



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS  
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
SECCIÓN DE MECATRÓNICA**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL  
DE UNA PLATAFORMA DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA**

Tesis que presenta

**Gengis Kanhg Toledo Ramírez\***

para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias**

en la especialidad de

**Ingeniería Eléctrica**

Directores de Tesis:

**Dr. Martín Velasco Villa  
Dr. Rafael Castro Linares**

México, D.F. Junio de 2002

\*Ex-becario de CONACYT.



**A mis Padres,**

gracias a ustedes soy y gracias a ustedes estoy, les debo todo.

**A Susy,**

has estado conmigo en todo sin importar la distancia, llegaste a mi vida para quedarte. Gracias por tu amor, te correspondo, lo sabes ;-\*

**A mis hermanos Rommel y Germán,**

gracias por su apoyo y sus críticas alentadoras.

**A mis Amigos,**

por su interés y apoyo en mi vida.



## Agradecimientos

Es para mi una meta muy satisfactoria en mi vida obtener el grado de Maestro en Ciencias y más aún si es en el CINVESTAV, la culminación de este trabajo de tesis significa alcanzar una meta más en mi vida, una gran meta. El presente trabajo no lo hice solo, de una u otra forma decenas de personas contribuyeron a él, aún sin saberlo; esta tesis entonces, no estaría completa sin agradecer humildemente a todas estas personas.

Confieso que nunca he escrito agradecimientos, he dejado esta tarea para el momento que me sintiera emocionado por sentir cercana la obtención del grado, y el momento ha llegado. Las personas y las vivencias, el apoyo, la amistad, el compañerismo y el amor brotan en mi mente y corazón al recordar a las muchas personas que me han apoyado para la elaboración de este trabajo y la obtención de este grado.

Primero que nada agradeceré a **mis padres Rosa Marina Ramírez de Toledo y Germán Toledo Orozco** por darme la vida y dar gran parte de su vida para mi, desde hace mas de 27 años han estado a mi cuidado y aún de una u otra forma se preocupan por mi. Los amo y los quiero gracias por todo, ¡¡¡GRACIAS!!! Mi madre me enseñó los valores, el ánimo, la lucha ante la vida, la sonrisa, el amor; mi padre me enseñó el pensamiento crítico, la superación, el estudio, la lectura y el carácter, claro, ambos me enseñaron mucho más...

A mis hermanos **Rommel y Germán** les agradezco su apoyo, sus críticas y sus pláticas, si bien hemos estado lejos en los últimos años no hemos olvidado el cariño familiar y de una u otra forma estamos comunicados y compartiendo ideas.

Agradezco a **mis abuelos maternos** por su interés hacia mi, preguntan siempre por mi, por lo que hago, ¡¡¡gracias abuelos!!! También a **mis abuelos paternos** –aunque ambos ya fallecieron- les agradezco darle la vida a mi padre, un hombre que admiro, miren que no es fácil pasar de un pueblo y hablar un dialecto a tener 2 hijos profesionistas (uno exitoso y el otro quizás lo sea) y otro más en el camino con coraje e intelecto.

Si bien ya tenía el gusanito de estudiar un posgrado desde mis estudios en el Tecnológico de Veracruz, muchos compañeros y amigos ahí me alentaron para no dudarlos, gracias a **Aldrin, Oscar Utrera, Manuel Salim, Omar Alba, Guilebaldo, Loeza, Luís Reyes, Jacobo** y otros más, gracias por su compañerismo y amistad. Muchos de estos ahora ya son maestros en ciencias o están a punto de serlo.

Gracias a mis hermanos –aunque no de sangre- **Alejandro Toledo y Javier Mora**, el primero y yo tuvimos vidas paralelas por varios años, misma comparsa de carnaval, misma Prepa, misma área (exactas), mismo tecnológico, misma carrera, mismo grupo de estudio, misma microempresa, mismo lugar de residencias profesionales, mismo lugar de propedeuticos para maestría y mismos apellidos. ¡Al menos tenemos parejas distintas! **Mora**, aún no se te olvida que en primero de Prepa yo vi en ti a un estudiante sumamente capaz y te induje a las ciencias y la ingeniería, pues a mi no se me olvida que tu amistad es para toda la vida y te lo agradezco sinceramente mucho, ¡Gracias!

Los propedeuticos en el INAOE, significaron salir del hogar para buscar el conocimiento, la superación, el convívio ya no con la familia, sino con los compañeros del tecnológico, gracias a mis compañeros de aquellos momentos y en especial gracias a **Chucho**, quien me hizo saber del posgrado en mecatrónica, cuestión que me hizo decidir de inmediato estudiar Mecatrónica en el CINVESTAV.

Gracias a mi primer instructor de montañismo: Ing. **Daniel Silva**, como aún dice “amigos en la montaña, amigos para siempre”, fue la primera persona que me brindó apoyo en la Ciudad de México, ¿recuerdas cuando me diste alojamiento en tu casa para presentar mi examen en el Cinves?, me dijiste que en el Cinves estudiaba lo mejor del Poli y que le echara ganas y aún esa noche estuve estudiando.

Gracias a **mis amigos del SIV**, amigos de años, amigos desde secundaria o prepa (IIV), muchas gracias **Carlos, Gerardo “Puchu”, Vázquez, Bernardino, Homero, Roberto “Topy”, Miriam** y en especial **Cancino y Paco “Barra”** por que me han brindado apoyo y amistad siempre que pueden y por que se han interesado en mi vida y en mi carrera profesional, gracias hermanos. ¿Recuerdan cuantos años llevamos reuniéndonos diciembre tras diciembre en la cena SIV? Ya mas de 8 y así seguiremos, ¡Unidos! Gracias también a mi amiga **América** por los ratos agradables que pasamos juntos.

Gracias también a mi amigo, mi gran amigo **Silverio Gutierrez Carrasco** (Q.E.P.D) cofundador del CEMAC Veracruz, fuiste el primer Maestro en Ciencias con que tuve amistad, me enseñaste perseverancia, felicidad ante la vida, luchar y trabajar por un ideal, me dijiste que la maestría no es fácil, por lo intelectual y lo personal y mira que lo he comprobado últimamente. Me hubiese gustado que vivieras para estar conmigo y ver en que se ha convertido tu ideal: el **CEMAC Veracruz**, club donde aprendí compañerismo, amor por la naturaleza, deporte al aire libre, amor por la vida. Me hubiese gustado Amigo Silverio que vieses que he llegado a una gran meta a la cual tu habías llegado también y que gracias a tu ideal, el Club, he conocido al AMOR de mi Vida...

**SUSY**, a veces pensé que no te encontraría, pero lo hice. Susy, eres más de lo que soñaba: profesional, inteligente, amigable, honesta, cariñosa, familiar, hogareña, linda, deportista, apasionada. Me has apoyado tanto, pero tanto, en este año que llevamos en el camino, no tengo la menor duda que gracias a ti he concluido ya esta meta, gracias a tu amor y que sin importar la distancia me has dado aliento cuando me ha faltado, apoyo cuando no lo encuentro, ánimos una y otra vez, has sido la luz de mi andar, no tengo duda alguna que eres mi sueño hecho realidad. GRACIAS AMOR.

Agradezco también a mis amigos del CEMAC Veracruz: **Boris, Oscar, Toño, Daniel Arce** y muchos otros con los cuales hemos compartido infinidad de horas de batalla contra el cansancio, junto con la naturaleza y aprendiendo juntos a disfrutar la vida de forma sana, deportiva, hemos aprendido juntos creo yo, a ser seres humanos integrales. También por todo lo anterior agradezco a **Guillermo Gassos y Ariel Aburto**, además que son deportistas, son intelectuales, personas profesionales que sin saberlo me han alentado para concluir este trabajo. Gracias a todos ustedes compañeros y amigos.

También tengo especial agradecimiento a **Nabor Castillo y Bernardo Morales** del CEMAC (DF) por que son grandes personas, maduras y profesionales con las cuales, conviviendo siempre se aprende algo.

El año y medio que estuve en UPIITA como profesor conviví con grandes compañeros, se que no me perdonarían que no los invite a mi examen de grado, por ello lo haré personalmente, los maestros en ciencias **Leonel, Jesús Silva y Alejandro Flores**. También agradezco a la **Ing. Graciela** por haberme persuadido de trabajar en el IPN, si bien esto me atrasó en este trabajo de tesis, también a la par hizo reafirmar ciencias y estudios y experimentar el trabajo en la academia así como avanzar en otras áreas como persona.

También estoy agradecido con mis amigos de la UNAM, **Miguel “Bakunin” e Itandehuí**, ellos, devoradores de libros, debatidores de ideas, luchamos juntos por defender la educación gratuita. Itandehuí, con 9 de promedio, en clases de Alemán, estudiando dos carreras a la vez y

becada fue mi más claro ejemplo que lo que dice la tv y la realidad son cosas distintas. Mi padre ya me lo decía y tardé en comprobarlo.

Y no se me olvidan, mis compañeros de Posgrado, la mayoría de los cuales vivimos juntos, juntos en departamento y juntos en vivencias con la maestría: **Chucho, Adolfo, Josué, Hasan, Julio y Froylán**. Algunos de ellos por una u otra razón han dejado los estudios pero los momentos que convivimos son inolvidables, lo aprendido mutuamente no se olvida, compañeros no solo en maestría, también en desesperación económica por no tener beca, en estudio y en pláticas. **Froylán** y su “ante todo, la justicia” para enfrentar los problemas del departamento; **Julio** y sus rollos intelectuales, su estilo muy personal de ser y de ver la vida, “los amigos”; **Hasan**, el ejemplo a la inventiva y a la curiosidad, siempre tiene una idea para hacer algo, para construir algo, el siempre sabe como, aunque lo niegue. Los tragos, pocos pero efectivos, los de Querétaro ¡inolvidables! Las múltiples pláticas que noche a noche dábamos **Cucho, Adolfo** y también después **Alejandro** sobre la maestría, la ciencia, la tecnología, la política, el neoliberalismo, la UNAM y su huelga, el AMOR, DIOS, la VIDA ¿de que no platicamos? ¿qué temas no compartimos? Aprendimos mucho, diría que como nunca antes, todos con diferente forma de ver el mundo, pero todos amigos. Vuelvo a agradecer a mi gran amigo **Adolfo**, por su apoyo brindado en los últimos días anteriores a mi examen de grado.

Dentro del Cinves hay mucha gente a la cual agradecer, al Doctor **Paco Ruíz** por sus muy diversos comentarios, en cuanto al trabajo, “la formación más que el conocimiento”, el humor. A los compañeros de mecatrónica de distintas generaciones que de una u otra forma me apoyaron, **Tomás, Genaro, Sergio, Alejandro, Ervin, Benjamín, Carlos Paúl, Jorge, Ramón** y otros más. Agradezco de manera especial al Maestro y amigo **Virgilio Vásquez**, sin su ayuda técnica y apoyo la parte de control de esta tesis hubiera sido mucho más difícil, realmente hacer levitar ese objeto de más de 2 kilogramos no fue fácil, y menos si la zona de estabilidad es muy pequeña como me ayudó a deducir del modelo matemático del sistema; gracias también por los momentos desestresantes de las partidas de ajedrez, “espero que ya aprendas algo más que solo el movimiento de las piezas”. Gracias también a **los doctores Parra, Aranda, Hebertt, Castro y Silva** por sus grandes clases durante los cursos del posgrado.

Agradezco muy especialmente a mis **Asesores de Tesis Dr. Rafael Castro Linares y Martín Velasco Villa** por haberme aceptado en su propuesta de investigación, por los momentos de asesorías, regaños, consejos, apoyos y por brindarme su experiencia que ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo.

Gracias a mis Sinodales **Dr. Carlos Cruz Villar y Dr. Gerardo Silva Navarro** por aceptar revisar mi tesis y formar parte de mi jurado.

Gracias a los auxiliares de investigación, **José, Andrés, Julio y Martha** por su apoyo durante la realización de mis estudios e investigación. Gracias a las secretarias de la Sección **Sras. Maru y Noemí** por el gran apoyo brindado durante mi estancia en el Centro. Al **personal de la Biblioteca** de Ingeniería Eléctrica por su apoyo, muchas gracias también.

Por último agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, **CONACYT**, por su insoslayable apoyo económico durante mis estudios y al **CINVESTAV** por los recursos humanos, materiales, económicos y técnicos invertidos en mi formación, les aseguro la inversión será redituada a México y su sociedad.

**GRACIAS A TODOS USTEDES HE ENCUMBRADO**



# **Diseño, construcción y control de una plataforma de levitación magnética**

Autor: Gengis Kanhg Toledo Ramírez  
CINVESTAV-IPN

## **Resumen**

Éste trabajo de investigación se ubica dentro de la línea de investigación en vehículos inteligentes de la Sección de Mecatrónica del CINVESTAV. Se basa en la tecnología de atracción electromagnética. Las fuerzas electromagnéticas entre el chasis o plataforma y la vía permiten mantener el chasis flotando a pocos milímetros de la vía. El desarrollo tecnológico más importante con esta tecnología es el tren de levitación magnética o MAGLEV. Esta tecnología permite altas velocidades, alta eficiencia de energía, impacto ecológico reducido y es independiente de los combustibles fósiles. El trabajo desarrollado se ha enfocado en la levitación de una plataforma dejando el movimiento longitudinal para otra etapa de investigación.

El presente trabajo abarca el diseño, la construcción y el control de un prototipo de laboratorio de levitador magnético. Éste comprende diversos subsistemas, como la estructura mecánica, la electrónica de sensado y de potencia, el programa de cómputo y el control de la levitación de esta estructura con técnicas clásicas de control, tanto analógicas como digitales.

El sistema desarrollado cuenta con cuatro módulos idénticos que juntos hacen flotar el chasis. El principio de operación básico de estos módulos es una fuerza de atracción electromagnética entre un electroimán de corriente regulable y una barra de hierro con un sensor de distancia o hueco de aire entre éstos así como un controlador que se encarga de regular la distancia de flotación variando la corriente eléctrica que activa el electroimán.

La instrumentación del prototipo ha sido implantada con sensores de rebote infrarrojo que cumplen con las características de no generar vínculos mecánicos entre las partes (chasis y vía). La electrónica de amplificación ha sido diseñada y construida también. Se obtuvo el modeló matemático de este sistema a partir de las ecuaciones diferenciales que gobiernan su comportamiento y se comprobó que el sistema posee una región de estabilidad muy pequeña, esto permitió generar simulaciones por computadora del sistema y elaborar los controladores tanto analógicos como digitales que han sido implantados. También se elaboró un programa de cómputo para el monitoreo, ajuste y control del prototipo.

Múltiples pruebas de laboratorio se realizaron de cada una de las partes por separado así como de todo el sistema con controladores de topología Proporcional - Derivativo en su modalidad analógica y digital. Las simulaciones resultaron ser muy similares a los resultados por lo que concluimos que el modelado del sistema es muy aceptable. Se logró la levitación completa del prototipo con un hueco de aire de aproximadamente 2 mm.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>7</b>
1.1. Contribución de este trabajo . . . . .	8
1.2. Organización del trabajo . . . . .	8
<b>2. Sistemas de levitación magnética</b>	<b>9</b>
2.1. Vehículos de levitación magnética (Maglev) . . . . .	9
2.2. Trabajos relacionados . . . . .	11
2.3. El por qué de la mecatrónica . . . . .	12
2.4. Prototipo de investigación desarrollado . . . . .	13
<b>3. Consideraciones electromagnéticas</b>	<b>17</b>
3.1. Preliminares sobre magnetismo . . . . .	17
3.2. Características fundamentales del hierro dulce . . . . .	19
3.3. El electroimán tipo $E$ . . . . .	21
3.3.1. Fuerza atractiva: Imán tipo $E$ . . . . .	21
3.3.2. Fenómenos magnéticos en el electroimán tipo $E$ . . . . .	23
<b>4. Estructura mecánica y sistema electrónico</b>	<b>25</b>
4.1. Estructura mecánica. . . . .	25
4.2. Sistema eléctrico y electrónico. . . . .	29
4.2.1. Sensores y tratamiento de señal . . . . .	29
4.2.2. Actuadores . . . . .	31
4.2.3. Etapa de potencia . . . . .	32
<b>5. Modelado de la plataforma de levitación</b>	<b>37</b>
5.1. Preliminares . . . . .	37
5.1.1. Validación de la expresión de fuerza electromagnética de atracción en un imán tipo $E$ . . . . .	37
5.1.2. Medición de la distancia de sustentación . . . . .	39
5.1.3. Respuesta de la etapa de potencia . . . . .	40
5.2. Modelado de un módulo de levitación . . . . .	41
5.3. Dinámica completa del levitador . . . . .	46

<b>6. Control de la plataforma de levitación</b>	<b>49</b>
6.1. Control . . . . .	49
6.2. Esquema de control analógico . . . . .	51
6.2.1. Simulación del control analógico PD . . . . .	51
6.2.2. Levitación de un cangrejo mediante control analógico PD . . . . .	56
6.2.3. Levitación total del prototipo mediante control analógico . . . . .	56
6.3. Control digital . . . . .	60
6.3.1. Respuesta del sistema al escalón . . . . .	60
6.3.2. Simulación con el sistema discretizado . . . . .	60
6.3.3. Resultados experimentales del control digital PD . . . . .	63
<b>7. Conclusiones y perspectivas</b>	<b>67</b>
7.1. Trabajo futuro . . . . .	68
<b>A. Planos mecánicos</b>	<b>69</b>
<b>B. Diagramas electrónicos</b>	<b>73</b>
<b>C. Adquisición de datos y software</b>	<b>81</b>
C.1. Simulación en Simnon 3.0 del sistema de levitación con control PD analógico . . . . .	81
C.2. Tarjeta de adquisición LAB-PC+ . . . . .	82
C.3. Señales de entrada y de salida . . . . .	82
C.4. Software LabWindows . . . . .	83
C.5. Biblioteca de funciones creadas: "Tesis.h" . . . . .	86
C.6. Software para MS-DOS . . . . .	87
C.7. Software principal de monitoreo y control del levitador . . . . .	90

# Índice de tablas

5.1. Parámetros considerados del prototipo. . . . .	37
5.2. Parámetros del prototipo para el modelo matemático. . . . .	42
5.3. Grados de libertad del prototipo . . . . .	47
6.1. Parámetros de los controladores analógicos (módulos 2 y 3). . . . .	56
6.2. Parámetros de los 4 controladores analógicos que lograron levitación completa del chasis. . . . .	56
B.1. Especificaciones de los sensores utilizados. Sensor EE-SY124. . . . .	73



# Índice de figuras

2.1. Tecnologías principales de Maglev. . . . .	10
2.2. Diagrama a bloques de levitador magnético básico. . . . .	12
2.3. Prototipo. Vista 3D . . . . .	13
2.4. Vista frontal del levitador . . . . .	14
2.5. Diagrama a bloques general. Prototipo de levitador magnético. . . . .	15
2.6. Prototipo levitador magnético construido . . . . .	16
3.1. Curva de magnetización y permeabilidad relativa del hierro comercial. . . . .	20
3.2. Curva de histéresis típica de un material ferromagnético. . . . .	21
3.3. Circuito magnético . . . . .	22
4.1. Partes del chasis . . . . .	26
4.2. Riel del prototipo con sensores y actuadores. . . . .	27
4.3. Detalles mecánicos de sensado. . . . .	28
4.4. Ubicación de los actuadores y sensores. Vista inferior del riel . . . . .	28
4.5. Despiece del soporte de sensor. . . . .	29
4.6. Sensor EE-SY124 . . . . .	30
4.7. Diagrama a bloques del sistema de medición de hueco de aire. . . . .	30
4.8. Actuator. Electroimán tipo $E$ . . . . .	31
4.9. Diagrama a bloques de la etapa de potencia. . . . .	32
4.10. Circuito del actuator . . . . .	33
4.11. Diagrama a bloques de la circuitería de potencia con control por corriente. . . . .	33
4.12. Diagrama a bloques de potencia con PWM. . . . .	34
4.13. PWM y 3 estados. . . . .	34
4.14. Circuito para medición de inductancias. . . . .	35
5.1. Gráfica de hueco de aire vs $I$ de sustentación. . . . .	38
5.2. Respuesta del sensor, gráfica $X$ vs $V_{\text{sensor}}$ . Calibración. . . . .	40
5.3. Gráfica de voltaje contra corriente para control por corriente. . . . .	41
5.4. Gráfica de $I$ vs $V_{\text{control}}$ con control PWM. . . . .	42
5.5. Diagramas de la planta para modelado . . . . .	43
5.6. Dinámica del levitador . . . . .	47
6.1. Diagrama general de control a bloques de un módulo del prototipo. . . . .	50

6.2. Diagrama a bloques de un controlador PD. . . . .	51
6.3. Diagrama de control analógico . . . . .	52
6.4. Diagrama de localización de raíces y simulación de la respuesta al escalón . . . . .	53
6.5. Simulación del control analógico desde $X_{02} = 0,002$ . . . . .	54
6.6. Simulación del control analógico desde $X_{02} = 0,002$ con perturbación. . . . .	55
6.7. Señales de error de los módulos 2 (arriba) y 3 (abajo) con control PD analógico. . . . .	57
6.8. Señales de control (arriba) y error (abajo) del módulo 2 con control PD analógico. . . . .	58
6.9. Señales de error del prototipo en flotación. . . . .	59
6.10. Levitación del prototipo . . . . .	59
6.11. Respuesta de un módulo del prototipo al escalón en lazo abierto. . . . .	61
6.12. Lugar geométrico de las raíces en el plano $Z$ . . . . .	62
6.13. Respuesta al escalón unitario del sistema discretizado con $\tau = 1$ ms . . . . .	63
6.14. Señales de error de los módulos 0 (arriba) y 1 (abajo) con control PD digital. . . . .	64
6.15. Señales de control (arriba) y error (abajo) del módulo 0 con control PD digital . . . . .	65
A.1. Dimensiones del núcleo . . . . .	69
A.2. Planos de chasis . . . . .	70
A.3. Planos de riel . . . . .	71
A.4. Planos de soporte de sensor . . . . .	72
B.1. Circuitos de sensado y tratamiento de señal. . . . .	74
B.2. Circuito del PWM . . . . .	75
B.3. Circuito de potencia y actuador . . . . .	76
B.4. Circuito de control PD analógico . . . . .	77
B.5. Conexiones por módulo en el circuito impreso. . . . .	78
B.6. Conexiones de la tarjeta NIDAQ, el sistema físico y el control analógico. . . . .	79
C.1. Señales de entrada y salida en la PC . . . . .	83

# Capítulo 1

## Introducción

La mecatrónica constituye un área emergente de la tecnología en la cual se involucran distintas disciplinas de la ingeniería como mecánica, eléctrica, electrónica, cómputo y control, de manera de poder abordar problemas interdisciplinarios desde una perspectiva integral.

En las últimas décadas los sistemas de levitación magnética han sido objeto de muchos estudios, dadas sus posibles aplicaciones en sistemas de vibraciones y en un sin número de sistemas dinámicos. El hecho de saber que un objeto levitado magnéticamente no presenta problemas graves de fricción (sólo con el aire), ha hecho a un amplio número de científicos interesarse por estos sistemas y aplicarlos sobre todo en el área de sistemas de transporte. La aplicación real más significativa se tiene en los trenes de levitación magnética.

Si bien los trenes de levitación magnética y su principio de funcionamiento han sido ampliamente abordados sobre todo por dos naciones (Alemania y Japón) en las últimas décadas, su nivel de desarrollo actual no es el adecuado para lograr un desarrollo comercial de este tipo de sistemas, encontrándose un sinnúmero de retos técnicos que han despertado el interés de la comunidad científica a nivel internacional.

Por lo anterior el CINVESTAV inició hace unos años una línea de investigación a este respecto, considerando inicialmente el problema de levitación de una pequeña esfera en un grado de libertad, continuando con el diseño de una plataforma de levitación (que es el objetivo del presente trabajo).

El presente trabajo de tesis aborda una plataforma de levitación magnética, su concepción, el diseño de todas sus partes (mecánica, electrónica, electromagnética, software y control) así como algunos experimentos y pruebas realizadas sobre las partes del prototipo. Se consideró la aplicación de diversas estrategias de control para lograr su levitación. El presente trabajo constituye la continuación del trabajo [1], en el cual se realizó un sistema de suspensión magnético de una esfera. El trabajo desarrollado en [1] proporciona una base experimental necesaria para llevar a cabo el presente trabajo que se ha especializado en la levitación de una plataforma o chasis. Este trabajo se ha desarrollado desde el punto de vista mecatrónico, donde la sinergia entre las distintas áreas tiene mucho que aportar.

Los retos que presenta el proyecto que aquí se describe son fuertes, no solo es el diseño de la estructura, la circuitería electrónica y la programación del software de control, se requiere también la aplicación de conceptos de control, modelado de sistemas, realización de simulaciones y extensivas pruebas de laboratorio. Es éste un reto en ingeniería multidisciplinaria y en el área de mecatrónica encuentra un perfecto sitio para su estudio, siendo el diseño y el estudio de estos sistemas de levitación

un desafío con un futuro prometedor e impulsor del desarrollo de tecnología.

## 1.1. Contribución de este trabajo

El presente trabajo de tesis se enmarca dentro de la nueva línea de investigación sobre sistemas de levitación de la Sección de Mecatrónica del CINVESTAV. La contribución de este trabajo es el modelado, construcción y control del prototipo de una plataforma de levitación magnética, incluyendo el desarrollo de sus interfaces de potencia para los actuadores así como el sensado y el acondicionamiento de las señales. Se presenta el modelado matemático del sistema considerando las relaciones electromagnéticas existentes. Se realizó la implantación de controladores clásicos tanto analógicos como digitales haciendo una comparación entre ambos.

Específicamente, los objetivos de este trabajo fueron los siguientes:

- Construcción de un prototipo de levitación magnética que pudiese adaptarse para soportar movimientos de traslación horizontal futuros
- Desarrollo de un sistema de medición de hueco de aire sin utilizar vínculos mecánicos entre las partes
- Desarrollo de la instrumentación electrónica del prototipo y sistema de adquisición de datos
- Programación de una interfaz gráfica para control, monitoreo y ajuste del prototipo
- Levitación magnética mediante estrategias de control clásicas.

## 1.2. Organización del trabajo

Esta tesis describe el diseño, construcción y control de un vehículo de levitación magnética en su primera fase, es decir, solo como plataforma de levitación, ignorando los aspectos de guiado y traslación.

Capítulo 1. Se da una introducción a los vehículos de levitación (maglev), se resumen dos sistemas de levitación: uno muy básico y otro más, bastante sofisticado y se justifica el estudio desde el punto de vista de la mecatrónica. Capítulo 2. Se describe el prototipo creado para esta investigación y se aborda su estructura mecánica y su sistema electrónico incluyendo sensores y actuadores. Capítulo 3. Se detallan conceptos magnéticos, fenómenos a considerar en el funcionamiento del prototipo y se obtiene la expresión para la fuerza magnética de atracción entre otras cuestiones electromagnéticas. Capítulo 4. Se describen el diseño mecánico y electrónico del prototipo, el sistema de sensado se aborda también. Capítulo 5. Se valida la expresión de fuerza magnética obtenida en el Capítulo 3, se caracterizan las señales de los sensores y actuadores y se obtiene el modelado matemático del sistema. Capítulo 6. Se describen los controladores utilizados y se muestran los resultados obtenidos, también se presentan las simulaciones realizadas. Capítulo 7. Conclusiones y perspectivas del trabajo realizado. Apéndices. Anexos de interés como especificaciones del diseño mecánico, diagramas electrónicos, códigos de programas utilizados y características de la tarjeta de adquisición de datos utilizada entre otras cosas.

## Capítulo 2

# Sistemas de levitación magnética

En el presente capítulo se presenta una introducción a los distintos tipos de sistemas de levitación, considerando tanto los trenes de levitación magnética, como otros estudios en sistemas de levitación. Al final de este capítulo se presentan las características principales del prototipo considerado.

Con el propósito de ubicar el trabajo desarrollado en esta tesis, a continuación se describen las características fundamentales de los vehículos de levitación magnética (maglev), los cuales pueden considerarse como el objetivo final de los estudios llevados a cabo en el campo de los sistemas de levitación.

### 2.1. Vehículos de levitación magnética (Maglev)

Ante los pronósticos de gran incremento en la demanda de transporte, tanto de personas como de productos consecuencia del crecimiento demográfico y del aumento de la calidad de vida de un cierto sector de la población, se tiene una potencial alternativa denominada Trenes de Levitación Magnética o mejor conocidos como MAGLEVs (Del inglés MAGnetically LEvitated Vehicles). La información contenida en esta sección ha sido tomada de [2], [3], [4], [5] y [6].

Un vehículo de levitación magnética o MAGLEV, es aquel en el cual se utiliza el magnetismo para suspenderlo a pocos milímetros de una vía, que en general cuenta con un sistema de guías que evitan que el vehículo se desvíe a los lados así como un sistema de propulsión. A pesar de tener muchas décadas en haber sido concebido tal tipo de vehículo, a inicios del siglo XXI solo se tiene un número reducido funcionando en todo el orbe, la mayoría a nivel experimental.

A lo largo del desarrollo de los maglev solo en Alemania y Japón se han realizado significativos proyectos e investigaciones al respecto.

Desde 1922 el ingeniero Alemán Hermann Kemper contemplaba la idea de un tren levitado magnéticamente, aunque obtiene la patente 12 años después, la tecnología de la época no permite desarrollar la idea y es hasta 1962 en Japón y 1969 en Alemania en que se inicia el desarrollo tecnológico de este tipo de sistemas.

Desde los años 70's la posibilidad de sustituir la rueda por un sistema de levitación magnética emocionó a muchos científicos e ingenieros en muchos países. Alemania y Japón destacan por haber investigado, apoyado y contribuido al desarrollo de este tipo de sistemas llamados MSTs (Magnetically Suspended Transportation Systems) o más simplemente Maglev. Cada uno de ellos desarrolló

sus investigaciones y tecnologías de forma bastante independiente. Las principales desventajas de la rueda son ampliamente conocidas, entre las que se puede mencionar, carga mecánica puntual, abrasión, ruido, vibraciones, guiado, propulsión y frenado basado en la fricción y limitación de velocidad. Gran parte de estas desventajas pueden ser eliminadas con un MSTS, por ello las investigaciones al respecto.

Entre las características básicas de un Maglev se pueden mencionar: sistema de levitación con cargas mecánicas de área, guiado lateral sin fricción, propulsión eléctrica sin fricción y frenado eléctrico sin fricción. Gracias a estas características los Maglev poseen las propiedades de alta velocidad (500 km/h); aceleración elevada ( $1\text{m/s}^2$ ); habilidad para viajar a través de curvas de pequeño radio y recorrer pendientes por arriba de  $16^\circ$  de elevación; baja fatiga; peso de vehículo relativo bajo (aprox. 500 kg/asiento); consumo de energía promedio relativo a la velocidad y número de asientos inferior al de otros sistemas; independiente del tipo de energía primaria; predominio de ruido aerodinámico; requerimientos de mantenimiento bajos como resultado de muy pocas partes móviles y capacidad de automatización completa por computadora.

La utilización de vías flexibles permite perturbaciones mínimas al medio ambiente y a las estructuras civiles ya construidas como puentes y túneles; bajos consumos de energía e inferiores emisiones de ruido que los trenes de alta velocidad con contacto rueda-vía cuando se comparan a iguales velocidades y consumo de espacio terrestre mínimo entre otras ventajas medioambientales.

