

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL EN TIEMPO REAL  
BAJO UNA PLATAFORMA LINUX APLICADO A UN LEVITADOR  
MAGNÉTICO”**

**Tesis previa a la obtención del Título de:**

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**Autores:**

**ELIO ANDRÉS ROJAS NARVÁEZ**

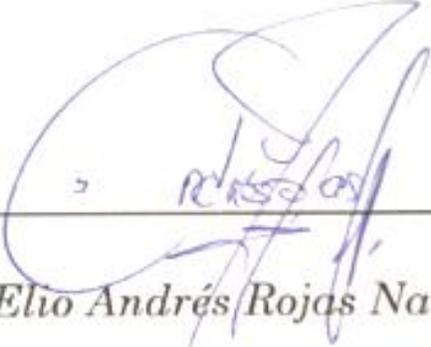
**MILTON ANTONIO SAQUISILÍ GONZÁLEZ**

**Director:**

**ING. MARCO A. CARPIO**

**Cuenca, julio 2013**

*Los conceptos vertidos, análisis realizados, resultados y conclusiones en este trabajo, son de absoluta responsabilidad de los Autores y autorizamos a la Universidad Politécnica Salesiana el uso de la misma con fines académicos*



---

*Elio Andrés Rojas Narváez*



---

*Milton Antonio Saquisilí González*

# CERTIFICACIÓN

El presente trabajo de tesis previo a la obtención del Título de Ingeniero Electrónico fue guiado satisfactoriamente por el Ing. Marco Carpio, quien autoriza su presentación para continuar con los trámites correspondientes.

Cuenca, julio de 2013



---

Ing. Marco A. Carpio

**DIRECTOR DE TESIS**

## DEDICATORIA

*“A mis amados e incomparables padres Elio y Carmita, que sin ellos hubiera sido imposible realizar este logro profesional, que con sus sabios consejos han hecho de mi una persona responsable, humilde, respetuosa y perseverante.*

*A mis hermanas Yessi y Gaby, que con su apoyo incondicional siempre me brindaron fuerzas para salir adelante.*

*Y a todas las personas que creyeron en mi y siempre estuvieron presentes en mis triunfos y derrotas”.*

**Elio Andrés...**

## DEDICATORIA

*Este trabajo de tesis principalmente va dedicado a mis Padres, porque ellos me han dado la formación como una persona con valores, con principios, con empeño, perseverancia, y sobre todo el carácter para conseguir los objetivos que me he planteado.*

*A mis hermanas, Johanna, Fernanda y Belén, que siempre estuvieron presentes para darme su apoyo incondicional. Y como no agradecer a mí esposa, Estrella, que es la base de mi inspiración y la persona que me apoyo firmemente para alcanzar este logro profesional tan anhelado.*

***"El futuro tiene muchos nombres. Para los débiles es lo inalcanzable. Para los temerosos, lo desconocido. Para los valientes es la oportunidad."*** Victor Hugo

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestros sinceros agradecimientos al Profesor Director Ing. Marco Carpio Alemán, por brindarnos paciencia y apoyo, con comentarios y sugerencias para la feliz culminación de este trabajo

Agradecemos también al Ing. Flavio Quizhpi, por su colaboración para el desarrollo de esta tesis, al proporcionarnos la tarjeta PCI de adquisición de datos.

## AGRADECIMIENTO

*“Agradezco infinitamente a Dios, que siempre estuvo presente dándome salud y guiándome por el camino del bien, para salir adelante en esta vida estudiantil.*

*A toda mi familia por ser la mejor, y brindarme su apoyo a cada momento, que con palabras de aliento, me levantaron de cada derrota.*

*A esa persona MACH que siempre estuvo ahí, a pesar de las circunstancias, en verdad  
GRACIAS*

## AGRADECIMIENTO

*El agradecimiento mas grande como no, a ti Mi Dios que nunca me falla, mi amigo incondicional, mi compañero de triunfos y derrotas, gracias a ti he logrado este sueño, que aunque a veces parecía imposible, tú me diste la fuerza y la sabiduría necesaria para seguir adelante.*

*Como no a mi familia, a mis padres, a mis hermanas, a mi querida esposa, que siempre tuvieron la confianza y la seguridad, de que lograría alcanzar este sueño y nunca dudaron en darme su apoyo, su ejemplo y sus consejos.*

*A mi director de tesis, Ing. Marco Carpio, quien con sus conocimientos, su experiencia y su paciencia logro guiarme de forma acertada en este trabajo para la culminación exitosa de mis estudios.*

*Y son muchas personas que me han acompañado en este duro camino de mi formación profesional, compañeros, amigos, profesores; A todos ellos por su amistad, sus consejos y su apoyo. GRACIAS*

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
DEDICATORIA.....	<i>iv</i>
AGRADECIMIENTOS .....	<i>vi</i>
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	<i>ix</i>
ÍNDICE DE TABLAS.....	<i>xiii</i>
ÍNDICE DE FIGURAS.....	<i>xiii</i>
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	<i>xv</i>
INTRODUCCIÓN .....	<i>xvii</i>

## **CAPÍTULO I**

<b>DISEÑO FÍSICO DE LA PLANTA .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. GENERALIDADES DEL LEVITADOR MAGNÉTICO.....</b>	<b>1</b>
1.1.1 SISTEMA FÍSICO.....	3
1.1.2 CONTROLADOR.....	3
1.1.3 CONCEPTOS ELECTROMAGNETISMO .....	7
1.1.4 CAMPO MAGNÉTICO EN UN SELENOIDE .....	8
1.1.5 LEVITADOR MAGNÉTICO .....	10
<b>1.2. ACTUADOR O BOBINA.....</b>	<b>10</b>
<b>1.3. MODULO DE POTENCIA.....</b>	<b>12</b>

<b>1.4. MEDICIÓN DE POSICIONAMIENTO.....</b>	<b>17</b>
--	-----------

## **CAPÍTULO II**

<b>ANÁLISIS MATEMÁTICO DE LA PLANTA.....</b>	<b>20</b>
--	-----------

<b>2.1 GENERALIDADES.....</b>	<b>20</b>
-------------------------------	-----------

2.1.1. SISTEMA DE CONTROL.....	20
--------------------------------	----

2.1.2. SISTEMA:.....	21
----------------------	----

2.1.3. PLANTA:.....	21
---------------------	----

2.1.4. VARIABLE CONTROLADA (SEÑAL DE SALIDA):.....	21
--	----

2.1.5. VARIABLE DE ENTRADA (SEÑAL DE ENTRADA O REFERENCIA):.....	21
--	----

2.1.6. CONTROLADOR:.....	22
--------------------------	----

2.1.7. PERTURBACIONES:.....	22
-----------------------------	----

2.1.8. SISTEMA EN LAZO ABIERTO:.....	22
--------------------------------------	----

2.1.9. SISTEMAS DE CONTROL REALIMENTADOS O LAZO CERRADO:.....	23
---	----

2.1.10. LA RETROALIMENTACIÓN Y SUS EFECTOS.....	25
---	----

2.1.11. EFECTOS.....	26
----------------------	----

2.1.12. CONTROL FIJO O ESTÁNDAR.....	31
--------------------------------------	----

<b>2.2. MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA.....</b>	<b>31</b>
--	-----------

2.2.1 FUERZA ELECTROMAGNÉTICA.....	32
------------------------------------	----

2.2.2 INDUCTANCIA.....	33
------------------------	----

2.2.3 ESTUDIO MECANICO.....	34
-----------------------------	----

2.2.4 ESTUDIO ELECTRICO.....	34
------------------------------	----

2.2.5 ESTUDIO DINAMICO.....	35
-----------------------------	----

2.2.6 ECUACIONES DE ESTADOS.....	36
----------------------------------	----

2.2.7 LINEALIZACION DEL SISTEMA.....	39
--------------------------------------	----

<b>2.3. LUGAR GEOMÉTRICO DE RAÍCES.....</b>	<b>43</b>
2.3.1 CONCEPTO LUGAR GEOMÉTRICO DE RAÍCES .....	43
2.3.2 LUGAR GEOMÉTRICO DE RAÍCES DEL LEVITADOR MAGNÉTICO .....	44

### **CAPÍTULO III**

<b>CONTROL EN TIEMPO REAL DEL SISTEMA.....</b>	<b>51</b>
--	-----------

<b>3.1. RTAI LINUX. ....</b>	<b>51</b>
------------------------------	-----------

3.1.1. RTAI.....	52
------------------	----

3.1.2. FUNDAMENTOS RTAI.....	53
------------------------------	----

3.1.3. HAL - HARDWARE ABSTRACTION LAYER. ....	54
---	----

3.1.4. PLANIFICACIÓN.....	54
---------------------------	----

3.1.5. CARACTERÍSTICAS .....	55
------------------------------	----

3.1.6. COMUNICACIÓN ENTRE PROCESOS (IPC - INTER-PROCESS COMMUNICATION). 56	
---	--

3.1.7. GESTIÓN DE MEMORIA.....	56
--------------------------------	----

3.1.8. LXRT: USER-SPACE INTERFACE TO RTAI.....	56
--	----

3.1.9. APLICACIONES.....	56
--------------------------	----

<b>3.2. CONTROL.....</b>	<b>57</b>
--------------------------	-----------

3.2.1 SCILAB.....	73
-------------------	----

3.2.2 SCICOS.....	74
-------------------	----

**CAPÍTULO IV**

**PRUEBAS DEL SISTEMA ..... 79**

**4.1. DESEMPEÑO EN ESTADO ESTACIONARIO..... 79**

**4.2. DESEMPEÑO ANTE SEÑALES VARIABLES EN EL TIEMPO..... 81**

**4.3. DESEMPEÑO ANTE PERTURBACIONES MECÁNICAS..... 86**

**CAPÍTULO V**

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... 89**

**5.1. CONCLUSIONES..... 89**

**5.2. RECOMENDACIONES..... 91**

**5.3. BIBLIOGRAFÍA..... 91**

**ANEXOS..... 93**

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1: "Tabla Parámetros Modulo Potencia"[13].....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 2: "Parámetros Convertidor Voltaje-PWM"[14, p. 3] .....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 3: "Parámetros Sensor Infrarrojo"[18].....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 4: "Comparación entre Controladores"[23] .....</i>	<i>24</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.- "Diagrama de Bloques de un Sistema de Levitación" .....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2: "Diagrama de Bloques Final" .....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 3: "Tarjeta PCI 1117"[4].....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 4: "Barra Imantada (Polos Magnéticos)"[6] .....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 5: "Separación de Imán" [6] .....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 6: "Campo Magnético en una Espira"[6] .....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 7: "Campo Magnético en un Selenoide"[6] .....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 8: "Regla de la Mano Derecha"[10].....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 9: "Actuador Electroimán".....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 10: "Dual VNH2SP30 Motor Driver Carrier MD03A"[12].....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 11: "Convertidor Voltaje-PWM".....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 12: "Esquema Convertidor Voltaje-PWM" .....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 13: "Sensor No Interrumpido"[20].....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 14: "Sensor Interrumpido"[20].....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 15: "Fotodiodo"[19] .....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 16: "Sistema de Control"[21].....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 17: "Sistema de control Simple"[21].....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 18: "Sistema de Control Lazo Abierto"[23].....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 19: "Sistema de control Lazo Cerrado"[23] .....</i>	<i>24</i>

<i>Figura 20:"Sistema Realimentado"[21].....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 21:"Lazo segundo de Realimentación"[21] .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 22:"Sistema realimentado con una señal de Ruido"[21].....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 23:"Circuito R-L"[24] .....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 24:"Modelo Dinámico de L.M"[2, p. 6].....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 25:"Lugar Geométrico de Raíces" .....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 26:"SISO TOOL" .....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 27:"Constantes Kp y Kd" .....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 28:"LGR con acción del Cero" .....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 29:"Respuesta al Escalón" .....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 30:"Sistema Operativo Linux con RTAI"[25, p. 4].....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 31:"Bloques Control RTAI"[25].....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 32"Diagrama de Bode Controladores 100Hz" .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 33"Diagrama de Bode Controladores 1KHz" .....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 34"Diagrama de Bode del Sistema, 138rad/seg" .....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 35"Respuesta del Sistema, 138rad/seg" .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 36"Respueta del Sistema Compensado Offset, 138rad/seg" .....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 37"Diagrama de Bode del Sistema, 2.99KHz" .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 38"Respuesta del Sistema, 2.99KHz" .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 39"Diagrama de Bode del Sistema a Frecuencia de Corte" .....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 40"Respuesta del Sistema a Frecuencia de Corte" .....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 41:"Diagrama de Bloques, Sistema tiempo Discreto" .....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 42"Respuesta del Sistema, Entrada Escalón" .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 43"Error del Sistema" .....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 44"Ubuntu Versión 10.04 Lucid" .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 45"Scilab 4.1.2" .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 46"Cargar Drivers del PCI" .....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 47"Diagrama de Bloques SCICOS" .....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 48"Referencia Constante" .....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 49"Levitación con Set Point" .....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 50"Respuesta Voltaje-Corriente Set Point" .....</i>	<i>80</i>

<i>Figura 51</i> "Referencia Cuadrada" .....	82
<i>Figura 52</i> "Levitación Señal Cuadrada" .....	82
<i>Figura 53</i> "Respuesta Voltaje-Corriente Señal Cuadrada" .....	83
<i>Figura 54</i> "Referencia Señal Sinusoidal" .....	84
<i>Figura 55</i> "Respuesta Voltaje-Corriente Señal Sinusoidal" .....	85
<i>Figura 56</i> "Referencia Set Point" .....	86
<i>Figura 57</i> "Secuencia de fotos Perturbaciones Mecánicas" .....	87
<i>Figura 58</i> "Respuesta Voltaje-Corriente Perturbaciones Mecánicas" .....	87

## ÍNDICE DE ECUACIONES

	Pág.
<i>Ecuación 1</i> :"Ley Circuital de Ampere"[5] .....	8
<i>Ecuación 2</i> :"Inductancia Bobina"[11] .....	12
<i>Ecuación 3</i> :"Relación Entrada/Salida"[21] .....	25
<i>Ecuación 4</i> :"Relación Entrada/Salida modificada"[21] .....	26
<i>Ecuación 5</i> :"Sensibilidad de M con respecto a G"[21] .....	28
<i>Ecuación 6</i> :"Sensibilidad Lazo Cerrado"[21] .....	28
<i>Ecuación 7</i> :"Sensibilidad en Lazo Abierto"[21] .....	28
<i>Ecuación 8</i> "Salida con Disturbios lazo abierto"[21] .....	30
<i>Ecuación 9</i> :"Salida con Disturbios lazo cerrado"[21] .....	31
<i>Ecuación 10</i> :"Energía almacenada debido al campo magnético"[2] .....	32
<i>Ecuación 11</i> :"Energía almacenada en función de la inductancia L"[2] .....	32
<i>Ecuación 12</i> :"Gradiente de energía magnética"[2] .....	33
<i>Ecuación 13</i> "Fuerza electromagnética en la dirección X"[2] .....	33
<i>Ecuación 14</i> :"Inductancia"[2] .....	33
<i>Ecuación 15</i> :"Fuerza electromagnética en la dirección X en relación de la inductancia"[2] .....	34
<i>Ecuación 16</i> :"Segunda ley de Newton"[2] .....	34

<i>Ecuación 17:"Modelo mecánico del LM"[2].....</i>	<i>34</i>
<i>Ecuación 18:"Ley de Kirchoff"[2].....</i>	<i>35</i>
<i>Ecuación 19:"Inductancia asumiendo que <math>L_i \gg L_o</math>"[2].....</i>	<i>35</i>
<i>Ecuación 20:"Modelo eléctrico del LM"[2].....</i>	<i>35</i>
<i>Ecuación 21:"Modelo dinámico del LM"[2].....</i>	<i>36</i>
<i>Ecuación 22:"Variable de estado 1".....</i>	<i>37</i>
<i>Ecuación 23:"Variable de estado 2".....</i>	<i>37</i>
<i>Ecuación 24:"Variable de estado 3".....</i>	<i>37</i>
<i>Ecuación 25:"Ecuación de estado 1".....</i>	<i>37</i>
<i>Ecuación 26:"Ecuación de estado 2".....</i>	<i>37</i>
<i>Ecuación 27:"Ecuación de estado 3".....</i>	<i>38</i>
<i>Ecuación 28:"Comportamiento del sensor"[2].....</i>	<i>38</i>
<i>Ecuación 29:"Comportamiento del actuador"[2].....</i>	<i>38</i>
<i>Ecuación 30:"Relación entre modelo mecánico del LM y modelo eléctrico del LM"[2].....</i>	<i>39</i>
<i>Ecuación 31:"Segunda derivada de H respecto a "t".....</i>	<i>41</i>
<i>Ecuación 32:"Laplace de segunda derivada de H respecto a "t".....</i>	<i>42</i>
<i>Ecuación 33:"Derivada de I respecto a "t".....</i>	<i>42</i>
<i>Ecuación 34:"Laplace de derivada de I respecto a "t".....</i>	<i>42</i>
<i>Ecuación 35:"Función de transferencia del LM linealizado con las tres ecuaciones de estado".....</i>	<i>43</i>
<i>Ecuación 36:""Función de Transferencia Lazo Cerrado"[22, p. 355].....</i>	<i>44</i>
<i>Ecuación 37:"Ecuación Característica"[21, p. 472].....</i>	<i>44</i>
<i>Ecuación 38:"Posición de Cero en LGR"[21].....</i>	<i>46</i>
<i>Ecuación 39:"Relación Transformación Bilineal"[26].....</i>	<i>58</i>

# INTRODUCCIÓN

El propósito del presente trabajo es plantear una plataforma abierta basada en Software Libre que permita el desarrollo, modificación e inclusión de sistemas de control que serán implementados en un Levitador Magnético en RTAI, sin la necesidad de un hardware de control especializado, careciendo de la utilización, tanto de hardware como de software costosos para la adquisición de datos.

En un primer momento se estudia las generalidades del electromagnetismo, para en base a esto, poder desarrollar el diseño y la construcción de la planta conjuntamente con todas las partes que consta la misma, dicha construcción debe ser lo más estricta posible para un buen desempeño del controlador.

Por otro lado mencionando que, la implementación del controlador es en tiempo real, se debe de estudiar la forma de, como adquirir los datos y como estos pueden ser útiles cuando se está trabajando en un sistema operativo abierto Linux.

Luego, se efectúa el análisis matemático de la planta, debido a que, cuando se estudia sistemas de control se debe priorizar la obtención de un modelo matemático, el cual es un conjunto de ecuaciones donde se representa la dinámica del sistema, teniendo en cuenta e introduciendo criterios sobre Teoría de Control, para que finalmente las ecuaciones obtenidas puedan ser modeladas con la ayuda del Software Matlab en simulink y se pueda tener un criterio de cómo está respondiendo el controlador.

Enseguida, luego de haber hecho el análisis matemático, mecánico, eléctrico, dinámico y de haber simulado el sistema de levitación, se puede empezar con el desarrollo del controlador PD, donde finalmente quedara implementado, recalando que, para esto se debe investigar estudiar y aplicar conceptos y técnicas que faciliten el entendimiento para realizar tareas en tiempo real.

Como forma de validación, seguidamente se lleva a la vida real, todo el modelo matemático mediante la realización de las pruebas respectivas, dichas pruebas se efectúan con señales variantes e invariantes en el tiempo y con perturbaciones mecánicas utilizando una señal de entrada constante, donde se comprueba cuan estable es el sistema cuando está sometido a disturbios ajenos a la planta.

Finalmente, se presenta conclusiones y recomendaciones, sobre controladores implementados en una plataforma abierta mediante la cual se puede trabajar en tiempo real.

# CAPITULO 1

## DISEÑO FISICO DE LA PLANTA

### 1.1. GENERALIDADES DEL LEVITADOR MAGNÉTICO.

En este capítulo se mencionara generalidades de electromagnetismo, las cuales son cruciales para poder entender el tema de levitación magnética por lo tanto se requiere el conocimiento de conceptos básicos que abarcan todo lo referente a fuerzas magnéticas, las mismas que son existentes al hacer circular una corriente por un conductor.

En la naturaleza se puede encontrar propiedades de atracción y de repulsión; dichas propiedades se encuentran en un mineral llamado “magnetita o piedra imán”, este mineral tiene la propiedad de atraer el “hierro” “cobalto” y ciertas aleaciones de dichos metales, a esta propiedad natural se le llama “magnetismo” [1].

De la misma manera como existen imanes naturales también existen imanes artificiales que de igual forma producen magnetismo.

La palabra levitación está relacionada con la idea, que algún cuerpo debe de estar suspendido o flotando en el aire sin ningún contacto mecánico. Existe una levitación de tipo magnética, esto quiere decir que un objeto, debe de estar levitando en el aire sin ningún contacto solo gracias al campo magnético inducido por una corriente eléctrica que circula a través del selenoide [1].

Entonces, un sistema de levitación magnética consta de tres partes básicas; *un electroimán (bobina o actuador), sensores y una esfera metálica*, esta última parte es la que estará suspendida o flotando.

Por otro lado un proceso de levitación magnética es naturalmente inestable y lógicamente no lineal, es por eso que el control de estos tipos de sistemas es muy desafiante. Por lo que es necesario utilizar un control en lazo cerrado para obtener una retroalimentación óptima a través de los sensores y poder mantener la levitación [2].

Sin embargo la levitación magnética utilizada en aplicaciones de entornos industriales, presenta diversas ventajas, que al ser un sistema que funciona sin contacto, donde no existe el rozamiento físico, se reduce notablemente costos en lo que se refiere a mantenimiento que suelen ser los más caros además de lubricantes para que exista una relación buena entre dos piezas o dos sistemas móviles. Cabe recalcar, que si bien es cierto tiene numerosas ventajas, pero implementar sistema de levitación magnética completo dándole una buena aplicación es costoso.

En los países desarrollados el tema de levitación magnética, está ganando territorio. Japón ha implementado algunas aplicaciones, que se está utilizando principalmente en el transporte por trenes con sistemas tipo “MagLev” (Magnetic Levitation Vehicles), siendo su principio de funcionamiento el sistema de levitación. Este tren puede alcanzar velocidades de más de 400 km/h, y su principal ventaja es que el mantenimiento es mucho más sencillo [3].

Ya se mencionaron las partes de un Levitador magnético, entonces, a continuación en la Figura 1.- “Diagrama de Bloques de un Sistema de Levitación”, se muestra un esquema de bloques de la funcionalidad del Sistema de Levitación, la parte fundamental de dicho sistema es la parte de adquisición de datos, que al ser una tarjeta PCI hace posible que se maneje velocidades de transmisión de datos superiores a 4Gbits/s. Siendo importante resaltar que esta tarjeta de adquisición se utilizara bajo una plataforma Linux para hacer posible el control en tiempo real.

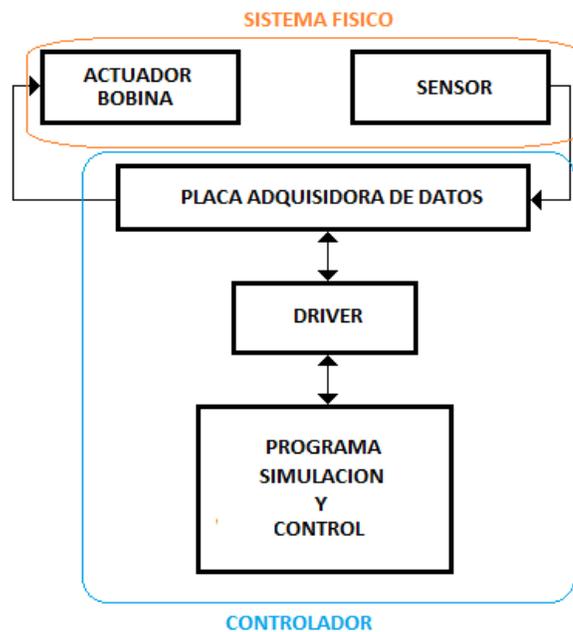


Figura 1.- “Diagrama de Bloques de un Sistema de Levitación”

### 1.1.1 SISTEMA FÍSICO

- **Actuador Bobina.-** El actuador es directamente el electroimán, este elemento al circular una corriente por él, es el encargado de generar una fuerza electromagnética que jala al objeto [2].
- **Sensor.-** Este dispositivo, adquiere la señal de retroalimentación, ya que indicara en qué posición se encuentra el objeto y según esto actuara el controlador a través de la bobina.
- **Objeto metal.-** El metal principalmente debe ser un material ferromagnético, los mismos tienen la propiedad de ser atraídos por los imanes, en el caso del sistema de levitación, será el actuador o bobina, hay que tomar en cuenta el peso de dicho material debe de ser según la fuerza magnética generada, sabiendo que esta fuerza debe de superar la fuerza de la gravedad.

### 1.1.2 CONTROLADOR

- **Placa Adquisidora de datos.-** La placa consta la parte física del controlador, es una tarjeta de multifunción de adquisición de datos para el bus PCI, la cual transmitirá y recibirá todas las señales de la planta al controlador y viceversa.
- **Drive.-** Es el modulo de potencia, la interfaz entre la placa Adquisidora de datos y el actuador o bobina, ya que los datos que expulsa la placa son niveles bajos de voltaje como para comandar directamente al actuador.
- **Programa Simulación.-** Es el corazón del sistema de levitación ya que aquí se desarrolla el controlador, el cual es en una interfaz amigable para el usuario.

Una vez definido el diagrama de bloques para un sistema de LM de una forma general, se puede considerar un diagrama bloque más detallado, para el caso de un Sistema de Control en Tiempo Real bajo una Plataforma

Linux aplicado a un Levitador Magnético, en la se puede mostrar en la Figura 2:"Diagrama de Bloques Final"

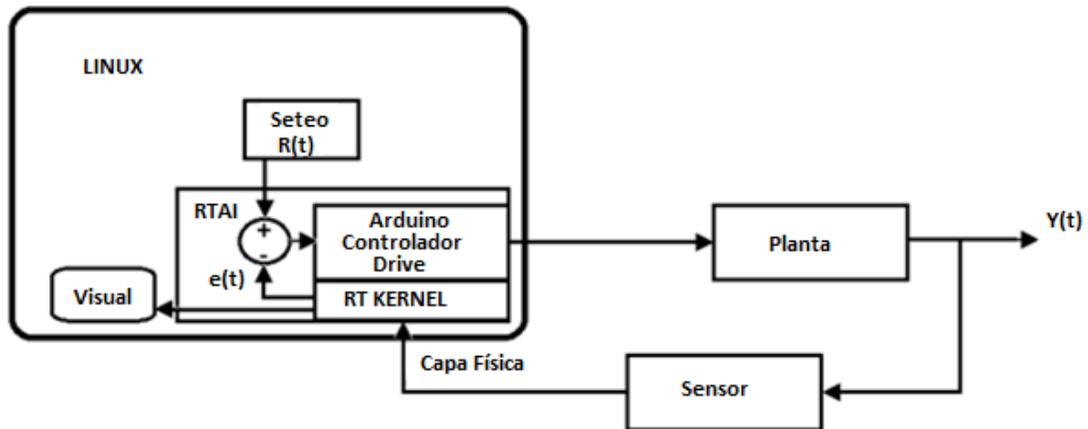


Figura 2:"Diagrama de Bloques Final"

✓ **Linux:**

Tomando como S.O software libre es posible la modificación de su estructura interna al disponer de los módulos y controladores en código abierto. Se utiliza Ubuntu como la distribución de Linux escogida por la facilidad de utilización de este entorno frente a otras distribuciones disponibles.

✓ **Seteo:**

En esta etapa se realiza la configuración del Set Point y el comportamiento del controlador de una manera amigable con el usuario.

✓ **RTAI:**

La distribución de Ubuntu será parchada con RTAI para la realización de tareas en tiempo real el cual permite la inclusión de nuevos módulos y la creación de otros compatibles que permitan realizar un control dentro de los rangos establecidos.

✓ **Controlador:**

Este es el corazón del proyecto. Aquí se desarrollará el controlador robusto en la interfaz amigable de SCILAB/SCICOS y los bloques de controladores

que sean necesarios serán programados en lenguaje C para optimizar su rendimiento, en caso de necesitar.

✓ **RTKernel:**

Es un parche que implementa RTAI para la gestión de hardware y asignación de prioridades.

✓ **Capa Física:**

- **Placa Adquisición de datos.-** Está conformada por la tarjeta PCI 1711, la cual es una tarjeta multifunción de adquisición de datos para el bus PCI. Esta tarjeta proporciona la facilidad para realiza múltiples mediciones y tareas de control.

El Modelo PCI-1711 ofrece 16 canales de 12 bits de una sola terminación de una entrada A/D, 16 canales de entradas digitales, 16 canales de salidas digitales, dos canales de salida analógica de 12 bits, y un temporizador/contador de 16-bit con un tiempo de base de 10 MHz.

Esta tarjeta proporciona un búfer de memoria FIFO (First In First Out) que puede almacenar hasta 1K muestras A / D.

La tarjeta proporciona un contador programable para generar un disparo para la conversión A/D.

El chip de contador es un 82C54 o equivalente, que incluye tres contadores de 16 bits en un reloj de 10 MHz. A continuación se muestra en la Figura 3:"Tarjeta PCI 1117"[4], la apariencia física de la tarjeta.



Figura 3:"Tarjeta PCI 1117"[4]

✓ **Drive:**

Esta tarjeta es la encargada de amplificar la señal de corriente que se obtiene a la salida de la tarjeta Adquisidora de datos, sin olvidar que entre estas dos existe un puente para la conversión de voltaje a PWM.

✓ **Placa interfaz de Potencia**

Esta placa es la encargada de hacer la conversión de voltaje a PWM, ya que la tarjeta de amplificación de corriente trabaja con modulación por ancho de pulso.

✓ **Sensor:**

Este dispositivo es el que envía la señal de realimentación, para saber el posicionamiento de objeto ferromagnético que se encuentra levitando, este sensor será de tipo infrarrojo.

✓ **Planta:**

Está conformada básicamente por el electroimán, elemento a levitar y los fenómenos físicos que interactúan con estos elementos (masa, aceleración de la gravedad, fuerzas externas, etc). Todos estos conforman una planta naturalmente inestable y no lineal.

