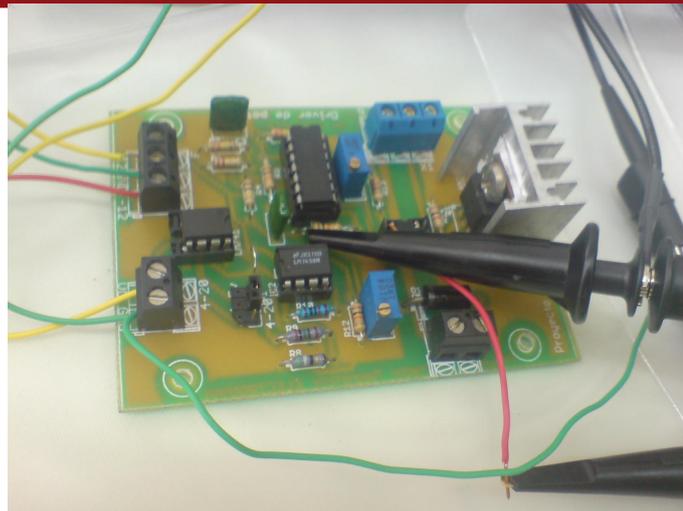
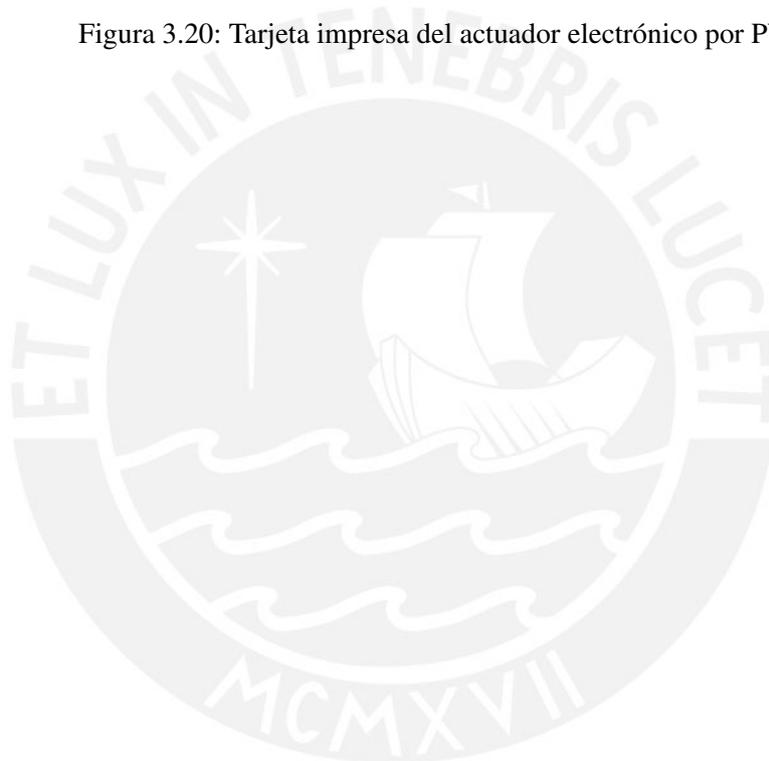


Figura 3.20: Tarjeta impresa del actuador electrónico por PWM



## Capítulo 4

# PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los sistemas de levitación magnética son complejos y requieren de diversas áreas de ingeniería y de la ciencia para su completo desarrollo. Por su naturaleza, este tipo de sistemas requieren de diversos subsistemas: Mecánicos, electrónicos, de control, y electromagnéticos. Partiendo de la descripción preliminar del módulo de levitación magnética de una esfera, estos subsistemas se encuentran ubicados dentro de las 3 etapas descritas previamente: Etapa de sensado, etapa de control y la etapa de potencia. Los cuales fueron diseñados e implementados como parte de los objetivos de cada una de las tesis desarrolladas en este sistema.

Como objetivo primordial en esta tesis, se detallará las pruebas y análisis de los resultados de la etapa de potencia. De igual forma se mostrará el diseño y construcción de la parte mecánica, el cual fue implementado en el laboratorio de manufactura del Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura (CETAM).



Figura 4.1: Módulo de levitación magnética de una esfera metálica

## 4.1. Estructura mecánica

Se consideró la conveniencia de construir un prototipo de laboratorio adecuado para realizar las experimentaciones de pruebas de levitación con una esfera metálica. Se partió de la idea más simple, se escogió un tamaño basado en las dimensiones del núcleo del electroimán y del sensor. El chasis está formado por una base y soportes de acrílicos, el cual sustenta el electroimán y el sensor. La idea básica de la estructura del prototipo se muestra en la figura (4.2).

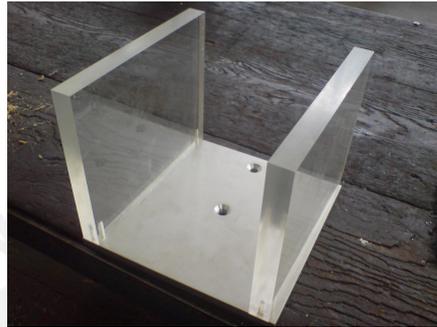


Figura 4.2: Estructura mecánica

Las especificaciones exactas de todas y cada una de las partes mecánicas del prototipo pueden consultarse en el anexo B.

### Ubicación del electroimán

El electroimán empleado es un electroimán tipo recto cilíndrico, la dimensión escogida fue vista en la etapa de diseño. La masa fue importante para la elección del material en donde se sustentará, para ello se utilizó una balanza electrónica la cual marco:

$$Masa = 750 \text{ gramos} \quad (4.1)$$

El electroimán se encuentra ubicado en la base superior del chasis. Las dimensiones exactas del electroimán se encuentra en el anexo B.

### Ubicación del sensor

Debido a las dimensiones y los requerimientos del sensor empleado, fue necesario implementar una estructura adicional para el sensor. Se construyó una caja acrílica negra con las dimensiones necesarias para que encaje el circuito receptor, en este caso un arreglo de foto diodos. La particularidad del chasis para el circuito receptor es tener una pequeña abertura donde sólo se pueda recibir el haz de luz que se genera de la fuente emisora de luz (LEDS) y no captar la luz externa, la cual podría interferir en la medición originando ruido.

En la siguiente figura se observa la ubicación del circuito emisor y receptor de la etapa de sensado.

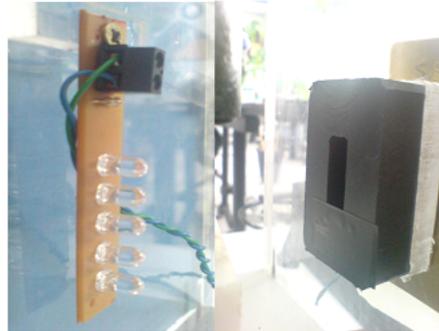


Figura 4.3: Ubicación de la estructura mecánica para el sensor y la fuente emisora de luz (LEDS)

Las dimensiones exactas de la estructura del chasis para el sensor se encuentra en el Anexo 2.

#### **Dispositivo mecánico adicional**

Se diseñó e implementó un dispositivo mecánico que permite desplazar la esfera de referencia sobre el eje vertical a fin de que se puedan realizar las pruebas de simulación para la etapa de sensado y la etapa de potencia.

El dispositivo mecánico consiste en un tornillo corrido anexado en la plataforma base del chasis, cuya función es servir como instrumento de medida de la posición de la esfera. Este instrumento permitirá desplazar la esfera en pequeñas posiciones, medidos en milímetros.

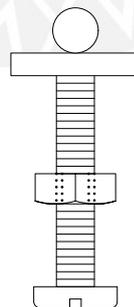


Figura 4.4: Diagrama del dispositivo mecánico adicional

## 4.2. Etapa de potencia<sup>1</sup>

Esta etapa es la encargada de amplificar la señal de control, la cual es enviada a la tarjeta de control (DSPACE DS1102). Entre las experimentaciones realizadas están: el cálculo experimental de la constante K del electroimán; comprobación del funcionamiento del actuador electrónico con una carga prueba; comprobación del sistema actuador electrónico y electroimán. En las siguientes secciones del capítulo se detalla cada una de estas pruebas experimentales.