Tres son las tecnologías que se han investigado y experimentado al respecto de los Maglev (Ver Figura 2.1).

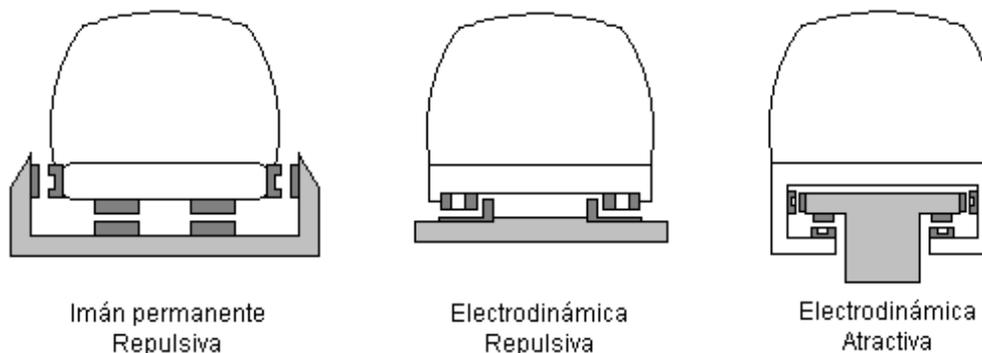


Figura 2.1: Tecnologías principales de Maglev.

- **Tecnología de imanes permanentes. PMS (Permanent Magnetic System)**

Se emplean imanes permanentes tanto en el vehículo como en la vía, los polos similares son alineados de modo que opere por fuerzas repulsivas. Posee guiado electromagnético y propulsión en base a un motor lineal. Después de pruebas operativas en 1972 y 1973 se descartó esta tecnología debido al alto costo de las vías o guías [7].

- **Tecnología electrodinámica. EDS (ElectroDynamical System)**

En esta tecnología los sistemas de levitación, guiado y propulsión se mezclan. Se basa en fuerzas repulsivas. Consta de bobinas superconductoras montadas sobre el vehículo. Éstas poseen gran potencial magnético y proporcionan suficiente velocidad. Inducen también corrientes indeseables llamadas “eddy” sobre los rieles de aluminio y las bobinas montadas sobre las guías las cuales generan estabilidad pero con fuerzas repulsivas de bajo amortiguamiento.

Las fuerzas de soporte y guiado son suficientes solo por encima de los 100km/h, abajo de esta velocidad otro sistema adicional deben ser utilizados como el de la rueda convencional. Las corrientes eddy sobre los rieles causan pérdidas sobre las fuerzas de frenado, dependiendo estas de la velocidad del vehículo. A los 50km/h se alcanza el poder máximo de frenado, arriba de esta velocidad decrece continuamente siendo a los 400km/h de solo 3% de la fuerza máxima. Con el fin de obtener fuerzas repulsivas y fuerzas de frenado adecuadas el vehículo se opera arriba de 150km/h. [7]

#### ▪ Tecnología electromagnética. EMS (ElectroMagnetic System)

En este caso se utilizan fuerzas de atracción entre electroimanes colocados en el vehículo y el material ferromagnético en la vía. El espacio de aire (distancia entre riel y electroimán) es difícil de controlar por lo que debe de utilizarse un sistema de control eficiente. Los electroimanes son de corriente directa, colocados estos sobre el vehículo tanto para la levitación como para el guiado, las armaduras ferromagnéticas son colocadas a lo largo de toda la vía. Estos dos sistemas y el de propulsión basado en un motor lineal son independientes entre ellos. En este esquema la capacidad de levitación no depende de la velocidad del vehículo.

El sistema de control de levitación debe de ser eficaz, sobretodo a altas velocidades y no puede fallar por lo que se diseña de manera redundante. Las principales causas de perturbaciones externas son las cargas aerodinámicas, las inexactitudes de la armadura y las deflexiones de la vía debido a carga. Por razones de costo solo pueden hacerse limitados requerimientos sobre la vía y las armaduras. Por esto el sistema de control debe de compensar todas estas perturbaciones y ser totalmente fiable para mantener en levitación el vehículo a la distancia adecuada.

A pesar de contar con múltiples ventajas sobre otros sistemas de transporte masivos que operan a través de largas distancias, ser ecológico y eficiente, el uso de los maglevs no se ha extendido en el mundo porque requiere de un costo muy elevado para su construcción, desarrollo e implantación [8]. Por esta razón los sistemas tradicionales siguen siendo más utilizados.

## 2.2. Trabajos relacionados

Como antecedente al presente trabajo se tiene el desarrollo de un sistema de levitación magnética [1] del tipo mostrado en la Figura 2.2.

Un sistema básico de levitación magnética como el de la Figura 2.2 consiste en una esfera pequeña que se suspende mediante la acción de un electroimán. Se requiere además un sistema de medición de la posición de la esfera y un sistema de control.

En el trabajo en cuestión se consigue la levitación de una esfera de masa pequeña mediante diferentes esquemas de control, como un control Proporcional-Derivativo, un control Proporcional-Integral-Derivativo de tipo digital y un control basado en técnicas de pasividad. Como resultado, se logró la regulación y el seguimiento de trayectorias simples de parte de la esfera dentro de un intervalo de trabajo de unos pocos centímetros. Algunos trabajos adicionales para este tipo de sistema de levitación pueden verse en [9], [10] y [11].

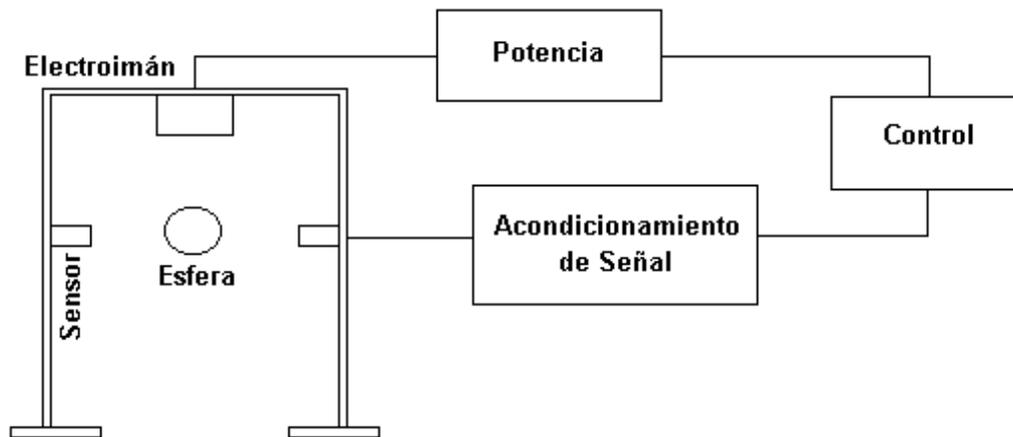


Figura 2.2: Diagrama a bloques de levitador magnético básico.

Además de [1] la idea del presente trabajo estuvo basada en la propuesta descrita en [12], en la que se desarrolla una plataforma de levitación magnética la cual es controlada mediante la implantación de esquemas de control clásico por retraso de fase y esquemas del tipo  $H_2$  y  $H_\infty$ .

Como parte de los trabajos relacionados con sistemas de levitación se puede mencionar el denominado “rueda magnética” [13], dicho trabajo representa una unidad básica de levitación electromagnética y de guiado. El concepto de “Rueda Magnética” se refiere a la unidad elemental de levitación electromagnética; como en el caso de los transportes terrestres convencionales lo es la rueda. Pero por su concepto novedoso, dicha unidad fundamental es bastante más compleja y esta compuesta por un controlador, un electroimán, su estructura mecánica y su estructura eléctrica.

La experiencia ganada en las pruebas con dichos prototipos indican que bajos requerimientos dinámicos del electroimán y más pequeños huecos de aire son posibles si los imanes y el cuerpo del vehículo son capaces de adaptarse al riel guía y también que el ancho de banda ideal del sistema de control respecto al mínimo de consumo de potencia eléctrica para levitación y guiado depende solo de las características y los parámetros nominales de los imanes, no de las irregularidades de la vía y es por esto que constituye un parámetro de diseño del vehículo. Este sistema ha sido ampliamente probado en vehículos funcionales, varias investigaciones de mejora se han realizado hasta la fecha. Este sistema, además de presentar levitación, también realiza guiado lateral.

### 2.3. El por qué de la mecatrónica

Los sistemas de levitación magnética son complejos y requieren de diversas áreas de la ingeniería y la ciencia para su completo desarrollo. La levitación magnética, si bien ofrece ventajas sobre otros sistemas, es una tecnología compleja, quedando su estudio y desarrollo solo a personal técnico o científico. Por su naturaleza, este tipo de sistemas requieren de diversos subsistemas: mecánicos, eléctricos y electrónicos, informáticos, de control y electromagnéticos. Es esta variedad de áreas de la ingeniería requeridas y el afán de perfeccionar estos sistemas que hace conveniente el análisis,

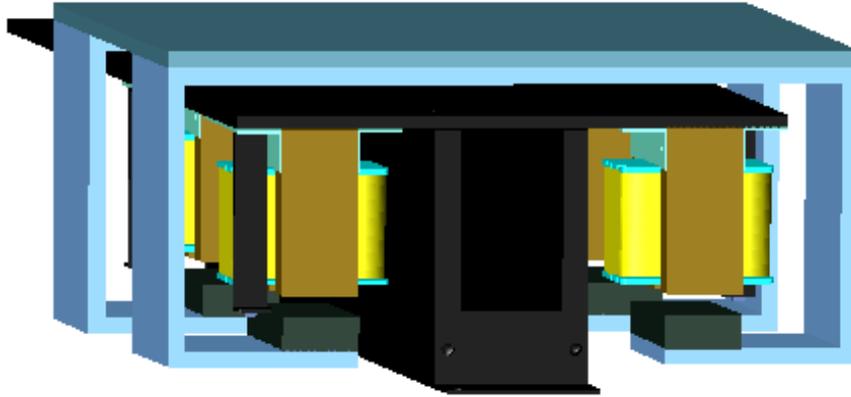


Figura 2.3: Prototipo. Vista 3D

diseño y estudio de éstos desde el enfoque de la Mecatrónica.

## 2.4. Prototipo de investigación desarrollado

En este trabajo se presenta el desarrollo de una plataforma de levitación magnética, se propone una plataforma con 4 soportes principales, cada uno de los cuales será levitado por medio de un electroimán, véase la Figura 2.3. La tecnología utilizada en nuestro prototipo es electromagnética, es decir mediante fuerzas de atracción. Dicha tecnología implica contar con un adecuado control de modo que pueda mantenerse una distancia adecuada de levitación. Cada una de los 4 soportes, cuenta con un sistema independiente de levitación, de aquí en adelante llamaremos a dichos sistemas Módulos.

Los actuadores así como los sensores en el prototipo han sido colocados en el riel para eliminar peso y problemas de cableado. Cada uno de los módulos cuenta con un electroimán, un sensor de posición, una barra metálica así como su estructura mecánica y los sistemas electrónicos, de cómputo y control. En la Figura 2.4 se ilustran las principales partes físicas del prototipo.

El prototipo consta de las siguientes partes funcionales:

1. **Estructura mecánica.** Se partió de la idea más simple; el chasis, formado por una plataforma de acrílico con 4 soportes, cada uno de los cuales sustentan una barra ferromagnética, y un riel de aluminio el cual soporta los electroimanes y los sensores correspondientes para cada módulo.
2. **Circuitería electrónica.** En esta parte se encuentra la circuitería de potencia, de medición y tratamiento de señal, el control analógico, los actuadores y los sensores. La circuitería de potencia se encarga de convertir las señales analógicas generadas por la computadora o el control analógico en señales eléctricas de alto amperaje para excitar las bobinas de los electroimanes (actuadores). La electrónica de medición convierte la señal de los sensores a un nivel adecuado

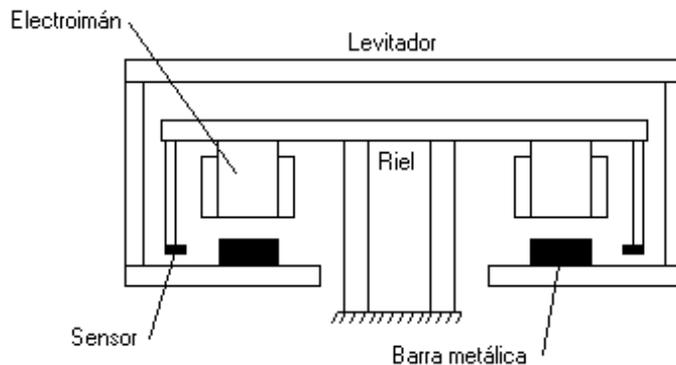


Figura 2.4: Vista frontal del levitador

para poder ser interpretado por el resto del sistema. Se cuenta con un selector de referencia para elegir la distancia de levitación o hueco de aire.

3. **Adquisición de datos.** Esta etapa se forma únicamente con una tarjeta LAB-PC+ de adquisición de datos de National Instrument Co., permite adquirir y enviar datos entre la computadora y la circuitería electrónica del prototipo. Consta de software que facilita las operaciones de adquisición de datos. Cada uno de los módulos requiere de una entrada analógica y una salida del mismo tipo.
4. **Cómputo.** Aquí se cuenta con el software de control del prototipo. Desde bibliotecas de lectura y escritura de datos para la tarjeta de adquisición de datos ya sea en ambiente windows o ms-dos, hasta un programa integral para control del levitador, contando con monitoreo de cada uno de los módulos así como con el control de dos de estos.
5. **Control.** Esta etapa es la más complicada ya que se debe de asegurar un control de hueco de aire en cada uno de los módulos. Sus ecuaciones matemáticas empleadas se integran al software en caso del control por computadora. Esta parte requiere de un modelado matemático del prototipo como sistema físico y eléctrico así como múltiples y exhaustivos experimentos.

Por limitaciones de laboratorio y presupuestales se ha diseñado este prototipo para ser controlado híbridamente, es decir, dos módulos se controlan de forma analógica y dos más de forma digital mediante la PC. Esto debido a que la tarjeta de adquisición con que se cuenta solo permite dos salidas analógicas.

En la Figura 2.5 se muestra el diagrama a bloques general del prototipo, en este se aprecian todos sus bloques funcionales así como la comunicación entre estos. En la Figura 2.6 se presenta una fotografía del prototipo.

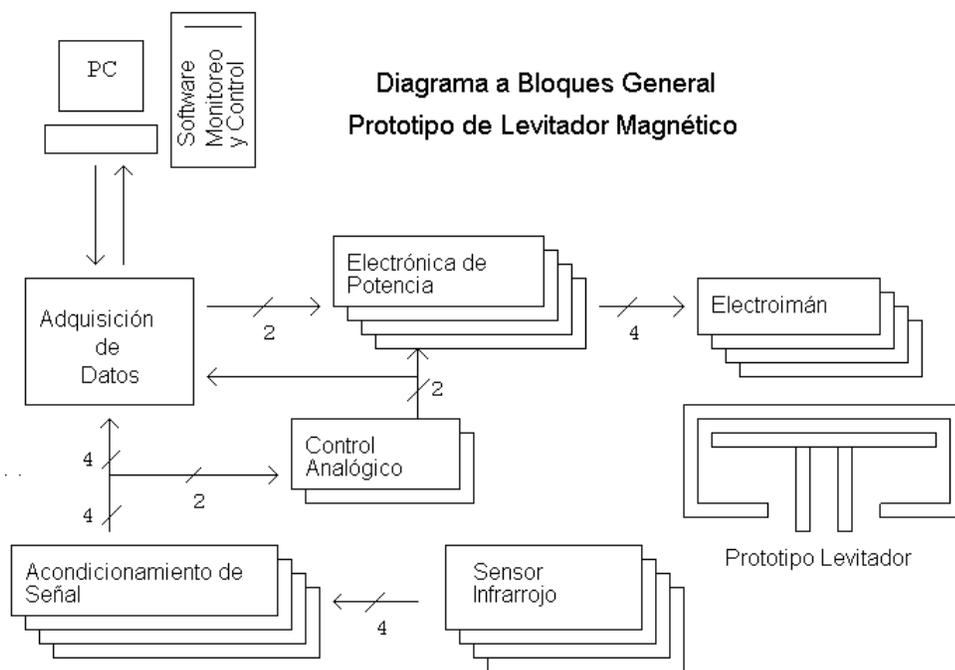


Figura 2.5: Diagrama a bloques general. Prototipo de levitador magnético.

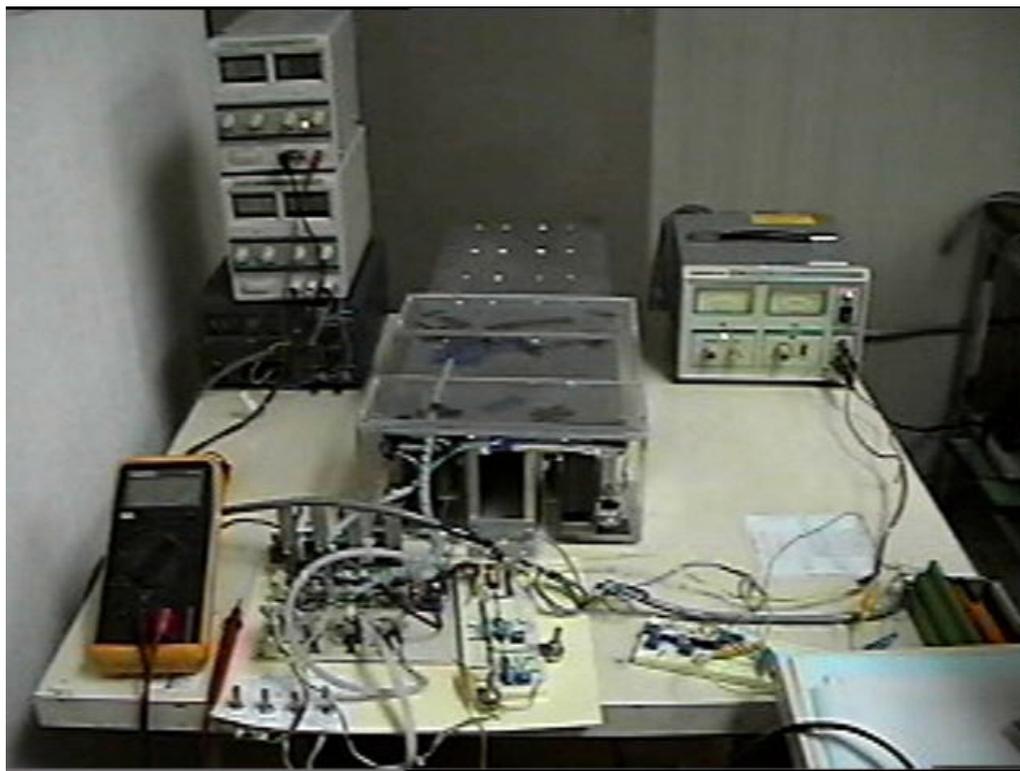


Figura 2.6: Prototipo levitador magnético construido

## Capítulo 3

# Consideraciones electromagnéticas

En este capítulo se presentan algunas características básicas sobre electromagnetismo las cuales serán importantes en la modelización del prototipo propuesto. La comprensión de la ecuación de fuerza entre un magneto y un metal, la inducción electromagnética y la elección de electroimanes adecuados son algunas cuestiones que hacen necesaria esta sección.

### 3.1. Preliminares sobre magnetismo

A principios del Siglo XIX el físico danés Hans Christian Oersted (1777-1851) [14] descubrió la presencia de un campo magnético siempre que existiese una corriente eléctrica. Subsecuentes trabajos de los científicos Carl Friedrich Gauss (1777-1855), Michael Faraday (1791-1867) y James Clerk Maxwell (1831-1879) entre otros condujo al desarrollo de la teoría electromagnética y a la asociación entre los campos magnéticos y eléctricos. Los siguientes conceptos han sido tomados de [14] y [15].

**Definición 1 Inducción magnética.** *En forma análoga a la fuerza eléctrica que ejerce un campo eléctrico sobre una carga prueba ( $F = qE$ ), existe una fuerza magnética asociada a una “carga prueba” que define un campo magnético.*

$$F_m = qv \times \mathbf{B}, \quad (3.1)$$

donde  $F_m$  es la fuerza magnética sobre la carga,  $q$  el valor de la carga eléctrica de prueba,  $v$  la velocidad de la carga y  $\mathbf{B}$  la inducción magnética.

La ecuación (3.1) puede escribirse también como:

$$F_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qq_1}{r^2} v \times (v_1 \times \frac{\mathbf{r}}{r}),$$

donde la inducción magnética está dada por  $\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_1}{r^2} v_1 \times \frac{\mathbf{r}}{r}$  siendo  $\mu_0$  la permeabilidad magnética en el vacío,  $q_1$  el valor de la carga que genera el campo magnético,  $v_1$  la velocidad de la carga  $q_1$ ,  $\mathbf{r}$  el vector posición entre las cargas y  $r$  la distancia entre estas.

La unidad de inducción magnética es el Tesla (T).

**Definición 2 Flujo magnético.** Se define como la integral de superficie sobre la componente normal del campo magnético

$$\Phi = \int_S B \cdot nda, \quad (3.2)$$

donde  $\Phi$  es el flujo magnético,  $B$  la inducción magnética,  $da$  la diferencial del área de la superficie y  $n$  la normal a  $da$ .

El flujo magnético es análogo al campo eléctrico, se representa también como líneas con punta de flecha, las cuales van del polo norte al sur en un imán,

Para una inducción magnética  $B$  y un área  $A$  constantes (3.2) puede escribirse de forma más simple:

$$\Phi = BA \quad (3.3)$$

La unidad de flujo magnético es el Weber (Wb).

Un Tesla (T) es equivalente a 1 Weber por metro cuadrado (Wb/m<sup>2</sup>)

**Definición 3 Intensidad Magnética.** La intensidad de campo magnético está dada por,

$$H = \frac{1}{\mu_0} B - M,$$

donde  $B$  es la inducción magnética y  $M$  la magnetización.

La definición anterior es análoga a la intensidad de campo eléctrico en electricidad.

**Definición 4 Susceptibilidad Magnética.** En muchos materiales isotrópicos y lineales existe una relación entre la magnetización ( $M$ ) y la intensidad de campo magnético ( $H$ ) dada por,

$$x_m = \frac{M}{H},$$

donde  $x_m$  es la susceptibilidad magnética.

De acuerdo a su susceptibilidad magnética los materiales se clasifican en paramagnéticos si  $x_m > 0$ , siendo la inducción magnética reforzada y en diamagnético si  $x_m < 0$ , en la cual la inducción magnética es debilitada,  $x_m$  puede variar drásticamente con la temperatura, en general  $x_m$  es bastante pequeña ( $|x_m| \ll 1$ ) para materiales diamagnéticos y paramagnéticos.

**Definición 5 Permeabilidad Magnética Relativa.** Está dada por la razón entre la permeabilidad absoluta ( $\mu$ ) y la permeabilidad del vacío ( $\mu_0$ )

$$K_m = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3.4)$$

donde  $K_m$  es la permeabilidad magnética relativa.

**Definición 6 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,*

$$L = \frac{N\Phi}{I} \text{ H}, \quad (3.5)$$

donde  $l$  es la longitud de la bobina y  $\Phi$  el flujo magnético presente en ella.

Considerando la ley de Faraday [14] la autoinductancia en una bobina origina una fuerza contraelectromotriz dada por,

$$\varepsilon = -L \frac{di}{dt}. \quad (3.6)$$

**Circuitos magnéticos.** Si consideramos una trayectoria bien definida para un flujo magnético (como en el caso de los materiales ferromagnéticos), puede considerarse un Circuito Magnético. Un circuito cerrado de material ferromagnético excitado por una serie de espiras de alambre a través de las cuales circula una corriente (como en la Figura 3.3) representa un circuito magnético. La fuerza magnetomotriz está dada por  $f_{mm} = NI$ , donde  $N$  es el número de espiras de la bobina e  $I$  la corriente circulante. La reluctancia se define como  $\mathfrak{R} = \int \frac{dl}{\mu A}$ , donde  $dl$  es la diferencial de longitud y  $A$  el área transversal en cuestión. De forma análoga a la ley de circuitos de Ohm y siendo  $\Phi$  el flujo magnético tenemos que,

$$f_{mm} = NI = \Phi \mathfrak{R}. \quad (3.7)$$

## 3.2. Características fundamentales del hierro dulce

Como ya se mencionó, los núcleos de los electroimanes utilizados para los actuadores son de hierro dulce, brevemente abordaremos sus principales propiedades para entender fenómenos electromagnéticos importantes como la saturación del núcleo.

**Propiedades magnéticas del Hierro.** El hierro (Fe) es uno 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, puede ser tratado como lineal. La composición de este es de 96 % Fe y 3 % Si. La intensidad magnética ( $H$ ) necesaria para saturación es de 56 A/m y su permeabilidad relativa ( $K_m$ ) máxima es de 8000.

**Magnetización del Hierro (Fe).** Los átomos del hierro se consideran agrupados en arreglos llamados DOMINIOS. Cada dominio contiene aproximadamente  $10^{15}$  átomos, en los cuales los ejes magnéticos son más o menos paralelos por lo que cada dominio se considera un pequeño imán. En el hierro desmagnetizado cada uno de los ejes magnéticos de los dominios se encuentran apuntando en direcciones distintas en forma aleatoria, por lo mismo no existe un efecto significativo en ninguna dirección particular. Si el hierro es magnetizado, los dominios se redireccionan, apuntando sus ejes magnéticos a una misma dirección y originándose un campo magnético significativo a partir de la suma vectorial de todos los campos individuales. Por lo anterior, aunque se elimine el campo magnético, el material permanece magnetizado debido al orden de sus dominios, a esto se le llama MAGNETIZACIÓN.

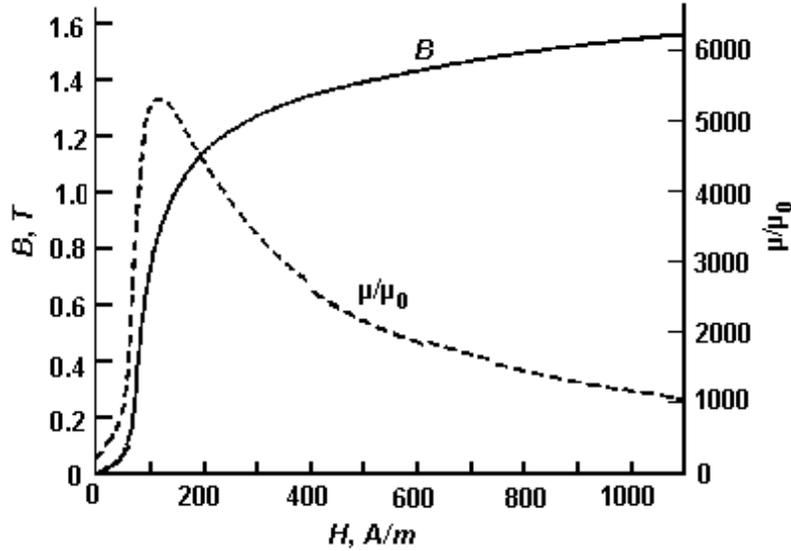


Figura 3.1: Curva de magnetización y permeabilidad relativa del hierro comercial.

**Curva de magnetización y permeabilidad relativa del hierro comercial (templado).**  
**Histéresis.** La curva de magnetización se obtiene a partir de aplicar paulatinamente una intensidad de campo magnético ( $H$ ) a un material desmagnetizado. La relación entre inducción magnética y campo magnético ( $B$ - $H$ ) puede verse en la Figura 3.1.

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 a este se le llama Magnetización de Saturación del material.

Consideramos que partimos del anterior experimento para reducir la intensidad magnética, 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 gráfica sigue otro camino, incluso la magnetización no desaparece con la desaparición de  $H$ , para eliminar esto es necesario invertir la intensidad magnética aplicada. Manipulando el campo obtenemos una gráfica como la de la Figura 3.2, este comportamiento “en atraso” se llama histéresis. Se refiere al retraso de la magnetización respecto a la intensidad del campo magnético.

A esta curva se le llama curva de histéresis del material. El valor de  $B$  en  $H = 0$  (r) se llama retentividad o remanencia; la magnitud de  $H$  para  $B = 0$  (c) se llama coercitividad o fuerza coercitiva.

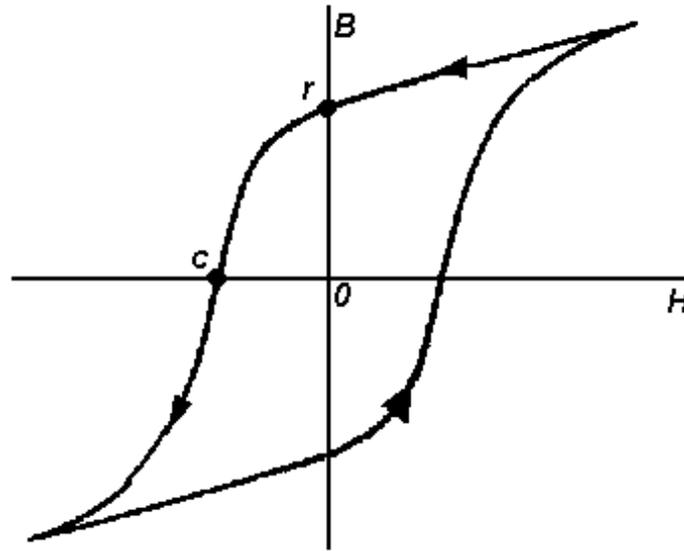


Figura 3.2: Curva de histéresis típica de un material ferromagnético.

### 3.3. El electroimán tipo $E$

#### 3.3.1. Fuerza atractiva: Imán tipo $E$ .

Considérese el circuito magnético formado por el electroimán tipo E, los huecos de aire y la barra superior. En este circuito se puede considerar la existencia de dos flujos magnéticos idénticos. Ambos parten del centro del núcleo, donde está la bobina y salen hacia los extremos (véase la Figura 3.3). Para propósitos de análisis se tomará en cuenta uno solo de estos circuitos.

Calcúlese el flujo magnético presente aplicando la ecuación (3.7) a lo largo del circuito magnético, se tiene

$$\frac{IN}{2} = \frac{\Phi}{2} \left( \frac{12a}{\mu_{\text{núcleo}} A} + \frac{2z}{\mu_{\text{aire}} A} \right)$$

donde  $\Phi$  es el flujo total que sale de la bobina, el cual se bifurca en dos partes iguales, como  $\mu_{\text{núcleo}}$  es muy grande, del orden de 8000 veces  $\mu_{\text{aire}}$  para el hierro al silicio, podemos aproximar con un margen de error más que aceptable a

$$IN = \Phi \left( \frac{2z}{\mu_{\text{aire}} A} \right).$$

Despejando  $\Phi$  resulta,

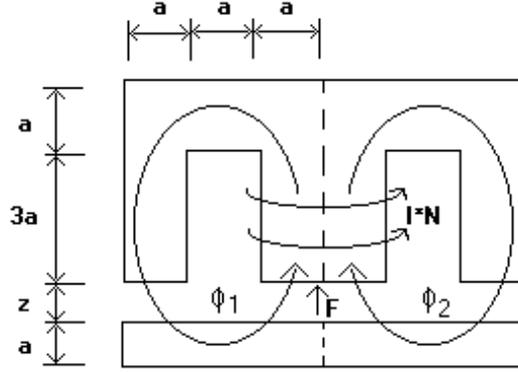


Figura 3.3: Circuito magnético

$$\Phi = \frac{IN\mu_{aire}A}{2z}. \quad (3.8)$$

Tomando la ecuación de fuerza entre dos polos magnéticos [16] tenemos que,

$$F = \frac{1}{2} \frac{B^2 A}{\mu_o},$$

donde  $B$  es la intensidad de campo magnético,  $A$  el área efectiva entre superficies y  $\mu_o$  la permeabilidad.