✓ **Visual:**

Esto se encuentra conformado por las diferentes lecturas y curvas presentadas en pantalla para su posterior análisis. Esta etapa es realizada en el espacio común de trabajo de Linux para evitar que interfiera con el controlador de mayor prioridad.

Se citan conceptos básicos sobre magnetismo, para según estas leyes hacer relación a un sistema de levitación magnética y conocer un poco más a fondo cómo se comporta dicho sistema.

### 1.1.3 CONCEPTOS ELECTROMAGNETISMO

✓ **Polos Magnéticos**

Los polos magnéticos aparecen en los extremos de las barras imantadas que generalmente se les conoce como “imán”, en dichos extremos la acción magnética es intensa siendo nula o cero en el centro de la barra. Para la distinción de los polos de una barra imantada se les denomina “polo norte” y “polo sur”, sabiendo que la aproximación entre polos iguales se repelen y entre polos distintos se atraen en relación a la distancia entre ellos [5].

En la Figura 4: “Barra Imantada (Polos Magnéticos)” se puede apreciar una barra imantada y la ubicación de los polos magnéticos



Figura 4: “Barra Imantada (Polos Magnéticos)”[6]

Una propiedad curiosa de las barras imantadas o de los imanes es la imposibilidad de separar los polos magnéticos, esto quiere decir, si se realiza un corte al imán cada pedazo tendrá su respectivo polo norte y polo sur. Se puede apreciar en la Figura 5: “Separación de Imán”

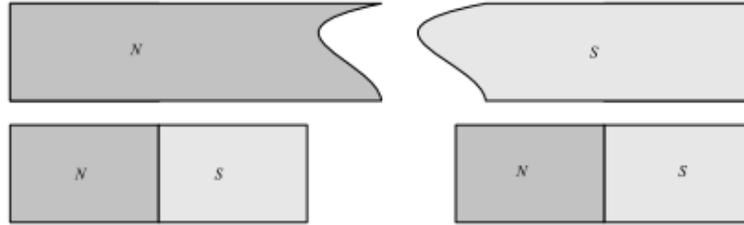


Figura 5: "Separación de Imán" [6]

#### ❖ Líneas de Fuerza

Las líneas de fuerza es la ruta que describe la energía de los polos norte y sur de un imán, sabiendo que el sentido de estas líneas de fuerza sale del polo norte y entran por el polo sur [1].

#### ❖ Flujo Magnético

La unidad de flujo magnético es el Maxwell, y mide la cantidad de líneas de fuerza que sale del polo norte al polo sur de un imán [7].

#### ❖ Campo Magnético

Es la intensidad que ha de tener un campo magnético, para que una carga 1C moviéndose a una velocidad 1m/s, perpendicularmente a la dirección del campo, experimente una fuerza magnética de 1 newton[6]. La unidad es el Tesla

#### ❖ Ley de Ampere

La ley de ampere, expresa que la integral de línea de H, sobre cualquier trayectoria cerrada, es igual a la corriente encerrada por dicha trayectoria. Se expresa con la Ecuación 1:"Ley Circuital de Ampere"

$$\oint H \, dl = I \quad (1)$$

Ecuación 1:"Ley Circuital de Ampere"[5]

### 1.1.4 CAMPO MAGNÉTICO EN UN SELENOIDE

Normalmente se conoce como un selenoide a un arrollamiento de alambre que está dando vueltas a un cilindro circular, cuyos arrollamientos están formando una espira helicoidal, teniendo en cuenta que la longitud del selenoide a lo largo de su eje debe de ser mayor al diámetro de cada vuelta del arrollamiento [6].

Para poder entender como es el campo magnético en un selenoide, hay que, analizar o conocer primero el campo magnético en una sola espira.

En la siguiente Figura 6:"Campo Magnético en una Espira" se puede observar que las líneas de campo magnético se encuentran en un plano perpendicular a la espira.

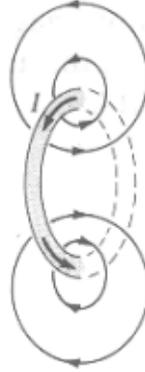


Figura 6:"Campo Magnético en una Espira"[6]

Una vez que se tiene una idea de cómo se comportan las líneas de campo magnético en una sola espira se podrá hacer relación a como se comportaría las líneas de campo magnético en un selenoide completo.

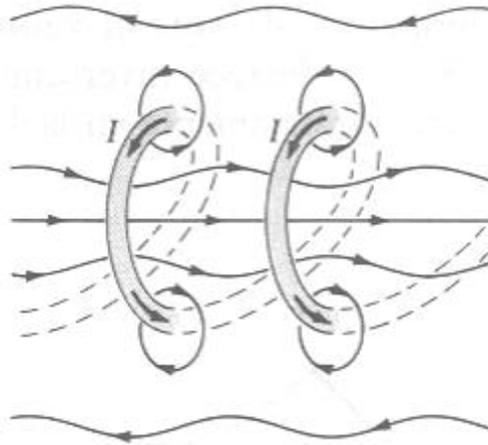


Figura 7:"Campo Magnético en un Selenoide"[6]

En la Figura 7:"Campo Magnético en un Selenoide" se muestra las líneas de campo en un selenoide teniendo en cuenta las vueltas separadas.

Por otra parte en un selenoide de vueltas mas apretadas lógicamente la separación entre estas será menor y dichas vueltas se parecen más en su forma a una espira, de esta manera cada espira producirá una contribución al campo magnético[6].

En el interior del selenoide el campo resultante será uniforme debido a la contribución de cada vuelta, mientras que en el exterior las mismas contribuciones tienden a cancelarse por lo tanto el campo resultante es pequeño.

### **1.1.5 LEVITADOR MAGNÉTICO**

Una vez que se ha mencionado algunos de los conceptos más sobresalientes de electromagnetismo, en este apartado se continúa con el diseño físico de la planta.

Anteriormente en la Figura 1.- “Diagrama de Bloques de un Sistema de Levitación”, el Levitador comúnmente constara de una parte física y una parte de control, en lo que se refiere a la parte física, se relaciona directamente con la planta del proyecto a ser controlada, la cual está compuesta del Actuador o Bobina y el Sensor.

## **1.2. ACTUADOR O BOBINA**

Al hablar del actuador, se hace referencia al electroimán, sin olvidar, de la corriente que lo controla, la cual está directamente relacionada con el controlador de la planta.

Un electroimán se le conoce como un dispositivo, que al fluir corriente eléctrica, este produce un campo magnético, dicho campo magnético es proporcional a la corriente.[8][9]

Para la construcción del electroimán, normalmente se enrolla, un pedazo de alambre sobre un objeto de metal, la forma de este objeto es un tubo cilíndrico recto, todo esto se le conoce como selenoide, o conocido también como, un arrollamiento de alambre que está dando vueltas a un cilindro circular, estos arrollamientos forman una espira helicoidal, teniendo en cuenta que, la longitud

del selenoide a lo largo de su eje debe de ser mayor al diámetro de de cada vuelta del arrollamiento.[6][9]

Se puede producir campos magnéticos muy fuertes si se utiliza un núcleo de material paramagnético o ferromagnético, en este electroimán se utiliza un material de acero eléctrico, por otro lado, los campos magnéticos generados se orientan según la regla de la mano derecha.[9]

En la Figura 8:"Regla de la Mano Derecha" se puede observar el sentido y dirección que tendrá, la corriente  $I$  y el campo magnético  $B$ , esto en relación a la regla de la mano derecha, siendo el pulgar, quien tenga la dirección de la corriente y los dedos restantes el campo magnético producido por el flujo de dicha corriente.[10]

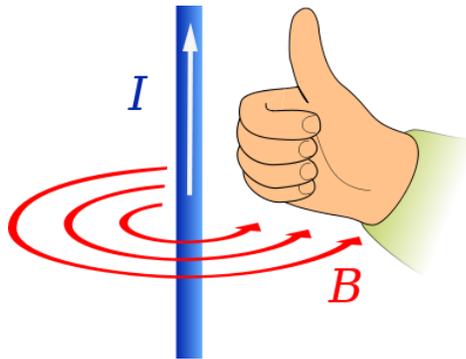


Figura 8:"Regla de la Mano Derecha"[10]

Según lo expuesto anteriormente, para la construcción del electroimán se utilizó alambre esmaltado del No. 16, enrollado sobre el núcleo de hierro, de 9.8cm de longitud, y de 19mm de diámetro. Se enrollaron 2600 vueltas, con lo que el embobinado quedó de 4.2cm de diámetro total.

En la Figura 9:"Actuador Electroimán" se muestra la apariencia, preliminar del actuador o electroimán



Figura 9:"Actuador Electroimán"

Para calcular el valor de la inductancia (en henrios), cuando un electroimán tiene como núcleo de permeabilidad diferente al vacío, según las ecuaciones de Maxwell, viene determinado por la Ecuación 2:"Inductancia Bobina".[11]

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (2)$$

Ecuación 2:"Inductancia Bobina"[11]

Donde:

- $\mu$  es la permeabilidad del hierro =  $4.971 \times 10^{-4}$
- $N$  es el número de vueltas
- $A$  es la sección transversal de la bobina
- $l$  es la longitud .

Reemplazando dichos valores en la ecuación, se tiene que el valor de la inductancia (en henrios), es de  $L=420\text{mH}$ .

### 1.3. MODULO DE POTENCIA

El modulo de potencia consta de dos partes la tarjeta de amplificación y la tarjeta de conversión de voltaje a PWM.

### ✓ **VNH2SP30 Dual Carrier Motor Driver MD03A**

Como se dijo anteriormente, esta tarjeta es la encargada de amplificar la corriente, es conocida como VNH2SP30 Dual Carrier Motor Driver MD03A, aparte de todos los dispositivos básicos que están contenidos en una tarjeta electrónica de potencia, consta de un pull-up de limitación de corrientes y un FET de protección de la batería inversa, además como es lógico existe una buena disposición de conexiones, ya que se encuentra separado las parte de control y potencia, esto es importante para proteger el circuito y no causar errores involuntarios, es de un tamaño aceptable para trabajar proyectos electrónicos, y finalmente para tener un mejor conocimiento sobre los parámetros de operación, se muestra en la Tabla 1:"Tabla Parámetros Modulo Potencia"[12].

Tabla 1:"Tabla Parámetros Modulo Potencia"[13]

PARÁMETROS	
Tensión de alimentación (Vcc)	5.5 a 16V
Capacidad de corriente máxima	30 A
MOSFET de resistencia (por trayecto)	19 mW
Máxima frecuencia PWM	20 Khz
El exceso de tensión de cierre	16 V mínimo (19 V típico)
Tiempo de recalentamiento a 20 A	35 segundos
Tiempo de recalentamiento a 15 A	150 segundos
Tiempo de ejecución	14 A

**Nota:** *“Este producto puede calentarse lo suficiente como para provocar quemaduras mucho antes de que se recalienta el chip. Tenga cuidado al manipular este producto y otros componentes directamente conectados a él”*[12].

Una vez visto los parámetros más sobresalientes y que se debe de tomar en cuenta para su funcionamiento en la Figura 10:"Dual VNH2SP30 Motor Driver Carrier MD03A"[12] se muestra la apariencia física de la tarjeta

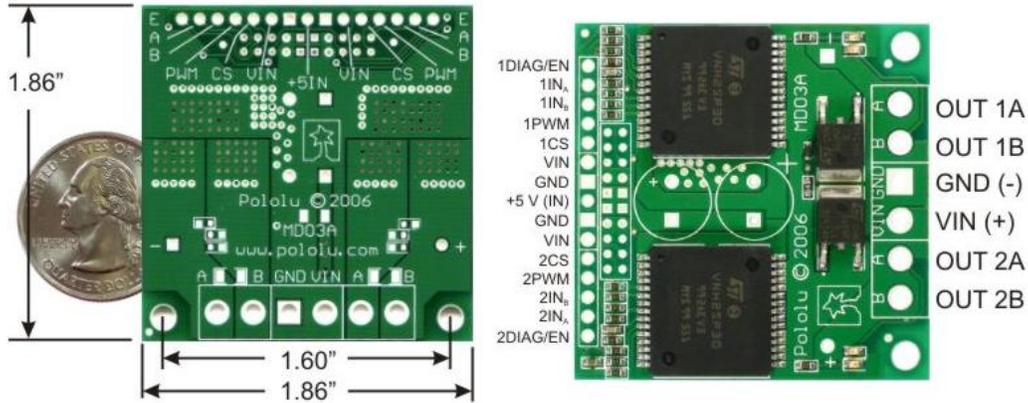


Figura 10:"Dual VNH2SP30 Motor Driver Carrier MD03A"[12]

✓ **Convertidor Voltaje-PWM**

El modulo de potencia además de la tarjeta de amplificación de corriente, consta de una tarjeta electrónica que convierte el voltaje a PWM(Pulse-width modulation).

La tarjeta electrónica encargada de realizar esta tarea, está basado en el microprocesador **PIC12F675**, el cual se puede ver las especificaciones completas en anexos. El mismo consta de un modulo convertidor analógico digital de 8 pines, 6 de ellos son entradas/salidas, dispone de un oscilador interno **4MHz** calibrado por fabrica a **±1%**, es importante resaltar que la alimentación para esta tarjeta se la suministrara de la misma tarjeta PCI para ahorrar cableado y fuentes de alimentación, resaltar que dispone de un botón de reinicio[14, p. 3].

A continuación en Tabla 2:"Parámetros Convertidor Voltaje-PWM"[14, p. 3], se muestra los parámetros más sobresalientes que se debe tomar en consideración para la operación o funcionamiento.

Tabla 2:"Parámetros Convertidor Voltaje-PWM"[14, p. 3]

PARÁMETROS	
Microcontroladores	PIC12F675
Tensión de funcionamiento	2 - 5.5V
I/O Pines	6
Corriente Operación	8.5 - 100µA
SRAM	64bytes
EEPROM	128bytes
Velocidad de Reloj	4MHz interno

De igual forma en la Figura 11:"Convertidor Voltaje-PWM" se puede apreciar, la apariencia física de la tarjeta a ser utilizada, la cual es de  $4.7\text{cm}^2$ , de dimensión que da ventajas de espacio y manipulación.

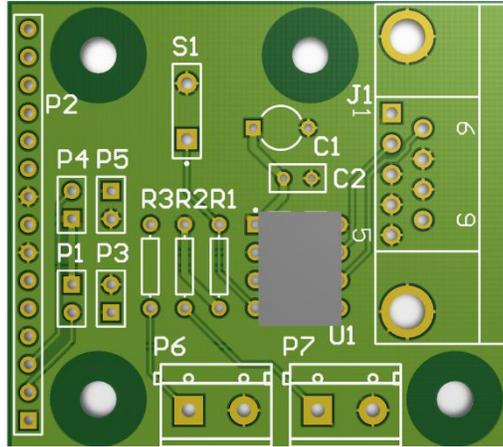


Figura 11:"Convertidor Voltaje-PWM"

El PWM, es una técnica utilizada para obtener una salida analógica con una salida digital, es decir simular una salida analógica a partir de una salida digital. El control digital es utilizado para crear una onda cuadrada, esta es una señal que conmuta entre 0V (apagado) y 5V (encendido), se varia la proporción de tiempo entre encendido y apagado. La duración del tiempo de encendido, se le llamara ancho de pulso, el mismo que será modulado, de ahí que PWM es modulación por ancho de pulso, con eso se logra variar el valor analógico[16].

En la Figura 12:"Esquema Convertidor Voltaje-PWM, se muestra el esquema del circuito, el mismo cumplirá con la tarea de convertir voltaje a PWM, las principales partes de este circuito es, el conector DB9, el cual se unirá al cable PCL-10168-1E, el mismo tiene el conector para la tarjeta PCI, el PIC12F675, que es el cerebro de la tarjeta, y adicionalmente el acople donde se conecta el driver de corriente.

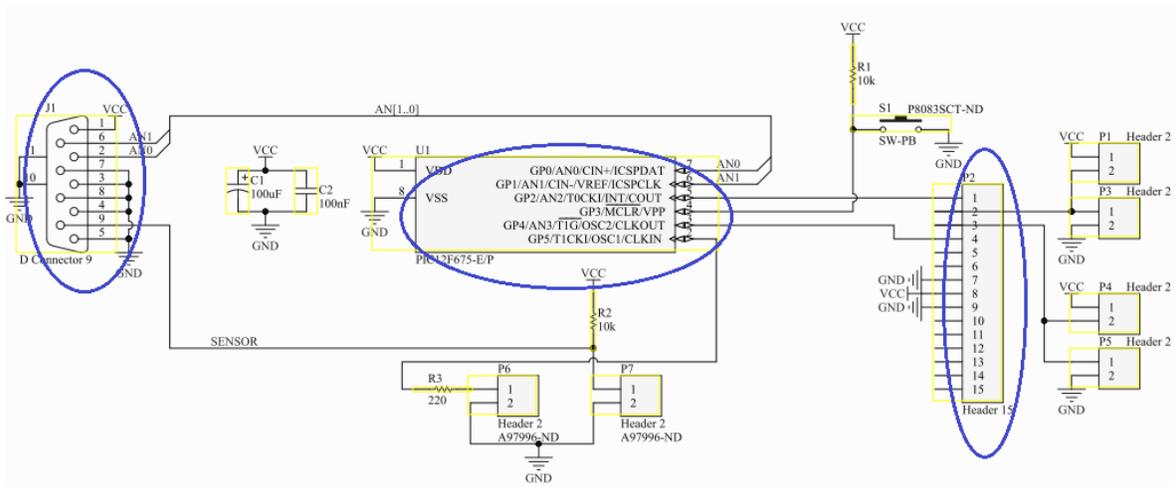


Figura 12: "Esquema Convertidor Voltaje-PWM"

Como podemos observar el circuito consta de condensadores de desacoplo, o conocidos como condensadores de BAYPASS, estos cumplen la tarea de almacenar carga, cuando existen caídas de tensión en el micro.

Al utilizar el conector DB9, como una interfaz entre la tarjeta PCI y la planta como tal, existen pines de dicho conector que no se utilizan, estos se encuentran conectados a tierra para evitar inconvenientes, por consiguiente este conector tendrá conectado el pin 2 y 6 que son las salidas de la tarjeta PCI el canal 0 y 1 respectivamente, se han dejado dos pines para esta función, siendo el uno de reserva, por estos canales es por donde la tarjeta PCI entrega el voltaje al "Convertidor Voltaje-PWM" y este a su vez al "Driver MD03A", llegando finalmente al electroimán, este voltaje le indica el cuerpo en levitación ubicarse a una posición "X" de voltaje.

De igual forma el pin 9 es el canal 3 de la tarjeta PCI, mediante este canal se sabe la posición del cuerpo en levitación, es prácticamente la realimentación del sistema, claramente se nota la configuración del sensor y se puede ver que se está utilizando el pin 9 antes mencionado.

La tarjeta también dispone de un pulsante de propósito general, y lo que se menciona el acople para poder conectar el Driver, y reducir el cableado de esta manera.

## 1.4. MEDICIÓN DE POSICIONAMIENTO

Para saber en qué posición se encuentra el objeto ferromagnético que esta levitando, se necesita medir de laguna forma esa posición, para esta función se utiliza un sensor, dispositivo que transforma las magnitudes físicas o químicas en una variable eléctrica, la misma que sirve de información, para el controlado[17].

Entre la gran variedad de sensores que existe, el sensor más adecuado que se utilizara, es un sensor de tipo infrarrojo, los cuales están diseñados especialmente para la detección clasificación y posicionado de objetos, en este caso dicho sensor realizara la función de la detección del objeto[18].

### ✓ Sensor Infrarrojo

Entonces, un sensor infrarrojo, es un dispositivo electrónico con la capacidad de detectar y de medir, la radiación electromagnética infrarroja, de los cuerpos, dichos cuerpos deben de estar ubicados en el rango visible de operación de este sensor[19].

Un sensor infrarrojo se divide en dos únicos grupos, que son, sensores activos y sensores pasivos.

- **Sensor Activo.-** Este tipo de sensor consta de dos partes, un emisor, y un receptor, recalcando que las dos partes están conjuntamente en un solo integrado, el emisor normalmente es un diodo LED infrarrojo y por su parte el receptor es un fototransistor[19].
- **Sensor Activo.-** Esta conformado solamente por el fototransistor, con el objetivo de detectar y de medir las radiaciones provenientes de los objetos[19].

### ✓ Sensor Infrarrojo de Barrera

El S.I que más conviene utilizar para la aplicación del Levitador Magnético es el S.I de Barrera, el cual consta originalmente de dos partes, la primera que será un EMISOR, el mismo que emita el haz de luz infrarroja y la segunda será el RECEPTOR obviamente es el que recibe dicho haz de luz, entre estas dos partes se crea una área de trabajo, sin olvidar que dichas partes deben de estar próximas, con un rango de distancia de

hasta 5m, el objeto es detectado cuando, el mismo interrumpe el haz de luz entre el EMISOR y el RECPETOR[20].

Para que el funcionamiento del S.I de Barrera se pueda entender de mejor manera en la Figura 13:"Sensor No Interrumpido" se muestra, en primera instancia, que el objeto o el material, no es detectado por el sensor, ya que el mismo no está interrumpiendo el haz de luz, o no se está atravesando en el área de trabajo.

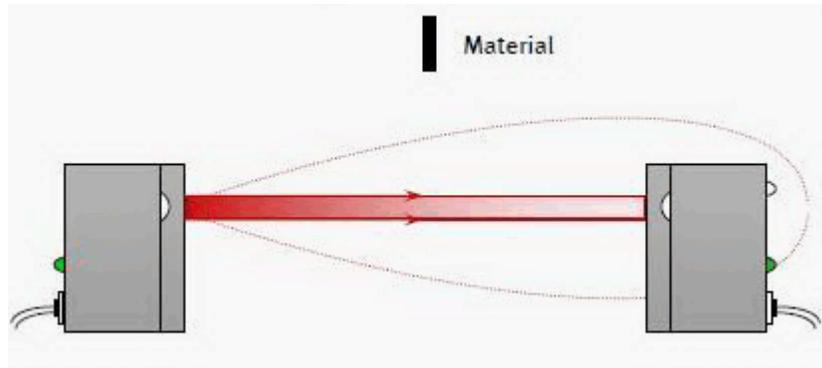


Figura 13:"Sensor No Interrumpido"[20]

En una segunda instancia, se observa en la Figura 14:"Sensor Interrumpido", que el material esta interrumpiendo el haz de luz que envía el EMISOR, por lo tanto el sensor dará una señal, indicando la detección o el posicionamiento del objeto.

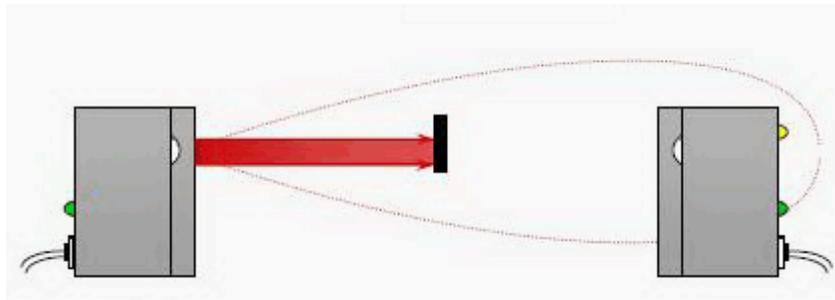


Figura 14:"Sensor Interrumpido"[20]

Es recomendable, para el buen funcionamiento del sensor, tanto la parte del EMISOR como la parte del RECPETOR, deben de estar bien alineados, para que el haz de luz cubra completamente la parte receptora.

Una vez que se ha visto de mejor manera el funcionamiento, en la Figura 15:"Fotodiodo" se muestra la apariencia física del sensor, la cual es análoga a un diodo LED.



Figura 15:"Fotodiodo"[19]

Los parámetros básicos de funcionamiento que hay que tomar en cuenta son los que se muestran en la Tabla 3:"Parámetros Sensor Infrarrojo"

Tabla 3:"Parámetros Sensor Infrarrojo"[18]

PARÁMETROS	
Tensión mínima de alimentación	4.5V
Tensión máxima de alimentación	5.5V
Corriente máxima de alimentación	5mA

## CAPITULO 2

### ANÁLISIS MATEMÁTICO DE LA PLANTA

En el siguiente capítulo se hará un análisis completo sobre la matemática que tendremos que utilizar para la planta, con lo que se obtendrá un modelo matemático que describe la dinámica del sistema, por otro lado esto será importante a la hora de diseñar el controlador ya que mediante los cálculos realizados se podrá definir cuál debe ser el mejor controlador para el Levitador Magnético en nuestro caso.

#### 2.1 GENERALIDADES

Para poder seguir adelante con el análisis del modelo matemático del sistema se debe conocer obligadamente conceptos básicos y principales de cómo es que se comporta un controlador sus objetivos y sus resultados, las partes sobresalientes en un sistema de control, tener en cuenta cuales serán las variables de entrada de salida, para poder hacer una relación de nuestras señales que se obtendrá en la plana. A continuación se cita algunos criterios sobre teoría de control

##### 2.1.1. SISTEMA DE CONTROL

La ingeniería de control diseña las leyes matemáticas que gobiernan los sistemas físicos conforme a una serie de especificaciones. En la Figura 16:"Sistema de Control", se muestra cómo funciona generalmente un sistema de control que señales deberían ingresar al bloque de control y que señales deberíamos esperar en relación a las plantas y lo que se espera de tales[21].

La ingeniería de control se basa en los fundamentos de la teoría de la realimentación y el análisis de sistemas lineales, conjuntamente abarca los conceptos de redes y comunicación. Por tanto la ingeniería de control no está limitada a ninguna disciplina de la ingeniería, sino que es igualmente aplicable a la ingeniería aeronáutica, química, mecánica, del medio ambiente, civil y eléctrica [21].



Figura 16: "Sistema de Control"[21]

### 2.1.2. SISTEMA:

Un sistema es una combinación de componentes que actúan conjuntamente para desempeñar una función específica que no fuese posible con ninguna de las partes individualmente que lo conforman[22]. El concepto de sistema se puede aplicar a fenómenos abstractos y dinámicos, por tanto, la palabra sistema debe interpretarse en un sentido amplio que comprenda sistemas físicos, biológicos, económicos y similares. Siempre se tendrá que tener en cuenta que un sistema de control consta generalmente de tres partes, la entrada, sistema de control y una salida esto hablando en lazo abierto [23].

### 2.1.3. PLANTA:

Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de los elementos de una maquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular [23]. Se llamara planta a cualquier objeto físico que se va a controlar, si queremos así mencionar la planta será el hardware de todo un sistema de control.

### 2.1.4. VARIABLE CONTROLADA (SEÑAL DE SALIDA):

La variable controlada o de salida es la cantidad o condición que se puede medir y controlar [23]. Es la cantidad que debe ser mantenida en un valor pre establecido, al final es la que hará actuar a la planta según condiciones de funcionamiento.

### 2.1.5. VARIABLE DE ENTRADA (SEÑAL DE ENTRADA O REFERENCIA):

La variable de entrada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la señal de salida, en algunos casos esta señal no viene sola si no que se le agregan la señal de retroalimentación [23].

### 2.1.6. CONTROLADOR:

Es la ley matemática que rige el comportamiento del sistema. Controlar significa medir el valor de la variable de salida del sistema y aplicar la variable de entrada al sistema para corregir o limitar la desviación del valor medido respecto al valor deseado [22].

### 2.1.7. PERTURBACIONES:

Señales o magnitudes físicas desconocidas que tienden a afectar adversamente la salida del sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema es una entrada. Si la señal de perturbación es de tipo externa, esta señal no es accesible al diseñador aunque esté presente en el sistema [23].

En la siguiente Figura 17: "Sistema de control Simple", se puede ver un diagrama de bloques, donde se puede apreciar como la señal de perturbación se agrega a la de entrada y es la que causa interferencia, esto se notara en la señal de salida.

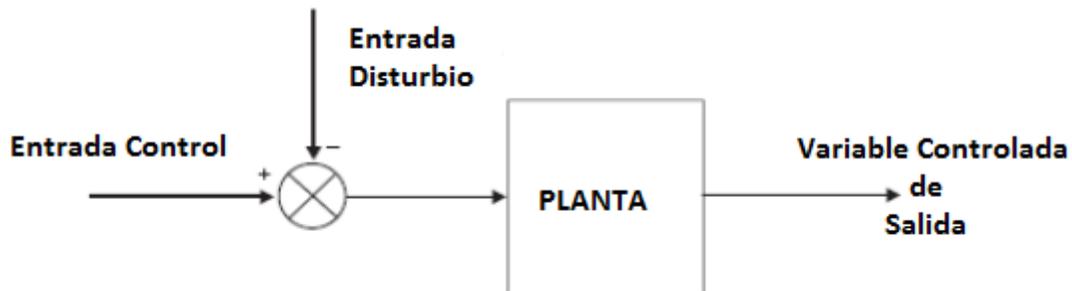


Figura 17: "Sistema de control Simple"[21]

### 2.1.8. SISTEMA EN LAZO ABIERTO:

Los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. Esto quiere decir que en los sistemas de control de lazo abierto no es necesario medir la salida, tampoco se tienen que compararla con la entrada mediante la retroalimentación, la acción del controlador es simplemente arrojar la salida.

Se emplea normalmente cuando las perturbaciones sobre el sistema son pequeñas y se tiene un buen modelo de planta. También se utiliza este tipo de sistemas si la señal de salida del sistema es imposible o muy difícil de medir[21].

En la Figura 18:"Sistema de Control Lazo Abierto", se observa los principales bloques que representa un control en lazo abierto, se toma en cuenta que la señal de perturbación es considerada como pequeña que quiere decir que no afecta al sistema.

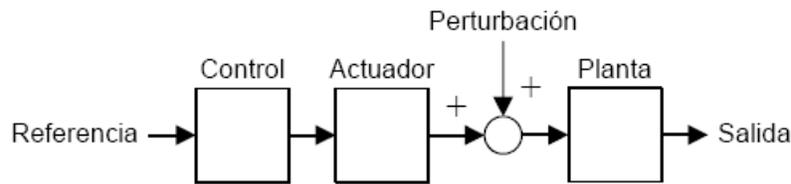


Figura 18:"Sistema de Control Lazo Abierto"[23]

#### 2.1.9. SISTEMAS DE CONTROL REALIMENTADOS O LAZO CERRADO:

Por el contrario en un sistema de control en lazo cerrado, la retroalimentación cumple un papel importante ya que se realimenta al controlador, entonces la diferencia entre la señal de entrada y la señal de retroalimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), se conoce como señal de error de actuación, esta tiene un objetivo de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente.