### 4.2.1. Cálculos experimentales de la expresión de fuerza electromagnética en el electroimán

#### Medición de inductancia del electroimán

Para la medición de la inductancia del electroimán fue necesario realizar la medición de la resistencia interna del devanado. Para esto se comprobó directamente con la ayuda de un multímetro, dando como resultado

$$R = 2,6\Omega \quad (4.2)$$

lo cual está dentro del límite de diseño. El método de medición de inductancia fue sacado por el método experimental practicado en [2]. Este método parte de un circuito RL serie como se observa en la figura (4.5), con un generador de ondas se aplicó una señal senoidal, se conectó un osciloscopio de 2 canales como se indica en el esquema. Se buscó una resistencia de prueba, para este caso fue  $1k\Omega$ . Se modificó la frecuencia de la fuente hasta encontrar un desfaseamiento entre ambos canales de  $45^\circ$ , es decir entre la señal del generador y el voltaje en la inductancia. Este valor de fase indica una reactancia inductiva igual a la resistencia de prueba.

Se calculó Debido a que la resistencia de bobina es pequeña se puede despreciar su efecto al sumarse con la resistencia de prueba R.

Comparando la reactancia inductiva y la resistencia de prueba tenemos:

$$2\pi f l = R \quad (4.3)$$

Despejando L

$$L = \frac{R}{2\pi f} \quad (4.4)$$

<sup>1</sup>El desarrollo de la etapa de control se encuentra descrita en la tesis "Diseño de un controlador para un sistema de levitación magnética" realizada por Toni Trigoso.

La frecuencia hallada fue de 5.8Khz, con lo que resulta una inductancia  $L = 27.44\text{mH}$ . Se hizo una prueba adicional de validación, cambiando la resistencia a  $2\text{k}\Omega$  por lo que se calcula que la frecuencia a la cual se presenta desfase de  $45^\circ$  es de  $11,6\text{KHz}$ . Se concluye que el valor hallado es el correcto.

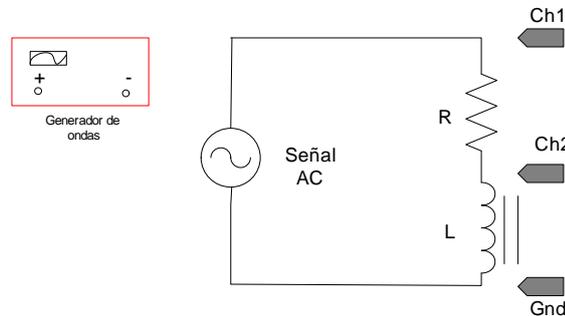


Figura 4.5: Circuito para la medición de inductancia

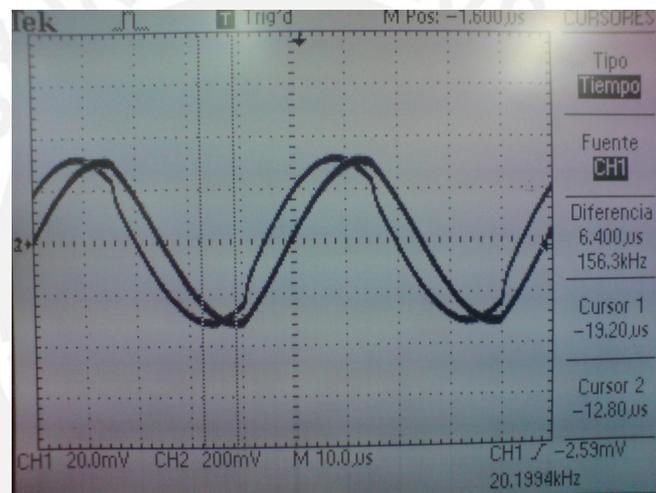


Figura 4.6: Desfasamiento de  $45^\circ$  entre ambos canales

### Análisis experimental de K

Para el cálculo de la constante K primero se obtuvo teóricamente el valor, para luego comprobarlo con el valor hallado en el método experimental. Este dato es de gran importancia para el modelado matemático del sistema de levitación en la etapa de control. Ya que para el diseño del controlador se requiere datos exactos del sistema físico, para así llegar a la respuesta deseada.

Los parámetros de este experimento se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Parámetros del sistema físico del módulo de levitación magnética de una esfera metálica

Permeabilidad magnética en el vacío	$\mu_0 = 4 * \Pi * 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$
Superficie activa en el electroimán	$A = 38 * 10^{-5} m^2$
Numero de espiras en el electroimán	$N = 600$
Aceleración gravitacional	$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$
Peso de la esfera metálica	$F = 0,3N$

La constante K se puede obtener teóricamente de la ecuación (3.2) como,

$$K = \frac{\mu_0 AN^2}{2} = 8,59 * 10^{-6} (V \frac{s}{A} m) \tag{4.5}$$

### Curva de corriente Vs distancia de sustentación

De manera experimental se obtuvo la gráfica de corriente en el electroimán y el entre-hierro. Obteniéndose para distintos valores de X el correspondiente valor i para el cual se obtiene el equilibrio de fuerzas. Como es de esperarse, los valores se aproximan a una línea recta, dado a que la ecuación teórica indica que la relación es proporcional.

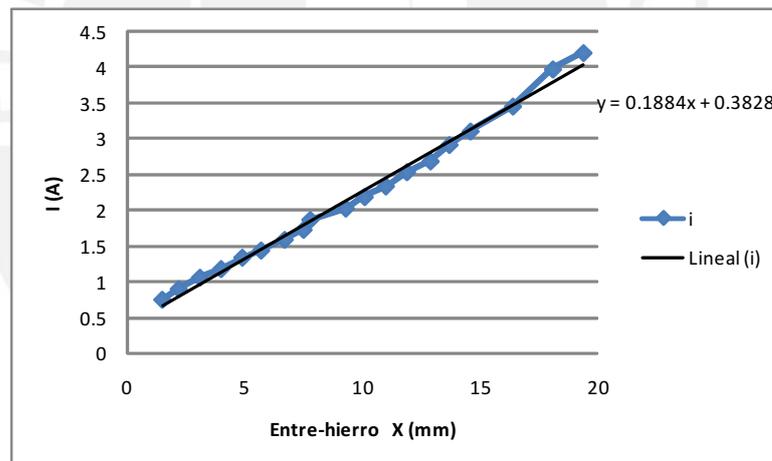


Figura 4.7: Gráfica entre-hierro Vs I de sustentación

Del gráfico podemos aproximarnos a una línea recta, en cuya ecuación lineal se destaca la relación entre la señal de corriente versus distancia de sustentación de la siguiente manera:

$$I = 0,1884X$$

dado que  $F = k \frac{I^2}{X^2}$  y como  $F = mg$  se obtiene,

$$k = \frac{mg}{\left(188,4 \frac{A}{m}\right)^2} = \frac{0,3N}{\left(188,4 \frac{A}{m}\right)^2} = 8,45 * 10^{-6} (V \frac{s}{A} m) \tag{4.6}$$

Comparando las ecuaciones (4.5) y (4.6) notamos que el valor experimental obtenido se ajusta al valor teórico, con una diferencia solo del 1.63 %. Además que la relación experimental entre el entre-hierro y la corriente de sustentación es casi lineal, lo cual está conforme a lo esperado.

#### 4.2.2. Respuesta del actuador electrónico con una carga de prueba

Para comprobar el funcionamiento del actuador electrónico por PWM, fue necesario una carga de prueba. Como carga de prueba se utilizó el arreglo diodos emisores de luz (LEDS) de la etapa de sensado. El objetivo era variar la intensidad de luz mediante el control por PWM, es decir variando el ciclo de trabajo de la señal PWM se regula la cantidad de corriente que circula por los diodos. El ensayo se realizó con la ayuda de una tarjeta de adquisición de datos, USB-6008 de la National Instrument, cuyo fabricante proporciona un programa, llamado Measurement & Automation Explorer, para la comprobación de las señales de entradas y salidas tanto analógicas como digitales del DAQ (del ingles, Data Acquisition). Se eligió una salida analógica que simule la señal del controlador, para lo cual se estableció un rango de voltaje de 1 a 5 VDC; es decir para un voltaje de 1 VDC el Actuador Electrónico PWM debe proporcionar un ciclo de trabajo de 0% en consecuencia no debe activarse el conmutador de potencia, para lo cual el arreglo de diodos emisores de luz (LEDS) deben permanecer apagados. Por lo contrario si se varía a un valor mayor de 1 VDC el actuador electrónico debe generar un ciclo de trabajo mayor del 0% por lo tanto se debe obtener energía en los diodos emisores luz (LEDS) y producir su encendido. En las siguientes figuras se muestran los distintos ensayos realizados, con la ayuda de un osciloscopio digital, en las que se observa el comportamiento del actuador electrónico por PWM a distintas tensiones de control.