Enfocándonos en la cuarta parte de la fuerza total del imán  $E$  sobre la barra, donde  $A = a \cdot c$  (parámetros dimensionales del núcleo) y tomando  $\mu_{aire} = \mu_o$

$$F_{\frac{1}{4}} = \frac{1}{2} \frac{B^2 A}{\mu_o}, \quad (3.9)$$

combinando las expresiones (3.8), (3.3) y (3.9) tenemos

$$F_{\frac{1}{4}} = \frac{1}{8} \mu_o a c N^2 \left(\frac{I}{z}\right)^2,$$

donde se multiplica esta última ecuación por un factor de 4 para obtener la Fuerza Total resulta,

$$F = \frac{1}{2} \mu_o a c N^2 \left(\frac{I}{z}\right)^2, \quad (3.10)$$

donde la fuerza se expresa en Newtons cuando todas las demás unidades están en Sistema Internacional (SI).

La ecuación (3.10) representa la expresión de fuerza entre un electroimán y una barra de hierro la cuál nos será fundamental para el modelado matemático.

### 3.3.2. Fenómenos magnéticos en el electroimán tipo E.

**Saturación del Núcleo.** A partir de la ecuación (3.8) es posible ver que  $\Phi$  y  $z$  son inversamente proporcionales. De aquí que existe un valor de  $z$  pequeño ( $z_{sat}$ ) para el cual el flujo  $\Phi$  es lo suficiente grande como para saturar el núcleo. Para estos valores de  $z$  e inferiores la ecuación de fuerza deducida anteriormente deja de ser válida porque a un incremento de corriente ya no corresponde un incremento de flujo.

**Inducción magnética.** Se tiene que a mayor inducción magnética mayor es el potencial eléctrico contraelectromotriz inducido en la bobina (ver ecuación 3.6), lo que hace su control más difícil, además por la ecuación (3.5) sabemos que también para una  $z$  pequeña tendremos inducción magnética elevada. Los dos fenómenos anteriores son de suma importancia ya que si elegimos un hueco de aire muy pequeño tendremos mayor dificultad en controlar el campo magnético y por ende la fuerza de atracción del electroimán.



## Capítulo 4

# Estructura mecánica y sistema electrónico

### 4.1. Estructura mecánica.

La mecánica del prototipo se refiere a todas las cuestiones estructurales. Los principales factores a consideración fueron las dimensiones, el peso y la rigidez mecánica del mismo.

Para la construcción del chasis se requirió un material ligero y con adecuada rigidez mecánica, ya que este es el objeto a levitar. En el caso del riel, éste se construyó con alta rigidez ya que es el componente que contiene los actuadores, los sensores y su cableado además de soportar las fuerzas de reacción del chasis al levitar.

La idea básica de la estructura del prototipo se muestra en la Figura 4.1 para el chasis y en la Figura 4.2 para el riel. Los actuadores se colocaron en el riel, dejando el chasis lo más ligero posible, esto permitió realizar los experimentos de levitación con un chasis ligero e independiente de las dimensiones y peso de los electroimanes. Para propósitos de experimentación, el chasis se diseñó desarmable. El riel se fabricó del doble de longitud que el chasis para futuras pruebas de traslación. El material utilizado es aluminio para un adecuado soporte de los pesados electroimanes. Ver los planos y demás especificaciones mecánicas en el Apéndice A.

El chasis consiste de tres partes desmontables. La base y dos soportes rígidos con dos barras férricas cada uno llamados cangrejos (ver Figura 4.1), los cangrejos se atornillan a la base para formar el chasis. El fin de este diseño es permitir la experimentación y pruebas con solo dos módulos o sistemas de levitación, es decir levitar un solo cangrejo a la vez.

Si bien un prototipo levitador en el cual se desee realizar un movimiento de traslación deberá contar con los actuadores en el chasis, en este prototipo se colocaron los actuadores en el riel a fin de reducir el peso a levitar al mínimo, asimismo los sensores se han colocado en el riel para evitar complicaciones en el cableado. Por lo anterior el chasis resulta ser únicamente estructural, estando todos los sistemas contenidos en el riel.

**Materiales y dimensiones.** Partiendo de la idea preliminar de chasis descrita anteriormente, se escogió un tamaño basado en las dimensiones de los núcleos de electroimanes tipo  $E$  disponibles en el mercado; la disposición energética en el laboratorio y la reducción de costos. También se consideró

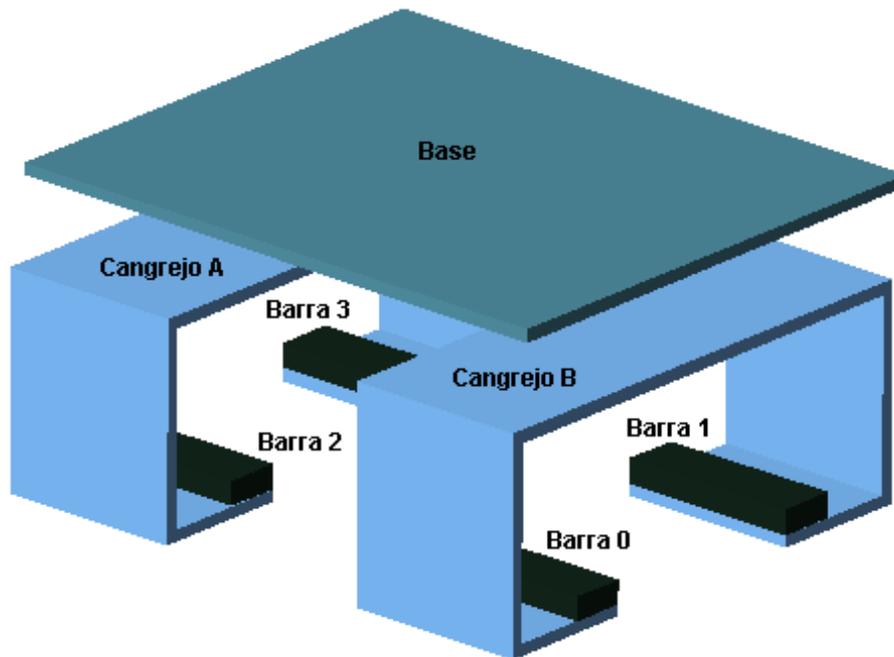


Figura 4.1: Partes del chasis

la conveniencia de construir un prototipo de laboratorio adecuado para realizar experimentación tanto en pruebas de levitación, como en pruebas de desplazamiento en una segunda etapa.

La dimensión escogida para la base es aproximada a una hoja tamaño carta. El alto del chasis se construyó en base a las dimensiones de los electroimanes escogidos. Por su disposición en el mercado, su baja densidad y adecuada rigidez mecánica el material empleado en el chasis fue acrílico. La unión de las piezas en cada cangrejo entre partes de acrílico se realizó con la sustancia llamada acetona (dimetil cetona, 2-propanona) y la unión con las barras férricas se realizó con tornillos. Para la unión de los cangrejos con la base superior se utilizaron tornillos inoxidable. El acoplamiento entre las tres partes de este chasis, cangrejos y placa superior, fue por medio de tornillos.

Debido a que el riel es el elemento que cuenta con los actuadores, los sensores y además debe soportar las fuerzas de reacción originadas por la levitación del prototipo, el material elegido para su construcción fue aluminio. Su geometría es de sección transversal "T" con doble columna vertical y su longitud es del doble que la del chasis para que permita futuros experimentos de traslación. Véase la Figura 4.2.

Las dimensiones del chasis son de 32 x 22 x 10 cm., mientras que las del riel son de 21.6 x 10 x 64 cm. Las especificaciones exactas de todas y cada una de las partes mecánicas del prototipo pueden consultarse en el Apéndice A.

**Ubicación y dimensiones de los actuadores.** Los actuadores empleados son electroimanes tipo *E* (véase Figura 4.8), la dimensión de estos ha sido escogida atendiendo a la disposición en-

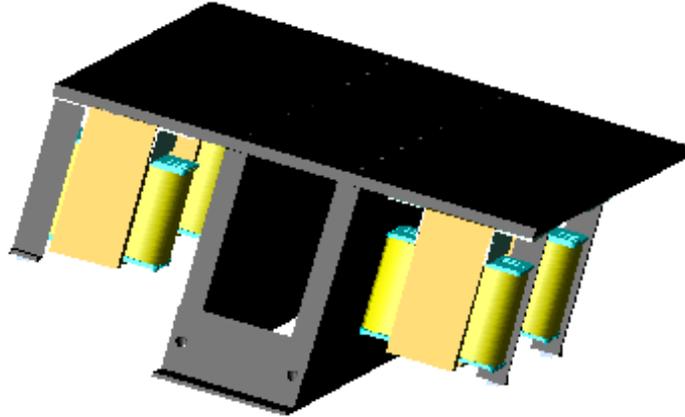


Figura 4.2: Riel del prototipo con sensores y actuadores.

ergética en el laboratorio, la capacidad magnética de éstos, su disposición en el mercado así como su peso. Se han empleado cuatro electroimanes idénticos y se ubican exactamente correspondiendo a las cuatro barras magnéticas del chasis. Dos escuadras para cada núcleo de electroimán han sido utilizadas para realizar la unión mecánica de éstos al riel. Las dimensiones exactas de los electroimanes se encuentran en el Apéndice A.

**Ubicación y soporte de los sensores.** Debido a que los sensores empleados son muy pequeños (véase Figura 4.3), requieren de una estructura de soporte que sea variable en longitud de tal forma que el sensor que funciona por rebote de luz infraroja pueda colocarse y calibrarse a poca distancia del chasis. Cuatro pequeñas láminas metálicas han sido unidas al chasis, justo abajo de cada sensor para asegurar el rebote de la señal.

Los sensores se han colocado en soportes que a su vez se han distribuido junto a los actuadores. Los sensores y los soportes correspondientes al cangrejo A se han colocado en esquinas opuestas para permitir la experimentación independiente de un solo cangrejo y los correspondientes al cangrejo B se han colocado en ambas esquinas traseras pues se utilizarán con todo el chasis levitando a la vez (Figura 4.4).

Los soportes de los sensores contruidos de aluminio permiten la regulación de la altura del sensor mediante un ajuste con tornillo y tuerca, véase la Figura 4.5. Con este sencillo diseño la posición de los sensores a la superficie reflejante del chasis puede regularse desde 0 hasta 2 cm, margen suficiente para calibrar los sensores de tal forma que éstos proporcionen una medición confiable del hueco de aire.

La cabeza del tornillo que une la placa fenólica que contiene el sensor con el soporte inferior ha sido adecuada de tal forma que sea imposible que el sensor sufra golpes.

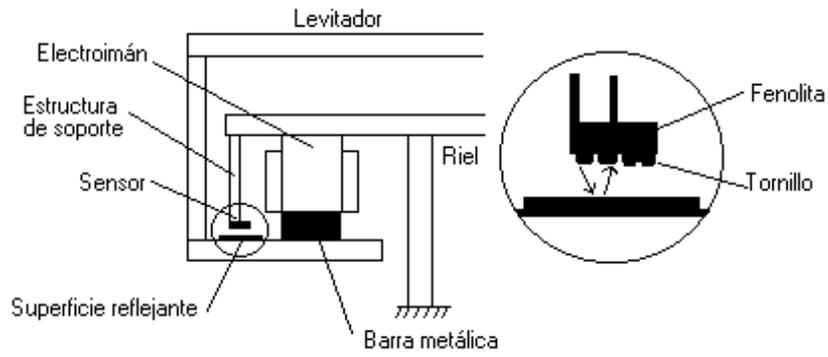


Figura 4.3: Detalles mecánicos de sensado.

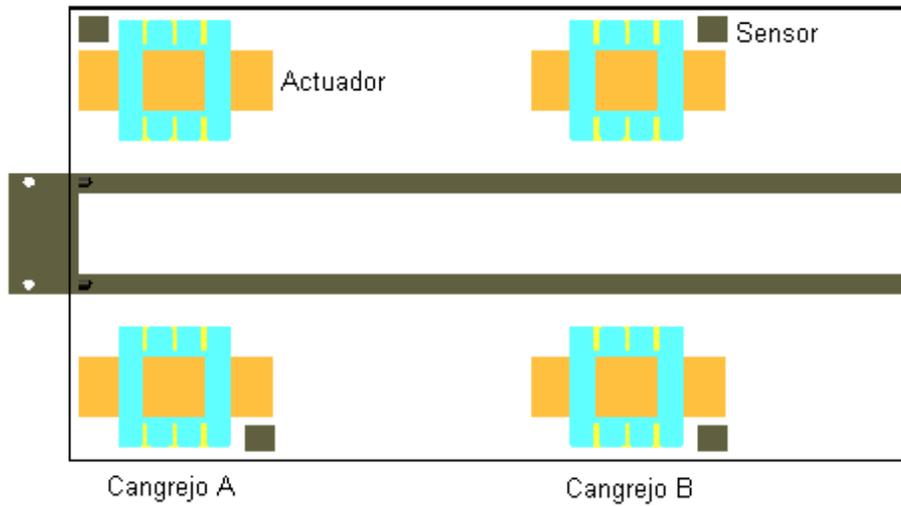


Figura 4.4: Ubicación de los actuadores y sensores. Vista inferior del riel

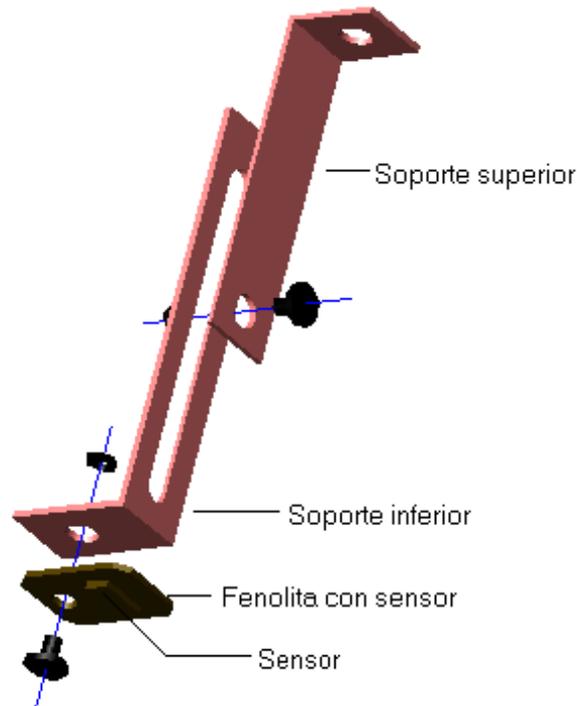


Figura 4.5: Despiece del soporte de sensor.

## 4.2. Sistema eléctrico y electrónico.

Este sistema comprende tanto los actuadores y sus manejadores como el acondicionamiento de señal de nuestro prototipo, es decir, los electroimanes y su electrónica de potencia, el sensado y la amplificación de las señales entre otras.

Partiendo de la idea básica de prototipo levitador ya descrita en la sección anterior se diseñó la electrónica que aquí se presenta.

### 4.2.1. Sensores y tratamiento de señal

No puede ser posible controlar un sistema y menos hacer levitar una plataforma con tecnología de atracción electromagnética (EMS por sus siglas en inglés) si no se cuenta con un sensor de hueco de aire, término como mejor se le conoce a la distancia existente entre el electroimán y la barra de hierro del chasis. Aunado a esto debe existir una circuitería que permita adecuar las señales de los sensores para poder ser interpretado por otras etapas del circuito o la computadora.

**Sensor.** Las necesidades de sensado de distancia son algo estrictas. El sensor necesario debe medir pequeñas distancias de entre 0 y 5 mm además de no presentar ningún vínculo mecánico entre las superficies en cuestión. Entre muchos sensores investigados dos tipos fueron los más adecuados,

los sensores inductivos y los sensores ópticos de estado sólido. Se eligió la tecnología optoelectrónica sobre los inductivos por las siguientes razones: la tecnología de sensado por rebote infrarrojo no requiere unión mecánica alguna; el tiempo de respuesta es inferior a  $40 \mu\text{s}$ ; la alimentación es sencilla y el consumo de energía mínimo; el tamaño, el peso y el costo es muy reducido.

De entre varios sensores optoelectrónicos se escogió el EE-SY124 de la compañía Omron (Figura 4.6) por su margen de trabajo adecuado para nuestro prototipo (1 a 5 mm), su tamaño (4.0 x 3.0 x 1.7 mm), el hecho de no ser afectado por la luz ambiente y debido a que sus características cumplen totalmente con los requerimientos de nuestro prototipo. La única desventaja que encontramos es su respuesta no lineal, pero este problema es resuelto con una adecuada caracterización del sensor. Este sensor requiere para funcionar óptimamente de una superficie metálica de reflejo, por ello una para cada sensor ha sido colocada en el chasis.

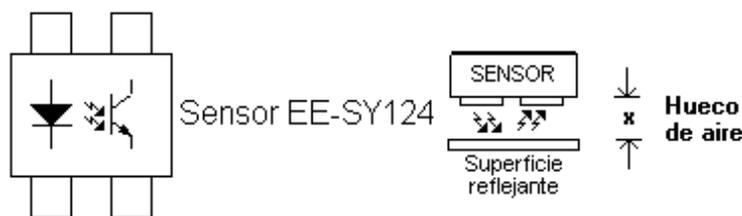


Figura 4.6: Sensor EE-SY124

**Tratamiento de señal.** Una circuitería simple de alimentación del sensor así como de amplificación de la señal es utilizada, ésta se presenta en el Apéndice B, mostrándose mas adelante en esta sección el diagrama a bloques correspondiente al Sistema de Medición de Hueco de Aire. Se calculó el valor de amplificación que el sensor requería para contar con una salida que fuese positiva y aproximadamente cubriera el rango de 0 a 5 V. Este rango fue escogido ya que es adecuado para las etapas electrónicas posteriores así como para la tarjeta de adquisición de datos.

Se diseñó la etapa de amplificación considerando que una variación en distancia de entre 1 y 5 mm resulten en un voltaje entre 0 y 5 V.

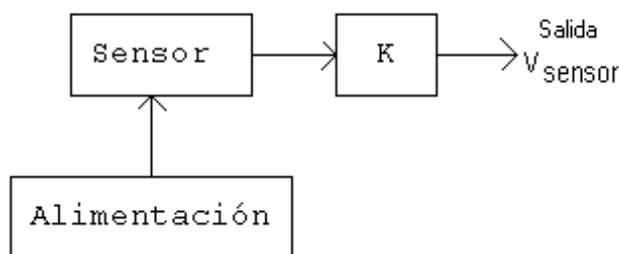


Figura 4.7: Diagrama a bloques del sistema de medición de hueco de aire.

El diagrama a bloques correspondiente al circuito basado en un amplificador operacional en

configuración de amplificador no inversor puede verse en la Figura 4.7. La constante de amplificación  $K$  es de 16, ya que es este valor el que genera el margen deseado de salida.

### 4.2.2. Actuadores

En nuestro prototipo, los actuadores son los electroimanes que al ser excitados eléctricamente producen una fuerza magnética atractiva que inducen un desplazamiento vertical sobre el chasis.

Como ya se mencionó anteriormente, para este trabajo se escogieron electroimanes tipo  $E$  (Figura 4.8). Para realizar esta elección se tomó en cuenta la relación masa-intensidad de campo magnético que distribuye el campo magnético en una superficie mayor evitando concentración de esfuerzos. Por otra parte presentan un núcleo laminado de acero al silicio que elimina corrientes parásitas, permiten el cambio de bobina sin desmontar el núcleo además de que están disponibles comercialmente y existen en distintos tamaños.

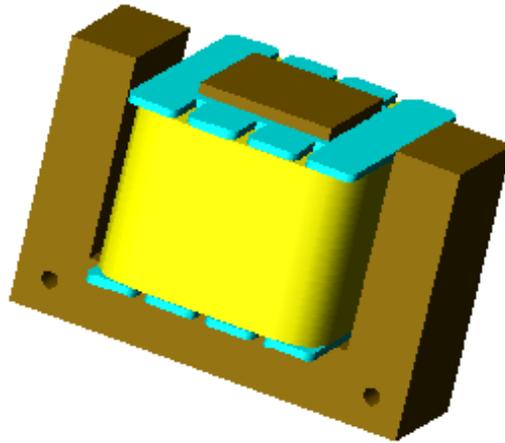


Figura 4.8: Actuador. Electroimán tipo  $E$ .

Las dimensiones de los electroimanes se eligieron a partir de las consideraciones magnéticas del capítulo 3, de las dimensiones propuestas del prototipo al inicio del diseño y de las características mecánicas deseadas.

Si bien un número de espiras grande asegura una fuerza magnética grande, también es cierto que aumenta la impedancia del actuador ocasionando que no pueda suministrarse la misma corriente sin cambiar la circuitería de potencia y la capacidad de alimentación.

**Cálculo del número de espiras de las bobinas.** Para elegir el número de espiras adecuado se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Voltaje alimentado al prototipo de 5V, con un máximo de 3A para cada módulo. Esto limita la resistencia del devanado a  $1.67\Omega$  máximo.
- Hueco de aire máximo deseado de 3 mm.

- Fuerza mínima de sustentación requerida de 10 N por bobina (40 N por las cuatro bobinas como mínimo para poder levitar el chasis).

Partiendo de los requerimientos anteriores, de las dimensiones comerciales de los núcleos de electroimán tipo  $E$  y de la ecuación (3.10) se requiere una bobina con un mínimo de 188 espiras. Se escoge una de 200 espiras. Se comprobó directamente que la resistencia fue de  $1.38\ \Omega$ , lo cual está dentro del límite.

Todo actuador requiere de un manejador, mejor conocido como “driver”, en la siguiente sección se detallará esta parte del prototipo.

### 4.2.3. Etapa de potencia

La etapa de Potencia es la que suministra la energía eléctrica necesaria a los electroimanes. Ha sido diseñada para trabajar en dos formas, control por corriente y control por modulación de ancho de pulso o PWM. Se ha cuidado aislar la etapa del circuito que maneja potencia de las etapas previas de baja potencia para evitar ruidos inducidos, interferencias o posibles daños al equipo. En la Figura 4.9 puede observarse un diagrama a bloques de esta etapa.

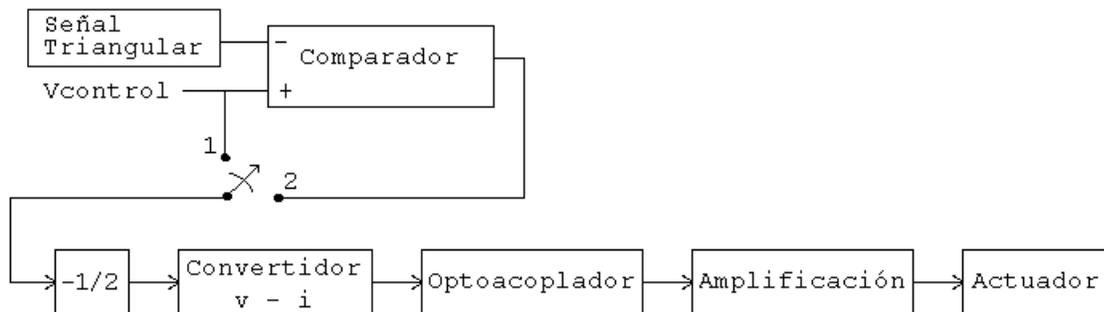


Figura 4.9: Diagrama a bloques de la etapa de potencia.

En el diagrama a bloques de la Figura 4.9, en la posición 1 del selector se tiene un control por corriente; en la posición 2 se tiene un control por modulación de ancho de pulso o PWM. En el circuito real este cambio de función no se realiza con un selector sino mediante un cambio de conexiones sobre la tarjeta electrónica (Ver Figura B.5).

**Circuito del actuador.** Como puede observarse en la Figura 4.10 el electroimán se coloca directamente en serie con el transistor de potencia y éstos entre la fuente de poder. Un diodo es colocado en paralelo con el electroimán para eliminar las corrientes inversas inducidas por la bobina. Es este diodo lo que vuelve controlable a la bobina, pues de otra forma la bobina presenta un comportamiento muy 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.

**Control por corriente.** Primeramente se concibió esta forma de manejo de corriente en el actuador la cual transforma una señal eléctrica de voltaje de entre 0 y 5 V a una corriente de entre

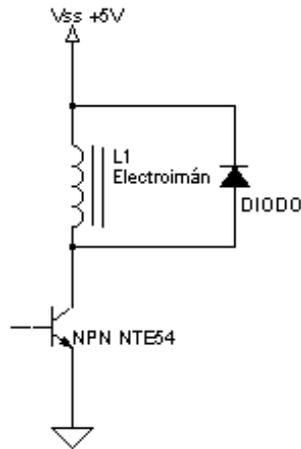


Figura 4.10: Circuito del actuador

0 y 2.5 A. Esto es, la variación continua en la señal de voltaje en la entrada origina una variación continua de corriente en el actuador. Esta etapa se diseñó lo más lineal posible, aunque no fue posible lograrlo del todo debido a no linealidades del transistor así como al comportamiento del actuador. En la Figura 4.11 se presenta el diagrama a bloques del control por corriente.



Figura 4.11: Diagrama a bloques de la circuitería de potencia con control por corriente.

La señal de entrada de voltaje es invertida y reducida a la mitad. La inversión se cancela con la inversión del bloque siguiente. La división se realiza para adecuar el rango de 5V a corriente máxima que es de 2.5A. El convertidor voltaje a corriente transforma los voltios de entrada en miliamperes de salida, es esta corriente el parámetro significativo para el actuador. A continuación el optoacoplador se encarga de aislar la electrónica de baja potencia del resto de la circuitería de la electrónica de mayor potencia que controla el actuador. El amplificador es un transistor tipo NPN de potencia con una ganancia de 100 aproximadamente, este amplifica la pequeña señal de salida del optoacoplador a un nivel de corriente alto el cual se aplica directamente al actuador.

**Control por modulación por ancho de pulso (PWM).** La bibliografía relacionada al tema Maglev indica que el control de los electroimanes se realiza mejor mediante modulación con ancho de pulso [17], [18], [19]. Por esta razón se implantó también esta forma de control de los actuadores. Véase el diagrama a bloques en la Figura 4.12.

En esta forma de manejo del actuador solo existen dos estados de voltaje en el actuador, todo o nada. La forma de manejar el actuador de esta forma y controlar la corriente a través de éste es

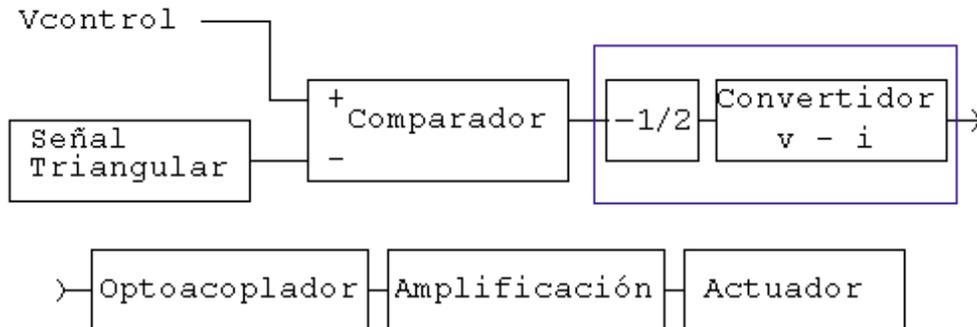


Figura 4.12: Diagrama a bloques de potencia con PWM.

mediante la modulación por ancho de pulso, es decir, variando el tiempo dentro de cada periodo en que la señal está activa. Por esto, el voltaje de entrada determina directamente el ciclo de trabajo de la señal (tiempo en que la señal permanece activa), lo anterior se describe en la Figura 4.13.

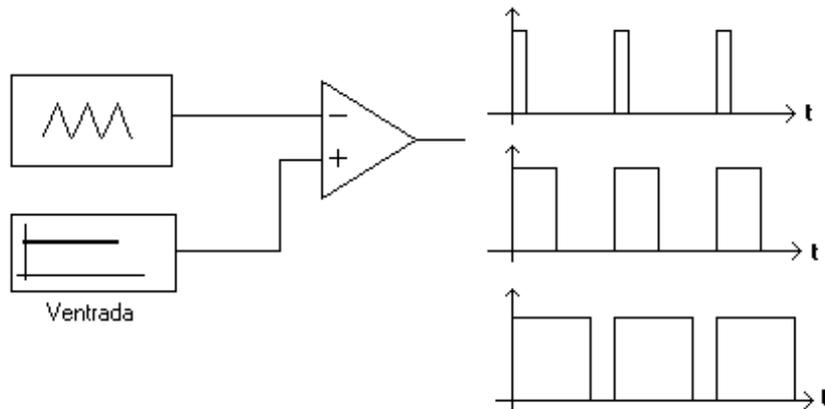


Figura 4.13: PWM y 3 estados.

En el control por modulación de ancho de pulso el voltaje de entrada se compara con una señal triangular, lo que produce la secuencia de pulsos de ancho variable mostrada en la Figura 4.13. La frecuencia no varía, pues ésta es proporcionada por la señal triangular.

En esta forma de control todo o nada, el transistor de potencia trabaja únicamente en corte o saturación (función de interruptor), resultando la función del bloque de conversión voltaje-corriente inútil, sin embargo este no causa ningún problema y dado que es necesario para el control por corriente se deja intacto. La frecuencia del PWM utilizado es de 3.3 KHz, esta señal puede variarse desde 2.2 KHz hasta 7 KHz.

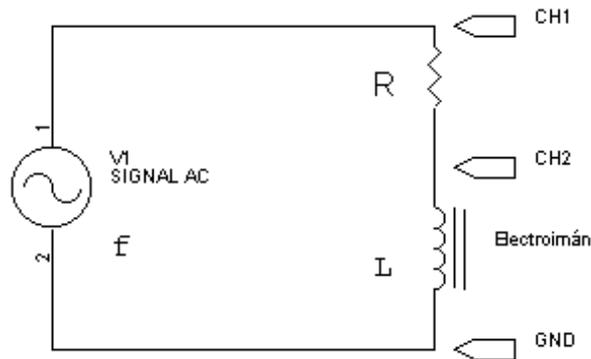


Figura 4.14: Circuito para medición de inductancias.

El control por PWM presenta una mayor estabilidad ante cambios de temperatura que el control por corriente, además el consumo de corriente es menor para un mismo hueco de aire, debido al funcionamiento como interruptor del transistor. Estas razones hacen que el manejo de Potencia para estos sistemas electromagnéticos se realice con PWM.

En el Apéndice B se presentan los diagramas electrónicos detallados de todos estos sistemas.

**Potencia de levitación.** El valor máximo de corriente de cada etapa de potencia es de 3,2 A y el voltaje de diseño es de 5 V, por lo que para todo el sistema de potencia del prototipo compuesto por 4 módulos se necesita una fuente de alimentación de 64 W o dos de 32 W, ya que el diseño permite utilizar dos fuentes por separado. La circuitería de tratamiento de señal, preamplificado de potencia y control analógico consume un total de 20 W, distribuido en 7,5 W a 0.5 A por cada una de las fuentes de +15 V y -15 V y 5 W a 0.5 A por la fuente de 5 V. El consumo máximo de energía del prototipo es de 84 W.