El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema. En la Figura 19:"Sistema de control Lazo Cerrado", se observa, en el diagrama de bloques que es lo que aumenta en un sistema de lazo cerrado, la realimentación del sistema normalmente es un sensor, que me indique de una u otra forma como se encuentra la señal de salida [21].

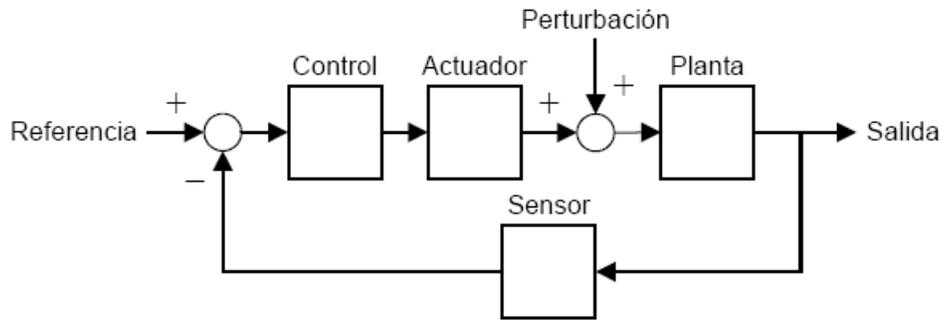


Figura 19: "Sistema de control Lazo Cerrado"[23]

Después que se ha conocido el principio de funcionamiento básico de un sistema de control en lazo abierto y lazo cerrado se establece diferencias, las cuales ayudara a decidir cuándo se quiera diseñar un controlador.

Por un lado el sistema de lazo cerrado presentara ventajas cuando la presencia de la señal de perturbación sea imprescindible, lógicamente de esta manera será insensible a las variaciones, pudiendo de esta forma contar con un controlador preciso para la planta, sin embargo cuando se utilice un control en lazo abierto se debe tener en cuenta claramente cuáles serán las entradas siempre y cuando no exista perturbaciones.

Desde el punto de vista de la estabilidad, el sistema de control en lazo abierto no presenta mayor complicación ya que la estabilidad no es un problema de interés, pero en el sistema de control de lazo cerrado la estabilidad es una función principal, lo cual puede conducir a corregir en exceso errores que producen oscilaciones de amplitud constante o cambiante [21].

A continuación en la Tabla 4: "Comparación entre Controladores", se muestra las principales diferencias entre un sistema de control de lazo abierto y lazo cerrado.

Tabla 4: "Comparación entre Controladores"[23]

CONTROL EN LAZO CERRADO	CONTROL EN LAZO ABIERTO
Rechaza perturbaciones	No rechaza perturbaciones
Puede hacerse inestable	No tiene problemas de estabilidad
Se puede controlar un sistema inestable	No se puede controlar un sistema inestable
Es adecuado cuando no se conoce la planta	Requiere conocer bien la planta
Requiere mayor número de componentes	Requiere menor número de componentes

Suele ser caro

Suele ser más económico

El controlador en lazo cerrado es el más recomendable cuando existen perturbaciones, para la planta del LM se diseñara este tipo de controlador, se debe tomar en cuenta ciertos efectos de un control de lazo cerrado en especial con la retroalimentación.

### 2.1.10. LA RETROALIMENTACIÓN Y SUS EFECTOS

El efecto de retroalimentación se analizara mas con aspectos relacionados con el funcionamiento del sistema de control con tal.

En la Figura 20:"Sistema Realimentado", se puede apreciar un diagrama de bloques, donde el bloque H me indica que es una ganancia de retroalimentación, dicho bloque envía una señal **b** que se adjunta a la señal de entrada **r** pasando por un bloque **G** y llegando al final a obtener una señal de salida **y**. Por último la señal de error será el resultado de la suma entre **r** y **b**.

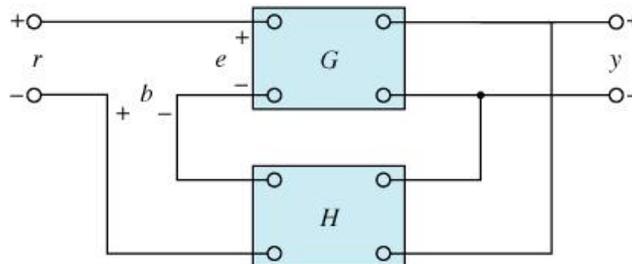


Figura 20:"Sistema Realimentado"[21]

La relación de entrada/salida del sistema se ve expresado por Ecuación 3:"Relación Entrada/Salida"

$$M = \frac{y}{r} = \frac{G}{1+GH} \quad (3)$$

Ecuación 3:"Relación Entrada/Salida"[21]

### 2.1.11. EFECTOS

- **Ganancia total del sistema**

Se observa que según la Ecuación 3:"Relación Entrada/Salida", la realimentación afecta directamente a la ganancia  $G$ , esto por un factor de  $1+GH$ .

En la Figura 20:"Sistema Realimentado", se observa que se tiene una señal de realimentación a la cual se le otorga un signo negativo, entonces se dice tener una realimentación negativa, sin embargo hay que considerar que, si el valor de  $GH$  como tal es negativo, o sea que tenga incluido el signo menos, el efecto general que tendría la realimentación es de aumentar o disminuir la ganancia  $G$ .

La realimentación puede incrementar la ganancia de un sistema en un intervalo de frecuencias pero reducirla en otro intervalo[21].

- **Estabilidad**

Primeramente hay que saber que un sistema de control es inestable siempre y cuando su salida este fuera de control, o sea que de resultados erróneos a lo que normalmente no se necesita.

Si existe una realimentación con un valor de  $GH=-1$ , entonces podemos notar claramente en la Ecuación 3:"Relación Entrada/Salida", que la respuesta de ese sistema para cualquier entrada seria infinito, el sistema por lo tanto será inestable.

Esto quiere decir que cuando se presente la otra condición de  $GH=1$ , esta no será la única forma de que el sistema sea estable.

Uno de las formas de lograr estabilidad, es colocando otro lazo cerrado entre salida y entrada a través de una ganancia  $F$ , la nueva relación entrada/salida ya considerando un sistema estable seria como muestra la Ecuación 4:"Relación Entrada/Salida modificada".

$$\frac{y}{r} = \frac{G}{1+GH+GF} \quad (4)$$

Ecuación 4:"Relación Entrada/Salida modificada"[21]

Y otra de las posibles formas más sencillas de estabilizar un sistema inestable, sería de tratar de modificar  $H$  para que esta ganancia fuera diferente de  $-1$ .

Como se observa en la siguiente Figura 21:"Lazo segundo de Realimentación", se muestra un diagrama de bloques, de cómo sería una de las formas para evitar la inestabilidad.

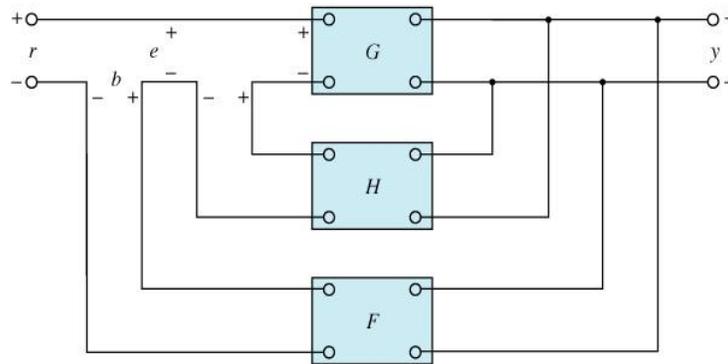


Figura 21:"Lazo segundo de Realimentación"[21]

- **Sensibilidad**

El tema de sensibilidad en los sistemas de control es de mucha consideración, ya que en este existe muchos componentes físicos que con el pasar de los tiempos no tienen las mismas características de funcionamiento de igual forma ciertas propiedades de los elementos son variantes con el ambiente de trabajo. "Por ejemplo la resistencia de un bobinado de un motor eléctrico cambia a medida que la temperatura del motor se eleva durante la operación"[21].

Un buen sistema de control, debe de ser lo suficientemente sensible con los comandos de entrada, quiere decir que debe de tener una buena reacción para respuesta con las señales de entrada, por el contrario debe de ser insensible a la variación de los parámetros, los mismos que están cambiando ya sea por condiciones ambientales o bien por edad de funcionamiento.

La sensibilidad de  $M$  con respecto a la variación de  $G$ , quiere decir que tan sensible se hace  $M$  con respecto a los cambios de los parámetros hechos en  $G$ , se representa por la Ecuación 5:"Sensibilidad de M con respecto a G"

$$S_G^M = \frac{\partial M/M}{\partial G/G} = \frac{\text{porcentaje de cambio en } M}{\text{porcentaje de cambio en } G} \quad (5)$$

#### Ecuación 5:"Sensibilidad de M con respecto a G"[21]

De la se tiene dos posibles respuestas las cuales serán en lazo cerrado y lazo abierto, siempre se tiene en cuenta que en lazo cerrado el denominador se ve afectado por el factor **(1+GH)**

$$S_G^M = \frac{1}{(1+GH)} \quad (6)$$

#### Ecuación 6:"Sensibilidad Lazo Cerrado"[21]

En la Ecuación 6:"Sensibilidad Lazo Cerrado", se observa que si **GH** toma un valor positivo grande entonces la función de la sensibilidad puede reducir considerablemente haciendo que el sistema sea estable, esto en el caso de que sea un sistema de control en lazo cerrado.

Por otro lado en lazo abierto el factor **1+GH=0**, no existe, de esto se dice que, para este tipo de sistema la función de sensibilidad tiene una relación de uno a uno con respecto a la variación de los parámetros de **G**.

Entonces la expresión será la Ecuación 7:"Sensibilidad en Lazo Abierto":

$$S_G^M = \frac{\partial G}{\partial G} = 1 \quad (7)$$

#### Ecuación 7:"Sensibilidad en Lazo Abierto"[21]

- **Disturbios externos o ruidos**

Existen señales externas que no son parte del sistema de control pero aun así están presentes en dichos sistemas, los disturbios o ruidos externos perturban la señal de entrada y puede dar como resultado datos errados de un sistema de control.

Estas señales no son del todo externas ya que en el mismo circuito electrónico se puede dar disturbios debido a los voltajes de ruido térmico, si bien es cierto estas señales están integras a los circuitos electrónicos pero sin embargo se transforman en señales externas no deseadas presentes en la planta por esta razón en los controladores se toma ciertas consideraciones para que estos sistemas sea insensibles a dichas señales [21].

Los efectos que tiene entonces la realimentación respecto a los disturbios o ruidos externos es favorable ya que “en muchas situaciones la realimentación puede reducir el efecto del ruido y las perturbaciones en el desempeño del sistema” [21].

Para el mejor análisis se utiliza la Figura 22: "Sistema realimentado con una señal de Ruido", donde se da un estudio matemático más concreto en base a las relaciones matemáticas de entrada/salida que se conoce.

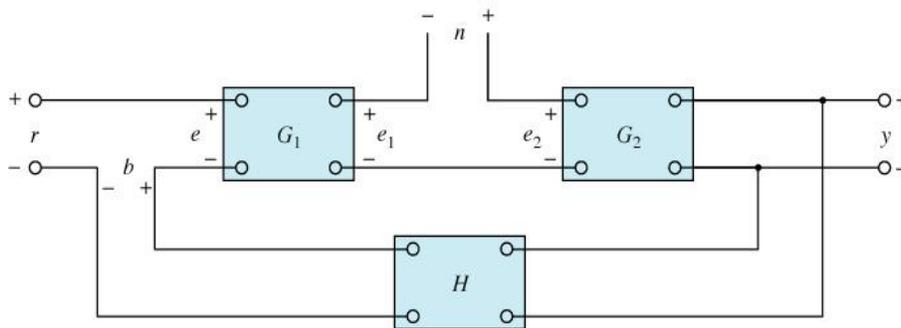


Figura 22: "Sistema realimentado con una señal de Ruido"[21]

En la figura anterior se puede notar que  $r$  es la señal de entrada o de comando y otra señal adicional es  $n$  esta es la señal de ruido, para el análisis matemático primero haremos referencia como si el sistema estuviera en lazo abierto, quiere decir con  $H=0$ , para luego se toma en cuenta la realimentación.

Tomando en cuenta  $H=0$ , o el sistema en lazo abierto tendremos:

$$\diamond e_1 = G_1 e$$

$$\diamond y = G_2 e_2$$

Donde  $q_2$ :

$$e_2 = e_1 + n$$

Reemplazando:

$$e_2 = G_1 e + n$$

Entonces la total sería:

$$y = G_2(e_1 + n)$$

$$y = G_2((G_1 e) + n)$$

Realizando las multiplicaciones presentes:

$$y = G_2 G_1 e + G_2 n \quad (8)$$

#### Ecuación 8 "Salida con Disturbios lazo abierto"[21]

De la Ecuación 8 "Salida con Disturbios lazo abierto" se puede notar que en el segundo término  $G_2 n$ , está involucrada la señal de ruido  $n$ , y con la condición que,  $G_2 n \gg G_2 G_1 e$ , dará como resultado a la salida una señal de ruido.

Ahora se analiza con la realimentación presente en el sistema, hay que considerar las dos entradas, siempre y cuando  $r$  se anule cuando actúe  $n$  y viceversa, el resultado de la salida total será entonces, la suma de las dos salidas cada una con su respectiva entrada.

Actuando  $H$ :

$$\diamond y_1 = \frac{G_1 G_2 r}{1 + G_1 G_2 H_1}$$

$$\diamond y_2 = \frac{G_2 n}{1 + G_2 G_1 H_1}$$

Salida total “ $Y=y_1+y_2$ ”

$$Y = \frac{G_1 G_2 r}{1 + G_1 G_2 H_1} + \frac{G_2 n}{1 + G_1 G_2 H_1} \quad (9)$$

Ecuación 9: "Salida con Disturbios lazo cerrado"[21]

Claramente se puede observar que, en lazo cerrado la salida, se ve afectado por el factor **(1+G1 G2 H1)**, de igual forma se ve involucrado el ruido en el segundo término.

### 2.1.12. CONTROL FIJO O ESTÁNDAR

Los parámetros de la ley de control no varían en el tiempo. Se llaman sistemas de control robusto a aquel que funciona correctamente ante errores en la modelización de la planta. Es interesante cuando las leyes del actuador y de la planta son fijas [21]. En el caso del LM se utilizara un control de este tipo.

## 2.2. MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA

Cuando se estudia sistemas de control de cualquier tipo o para cualquier aplicación, se debe priorizar la obtención de un modelo en el cual se refleje la dinámica de todo el sistema.

Se debe tener en cuenta que un modelo matemático es un conjunto de ecuaciones que nos dan una representación de la dinámica del sistema, en donde se incluyen las principales características del mismo pero se vuelve imprescindible considerar la precisión de los resultados dependiendo del modelo, debido a que al modelar un sistema físico se ignoran de forma consciente o inconsciente ciertas características físicas propias del sistema.

Al tener un sistema determinado, es necesario saber que no se tiene solamente un modelo matemático para este sistema, sino que se puede tener varios modelos dependiendo de las perspectivas del modelador.

A continuación se procede a encontrar un modelo que permite realizar el análisis genérico de un Levitador magnético [2].

### 2.2.1 FUERZA ELECTROMAGNÉTICA

La fuerza magnética es la fuerza que se genera debido a un campo magnético sobre un dipolo magnético. En el caso del Levitador Magnético la fuerza electromagnética es producida debido al paso de corriente eléctrica sobre un conductor en forma de bobina [2].

La co-energía almacenada debido al campo magnético, se expresa en la Ecuación 10:"Energía almacenada debido al campo magnético"[2]

$$W_m = \frac{1}{2} \int_V \vec{B} \cdot \vec{H} dv \quad (10)$$

Ecuación 10:"Energía almacenada debido al campo magnético"[2]

En donde:

$\vec{H}$ = Valor del campo magnético.

$\vec{B}$ = Valor de inducción magnética.

Si se aplica las leyes de Ampere y de Faraday se puede calcular los valores de campo magnético y de la inducción magnética. Es así que se puede reescribir la ecuación 10 pero esta vez en función de la inductancia **L** y de la corriente que circula por el conductor.

$$W_m = \frac{1}{2} \vec{L} \cdot i^2 \quad (11)$$

Ecuación 11:"Energía almacenada en función de la inductancia L"[2]

Si se desea ahora encontrar el valor de la fuerza electromagnética podemos aplicar el gradiente de la energía magnética, el cual se aprecia en la Ecuación 12:"Gradiente de energía magnética"[2]

$$\vec{f}_{el-mag} = \nabla \vec{W}_m = \left( \frac{\partial W_{mx}}{\partial x}, \frac{\partial W_{my}}{\partial y}, \frac{\partial W_{mz}}{\partial z} \right) \quad (12)$$

#### Ecuación 12:"Gradiente de energía magnética"[2]

En este caso al realizar el modelo de un Levitador magnético con solo un grado de libertad, se debe considerar simplemente la fuerza electromagnética generada en una sola dirección, de tal manera se la representa en la Ecuación 13"Fuera electromagnética en la dirección X"[2]. El eje que se considera es el eje X pero de forma descendente, es decir, en un plano real se considera el eje X positivo al eje Y negativo.

$$\vec{f}_{el-mag} = \frac{i^2}{2} \frac{\partial L(x)}{\partial x} \quad (13)$$

#### Ecuación 13"Fuera electromagnética en la dirección X"[2]

### 2.2.2 INDUCTANCIA

A la inductancia se la puede definir como la oposición de un elemento conductor, en este caso una bobina a cambios en la corriente que circula a través de ella. Si se tiene una bobina, a la inductancia también se la puede definir como la relación entre el flujo magnético y la corriente que fluyen a través de esta bobina. Esta relación se la aprecia en la Ecuación 14:"Inductancia"[2].

$$L(x) = L_I + \frac{L_0 X_0}{x} \quad (14)$$

#### Ecuación 14:"Inductancia"[2]

En donde:

$L_I$ = Es la inductancia que presenta el electroimán al vacío.

$L_0$ = Es la inductancia que presenta el electroimán con el objeto levitando en la posición  $X_0$ . Entonces, luego de esto si se trabaja con las ecuaciones 12 y 13 se puede llegar a la Ecuación 15:"Fuera electromagnética en la dirección X en relación de la inductancia"[2]

$$\vec{f}_{el-mag} = \frac{L_0 X_0}{2} \frac{i^2}{x^2} = k \frac{i^2}{x^2} \quad (15)$$

Ecuación 15: "Fuerza electromagnética en la dirección X en relación de la inductancia"[2]

### 2.2.3 ESTUDIO MECANICO

Si en el análisis mecánico se aplica la segunda ley de Newton que dice: "La aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él e inversamente proporcional a su masa" se puede establecer una relación entre la fuerza y la masa como se expresa en la Ecuación 16: "Segunda ley de Newton"[2].

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (16)$$

Ecuación 16: "Segunda ley de Newton"[2]

Como es el caso de un LM en el cual se analiza la variación del objeto a levitar solamente en uno de los ejes que representaría la altura, sin considerar los desplazamientos horizontales se obtiene la Ecuación 17: "Modelo mecánico del LM"[2].

$$m \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = m \cdot g - f_{el-mag} \quad (17)$$

Ecuación 17: "Modelo mecánico del LM"[2]

Dónde:

h=Representa la altura del objeto.

En este caso el valor de  $m \cdot g$  se lo considera positivo debido a la referencia que se tiene para el electroimán.

### 2.2.4 ESTUDIO ELECTRICO

Realizando un estudio eléctrico del sistema, se puede observar que se comporta como un circuito R-L, es decir se encuentra formado por una resistencia y una bobina en serie. La función de la bobina es oponerse de forma transitoria al establecimiento de una corriente en el circuito R-L mostrado en la Figura 23: "Circuito R-L".

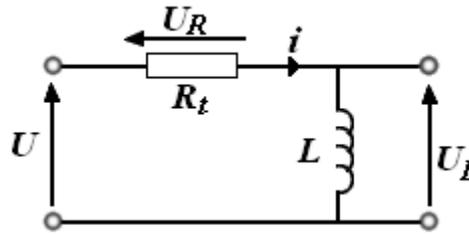


Figura 23:"Circuito R-L"[24]

Aplicando la ley de Kirchoff se obtiene la Ecuación 18:"Ley de Kirchoff"[2].

$$V = R \cdot i + L(x) \frac{\partial i}{\partial t} \quad (18)$$

Ecuación 18:"Ley de Kirchoff"[2]

Por razones de modelamiento se pueden realizar aproximaciones que servirán para simplificar la resolución del mismo, es decir se puede aproximar  $X$  a  $X_0$  y asumir que  $L_i \gg L_0$ , esto se aprecia en las ecuaciones 19 y 20.

$$L(x) \approx L_I \quad (19)$$

Ecuación 19:"Inductancia asumiendo que  $L_i \gg L_0$ "[2]

$$V = R \cdot i + L_I \frac{\partial i}{\partial t} \quad (20)$$

Ecuación 20:"Modelo eléctrico del LM"[2]

## 2.2.5 ESTUDIO DINAMICO

Para poder analizar el modelando dinámico del sistema de un Levitador magnético, es necesario tener una idea grafica, la cual se representa en la Figura 24:"Modelo Dinámico de L.M"[2, p. 6]

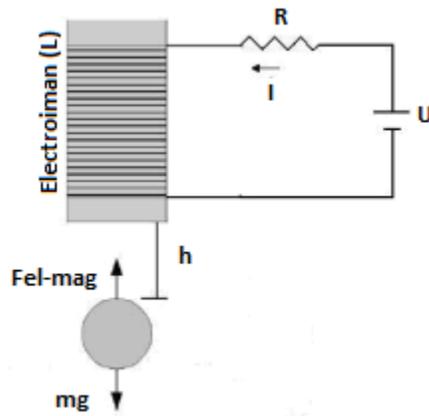


Figura 24: "Modelo Dinámico de L.M" [2, p. 6]

Se puede describir o expresar la dinámica de un Levitador Magnético a través de dos ecuaciones diferenciales, la primera se obtiene luego de trabajar la Ecuación 17: "Modelo mecánico del LM" [2] en la Ecuación 15: "Fuerza electromagnética en la dirección X en relación de la inductancia" [2] y se obtiene:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = g - \frac{1}{m} \frac{L_0 h_0}{2} \left(\frac{i}{h}\right)^2 \quad (21)$$

#### Ecuación 21: "Modelo dinámico del LM" [2]

La segunda es simplemente el resultado del estudio eléctrico del Levitador que como se vio anteriormente es la Ecuación 20: "Modelo eléctrico del LM" [2].

$$V = R \cdot i + L_I \frac{\partial i}{\partial t}$$

### 2.2.6 ECUACIONES DE ESTADOS

Para determinar las ecuaciones de estado del sistema, primero se debe imponer las variables de estado sobre las cuales se van a trabajar. Para esto se debe considerar que el sistema al cual se está modelando es un sistema SISO, es decir Single Input Single Output (Una entrada, Una salida), en este caso la variable que

será de entrada será la tensión y la salida obviamente la altura a la que estará oscilando el objeto.

Considerando estos parámetros y pensando en la simplificación de cálculos en el modelamiento se tienen tres variables de estados, representadas en las ecuaciones 21, 22 y 23 respectivamente.

$$x_1 = h \quad (22)$$

Ecuación 22:"Variable de estado 1"

$$x_2 = \frac{dh}{dt} \quad (23)$$

Ecuación 23:"Variable de estado 2"

$$x_3 = i \quad (24)$$

Ecuación 24:"Variable de estado 3"

Entonces considerando estas variables de estado las ecuaciones de estados son las representadas en las ecuaciones 25, 26 y 27.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (25)$$

Ecuación 25:"Ecuación de estado 1"

$$\dot{x}_2 = g - \frac{k}{m} \left( \frac{x_3}{x_1} \right)^2 \quad (26)$$

Ecuación 26:"Ecuación de estado 2"

Para trabajar con estas ecuaciones se procede a reemplazar el valor de  $\frac{L_0 X_0}{2}$  por una constante k.

$$k = \frac{L_0 X_0}{2}$$

Donde

Lo= Es la inductancia adicional generada por el objeto levitando en la posición de equilibrio Xo.

$$\dot{x}_3 = \frac{u}{L} - \frac{R}{L}x_3 \quad (27)$$

Ecuación 27:"Ecuación de estado 3"

Considerando ahora al sensor y al actuador se pueden establecer las ecuaciones 28 y 29 que describirán el comportamiento de los mismos respectivamente.

$$V_s = K_s \cdot h + \bar{V}_s \quad (28)$$

Ecuación 28:"Comportamiento del sensor"[2]

Dónde:

Ks= Es la ganancia del sensor.

$\bar{V}_s$  = Se considera una constante.

$$i = K_v \cdot v + \bar{i} \quad (29)$$

Ecuación 29:"Comportamiento del actuador"[2]

Dónde:

$\bar{i}$  = Corriente necesaria para que la salida del sensor sea  $\bar{V}_s$ .

Si vamos a la relación entre la Ecuación 17:"Modelo mecánico del LM"[2] y la Ecuación 20:"Modelo eléctrico del LM"[2] se llega a la Ecuación 30:"Relación entre modelo mecánico del LM y modelo eléctrico del LM"[2].

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = g - \frac{k}{m} \left( \frac{K_v \cdot v}{h} \right)^2 \quad (30)$$

Ecuación 30:"Relación entre modelo mecánico del LM y modelo eléctrico del LM"[2]

### 2.2.7 LINEALIZACION DEL SISTEMA

Si se linealiza el sistema con las tres ecuaciones de estado: Ecuación 25:"Ecuación de estado 1" Ecuación 26:"Ecuación de estado 2" Ecuación 27:"Ecuación de estado 3" se puede obtener una función de transferencia más aproximada al sistema real. Entonces a continuación se procede a realizar la linealización considerando las 3 variables de estado.

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 \\ \dot{\tilde{x}}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial X_1} & \frac{\partial f_1}{\partial X_2} & \frac{\partial f_1}{\partial X_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial X_1} & \frac{\partial f_2}{\partial X_2} & \frac{\partial f_2}{\partial X_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial X_1} & \frac{\partial f_3}{\partial X_2} & \frac{\partial f_3}{\partial X_3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \end{bmatrix} + \tilde{u} \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} \\ \frac{\partial f_3}{\partial u} \end{bmatrix}$$

De igual manera que en el caso anterior que se linealizó únicamente con 2 ecuaciones de estado, en este caso se aplica el jacobiano para linealizar el sistema ya con las tres ecuaciones de estado y resolviendo las derivadas se tiene:

$$\diamond \frac{\partial f_1}{\partial X_1} = 0$$

$$\diamond \frac{\partial f_1}{\partial X_2} = 1$$

$$\diamond \frac{\partial f_1}{\partial X_3} = 0$$

$$\diamond \frac{\partial f_2}{\partial X_1} = \frac{2k \cdot x_3^2}{m \cdot x_1^3}$$

Para reemplazar los valores se debe de despejar X3 de la Ecuación 27:"Ecuación de estado 3".

- $0 = \frac{u}{L} - \frac{R}{L} x_3$
- $x_3 = \frac{u}{R}$

También de la Ecuación 26: "Ecuación de estado 2" se despeja el valor de  $U_0$ .

- $0 = g - \frac{k}{m} \left( \frac{u}{R} \right)^2$
- $u_0 = \sqrt{\frac{gm}{k} \cdot h_0 \cdot R}$
- $\frac{\partial f_2}{\partial X_1} = \frac{2k \cdot \frac{U_0}{R}}{m \cdot h_0^3}$
- $\frac{\partial f_2}{\partial X_1} = \frac{2k \cdot \left( \sqrt{\frac{gm}{k}} h_0 \cdot R \right)}{m \cdot h_0^3}$
- ❖  $\frac{\partial f_2}{\partial X_1} = \frac{2g}{h_0}$
- ❖  $\frac{\partial f_2}{\partial X_2} = 0$
- ❖  $\frac{\partial f_2}{\partial X_3} = \frac{-2k \cdot x_3}{m \cdot x_1^2}$

En este caso igualmente reemplazamos los valores  $X_3$ .