En la figura (4.8) se observa la señal triangular generada por el actuador electrónico para la modulación por ancho de pulso. La misma es importante, ya que determina la frecuencia de conmutación del dispositivo de potencia, en este caso  $F_s = 2,466\text{KHz}$

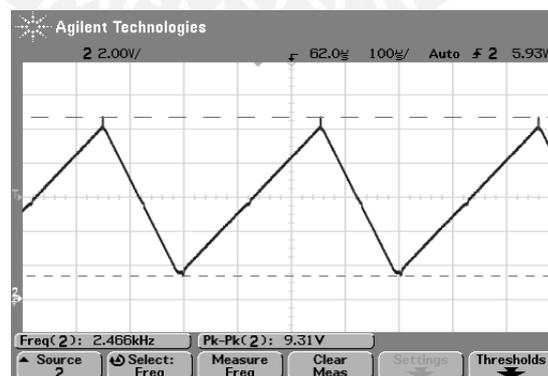


Figura 4.8: Onda triangular ( $F_s = 2,466\text{KHz}$ )

En la figura (4.9) se muestra la señal PWM y la onda triangular para una modulación del 49%.

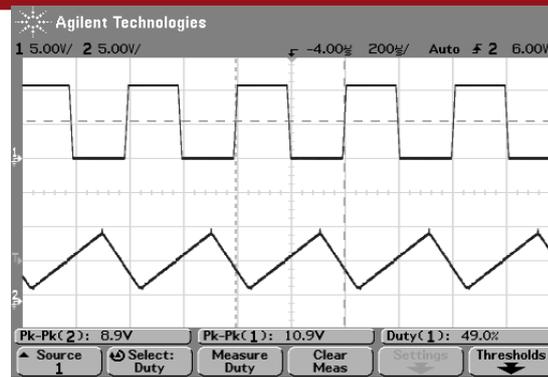


Figura 4.9: Onda triangular y la señal de la PWM con un ciclo de trabajo del 49%

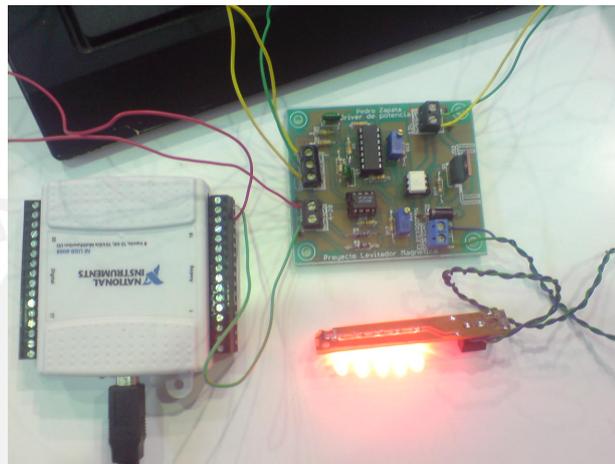


Figura 4.10: Prueba en laboratorio del actuador electrónico por PWM con los diodos emisores de luz (LEDS)

### Procedimiento de calibración del actuador electrónico por PWM

1. Con la ayuda de la tarjeta de adquisición de datos USB-6008 y el programa Measurement & Automation Explorer se genera la señal de control mínima de 1VDC.
2. Se regula el valor de resistencia con los potenciómetros de precisión, ubicados en el actuador electrónico, hasta obtener una señal modulada con el mínimo ciclo de trabajo.
3. Se genera nuevamente una señal de control de 5VDC con la tarjeta de adquisición de datos.
4. Se regula el valor de resistencia con los potenciómetros de precisión, ubicados en el actuador electrónico, hasta obtener una señal modulada con un ciclo de trabajo del 100%.
5. Se repite nuevamente todo el procedimiento hasta alcanzar el rango de trabajo esperado.

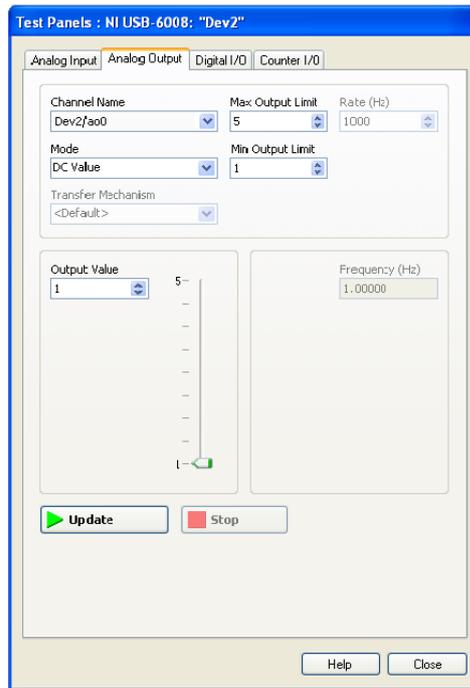


Figura 4.11: Configuración de la salida analógica del DAQ USB-6008 mediante el entorno del Measurement & Automation Explorer

En la figura 4.12 se muestra el proceso de calibración variando el ciclo de trabajo para una modulación aproximada del 0%.

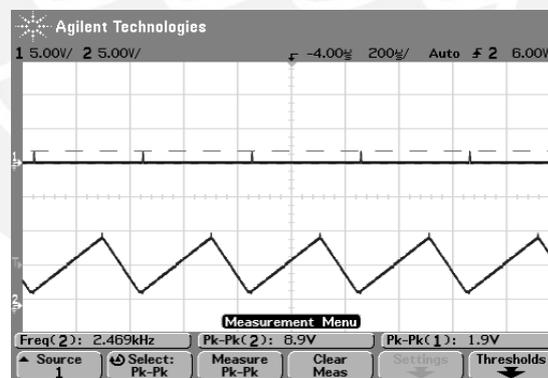


Figura 4.12: Señal triangular y la señal PWM para una modulación aproximada del 0%

En la figura 4.13 se muestra el proceso de calibración variando el ciclo de trabajo para una modulación aproximada del 100%.

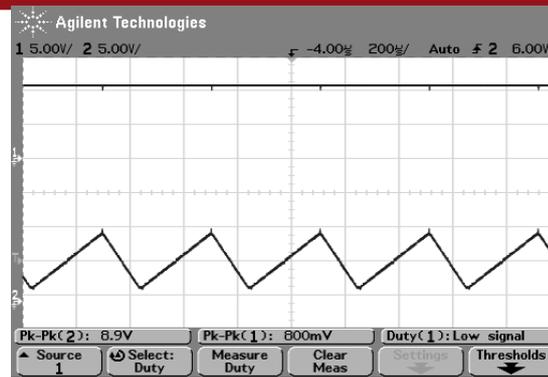


Figura 4.13: Señal triangular y la señal PWM para una modulación aproximada del 100%

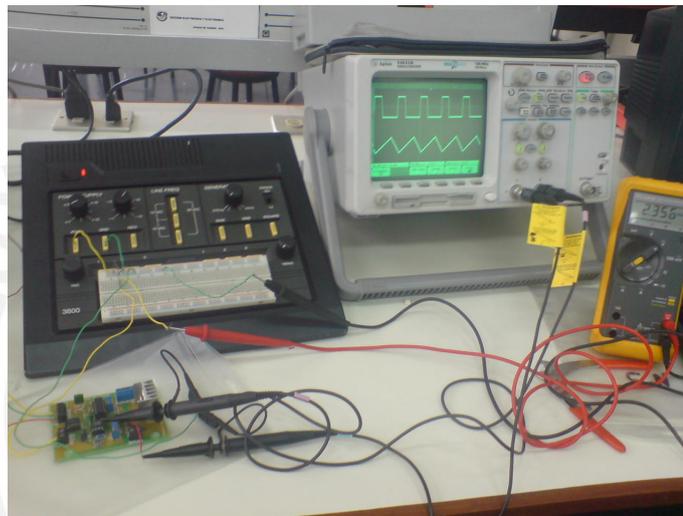


Figura 4.14: Prueba en laboratorio del proceso de calibración del actuador electrónico

### 4.2.3. Respuesta de la etapa de potencia

Para analizar el comportamiento de la etapa de potencia se alcanzó experimentalmente la caracterización de la respuesta del circuito de potencia con el electroimán. En las pruebas se logró la relación entre la señal de entrada del controlador con la corriente que circula en el electroimán. El funcionamiento se analizó como lo visto en los ensayos con los diodos emisores de luz (LEDS). Se establece el rango de voltaje de las señales de control, en la salida analógica de la tarjeta de adquisición de datos, de 1 a 5 VDC y con la ayuda del dispositivo mecánico adicional se logra realizar las mediciones de distancia de una manera precisa.