**Capacidad de carga teórica.** Siendo el tamaño del hueco de aire nominal de 2 mm y la corriente máxima de los actuadores de 2,7 A, calculamos a partir de la ecuación (5.1) que cada actuador será capaz de sustentar 20,6 N. Esto es una capacidad total de levitación de 82,4 N. Si el chasis pesa  $2,7 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2 \approx 26,5 \text{ N}$ . La capacidad de carga es  $82,4 \text{ N} - 26,5 \text{ N} \approx 56 \text{ N}$  o 5,7 kg

**Medición de inductancia de los electroimanes.** Se partió de un circuito RL serie (véase Figura 4.14), con un generador de funciones se le aplicó una señal senoidal, se conectó un osciloscopio de 2 canales como se indica en el diagrama. Se buscó una resistencia de prueba, para este caso fue de  $1 \text{ k}\Omega$ . Se modificó la frecuencia de la fuente hasta encontrar un defasamiento 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.

Debido a que la resistencia de la bobina es menor de  $2\Omega$  se puede despreciar su efecto al sumarse con la resistencia (R) de prueba.

Comparando la reactancia inductiva y la resistencia de prueba tenemos,

$$2\pi fL = R,$$

despejando  $L$  tenemos,

$$L = \frac{R}{2\pi f}.$$

La frecuencia hallada fue de 9,1Khz, con lo que resulta una inductancia  $L = 17,5mH$ . Se hizo una prueba adicional de validación, cambiando la resistencia a  $2k\Omega$  por lo que se calcula que la frecuencia a la cual se presenta el defasamiento de  $45^\circ$  es de 18.2khz. Se valida el resultado obtenido ya que las mediciones dan el resultado calculado. Se realiza el mismo experimento en los demás electroimanes del proyecto no arrojando ninguna variación perceptible.

## Capítulo 5

# Modelado de la plataforma de levitación

En el presente capítulo se desarrolla un modelo matemático de la plataforma de levitación; se describirá el sistema físico en términos matemáticos para su posterior análisis y control. Debido a la complejidad del modelo del sistema, en este trabajo se considera que se cuentan con actuadores desacoplados entre sí, esto es, se considera un modelo una entrada-una salida (modelo SISO, por sus siglas en inglés) para cada uno de los sistemas de levitación electromagnética. Llamaremos “módulos” a cada uno de estos sistemas de levitación electromagnética.

### 5.1. Preliminares

#### 5.1.1. Validación de la expresión de fuerza electromagnética de atracción en un imán tipo $E$

Para validar la expresión dada en la ecuación (3.10), se realizó un experimento con una bobina y una barra metálica tal cual se muestra en la Figura 3.3. Primero se obtuvo teóricamente el valor de la constante  $k$  (dada en (3.10)) y después experimentalmente, comparando ambos resultados. Los parámetros de este experimento se muestran en la Tabla 5.1.

La constante  $k$  puede obtenerse analíticamente como,

Permeabilidad magnética en el vacío	$\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$
Dimensiones del electroimán	$a = 0,015 \text{ m}$ y $c = 0,030 \text{ m}$
Número de espiras en el electroimán	$N = 200$
Aceleración gravitacional	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$
Masa prueba	$m = 0,55 \text{ kg}$

Tabla 5.1: Parámetros considerados del prototipo.

$$k = \frac{\mu_0 ac N^2}{2} = 1.131 \times 10^{-5} \left( \text{V} \frac{\text{s}}{\text{A}} \text{m} \right). \quad (5.1)$$

#### Obtención experimental de $k$ .

De manera experimental se obtuvo la gráfica de la Figura 5.1 que relaciona la corriente  $i$  contra la distancia  $x$ , obteniendo para distintos valores de  $x$  el correspondiente valor de  $i$  para el cual se obtiene equilibrio de fuerzas, es decir  $F = mg$ . Como es de esperarse, los valores se aproximan a una línea recta, ya que la ecuación teórica indica que la relación es proporcional. Aproximando por

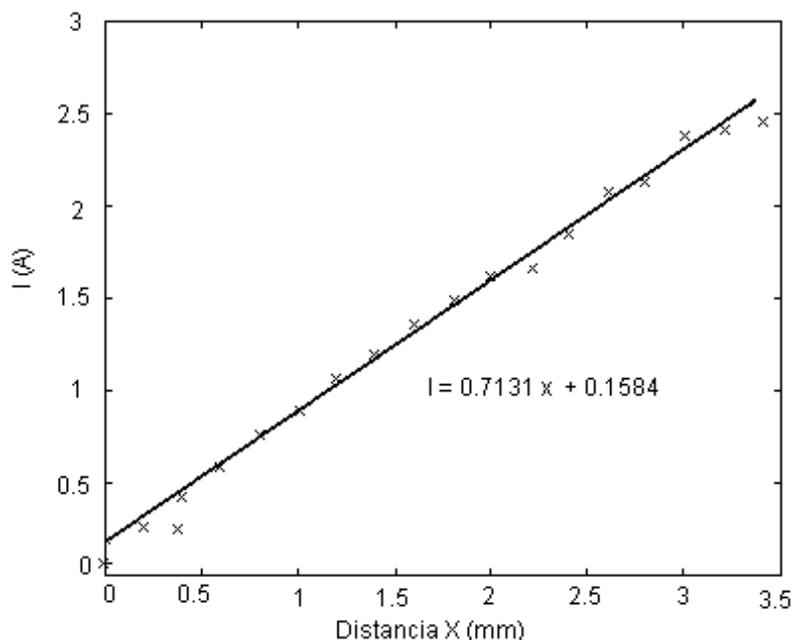


Figura 5.1: Gráfica de hueco de aire vs I de sustentación.

una línea recta los valores experimentales obtenidos, esto es  $i = 0,713x$ . Dado que  $F = k_f \frac{i^2}{x^2}$  y como  $F = mg$  se obtiene,

$$k_f = \frac{mg}{(713 \text{ A/m})^2} = 1.0613 \times 10^{-5} \left( \text{kg} \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2 \text{A}^2} \right). \quad (5.2)$$

La razón de que la línea recta (Figura 5.1) que se obtiene como resultado de aplicar la aproximación no inicie en cero, es debido a las irregularidades en las superficies del electroimán y la barra ferromagnética.

Al comparar las ecuaciones (5.1) y (5.2) notamos que los valores de  $k$  obtenidos son muy similares, la diferencia es de solo 6,16%, además la relación experimental entre  $i$  y  $x$  es casi lineal, conforme a lo esperado, entonces, la ecuación (3.10) queda validada.

### 5.1.2. Medición de la distancia de sustentación

La respuesta del sistema de medición se obtuvo de forma experimental, resultando la curva mostrada en la Figura 5.2 (puede verse la similitud de ésta con la gráfica “características de sensado de distancias” presentada en la hoja de datos del fabricante del sensor), esto es posible debido a que al sensor se le ha añadido un amplificador lineal. Aunque la respuesta del sensor no es lineal, su respuesta es suave y adecuada para la medición de pequeñas distancias, sobre todo en el intervalo de 1 a 4 mm el cual es el que se requiere en este trabajo.

Como se ve en la Figura 5.2, el intervalo de variación de  $V_{sensor}$ , definido como la salida de la etapa de tratamiento de señal del sensor (Figura 4.7), es entre 0 y 5.5 V. Esta respuesta no es una función únicamente determinada por la distancia pues para un mismo valor de  $V_{sensor}$  pertenecen dos valores de distancia. Sin embargo al calibrarse la distancia a la superficie reflejante del sensor de tal forma que la respuesta máxima sea de 5.0 V se hará que en términos matemáticos la respuesta sea una relación uno a uno con la distancia. Esto es muy importante ya que de no ser así la respuesta del sensor no estaría bien determinada. Por otra parte, el intervalo de respuesta estará dentro del intervalo de medición de la tarjeta de adquisición de datos empleada (Ver Apéndice C.2). Calibrando así (Figura 5.2),  $V_{sensor}$  tendrá como valor máximo 5 V. De esta forma el hueco de aire mínimo resultará en un valor de  $V_{sensor}$  de 5 V y un hueco de aire máximo resultará en un valor cercano a 0 V.

La entrada de señal hacia la tarjeta de adquisición de datos no es el voltaje del sensor ( $V_{sensor}$ ), sino el voltaje de error ( $V_{error}$ ), es decir, la diferencia entre el Voltaje de referencia “ $V_{referencia}$ ” (proporcionado por un potenciómetro discreto) y el voltaje del sensor “ $V_{sensor}$ ”, por esto el intervalo de variación de  $V_{error}$  es (-5.0V , 5.0V), por lo cual la entrada analógica de la tarjeta de adquisición de datos ha sido programada para la lectura de dicho intervalo.

Partiendo de la caracterización del sensor mostrada en la gráfica de la Figura 5.2, se ha calculado con el método de mínimos cuadrados y mediante MATLAB un polinomio de 3er orden para aproximar la distancia (X) en mm a partir del voltaje en el sensor ( $V_{sensor}$ ).

$$X = -1,1618V_{sensor}^3 + 6,5546V_{sensor}^2 - 12,8134V_{sensor} + 9,6713 + k_{calibración}$$

Este polinomio requiere además de una constante de calibración ( $k_{calibración}$ ) que debe ser obtenida experimentalmente pues recordemos que la distancia entre el sensor y la superficie reflejante puede variarse mediante los soportes de sensado para un mismo hueco de aire. Esta aproximación puede variar también en menor medida por el ángulo entre el sensor y la superficie reflejante, así como por suciedad en estos.

#### Procedimiento de calibración de sensores

1. Se une la barra férrea con el electroimán correspondiente activando el electroimán a corriente máxima.
2. Se afloja el tornillo horizontal del soporte mecánico del sensor y se busca la posición del sensor que marque 5V. Con esto se asegura que el sensor no trabajará en la “zona prohibida” que causaría inconsistencias en la medición. Véase la Figura 5.2.
3. Se aprieta el tornillo con mucho cuidado y evitando que la lectura cambie por abajo de 5V.

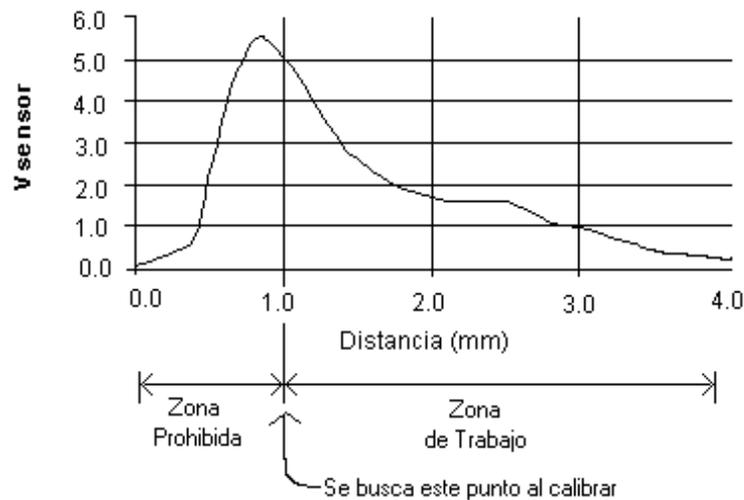


Figura 5.2: Respuesta del sensor, gráfica X vs Vsensor. Calibración.

### 5.1.3. Respuesta de la etapa de potencia

Con el propósito de analizar el comportamiento de la etapa de potencia se obtuvo experimentalmente la caracterización de la respuesta de la circuitería de potencia, tanto para el control por corriente como para el control por modulación de ancho de pulso (PWM). Para este circuito, en ambos casos su entrada es el voltaje de control ( $V_{control}$ ) y su salida es la corriente ( $I_{elect}$ ) que se aplica a cada electroimán. Las respuestas fueron obtenidas con ayuda de la tarjeta de adquisición de datos y mediante un programa de cómputo que se realizó para este propósito. Este puede ser consultado en el Apéndice C.

La respuesta obtenida para el circuito de potencia con control por corriente puede verse en la Figura 5.3. Se notó que la temperatura afecta dicha respuesta en forma considerable (alrededor de 20% para lecturas repetitivas similares) por lo cual se hicieron las pruebas tomando como base una corriente estacionaria de 1.5 A, la cual es cercana a la corriente teórica de trabajo del prototipo.

También experimentalmente se obtuvo la relación entrada-salida del circuito de potencia utilizando modulación de ancho de pulso (PWM). Esta relación está dada por la gráfica mostrada en la Figura 5.4. Esta gráfica demostró ser superior en estabilidad (con respecto a variaciones de temperatura) y de comportamiento más cercano a una línea recta que la correspondiente al control por corriente.

Al comprobarse el mayor desempeño del control por ancho de pulso sobre el control por corriente se ha optado por realizar todos los experimentos subsecuentes utilizando PWM.

La señal de salida de la tarjeta de adquisición de datos para los módulos que han de ser controlados por computadora ( $V_{control}$ ) será la que se dirija a la etapa de potencia del prototipo para ser convertida en Corriente aplicada al Electroimán. La etapa de potencia se ha diseñado para un voltaje de entrada “Vactuador” en el intervalo  $[0, 5]$  V, este intervalo lo otorga directamente la tarjeta programando su salida en modo unipolar en el intervalo de funcionamiento  $[0, 10]$  Voltios.

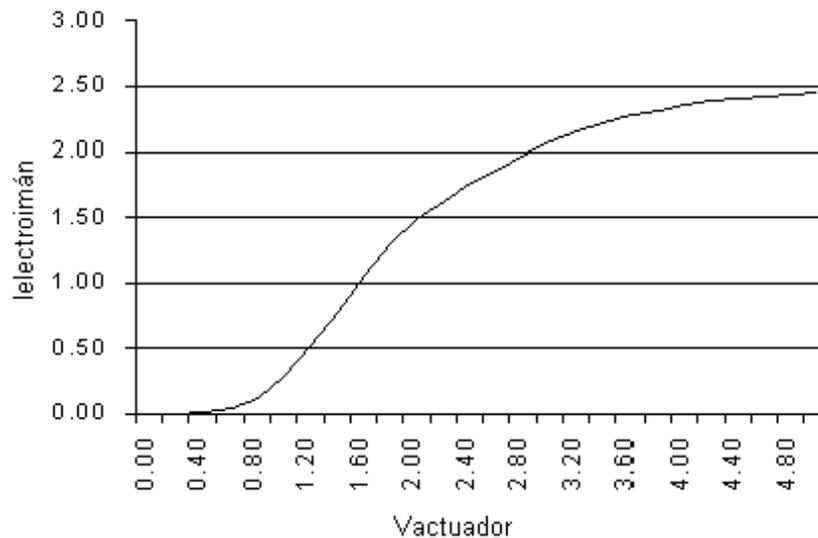


Figura 5.3: Gráfica de voltaje contra corriente para control por corriente.

Cabe mencionar que valores mayores que 5 V aplicados por un posible error a la etapa de potencia no causarán ningún daño y su efecto será mínimo pues ya se habrá llegado desde los 5 V a la zona de saturación tanto del transistor de potencia como de la capacidad de corriente del electroimán.

Conociendo la relación dada en la Figura 5.4, y siguiendo el mismo método de mínimos cuadrados que se utilizó para la respuesta del sensor se obtiene un polinomio de 4<sup>o</sup> orden que describe esta relación, esto es,

$$V_{control} = 0,1723i^3 - 1,1194i^2 + 3,6685i - 0,1367$$

Se tiene entonces una forma que permite calcular el Voltaje necesario para obtener una corriente requerida. Esta relación polinomial es considerada en el programa de cómputo para poder obtener la respuesta en corriente en el actuador que el control o el usuario requiera.

## 5.2. Modelado de un módulo de levitación

Es importante mencionar que en varios trabajos relacionados con los sistemas de levitación electromagnética ([12], [13] y [18]) el control de cada uno de los módulos de levitación se realiza de forma independiente, es decir, ignorando los efectos de los otros módulos; aunque este efecto no es despreciable debido al acoplamiento mecánico del chasis de nuestro prototipo, puede considerarse así para propósitos de simplificación del modelo y del control. Esta es precisamente la estrategia que se seguirá en este trabajo.

Por lo anterior se obtendrá el modelo matemático de un solo módulo, que representa lo que se conoce como sistema una entrada-una salida (UEUS o SISO, por sus siglas en inglés).

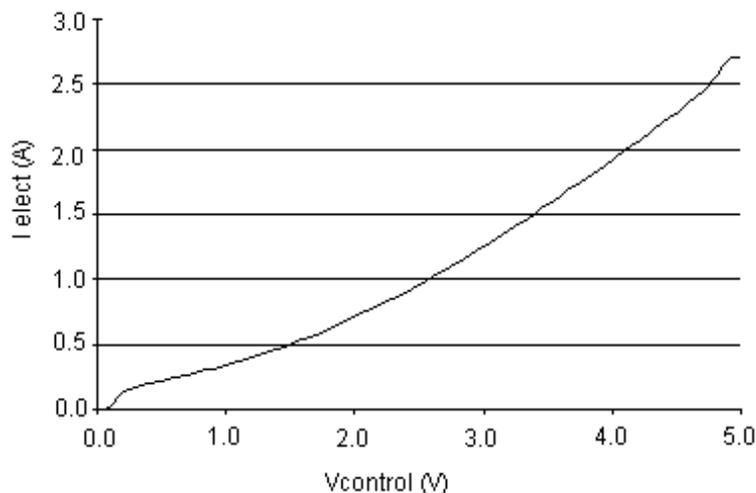


Figura 5.4: Gráfica de I vs Vcontrol con control PWM.

Un cuarto de la masa total del chasis	$m = 2,7 \text{ kg}/4 = 0.675 \text{ kg}$
Constante de fuerza electromagnética	$k = 1.131 \times 10^{-5} \text{ (V) } \frac{\text{s}}{\text{A}} \text{ m}$
Aceleración gravitacional	$g = -9,81 \text{ m/s}^2$
Inductancia del electroimán	$L = 17,5 \times 10^{-3} \text{ H}$
Resistencia del electroimán	$R = 1,38 \Omega$

Tabla 5.2: Parámetros del prototipo para el modelo matemático.

Se obtendrá el modelo de un módulo de levitación en variables de estado, debido a su naturaleza no lineal, se linearizará en torno a un hueco de aire de 2 mm, este valor se ha escogido como parámetro de diseño ya que requiere un consumo de energía que está dentro de lo posible de ser suministrado por la circuitería de potencia además de no producir efectos electromagnéticos no deseados como inducción magnética elevada (Ver Sección 3.3.2).

La representación gráfica de la planta a modelar puede consultarse en la Figura 5.5, los parámetros del sistema a modelar se presentan en la Tabla 5.2.

Las ecuaciones diferenciales que describen la planta son,

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (5.3)$$

$$m\ddot{z} = mg + F_m \quad (5.4)$$

donde  $F_m = k \frac{i^2}{z^2}$ . La primera ecuación diferencial es la correspondiente al circuito eléctrico de potencia y la segunda representa la dinámica del sistema.

Tomamos las variables de estado,

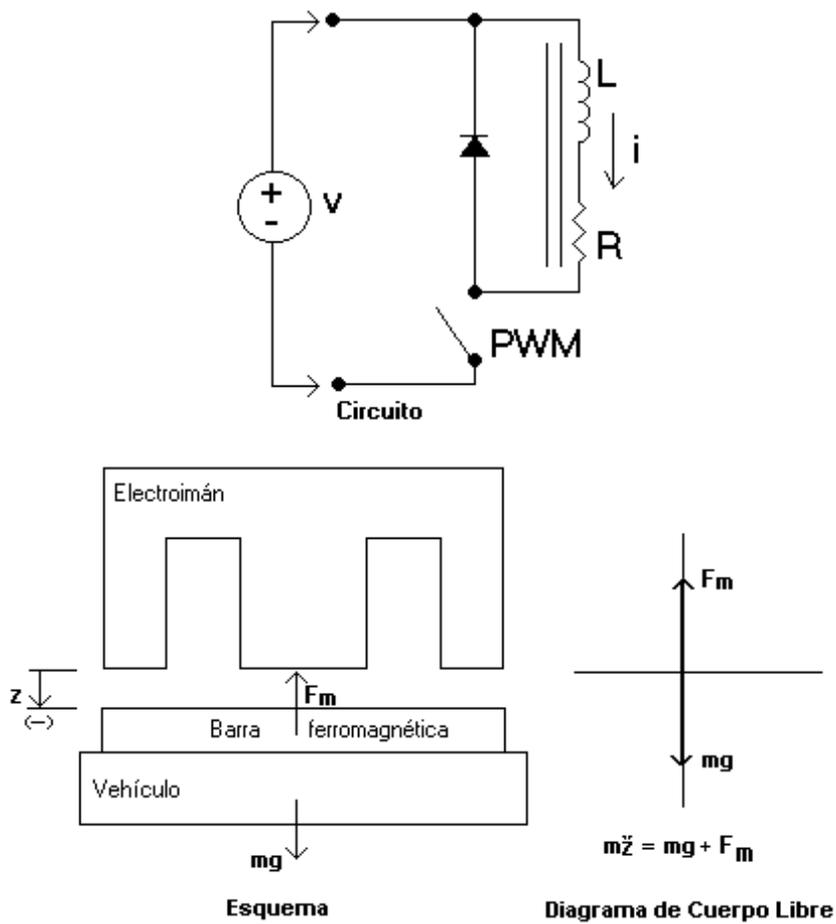


Figura 5.5: Diagramas de la planta para modelado

$$x_1 = i, \quad x_2 = z, \quad x_3 = \frac{dz}{dt},$$

y nombrando la entrada  $v$  de voltaje como  $u$ , se obtienen las ecuaciones dinámicas no lineales del sistema en la forma,

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)).$$

Equivalentemente,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_1 + \frac{1}{L}u \\ x_3 \\ g + \frac{k}{m}\frac{x_1^2}{x_2^2} \end{bmatrix}. \quad (5.5)$$

Dado que el objeto fundamental de control será la regulación de la plataforma de levitación en una distancia determinada, para efectos de análisis y control a continuación se presenta la linealización del sistema (5.5) alrededor del punto  $(x_1 = x_{01}, x_2 = x_{02}, x_3 = x_{03})$ . Se obtiene un sistema de la forma,

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= A^* \Delta x + B^* \Delta u \\ y &= C \Delta x, \end{aligned} \quad (5.6)$$

donde dado que  $\dot{x}_{02} = 0$ ,

$$x_{01} = -x_{02} \sqrt{\frac{-gm}{k}}. \quad (5.7)$$

Dado que,

$$A = \left. \frac{\delta f}{\delta x} \right|_{x=x_0, u=u_0}, \quad B = \left. \frac{\delta f}{\delta u} \right|_{x=x_0, u=u_0},$$

se obtiene

$$\begin{aligned} A^* &= \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1} & \frac{\delta f_1}{\delta x_2} & \frac{\delta f_1}{\delta x_3} \\ \frac{\delta f_2}{\delta x_1} & \frac{\delta f_2}{\delta x_2} & \frac{\delta f_2}{\delta x_3} \\ \frac{\delta f_3}{\delta x_1} & \frac{\delta f_3}{\delta x_2} & \frac{\delta f_3}{\delta x_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{2kx_{01}}{mx_{02}^2} & -2\frac{kx_{01}^2}{mx_{02}^3} & 0 \end{bmatrix} \\ B^* &= \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta u} \\ \frac{\delta f_2}{\delta u} \\ \frac{\delta f_3}{\delta u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

El sistema linealizado resulta ser,

$$\Delta \dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{2kx_{01}}{mx_{02}^2} & -2\frac{kx_{01}^2}{mx_{02}^3} & 0 \end{bmatrix} \Delta x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u, \quad (5.8)$$

donde,

$$\Delta x = x - x_0, \quad \Delta \dot{x} = \dot{x} - \dot{x}_0 = \dot{x}, \quad \Delta u = u - u_0.$$

Sustituyendo (5.7) en (5.8) se obtiene

$$\Delta \dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{2}{x_{02}} \sqrt{\frac{kg}{m}} & \frac{2g}{x_{02}} & 0 \end{bmatrix} \Delta x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u. \quad (5.9)$$

Considerando como salida del sistema la posición  $x_2$ , se obtiene

$$y = C\dot{x}, \quad (5.10)$$

donde

$$C = [0 \quad 1 \quad 0].$$

De lo anterior el sistema linealizado (5.6) puede caracterizarse totalmente a partir de,

$$\begin{aligned} A^* &= \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{2}{x_{02}} \sqrt{\frac{kg}{m}} & \frac{2g}{x_{02}} & 0 \end{bmatrix} \\ B^* &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ C &= [0 \quad 1 \quad 0]. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Se obtiene el polinomio característico del sistema a partir de,

$$P(s) = \det(sI - A^*) = \begin{vmatrix} s + \frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & s & -1 \\ \frac{2}{x_{02}} \sqrt{\frac{kg}{m}} & -\frac{2g}{x_{02}} & s \end{vmatrix},$$

produciendo

$$P(s) = \left(s + \frac{R}{L}\right) \left(s + \sqrt{\frac{2g}{x_{02}}}\right) \left(s - \sqrt{\frac{2g}{x_{02}}}\right)$$

de donde los polos del sistema resultan ser,

$$s_1 = -\frac{R}{L}, \quad s_2 = -\sqrt{\frac{2g}{x_{02}}}, \quad s_3 = \sqrt{\frac{2g}{x_{02}}}. \quad (5.12)$$

**Función de transferencia en lazo abierto.**

La función de transferencia del sistema  $G(s)$  puede obtenerse directamente a partir de las ecuaciones (5.6) y (5.11),

$$G(s) = C (sI - A)^{-1} B$$

$$G(s) = \frac{-\frac{2g}{Lx_{01}}}{(s + \frac{R}{L})(s + \sqrt{\frac{2g}{x_{02}}})(s - \sqrt{\frac{2g}{x_{02}}})}. \quad (5.13)$$

El signo negativo de la función de transferencia de la planta se cancela al sustituir el valor de  $g$  dado en la Tabla 5.2.

Nótese que el sistema posee una ganancia inversamente proporcional a la corriente  $x_{01}$  y 3 polos, dos estables y uno inestable en  $\sqrt{\frac{2g}{x_{02}}}$  lo que indica que a mayor hueco de aire ( $x_{02}$ ) la estabilidad relativa del sistema se incrementa pues el polo está más cargado a la izquierda en el plano imaginario. Para los valores numéricos considerados en el prototipo de la planta la función de transferencia resulta,

$$G(s) = \frac{730,88}{(s + 78,9)(s + 99)(s - 99)}. \quad (5.14)$$

Puede notarse que el sistema descrito por (5.9) y (5.10) es completamente controlable ya que su matriz de controlabilidad  $C$ , dada por

$$C = [ B \quad AB \quad A^2B ] = \begin{bmatrix} 57,1 & -4502,9 & 355100 \\ 0 & 0 & 730 \\ 0 & 730,9 & 57640 \end{bmatrix}$$

resulta ser de rango completo. Por otra parte, el sistema resulta ser observable ya que posee una matriz de observabilidad  $O$ ,

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 12,8 & 9801 & 0 \end{bmatrix}$$

la cual es también de rango completo.

### 5.3. Dinámica completa del levitador

A partir del control sobre el hueco de aire o distancia  $z$  de cada uno de los soportes del chasis, podemos analizar los distintos movimientos que pueden presentarse y controlarse en la plataforma de levitación.

Como se ve en la Figura 5.6, tenemos un total de seis grados de libertad, tres de traslación y tres más de rotación. Sin embargo, debido a que solo tenemos control sobre las distancias  $z$  de cada uno de los soportes de la plataforma no todos estos grados de libertad pueden ser controlados.

En la Tabla 5.3 se analiza brevemente cada uno de los seis grados de libertad de nuestro prototipo.

En la Tabla 5.3, *ancho* y *largo* representan las dimensiones del chasis de nuestro prototipo y  $z_0$ ,  $z_1$ ,  $z_2$  y  $z_3$  son los valores de hueco de aire para los módulos correspondientes.

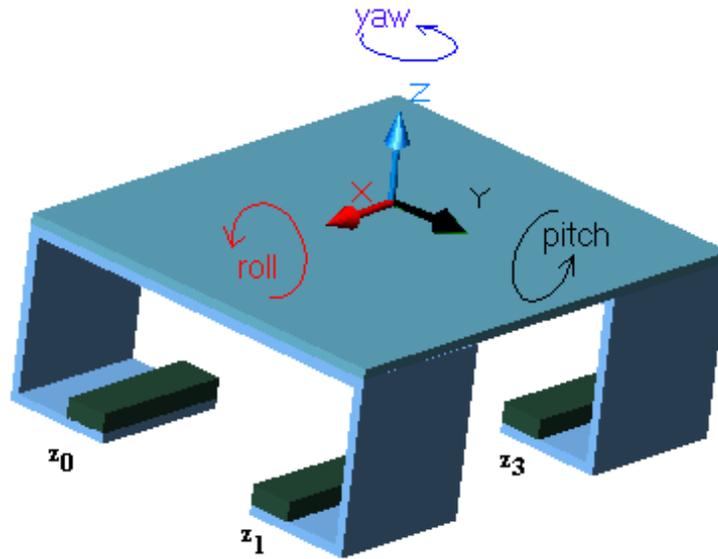


Figura 5.6: Dinámica del levitador

Note que los movimientos *roll* y *pitch* pueden ser controlados mediante la variación de las  $z_i$  de referencia correspondientes, sin embargo, debido a que nuestro proyecto tiene dos módulos analógicos (control de  $z_0$  y  $z_1$ ) y dos más digitales (control de  $z_2$  y  $z_3$ ), el control del movimiento *roll* no puede ser implantado y el movimiento *pitch* solo puede implantarse mediante la variación por computadora de los valores de referencia de  $z_2$  y  $z_3$  a la vez.

Debido a que la tarjeta de adquisición de datos permite monitorear los cuatro valores  $z$  es posible mediante programación monitorear entonces la posición  $z$  promedio del prototipo, así como los ángulos de *roll* y *pitch*.

Dinámica	Chasis	Expresión	Comentarios
x	despreciable	—	No posible, se requiere sistema de traslación
y	despreciable	—	Se ignora pues su efecto es despreciable
z	si	$\frac{z_0+z_1+z_2+z_3}{4}$	Este es el objetivo de control del prototipo
roll	si	$\tan^{-1}\left(\frac{-z_0+z_1-z_2+z_3}{2*\text{ancho}}\right)$	Podría controlarse (ver el texto)
pitch	si	$\tan^{-1}\left(\frac{-z_0-z_1+z_2+z_3}{2*l\text{ arg o}}\right)$	Puede ser controlado (ver el texto)
yaw	despreciable	—	Se ignora

Tabla 5.3: Grados de libertad del prototipo



## Capítulo 6

# Control de la plataforma de levitación

### 6.1. Control

En todo sistema de levitación electromagnético, el control de cada uno de los huecos de aire de cada uno de los subsistemas de levitación (módulos) es fundamental para el funcionamiento del vehículo, ya que es este control lo que mantiene al sistema en levitación a una distancia adecuada de su vía optimizando el consumo de energía.

El último objetivo en el presente trabajo de tesis es el control de la levitación del sistema a una distancia determinada. En el presente capítulo se detallan cada uno de los controles aplicados, las simulaciones correspondientes así como los resultados reales obtenidos en el prototipo.