- ❖  $\frac{\partial f_2}{\partial X_3} = -\frac{2k \sqrt{\frac{gm}{k}}}{m \cdot h_0}$
- ❖  $\frac{\partial f_3}{\partial X_1} = 0$

$$\diamond \frac{\partial f_3}{\partial X_2} = 0$$

$$\diamond \frac{\partial f_3}{\partial X_3} = -\frac{R}{L}$$

$$\diamond \frac{\partial f_1}{\partial u} = 0$$

$$\diamond \frac{\partial f_2}{\partial u} = 0$$

$$\diamond \frac{\partial f_3}{\partial u} = \frac{1}{L}$$

Entonces una vez obtenidos los valores reemplazando se tiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{X}}_1 \\ \dot{\tilde{X}}_2 \\ \dot{\tilde{X}}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2g}{h_0} & 0 & \frac{-2k\sqrt{\frac{gm}{k}}}{m \cdot h_0} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{X}_1 \\ \tilde{X}_2 \\ \tilde{X}_3 \end{bmatrix} + \tilde{u} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}$$

En este caso también se tiene que:

$$\dot{\tilde{x}}_1 = h - h_0 = H$$

$$\dot{\tilde{x}}_3 = i - i_0 = I$$

$$\tilde{u} = u - u_0 = U$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = \frac{2g}{h_0} H - \frac{2}{h_0} \sqrt{\frac{Kg}{m}} \cdot I \quad (31)$$

**Ecuación 31:"Segunda derivada de H respecto a "t"**

Se aplica la transformada de Laplace a la Ecuación 31:"Segunda derivada de H respecto a "t" y se tiene:

$$s^2 H = \frac{2g}{h_0} H - \frac{2}{h_0} \sqrt{\frac{Kg}{m}} \cdot I \quad (32)$$

Ecuación 32:"Laplace de segunda derivada de H respecto a "t""

La segunda ecuación luego de aplicar el jacobiano se tiene:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = -\frac{R}{L} I + \frac{1}{L} U \quad (33)$$

Ecuación 33:"Derivada de I respecto a "t""

Al igual que en el caso anterior se aplica la transformada de Laplace a la Ecuación 33:"Derivada de I respecto a "t"" y se tiene:

$$sI = -\frac{R}{L} I + \frac{1}{L} U \quad (34)$$

Ecuación 34:"Laplace de derivada de I respecto a "t""

Se despeja I de la Ecuación 34:"Laplace de derivada de I respecto a "t"" y se obtiene:

$$I = \frac{U}{L_s + R}$$

Se reemplaza el valor de I en la Ecuación 32:"Laplace de segunda derivada de H respecto a "t"" y se tiene:

$$s^2 H = \frac{2g}{h_0} H - \frac{2}{h_0} \sqrt{\frac{Kg}{m}} \cdot \frac{U}{L_s + R}$$

$$\frac{H}{U} = G(s) = \frac{-2\sqrt{\frac{kg}{m}}}{(L_s + R)(h_0 s^2 - 2g)}$$

$$G(s) = \frac{\frac{2}{Lh_0} \sqrt{\frac{Kg}{m}}}{s^3 + \frac{R}{L}s^2 - \frac{2g}{h_0}s - \frac{2gR}{Lh_0}} \quad (35)$$

Ecuación 35: "Función de transferencia del LM linealizado con las tres ecuaciones de estado"

### 2.3. LUGAR GEOMÉTRICO DE RAÍCES.

Cuando se diseña un controlador, el diseñador debe de ser capaz de predecir el rendimiento de dicho sistema por un análisis en el que no requiere la solución real de las ecuaciones diferenciales. Además, al diseñador, le conviene este análisis ya que podrá indicar fácilmente la forma o el método por el cual este sistema debe ser ajustado o compensado, para poder modificar las características de rendimiento [21, p. 468].

De esta manera la primera interrogante que se hace el diseñador, es que, quiere saber si el sistema dado es o no es estable.

#### 2.3.1 CONCEPTO LUGAR GEOMÉTRICO DE RAÍCES

Entonces un estudio importante en los sistemas de control, es la investigación de las trayectorias en las raíces de la ecuación característica en el plano  $S$  o simplemente se denomina "*lugar geométrico de raíces*" cuando cierto parámetro del sistema varia [21, p. 471].

Entonces la estabilidad relativa y el comportamiento transitorio de un sistema de control de lazo cerrado están directamente relacionados con la localización de las raíces de un lazo cerrado de la ecuación característica en el plano de Laplace " $S$ " [22, p. 355].

El comportamiento de un sistema de control en lazo cerrado, se describe mediante la función de transferencia en lazo cerrado, se observa en la Ecuación 36: "Función de Transferencia Lazo Cerrado"

$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{p(s)}{q(s)} \quad (36)$$

**Ecuación 36:"Función de Transferencia Lazo Cerrado"[22, p. 355]**

Donde  $p(s)$  y  $q(s)$ , son polinomios de  $s$ , y las raíces de  $q(s)$  determinan los modos de respuesta del sistema.

Entonces, para un sistema de control en lazo cerrado donde la ganancia será  $G(s)$ , y la realimentación sea  $H(s)$ , se tiene la siguiente Ecuación 37:"Ecuación Característica"

$$1 + G(s)H(s) = 0 \quad (37)$$

**Ecuación 37:"Ecuación Característica"[21, p. 472]**

Las raíces de la ecuación característica deben de satisfacer dicha ecuación, estas raíces se encuentran en el plano de Laplace, y por lo tanto determinan el lugar geométrico de la ecuación característica.

**2.3.2 LUGAR GEOMÉTRICO DE RAÍCES DEL LEVITADOR MAGNÉTICO**

Para empezar con el análisis del LGR, se parte de la función de transferencia en lazo cerrado del sistema de L.M, entonces se parte de la

Ecuación 35:"Función de transferencia del LM linealizado con las tres ecuaciones de estado", que al ser una ecuación linealizada se puede aplicar el LGR, recordando que la técnica del lugar geométrico se aplica en sistemas lineales.

$$G(s) = \frac{\frac{2}{Lh_0} \sqrt{\frac{Kg}{m}}}{s^3 + \frac{R}{L}s^2 - \frac{2g}{h_0}s - \frac{2gR}{Lh_0}}$$

Partiendo de esta ecuación, podemos obtener el LGR, mediante la ayuda del software Mat-Lab, como se dijo anteriormente el denominador será la ecuación característica, y para poder modelar el sistema, se utiliza los datos de la planta, tales como:

- ✓  $g = 9.8$ , que será conocida como la gravedad
- ✓  $k = 0.0003044$ , se conoce como constante de acoplamiento magnético
- ✓  $m = 0.036$ , se conoce como la masa del objeto a levitar
- ✓  $h_0 = 0.015$ , se conoce como la altura de equilibrio, donde el sistema es estable
- ✓  $R = 9$ , se conoce como el valor resistivo
- ✓  $L = 0.0336$ , se conoce como el valor de la inductancia.

A continuación se presenta el código que se utiliza en Mat-Lab, para la técnica LGR.

```
clc;
clear all;
close all;

syms kd kp
k = 0.0003044
g = 9.81
m = 0.036
h0 = 0.015
R = 9
L = 0.0336

num = [-2*sqrt(k*g/m)/(L*h0)];
den = [1 R/L -2*g/h0 -2*g*R/(L*h0)];
Gs = tf(num,den)
Gsc = feedback(Gs,1)
rlocus(Gs)
grid on
```

---

En la siguiente Figura 25:"Lugar Geométrico de Raíces" se presenta la localización, de las raíces, de la ecuación característica en el plano S o simplemente se denomina "**lugar geométrico de raíces**".

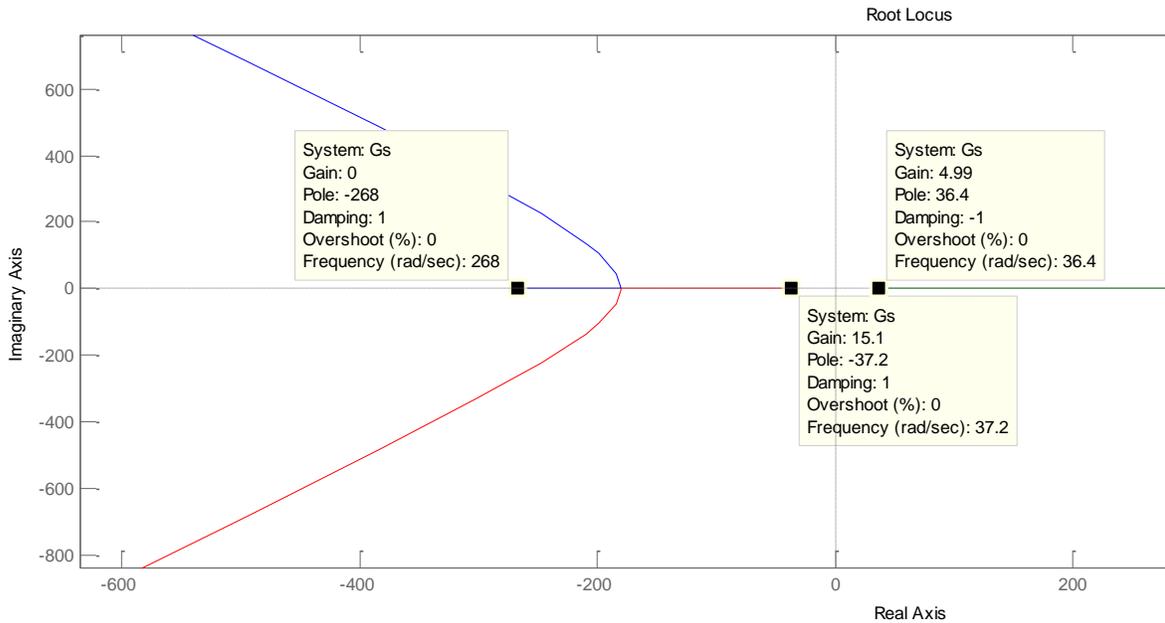


Figura 25: "Lugar Geométrico de Raíces"

De la figura anterior se puede observar que, la primera raíz se encuentra en -268, la otra en -37.2 y la última se encuentra en 36.4, esto permite analizar que, al estar esta última raíz a lado derecho del plano de Laplace se considera un sistema inestable, dado que la solución transitoria de una respuesta al escalón contiene una función exponencial creciente de tipo  $e^{at}$ , donde que si "a", toma valores positivos, es decir mayor que cero, la respuesta se dispara con valores excesivamente elevados.

Dado que el sistema es inestable, se procede con la adición de un cero, ya que el efecto de añadir un cero, es que, empuja el LGR hacia la izquierda, haciendo al sistema estable, por otro lado cuando se añade un cero el tiempo de subida disminuye y el máximo sobresalto del sistema se incrementa.

Sin embargo, al implementar un controlador tipo PD (proporcional, derivativo), es equivalente, que adicionar un simple cero al sistema, y la posición del mismo en el plano S, será como se muestra en la Ecuación 38: "Posición de Cero en LGR"

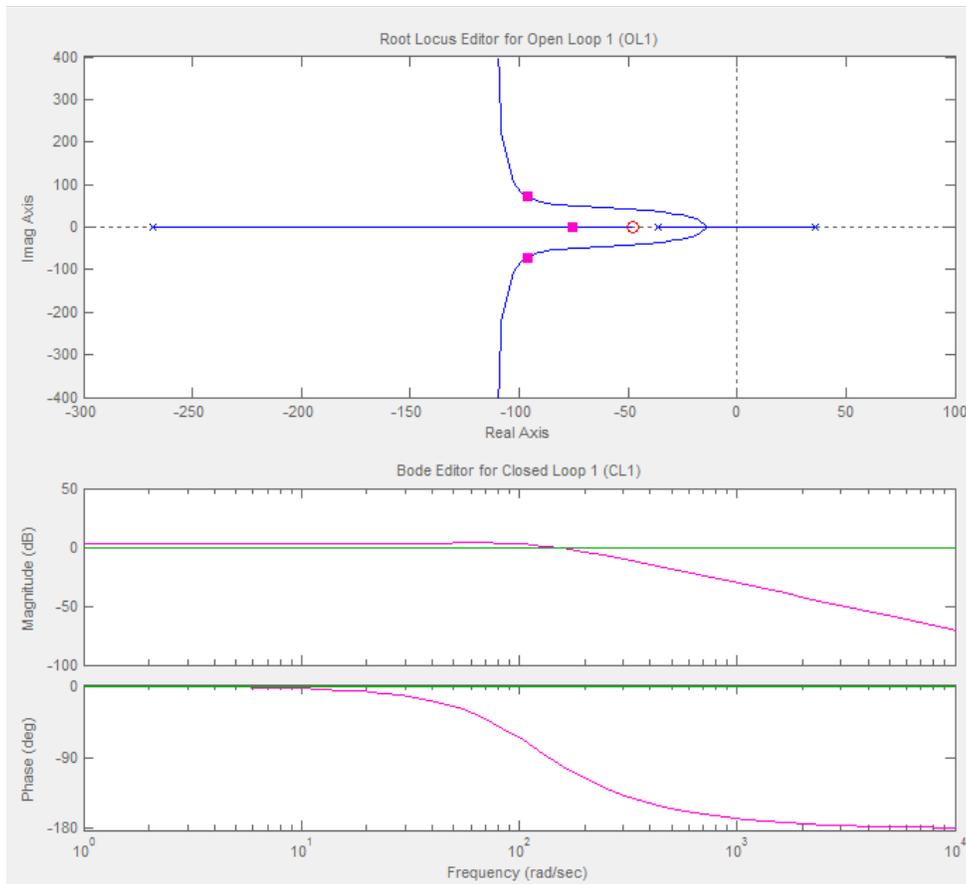
$$Z = -\frac{K_p}{K_d} \quad (38)$$

Ecuación 38: "Posición de Cero en LGR" [21]

Donde,  $K_P$  y  $K_D$  son las constantes de proporcional y derivativa, respectivamente.

Para seguir con el análisis, se procede a encontrar el valor de las constante  $K_p$  y  $K_d$ , para esto se ocupa la herramienta del software matlab, **SISO Tool**, la cual, facilita el diseño de cualquier tipo de controlador lineal, la ventaja es que utiliza como método el LGR, siendo capaz de mostrar en tiempo real las variaciones de la respuesta del sistema generados por cambios provocados por el usuario en el LGR.

En la Figura 26:"SISO TOOL", se muestra la herramienta SISO Tool, que después de manipular la posición del cero, se determina las constantes  $K_p$  y  $K_d$ , basándose en las respuestas graficas del sistema, de esta manera se observa que, la nueva posición del polo se encuentra en la parte izquierda del plano, lo cual indica que, el sistema se volvió estable.



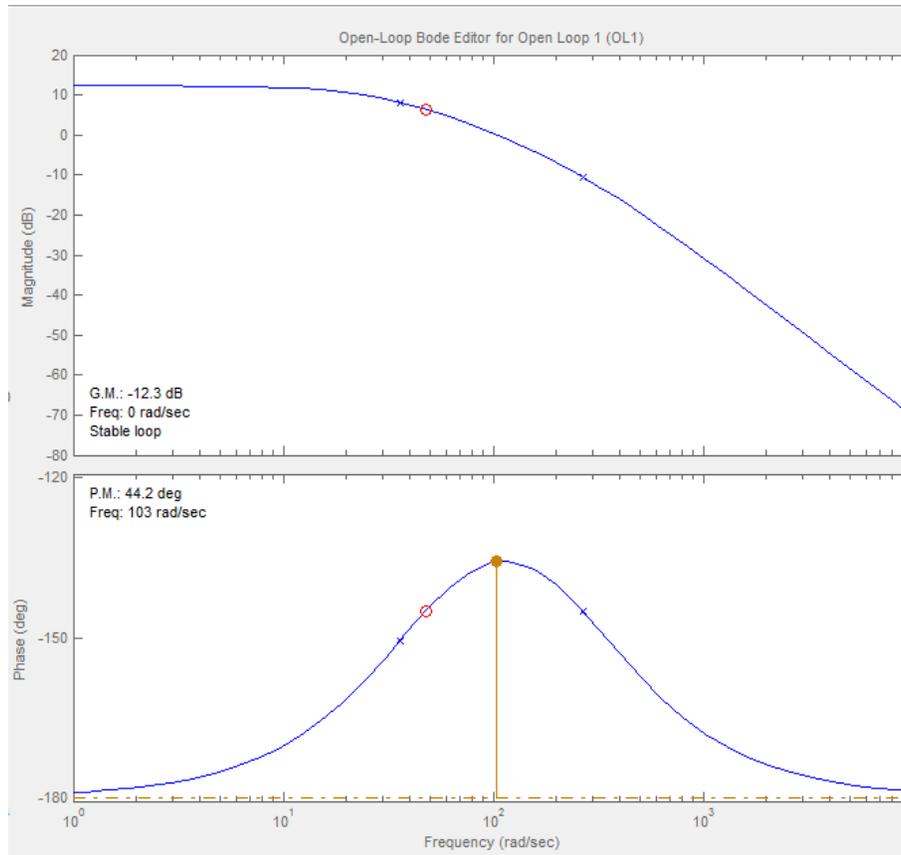


Figura 26:"SISO TOOL"

En la Figura 27:"Constantes Kp y Kd" se muestra los valores de **Kp** y la ubicación del cero, lógicamente en el plano S, mediante lo cual resulta sencillo encontrar el valor de **kd**, mediante la Ecuación 38:"Posición de Cero en LGR", con lo cual estaríamos encontrando las dos constantes y la ubicación del cero.

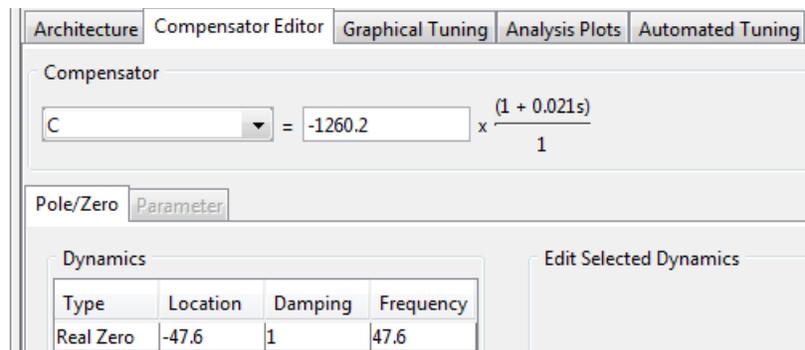


Figura 27:"Constantes Kp y Kd"

Entonces el nuevo LGR, compensado o corregido ya con la acción del cero, generado por el controlador PD, se ve en la Figura 28:"LGR con acción del Cero"

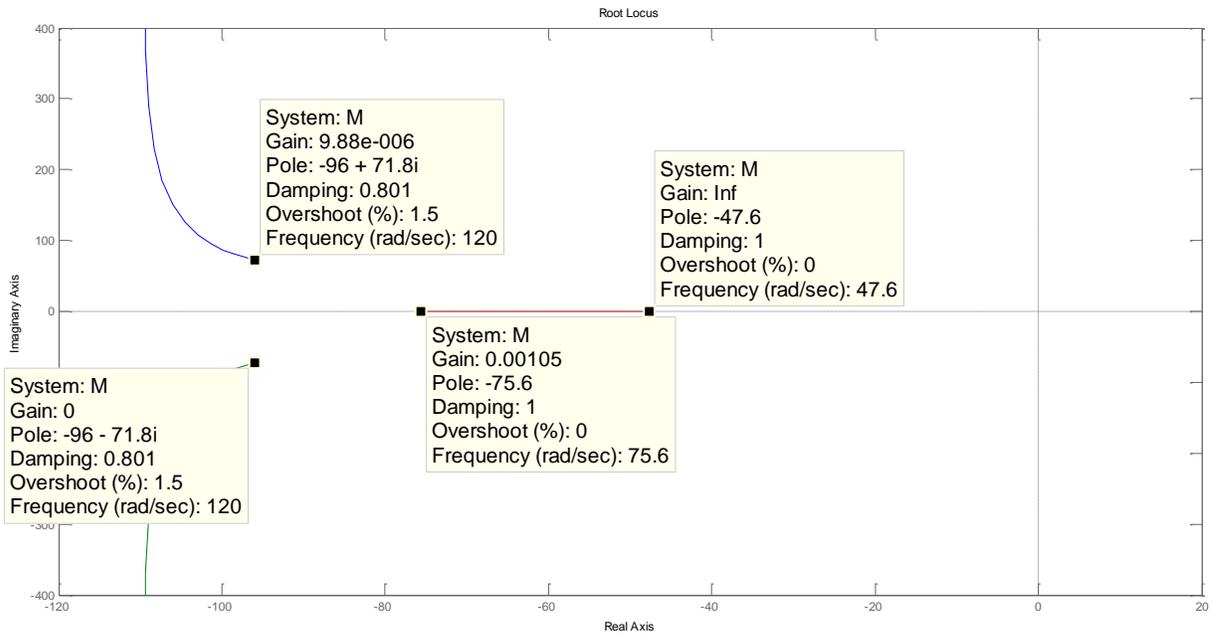


Figura 28:"LGR con acción del Cero"

A continuación se hace un análisis de la respuesta al escalón del sistema, con las especificaciones, más sobresalientes, en un sistema de control, teniendo en cuenta que dicho análisis se realiza en el dominio del tiempo.

Para su respectivo análisis en la Figura 29:"Respuesta al Escalón" se muestra la curva correspondiente a la respuesta al escalón, donde claramente se puede observar el tiempo de subida, el pico máximo de amplitud conjuntamente con el tiempo máximo y el máximo sobresalto, finalmente también se observa el tiempo de establecimiento y el valor final de la respuesta donde se estabiliza.

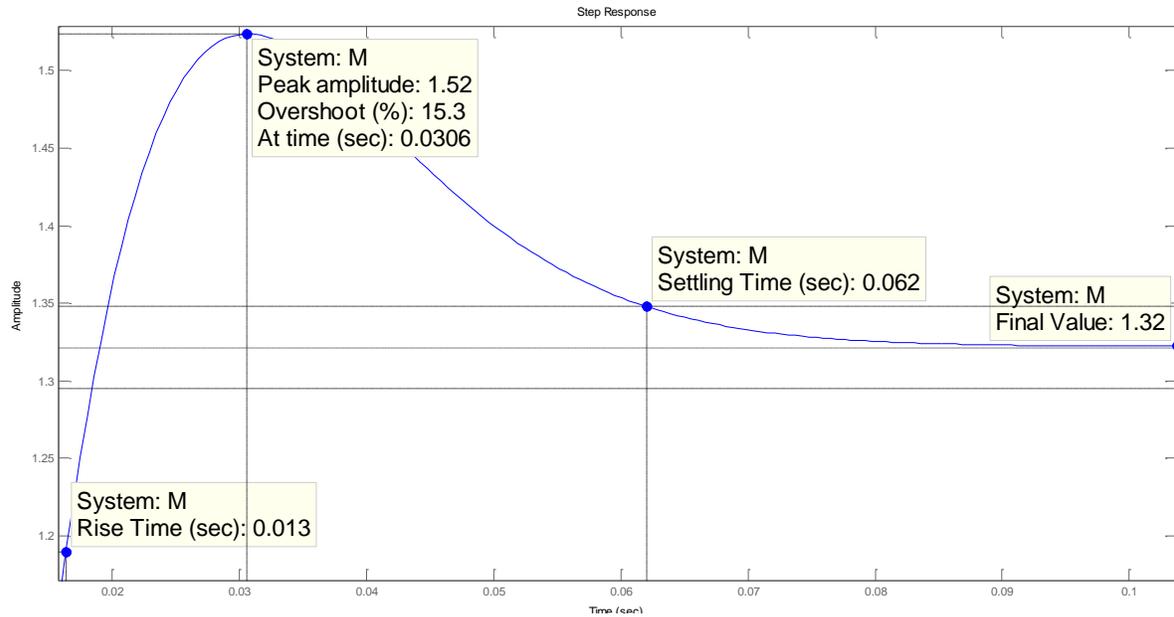


Figura 29: "Respuesta al Escalón"

- ✓ **Máximo Sobresalto.**- Se usa para medir la estabilidad relativa de un sistema de control, es decir representa una medida de que tan estable es un sistema.
- ✓ **Tiempo de Subida.**- Se define del tiempo requerido para que la respuesta al escalón se eleve del 10 al 90% de su valor final
- ✓ **Tiempo de Establecimiento.**- Se define como el tiempo requerido para que la respuesta al escalón disminuya y permanezca dentro de un porcentaje específico de su valor final.

## CAPITULO 3

### CONTROL EN TIEMPO REAL DEL SISTEMA

#### 3.1. RTAI LINUX.

El controlador del L.M se realiza bajo una plataforma de Linux, por lo que es necesario conocer ciertos parámetros, información y características de este sistema.

Se tiene en cuenta que el cerebro del Sistema de Levitación, se encuentra, en el Sistema Operativo Linux, ya que en el mismo es donde se desarrolla el controlador, la base del L.M, como se puede observar en la Figura 1.- “Diagrama de Bloques de un Sistema de Levitación”, como se dice, Linux, está siendo parte del controlador del sistema, conjuntamente con la placa de adquisición de datos y el drive, pero la tarea específica que cumple éste, es que, en él se desarrolla la, programación, simulación y control.

Linux es sistema operativo de multitareas, sin embargo, no garantiza la respuesta en el tiempo de los procesos, a pesar de esto existe diversidad de áreas donde las aplicaciones requieren respuesta en tiempo real, como en la robótica, salud fines, militares y generalmente donde se utilice un control que sea desafiante como el control de un Sistema de Levitación [25, p. 3].

En lo que se refiere a tiempo real, existen algunos sistemas operativos que trabajan bajo estas condiciones, como, QNX, AMX, RTKernel, los mismos generalmente conviene ser usados en sistemas integrados, por lo pequeños que son. Por otro lado debido a la necesidad, investigadores han visto conveniente que si se utiliza un núcleo para tiempo real es necesario disponer de varios drives de dispositivos, protocolos de red, tarjetas, etc, y otras disponibilidades de Linux[25, p. 3].

De acuerdo a las necesidades, RTLinux ha sido la mejor solución usada en forma básica como una solución de Linux en tiempo real. Una breve reseña de funcionamiento es que, RTlinux inserta un pequeño kernel de tiempo real abajo del estándar kernel de Linux y trata al kernel de Linux como un proceso de tiempo real. La desventaja de este enfoque es que las tareas de tiempo real operan en un espacio de kernel y en el caso de un bug del software podría causar daños considerables[25].

Por la desventaja que presenta, una solución basada en RTlinux es Real time Application Interface (RTAI), desarrollado en la politécnica de Milán, en el departamento de ingeniería Aeroespacial. De todas las posibles soluciones de Linux de tiempo real disponibles, RTAI es la más utilizada, actualizada y estable. "Las características más importantes de RTAI incluyen varios métodos de comunicación flexible entre procesos, y un API simétrico permitiendo la creación de tareas en tiempo real en el espacio de usuario, evitando la desventaja de operación en el espacio de kernel"[25].

### 3.1.1. RTAI

RTAI, como se dijo, es una implementación de Linux para tiempo real basada en RTlinux, que, volviendo con la explicación, inserta un pequeño kernel de tiempo real abajo del estándar kernel de Linux y trata al kernel de Linux como una tarea con la menor prioridad, adicional a esto RTAI proporciona una amplia selección de protocolos de comunicación entre procesos y servicios de tiempo real[25].

A pesar que RTAI, garantiza la programación en tiempo real, pero al estar bajo Linux conserva las características y servicios de este. Además RTAI proporciona un modulo denominado LXRT, el cual facilita el desarrollo de aplicaciones en tiempo real en el espacio usuario[25].

A continuación en Figura 30:"Sistema Operativo Linux con RTAI" se muestra un esquema generalizado de cómo es, o como está conformado el sistema operativo Linux con el RTAI.

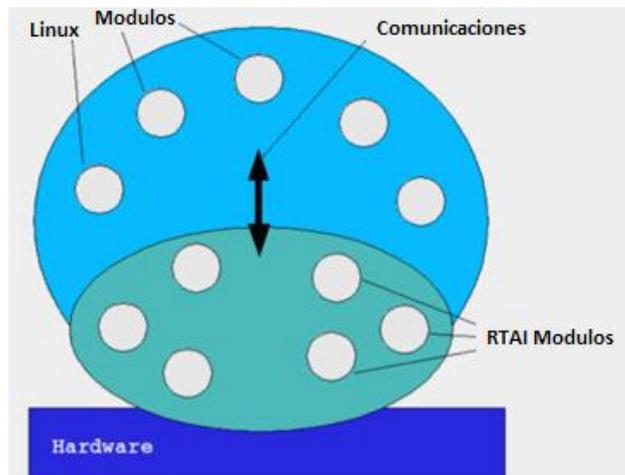


Figura 30:"Sistema Operativo Linux con RTAI"[25, p. 4]

### 3.1.2. FUNDAMENTOS RTAI

RTAI trata el kernel estándar de Linux como una tarea de tiempo real con la menor prioridad, esto hace posible la ejecución cuando no exista ninguna otra tarea con más prioridad a ser ejecutada. Las operaciones básicas de las tareas de tiempo real se implementan a través de módulos del kernel de la misma manera que en RTLinux. RTAI maneja o controla las interrupciones de periféricos las cuales son atendidas por el kernel de Linux después de las posibles acciones de tiempo real, que hayan sido consecuencia de la interrupción, de esta manera el sistema de Linux no se altera en su operación desde el punto de vista del usuario o el kernel de Linux, salvo que este autorizada a ejecutar única y exclusivamente cuando no hay tareas en tiempo real de ejecución[25, p. 5].

Es muy importante conocer la arquitectura básica de RTAI, la cual será muy similar a RTLinux. Al tener interrupciones, estas se originan básicamente en el procesador y en los periféricos.

- ✓ Las interrupciones originadas en el procesador, que principalmente son señales de error como una división por cero, son manejadas por el kernel estándar,
- ✓ pero las interrupciones de los periféricos (como los relojes) son manejadas por RTAI Interrupt Dispatcher.

RTAI se encarga de enviar dichas interrupciones a los manejadores del kernel estándar de linux siempre y cuando no exista tareas de tiempo real activas, en cuanto a las instrucciones de activar o desactivar las interrupciones del kernel estándar son reemplazadas por macros que se conectan directamente con las instrucciones de RTAI[25, p. 5].

Entonces, cuando las interrupciones están desactivadas en el kernel estándar, lo que hace RTAI es encolar todas interrupciones, para que puedan ser repartidas después de que el kernel estándar haya activado las interrupciones nuevamente[25].

En la Figura 31:"Bloques Control RTAI" se puede observar un diagrama de bloques del sistema de comunicación entre procesos (IPC), el mismo que está establecido de forma separada por Linux y por RTAI, adicional a esto también existe un planificador (Schedule) distinto para Linux y para RTAI[25, p. 6].

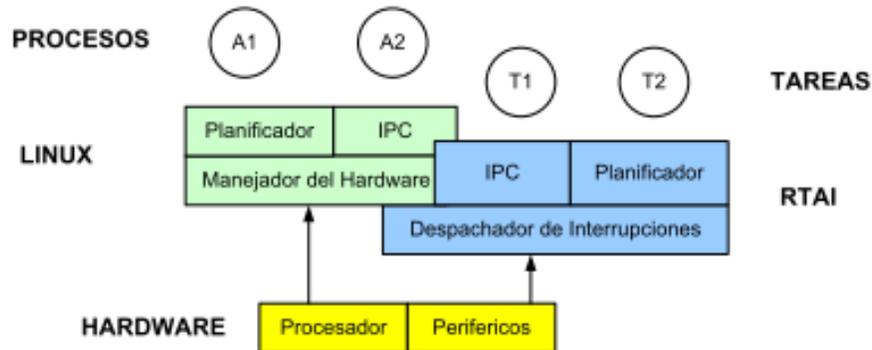


Figura 31: "Bloques Control RTAI"[25]

### 3.1.3. HAL - HARDWARE ABSTRACTION LAYER.

RTAI, trabaja con RTHAL (Real Time Hardware Abstraction Layer), este fue introducido por los mismos desarrolladores y se utiliza para interceptar las diferentes interrupciones del hardware y poder operarlas después[25, p. 6].