Para comenzar la toma de mediciones, se ajustó primero a la distancia máxima en la que va a ser suspendida la esfera, luego se ingresó la señal de control necesaria que ejerza la fuerza de atracción electromagnética sobre la esfera, esto se interpreta con un valor de corriente que circula sobre los devanados del electroimán. Con la ayuda de un multímetro se apuntó el valor de corriente a la cual le corresponde a dicha medida de distancia. Del mismo modo se modificó la posición a una distancia menor para obtener un nuevo resultado. Se realizaron varias

mediciones hasta alcanzar todo el rango de voltaje de control requerido. Finalmente se obtuvo la relación de señal de control contra la señal de corriente en el electroimán. Esta relación está dada por la gráfica mostrada en la figura (4.15). Esta gráfica demostró un comportamiento cercano a una línea recta, por lo que se demuestra la estabilidad en el control por PWM.

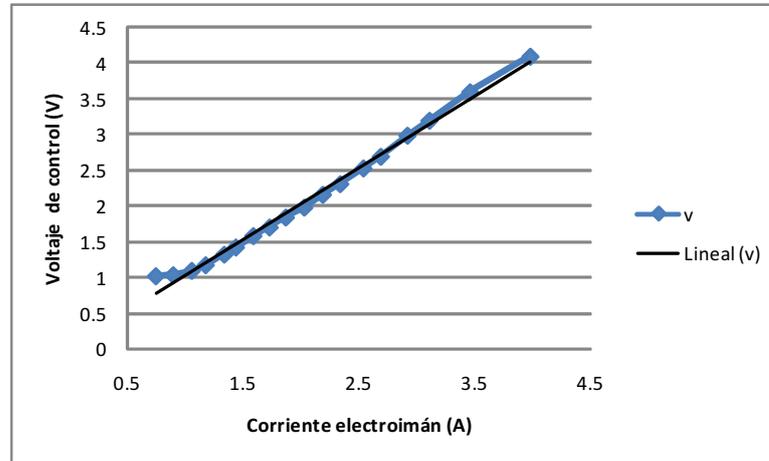


Figura 4.15: Curva de la señal de control versus corriente en el electroimán



Figura 4.16: Prueba en laboratorio de la etapa de potencia

### Consumo de energía del sistema electrónico

Dado que el valor máximo de corriente de la etapa de potencia es igual a 4,6A y un voltaje de alimentación de 12V se necesita una fuente de alimentación aproximadamente de 55,2W. La circuitería de acondicionamiento de la señal sensor y el pre-amplificado de potencia en el actuador electrónico consume un total de 1,044W, distribuido en 0,48W a 0,04A por la fuente de -12v y 0.564W a 0.047A por la fuente de +12V. El consumo máximo del actuador electrónico será de 56,24W.

### 4.3. Prueba experimental del módulo de levitación magnética

Después de concluidas las pruebas necesarias de la etapa de potencia y habiéndose observado la respuesta de las demás etapas, se puso en funcionamiento el sistema completo acoplando todas las etapas. Fue así que se realizaron 2 experimentos. Una para comprobar el comportamiento del levitador en ausencia del sistema de control y otro con la acción del sistema de control.

#### Funcionamiento experimental del modulo de levitación magnética sin sistema de control

El objetivo es comprobar cómo el levitador, en ausencia de un sistema de control, tiene un comportamiento inestable. Para ello mantendremos el controlador desconectado del sistema e intentaremos situar la esfera metálica en un punto tal que se mantenga en equilibrio.

Haciendo diversas pruebas comprobaremos cómo en posiciones excesivamente bajas la fuerza de atracción es insuficiente para vencer la gravedad y la esfera se caerá; mientras que en posiciones excesivamente altas la fuerza de atracción será superior a la de la gravedad y la esfera tenderá a elevarse.

Existirá un punto en el que las fuerzas se equilibren, pero será imposible encontrarlo exactamente. Debe quedar claro que es necesario un sistema de control.



Figura 4.17: Prueba en laboratorio del módulo de levitación magnética sin sistema de control

#### Funcionamiento experimental del modulo de levitación magnética con sistema de control

En este segundo experimento se activó el sistema de control y se observó como el comportamiento del sistema tiende a estabilizarse. Se ubicó la esfera en un punto de equilibrio, en una pequeña zona de estabilidad en el que el imán no tiene tendencia ni a elevarse ni a descender.

Una vez encontrada la zona se soltó la esfera delicadamente y se observó que es posible llegar a suspenderlo en el aire con el sistema de control actuando.

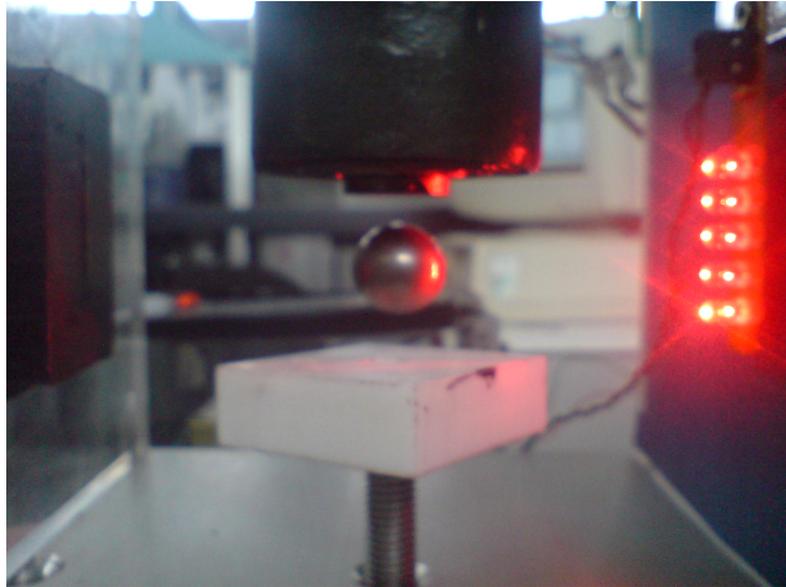


Figura 4.18: Prueba en laboratorio del módulo de levitación magnética con sistema de control

### Observaciones:

- Debido que las prácticas experimentales del módulo de levitación magnética se realizarán dentro del laboratorio del Centro de Tecnología Avanzadas de Manufactura (CETAM), fue necesario identificar las condiciones del lugar de trabajo del modulo de levitación magnética. El laboratorio del CETAM se encuentra regularmente a una temperatura de  $21^{\circ}\text{C}$ , 67 % humedad y una altitud de  $154\text{msnm}$ .
- A pesar de realizar todos los ajustes y medidas preventivas, la esfera metálica en el proceso de levitación presenta algunas vibraciones. Esto debido principalmente por efecto de la luz externa, la cual afecta a las señales de salida del sensor.

### 4.4. Costo de la implementación de la etapa de potencia<sup>2</sup>

Los costos estimados para la implementación de la etapa de potencia del sistema de levitación magnética de una esfera son:

<sup>2</sup>El CETAM apoyó con los materiales e implementación de la estructura mecánica así como la utilización de equipos electrónicos. No se incluye los costos del uso del laboratorio del CETAM.

Tabla 4.2: Costo de los materiales del electroimán

<b>Componentes para el electroimán</b>			
Cantidad	Componente	Costo por unidad (S/.)	Costo Total (S/.)
20	Metros de cable AWG 18	1	20
1	Núcleo de hierro	4	4
10	Metros de papel de pescado	0.5	5
1	Tornillo M16 con tuerca	8	8
1	Fabricación del electroimán	40	40
<b>SUBTOTAL (S/.)</b>			<b>77</b>



Tabla 4.3: Costo de la implementación del actuador electrónico por PWM

<b>Componentes para el actuador electrónico por PWM</b>			
Cantidad	Componente	Costo por unidad (S/.)	Costo Total (S/.)
2	Resistencia 330k 1/4w	0.05	0.1
1	Resistencia 220k 1/4w	0.05	0.05
1	Resistencia 100k 1/4w	0.05	0.05
4	Resistencia 10k 1/4w	0.05	0.2
1	Resistencia 1k 1/4w	0.05	0.05
1	Resistencia 330 1/4w	0.05	0.05
1	Resistencia 220 1/4w	0.05	0.05
1	Resistencia 50 1/4w	0.05	0.05
2	Potenciómetro de precisión 100k	3	6
2	Condensador	0.02	0.04
1	Circuito integrado LM324N	2	2
1	Circuito integrado LM1458N	1	1
1	Circuito integrado LM741N	1	1
1	Opto aislador 4N35	1	1
1	Mosfet de potencia IRFZ44	5	5
1	Diodo FR307	2.5	2.5
2	Borneras 2 terminales	0.8	1.6
2	Borneras 3 terminales	1.2	2.4
2	Zócalo de 4 pines por lado	0.3	0.6
1	Jumper	0.3	0.3
1	Zócalo de 3 pines por lado	0.3	0.3
1	Zócalo de 7 pines por lado	0.7	0.7
1	Disipador para encapsulado TO 220	1.5	1.5
1	Fabricación de circuito impreso	20	20
<b>SUBTOTAL (S/.)</b>			<b>46.54</b>