Características principales del sistema de levitación magnética desde el punto de vista de control:

- No lineal
- Inestabilidad
- Región de estabilización muy restringida

Dependiendo si el control trabaja en forma continua o discreta los controladores pueden clasificarse en analógicos o digitales. Los controladores analógicos emplean circuitería eléctrica o electrónica o en algunos casos dispositivos mecánicos para aplicar los algoritmos de control, en general, lo hacen con gran velocidad de respuesta, permitiendo fácilmente un control en tiempo real. Sin embargo, puede mencionarse que los controladores analógicos son muy poco flexibles a cambios o muy difíciles de implantar. Los controles mediante computadora o controladores digitales son mucho más flexibles aplicándose a través de éstos, a todo tipo de algoritmos de control, como el caso de controladores modernos que requieren de muchos cálculos matemáticos.

Los controles digitales, se implantan bajo circuitería digital, generalmente microcomputadores. Estos requieren de una conversión analógica digital y digital analógica. Lo anterior hace más lento los controladores y más caros. Sin embargo, un sistema de cómputo tiene la capacidad de realizar muchísimos cálculos complejos siendo su implantación fácil. Actualmente los sistemas de cómputo

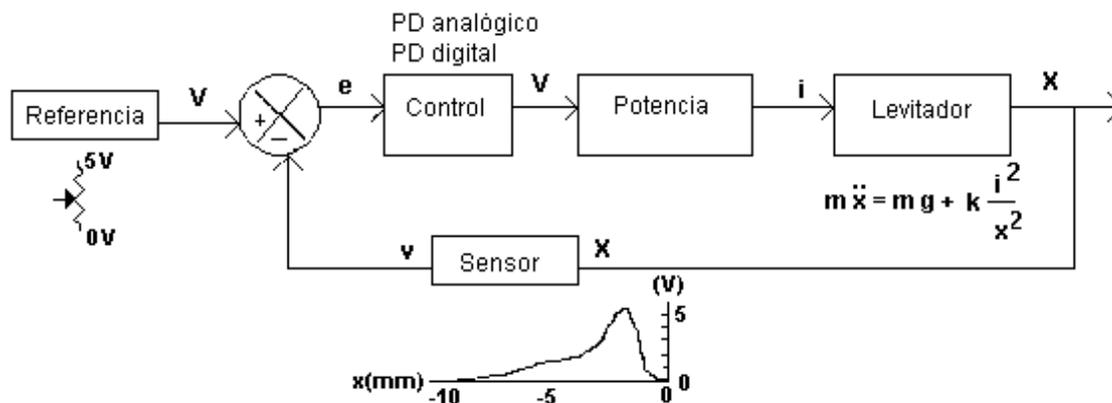


Figura 6.1: Diagrama general de control a bloques de un módulo del prototipo.

permiten control en tiempo real en la mayoría de los sistemas por la alta velocidad que poseen, sobre todo los DSP (procesadores digitales de señal, por sus siglas en inglés), sin embargo, resultan mucho más caros que otros basados tan solo en computadoras personales.

Debido a limitaciones en el número de entradas en la tarjeta de adquisición de datos utilizada para este proyecto, solo podrán controlarse de forma digital mediante computadora 2 módulos a la vez. Sin embargo nada impide que los 4 módulos puedan ser monitoreados completamente, debido a esta limitación 2 módulos serán controlados mediante control analógico clásico y dos más con control digital.

El objetivo de control es levitar el sistema con un mínimo de vibraciones, estabilizando el sistema en un punto determinado.

Es importante mencionar que en varios trabajos relacionados con los sistemas de levitación electromagnética el control de cada uno de los módulos se realiza de forma independiente, es decir ignorando los efectos de los otros módulos; aunque esto no es del todo cierto por el acoplamiento mecánico del chasis de nuestro prototipo, puede considerarse así para propósitos de simplificación del modelo y del control.

En la Figura 6.1 se presenta un diagrama general a bloques de la estructura de control de un módulo del prototipo, este será de utilidad para el análisis de los controladores que serán detallados más tarde en este capítulo..

En el presente trabajo de tesis se han implantado con buenos resultados dos algoritmos de control clásico, uno de tipo analógico y otro digital.

**Los algoritmos de control que se presentan son:**

1. Control Proporcional - Derivativo Analógico
2. Control Proporcional - Derivativo Digital

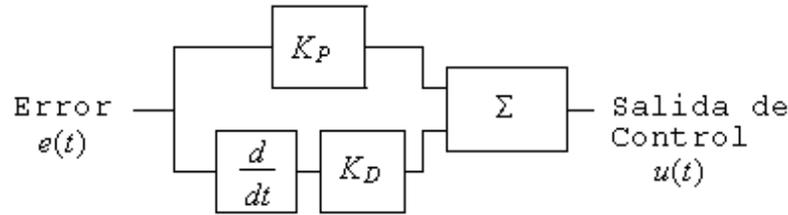


Figura 6.2: Diagrama a bloques de un controlador PD.

## 6.2. Esquema de control analógico

En cada uno de los dos módulos correspondientes al cangrejo B del chasis del prototipo levitador (Véase Figura 4.1) se le aplicó un esquema de control analógico clásico del tipo Proporcional-Derivativo (PD), esto con el objetivo de lograr la levitación de esta parte de la plataforma.

Matemáticamente el control PD se representa por,

$$u(t) = K_P e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (6.1)$$

donde

$e(t) = y_r(t) - y(t)$ : error de posición

$y_r(t)$ : posición de referencia

$y(t)$ : posición instantánea

$K_P$ : constante proporcional

$K_D$ : constante derivativa

El diagrama a bloques de la estructura del control utilizado en los Módulos 2 y 3 se muestra en la Figura 6.2.

El circuito utilizado para realizar esta acción de control puede consultarse en el Apéndice B.4, un circuito para cada uno de los módulos 2 y 3 ha sido construido. Las ganancias tanto de la parte proporcional como de la parte diferencial para cada uno de estos controladores ha sido obtenida mediante prueba y error, esto debido a que por la naturaleza inestable en lazo abierto del sistema de levitación no ha sido posible utilizar métodos de aproximación analítica para los parámetros de los controladores.

### 6.2.1. Simulación del control analógico PD

Partiendo del diagrama de la Figura 6.1, de la función de transferencia (5.14) y de la Tabla 6.1 se obtuvo el diagrama a bloques para el control analógico PD del módulo 3 mostrado en la Figura 6.3. Para este diagrama fue necesario obtener la ganancia del sensor, la cual se determinó a partir de mediciones experimentales alrededor del punto de trabajo que es de 2 mm.

Basándose en los datos presentados en este diagrama se llevaron a cabo diversas simulaciones. En la Figura 6.4 se muestra el lugar geométrico de las raíces del sistema en estudio y la respuesta de este a una señal escalón aplicado (equivalente en distancia a una referencia de 2 mm), ambas gráficas se han obtenido con ayuda del módulo RLTOOL de Matlab 6.12. En este podemos ver la ubicación

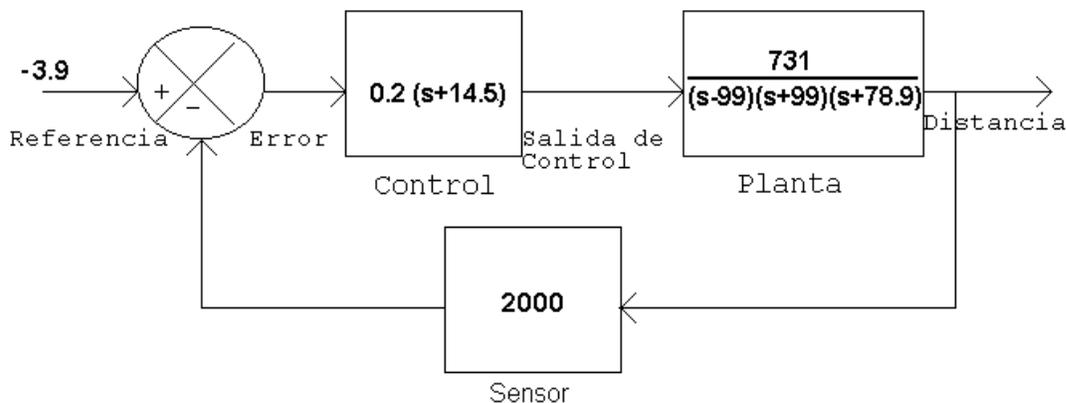


Figura 6.3: Diagrama de control analógico

de los 3 polos de nuestra planta, dos en el semiplano izquierdo del plano complejo y uno más en el lado derecho, es este último el que vuelve inestable al sistema, por lo cuál su efecto es cancelado mediante el controlador.

Las mayor parte de las simulaciones se llevaron a cabo en Simnon 3.0, el código utilizado se muestra en el Apéndice C.1. Las simulaciones arrojaron resultados interesantes y muy acordes a lo que realmente sucede con el sistema físico. Todas las simulaciones tuvieron como valor de referencia 2 mm, que fue el valor escogido en el diseño de todo nuestro sistema. Para la simulación presentada en la Figura 6.5 se tomó un valor inicial del estado  $x_2$  que representa el tamaño de hueco de aire de 2 mm, como nuestro actuador es unidireccional, tenemos que cuando el error es 0 o negativo el actuador no funciona y se deja a la fuerza de gravedad el trabajo de aumentar el hueco de aire, es por esto que el sistema comienza a caer y el control rápidamente entra en acción logrando la estabilización del hueco de aire.

Otra simulación se realizó añadiendo una perturbación senoidal de 0.01 mm de amplitud y 1 khz de frecuencia a la señal de error, esto con el fin de simular el efecto del ruido en el sensor real. Los resultados obtenidos pueden verse en la Figura 6.6, esta simulación es bastante más acorde al comportamiento real del sistema, pues nunca logra estabilizarse totalmente

Otras simulaciones llevadas a cabo fueron cambiando el estado inicial del hueco de aire. Se probó con valores varias décimas de milímetro tanto por debajo como por arriba de la referencia (2 mm), verificando que el control logra estabilizar el sistema en un margen de hueco de aire de entre 1.5 a 2.4 mm, no consiguiendo hacerlo para valores más pequeños o más grandes de hueco de aire. Esto es lo que realmente sucede ya que para valores por debajo del intervalo dado el sistema entra momentáneamente en caída libre, acelerándose lo suficiente como para que el sistema de actuación electromagnética ya no sea capaz de lograr la levitación. Así mismo, para valores mayores a 2.4mm el sistema tampoco es capaz ya de atraer a la plataforma con la suficiente fuerza cayendo ésta.

Los anteriores resultados son lo que hacen que este tipo de sistemas de levitación electromagnética tengan un intervalo de estabilidad muy pequeño, siendo muy costoso en dinero y energía ampliarlo.

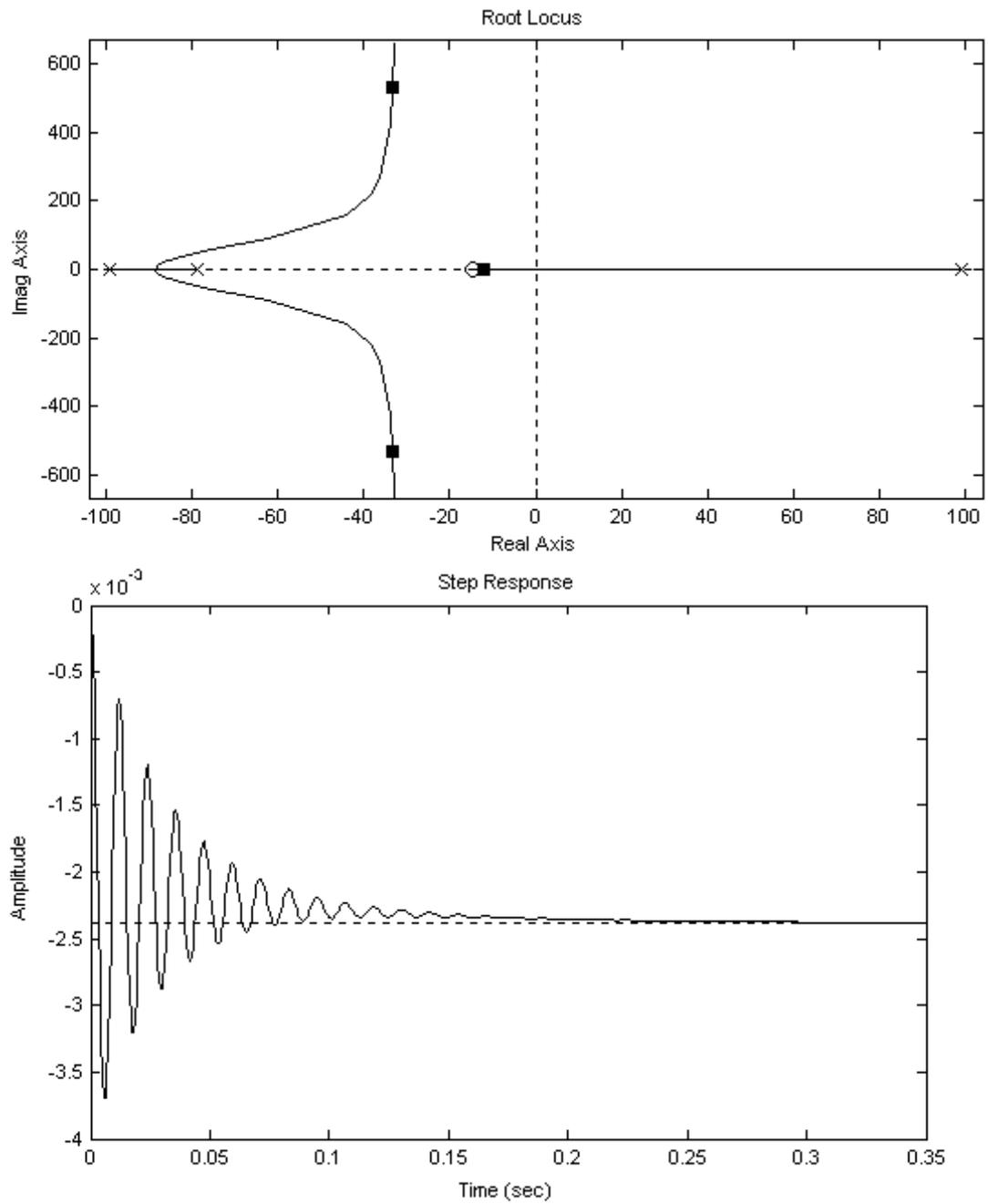


Figura 6.4: Diagrama de localización de raíces y simulación de la respuesta al escalón

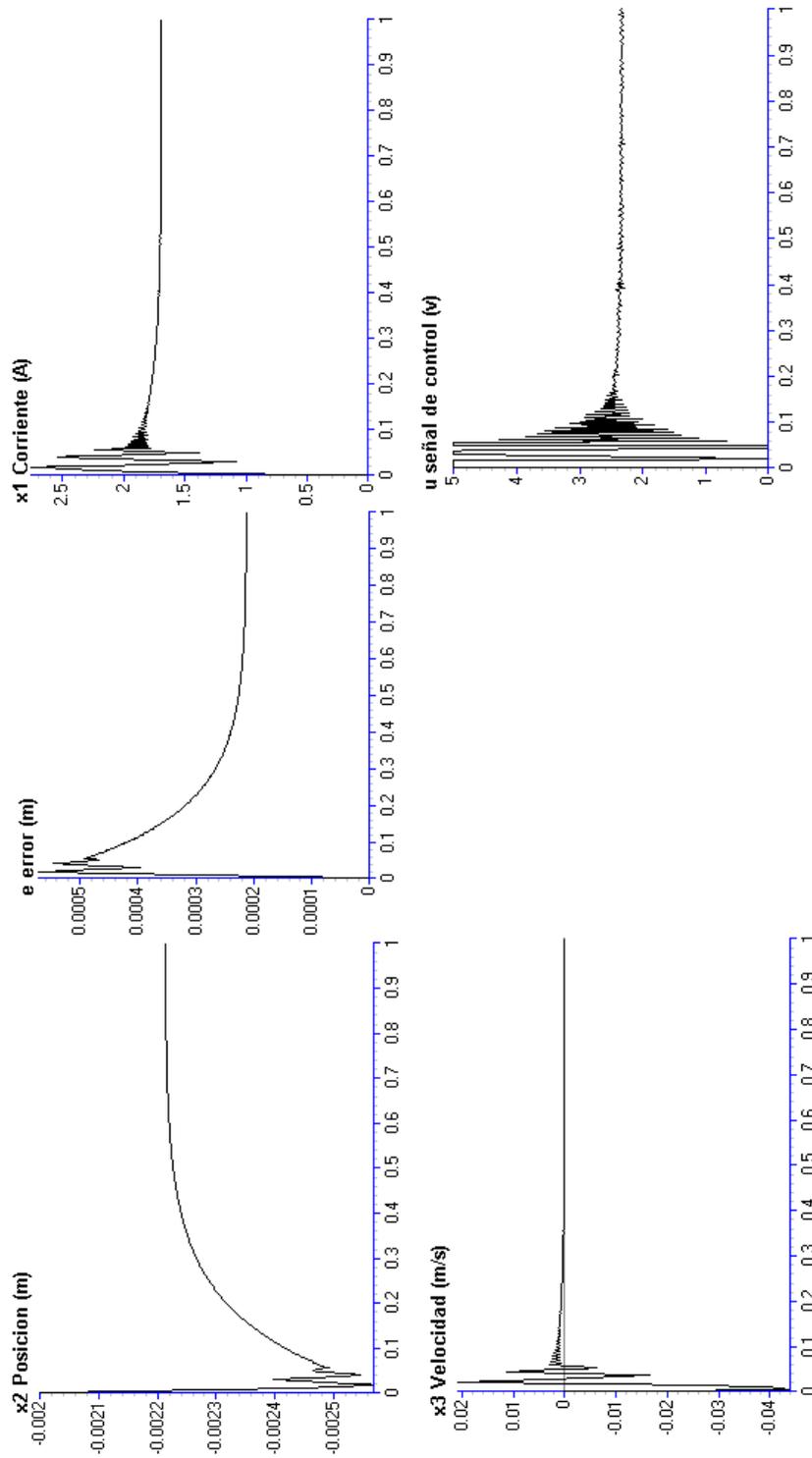
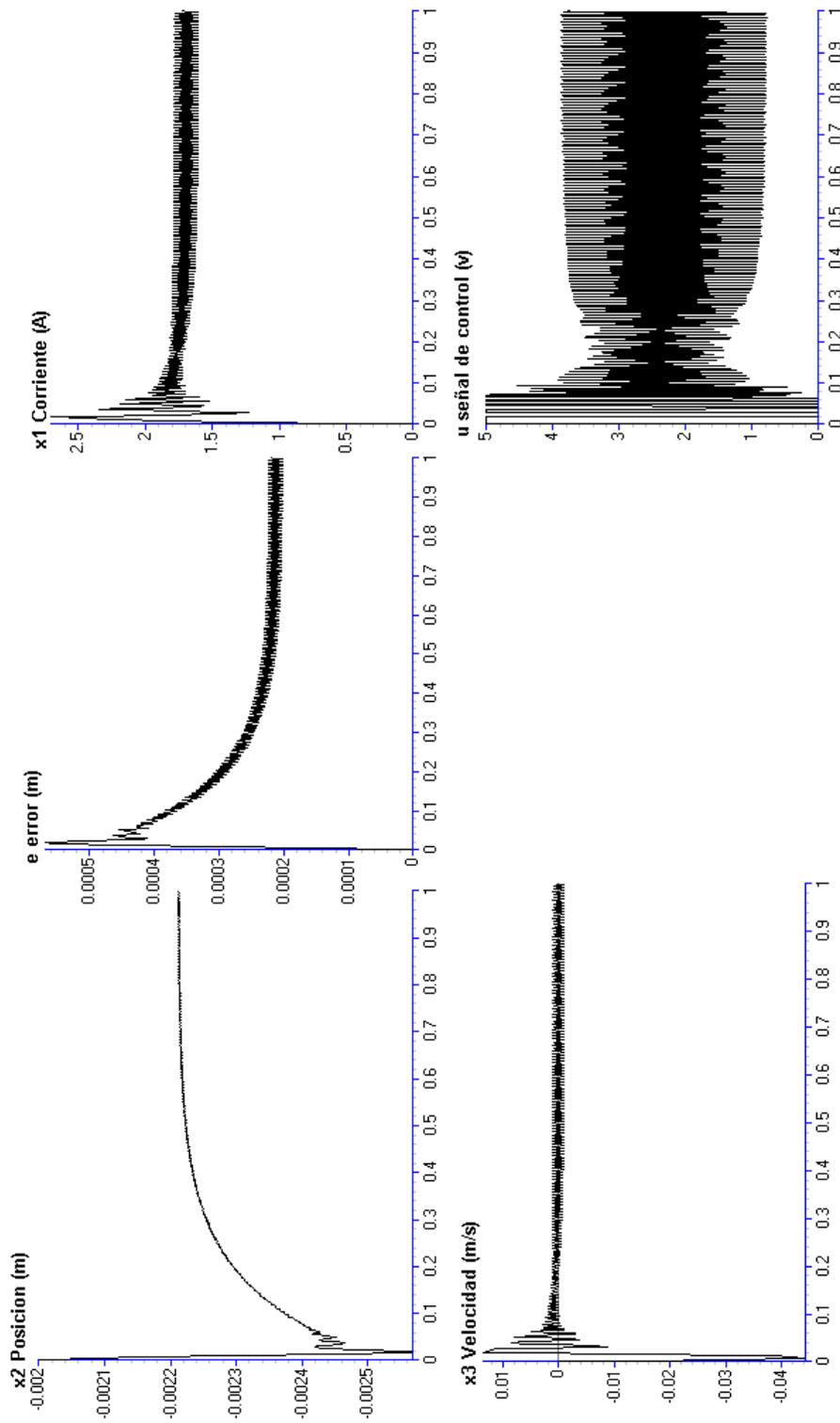


Figura 6.5: Simulación del control analógico desde  $X_{02} = 0,002$

Figura 6.6: Simulación del control analógico desde  $X_{02} = 0,002$  con perturbación.

Parámetros:	Módulo 2	Módulo 3
Voltaje de Referencia	1.1 V	1.1 V
Resistencia Proporcional de Retroalimentación	53.0k $\Omega$	16k $\Omega$
Resistencia Proporcional de Entrada	5.5k $\Omega$	5.5k $\Omega$
Resistencia Derivativa de Retroalimentación	2k $\Omega$	2k $\Omega$
Capacitancia Derivativa de Entrada	100 $\mu$ F	100 $\mu$ F
Ganancia Proporcional: Kp	9.6	2.9
Ganancia Derivativa: Kd	0.2	0.2

Tabla 6.1: Parámetros de los controladores analógicos (módulos 2 y 3).

Parámetros:	Módulo: 0	1	2	3
Voltaje de Referencia	1.64 V	1.33 V	1.49 V	1.475 V
Resistencia Proporcional Retroalimentación	26.7k $\Omega$	8.1k $\Omega$	54.3k $\Omega$	40.7k $\Omega$
Resistencia Proporcional de Entrada	5.6k $\Omega$	1k $\Omega$	5.5k $\Omega$	5.5k $\Omega$
Resistencia Derivativa Retroalimentación	1k $\Omega$	0.56k $\Omega$	2k $\Omega$	2k $\Omega$
Capacitancia Derivativa de Entrada	100 $\mu$ F	100 $\mu$ F	100 $\mu$ F	100 $\mu$ F
Ganancia Proporcional: Kp	4.76	8.10	9.87	7.40
Ganancia Derivativa: Kd	0.1	0.056	0.2	0.2

Tabla 6.2: Parámetros de los 4 controladores analógicos que lograron levitación completa del chasis.

### 6.2.2. Levitación de un cangrejo mediante control analógico PD

Después de múltiples pruebas y experimentos se encontraron los valores enlistados en la Tabla 6.1 para los controles analógicos adecuados para la levitación del prototipo en su cangrejo B. El resultado obtenido fue una levitación con vibraciones muy difíciles de percibir a simple vista y capaz de soportar ligeras perturbaciones o aumentos de peso en el prototipo. En la Figura 6.7 se muestran las señales correspondientes de error de ambos módulos en levitación.

Como es de esperarse el control PD no logra llevar el error a cero, sin embargo consigue una levitación muy aceptable. En la Figura 6.8 pueden verse la señal de control y su correspondiente señal de error correspondientes al módulo 2. Obsérvese que el control nunca se satura pues su intervalo de funcionamiento es de 0 a 5V.

### 6.2.3. Levitación total del prototipo mediante control analógico

Se logró la levitación completa del prototipo mediante control Proporcional-Derivativo, los parámetros de sintonización de los controladores se muestran en la Tabla 6.2. Las gráficas de las señales de error respecto al tiempo en levitación plena se muestra en la Figura 6.9.

La levitación del prototipo lograda ha sido bastante estable, presenta pocas vibraciones y resiste perturbaciones pequeñas, como movimientos ligeros o la adición de peso en el chasis.

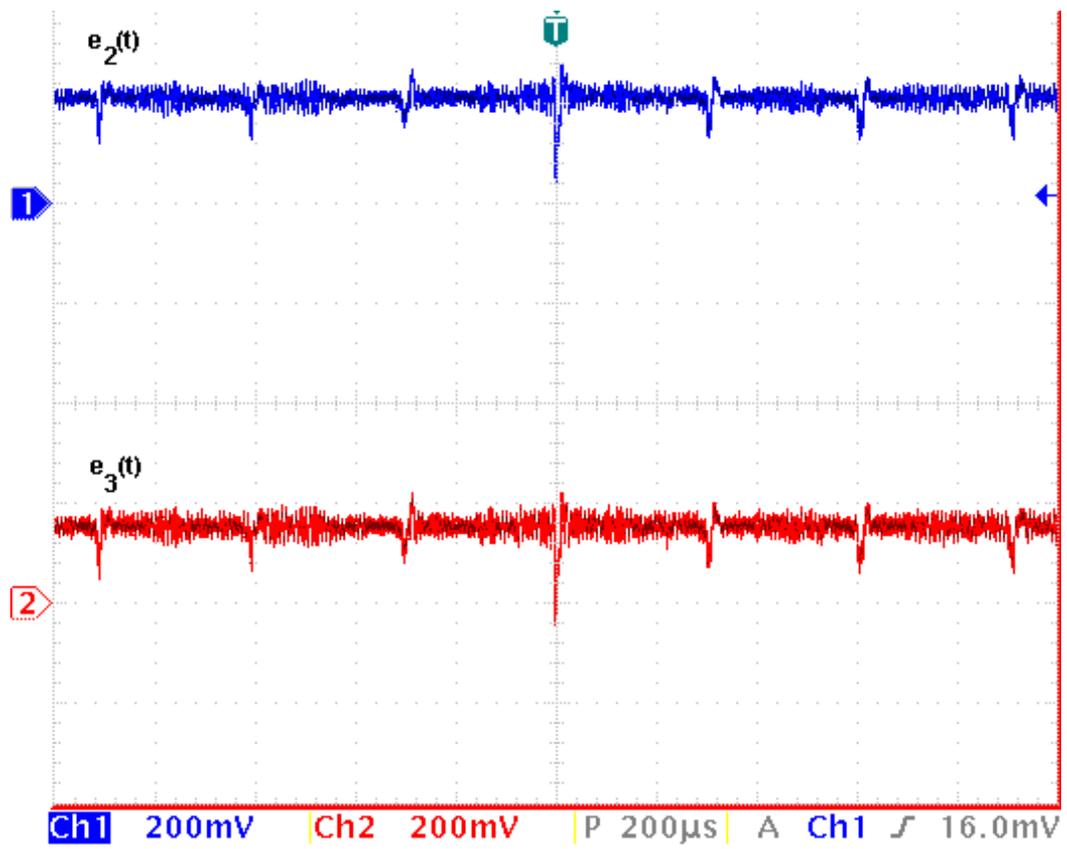


Figura 6.7: Señales de error de los módulos 2 (arriba) y 3 (abajo) con control PD analógico.

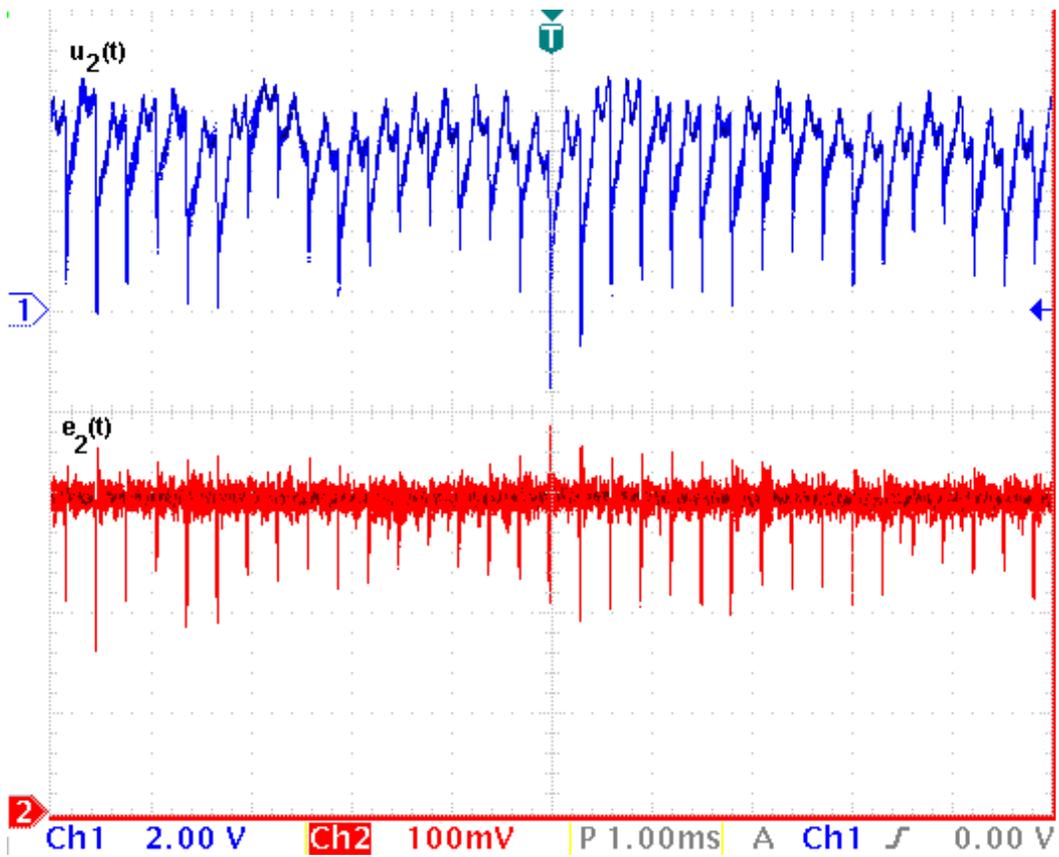


Figura 6.8: Señales de control (arriba) y error (abajo) del módulo 2 con control PD analógico.