La función de RTHAL, es disminuir los cambios, necesarios sobre el código del kernel, mejora el rendimiento y mantenimiento de RTAI y del código del kernel de Linux, y de esta manera es más fácil cambiar y modificar operaciones sin tener que interferir directamente con la implementación de Linux, RTHAL, se filtra directamente en la tabla de manejadores de interrupción, la cual es una lista de funciones y lo que hace es modificar las líneas de código del kernel de Linux añadiendo nuevas líneas de código por ejemplo puede modificar 20 líneas y añadir 50 líneas nuevas de código[25, p. 6].

### 3.1.4. PLANIFICACIÓN.

La parte de planificación es la que organiza las tareas, cuando existen tareas de tiempo real, es cuando entra a operar esta parte o sea el planificador, el cual da mayor prioridad a estas tareas, sobre la tarea del kernel de Linux[25, p. 7].

Entonces el planificador otorga servicios como:

- suspend,
- resume,
- yield,
- make

- periodic,
- wait
- until,

que son usadas en varios sistemas operativos de tiempo real.

Existe tres tipos de planificadores Uniprocador, Multiprocador Simétrico y Multi-Uniprocador.

✓ **Uniprocador**

Este tipo de planificador realiza un algoritmo de programación para seleccionar la tarea que se va a ejecutar en un CPU, con este tipo cualquier proceso tiene una prioridad alta de tomar la CPU[25, p. 7].

✓ **Multiprocador Simétrico**

Exclusivo para maquinas SMP y proporciona un interfaz para las aplicaciones de forma que es posible seleccionar el procesador y procesadores que deben ejecutar una tarea, en el caso que no se escoge el procesador este se selecciona en función de carga del trabajo[25, p. 7].

✓ **Multi-Uniprocador**

Este tipo es usado con ambos, pero con la diferencia que a este se le debe especificar el procesador que deben usar[25, p. 7].

### 3.1.5. CARACTERÍSTICAS

Los desarrolladores de RTAI, con el objetivo de hacer el desarrollo de aplicaciones de una manera más fácil y flexible, han introducido mecanismos para la comunicación entre procesos (IPC), entre tareas de tiempo real y procesos en el espacio de usuarios[25, pp. 7-8].

### **3.1.6. COMUNICACIÓN ENTRE PROCESOS (IPC - INTER-PROCESS COMMUNICATION).**

Para la comunicación entre procesos, RTAI proporciona una variedad de mecanismos, sin embargo los sistemas Unix también proporcionan mecanismos pero estos son similares a IPC, RTAI debe tener una implementación propia, para que las tareas de tiempo real puedan usar este mecanismo y no usen el estándar del kernel de Linux. Los diferentes mecanismos de IPC están incluidos como módulos de kernel, lo que facilita la carga cuando son necesarios[25, p. 9].

### **3.1.7. GESTIÓN DE MEMORIA**

En lo que se refiere a la gestión de memoria, para las primeras versiones de RTAI, la memoria debe ser asignada estáticamente y asignar memoria en tiempo real no era posible. Pero para las versiones actuales RTAI, incluye un módulo gestor de memoria que permite la asignación dinámica de memoria por parte de las tareas de tiempo real, este proceso se hace usando una interfaz basado en una librería estándar de C. Además RTAI pre asigna trozos de memoria antes de la ejecución de tiempo real[25, p. 9].

### **3.1.8. LXRT: USER-SPACE INTERFACE TO RTAI.**

LXRT hace posible el desarrollo de aplicaciones en tiempo real en el espacio de usuario sin la necesidad de crear módulos para el kernel, esto lo hace gracias a una API para RTAI, esto es muy útil ya que el espacio de memoria destinado al kernel no está protegido de accesos inválidos, lo que puede provocar la corrupción de datos y el mal funcionamiento del kernel de Linux, por otro lado en el caso que el kernel sea actualizado, esto afecta a los módulos ya que estos necesitan ser recompilados lo que puede provocar que sean incompatibles con la nueva versión[25, p. 10].

### **3.1.9. APLICACIONES**

Debido a que puede trabajar en tiempo real las aplicaciones en la actualidad son múltiples, en especial en el área del control, sistemas donde se requiere una respuesta rápida y eficiente. Este sistema de tiempo real fue diseñado ante la necesidad de contar con un sistema flexible y de gran capacidad para realizar control de sistemas, en tiempo real[25].

El RTAI, se utiliza en todo campo donde exista un control de señales, o para el monitoreo de las mismas, ahora muy utilizado en lo que se refiere al campo de la medicina en bioingeniería, para mediciones y otros. Otro campo potencial y desafiante es sistemas militares donde se requiere cierta precisión y gran capacidad de cómputo para tomar una decisión en tiempo real ante la toma de datos del exterior. En este momento otra área que esta que utiliza con gran amplitud el RTAI son los wireless sensor network.[25]

### 3.2. CONTROL

El control es la parte fundamental del proyecto, dicho control se implementa en un sistema operativo Linux, el cual tiene la particularidad que se puede trabajar o manipular procesos en tiempo real.

En el capítulo anterior se hizo el análisis del LGR, conjuntamente con los criterios de estabilidad del controlador PD, que se va aplicar a la planta del Levitador, sin embargo todo este análisis se realizó en el dominio del tiempo continuo, por lo que, hay que recalcar que el controlador que se implementara al final será un controlador digital, es decir un controlador en tiempo discreto.

Para esto iniciamos con la función de transferencia tanto del controlador como de la planta, los mismos que es necesario discretizar, es decir, pasar la función de transferencia en el dominio de Laplace a tiempo discreto, esta operación se la puede realizar con la ayuda del software Mat-Lab.

#### ➤ C2D

Para discretizar una función de transferencia en función de Laplace se utiliza el comando **c2d**, el cual, como se dice, convierte la función de transferencia en función de Laplace o en el tiempo continuo de un sistema LTI, a un modelo de tiempo discreto.

Para utilizar dicho comando es necesario parámetros como: la función de transferencia en función de Laplace (en tiempo continuo), el tiempo de muestreo y el método que se utilizara para realizar dicha conversión. A continuación se muestra un ejemplo del comando, de como se debe escribirlo.[26]

## **SYSD = C2D(SYSC,Ts,METHOD)**

Donde:

- ✓ **SYSD.**- Es únicamente una variable de salida, que me indica que la función de transferencia se encuentra en tiempo discreto.
- ✓ **C2D.**- Es directamente el comando que se utiliza para la conversión.
- ✓ **SYSC.**- Es la variable dentro de la cual se encuentra la función de transferencia en función de Laplace.
- ✓ **TS.**- Es el tiempo de muestreo del sistema en tiempo discreto
- ✓ **METHOD.**- Es el método que se utiliza para realizar la conversión, en este caso se utilizara el método de TUSTIN.

### ➤ **TUSTIN**

El método de TUSTIN es conocido como la aproximación bilineal, es un método que mapea todo el semiplano izquierdo del plano S en el círculo unitario en el plano Z. La transformación bilineal mapea del plano S al plano Z mediante la Ecuación 39:"Relación Transformación Bilineal" :

$$S = \frac{z}{T_s} = \frac{z-1}{z+1} \quad (39)$$

Ecuación 39:"Relación Transformación Bilineal"[26]

A continuación se presenta el código que se utiliza en Mat-Lab, para la conversión de la función de transferencia de tiempo continuo en discreto.

```
Gsz = c2d(Gs,Ts,'tustin') %pasa a discreto con metodo de tustin
Cpdz = c2d(Cpd,Ts,'tustin')
bode(Cpd,Cpdz)%diagrama de bode de continuo y discreto
legend('Cpd','Cpdz')
```

-----

Donde el **Cpdz**, es el controlador PD en tiempo discreto, el **Cpd**, el controlador en función de Laplace, **Ts** el tiempo de muestro y finalmente **tustin** el método utilizado que se explico anteriormente.

Como resultado se obtiene la función de transferencia tanto del controlador como de la planta en tiempo discreto.

- ✓ Función de transferencia en tiempo discreto Controlador

$$\begin{aligned} & \textbf{Transfer function:} \\ & \frac{-5.419e004 z + 5.167e004}{z + 1} \end{aligned}$$

**Sampling time: 0.001**

- ✓ Función de transferencia en tiempo discreto Planta

$$\begin{aligned} & \textbf{Transfer function:} \\ & \frac{-1.26e-007 z^3 - 3.781e-007 z^2 - 3.781e-007 z - 1.26e-007}{z^3 - 2.765 z^2 + 2.529 z - 0.7638} \end{aligned}$$

**Sampling time: 0.001**

### ➤ Diagrama de Bode Controlador

Una vez obtenidas las funciones de transferencia, se obtuvo una gráfica de los diagramas de bode del controlador, tanto en tiempo continuo como en discreto, el propósito de obtener el diagrama de bode es, ver la imitación de cómo se comporta el controlador continuo con el comportamiento del controlador discreto, esta similitud de compartimentos se debe de tomar en cuenta cuando las dos curvas estén antes y cerca a al eje de la frecuencia natural, ya que antes de dicha frecuencia el sistema debe de cumplir con los requerimientos de estabilidad.

Quiere decir que las dos curvas deben de estar sobrepuestas o su comportamiento debe de ser casi idéntico, dicho comportamiento se debe mantener hasta valores muy próximos al eje de la frecuencia natural ya que a dicha frecuencia el sistema pierde estabilidad, para valores que sobrepasen el límite de la frecuencia natural el

controlador discreto ya no actuará de ninguna manera en el sistema, sin embargo el controlador continuo tolera estos valores.

En la siguiente Figura 32 "Diagrama de Bode Controladores 100Hz", se muestra una captura del diagrama de bode de los dos controladores, estas curvas están simuladas a un tiempo A de 0.01 segundos, lo que quiere decir a una frecuencia de 100Hz.

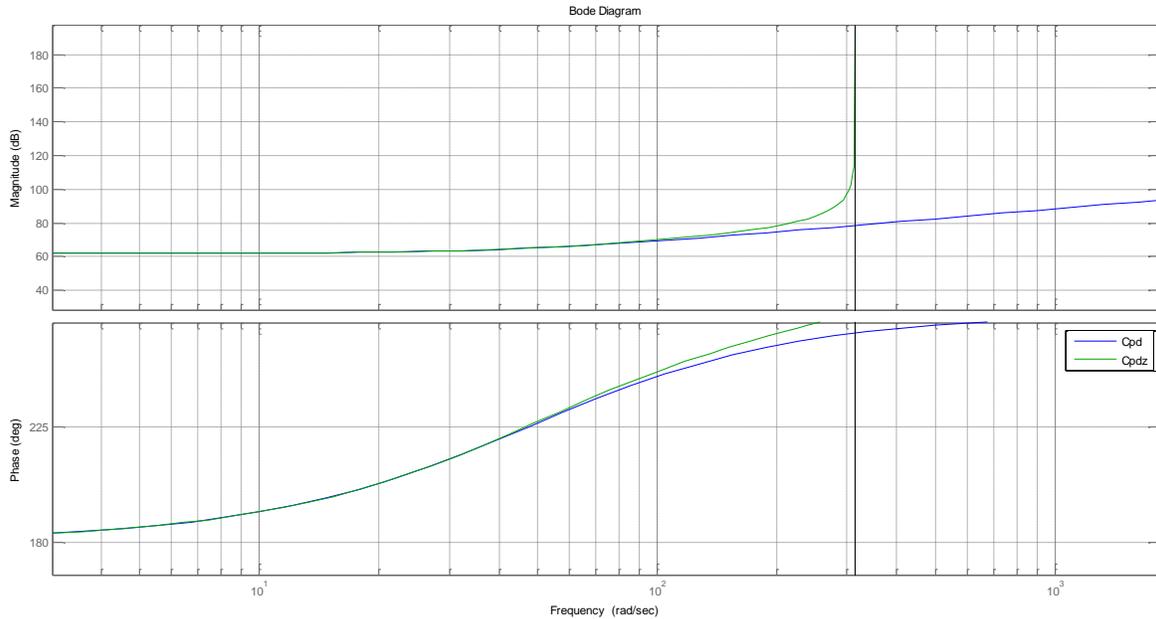


Figura 32 "Diagrama de Bode Controladores 100Hz"

Como se puede observar en dicha figura, la curva verde que es la del controlador discreto, que imita bien a la curva azul que es la del controlador continuo, se puede ver que antes de la frecuencia natural las dos curvas tienen un comportamiento igual, ya que llegando al eje de la frecuencia natural, las dos curvas pierden similitud puesto que, a dicha frecuencia el sistema pierde estabilidad, sin embargo antes de la misma cumple con los requerimientos de estabilidad, notándose la similitud de las dos curvas.

Una grafica mejorada de esta, seria que las dos curvas deben de ser los más similares posibles cuando estén muy próximas al eje de la frecuencia natural.

Dicho esto por otro lado en la Figura 33 "Diagrama de Bode Controladores 1KHz", se muestra una captura del diagrama de bode igualmente de los dos

controladores, con un segundo tiempo B de 0.001 segundos, lo que quiere decir que se trabaja con una frecuencia de 1KHz.

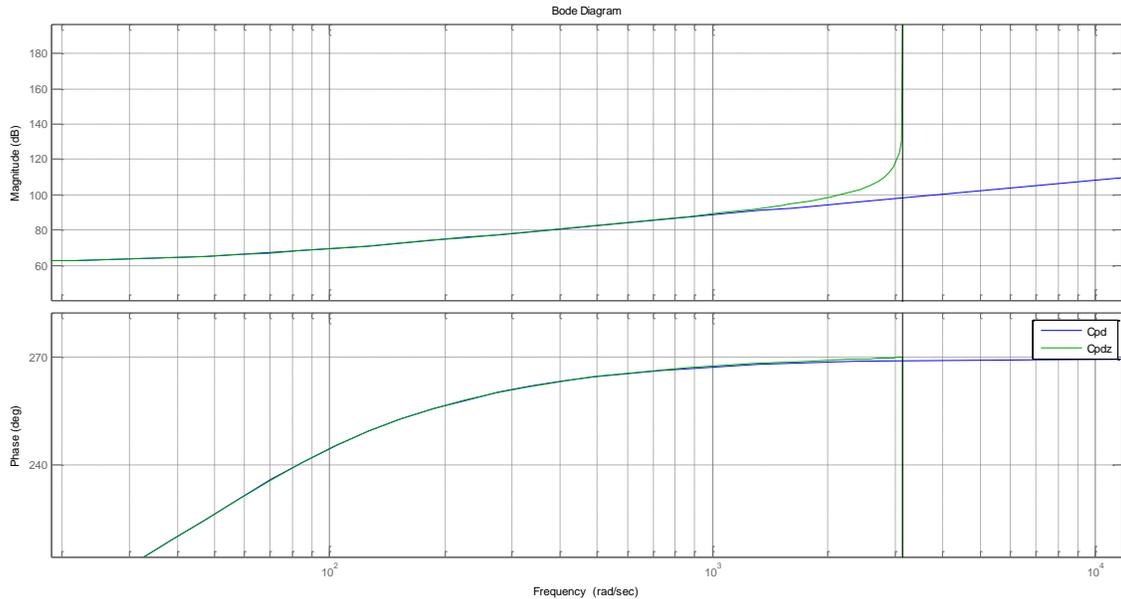


Figura 33 "Diagrama de Bode Controladores 1KHz"

Como se puede observar la similitud del comportamiento de los dos controladores, es mejor que la grafica anterior, ya que antes del eje de la frecuencia natural, cumple requerimientos de estabilidad por lo que las dos curvas son bastantes similares, este comportamiento se cumple hasta valores muy cercanos al eje de la frecuencia natural en donde de igual forma las dos curvas también tienen un rango de similitud.

De las dos graficas se puede concluir que, al bajar el tiempo de muestro del sistema, el controlador se vuelve de mejores características, ya que el sistema se está actualizando en menor tiempo, esto se puede probar gráficamente en la similitud de las curvas, sin embargo este tiempo de muestro no puede ser tan bajo ya que existe una limitante que es el procesador del computador, el cual no puede trabajar a grandes frecuencias, dado que el tiempo es inversamente proporcional a la frecuencia

El efecto del controlador PD es que se asemeja a un filtro paso-alto y al tener dichas características, este aumenta el ancho de banda del sistema y reduce el tiempo de subida de la respuesta al escalón[27]

### ➤ Diagrama de Bode del Sistema

Una vez que se termina el análisis del diagrama de bode de los controladores se procede con el análisis del diagrama de bode de todo el sistema tanto en tiempo continuo como en tiempo discreto.

Como se dijo que, el controlador se vuelve de mejores características cuando disminuye el tiempo de muestro se utiliza entonces un tiempo de muestro de 1msegundo para las simulaciones, lo que nos mostrara una aproximación buena del comportamiento dinámico del sistema en la vida real.

En la Figura 34 "Diagrama de Bode del Sistema, 138rad/seg", se muestra el diagrama de bode marcando una frecuencia que me de cómo resultado una ganancia aproximada a cero, ya que el efecto de un controlado PD es que, cuando existe un desfase de **-90deg**, la magnitud tiene una ganancia de cero, por lo tanto en la figura se aprecia una magnitud con ganancia **0.28dB**, la cual se aproxima a **0dB**, de igual forma existe un desfase de **-90.1deg**, aproximado a **-90deg**, con una frecuencia de **138rad/seg**.

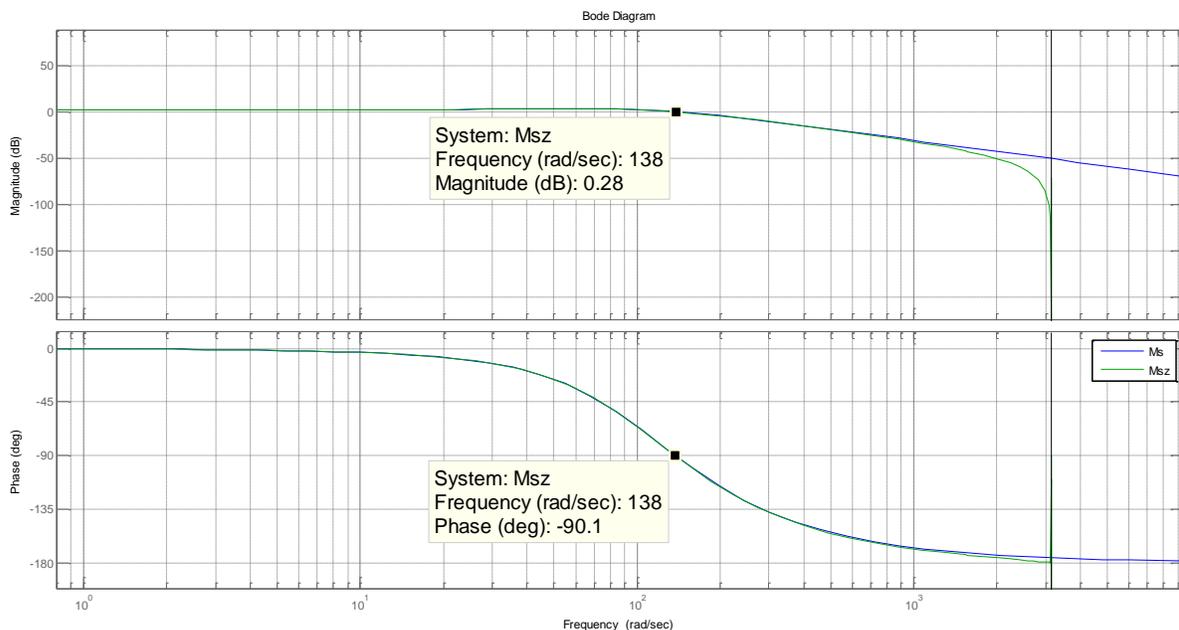


Figura 34 "Diagrama de Bode del Sistema, 138rad/seg"

De esta figura se puede observar claramente que la frecuencia con la que se obtiene los parámetros es de **138rad/seg**, si utilizamos esta frecuencia para las simulaciones en el dominio del tiempo, tenemos que obtener una respuesta similar en cuanto a magnitud y fase del sistema.

En la Figura 35 "Respuesta del Sistema, 138rad/seg", para fines de comprobación se muestra la respuesta del sistema en el dominio del tiempo, utilizando la misma frecuencia, con el fin de observar gráficamente las mismas respuestas de los parámetros de magnitud y fase, la curva de color amarillo es, de la referencia, mientras que la de rojo es la salida del sistema.

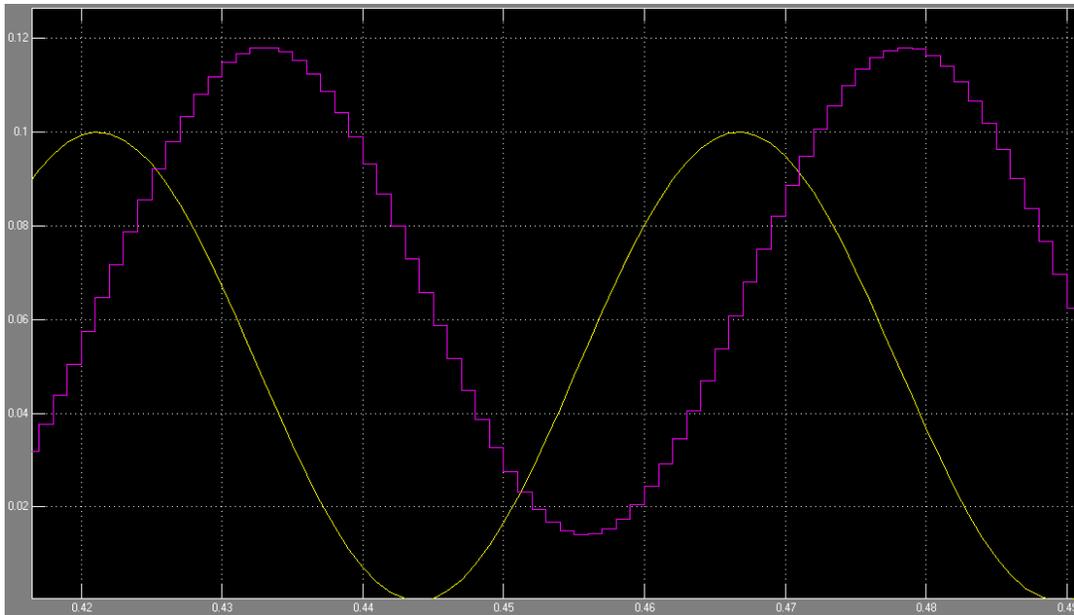


Figura 35 "Respuesta del Sistema, 138rad/seg"

Con esta grafica se comprueba que, a una frecuencia de **138rad/seg**, existe un desfase aproximado de **-90deg**, con una magnitud con ganancia de aproximadamente **0dB**, la grafica de color rojo, que es la respuesta del sistema está con un **offset** de **0.018**, es por eso que esta curva se encuentra desplazada hacia arriba, este desplazamiento, es debido al error que se tiene del sistema.

Para visualizar de mejor forma, se compensa el **offset**, de **0.018**, a la curva de color rojo que es la respuesta del sistema, por lo que en la Figura 36 "Respueta del

Sistema Compensado Offset, 138rad/seg", ya se puede ver de mejor manera que existe una ganancia de **0dB**, en relación a la referencia, sin embargo el desfase será el mismo de **-90deg**, ya que solo se desplazó a la curva hacia abajo.

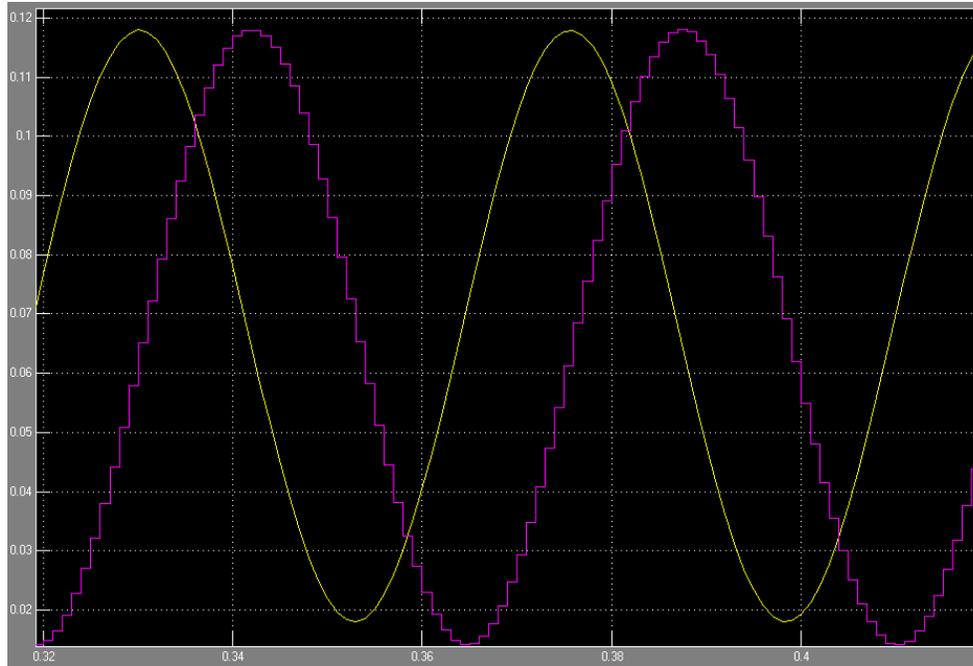


Figura 36"Respueta del Sistema Compensado Offset, 138rad/seg"

En la Figura 37"Diagrama de Bode del Sistema, 2.99KHz" se observa el diagrama de bode con una segunda frecuencia de **2.99KHz**, de la misma manera se observa una magnitud con ganancia de **-87.3dB**, lo cual me indica que para valores menores a **0dB**, existe una atenuación en la salida, en lo que se respecta a la fase existe un desfase, de **-180deg**, aproximadamente.

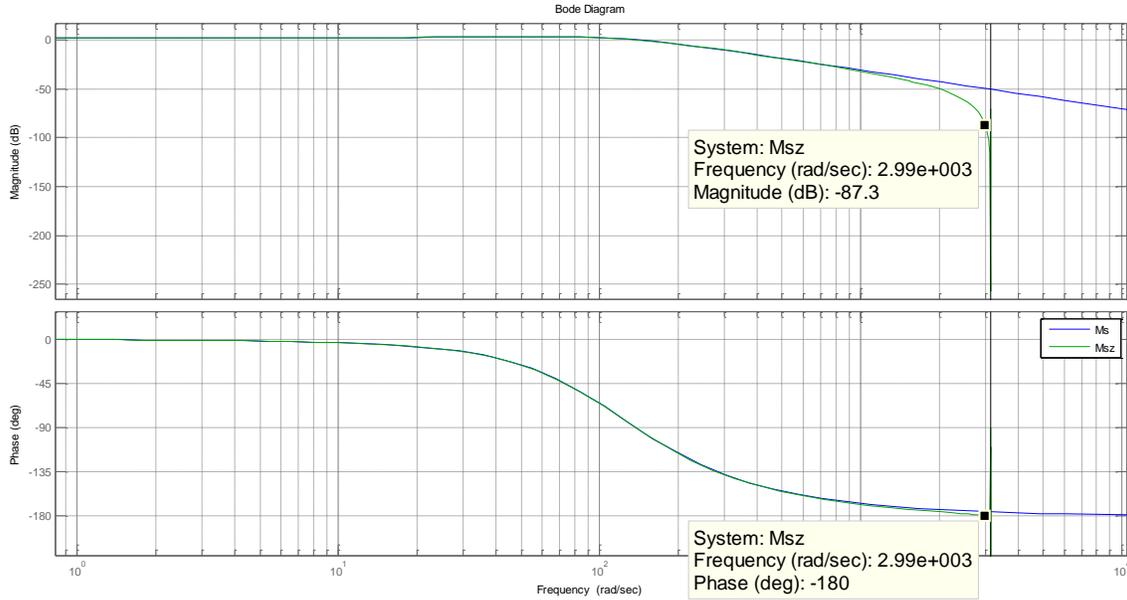


Figura 37"Diagrama de Bode del Sistema, 2.99KHz"

De igual forma para fines de comprobación, en la Figura 38"Respuesta del Sistema, 2.99KHz", se muestra la respuesta del sistema en el dominio del tiempo, utilizando la misma frecuencia de **2.99KHz**, observando respuestas similares de los parámetros de magnitud y fase.