Tabla 4.4: Costo total del diseño electrónico de la etapa de potencia

<b>Costo Total de la etapa de potencia</b>			
Cantidad	Componente	Costo por unidad (S/.)	Costo Total (S/.)
1	Componentes para electroimán	77	77
1	Componentes para el actuador electrónico	46.54	46.54
1	Fuente de poder Switching	60	60
1	Fuente de alimentación dual de +12V y -12 V	40	40
1	Tarjeta de adquisición de datos por puerto NI USB-6008 *	551.3	551.3
SUBTOTAL (S/.)			774.84
SUBTOTAL (\$.)			<b>267.18</b>

\* Costo de la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008 fue obtenido de la casa comercial representante en Perú: Sociedad Inducontrol Ingeniería SAC (Perú)

Tabla 4.5: Costos por honorario

<b>Costo de Desarrollo</b>		
Horas de trabajo del tesista	Costo por hora (\$)	Costo efectivo (\$)
800	10	8000
SUBTOTAL (\$.)		<b>8000</b>

Tabla 4.6: Costos de instrumentos

<b>Depreciación de los instrumentos</b>					
Cantidad	Instrumento	Costo (\$)	Vida Útil (años)	Tiempo uso (meses)	Costo efectivo (\$)
1	Osciloscopio	1000	5	3	50
1	Multímetro	200	5	6	20
1	Computador del CETAM	500	4	8	83.33
SUBTOTAL (\$.)					<b>153.33</b>

Tabla 4.7: Costo de programas

Lista de programas					
Cantidad	Instrumento	Costo (\$)	Vida útil (años)	Tiempo uso (meses)	Costo efectivo (\$)
1	Windows vista	150	3	8	33.33
1	Microsoft Office	150	3	8	33.33
1	Eagle 5.2	100	3	4	11.11
1	Electronic Workbench 5.2	100	3	4	11.11
				<b>SUBTOTAL (\$.)</b>	<b>88.88</b>

Tabla 4.8: Costo total del trabajo de tesis

<b>Egresos</b>	
Gastos del proyecto	267.18
<b>Servicios</b>	
Honorarios profesionales	8000
<b>Bienes de capital</b>	
Instrumentos	153.33
Programas	88.88
<b>TOTAL (\$)</b>	<b>8509.39</b>

## Conclusiones

- El electroimán y el actuador electrónico son partes básicas que componen un sistema de levitación magnética por lo que, el diseño adecuado es de vital importancia ya que afecta directamente en el resultado de la etapa de experimentación.
- Se llegó a comprobar que el resultado  $8,45 * 10^{-6} (V \frac{s}{A} m)$ , obtenido experimentalmente del valor de la constante K del electroimán, se aproxima al valor hallado teóricamente igual a  $8,59 * 10^{-6} (V \frac{s}{A} m)$ .
- El uso de programas de simulación de circuitos eléctricos permitió poner a prueba el diseño del actuador electrónico, en un entorno virtual, para la verificación de su funcionamiento previo a su implementación. A diferencia del entorno real, en el que la instrumentación es escasa, en el laboratorio virtual dispone de una librería de instrumentos prácticamente inagotable: multímetro, osciloscopio, etc. La instrumentación virtual se comporta de modo idéntico a la instrumentación real. A menudo, incluso, los instrumentos virtuales funcionan mejor que los instrumentos reales, porque son instrumentos ideales que obedecen a las leyes físicas para representar las magnitudes que miden y están libres de los desajustes debido a los desgastes y a los efectos del entorno.
- Los elementos que conforman el actuador electrónico por PWM determinan en gran parte la calidad de las señales medidas y observadas. Pruebas con resistencias y condensadores de baja calidad dieron lugar a visualizar que la frecuencia, hallada de 3.75 KHz en la etapa de diseño, no es exacta a la frecuencia real medida en el osciloscopio de 2.469 KHz. Si se requiere alcanzar a los valores exactos es necesaria la selección de componentes de alta calidad que permitan obtener valores con una gran precisión.
- Se comprobó experimentalmente que el comportamiento del actuador electrónico por PWM con una carga prueba, como la fuente emisora de luz, es similar con el electroimán. Con la ayuda de un multímetro digital se registró la variación de la potencia en el electroimán frente a los cambios dados en la señal de entrada.
- Con el control por PWM, no es posible obtener una relación entre la masa de las esferas y el ciclo de trabajo, puesto que el ciclo de trabajo nunca es estabilizado en un valor determinado, siendo variado por el controlador.
- Finalmente se logró un gran avance con la implementación del módulo de levitación magnética. Se deja un prototipo en el CETAM, con la finalidad de obtener un sistema

experimental que sea útil en aplicaciones de enseñanza e investigación dentro del área de control y la automatización.



## Recomendaciones

- La inclusión de técnicas como elementos finitos en el diseño de los circuitos magnéticos de las máquinas es indispensable. Aunque trabajar con valores de densidad de campo magnético constante que conlleven a la suposición de la generación de fuerzas constantes sea una aproximación en la mayoría de los casos, no lo es para la optimización de una máquina en la cual se deban trabajar los materiales hasta el límite diseñando sobre el codo de saturación para obtener los mejores resultados.
- En el presente trabajo no fue posible hacer un estudio detallado de la influencia y del recorrido del campo magnético que se genera en el electroimán, lo cual sería primordial en un dispositivo comercial, para el cumplimiento de la normatividad referente a la contaminación electromagnética y especialmente ante los posibles efectos que los campos magnéticos puedan tener sobre la vida humana y el medio ambiente.
- Para la elección del tipo de actuador electrónico del sistema, se eligió por PWM debido a que presenta ventajas frente a otras como por ejemplo el control por corriente. En este caso presenta la desventaja de sobrecalentamiento en la etapa de potencia, causada por la aplicación continua de corriente sobre el electroimán.
- Para la construcción del modulo de levitación magnética es necesario la selección de material rígido y no magnetizable.

## Bibliografía

- [1] V. C. O. Douglas C Giancoli, *Física: Principios con aplicaciones*. Pearson Educación, 2006.
- [2] G. k. Toledo Ramírez, *Diseño, construcción y control de una plataforma de levitación magnética*. Tesis de maestría, CINVESTAV, IPN (Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional de México), 2002.
- [3] R. B. G. Robert F . Coughlin, Frederick Driscoll, *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*. Pearson Educación, 1999.
- [4] E. Maset, *Introducción a los sistemas de potencia*. Universidad de Valencia, 2006.
- [5] G. A. R. Robredo, *Electrónica básica para ingenieros*, primera edición ed. Gustavo A. Ruiz Robredo, 2001.
- [6] M. M. Civoric, *Electrónica fundamntl: dispositivos, circuitos y sistemas*, segunda ed. Reverte, 2004.
- [7] H. D.vallejo, “Cálculo simplificado de transformadores,” *Saber electrónica*, mayo 2009.
- [8] F. Costantini, *Aerogenerador de levitación magnética*, Std., Rev. Fecha de consulta: 10/09/2008, 2007. [Online]. Available: <http://axxon.com.ar>
- [9] A. S. o. M. Kouresh Danai, *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, illustrated ed. American Society Of Mechanical Engineers, 2007.
- [10] P. home page, *Pantech con levitación magnética*, Std., Rev. Fecha de consulta: 10/09/2008, 2007. [Online]. Available: <http://www.pantech.com>
- [11] V. Román, *Desarrollan corazones artificiales con la tecnología del tren bala*, Std., Rev. Fecha de consulta: 21/11/2008, 2008. [Online]. Available: <http://www.clarin.com>
- [12] P. Francisco, *Ciencia y Tecnología en América Latina: una posibilidad para el desarrollo*. Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura y Fundación Escenarios, 2002.
- [13] A. H.Cromer, *Física en la ciencia y en la industria*, illustrated ed. Reverte, 1995.
- [14] B. Eliezer, *Electromagnetismo de la ciencia a la tecnología*, 3rd ed. Fondo de cultura economica, 1992.