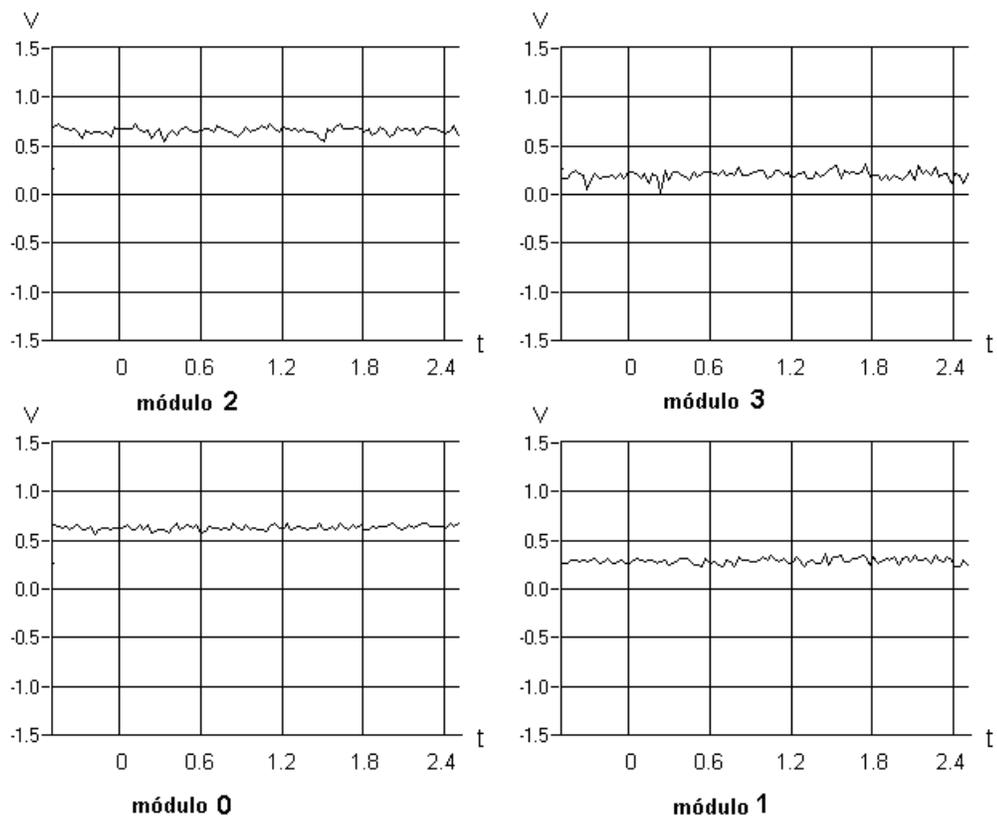


Figura 6.9: Señales de error del prototipo en flotación.

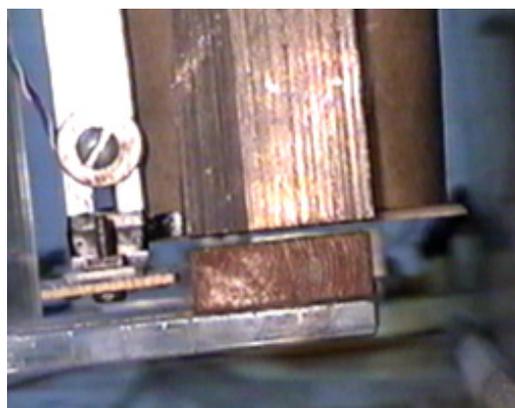


Figura 6.10: Levitación del prototipo

### 6.3. Control digital

En el cangrejo A se experimentó con dos controladores PD digitales. Mediante el software de programación Labwindows/CVI se han programado dos controladores independientes Proporcional-Integral-Derivativo, una interfaz gráfica amigable hace posible variar los parámetros de los controladores fácilmente así como seleccionar que tipo de controlador se desea, P, PD, PI o PID.

Para implantar un controlador PD digital debe de discretizarse primero este, partimos de la expresión en tiempo continuo del controlador dada en la Ecuación (6.1), la discretización se hizo siguiendo los pasos dados en [20]. Para la implantación de la derivada se utilizó el método de Euler.

La expresión matemática para tiempo discreto en  $z$  queda:

$$u(t) = e(z)[K_P + K_D \frac{z-1}{z}]. \quad (6.2)$$

Se utiliza un periodo de muestreo de 1ms en todos los experimentos.

#### 6.3.1. Respuesta del sistema al escalón

Se obtuvo la respuesta en lazo abierto para un módulo del prototipo a una entrada escalón de 5V (correspondiente a corriente máxima de 2.5A en el actuador), esto con la intención de conocer la respuesta del sistema y poder tener una idea del período de muestro necesario para la implantación de un controlador digital. En la Figura 6.11 puede verse el resultado de este experimento, siendo  $e(t)$  la respuesta al escalón aplicado ( $u(t)$ ), esta respuesta representa la reacción de un soporte del chasis al unirse a su electroimán correspondiente.

#### 6.3.2. Simulación con el sistema discretizado

Utilizando herramientas del software Matlab se realizó la conversión del sistema descrito en la Ecuación (5.14) a tiempo discreto. El sistema una vez discretizado queda:

$$G(z) = 1,2 \times 10^{-7} \frac{(z + 3,66)(z + 0,263)}{(z - 1,1)(z - 0,906)(z - 0,924)}. \quad (6.3)$$

En la gráfica de la Figura 6.12 puede verse que la zona de estabilidad del sistema es muy pequeña, esta es la razón por la cual el sistema es muy difícil de controlar y de estabilizar.

Mediante simulaciones con el Módulo "RLTOOL" de Matlab se ha obtenido un controlador equivalente a un PD discreto dado por,

$$C(z) = 26300 \frac{z - 0,939}{z}, \quad (6.4)$$

con el cual se muestran las simulaciones de la Figura 6.13 para la cual se ha aplicado una entrada de escalón unitario.

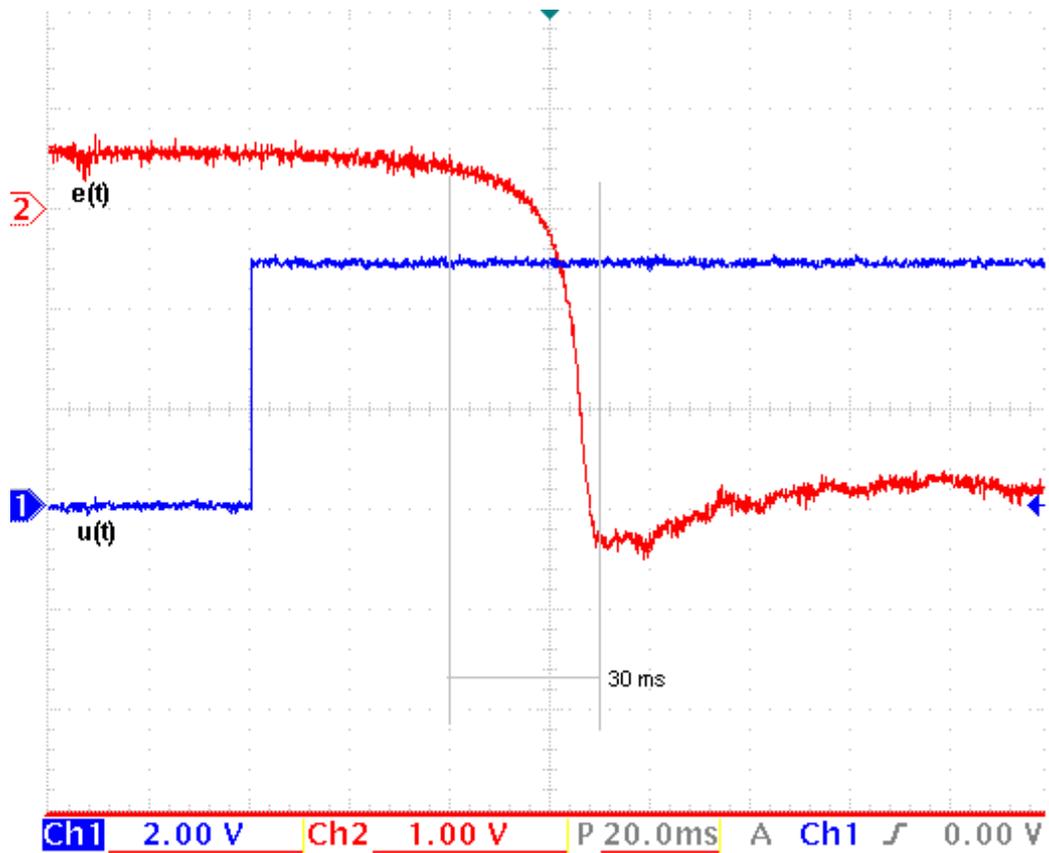


Figura 6.11: Respuesta de un módulo del prototipo al escalón en lazo abierto.

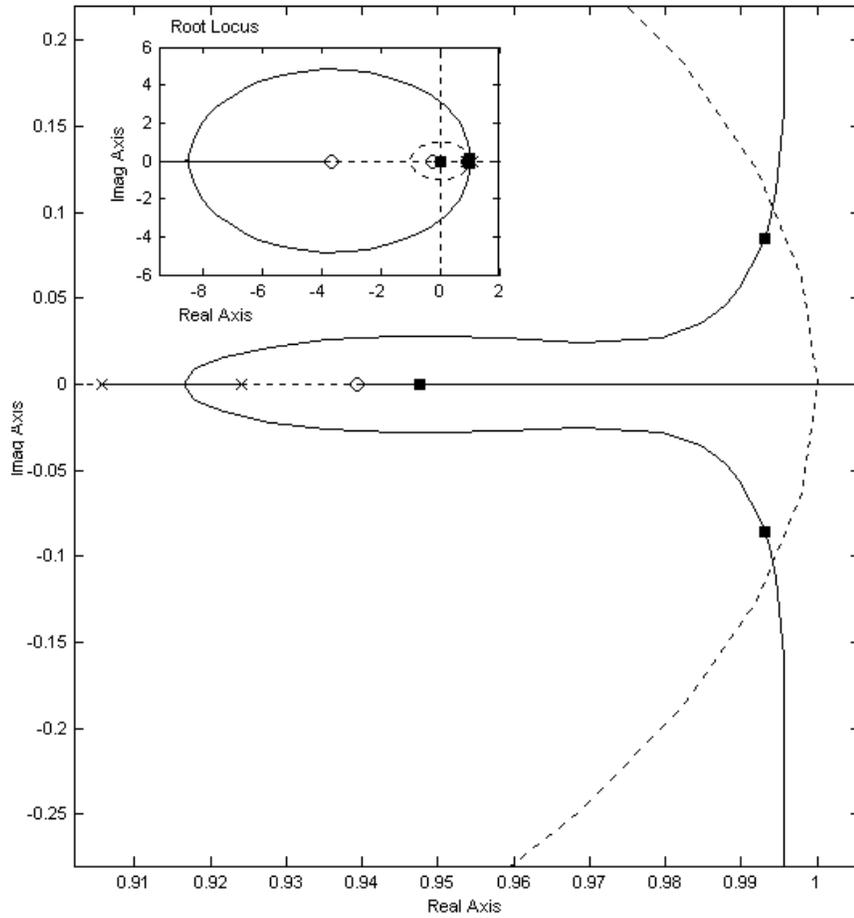


Figura 6.12: Lugar geométrico de las raíces en el plano Z

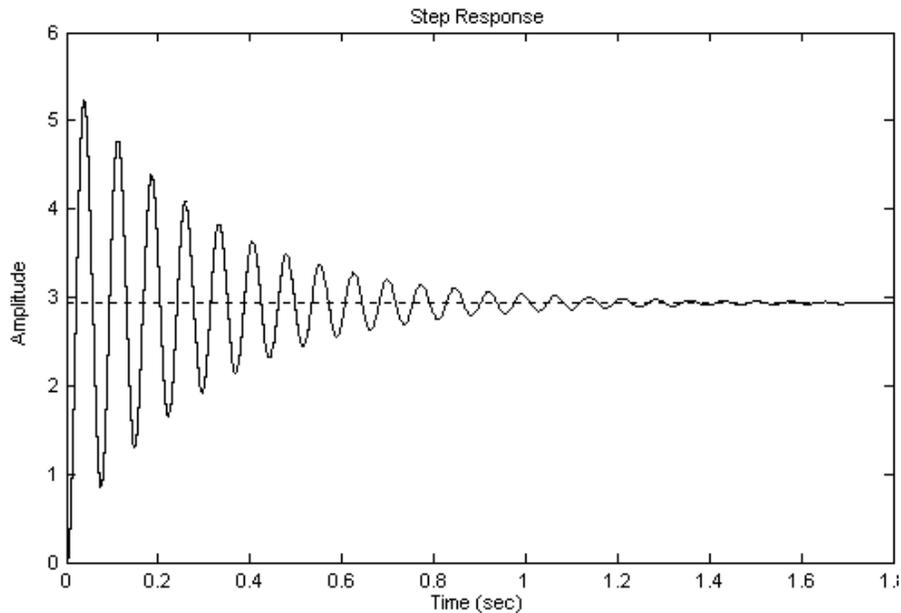


Figura 6.13: Respuesta al escalón unitario del sistema discretizado con  $\tau = 1$  ms

### 6.3.3. Resultados experimentales del control digital PD

Se tomaron los parámetros de los controladores correspondientes a los módulos 0 y 1 de la Tabla 6.2 y se logró la levitación del cangrejo A con muy poca vibración pero con menor estabilidad que con el control analógico. En la Figura 6.14 se presentan las señales de error de los dos módulos correspondientes al cangrejo A del prototipo. En estas gráficas se puede observar que la levitación es bastante estable, teniendo pocas vibraciones.

Adicionalmente en las gráficas de la Figura 6.15 se presentan las señales del control y de error del módulo 0. Puede verse que el controlador nunca se satura y que el período de muestreo de la computadora es estable y de 1 ms. Debido a que la señal de control del módulo 1 es muy similar se ha omitido su presentación.

Se experimentó también con el control PID, sin embargo este controlador no pudo eliminar el error de estado estable ni demostró ser superior al control PD, por lo que no se consideró documentarlo.

El modelo matemático obtenido ha sido satisfactorio pues el resultado de las simulaciones y los experimentos han sido muy similares, el pequeño intervalo de estabilidad que posee este sistema se ha visto demostrado en ambos casos.

Ambas topologías de control lograron por separado la levitación de un cangrejo del prototipo pero la levitación completa de la plataforma solo se logró con los controladores analógicos implementados en cada uno de los cuatro módulos. Lo anterior es debido a que en el caso híbrido (levitando un cangrejo con controladores analógicos y el otro con controladores digitales), los valores de hueco de aire para cada uno de los módulos analógicos y digitales no pudieron hacerse coincidir, lo que producía inestabilidad al momento de hacer levitar todo el prototipo. El control analógico resultó ser

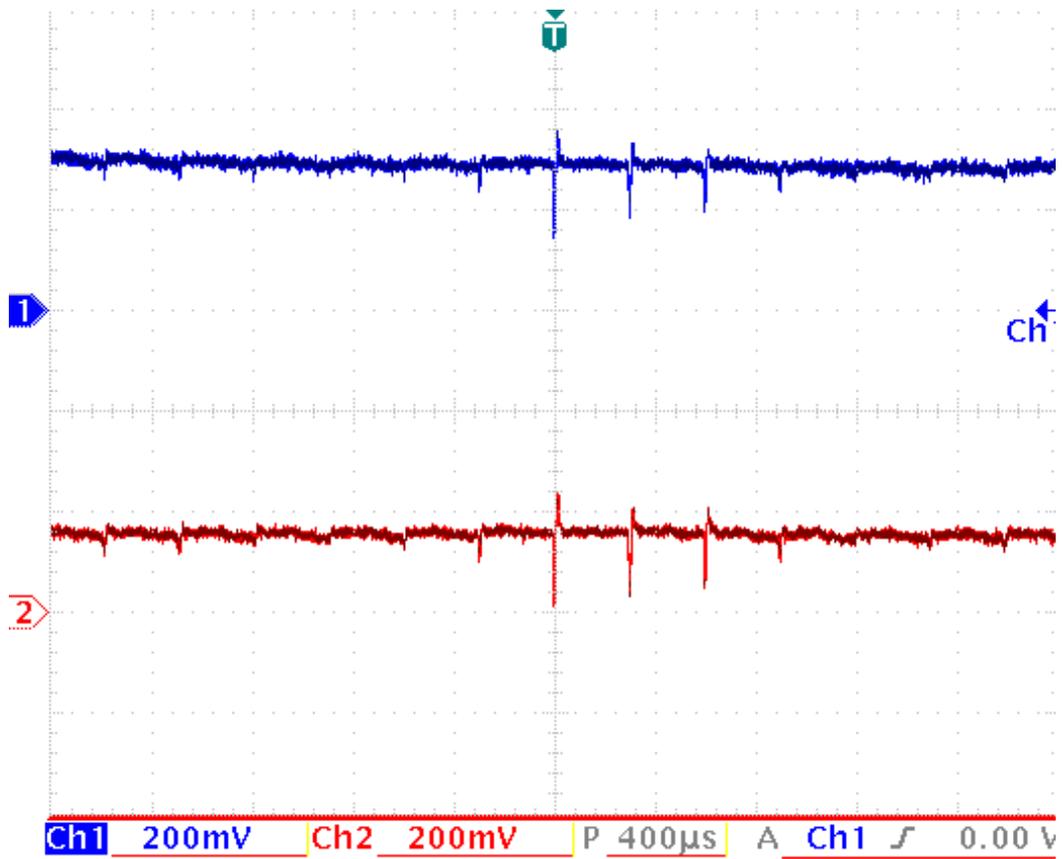


Figura 6.14: Señales de error de los módulos 0 (arriba) y 1 (abajo) con control PD digital.

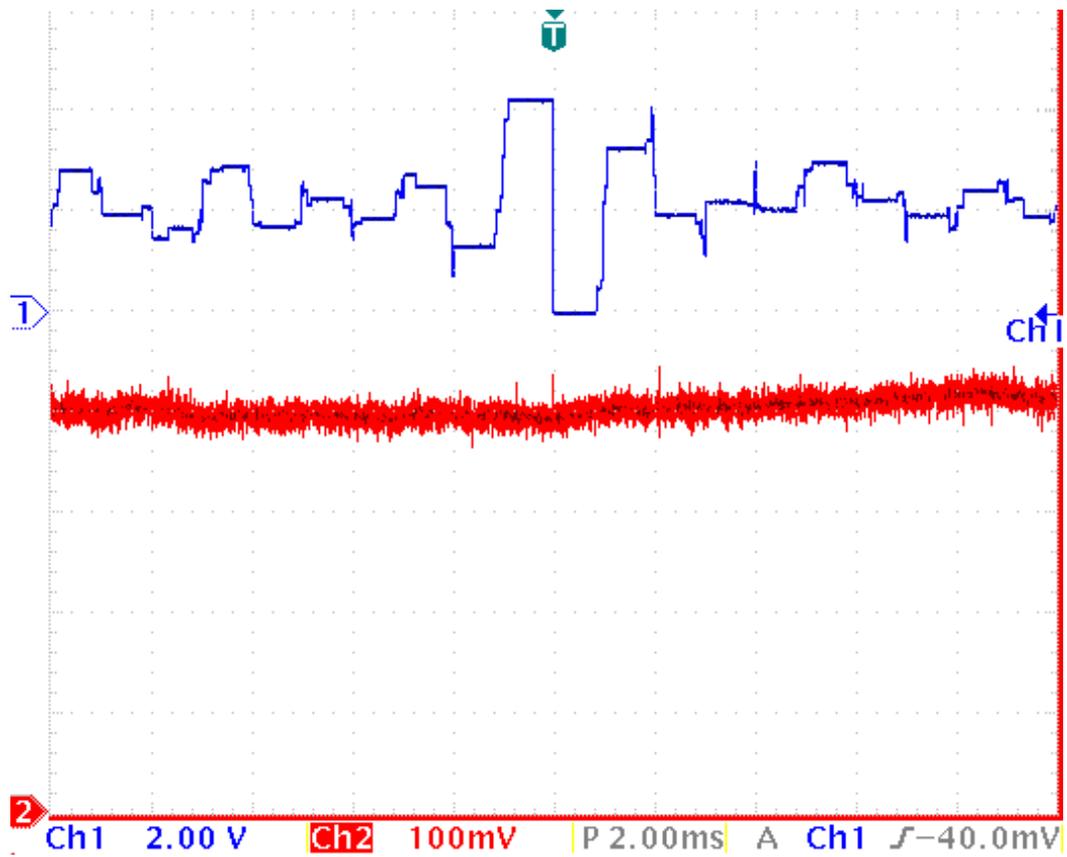


Figura 6.15: Señales de control (arriba) y error (abajo) del módulo 0 con control PD digital

más estable que el control digital, sobre todo a cambios de peso en el chasis u otras perturbaciones mecánicas. Debido a la tarjeta de adquisición de datos usada (Apéndice C.2), el período de muestreo utilizado para el control digital del prototipo no pudo reducirse de  $1ms$  como es recomendable para este tipo de sistemas en que las dinámicas son muy rápidas.

## Capítulo 7

# Conclusiones y perspectivas

La tecnología electromagnética de levitación aplicada a vehículos es muy prometedora para un futuro próximo en el que los combustibles fósiles sean escasos, el avance tecnológico en esta área del saber humano es entonces indispensable. Las ventajas que esta tecnología aporta, como minimizar la fricción; capacidad de alcanzar grandes velocidades y ser ecológicamente responsable entre otras, la hace estar a la vanguardia en sistemas de transporte de alta velocidad.

El presente trabajo se ubica dentro de la línea de investigación de levitación electromagnética. El trabajo de tesis tuvo como objetivos el diseño, construcción y control de una plataforma de levitación magnética. Este trabajo marca un avance en el estudio de los sistemas de levitación mediante la aplicación de distintas áreas de la ingeniería así como la teoría de control. Las ventajas de integrar diversas disciplinas técnicas para lograr un objetivo tiene en el prototipo realizado un muy buen ejemplo.

Los sistemas de levitación electromagnética tienen como principal reto el control de su distancia de flotación, distancias muy pequeñas producen grandes inestabilidades y hacen el control casi imposible y a su vez distancias grandes requieren grandes cantidades de energía. El control se hace difícil debido a que la dinámica del sistema es muy inestable, no lineal, además de que tiene una región de estabilidad muy pequeña.

El presente trabajo se ha desarrollado con una perspectiva mecatrónica, se ha tomado en cuenta los diferentes subsistemas que componen el prototipo, así como la relación entre ellos para el diseño de cada una de las etapas del proyecto. La estructura mecánica, la electrónica de potencia, el tratamiento de las señales, el software de control, el diseño de los electroimanes, todo fue diseñado en el laboratorio a excepción de la tarjeta de adquisición de datos.

Los principales problemas que se enfrentaron a lo largo de este trabajo fueron múltiples. Para el diseño del chasis primeramente se contempló utilizar aluminio, pero debido a su elevada densidad se optó por utilizar acrílico, material que resultó más adecuado. El sistema de medición debía ser muy riguroso, no presentando contacto alguno entre las partes, se analizaron varios sistemas eligiéndose el de rebote de luz infrarroja por considerarse más adecuado a los requerimientos del trabajo, múltiples pruebas y experimentos se realizaron para colocar los sensores adecuadamente así como diseñar los soportes mecánicos de éstos los cuales se presentaron en el capítulo 4. Para el diseño de la etapa de potencia, no fue fácil la decisión entre utilizar control por corriente o control por modulación de ancho de pulso, se realizaron múltiples pruebas con ambas formas de manejo de los actuadores hasta concluir que el segundo método es más adecuado para nuestro trabajo por cuestiones de

estabilidad y ahorro de energía. La pequeña zona de estabilidad que posee el sistema de levitación diseñado hizo difícil el control y más estrictos los diseños de las partes mecánicas y electrónicas del prototipo, debiendo reducir lo más posible ruidos de los sensores y otras partes de la circuitería así como exigiendo una construcción mecánica más precisa. De forma muy similar a las simulaciones, el sistema físico posee una zona de estabilidad de menos de 2 mm, cosa que aunada a que la plataforma de levitación posee 4 módulos de levitación (los cuales no son del todo independientes pues están unidos mecánicamente por el chasis) hizo más difícil alcanzar el objetivo final de este trabajo que fue la levitación completa de la plataforma, lo cual se logró utilizando 4 controladores analógicos. No fue posible lograr la levitación estable de la plataforma utilizando control analógico para un cangrejo del chasis y digital para el otro, pues cada uno de estos controladores se estabilizaba a distinta medida de hueco de aire por lo que el chasis no se lograba estabilizar. Otro problema respecto al control por computadora fue el período de muestreo que no pudo bajarse de 1 ms con el hardware utilizado (tarjeta de adquisición de datos y computadora), cuestión que afectó el desempeño adecuado de los controladores digitales implantados.

## 7.1. Trabajo futuro

El trabajo de tesis podría mejorarse rediseñando la estructura mecánica siendo muy rigurosos en su precisión, colocando sensores redundantes de posición, aumentando la capacidad de potencia así como aplicando controladores más sofisticados con un adecuado período de muestreo de señales. Se sugiere la utilización de un Procesador Digital de Señales (DSP, por sus siglas en inglés).

De acuerdo a la experiencia obtenida, se propone que como continuación de esta línea de investigación se contemple el diseño, la construcción y el control de una unidad de levitación magnética o “rueda magnética”, esta unidad de levitación deberá contar con sensores además de distancia, de flujo magnético y de aceleración en vista de que el control del sistema sea más efectivo, también es adecuado añadir una guía lateral electromagnética para evitar el movimiento de vaivén que se presenta. Como siguiente paso en la investigación ya se podría pensar en añadir un motor lineal.

## Apéndice A

# Planos mecánicos

En la Figura A.1 se muestran las dimensiones del núcleo utilizado para los actuadores del prototipo. En la Figura A.2 se presenta la geometría del chasis construido para el prototipo. Se presentan 3 vistas ortogonales y una en isométrico. En la Figura A.3 se presenta la geometría del riel construido y 3 vistas de éste. Por último en la Figura A.4 se detalla la geometría del soporte para sensor diseñado y se presenta un despiece del mismo.