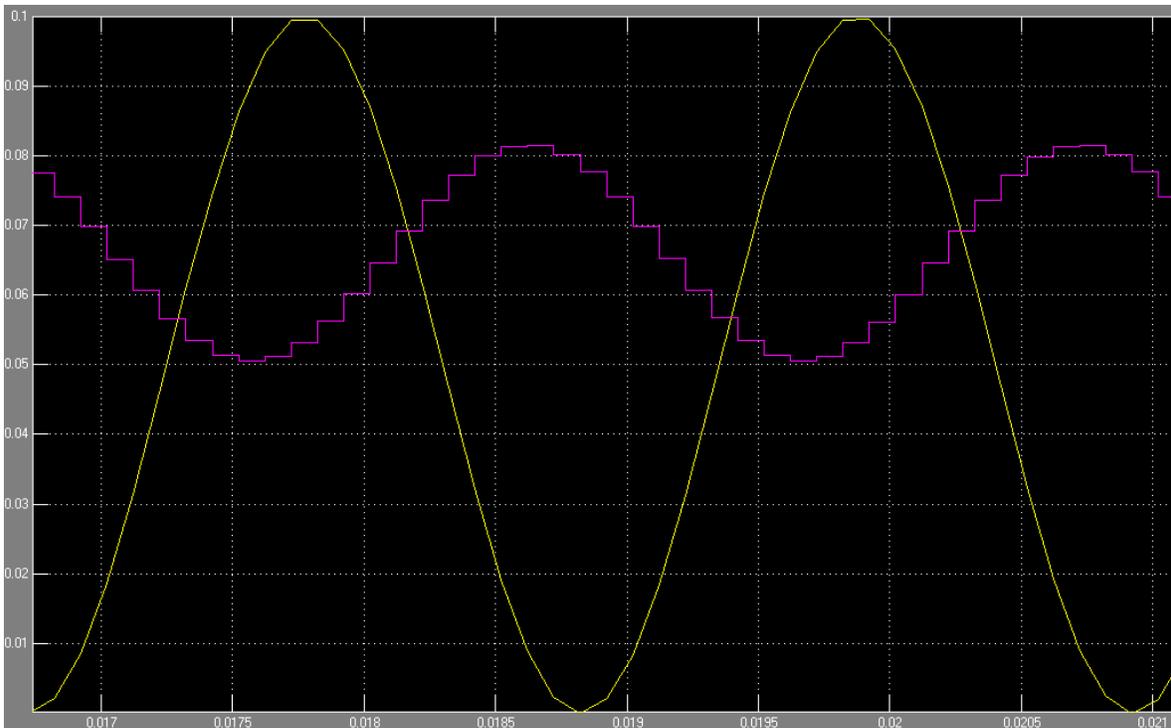


Figura 38"Respuesta del Sistema, 2.99KHz"

Como se puede observar la respuesta al sistema se encuentra desfasada **-180deg**, de igual forma se puede notar una atenuación en la señal de salida, lo cual indica que existe una coherencia, de la respuesta del sistema, en el tiempo y frecuencia.

Por otro lado en la Figura 39 "Diagrama de Bode del Sistema a Frecuencia de Corte", se observa una frecuencia aproximada de **47.6rad/seg**, la misma concuerda, con la localización de la frecuencia de corte de un controlado PD que no es más que las relación de las constantes  $w=Kp/Kd$ , de igual forma esta relación coincide con la ubicación del cero que se agrego al sistema al introducir el controlador[27].

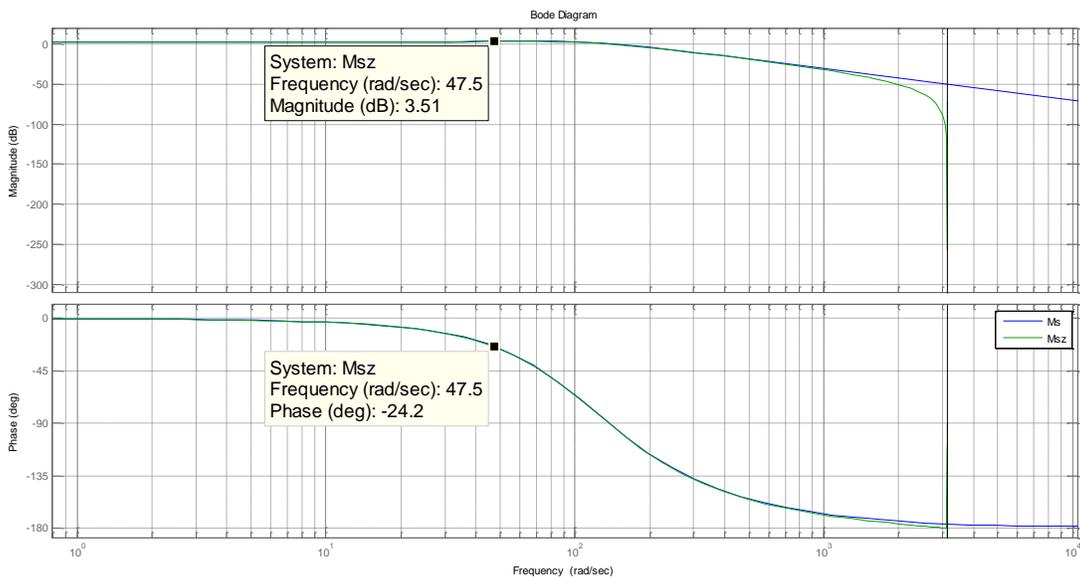


Figura 39 "Diagrama de Bode del Sistema a Frecuencia de Corte"

Se puede notar que, en la parte de magnitud existe una ganancia de **3.51dB**, mientras que se encuentra desfasado **-24.2deg**, el signo me indica que existe un desfase de retraso.

En la Figura 40 "Respuesta del Sistema a Frecuencia de Corte", se muestra el comportamiento del sistema con los mismo parámetros, pero en el dominio del tiempo, donde se puede comprobar, la ganancia de la magnitud, la misma que muestra una amplificación al ser mayor a **0dB**, y de igual forma se puede apreciar el desfase del sistema.

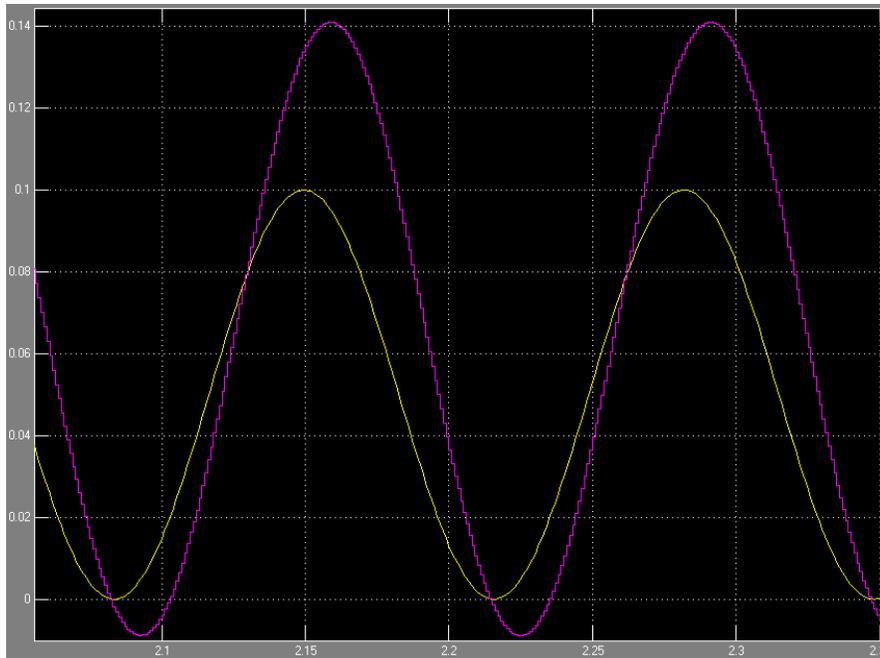


Figura 40 "Respuesta del Sistema a Frecuencia de Corte"

### ➤ Simulink

Como ya se obtuvo la función de transferencia en tiempo discreto, tanto del controlador como de la planta, se obtiene entonces los coeficientes de dichas funciones de transferencia los cuales son cruciales para poder modelar el sistema.

Los coeficientes de las funciones de transferencia son constantes que requieren, los bloques del controlador y de la planta, dado que para el modelamiento del sistema en tiempo discreto se utiliza el entorno virtual de simulink, el cual, es un entorno de programación grafica, que permite mediante un diagrama de bloques simular el sistema y el comportamiento del Levitador, dicho diagrama de bloques debe de cumplir con etapas como señal de entrada, sumador, señal de error, controlador, planta, señal de salida, sin olvidar los respectivos bloques que servirán para la visualización de lo que ocurre con el sistema poniendo énfasis en lo que ocurre con la salida.

En la Figura 41: "Diagrama de Bloques, Sistema tiempo Discreto", se puede apreciar el diagrama de bloques de un Sistema de control del L.M, el cual, como se dijo, cumple con diferentes etapas propias del Levitador y de un controlador, lo que hace posible un correcto modelamiento, es una perspectiva de un sistema generalizado y resumido en ecuaciones matemáticas que comandan dichos

módulos, dentro de dichas ecuaciones se encuentra todo el análisis, matemático, dinámico, mecánico y eléctrico de un sistema de un L.M

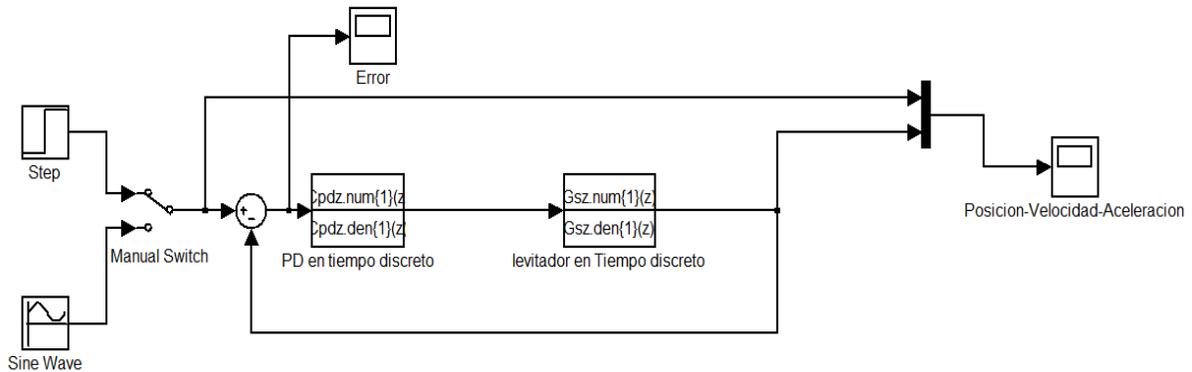


Figura 41: "Diagrama de Bloques, Sistema tiempo Discreto"

Es necesario conocer las funciones individuales que cumple cada bloque, para consiguiente poder entender la función general que cumple todo el diagrama y de esta manera hacer referencia al funcionamiento y comportamiento de un sistema de L.M. Hay que recalcar que la modelación se realiza a una velocidad de frecuencia de 1KHz, de esta manera se actualiza cada 1ms.

### ➤ Bloques



Este bloque genera una función de tipo escalón, cuyos parámetros de configuración son: Step time, Initial Value y Final Value[28].

- **Step Time.**- Tiempo de salto especifica el instante de tiempo en el cual la función conmuta.
- **Initial Value.**- Es el valor con el que da inicio la función
- **Final Value.**- Es el valor final al que llega la función[29].



Este bloque genera una función de tipo senoidal, cuyos parámetros de configuración son: Amplitude, Bias, Frecuency y Phase[28].

- **Amplitude.**- Indica la amplitud de la señal
- **Bias.**- Se define como el valor medio de la señal
- **Frecuency.**- Frecuencia en rad/seg

- **Phase.-** Fase en rad[29]

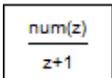


Este bloque es un tipo de conector, que escoge la señal de entrada para tener un análisis y un criterio de dos funciones[28].



Este bloque representa el restador de la señal de entrada menos la señal de realimentación[28].

Este bloque me representa el controlador PD, el cual se va implementar en el sistema, en este controlador hará falta solo las constantes de la función de transferencia en tiempo discreto.



Un bloque similar se tiene para el bloque que representa la planta del sistema, en él están incluidas todas las ecuaciones matemáticas, mecánicas, eléctricas y dinámicas del comportamiento de la planta[28].



Este bloque representa un visualizador, tanto de la señal de error como la señal de salida, en la visualización de salida se puede apreciar la posición[28].

Una vez que se haya modelado el diagrama de bloques, de la Figura 41:"Diagrama de Bloques, Sistema tiempo Discreto", en la Figura 42"Respuesta del Sistema, Entrada Escalón", se aprecia la simulación, de la respuesta del sistema en el dominio del tiempo, en el caso de dar una señal de entrada de tipo escalón, la misma que en dicha figura está representada por la línea de color amarillo, por otro lado en la misma figura se puede apreciar la línea de color rojo la cual representa la salida o la respuesta del sistema de levitación, es decir, se muestra la ubicación del objeto con respecto a la referencia (entrada).

Se observa que, en base a la entrada, el sistema responde acertadamente bien, ya que, como se observa, la señal de salida trata de seguir lo mejor posible al comportamiento de la entrada, quiere decir que, el cuerpo que estará levitando, tendrá bastante similitud con el valor de la referencia (entrada), cabe recalcar que, el valor de la posición que se da a la referencia (entrada), es en unidades de voltaje, es decir la entrada le ordenara al sistema, ubicar al cuerpo a cierto voltaje de posición.

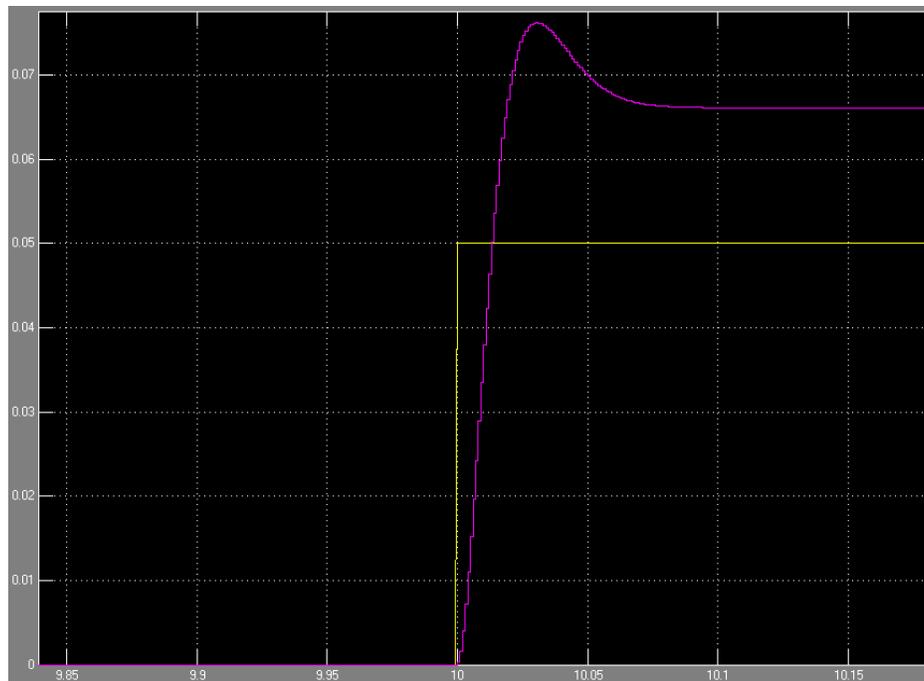


Figura 42 "Respuesta del Sistema, Entrada Escalón"

Aunque es un poco difícil notar a simple vista se encuentran valores aproximados como el tiempo de subida **13mseg**, teniendo un pico máximo de amplitud de **0.0762**, y por consiguiente también se puede notar el error que, no es más que la diferencia, de la referencia menos lo que se obtiene a la salida el cual es de **0.0161**, que en términos porcentuales es de **32.2%**, también se tiene un máximo sobrealto de **0.0101**, que de la misma manera en términos porcentuales es de **15.2%**, y por último un tiempo de establecimiento de aproximadamente **91mseg**.

Para una mejor apreciación del error se puede observar en la Figura 43 "Error del Sistema"

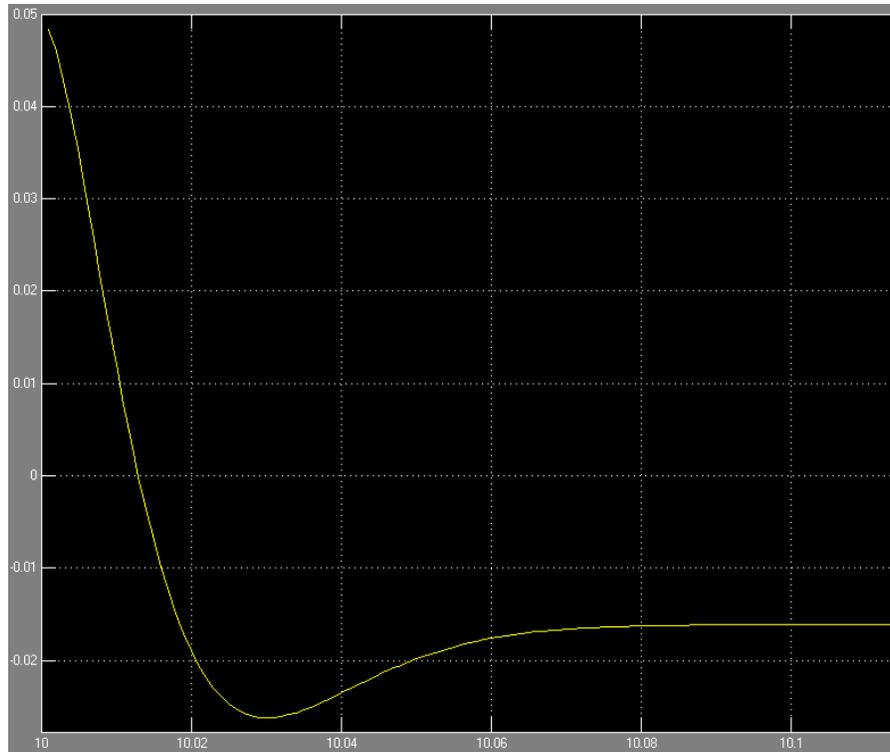


Figura 43"Error del Sistema"

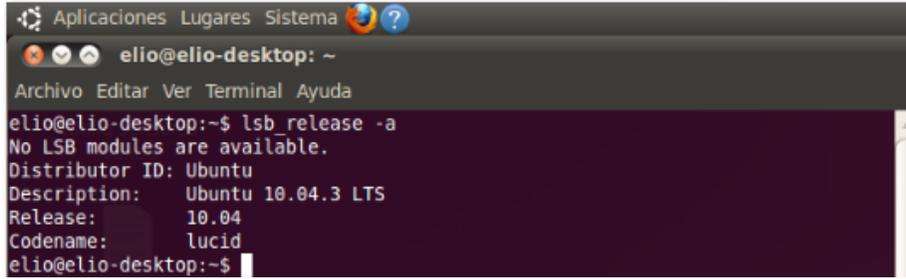
Mediante el análisis que se realizó se dice que, el controlador cumple con las expectativas, ya que la señal de salida que me indica la posición del cuerpo sigue en gran medida el comportamiento de la referencia, existe una buena respuesta que se puede comprobar con el valor del tiempo de subida y el tiempo de establecimiento, mencionando también el error que existe demostrando la exactitud del sistema.

Una vez realizado el análisis del modelamiento del sistema en tiempo discreto, se pasa ya al sistema operativo Linux, ya que, en el mismo se implementará finalmente el controlador digital para el L.M.

El sistema operativo de Linux es implementado en una PC de propósito general de características como: Pentium IV, de 1G de memoria RAM y que tiene acoplada ya la tarjeta PCI 1711.

Para empezar el control en Linux, se deben considerar algunos aspectos, entre ellos:

- La versión de la distribución de Linux, que es **UBUNTU versión 10.04 Lucid**, ya que RTAI puede ser instalado solamente en esta versión o en versiones anteriores. Ver Figura 44"Ubuntu Versión 10.04 Lucid"



```

Aplicaciones Lugares Sistema
ello@elio-desktop: ~
Archivo Editar Ver Terminal Ayuda
elio@elio-desktop:~$ lsb_release -a
No LSB modules are available.
Distributor ID: Ubuntu
Description:    Ubuntu 10.04.3 LTS
Release:       10.04
Codename:      lucid
elio@elio-desktop:~$

```

Figura 44"Ubuntu Versión 10.04 Lucid"

- La versión de **RTAI** es la **2.6.32-122**, ya que esta tiene compatibilidad con **SCILAB 4.1.2** que será utilizada como plataforma para el controlador. Ver Figura 45"Scilab 4.1.2"

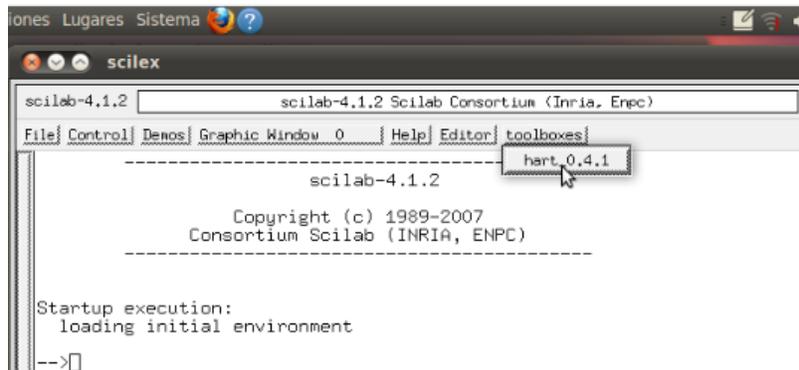


Figura 45"Scilab 4.1.2"

- Para poder ejecutar los procesos dentro del terminal de UBUNTU, es necesario tener privilegios de súper administrador, ya que los códigos a ejecutarse tiene relación directa con el kernel del sistema, para poder manipular RTAI. Esto se logra escribiendo en el terminal "sudo su".
- Una vez que se tienen derechos de súper administrador se inician los módulos de rtai:

```
# root@elio-desktop:/home/elio# start_rtai
```

Para evitar estar ejecutando los módulos de uno en uno, estos se colocaron dentro un archivo, de tal manera que facilita al usuario al ejecutar un solo archivo con el comando "start\_rtai", que lógicamente aquí se encuentran todos los módulos que trabajan con rtai.



- ✓ Permite la creación de funciones propias
- ✓ Se puede realizar operaciones con polinomios y funciones de transferencia
- ✓ Se puede crear y utilizar un conjunto de funciones destinadas a aplicaciones específicas, estas se denominan “Toolboxes” y tiene funciones para control, redes neuronales, etc. [30]

En relación a las ventajas que presenta Scilab se debe recalcar que, aparte de todas las operaciones que permite realizar y mencionado que son en tiempo real, Scilab me permite trabajar sobre un lenguaje de programación amigable para el usuario, es decir su lenguaje es tipo grafico, lo cual facilita la interpretación de procesos para los usuarios.

Como se mencionó anteriormente Scilab como tal no trabaja en tiempo real, pero, necesita de un complemento, el cual se conoce como HART, con esta herramienta y conjuntamente a través del entorno virtual conocido como SCICOS permite a Scilab trabajar en tiempo real.

Para ingresar al entorno virtual de SCICOS donde se desarrolla el controlador con programación tipo grafica, únicamente se debe digitar el comando **#scicos**

### 3.2.2 SCICOS

Dentro de Scilab se tiene un entorno que es muy parecido al entorno que presenta simulink dentro de matlab este es SCICOS, el cual brinda la posibilidad de la simulación de varios sistemas, ya que cuenta con paquetes que incluyen herramientas para la simulación de circuitos eléctricos, sistemas de control y termo hidráulica.[31]

Para poder ejecutarlo dentro de Scilab basta con escribir el código “**scicos**”, se abrirá una nueva ventana lista para trabajar.

Existen tres clases de programas que se pueden ejecutar en SCICOS:

- ✓ **Macros y funciones.** Las macros y las funciones permiten realizar nuestras propias utilidades y reutilizarlas siempre que queramos. El procedimiento consiste en escribir con un editor de texto la función deseada (debe tener extensión .sci), cargarla desde el programa y finalmente ejecutarla.[32]

- ✓ - **Programas.** Los programas Scilab también son ficheros de órdenes con extensión .sci, que se ejecutan con el comando:  
--> *exec ordenes.sci*  
El programa busca el fichero "ordenes.sci" y lo ejecuta secuencialmente hasta que encuentre alguna sentencia de control de flujo.[32]
- ✓ - **Interfaces.** Una subrutina en código C o Fortran se puede utilizar como una función de Scilab, a este código se le denomina una Interface. Evidentemente esta posibilidad permite codificar programas muy exigentes en términos de complejidad o velocidad de cálculo, además de la reutilización de código ya existente en estos lenguajes.[32]

Una vez dentro del programa SCICOS, se busca el archivo con extensión .sci el cual es el controlador digital representado en diagrama de bloques, hay que resaltar que, en este diagrama de bloques ya no está representado el modulo de la planta como tal ya que en este, esta únicamente el controlador, solamente existe bloques y módulos representando entradas de voltaje y salidas de la variable ya controlada y los bloques que representa los drivers de la tarjeta PCI.

En la Figura 47 "Diagrama de Bloques SCICOS" se muestra ya el diagrama de bloques del controlador digital, como se puede observar es un entorno bastante parecido al de simulink, se dispone de una variedad de bloques para una variedad de modelaciones, en tiempo real. Una cosa importante que hay que notar en este entorno es que, debe tener activado la pestaña que se encuentra en la parte superior con el nombre de "RTAI" ya que de no tener activada dicha pestaña las simulaciones no correrán en tiempo real o no tendrán la prioridad de tiempo real.

Se nota también que este entorno es un ambiente amigable para el usuario, por el hecho que la programación es de tipo grafica, en dicha programación se debe tener claro qué tipo de bloques y módulos utilizar, teniendo en cuenta también, como se debe realizar la correcta conexión de los mismos, siguiendo un proceso y un orden del sistema de control, con este diagrama de bloques en forma de programación grafica, se puede apreciar y tener un criterio del funcionamiento completo del sistema de control.

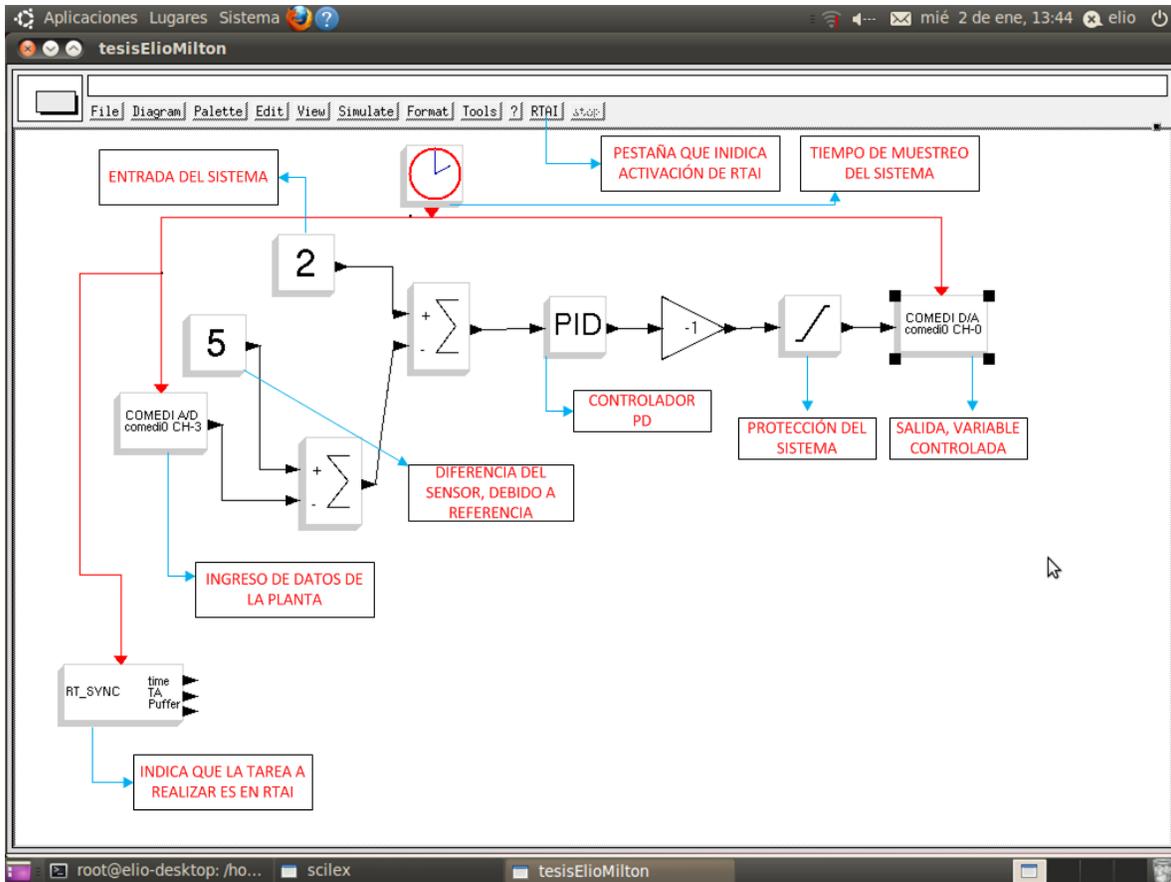


Figura 47"Diagrama de Bloques SCICOS"

Para tener un poco más claro el funcionamiento de este diagrama de bloques se explicara de manera concisa la función que desempeña cada uno de los bloques o módulos.

- RT\_SYNC.-** El primer bloque de la parte inferior izquierda, es de mucha importancia ya que este bloque actúa directamente con el kernel antes parchado, y se encarga de decir al sistema que la tarea a ejecutarse en el entorno de SCICOS es en tiempo real, por lo tanto este proceso debe de ser el privilegio para el procesador, es decir si existe alguna otra tarea a ejecutarse como por ejemplo leer un dispositivo usb, esta tarea tiene que esperar que el procesador atienda primero al sistema de control y luego podrá realizar el resto de tareas, hay que resaltar que, este modulo deberá ir conectado de alguna forma al mismo nodo que está conectado el reloj del sistema. Ya que este reloj es el que me indica a que tiempo de muestreo se encuentra el sistema quiere decir cada qué tiempo se está actualizando.

- **COMEDI A/D CH-14.-** Dentro de este bloque se encuentra los drives de la tarjeta PCI para poder trabajar con RTAI exclusivamente, se necesita los drivers de dicha tarjeta tanto para que ingrese el voltaje como para que salga, en este caso la función de este bloque es el que indica la posición actual del cuerpo que se encuentra levitando, mediante este bloque ingresa el voltaje de realimentación directamente de los sensores, a través de un puerto de la tarjeta conocido como canal 14.

Se debe tomar en cuenta que, el voltaje que arroja este bloque por especificaciones originales es inversamente proporcional a la posición del cuerpo que esta levitando, por esta razón se debe restar 5 voltios, debido a que el sensor me entrega un voltaje entre el rango de 0 a 5V. Esta constante de 5 que se le resta a la salida del bloque **CH-14**, se puede notar contigo a dicho bloque, los mismos que están ingresando al bloque sumador donde se realiza la operación antes mencionada.