- [15] A. Palazzesi, “Control de velocidad de motores cc por pwm,” *uControl*, p. 32, 2008.
- [16] G. F. M. Rodríguez, “Levitador magnético: un prototipo experimental para la enseñanza y la investigación en el área del control automático,” *III congreso internacional de tecnologías avanzadas. Universidad de Pamplona*, 2003.
- [17] A. Shackelford, J. Quemes, *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*, cuarta edición ed. Prentice Hall, 1998.
- [18] W. S. A. Heinrich Hubscher, J. Klaue, *Electrotecnia*. Reverte, 1991.
- [19] G. E. Harper, *Fundamentos de Electricidad 2: Elementos de corriente alterna*. Limusa, 1994.



# Anexo A

## Diagramas electrónicos

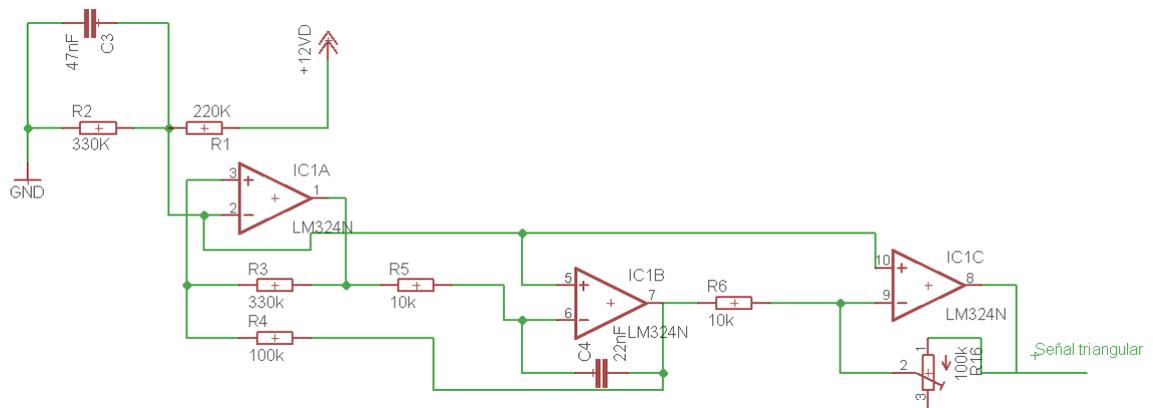


Figura 1: Diagrama esquemático del circuito generador de la señal triangular

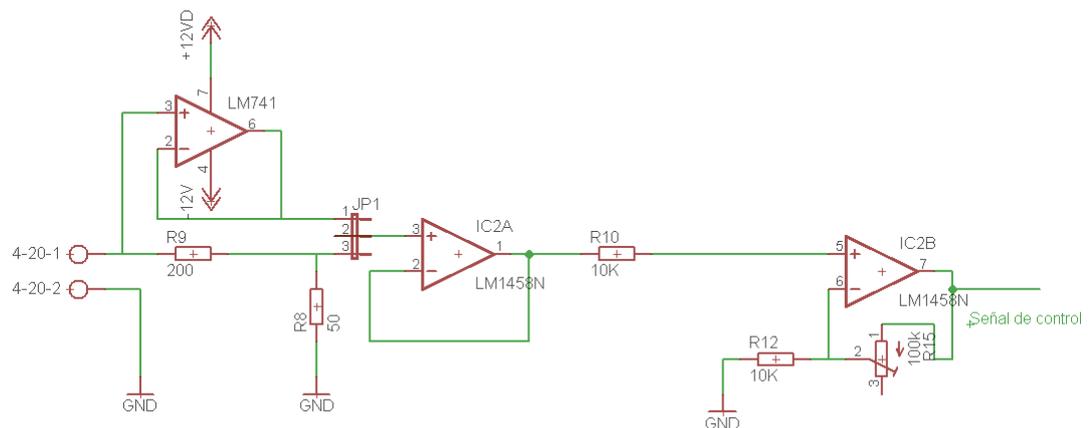


Figura 2: Diagrama esquemático del circuito acondicionador de la señal de control