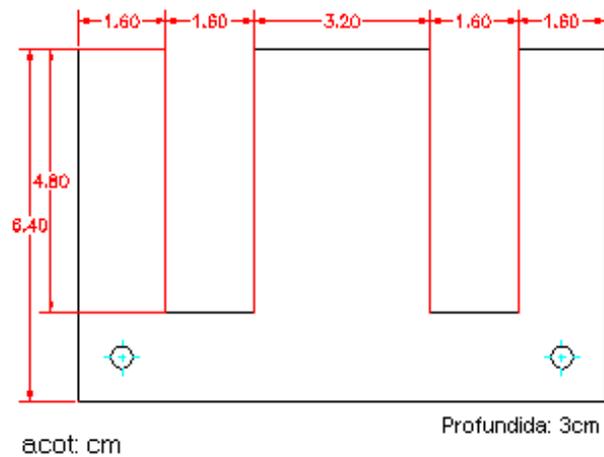


Figura A.1: Dimensiones del núcleo

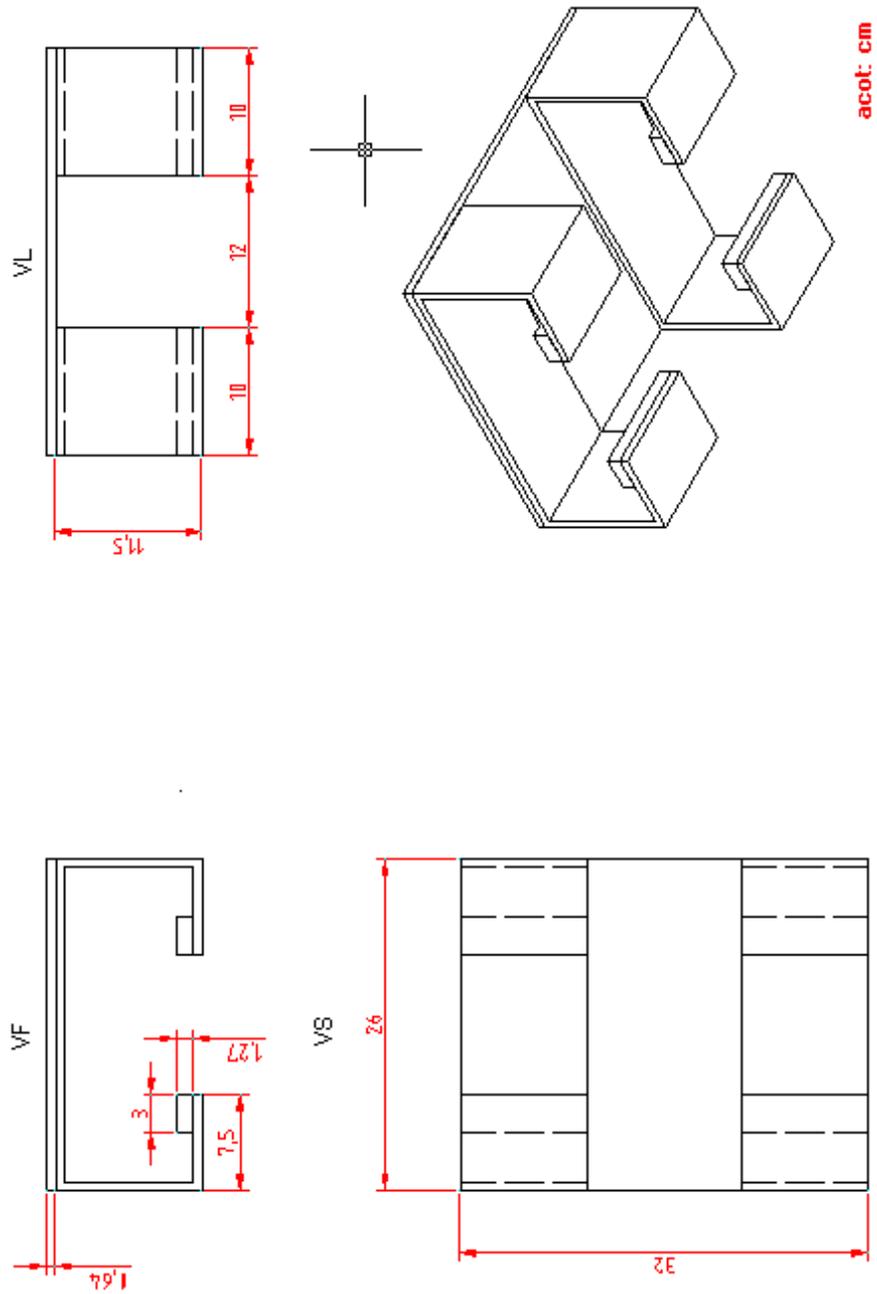


Figura A.2: Planos de chasis

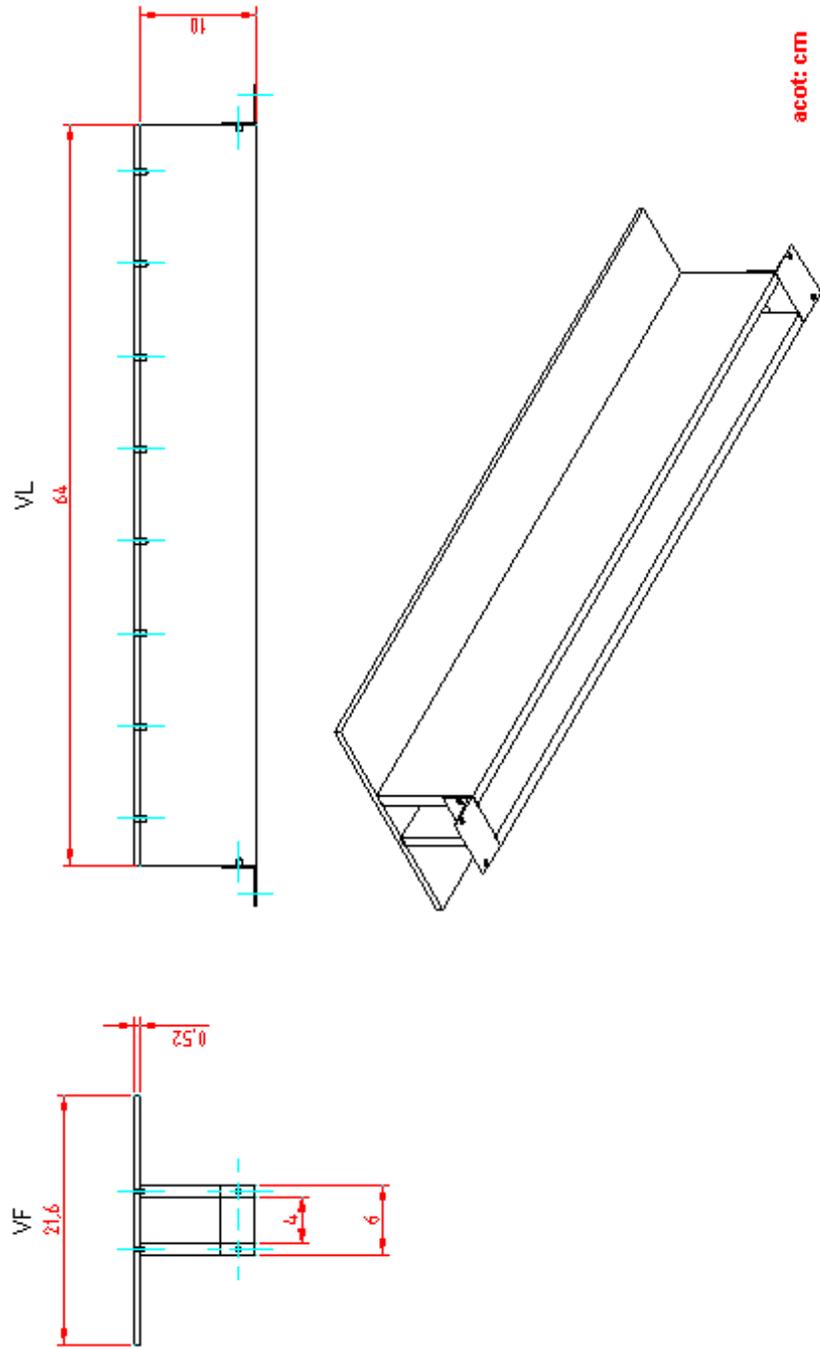


Figura A.3: Planos de riel

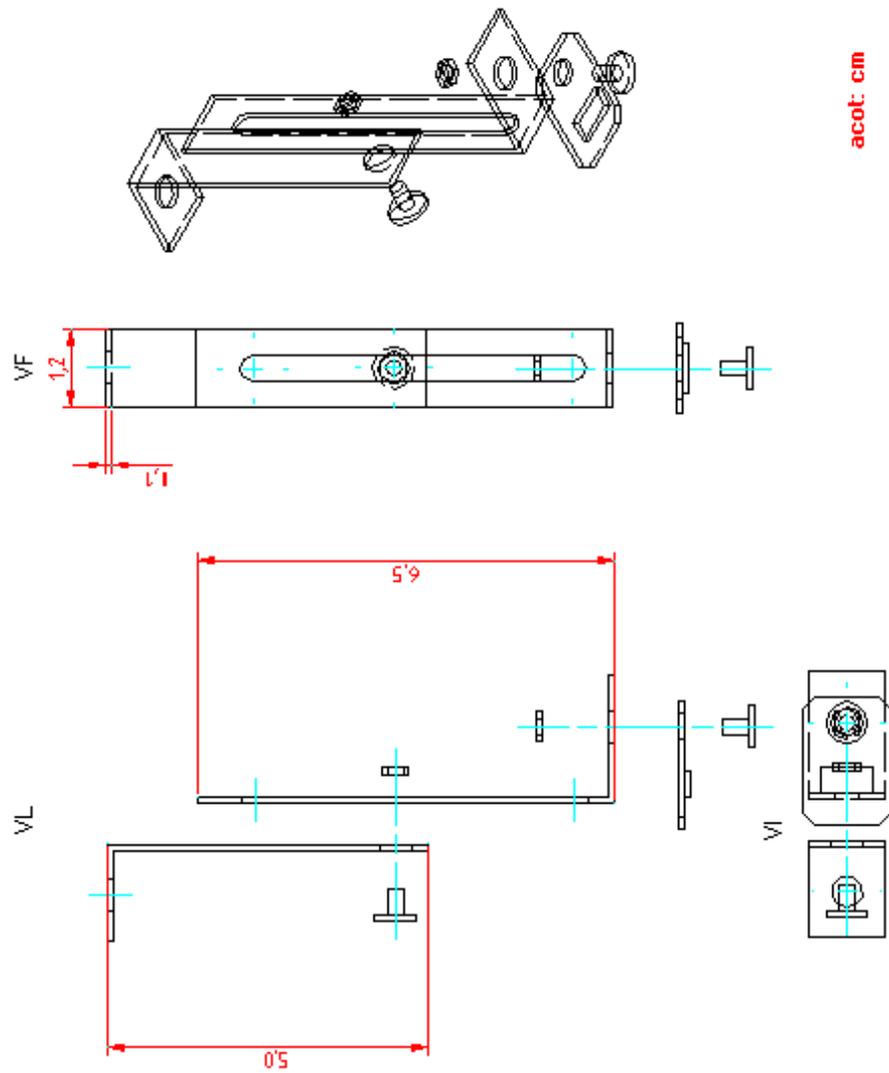


Figura A.4: Planos de soporte de sensor

## Apéndice B

# Diagramas electrónicos

En la Figura B.1 se muestra el diagrama electrónico de la circuitería del sensado y tratamiento de señal. En la Figura B.2 se presenta el diagrama del modulador por ancho de pulso (PWM), circuito generador de pulsos. En la Figura B.3 se detalla el circuito de potencia utilizado para el control de los actuadores. En la Figura B.4 puede verse el diagrama electrónico de los controladores analógicos utilizados. En la Figura B.5 se presenta un diagrama de la ubicación física de los conectores eléctricos de un módulo del prototipo. En la Figura B.6 se detalla la conexión entre la circuitería discreta y la tarjeta de adquisición de datos. En la Tabla B.1 se dan las principales especificaciones de los sensores utilizados.

Rango de trabajo de 1 a 5mm. (Adecuado para el prototipo)
No es afectado por la luz ambiente
Requiere superficie metálica para reflejo adecuado
Salida de fototransistor
Tamaño 4.0 x 3.0 x 1.7 mm
Peso 0.4 gr
Respuesta no lineal

Tabla B.1: Especificaciones de los sensores utilizados. Sensor EE-SY124.

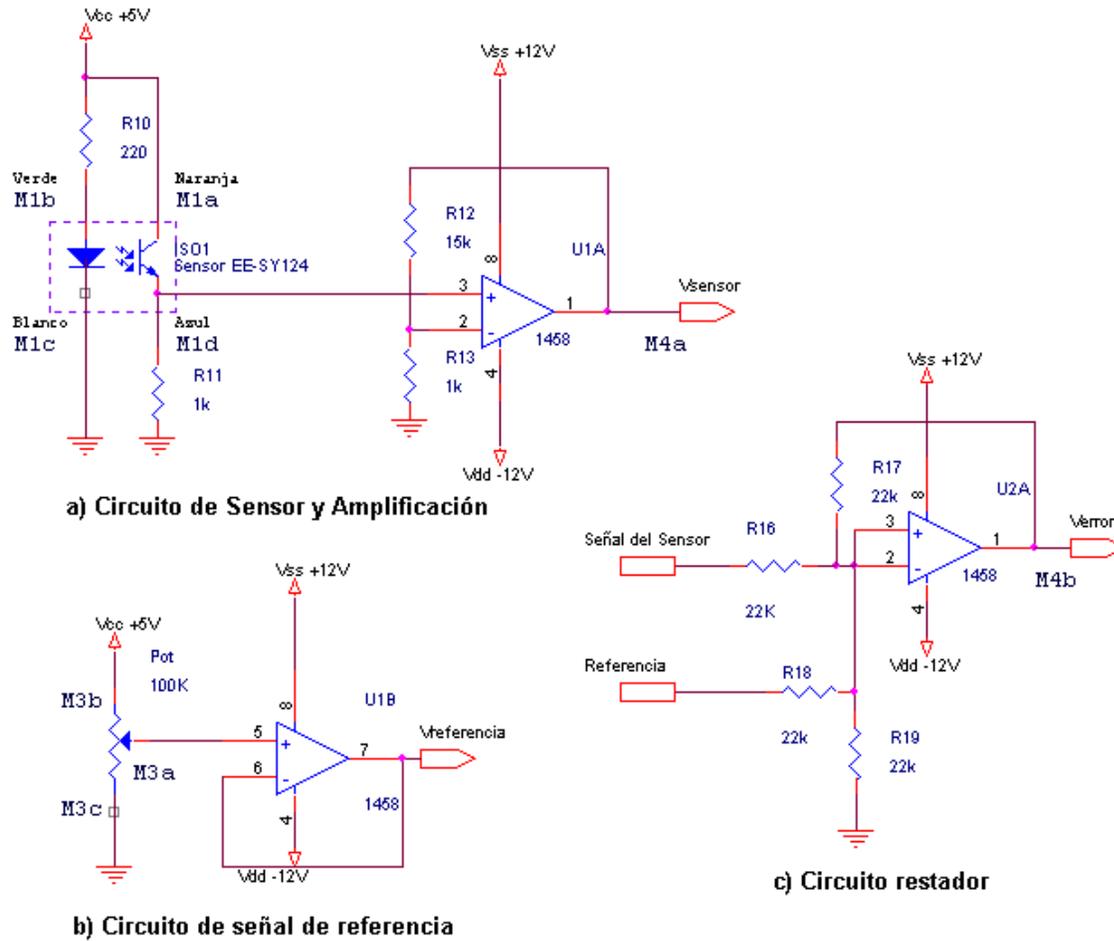


Figura B.1: Circuitos de sensado y tratamiento de señal.

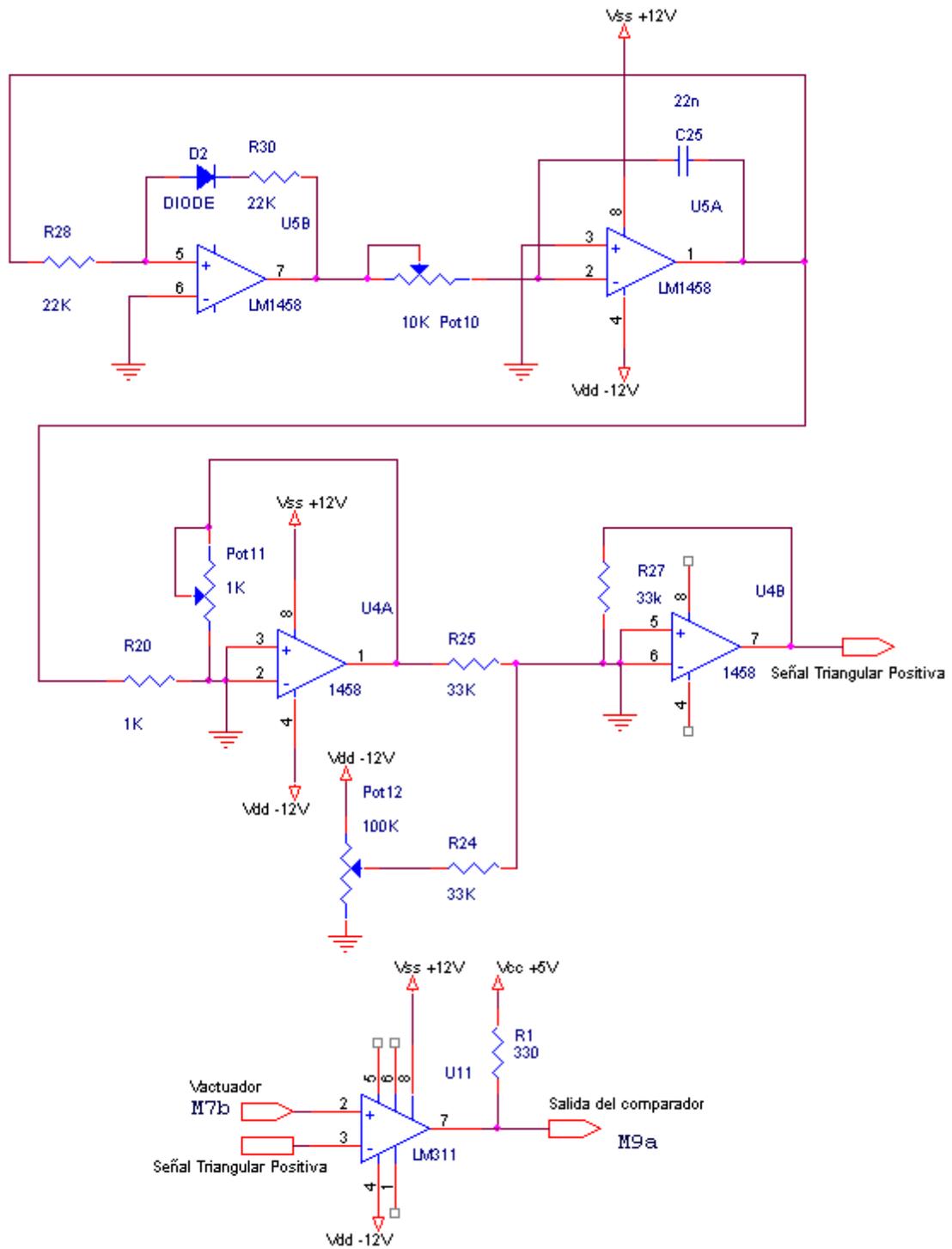


Figura B.2: Circuito del PWM

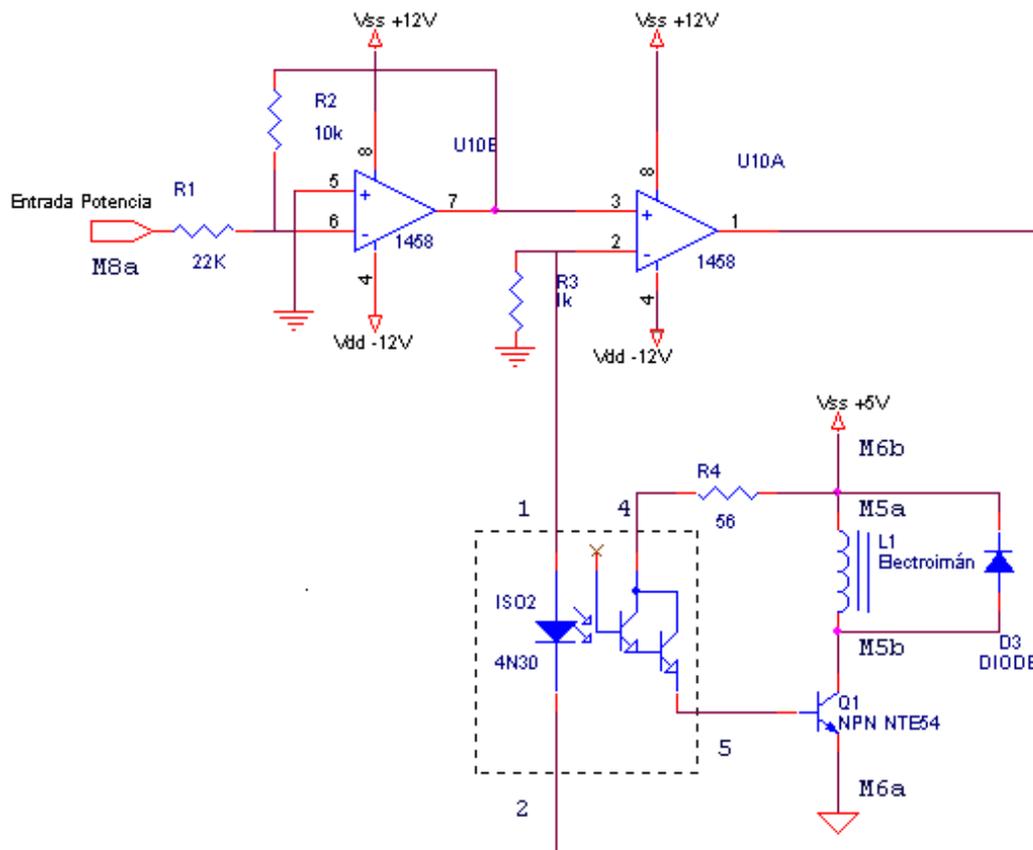


Figura B.3: Circuito de potencia y actuador

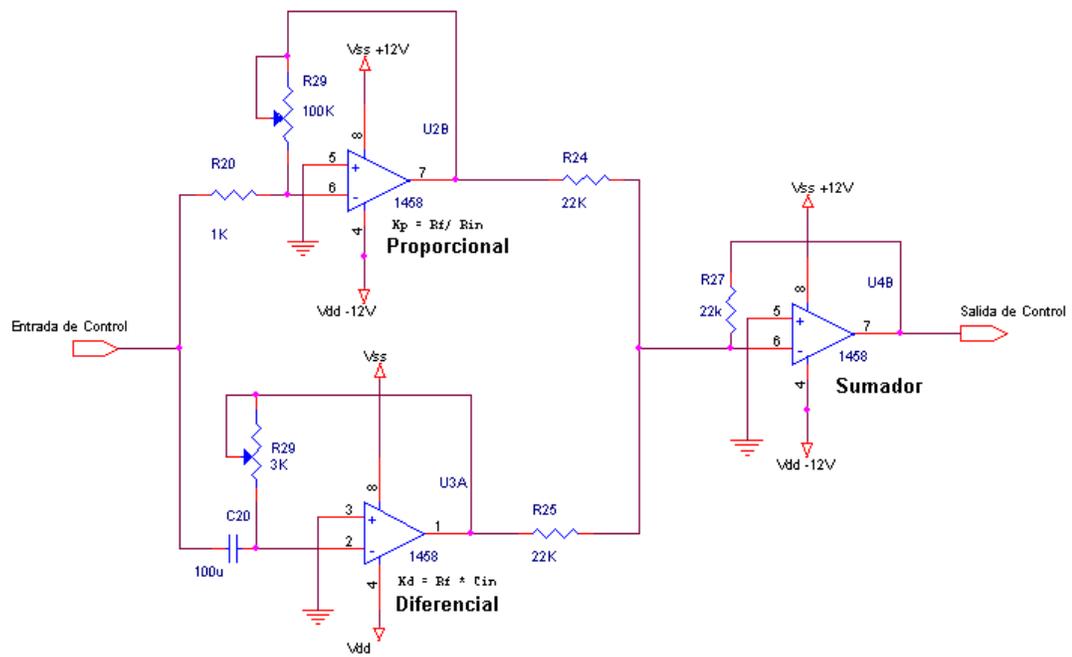


Figura B.4: Circuito de control PD analógico

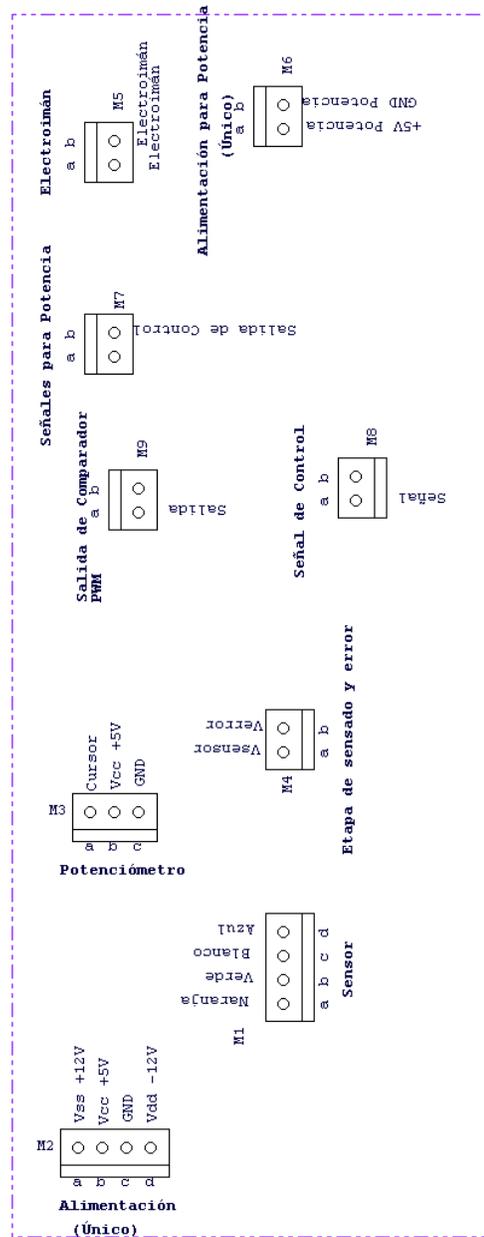


Figura B.5: Conexiones por módulo en el circuito impreso.

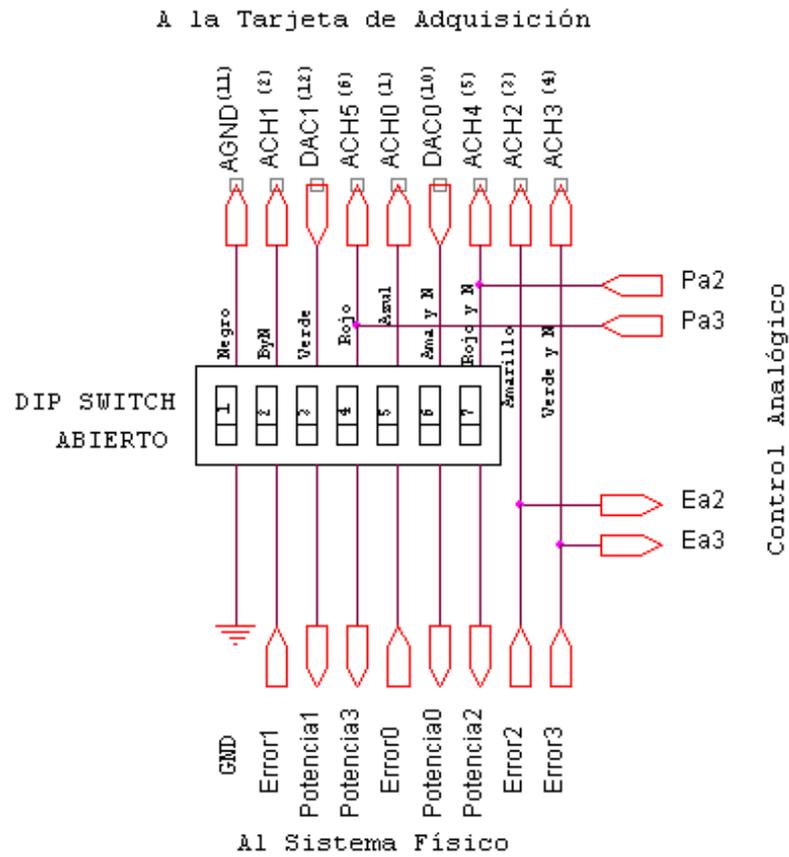


Figura B.6: Conexiones de la tarjeta NIDAQ, el sistema físico y el control analógico.



## Apéndice C

# Adquisición de datos y software

### C.1. Simulación en Simnon 3.0 del sistema de levitación con control PD analógico

```
CONTINUOUS SYSTEM levitar1
" Versión: 1.0
" Resumen: Sistema Levitador Magnético
" Descripción: Modelado en base a ecuaciones físicas
" Revisión: 1.0
" Autor: Gengis Kanhg Toledo Ramírez
" Creado: 03/04/01
" TODOS los valores en S.I.
" Estados, derivadas y tiempo:
STATE x1 x2 x3
DER dx1 dx2 dx3
TIME t
" Inicializaciones:
x1:0 "A
x2:-0.002"m
x3:0 "m/s
" Ecuaciones:
dx1 = -(R/L)*x1+(1/L)*u "x1 debe estar en [0,2.7] por Restricciones Físicas
dx2 = x3 "x2 no debe ser positivo por Restricciones Físicas
dx3 = g+(k/m)*(x1*x1)/(x2*x2)
"Control PD
e = ref-x2"+0.00001*sin(1000*t) "perturbación agregada
e1 = -x3
v = kp*e + kd*e1
u = IF v<0 THEN 0 ELSE (IF v>5 THEN 5 ELSE v) "u en [0,5]V por PWM
" Valores de los Parámetros:
k:1.131e-5
```

```

m:0.675 "masa del chasis entre 4
g:-9.81
L:0.0175
R:1.38
ref: -0.002
kp:5800 " =2.9*2000
kd:400 " =0.2*2000
END

```

## C.2. Tarjeta de adquisición LAB-PC+

La tarjeta de Adquisición de Datos empleada es de la Compañía National Instruments. Modelo LAB-PC+. Es una tarjeta multifunción para PC. Contiene un Convertidor Analógico-Digital de aproximación sucesiva de 12 bits con 8 entradas analógicas que pueden ser configuradas como 8 canales simples o 4 canales diferenciales. También se tiene dos Convertidores Digital a Analógico de 12 bits con salidas de voltaje. 24 Líneas de Entrada/Salida digitales con compatibilidad TTL y 6 temporalizadores/contadores de 16 bits. Esta tarjeta utilizada junto a una PC es versátil y efectiva en costo para pruebas de laboratorio, instrumentación y control.

La tarjeta para PC de bus tipo ISA posee muchas características de entrada y salida de señal, interfáz con la computadora además de que el fabricante provee software para simplificar su manejo así como información a nivel registros para ampliar las posibilidades de utilización en distintos ambientes de software.

Las principales características útiles en nuestro proyecto de la tarjeta son:

- 6 entradas analógicas en modo de referencia simple (tierra común)
- 2 salidas analógicas en modo unipolar (0 a 10 V)
- velocidad máxima de muestreo: 1ms

La PC utilizada es una DELL Pentium III a 450Mhz y con 96Mb en RAM.

Debido a la restricción de solo dos salidas analógicas de la tarjeta, se utilizan 2 módulos del prototipo con control digital y los otros dos con control analógico.

6 de las 8 entradas analógicas son utilizadas; 4 para lectura de sensores y 2 para lectura de los actuadores controlados analógicamente.

## C.3. Señales de entrada y de salida

La tarjeta de adquisición de datos y la computadora hacen posible el monitoreo y control del prototipo. La instrumentación de la plataforma levitadora se ha simplificado tomando los 4 módulos por separado. Cada módulo tiene una señal de voltaje proveniente del sensor, mediante circuitería discreta esta se resta del voltaje de referencia correspondiente resultando en una señal de error llamada "Verror". La señal de control que se aplica al actuador se denomina "Vactuador" (ver Figura C.1). Estas señales en sus respectivas etapas electrónicas han sido adecuadas en nivel y polaridad para ser interpretadas por el computador.

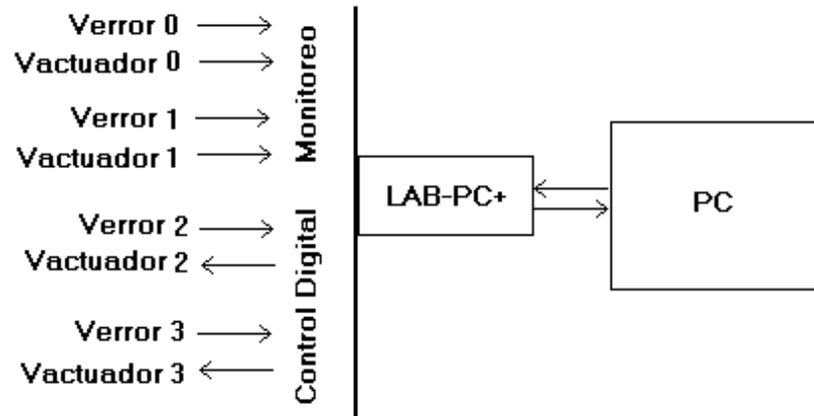


Figura C.1: Señales de entrada y salida en la PC

Nótese que las 4 señales Verror de cada uno de los módulos son lecturas para la PC, por lo que es posible monitorear todas y cada una de ellas. Con el voltaje del Actuador es distinto, pues solo tenemos dos salidas analógicas, por lo que para los módulos 0 y 1 las señales de Vactuador son entradas también para ser monitoreadas. En cambio para los módulos 2 y 3 son salidas, pues el control de estas se ubica en la computadora.

## C.4. Software LabWindows

El software empleado para el monitoreo e implantación del controlador de este prototipo es LabWindows/CVI 4.0.1 de National Instrument Co., lenguaje de programación similar a C con un constructor de interfaces gráficas y funciones de control para las tarjeta de adquisición de datos de la misma compañía.. El LabWindows/CVI permite un período de muestreo máximo de 1ms, este es la mayor limitante que este software posee.

El software del levitador concentra diversas funciones dentro del sistema mecatrónico, las principales son: monitoreo, control, ajuste y calibración de sensores e interfaz con el usuario. Para facilitar la comunicación con el usuario se desarrolló una interfaz gráfica que consta de 3 paneles, uno de ajuste, uno de monitoreo del control analógico y uno más de control digital. El LabWindows provee de un método de construcción de interfaces gráficas que facilita enormemente la tarea.

Las funciones principales del programa son: Para los Módulos 0 y 1: monitorear y graficar las señales tanto de sensores como de los actuadores analógicos. Para los Módulos 2 y 3: ofrece una interfaz de control clásico PID para dos módulos, de tal forma que el usuario puede variar los parámetros en tiempo real. También se monitorea y puede graficarse las señales de los sensores correspondientes y las señales de control. Funciones adicionales del software: encendido y apagado de gráficas, indicador de flotación, cronómetro del tiempo de levitación y ahorro de energía.

**Programas adicionales.** Otros pequeños programas han sido creados para realizar mediciones, caracterizar etapas o realizar experimentos diversos. Estos programas facilitaron enormemente la

caracterización tanto del sensor utilizado (Figura 5.2), de la etapa de potencia diseñada (Figuras 5.3 y 5.4), así como de la obtención de la Figura 5.1 utilizada para validar la relación matemática entre corriente y fuerza magnética en el electroimán.