La señal que sale del sumador ya es una señal real de la posición en relación al voltaje, como se menciono antes esta señal es la que entrega el sensor, por lo tanto entonces es la señal de realimentación del sistema que se obtiene de la posición del cuerpo, dicha señal como es lógico en un sistema de control se debe de restar con la señal de entrada (más conocida como la señal del Set Point), al obtener dicha resta, se conoce el error del sistema en este caso sería el error de ubicación del cuerpo, esta señal debe de ingresar al controlador para que se pueda compensar dicho error.

La señal del Set Point, es la señal de referencia, que esta representada con el bloque de constante **2**, esta constante es un valor de voltaje que indica al actuador que jale al cuerpo que esta levitando y le ubique a una posición de 2 voltios.

En el siguiente capítulo se establecerá una relación entre el voltaje y unidades métricas sobre la posición a la que se encuentra el cuerpo que esta levitando, todo esto a través de las pruebas que se realice al sistema de L.M

- **PID.-** Este bloque es el controlador como tal de todo el sistema de L.M, como se observa es un bloque de un controlador tipo PID, recalando que en este caso se utiliza un controlador tipo **PD**, por lo que, solo se utilizara las constantes proporcional y derivativo, dejando anulado la parte de integrador, este bloque es

similar al bloque de control de simulink, el cual trabaja con constantes que se obtiene de la función de transferencia en tiempo discreto.

Las constantes de la función de transferencia en tiempo discreto se obtiene del software MatLab, donde se obtuvo una respuesta optima a través de las diferentes simulaciones que se realizo, indicando que, el controlador cumple con las expectativas propuestas, dicho esto las constantes obtenidas aquí ya se puede implementar finalmente en el controlador digital e ingresar dichas constantes en el bloque respectivo.

Seguido de esto se coloca un bloque limitante, la función de este bloque es que limita el voltaje de salida, ya que la tarjeta PCI con la que se está trabajando, puede arrojar voltajes de hasta 12V, y el voltaje nominal con el que trabaja todo el sistema de la planta es de 5V, entonces dicho bloque limitante es mas como una protección del sistema.

- **COMEDI D/A CH-0.-** De igual forma que el bloque del canal 14-**CH-14**, este bloque también contiene interiormente los drivers de la tarjeta PCI, para que pueda trabajar en RTAI, mediante dicho bloque sale la señal controlada en forma de voltaje, dicha señal se pretende que debe de llegar a la planta directamente al actuador, para que el mismo haga su función de jalar al cuerpo que esta levitando a una posición de voltaje configurada en el set point. Este voltaje sale a través de un puerto de la tarjeta el mismo es el canal 0, sin embargo, con esta señal no se puede manejar directamente el actuador, por motivo de la potencia que maneja el electroimán como tal. Dicho esto, esta señal debe de pasar por el convertidor Voltaje-PWM, y seguidamente pasara por el amplificador de corriente Driver MD03A, debido a que este amplificador maneja a la entrada PWM, se utiliza antes un convertidor, por otro lado a la salida de este amplificador obtenemos corriente la cual ya puede manejar directamente al electroimán que al hacer circular corriente crea una fuerza electromagnética que jala al objeto al nivel o la posición configurada en la referencia o set point.
- **BLOQUE RELOJ.-** En este bloque se configura el tiempo de muestreo del sistema, como se trabaja con una frecuencia de 1KHz, entonces el tiempo de muestreo o de tiempo de actualización es de 1ms, como se dijo anteriormente es importante que, este bloque debe de estar conectado de alguna forma al mismo nodo que el bloque **RT\_SYNC**, ya que éste actúa directamente sobre el kernel del sistema recalcando que se está trabajando en RTAI.

## CAPITULO 4

### PRUEBAS DEL SISTEMA

En el presente capítulo, se desarrolla las pruebas del sistema, donde se comprueba de manera real los datos que se obtuvieron en las simulaciones.

#### 4.1. DESEMPEÑO EN ESTADO ESTACIONARIO

En esta prueba, como referencia se introduce una señal invariante en el tiempo, es decir el valor del Set Point, será de 4V, resaltando que el valor que se da a la entrada no está en unidades métricas si no de voltaje.

Como se puede apreciar en la Figura 48 "Referencia Constante" el bloque que da la entrada al sistema, es un valor constante de 4V.

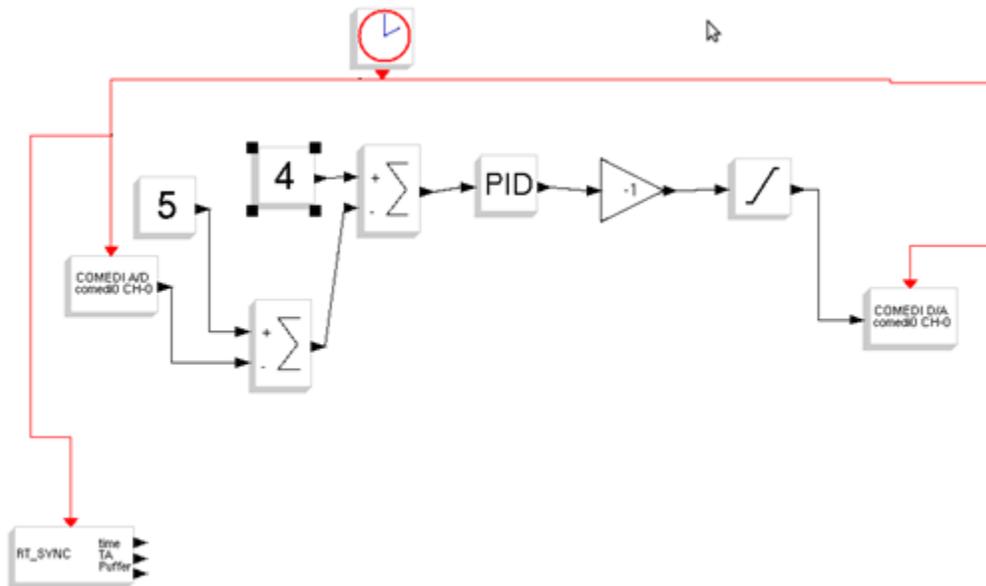


Figura 48 "Referencia Constante"

En la Figura 49 "Levitación con Set Point" se observa la respuesta real del sistema, la misma que no varía con el tiempo, ya que a la entrada se le da un Set Point constante, manteniéndose estable en una determinada posición, y se obtiene valores aproximados a la referencia.

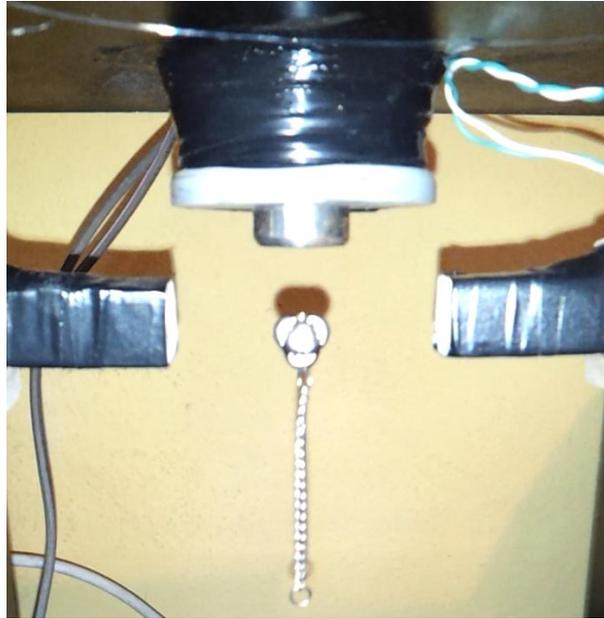


Figura 49" Levitación con Set Point"

El valor de realimentación es de **1.4V** aproximadamente, dicho valor se resta de 5V, debido a que la referencia del electroimán se encuentra invertida, con esto se obtiene un error de **10%**, el cual es valor esperado de acuerdo a las simulaciones obtenidas.

En la Figura 50"Respuesta Voltaje-Corriente Set Point" se muestra la respuesta en voltaje de la entrada al electroimán y la corriente, que circula por el mismo, cuando existe un Set Point de **4V** en la referencia, resaltando que el canal uno amarillo es voltaje y el canal dos azul es corriente.

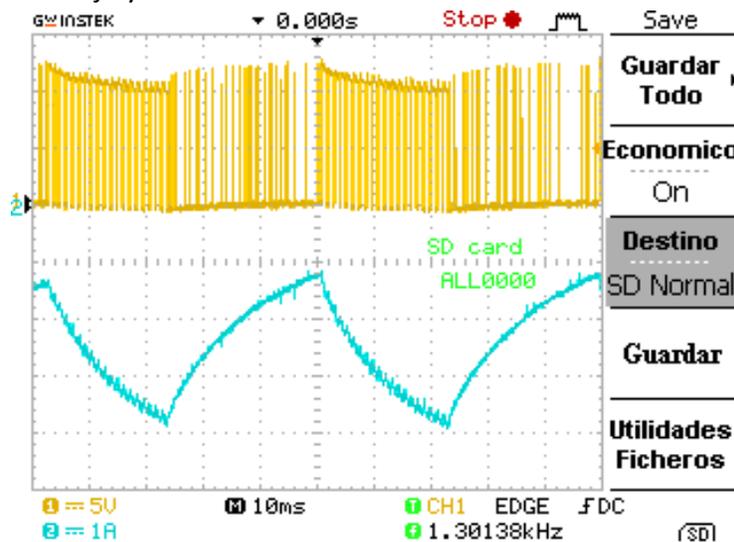


Figura 50"Respuesta Voltaje-Corriente Set Point"

Claramente se puede notar el comportamiento de la corriente en el electroimán que lógicamente es análoga al comportamiento de corriente en un inductor, pues la corriente se carga y se descarga, como se dijo que, existe un Set Point en la referencia, por lo que, la corriente aumenta linealmente cuando en el voltaje se presenta un estado de cerrado e igualmente disminuye cuando existe un estado de abierto.

Hay que recalcar que, la corriente aumenta de un valor de **-1A a -4A**, aproximadamente y disminuye de igual forma en el mismo rango, y ya que no existe valor de corriente negativa, este comportamiento se debe al sentido de corriente ya que la sonda se colocó donde está saliendo la corriente del electroimán.

#### **4.2. DESEMPEÑO ANTE SEÑALES VARIABLES EN EL TIEMPO**

- **Respuesta Entrada Cuadrada**

Para fines de comprobación se realiza las pruebas ya no con una señal constante, sino, con una señal que varía en el tiempo, como por ejemplo una señal tipo cuadrada.

En la Figura 51 "Referencia Cuadrada" se observa que en el bloque de entrada se le asigna una señal cuadrada, cabe recalcar que dicha señal se le introduce un BIAS, debido a que, si la onda tiene una referencia de cero el objeto a levitar se cae, ya que el sensor no lo detecta debido a su rango de operación.

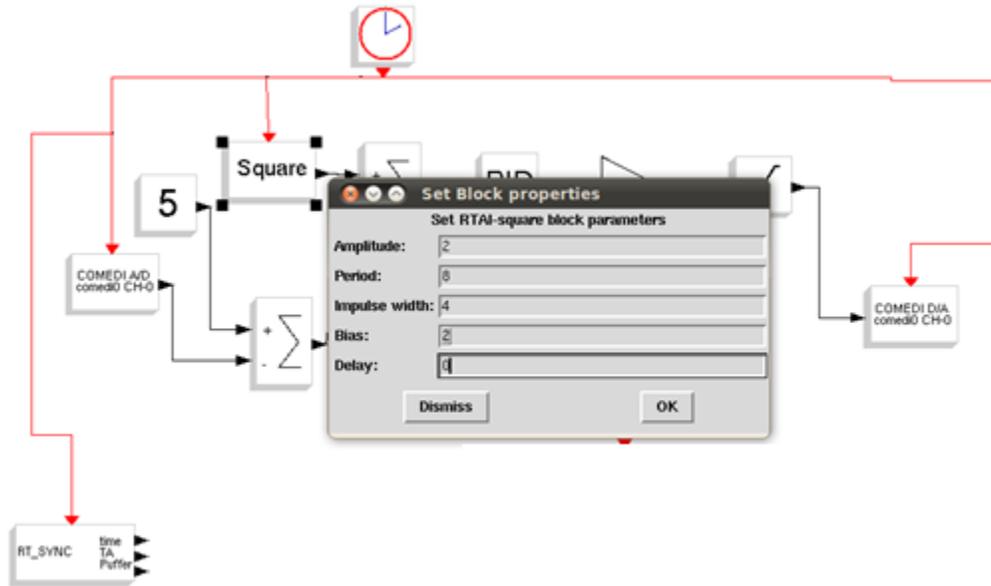


Figura 51 "Referencia Cuadrada"

Como se observa en la Figura 52 "Levitación Señal Cuadrada", el objeto a levitar responde de una manera similar al comportamiento de una onda cuadrada ya que en ocasiones el objeto baja hasta obtener una posición de **10mm**, y de la misma manera sube obteniendo una posición de **8mm**. En esta prueba se obtuvo un error de **38.5%** debido a las variaciones bruscas en la entrada

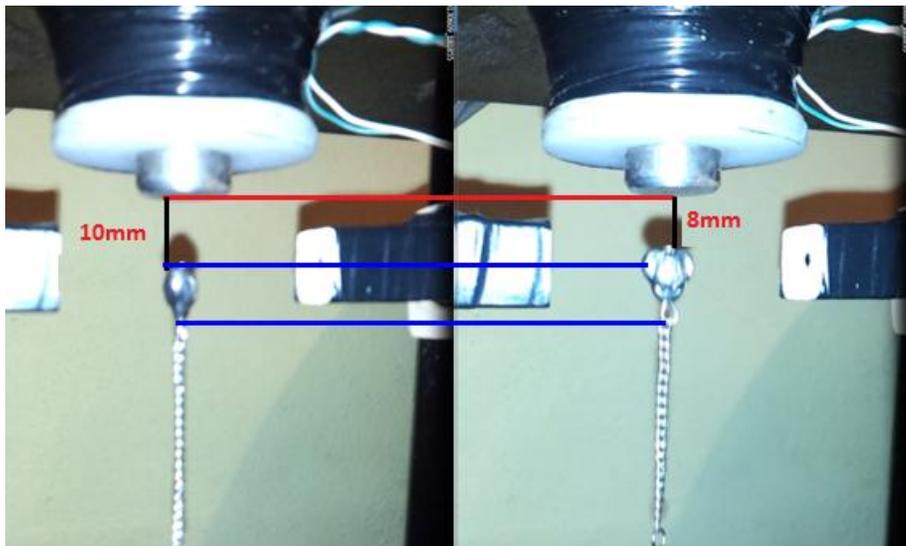


Figura 52 "Levitación Señal Cuadrada"

Se puede notar que cuando el objeto se encuentra en una posición de **8mm**, el voltaje se encuentra en el ciclo bajo, que es de **2V**, y cuando el objeto se encuentra

en **10mm**, el voltaje se encuentra en **4V**, esto quiere decir que la relación de voltaje y posición es de 1 voltio por 1mm.

En la Figura 53 "Respuesta Voltaje-Corriente Señal Cuadrada", se puede notar el comportamiento de la corriente en el electroimán cuando existe de referencia una entrada tipo cuadrada, en este caso se presenta solo el comportamiento de la corriente, ya que este factor es principal debido a que, al circular por el electroimán genera una fuerza magnética que jala al objeto, por otro lado el voltaje se comportara de manera similar existiendo una variación del ancho de pulso.

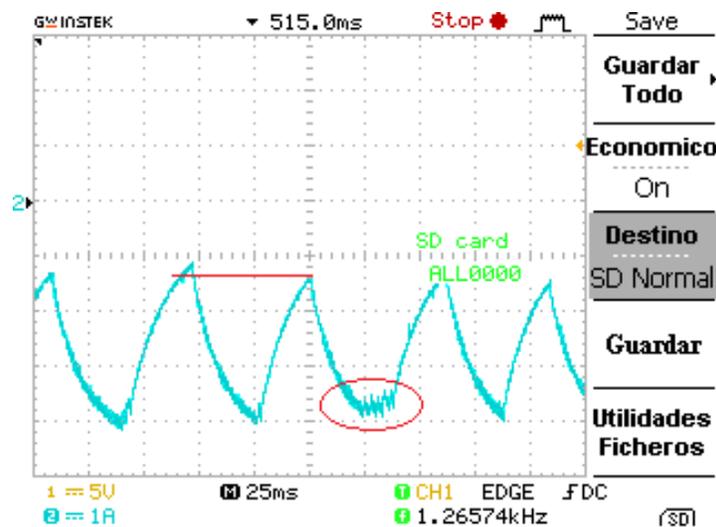


Figura 53 "Respuesta Voltaje-Corriente Señal Cuadrada"

La parte circular que esta resaltada con rojo es la variación que existe en la corriente al tener una señal de tipo cuadrada en la referencia, se nota que, cuando la corriente se carga o aumenta hasta llegar a un valor aproximado de **4A**, existe un extraño en la corriente parecido a un disturbio, esto se debe a que el objeto trata de estabilizarse en la posición de indicada en este caso sería cuando el voltaje se encuentre en **4V**, y el objeto este a **8mm**. Existe dicho disturbio debido a que la señal tipo cuadrada tiene cambios bruscos de voltajes quiere decir que el cambio de arriba/abajo es rápido inesperado.

Por otro lado la línea roja me indica la variación de la corriente en el momento que se descarga o disminuye, se puede notar que en ocasiones no llega al valor aproximado de **1A**, esto se debe a que, el controlador es precavido de mantener al objeto en el rango indicado por la señal tipo cuadrada, quiere decir que no hace

una descarga total de la corriente si no que lo hace de una manera de mantener al objeto en la posición de **10mm**, cuando el voltaje se encuentra en **4V**. Sin embargo en algunas posiciones la corriente si llega aproximadamente a **1A**, pero esto se debe a como se dijo anteriormente es por lo que la señal cuadrada presenta cambios bruscos.

- **Respuesta Entrada Sinusoidal**

De igual manera para fines de comprobación se realiza las pruebas con otra señal que varía en el tiempo con la diferencia que esta señal es una señal suavizada, la cual no presenta cambios bruscos como la señal cuadrada.

Entonces de igual forma en la Figura 54 "Referencia Señal Sinusoidal", se observa que en el bloque de entrada se le asigna una señal sinusoidal, cabe recalcar que también se le introduce un BIAS, debido a que, si la onda tiene una referencia de cero el objeto a levitar se cae.

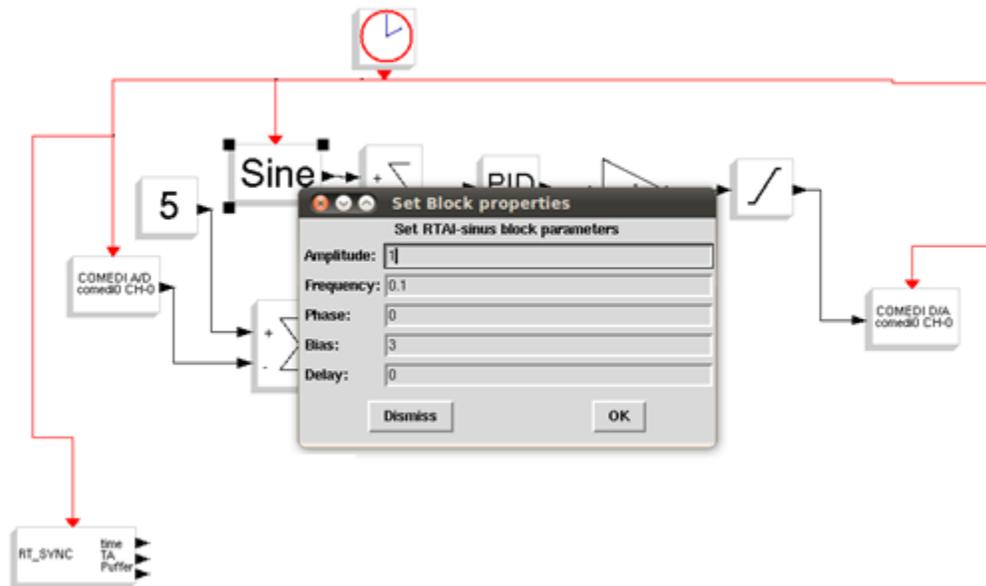


Figura 54 "Referencia Señal Sinusoidal"

Por motivos de visualización no se presenta las imágenes capturadas, del funcionamiento de la planta, por lo que, es dificultoso notar dichos cambios en el objeto, solo apreciándolo en una imagen, otra de las razones es que, se van a parecer en gran parte a las imágenes con la referencia cuadrada.

Sin embargo en la Figura 55 "Respuesta Voltaje-Corriente Señal Sinusoidal", se muestra las capturas del osciloscopio, donde si se puede apreciar de una mejor manera el comportamiento de la corriente en el electroimán y de igual forma el comportamiento del voltaje.

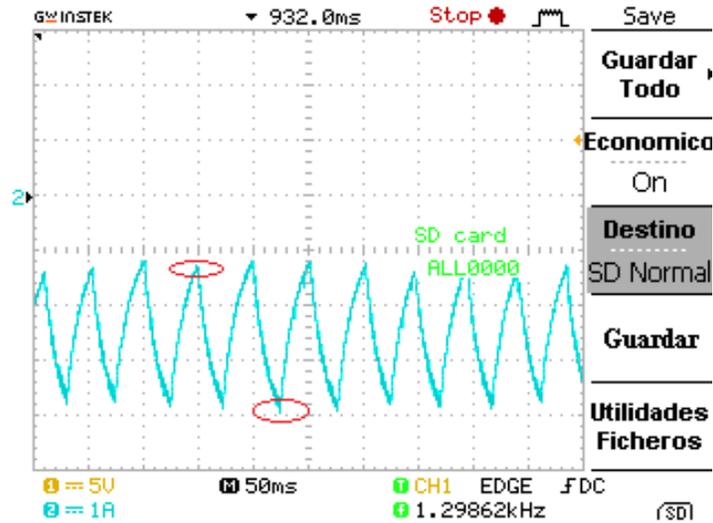


Figura 55 "Respuesta Voltaje-Corriente Señal Sinusoidal"

Las dos partes resaltadas con rojo, demuestran que se está dando a la referencia una señal sinusoidal, por lo que, el aumento y disminución de la corriente en el electroimán ya no se presenta con disturbios como lo hacía en la señal cuadrada, se presenta de una forma que, no se existe disturbios y variaciones debido a que la señal es una señal tipo suavizada y los cambios que realiza son incrementales crecientes, es decir los cambios se no son bruscos si no que aumenta en porcentaje.

A pesar de ello, se puedo notar que tanto en la carga y descarga de la corriente, en algunas ocasiones no llega al valor aproximado de **1.2 y 3.8A**, debido a que como en la señal anterior el controlador tiene que ser eficiente y mover al objeto según la referencia o según el rango de operación que se tiene, o la posición que se le asigne

### 4.3. DESEMPEÑO ANTE PERTURBACIONES MECÁNICAS

Las pruebas que se realiza en este apartado es, observar la respuesta del sistema ante perturbaciones mecánicas, dichas perturbaciones mecánicas, son fuerzas que afecten directamente a la normal levitación del objeto, pudiendo ser una ráfaga de viento o simplemente contactos físicos que perturben la levitación.

Para esta prueba se utiliza como referencia un Set Point, ya que es una entrada constante que no tiene variaciones en el tiempo, quiere decir que el objeto a levitar estará estable, se escogió dicha entrada por que las variaciones justamente serán externas. Ver Figura 56 "Referencia Set Point".

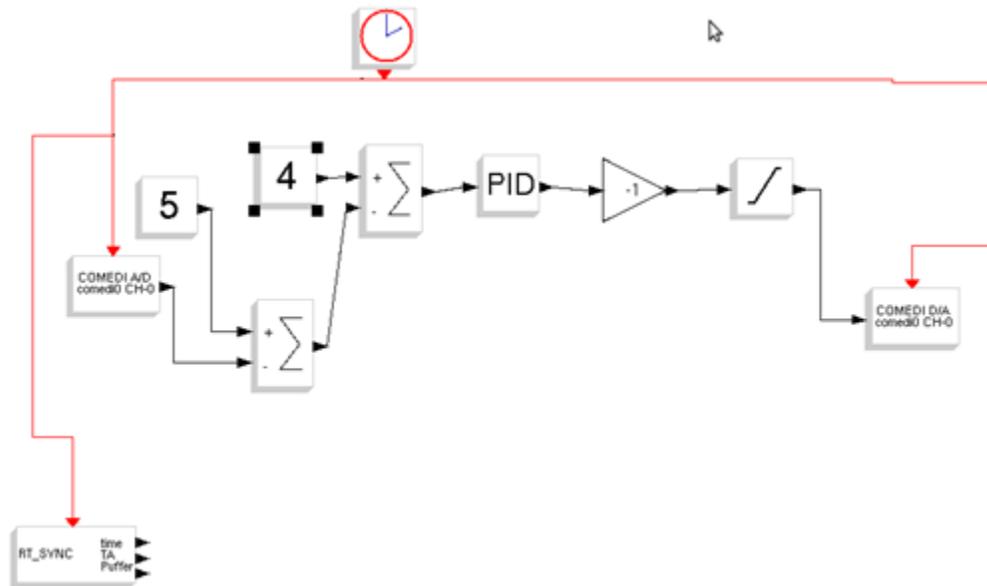


Figura 56 "Referencia Set Point"

En la Figura 57 "Secuencia de fotos Perturbaciones Mecánicas", se muestra una ráfaga de 4 capturas secuenciales, de cómo se está comportando el sistema ante perturbaciones físicas, si bien es cierto no se puede notar de una buena manera las variaciones en movimiento que presenta el objeto que esta levitando, es por eso que estas imágenes se fomentaran de las pruebas realizadas en el osciloscopio.

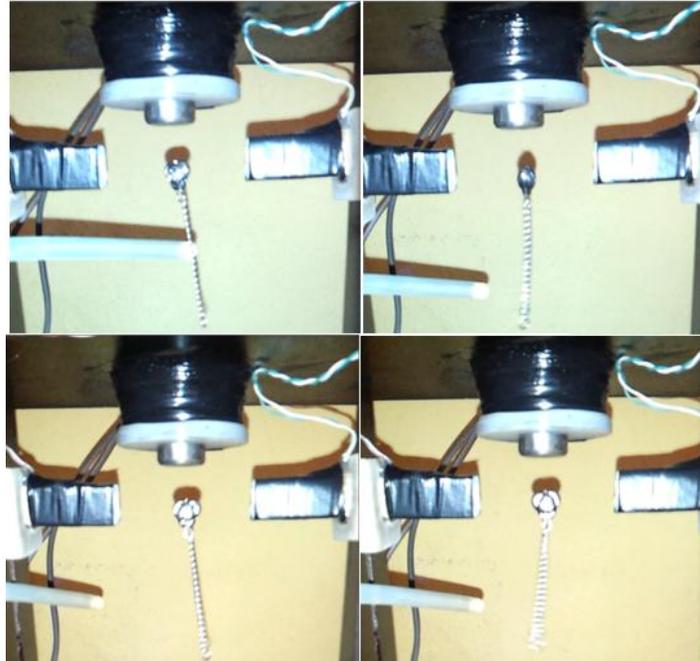


Figura 57 "Secuencia de fotos Perturbaciones Mecánicas"

En la Figura 58 "Respuesta Voltaje-Corriente Perturbaciones Mecánicas" se muestra el comportamiento de la corriente y del voltaje, cuando la planta está sometida a perturbaciones mecánicas, es decir a fuerzas físicas que perturben la levitación normal del objeto.

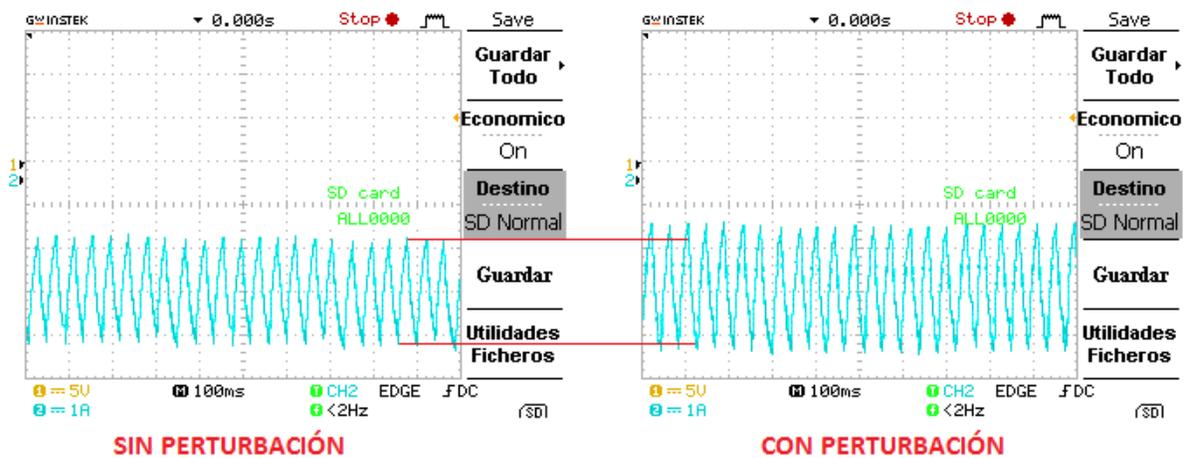


Figura 58 "Respuesta Voltaje-Corriente Perturbaciones Mecánicas"

El comportamiento de la corriente en este caso, es totalmente diferente al de los casos anteriores, se puede notar que, lo resaltado con rojo, son justamente las variaciones del valor de la corriente producto de la perturbación mecánica introducida.

Para poder observar de mejor manera la variación de la corriente, y lógicamente notar cómo está actuando el controlador, se compara, la corriente cuando no existe perturbación en el sistema, entonces claramente ésta corriente varía en un rango de **1.8A-4.2A**.

Por otro lado cuando ya existe la perturbación mecánica externa, se nota que la corriente aumenta debido a que la perturbación desestabiliza al objeto que está levitando, entonces el electroimán debe esforzarse más para lograr estabilizar dicho objeto o mantenerlo a la posición original, se observa que, en este caso la corriente varía en un rango de **1.5A-4.5A**, con lo que se puede concluir que la corriente está aumentada **600mA**, y se verifica que el controlador está actuando, según las exigencias, en este caso son los disturbios mecánicos.

## CAPITULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

Al realizar las pruebas y analizar los resultados obtenidos en la realidad, podemos darnos cuenta de que existe una buena relación entre estos y los resultados que se obtuvieron en las simulaciones, lo cual nos permite asegurar que el modelo dinámico que se obtuvo al linealizar la planta del LM alrededor de un punto de equilibrio son válidos para la realización de un sistema de control, siendo un controlador PD el que se pudo implementar en esta tesis.

Una de las principales conclusiones que hay que tomar en cuenta y que se presenta en la realidad, es que, los diferentes parámetros físicos de la planta como por ejemplo: inductancia de electroimán, con objeto y sin objeto, resistencia del electroimán tomando en cuenta las pérdidas por el calentamiento variación del voltaje de los sensores según el ambiente donde se encuentre etc. Son mediciones difíciles de obtener por la variabilidad de los parámetros al cambio de las condiciones ambientales y por el calentamiento mismo del electroimán cuando esta funcionamiento.

Tomando en cuenta lo que se mencionando anteriormente sobre la variabilidad de los parámetros físicos, el controlador PD digital es capaz de soportar cambios pequeños en la planta, producidos por calentamiento cuando está funcionando, sin perder la estabilidad del sistema. Las variaciones o cambios producidos internamente en el sistema se consideran como perturbaciones producidas por efectos físicos auto inducidos que son muy difíciles de modelar matemáticamente. Es por esto que, para contrarrestar dichos cambios se propone para investigaciones futuras el diseño e implementación de controladores NO LINEALES usando la misma plataforma de RTAI Linux.

Para determinar la frecuencia de muestreo mínima necesaria para estabilizar el sistema se realizo con el incremento paulatino de la misma en el controlador. Dicha frecuencia fue difícil determinar en las simulaciones ya que el modelo matemático de la planta no considera algunas variaciones de los parámetros que modifica su comportamiento real, dichas variaciones como se dijo anteriormente

son internas de la planta. De aquí se llegó a la conclusión que, con una frecuencia de muestreo superior a 850Hz es posible estabilizar el sistema de levitación magnética.

Otro de los parámetros importantes que hay que tomar en cuenta así como la frecuencia de muestreo es el jitter que está presente en el controlador, dicho parámetro se conoce como la desviación o el retardo temporal de los eventos necesarios para el control de la planta en tiempo real. De esta manera se llegó a la conclusión que un jitter superior a los 50us provoca la pérdida de controlabilidad del sistema por parte del controlador.

Este jitter se puede presentar por eventos externos que realiza el programador de tareas del kernel de linux, ajenos al controlador y que retardan su funcionamiento.

Es necesario recalcar que, por lo mencionado anteriormente, realizar un controlador para este tipo de planta es una tarea IMPOSIBLE, si no se cuenta con sistema en donde no se logre controlar la prioridad de las tareas y la pila de interrupciones en el sistema para obtener un verdadero TIEMPO REAL, siendo un claro ejemplo de esto el Sistema Operativo Windows, que en cualquiera de sus versiones para PC de escritorio, incluso habiendo instalado software especializado de control como es LABVIEW de National Instrument, o Matlab con programación en Lenguajes rápidos como C, ya que estos solo nos podrían garantizar la ejecución rápida de las instrucciones (dependiendo del procesador del PC), PERO no pueden controlar la pila de interrupciones ni el programador de eventos por la arquitectura misma del Sistema Operativo Windows.

El uso de RTAI permite realizar un tipo básico de Tiempo Real con interface gráfica en SCICOS, mas no por ello su poder es limitado ya que, con este tipo de Tiempo Real se pudo controlar sin problema la planta hasta con 1KHz de frecuencia de muestreo debido al procesador que se utilizo. Se tiene además la alternativa de convertir los bloques de SCICOS en código C para luego compilarlos y obtener un controlador limitado en una PC Core 2 Duo de 2.2 GHz a frecuencia de muestreo de 15Khz, frecuencia suficiente para realizar controladores muy poderosos incluso para el campo industrial, militar o de investigación.

## 5.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda que para la construcción de la maqueta se utilice materiales que no tengan ningún tipo de reacción con la fuerza magnética ejercida por el electroimán, por lo general la madera será un buen aliado.

Tomar las respectivas precauciones debido a que cuando el sistema está en funcionamiento por un tiempo prolongado el electroimán tiende a calentarse, es por eso que la ubicación del mismo debe ser lo más segura posible.

Construir un sistema móvil para la referencia de los sensores, para que de tal manera sea fácil manipular para poder calibrar los mismos.

Necesariamente para una buena conexión entre el entorno digital y el físico se debe utilizar el cable respectivo para la tarjeta PCI, ya que de lo contrario suele desconectarse continuamente y no existe un funcionamiento adecuado.

Por último utilizar las versiones especificadas tanto del kernel como la versión de Linux ya que estas tienen la compatibilidad en tiempo real, de lo contrario no podrá haber una compilación completa y una garantía de procesos en tiempo real.

## 5.3. BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. Cruz y M. José, «Diseño e implementación de un sistema de control web para un levitador magnético en la Universidad Nueva Esparta», 2011.
- [2] «Control lineal y no lineal de un levitador magnetico.pdf (objeto application/pdf)». .
- [3] R. Pigem Cameselle, «50 años de alta velocidad en Japón», 2008.
- [4] «PCI-1711 - Datasheet - PCI-Bus Multi-Function Data Acquisition Card - pci-1711.pdf». [En línea]. Disponible en: <http://www.bb-europe.com/bb-euro/literature/pci-1711.pdf>. [Accedido: 12-abr-2013].
- [5] W. H. H. J. | J. A. Buck, *Eletrromagnetismo*. McGraw Hill Brasil.
- [6] «Microsoft Word - Tema 4 - Campo magnetico 2008 - teo4.pdf». .
- [7] D. K. Cheng, *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*. Pearson Educación, 1997.
- [8] «¿Cómo hacer un electroimán? - Ojo Científico». [En línea]. Disponible en: <http://www.ojocientifico.com/2011/02/16/como-hacer-un-electroiman>. [Accedido: 09-may-2013].
- [9] «Electroimán», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 02-may-2013.

- [10] «Regla de la mano derecha», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 16-mar-2013.
- [11] «Inductancia», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 13-abr-2013.
- [12] «Pololu - Dual VNH2SP30 Motor Driver Carrier MD03A». [En línea]. Disponible en: <http://www.pololu.com/catalog/product/708>. [Accedido: 15-abr-2013].
- [13] «AUTOMOTIVE FULLY INTEGRATED H-BRIDGE MOTOR DRIVER - vnh2sp30.pdf». .
- [14] «PIC12F629/675 Data Sheet - 41190g.pdf». .
- [15] «Arduino - ArduinoBoardMega2560». [En línea]. Disponible en: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>. [Accedido: 16-abr-2013].
- [16] «Arduino - PWM». [En línea]. Disponible en: <http://arduino.cc/es/Tutorial/PWM>. [Accedido: 16-abr-2013].
- [17] «Sensor», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 14-abr-2013.
- [18] «() - Sensor Infrarrojo - Grupo Naranja.pdf». [En línea]. Disponible en: <http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/PAEEES/2008-09/Sensor%20Infrarrojo%20-%20Grupo%20Naranja.pdf>. [Accedido: 18-abr-2013].
- [19] «Sensor infrarrojo», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 11-abr-2013.
- [20] «Sensores de proximidad: Infrarrojo». [En línea]. Disponible en: <http://sensoresdeproximidad.blogspot.com/p/infrarrojo.html>. [Accedido: 17-abr-2013].
- [21] Kuo y Golnaraghi, *AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS, 8TH ED (With CD)*. Wiley India Pvt. Limited, 2007.
- [22] R. C. Dorf y R. H. Bishop, *Sistemas de control moderno 10/e*. Pearson Educación, 2005.
- [23] «TEORIA DE CONTROL CAPITULO1», *calameo.com*. [En línea]. Disponible en: <http://www.calameo.com/books/00169857795ef2f4d5659>. [Accedido: 26-mar-2013].
- [24] O. uploader was M. at F. Wikipedia, *Français : Circuit dipole RL série*. 2006.
- [25] «RTAI – Real Time Application Interface. - RTAI.pdf». [En línea]. Disponible en: <http://www.jeuazarru.com/docs/RTAI.pdf>. [Accedido: 23-abr-2013].
- [26] «controlador PID con Aproximación Bilineal». [En línea]. Disponible en: [http://www.ib.cnea.gov.ar/~control2/Links/Tutorial\\_Matlab\\_esp/PID\\_Bilinear.html](http://www.ib.cnea.gov.ar/~control2/Links/Tutorial_Matlab_esp/PID_Bilinear.html). [Accedido: 10-may-2013].
- [27] «Microsoft PowerPoint - Tema11.ppt - Tema11.pdf». .
- [28] «simbasico.pdf». .
- [29] «Microsoft Word - 10. SIMULINK - 10SIMULINK.pdf». .
- [30] «Microsoft Word - CURSO DE SCILAB.doc - CURSO DE SCILAB.pdf». .
- [31] «Manual de Scilab/Xcos/Xcos - Wikilibros». [En línea]. Disponible en: [http://es.wikibooks.org/wiki/Manual\\_de\\_Scilab/Xcos/Xcos](http://es.wikibooks.org/wiki/Manual_de_Scilab/Xcos/Xcos). [Accedido: 20-may-2013].
- [32] «Microsoft Word - SCILAB UN SOFTWARE CIENTIFICO DE ALTAS PRESTACIONES BAJO L. - SCILAB.pdf». .

## ANEXOS

### ➤ INSTALACION DE LOS COMPONENTES DEL KERNEL RTAI DESDE EL EMC

- **Desde el terminal de UBUNTU se procede a entrar los siguientes códigos para la descarga e instalación de los componentes desde el repositorio EMC:**

```
> echo deb http://www.linuxcnc.org/lucid lucid base emc2.4 > /tmp/linuxcnc.list
> echo deb-src http://www.linuxcnc.org/lucid lucid base emc2.4 >> /tmp/linuxcnc.list
> sudo mv /tmp/linuxcnc.list /etc/apt/sources.list.d/
> gpg --keyserver pgpkeys.mit.edu --recv-key 8F374FEF
> gpg -a --export 8F374FEF | sudo apt-key add -
> sudo apt-get update
> sudo apt-get install linux-headers-2.6.32-122-rtai linux-image-2.6.32-122-rtai
```

- **Luego de esto se reinicia el sistema para proceder con la descarga e instalación de las versiones de rtai. De igual manera desde el terminal se introduce:**

```
> cd /usr/src
> sudo cvs -d:pserver:anonymous@cvs.gna.org:/cvs/rtai co magma
> sudo ln -s magma rtai
> cd /usr/src
> sudo wget --no-check-certificate https://www.rtai.org/RTAI/rtai-3.8.1.tar.bz2
> sudo tar xjvf rtai-3.8.1.tar.bz2
> sudo ln -s rtai-3.8.1 rtai
> cd /usr/src/rtai
> sudo make menuconfig
```

- **Después de este proceso se revisa que los siguientes directorios sean los correctos:**

```
- Installation: /usr/realtime
- Linux source tree: /usr/src/linux-headers-2.6.32-122-rtai
```

- **Se procede a cargar los modulos rtai desde el terminal de UBUNTU:**

```
> /sbin/insmod /usr/realtime/modules/rtai_smi.ko
> /sbin/insmod /usr/realtime/modules/rtai_hal.ko
> /sbin/insmod /usr/realtime/modules/rtai_lxrt.ko
> /sbin/insmod /usr/realtime/modules/rtai_fifos.ko
> /sbin/insmod /usr/realtime/modules/rtai_sem.ko
> /sbin/insmod /usr/realtime/modules/rtai_mbx.ko
```

```
> /sbin/insmod /usr/realtime/modules/rtai_msg.ko
> /sbin/insmod /usr/realtime/modules/rtai_netrpc.ko
> /sbin/insmod /usr/realtime/modules/rtai_shm.ko
```

- **Si se utilizare estos modulos rtai directamente, la programación debería ser en código C, lo cual resultaría complicado y tedioso debido a que los drives para manejar periféricos deberían ser programados y creados por el mismo usuario, para evitar tal problema se procede a descargar e instalar una plataforma de drives que ya vienen creados y listos para utilizarse. Esta plataforma es COMEDI y se descarga e instala desde el terminal de UBUNTU:**

```
> cd /usr/local/src
> sudo cvs -d :pserver:anonymous@cvs.comedi.org:/cvs/comedi login
> sudo cvs -d :pserver:anonymous@cvs.comedi.org:/cvs/comedi co comedi
> sudo cvs -d :pserver:anonymous@cvs.comedi.org:/cvs/comedi co comedilib
> sudo cvs -d :pserver:anonymous@cvs.comedi.org:/cvs/comedi co comedi_calibrate
> sudo cvs -d :pserver:anonymous@cvs.comedi.org:/cvs/comedi co comedi-nonfree-
firmware
```

- **Las librerías que nos da COMEDI:**

```
> cd /usr/local/src/comedilib
> sudo sh autogen.sh
> sudo ./configure
> sudo make
> sudo make install
> sudo mkdir /usr/local/include/Linux
```

- **Para la configuración de COMEDI:**

```
> cd /usr/local/src/comedi
> sudo sh autogen.sh
> sudo ./configure --with-linuxdir=/usr/src/linux-headers-2.6.32-122-rtai --with-
rtaidir=/usr/realtime
> sudo make
> sudo make install
> sudo make dev
> sudo ldconfig
```

- **Y finalmente la instalación de COMEDI:**

```
> cd /usr/local/src/comedi_calibrate
> sudo autoreconf -i -B m4
> sudo ./configure
```

- > sudo make
- > sudo make install
  - **Para evitar ejecutar y arrancar de forma manual los módulos rtai y las librerías de comedi, se hace un archivo para que se ejecute todas estas órdenes con la ejecución de un solo comando para esto se hace el archivo desde el terminal:**

```
> sudo cp /usr/local/src/comedi/include/linux/comedi.h /usr/local/include/  
> sudo cp /usr/local/src/comedi/include/linux/comedilib.h /usr/local/include/  
> sudo ln -s /usr/local/include/comedi.h /usr/local/include/linux/comedi.h  
> sudo ln -s /usr/local/include/comedilib.h /usr/local/include/linux/comedilib.h
```

```
> cd /usr/src/rtai  
> sudo make menuconfig
```

- **En la opción “Add-Ons”, se selecciona “Real Time COMEDI support in user space”**

```
> sudo make  
> sudo make install  
> sudo cp /usr/local/src/comedilib/include/comedilib.h /usr/local/include/
```

- **Una vez cargados los modulos rtai se cargan los modulos de COMEDI:**

```
> modprobe comedi  
> modprobe kcomedilib  
> modprobe comedi_fc  
> modprobe ni_mio_cs  
> insmod /usr/realtime/modules/rtai_comedi.ko  
> comedi_config -v /dev/comedi0 ni_mio_cs 0x0100  
> comedi_calibrate --calibrate  
> chmod a+rw /dev/comedi0
```

- **Una vez realizados todos estos procesos necesitamos una plataforma amigable que nos permita programar el controlador, por lo que se procede a instalar SCILAB 4.1.2 solamente esta versión por problemas de compatibilidad.**

```
> cd /opt  
> sudo wget http://www.scilab.org/download/4.1.2/scilab-4.1.2.bin.linux-i686.tar.gz  
> sudo tar xvzf scilab-4.1.2.bin.linux-i686.tar.gz  
> cd /opt/scilab-4.1.2  
> sudo wget http://hart.sourceforge.net/scilablibs.tar.gz  
> sudo tar xvzf scilablibs.tar.gz
```

```
> sudo make
> sudo ln -s /opt/scilab-4.1.2/bin/scilab /usr/local/bin/scilab
```

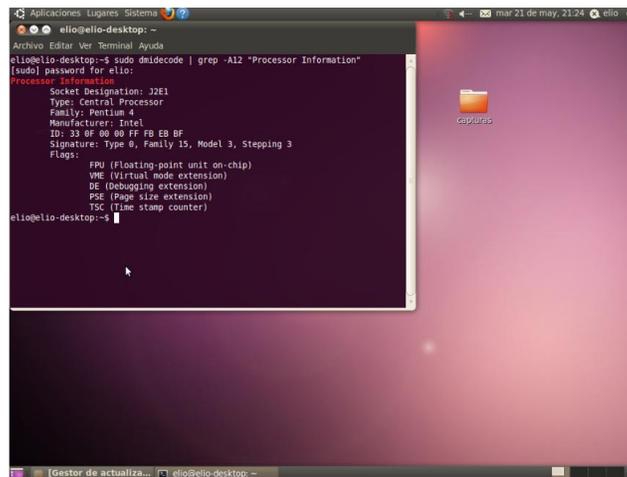
- **Para poder manejar rtail de SCILAB se instala librerías de QRTaiLab que son plugins de SCILAB:**

```
> cd /usr/local/src
> sudo svn co https://qrtailab.svn.sourceforge.net/svnroot/qrtailab/trunk qrtailab
> cd /usr/local/src
> sudo wget http://downloads.sourceforge.net/qrtailab/QRtaiLab-0.1.12.tar.gz
> sudo tar xvzf QRtaiLab-0.1.12.tar.gz
> cd /usr/local/src/qrtailab
> sudo qmake-qt4
> sudo make
> sudo make install
```

- **Finalmente para poder realizar una programación con una interfaz gráfica que nos brinda XCOS, tenemos que instalar unas librerías de HART Toolbox :**

```
> svn co https://hart.svn.sourceforge.net/svnroot/hart/trunk hart
> wget http://dfn.dl.sourceforge.net/sourceforge/hart/hart_0.4.1-src.tar.gz
> tar xvzf hart_0.4.1-src.tar.gz
> make
> cd /.../scilab-xxx/contrib
> sudo ln -s {link to hart-toolbox }
```

- **Propiedades del Procesador**

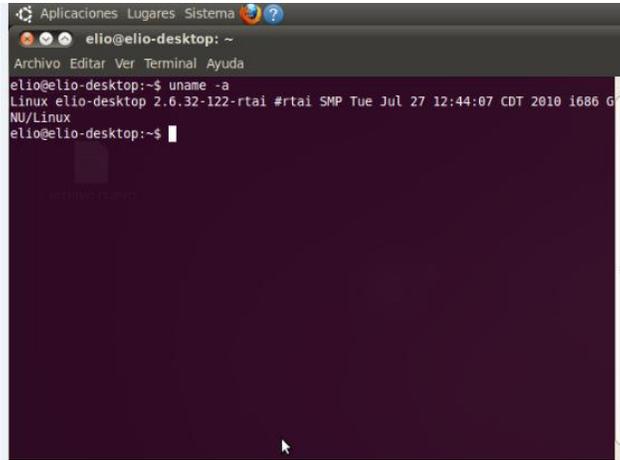


```

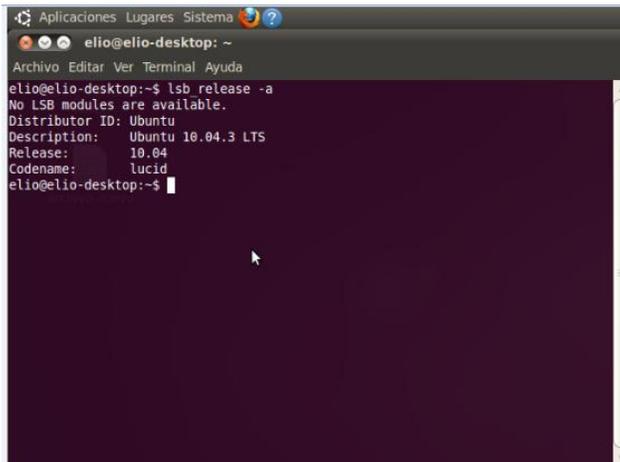
eli@eli-desktop:~$ sudo dmesg | grep -A12 "Processor Information"
[sudo] password for eli:
Processor Information:
Socket Designation: 32E1
Type: Central Processor
Family: Pentium 4
Manufacturer: Intel
ID: 33 0F 00 00 FF FB EB BF
Signature: Type 0, Family 15, Model 3, Stepping 3
Flags:
  FPU (Floating-point unit on-chip)
  VME (Virtual mode extension)
  DE (Debugging extension)
  PSE (Page size extension)
  TSC (Time stamp counter)
eli@eli-desktop:~$

```

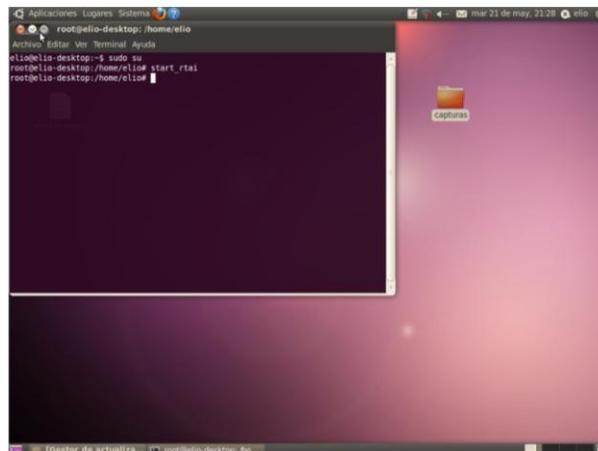
- **Versión de RTAI**



○ Versión de Ubuntu



○ Iniciar RTAI







<b>DOCENTE:</b> Ing. Marco Carpio	<b>NÚMERO DE ESTUDIANTES POR EQUIPO O PRÁCTICA:</b> 1 puesto de trabajo 2 estudiantes por puesto	<b>Fecha:</b> 17 de Diciembre del 2013
<p><b>Tema:</b> <i>Control en tiempo real aplicado a un levitador magnético en una plataforma Linux</i></p> <p><b>Objetivo</b> <i>Implementar un sistema de control en Tiempo Real basado en una plataforma de Software Libre Linux aplicado a un Levitador Magnético.</i></p> <p><b>Objetivo específico:</b> <i>Implementar en un PC de propósito general el Sistema Operativo Linux con capacidades de respuesta en tiempo Real (RTAI-Linux) que presente un ambiente de programación amigable al usuario.</i></p> <p><b>Sustento teórico:</b></p> <p>Se tiene en cuenta que el cerebro del Sistema de Levitación, se encuentra, en el Sistema Operativo Linux, ya que en el mismo es donde se desarrolla el controlador, la base del L.M. Linux, está siendo parte del controlador del sistema, conjuntamente con la placa de adquisición de datos y el drive, pero la tarea específica que cumple éste, es que, en él se desarrolla la, programación, simulación y control.</p> <p>Linux es sistema operativo de multitareas, sin embargo, no garantiza la respuesta en el tiempo de los procesos, a pesar de esto existe diversidad de áreas donde las aplicaciones requieren respuesta en tiempo real, como en la robótica, salud fines, militares y generalmente donde se utilice un control que sea desafiante como el control de un Sistema de Levitación</p> <p><b>RTAI:</b> Es una implementación de Linux para tiempo real basada en RTlinux, que inserta un pequeño kernel de tiempo real abajo del estándar kernel de Linux y trata al kernel de Linux como una tarea con la menor prioridad, adicional a esto RTAI proporciona una amplia selección de protocolos de comunicación entre procesos y servicios de tiempo real.</p> <p><b>SCILAB:</b> Es un software libre desarrollado para que el usuario disponga de un ambiente de programación poderoso en el cual se encuentren herramientas de cálculo numérico, programación y gráficos todo en ese mismo entorno. SCILAB es similar a MATLAB y otros programas de cálculo numérico. Puede ser utilizado en una variedad de sistemas operativos tales como UNIX, Windows, Linux, etc.</p> <p><b>SCICOS:</b> Dentro de Scilab se tiene un entorno que es muy parecido al entorno que presenta simulink dentro de matlab este es SCICOS, el cual brinda la posibilidad de la simulación de varios sistemas, ya que cuenta con paquetes que incluyen herramientas para la simulación de circuitos eléctricos, sistemas de control y termo hidráulica. Para poder ejecutarlo dentro de Scilab basta con escribir el código “scicos”, se abrirá una nueva ventana lista para trabajar.</p>		

**Procedimiento:**

- Para poder ejecutar los procesos dentro del terminal de UBUNTU, es necesario tener privilegios de súper administrador, ya que los códigos a ejecutarse tiene relación directa con el kernel del sistema, para poder manipular RTAI. Esto se logra escribiendo en el terminal "sudo su".

- Una vez que se tienen derechos de súper administrador se inician los módulos de rtai:

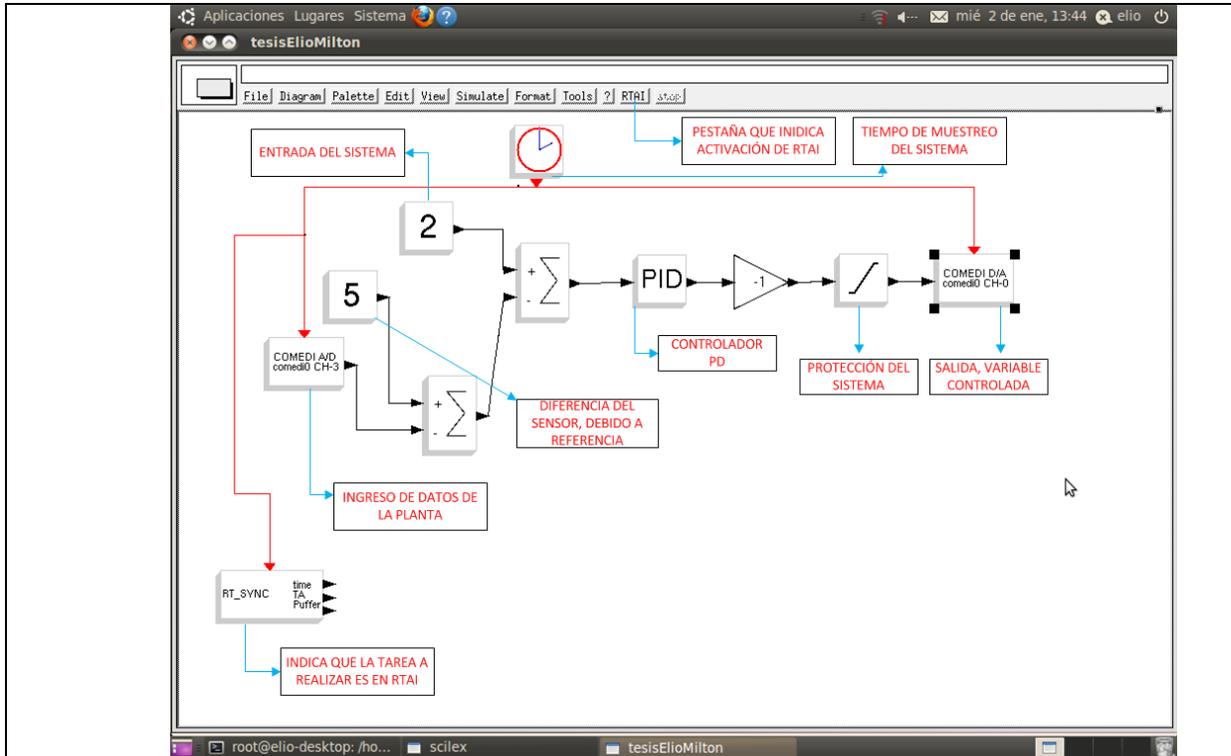
```
# root@elio-desktop:/home/elio# start_rtai
```

Para evitar estar ejecutando los módulos de uno en uno, estos se colocaron dentro un archivo, de tal manera que facilita al usuario al ejecutar un solo archivo con el comando "start\_rtai", que lógicamente aquí se encuentran todos los módulos que trabajan con rtai.

- El siguiente paso es cargar los drivers de la tarjeta pci que se está utilizando, para lo cual, se ejecuta el archivo "load\_daq", de la misma manera, dentro de este se encuentra los drivers de la tarjeta. Ver Figura 46 "Cargar Drivers del PCI"

```
# root@elio-desktop:/home/elio# load_daq
```

- Una vez se hayan cumplido todos los comandos, SCILAB está listo para ser ejecutado, recalcando que dentro de SCILAB se tiene que ejecutar el módulo HART, que es un módulo que permite interoperabilidad entre SCILAB y rtai.
- Una vez realizado estos pasos se abre el archivo con lo que se debería obtener la siguiente pantalla:



### Recursos (Accesorios y Material fungible):

Los recursos y materiales ocupados en la realización de esta práctica son todos materiales NO FUNGIBLES A CORTO PLAZO.

### Registro de Resultados:

**ESTADO ESTACIONARIO:** La respuesta real del sistema, la misma que no varía con el tiempo, ya que a la entrada se le da un Set Point constante, manteniéndose estable en una determinada posición, y se obtiene valores aproximados a la referencia. Donde se puede observar una respuesta y un valor constante de la corriente en el electroimán.

**SEÑALES VARIANTES EN EL TIEMPO:** La entrada o set Point que se dé al sistema puede ser constante, o puede ser una señal que varíen el tiempo como puede ser una onda cuadrada o sinusoidal, obteniéndose en cada caso una variación en la posición en la que levita el objeto ferromagnético pero con la consideración que ya no se mantendrá estático sino que variará de acuerdo a las variaciones en la entrada. Según sea la entrada se tendrá una variación brusca o levemente suave de acuerdo a señales de cambio brusco como lo es el escalón o señales suavizadas como lo es la sinusoidal.

**PERTURBACIONES MECÁNICAS:** La entrada o referencia recomendada es un Set Point, ya que las variaciones serán externas, se debe notar que el electroimán se esfuerce mas por mantener el objeto en levitación esto mediante el osciloscopio al notar el aumento de corriente con perturbación versus la corriente normal sin perturbación.

**Bibliografía:**

- [1] T. Cruz y M. José, «Diseño e implementación de un sistema de control web para un levitador magnético en la Universidad Nueva Esparta», 2011.
- [2] «Control lineal y no lineal de un levitador magnetico.pdf (objeto application/pdf)». .