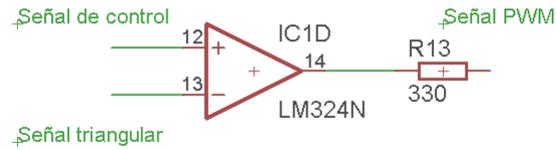


Figura 3: Diagrama esquemático del circuito del PWM

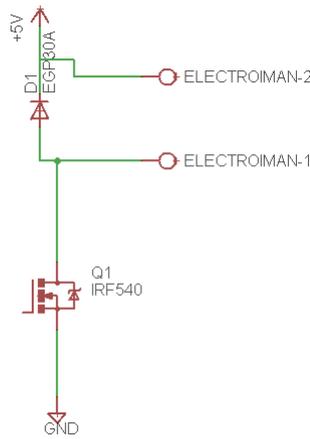


Figura 4: Diagrama esquemático del circuito de potencia

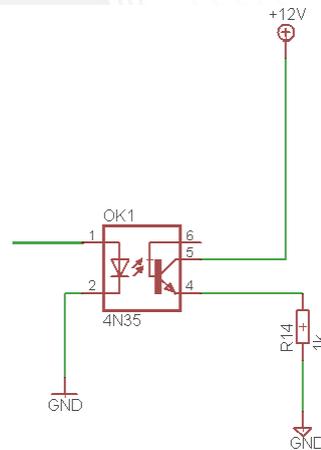


Figura 5: Diagrama esquemático del circuito aislador de potencia

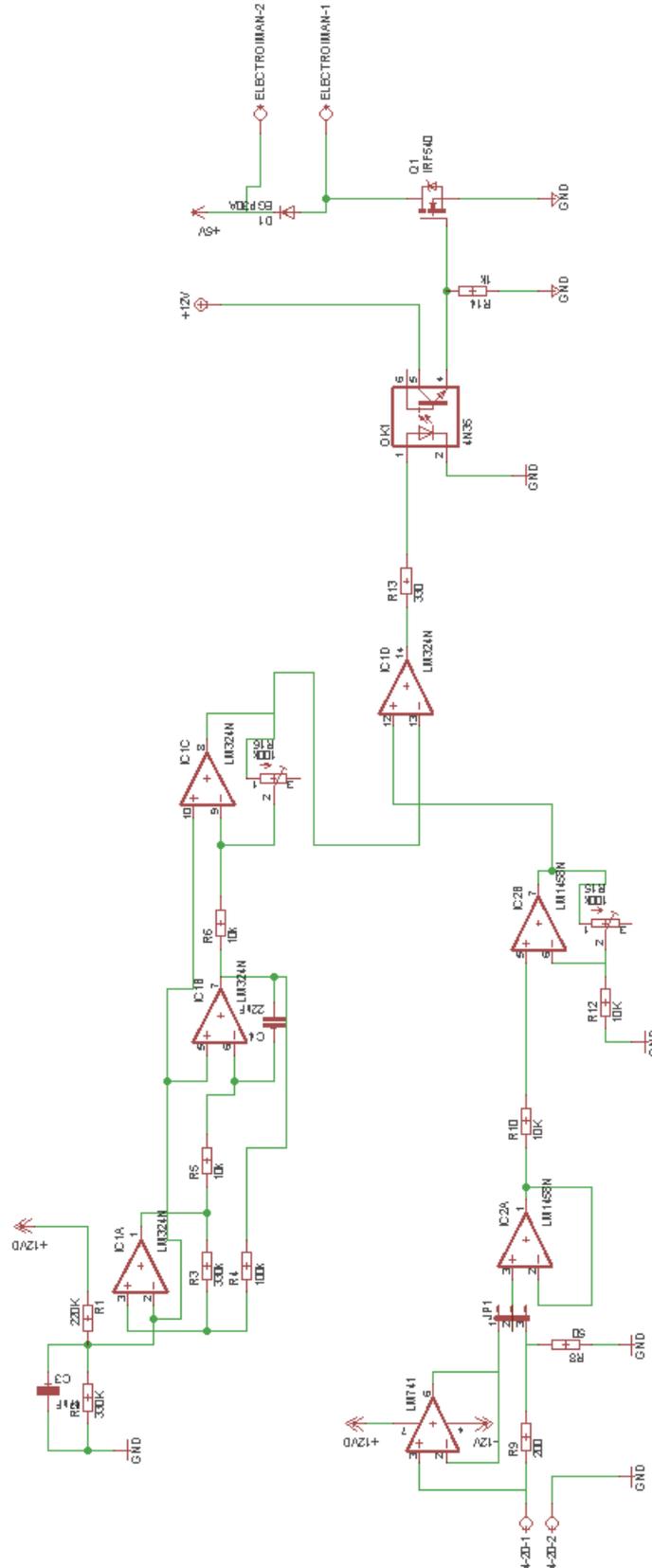


Figura 6: Diagrama esquemático del circuito actuador electrónico por PWM

## Anexo B

### Estructura mecánica

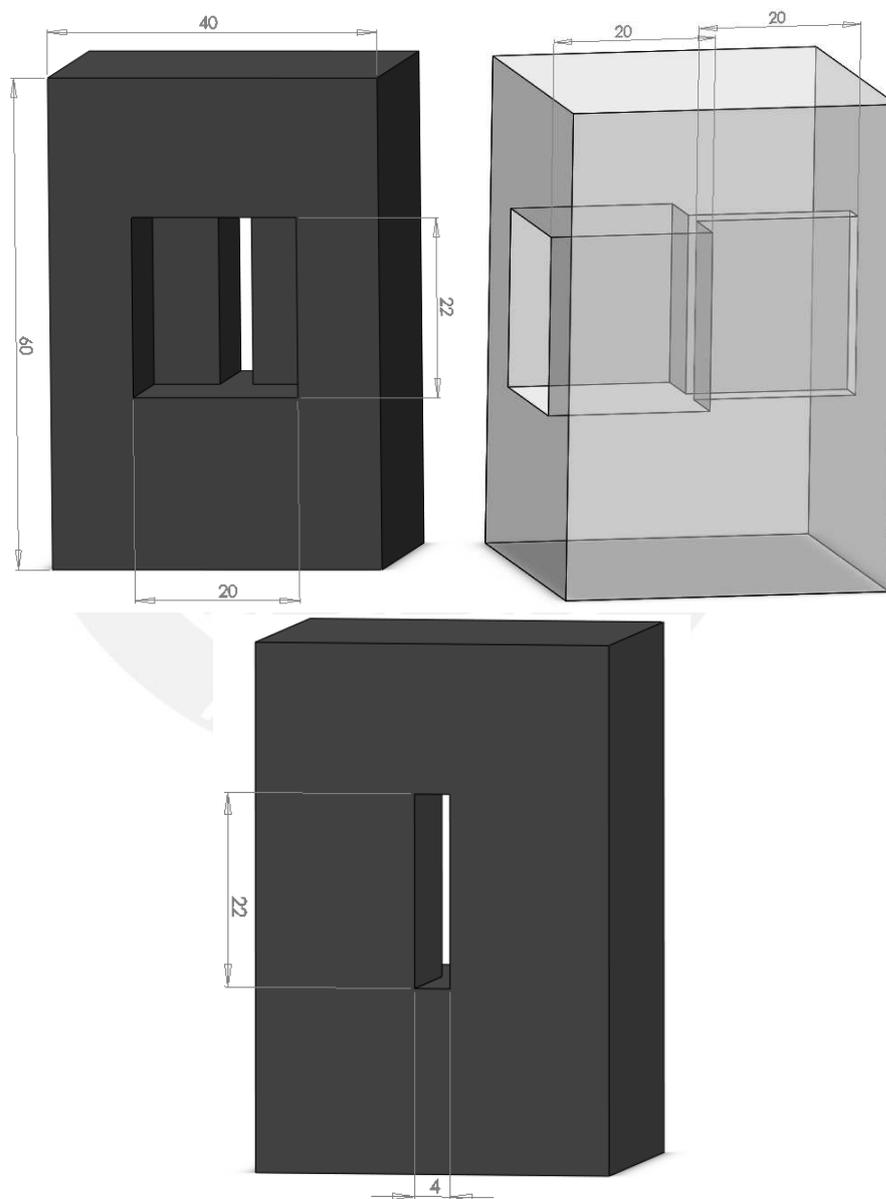