**Programa para graficar entrada vs salida de la etapa de potencia**

```

/*****
* Programa de Control de Levitador
* Autor: Gengis gengiskanhg@hotmail.com
* Lectura de Vcontrol vs I electroiman tomando un estado de I base
* Salida de la TARJETA en modo UNIPOLAR
*****/

#define PUNTOS 300
#define VOLTAJE 3.38 //correponde a i=1.5A
#define ESPERA_ENTRE_LECTURAS_EN_S 5
#define CHAN 0
#define INC 0.1
#include "nidaqex.h"
#include "tesis.h"
void espera(int);
void main(void)
{
int k=0,i=0,j=0,tiempo;
double val,vol=0;
double Vr,Ix[PUNTOS],I[PUNTOS],Vdc[PUNTOS];
bobina(CHAN, 0);
printf("\n MEDICION PRACTICA de Ielectroimán vs Vcontrol");
printf("\n A la corriente ingresada de consumo de la fuente se restará el consumo de R de 56 ohms");
printf("\n Espera en SEGUNDOS: ");
scanf("%d",&tiempo);
bobina(CHAN, VOLTAJE);
printf("\n Bobina en: %5.2f V. Voltaje base",VOLTAJE);
espera(tiempo);
printf("\n Voltaje\tVR\tCorriente\n");
/*Rutina para obtener datos Vact vs Ielec de acuerdo a entradas del usuario*/
i=0;
do
{
bobina(CHAN, VOLTAJE);
vol=(double)i*INC;
k=GetKey ();
bobina(CHAN,vol);
printf("\n %lf\t",vol);
printf(" Vr=");
scanf("%lf",&Vr);
printf("\t\t\tI=");
scanf("%lf",&Ix[i]);
printf("\t\t\tVdc=");

```

```

scanf("%lf",&Vdc[i]);
I[i]=Ix[i]-Vr/56;
printf("\t\t\t\t\t%lf",I[i]);
i=i+1;
}
while(k != 0x0051); /* Para salir "Q" */
bobina(CHAN, 0);
printf("\n\nV,Vdc,Ielec,Ifuente\n");
for(j=0;j<i;j++)
{ printf("\n%lf,%lf,%lf,%lf",j*INC,Vdc[j],I[j],Ix[j]); }
}
void espera(int Espera)
{
int inicio, ahora;
float porcentaje;
printf("\n Por favor espere %d segundos, etapa de calentamiento de sistemas...\n",Espera);
inicio=clock();
do {
ahora=((clock()-inicio)/CLOCKS_PER_SEC);
porcentaje = (float) 100*ahora/Espera;
printf("%5.0f%% \r",porcentaje);
}
while ((clock()-inicio)/CLOCKS_PER_SEC<=Espera);
printf("\n Iniciamos. \n");

```

### Programa de graficación del Sensor vs X

```

/*****
* Programa para Levitador
* Autor: Gengis gengiskanhg@hotmail.com
* Obtención de gráfica Vsensor vs X
*****/
#include "nidaqex.h"
#include "tesis.h"
#define CANAL 0
void main(void)
{
int k;
int i,contador=0;
//double val,vol=0;
double lectura[300];
bobina(CANAL, 0);
printf("\n MEDICION PRACTICA de Vsensor vs X");
printf("\n\t\t\tLectura1\tLectura2\tLectura3\tPromedio");
/*Rutina repetitiva para prueba, experimentación y lectura*/
do
{

```

```

printf("\nColoque %d", (contador/3));
GetKey ();
bobina(CANAL, 5);
k = GetKey ();
lectura[contador]=sensor(CANAL);
lectura[contador+1]=sensor(CANAL);
lectura[contador+2]=sensor(CANAL);
printf("\t %lf\t %lf\t %lf\t %lf",lectura[contador], lectura[contador+1], lectura[contador+2],
      (lectura[contador]+lectura[contador+1]+lectura[contador+2])/3);
bobina(CANAL, 0);
contador=contador+3;
}while((k != 0x0051)); /* Para salir "Q" */
bobina(CANAL,0);
for(i=0;i<contador;i=i+3)
{ printf("\n\n %d, %lf, %lf, %lf", i/3,lectura[i], lectura[i+1], lectura[i+2],
      (lectura[i]+lectura[i+1]+lectura[i+2])/3); }
}

```

## C.5. Biblioteca de funciones creadas: “Tesis.h”

```

/*****
* TESIS.H
* Programa INCLUDE con las funciones de entrada salida
* TESIS. Levitador Magnético
* Autor: Gengis gengiskanhg@hotmail.com
*****/
#include "nidaqex.h"
double sensor(int);
void bobina(int, double);
/* Global Variable Declarations: */
i16 iStatus = 0;
i16 iRetVal = 0;
i16 iDevice = 1;
i16 iGain = 1;
i16 iIgnoreWarning = 0;
double sensor(int No_Canal)
{
double Voltaje;
iStatus = AI_VRead(iDevice, No_Canal, iGain, &Voltaje);
//iRetVal = NIDAQErrorHandler(iStatus, "AI_VRead", iIgnoreWarning);
return Voltaje;
}
void bobina(int No_Canal, double I)
{
double V;

```

```

V=I;
//V=0.1723*I*I-I-1.1194*I*I+3.6685*I-0.1367;
if (V<=0) V=0;
if (V>=5.0) V=5.0;
iStatus = AO_VWrite(iDevice, No_Canal, V);
//iRetVal = NIDAQErrorHandler(iStatus, "AO_VWrite", iIgnoreWarning);
}

```

## C.6. Software para MS-DOS

Adicional al ambiente Windows, se realizó un programa en C para MS-DOS, tiene una interfaz de usuario mucho menos amigable que el programa en LabWindows/CVI pero tiene como ventaja algoritmos un poco más veloces y estables. Este programa, al igual que su equivalente en LabWindows tiene como período de muestreo mínimo 1ms, por lo que se optó por trabajar en el ambiente Windows debido a las ventajas que presenta..

```

#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <bios.h>
#include <io.h>
#include <dos.h>
#include <graphics.h>
#include <tesisdos.h>
#define FRECUENCIA 1000 /*Frecuencia en Hertz*/
#define PULSOS 1 /* Cada cuantos pulsos se realiza una acción n*/
static void interrupt far control(void);
static void interrupt far (*viejo)(void);
float PERIODO=1/FRECUENCIA;
//double datos0[MUESTRAS],datos1[MUESTRAS],datos2[MUESTRAS],datos3[MUESTRAS];
double Vcontrol0, Vcontrol1;
int SENSOR_0=0;
int SENSOR_1=1;
//int ACTUADOR_0=2;
//int ACTUADOR_1=3;
int q=0;
int i;
int P0=0, D0=0, I0=0;
float KP0=0, KD0=0, KI0=0;
double e0, e0_anterior, de0, ie0=0;
int j=0;
int P1=0, D1=0, I1=0;
float KP1=0, KD1=0, KI1=0;
double e1, e1_anterior, de1, ie1=0;
int i;
float salfl,posicion,angulo;
/* _____ */

```

```

void main(void)
{
    void reloj(int);
    void cambio(void);
    void reestablece(void);
    bobina(0,0);
    bobina(1,0);
    e0_anterior=sensor(SENSOR_0);
    e1_anterior=sensor(SENSOR_1);
    clrscr();
    printf("Programa de Control de Levitador\n\n");
    printf("Ingrese 1 para SI, 0 para NO\n");
    printf("\nMódulo Izquierdo");
    printf("\n`P? ");
    scanf("%d",&P0);
    printf("\n`D? ");
    scanf("%d",&D0);
    printf("\n`I? ");
    scanf("%d",&I0);
    if(P0==1)
    {printf("\n`KP? ");
    scanf("%f",&KP0);}
    if(D0==1)
    {printf("\n`KD? ");
    scanf("%f",&KD0);}
    if(I0==1)
    {printf("\n`KI? ");
    scanf("%f",&KI0);}
    printf("\nMódulo Derecho");
    printf("\n`P? ");
    scanf("%d",&P1);
    printf("\n`D? ");
    scanf("%d",&D1);
    printf("\n`I? ");
    scanf("%d",&I1);
    if(P1==1)
    {printf("\n`KP? ");
    scanf("%f",&KP1);}
    if(D1==1)
    {printf("\n`KD? ");
    scanf("%f",&KD1);}
    if(I1==1)
    {printf("\n`KI? ");
    scanf("%f",&KI1);}
    reloj(FRECUENCIA);
    cambio();
}

```

```

do{
if(i>PULSOS){
i=0;
};
}
while(kbhit()==0);
printf("FIN\n");
bobina(0,0);
bobina(1,0);
reestablece();
}
/*****
Subrutina de interrupción
*****/
static void interrupt far control(void)
{
//Agregar aquí todo el bloque de instrucciones periódicas
//i++;
//obtención de e0.
e0=sensor(SENSOR_0);
//cálculo de de0.
de0=(e0-e0_anterior)/PERIODO;
//cálculo de ie0.
ie0+=(e0+e0_anterior)*PERIODO/2;
//actualizando e0_anterior.
e0_anterior=e0;
//obtención de e1.
e1=sensor(SENSOR_1);
//cálculo de de1.
de1=(e1-e1_anterior)/PERIODO;
//cálculo de ie1.
ie1+=(e1+e1_anterior)*PERIODO/2;
//actualizando e1_anterior.
e1_anterior=e1;
//Acción de control MODULO 0.
Vcontrol0 = P0*KP0*e0 + D0*KD0*de0 + I0*KI0*ie0;
if (Vcontrol0<0) Vcontrol0=0;
if (Vcontrol0>5) Vcontrol0=5;
bobina(0, Vcontrol0);
//Acción de control MODULO 1.
Vcontrol1 = P1*KP1*e1 + D1*KD1*de1 + I1*KI1*ie1;
if (Vcontrol1<0) Vcontrol1=0;
if (Vcontrol1>5) Vcontrol1=5;
bobina(1, Vcontrol1);
/* bobina(1, q);
q=1-q;*/

```

```

}
void reloj(int frec)
{
    int contador;
    char Balto, Bbajo;
    /*calcula el valor de conteo para tim0*/
    contador=1193000/frec;
    /*pide acceso al tim0*/
    outportb(0x43,0x36);
    /*separa contador en 2 bytes*/
    Balto=contador/255;
    Bbajo=fmod(contador,255);
    /*programa el tim0 para contar hasta contador(16bits)*/
    outportb(0x40,Bbajo);
    outportb(0x40,Balto);
}
void cambio(void)
{
    disable(); /*desabilita interrupciones*/
    viejo=getvect(0x1c); /*almacena el actual vector de int*/
    setvect(0x1c,control); /*cambia el vector de interrupcion*/
    enable();
}
void reestablece(void)
{
    /*pide acceso al tim0*/
    outportb(0x43,0x36);
    /*programa el tim0 para contar hasta contador(16bits)*/
    outportb(0x40,0xff);
    outportb(0x40,0xff);
    /*reestableve vector de interrupcion*/
    disable();
    setvect(0x1c,viejo);
    enable();
}

```

## C.7. Software principal de monitoreo y control del levitador

```

/*****
*
* Programa Gráfico de Control y graficado de señales del Levitador
* Autor: Gengis gengiskanhg@hotmail.com
*
*****/

```

```

//#include <cvirte.h> /* Needed if linking in external compiler; harmless otherwise */
#include <userint.h>
#include "prueba.h"
#include "tesis.h"
#define MUESTRAS 100 //número de muestreos...
#define TEXTO_ACERCA_DE "\
Este programa basado en LabWindows ha sido realizado en el CINVESTAV. IPN. México.\n\
Por Gengis Kanhg Toledo Ramírez\tgengiskanhg@hotmail.com\n\
Cualquier reproducción es autorizada siempre que se cite la fuente."
double PERIODO;
//double datos0[MUESTRAS],datos1[MUESTRAS],datos2[MUESTRAS],datos3[MUESTRAS];
double datosS2[1],datosS3[1],datosA2[1],datosA3[1];
double datoS0[1],datoS1[1],datoS2[1],datoS3[1];
double datosS0[1], datosA0[1];
double datosS1[1], datosA1[1];
double Vcontrol0;
double Vcontrol1;
int q=0,qt0=0,qt1=0,qtt=0; //variable para contar varios pulsos
int SENSOR_0=0; //Canal de entrada de la Tarjeta al cual esta conectado el sensor en cuestión (Mon-
itoreo)
int SENSOR_1=1;
int SENSOR_2=2;
int SENSOR_3=3;
int ACTUADOR_0=0; //Canal de salida de la Tarjeta al cual esta conectado el actuador en cuestión
(Control)
int ACTUADOR_1=1;
int ACTUADOR_2=4; //Canal de entrada de la Tarjeta al cual esta conectado el actuador en cuestión
(Monitoreo)
int ACTUADOR_3=5;
int i=0;PARAR=0;
int HABILITAR_ACT=1;
int CONTROL_DIGITAL=0; // encendido/apagado del Control Digital
int CONTROL_ANALOGICO=0; // encendido/apagado de la Graficación Analógica
int CONTROL_AJUSTE=0; // encendido/apagado del Panel de Ajuste
int P0=0, D0=0, I0=0;
float KP0=0, KD0=0, KI0=0;
double hueco_0,hueco_1;
double e0, e0_anterior, e0_anterior2, de0, ie0, de0_anterior=0;
int j=0;
int P1=0, D1=0, I1=0;
float KP1=0, KD1=0, KI1=0;
double e1, e1_anterior, e1_anterior2, de1, ie1, de1_anterior=0;
double act0=0, act1=0;
int N=100000; //N [10,oo)
float g1;
int graf;

```

```

double error_base0=5, error_base1=5;
int Ahorro=0;
//double Vcontrol5=0; //para prueba de periodo de señal de salida
static int panelHandle,panelDigital,panelAnalogico,panelAjuste;
int main (int argc, char *argv[])
{
//Iniciando todo en CERO. Apagando sistemas.
bobina(ACTUADOR_0, 0);
bobina(ACTUADOR_1, 0);
if (InitCVRTE (0, argv, 0) == 0) /* Needed if linking in external compiler; harmless otherwise */
return -1; /* out of memory */
panelHandle = LoadPanel (0, "prueba.uir", PANEL_base);
panelAnalogico = LoadPanel (panelHandle, "prueba.uir", PANEL_ana);
panelDigital = LoadPanel (panelHandle, "prueba.uir", PANEL_dig);
panelAjuste = LoadPanel (panelHandle, "prueba.uir", PANEL_aju);
DisplayPanel (panelHandle);
DisplayPanel (panelDigital);
//Apaga el TEMPORALIZADOR DIGITAL
SetCtrlAttribute(panelDigital, PANEL_dig_tiempo, ATTR_ENABLED, 0);
//Apaga el TEMPORALIZADOR ANALOGICO
SetCtrlAttribute(panelAnalogico, PANEL_ana_TIMER, ATTR_ENABLED, 0);
//Apaga el TEMPORALIZADOR AJUSTE
SetCtrlAttribute(panelAjuste, PANEL_aju_Tiempo_aju, ATTR_ENABLED, 0);
//Obtiene el valor del Intervalo establecido por defecto en el RELOJ Digital.
GetCtrlAttribute (panelDigital, PANEL_dig_tiempo, ATTR_INTERVAL,&PERIODO);
//Inicialización de variables para Control.
e0=0;
e0_anterior=0;
e0_anterior2=0;
ie0=0;
Vcontrol0=0;
j=0;
e1=0;
e1_anterior=0;
e1_anterior2=0;
Vcontrol1=0;
ie1=0;
//Inicialización de variables a los valores por defecto en los controles de la Interfaz Gráfica
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_SWITCH_P, &P0);
//GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_SWITCH_D, &D0);
//GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_SWITCH_I, &I0);
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_NUMERIC_KP, &KP0);
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_NUMERICSLIDE_KD, &KD0);
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_NUMERICSLIDE_KI, &KI0);
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_hueco_0, &hueco_0);
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_SWITCH_P1, &P1);

```



```

}
int CVICALLBACK Enc_analog (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
switch (event) {
case EVENT_COMMIT:
CONTROL_ANALOGICO=1-CONTROL_ANALOGICO;
SetCtrlAttribute(panelAnalogico, PANEL_ana_TIMER, ATTR_ENABLED,
CONTROL_ANALOGICO);

//if(CONTROL_ANALOGICO==0) {}
break;
case EVENT_RIGHT_CLICK:
break;
}
return 0;
}
//Temporalizador del PANEL ANALOGICO
int CVICALLBACK tempo (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
switch (event) {
case EVENT_TIMER_TICK:
//toma muestras de sensores y actuadores (CONTROL ANALÓGICO)
datosS2[0]=sensor(SENSOR_2);
datosS3[0]=sensor(SENSOR_3);
datosA2[0]=sensor(ACTUADOR_2);
datosA3[0]=sensor(ACTUADOR_3);
//Gráfica las 4 gráficas
PlotStripChart (panelAnalogico, PANEL_ana_ERROR1, datosS2, 1, 0, 0, VAL_DOUBLE);
PlotStripChart (panelAnalogico, PANEL_ana_ERROR2, datosS3, 1, 0, 0, VAL_DOUBLE);
PlotStripChart (panelAnalogico, PANEL_ana_ACTUADOR1, datosA2, 1, 0, 0, VAL_DOUBLE);
PlotStripChart (panelAnalogico, PANEL_ana_ACTUADOR2, datosA3, 1, 0, 0, VAL_DOUBLE);
break;
}
return 0;
}
//DESUSO Borra las gráficas del Módulo 0 del Control Analógico
int CVICALLBACK Borrar1 (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
switch (event) {
case EVENT_COMMIT:
DeleteGraphPlot (panelAnalogico, PANEL_ana_ERROR1, -1, VAL_IMMEDIATE_DRAW);
DeleteGraphPlot (panelAnalogico, PANEL_ana_ACTUADOR1, -1, VAL_IMMEDIATE_DRAW);
break;
case EVENT_RIGHT_CLICK:

```

```

break;
}
return 0;
}
//DESUSO Borra las gráficas del Módulo 1 del Control Analógico
int CVICALLBACK Borrar2 (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
switch (event) {
case EVENT_COMMIT:
DeleteGraphPlot (panelAnalogico, PANEL_ana_ERROR2, -1,VAL_IMMEDIATE_DRAW);
DeleteGraphPlot (panelAnalogico, PANEL_ana_ACTUADOR2, -1, VAL_IMMEDIATE_DRAW);
break;
case EVENT_RIGHT_CLICK:
break;
}
return 0;
}
//Función de control de los interruptores y controles del Panel Digital.
int CVICALLBACK c_digital (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
switch (event) {
case EVENT_COMMIT:
switch (control) {
//casos del MODULO 0
case PANEL_dig_SWITCH_P:
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_SWITCH_P, &P0);
break;
case PANEL_dig_SWITCH_D:
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_SWITCH_D, &D0);
break;
case PANEL_dig_SWITCH_I:
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_SWITCH_I, &I0);
break;
case PANEL_dig_NUMERIC_KP:
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_NUMERIC_KP, &KP0);
break;
case PANEL_dig_NUMERICSLIDE_KD:
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_NUMERICSLIDE_KD, &KD0);
break;
case PANEL_dig_NUMERICSLIDE_KI:
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_NUMERICSLIDE_KI, &KI0);
break;
case PANEL_dig_hueco_0:
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_hueco_0, &hueco_0);

```

```

break;
//casos del MODULO 1
case PANEL_dig_SWITCH_P1:
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_SWITCH_P1, &P1);
break;
case PANEL_dig_SWITCH_D1:
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_SWITCH_D1, &D1);
break;
case PANEL_dig_SWITCH_I1:
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_SWITCH_I1, &I1);
break;
case PANEL_dig_NUMERIC_KP1:
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_NUMERIC_KP1, &KP1);
break;
case PANEL_dig_NUMERICSLIDE_KD1:
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_NUMERICSLIDE_KD1, &KD1);
break;
case PANEL_dig_NUMERICSLIDE_KI1:
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_NUMERICSLIDE_KI1, &KI1);
break;
case PANEL_dig_hueco_1:
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_hueco_1, &hueco_1);
break;
case PANEL_dig_TOGGLEBUTTON_graficas:
GetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_TOGGLEBUTTON_graficas, &graf);
break;
}
}
return 0;
}
//Temporalizador del CONTROL DIGITAL por PC
int CVICALLBACK Tempo_d (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
switch (event) {
case EVENT_TIMER_TICK:
//PID DIGITAL
//MODULO 0
/* //obtención de errores.
e0_anterior2=e0_anterior;
e0_anterior=e0;
e1_anterior2=e1_anterior;
e1_anterior=e1;
e0=hueco_0+sensor(SENSOR_0);
e1=hueco_1+sensor(SENSOR_1);
//cálculo de Vcontrol

```

```

Vcontrol0+=((KP0+KI0+KD0)*e0-(KP0+2*KD0)*e0_anterior+KD0*e0_anterior2);
Vcontrol1+=((KP1+KI1+KD1)*e1-(KP1+2*KD1)*e1_anterior+KD1*e1_anterior2);
//Lmites de control
if (Vcontrol0<0.0) Vcontrol0=0;
if (Vcontrol0>5.0) Vcontrol0=5.0;
if (Vcontrol1<0.0) Vcontrol1=0;
if (Vcontrol1>5.0) Vcontrol1=5.0;
//Apagado
if (P0==0) Vcontrol0=0;
if (P1==0) Vcontrol1=0;
//Acci3n de control
bobina(ACTUADOR_0, Vcontrol0);
bobina(ACTUADOR_1, Vcontrol1);
/*/ /*Con esta rutina el sistema funciona muy aceptable 21/Mar/2002
//PID ANALOGICO
//de0_anterior=de0;
e0_anterior=e0;
e0=sensor(SENSOR_0);
de0=(e0-e0_anterior)/(PERIODO);
// ie0+=(e0+e0_anterior)*PERIODO/2;
// de0=N*(e0-e0_anterior)/(1+N*PERIODO)+de0_anterior/(1+N*PERIODO);
//de1_anterior=de1;
e1_anterior=e1;
e1=sensor(SENSOR_1);
de1=(e1-e1_anterior)/(PERIODO);
//ie1+=(e1+e1_anterior)*PERIODO/2;
//de1=N*(e1-e1_anterior)/(1+N*PERIODO)+de1_anterior/(1+N*PERIODO);
//Acci3n de control MODULO 0.
Vcontrol0 = P0*KP0*e0 + D0*KD0*de0;// + I0*KI0*ie0;
bobina(ACTUADOR_0, Vcontrol0*!Ahorro);
//Acci3n de control MODULO 1.
Vcontrol1 = P1*KP1*e1 + D1*KD1*de1;// + I1*KI1*ie1;
bobina(ACTUADOR_1, Vcontrol1*!Ahorro);*/
//PID ANALOGICO
//de0_anterior=de0;
e0_anterior=e0;
e0=sensor(SENSOR_0);
de0=(e0-KD0*e0_anterior);
// ie0+=(e0+e0_anterior)*PERIODO/2;
// de0=N*(e0-e0_anterior)/(1+N*PERIODO)+de0_anterior/(1+N*PERIODO);
//de1_anterior=de1;
e1_anterior=e1;
e1=sensor(SENSOR_1);
de1=(e1-KD1*e1_anterior);
//ie1+=(e1+e1_anterior)*PERIODO/2;
//de1=N*(e1-e1_anterior)/(1+N*PERIODO)+de1_anterior/(1+N*PERIODO);

```

```

//Acción de control MODULO 0.
Vcontrol0 = KP0*de0;// + I0*KI0*ie0;
bobina(ACTUADOR_0, Vcontrol0*!Ahorro);
//Acción de control MODULO 1.
Vcontrol1 = KP1*de1;// + I1*KI1*ie1;
bobina(ACTUADOR_1, Vcontrol1*!Ahorro);
//*****
if(q++>1000) //Rutinas a checar cada 1000 periodos
{
//¿Estamos en flotación?
if ((Vcontrol0>0) && (e0>-1 && e0<1) && (error_base0>e0+0.2))
{SetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_LED0, 1);
qt0++; }
else {
SetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_LED0, 0);
qt0=0;};
if ((Vcontrol1>0) && (e1>-1 && e1<1) && (error_base1>e1+0.2))
{SetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_LED1, 1);
qt1++; }
else {
SetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_LED1, 0);
qt1=0;};
SetCtrlVal(panelDigital, PANEL_dig_CRONO0, qt0);
SetCtrlVal(panelDigital, PANEL_dig_CRONO1, qt1);
//¿Aplicamos Energy Save?
if( (error_base0<e0+0.2) && (error_base1<e1+0.2) )
{qtt++;
if (qtt>20)
{Ahorro=1;
SetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_AHORRO, 1);};
}
else {Ahorro=0;
SetCtrlVal (panelDigital, PANEL_dig_AHORRO, 0);
qtt=0;};
q=0;
}
if(graf){
//4 Graficas
datosS0[0]=e0;
datosA0[0]=Vcontrol0;
datosS1[0]=e1;
datosA1[0]=Vcontrol1;
PlotStripChart (panelDigital, PANEL_dig_GRAF_S1, datosS1, 1, 0, 0, VAL_DOUBLE);
PlotStripChart (panelDigital, PANEL_dig_GRAF_A1, datosA1, 1, 0, 0, VAL_DOUBLE);
PlotStripChart (panelDigital, PANEL_dig_GRAF_S0, datosS0, 1, 0, 0, VAL_DOUBLE);
PlotStripChart (panelDigital, PANEL_dig_GRAF_A0, datosA0, 1, 0, 0, VAL_DOUBLE);
}

```

```

};
break;
}
return 0;
}
//Botón de ENCENDIDO/APAGADO del control DIGITAL
int CVICALLBACK control_pc (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
switch (event) {
case EVENT_COMMIT:
CONTROL_DIGITAL=1-CONTROL_DIGITAL;
SetCtrlAttribute(panelDigital, PANEL_dig_tiempo, ATTR_ENABLED, CONTROL_DIGITAL);
error_base0=e0;
error_base1=e1;
qtt=0;
if(CONTROL_DIGITAL==0) {
bobina(0, 0);
bobina(1, 0);
/*
if(j=MUESTRAS){
j=0;
//Gráfica las muestras tomadas
PlotY (panelDigital, PANEL_dig_GRAF_S0, datosS0, MUESTRAS, VAL_DOUBLE,
VAL_THIN_LINE, VAL_EMPTY_SQUARE, VAL_SOLID, 1, VAL_RED);
PlotY (panelDigital, PANEL_dig_GRAF_A0, datosA0, MUESTRAS, VAL_DOUBLE,
VAL_THIN_LINE, VAL_EMPTY_SQUARE, VAL_SOLID, 1, VAL_RED);
} */
}
break;
case EVENT_RIGHT_CLICK:
break;
}
return 0;
}
//Mensaje. pero se traba...
void CVICALLBACK acerca_de (int menuBar, int menuItem, void *callbackData,
int panel)
{
switch (menuItem) {
case menu_ayuda_acerca_de:
/*MessagePopup (" Acerca de este Programa", "TEXTTO_ACERCA_DE");*/
break;
}
}
}
int CVICALLBACK tiempoaju (int panel, int control, int event,

```

```

void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
    switch (event) {
    case EVENT_TIMER_TICK:
        //toma muestras de sensores
        datoS0[0]=sensor(SENSOR_0);
        datoS1[0]=sensor(SENSOR_1);
        datoS2[0]=sensor(SENSOR_2);
        datoS3[0]=sensor(SENSOR_3);
        //Gráfica las 4 gráficas
        PlotStripChart (panelAjuste, PANEL_aju_Grafica_0, datoS0, 1, 0, 0, VAL_DOUBLE);
        PlotStripChart (panelAjuste, PANEL_aju_Grafica_1, datoS1, 1, 0, 0, VAL_DOUBLE);
        PlotStripChart (panelAjuste, PANEL_aju_Grafica_2, datoS2, 1, 0, 0, VAL_DOUBLE);
        PlotStripChart (panelAjuste, PANEL_aju_Grafica_3, datoS3, 1, 0, 0, VAL_DOUBLE);
        break;
    }
    return 0;
}

int CVICALLBACK Enc_sen (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
    switch (event) {
    case EVENT_COMMIT:
        CONTROL_AJUSTE=1-CONTROL_AJUSTE;
        SetCtrlAttribute(panelAjuste, PANEL_aju_Tiempo_aju, ATTR_ENABLED, CONTROL_AJUSTE);
        break;
    case EVENT_RIGHT_CLICK:
        break;
    }
    return 0;
}

int CVICALLBACK act_izq (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
    switch (event) {
    case EVENT_COMMIT:
        GetCtrlVal (panelAjuste, PANEL_aju_Act_izq, &act0);
        bobina(0,act0*HABILITAR_ACT);
        break;
    case EVENT_RIGHT_CLICK:
        break;
    }
    return 0;
}

int CVICALLBACK act_der (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)

```

```
{
switch (event) {
case EVENT_COMMIT:
GetCtrlVal (panelAjuste, PANEL_aju_Act_der, &act1);
bobina(1,act1*HABILITAR_ACT);
break;
case EVENT_RIGHT_CLICK:
break;
}
return 0;
}
int CVICALLBACK hab_act (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
switch (event) {
case EVENT_COMMIT:
GetCtrlVal (panelAjuste, PANEL_aju_habilitador_act, &HABILITAR_ACT);
bobina(0,act0*HABILITAR_ACT);
bobina(1,act1*HABILITAR_ACT);
break;
}
return 0;
}
```



# Bibliografía

- [1] Leonel Corona Ramírez, *Diseño, construcción y control de un sistema de levitación magnética*, Tesis de Maestría, Sección de Mecatrónica, CINVESTAV, IPN, 2000.
- [2] K. Glatzel, G. Khurdok y D. Rogg, *The development of the magnetically suspended transportation system in the Federal Republic of Germany*, IEEE Trans. Veh. Technol, vol VT-29, no. 1, pp. 3-16, 1980.
- [3] *Maglev Transrapid Home Page*, <http://www.transrapid.de>, 30/mayo/2002.
- [4] *The Baltimore-Washington Maglev Project*, <http://www.bwmaglev.com/default.htm>, 30/mayo/2002.
- [5] *Maglev Systems Development Department Home Page*, [http://www.rtri.or.jp/rd/maglev/html/english/maglev\\_frame\\_E.html](http://www.rtri.or.jp/rd/maglev/html/english/maglev_frame_E.html), 30/mayo/2002.
- [6] *California Maglev Alliance*, <http://www.calmaglev.org>, 30/mayo/2002.
- [7] D. Rogg, *General survey of the possible applications and development tendencies of magnetic levitation technology*, IEEE Trans. Magn., vol MAG-20, no. 5, pp. 1696-1701, 1984.
- [8] Gary Stix, *Maglev: Racing to Oblivion?*, [http://www.sciam.com/1097issue/1097stix\\_maglev.html](http://www.sciam.com/1097issue/1097stix_maglev.html), 30/mayo/2002.
- [9] Dan Cho, Yoshifumi Kato y Darin Spilman, *Sliding Mode and Classical Controllers in Magnetic Levitation systems*, IEEE Control Systems, pp. 42-48, Febrero 1993.
- [10] P.K. Sinha, *Design of a magnetically levitated vehicle*, IEEE Trans. Magn., vol MAG-20, no. 5, pp. 1672-1674, 1984.
- [11] Jayawant B., *Electromagnetic suspension and levitation*, Proc. of IEEE, Vol. 129(A), pp. 549-581, 1982.
- [12] Anselmo Bittar y Roberto Moura Sales,  *$H_2$  and  $H_\infty$  control for maglev vehicles*, IEEE Control Systems, pp. 18-25, Agosto 1998.
- [13] E. Gottzein, R. Meisinger, y L. Miller, *The magnetic wheel in the suspension of high-speed ground transportation vehicles*, IEEE Trans. Veh. Technol, vol VT-29, no. 1, pp. 17-22, 1980.
- [14] Reitz, Milford y Christy, *Fundamentos de la teoría electromagnética*, Addison-Wesley Iberoamericana, pp. 201-217, 1986.

- [15] R. G. Powel, *Electromagnetism, Foundations of Engineering Series*. Mac Millan, pp. 117-209, 1990
- [16] Kurt Gieck, *Manual de formulas técnicas*, Ediciones Alfaomega, pp. S13, 1981.
- [17] Ronald G. Rule y Richard G. Gilliland, *Combined Magnetic Levitation and Propulsion: The Mag-Transit Concept*, IEEE Trans. Veh. Technol, vol VT-29, no 1, pp 41-49, 1980.
- [18] Yoshio Hikasa y Yutaka Takeuchi, *Detail and Experimental Results of Ferromagnetic Levitation System of Japan Air Lines HSST-01/-02 Vehicles*, IEEE Trans. Veh. Technol, vol VT-29, no 1, pp 35-41,1980.
- [19] Roger D. Fruechte, Robert H. Nelson, and Thomas A. Radomski, *Power conditioning systems for a magnetically levitated test vehicle*, IEEE Trans. Veh. Technol, vol VT-29, no. 1, pp. 50-60, 1980.
- [20] Benjamin C. Kuo, *Sistemas de Control Automático*, Prentice Hall, 1996.