Figura 7: Empaque para el arreglo de Foto-diodos

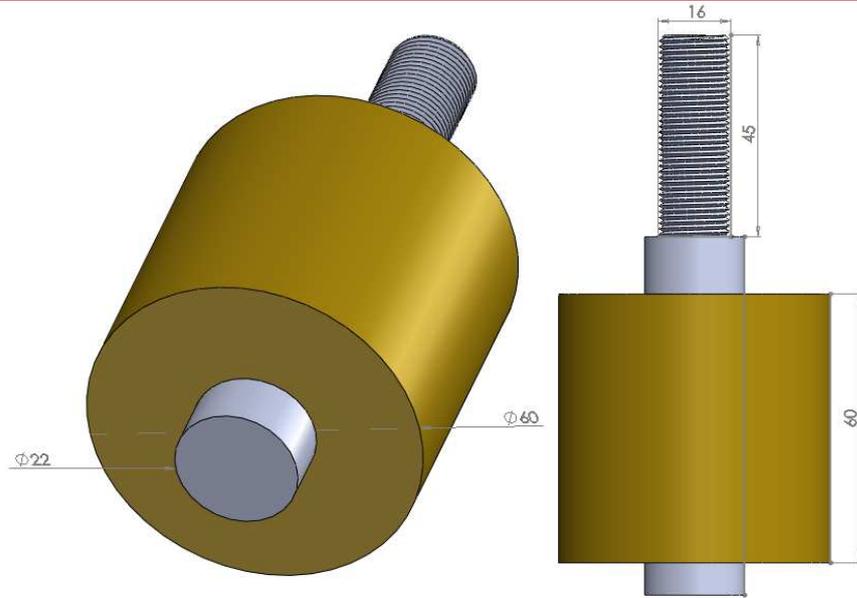


Figura 8: Electroimán

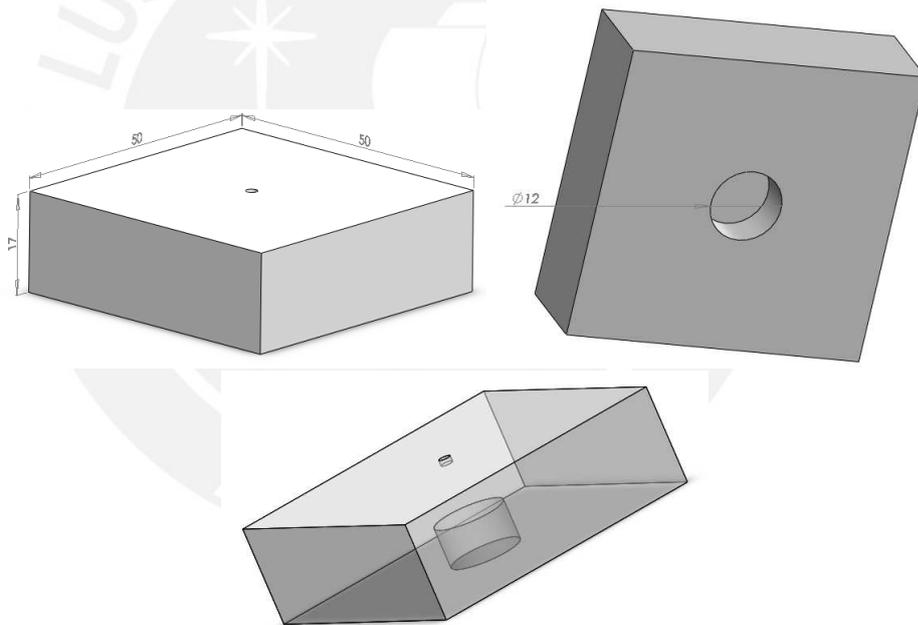


Figura 9: Bloque de soporte para la esfera

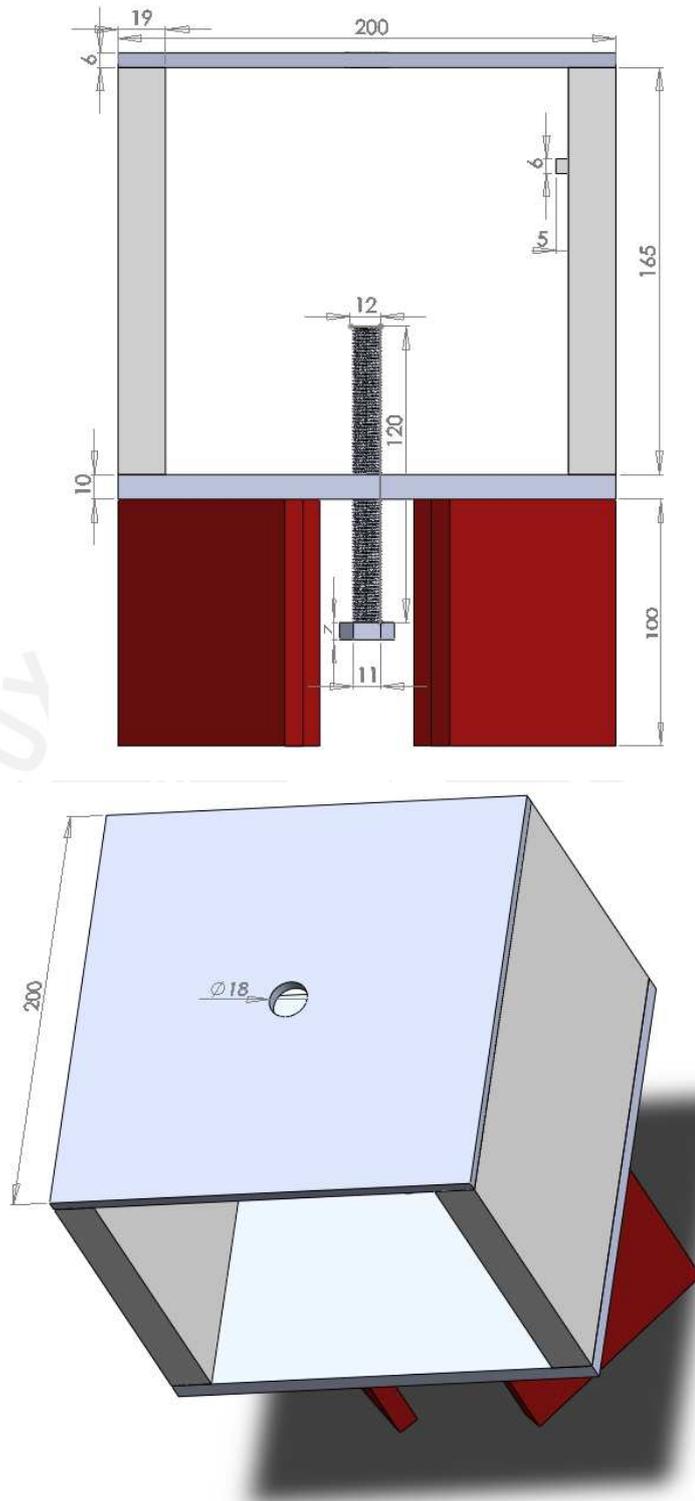


Figura 10: Chasis

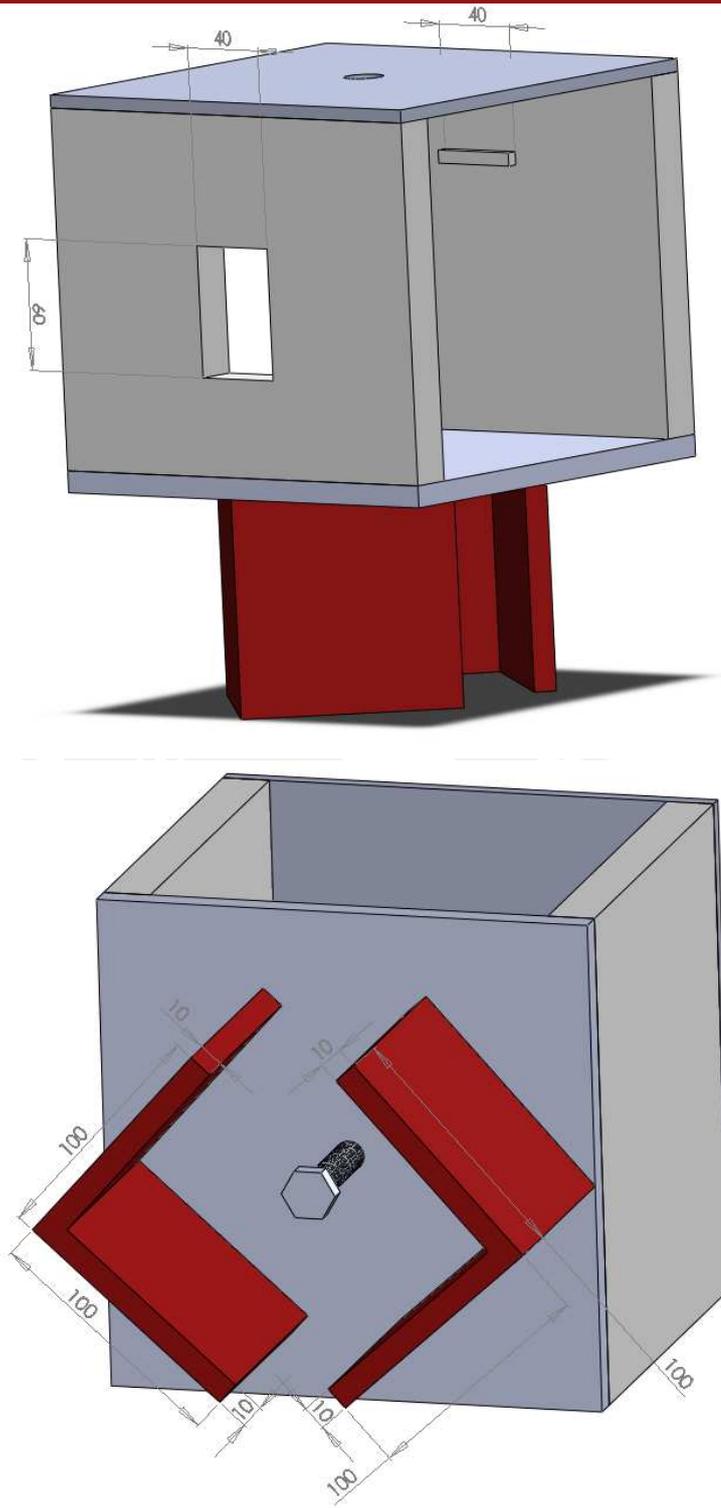


Figura 11: Chasis

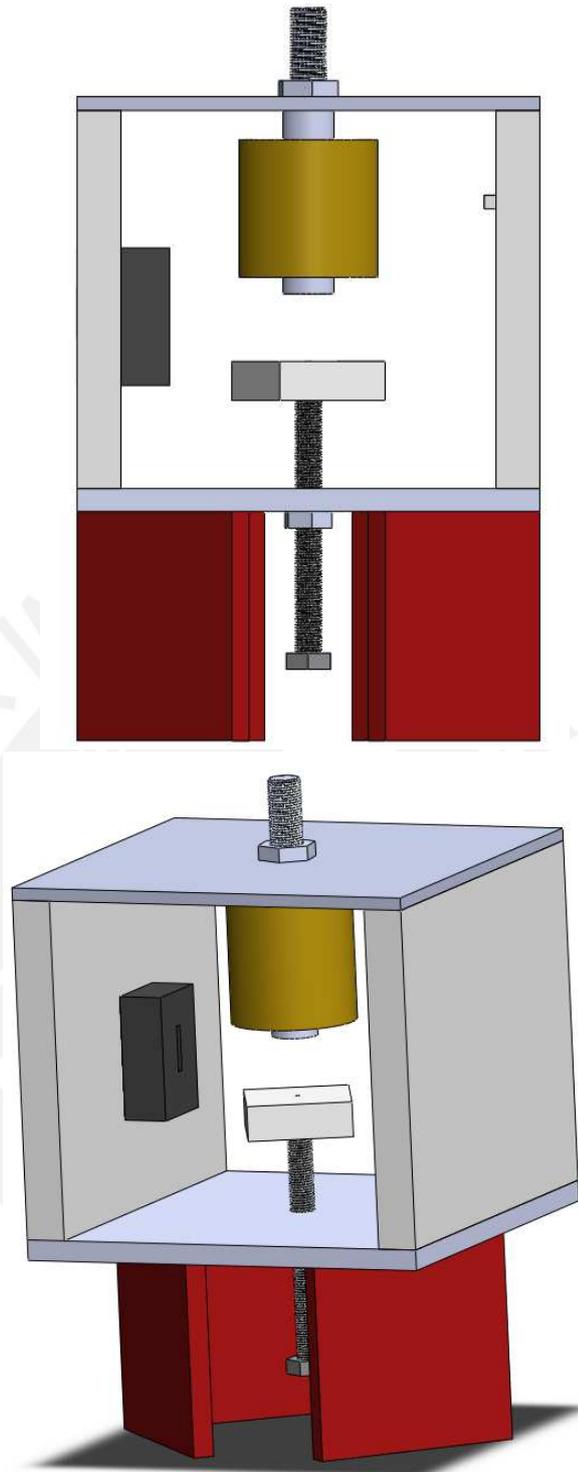


Figura 12: Módulo lecitador magnético

# Anexo C

## Hojas técnicas

