



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**CARRERA: INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

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

**TEMA:**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN LEVITADOR  
ELECTRO-MAGNÉTICO BASADO EN UN  
CONTROL PID UTILIZANDO  
LABVIEW”**

**AUTORES:**

**JAVIER ANDRÉS GUIJARRO SOLÓRZANO  
JISSELA TATIANA VIVAR MARTÍNEZ**

**DIRECTOR:**

**ING. VICENTE PEÑARANDA**

**GUAYAQUIL, MAYO DE 2015**

## **DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD**

Todos los conceptos, análisis y conclusiones desarrollados del presente trabajo de titulación son responsabilidad de los autores y propiedad intelectual de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, marzo de 2015

(f) \_\_\_\_\_  
Javier Guijarro Solórzano

(f) \_\_\_\_\_  
Jissela Vivar Martínez

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a Dios, base fundamental para mi crecimiento como persona y profesional, porque siempre me acompaña y me da fuerzas para salir adelante.

A mis maravillosos padres, ejemplo vivo de perseverancia y esfuerzo, por guiarme y saberme enseñar lo que es una familia de verdad y ayudarme a superar esta gran meta, una más en el camino de la vida.

A las personas que me apoyaron durante el transcurso de mi proceso educativo, porque me hicieron sentir que no estaba solo.

Javier Andrés Guijarro Solórzano

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a Dios y a la Virgen Santísima quienes inspiraron mi conocimiento para la culminación de mi carrera universitaria, ya que me brindaron la fortaleza para continuar y no darme por vencida en algún momento inestable.

A mis padres y hermano quienes depositaron su confianza y siempre me han inculcado sentimientos y valores sanos lo cual me ha servido para seguir adelante con mis estudios.

A mis familiares en general que a través de sus consejos y apoyo incondicional me alentaban para seguir con mi carrera.

A mis amigos quienes me ayudaron con sus opiniones para el desarrollo de éste trabajo.

A todos quienes con paciencia y humildad formaron parte de este proceso educativo, pues son quienes me dieron su apoyo absoluto para finalizar esta etapa estudiantil.

Jissela Tatiana Vivar Martínez.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis padres por ayudarme y estar conmigo siempre en los buenos y malos momentos, por la confianza que han depositado en mí.

A las personas que directa o indirectamente han aportado con conocimiento o ideas a esta tesis, cada opinión ha sido importante para el desarrollo de la misma.

Javier Andrés Guijarro Solórzano

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por haberme brindado una familia maravillosa y permitir tenerlos junto a mí brindándome su apoyo y fortaleza.

A mis padres que han creído en mí y han estado siempre juntos dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio.

A mi hermano, quien confió en mí y me ha brindado su apoyo incondicional.

A todos quienes han formado parte de mi carrera universitaria, porque sin su contribución y ayuda continua no fuera posible culminar esta etapa.

Jissela Tatiana Vivar Martínez.

# ÍNDICE GENERAL

<b>DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>II</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>III</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>V</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>XII</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XIV</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I. EL PROBLEMA</b> .....	<b>2</b>
1.1 Planteamiento del problema. ....	2
1.2 Delimitación del problema. ....	2
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo general. ....	3
1.3.2 Objetivos específicos .....	3
1.4 Justificación.....	3
1.5 Variables e indicadores .....	4
1.5.1 Variables. ....	4
1.5.2 Indicadores. ....	4
1.6 Metodología .....	5
1.6.1 Métodos.....	5
1.6.1.1 Método Deductivo.....	5
1.6.1.2 Método Inductivo. ....	5

1.6.2 Técnicas.....	5
1.6.2.1 Técnicas matemáticas.....	5
1.6.2.2 Técnica de localización de raíces.....	5
1.6.3 Instrumentos.....	5
1.6.3.1 Instrumento de Investigación.....	5
1.7 Población y muestra .....	6
1.7.1 Población.....	6
1.7.2 Muestra.....	6
1.8 Descripción de la propuesta .....	6
1.8.1 Beneficiarios .....	6
1.8.2 Impacto.....	6
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
2.1 Antecedentes .....	7
2.2 Fundamentación Teórica.....	7
2.2.1 Principios y teoría del electromagnetismo .....	7
2.2.2 Electroimán.....	8
2.2.3 Teoría de Control .....	9
2.2.4 Root Locus, método de localización de raíces .....	10
2.2.5 Controlador PID.....	11
2.2.6 El PID Lead-Lag VI.....	13
2.2.7 Adquisición de datos .....	14
2.2.7.1 Funcionamiento.....	14
2.2.8 Foto resistencia.....	15
<b>CAPÍTULO III. DESARROLLO DEL PROYECTO .....</b>	<b>16</b>
3.1 Introducción al Desarrollo.....	16
3.2 Implementación.....	17
3.3 Ecuaciones magnéticas.....	18

3.4 Linealización.....	20
3.5 Modelado del Sistema.....	24
3.6 Estabilidad del sistema de levitación.....	27
3.7 Método experimental para la obtención de constantes.....	30
Procedimiento para obtención de constante $k_{fl}$ .....	30
Procedimiento para obtención de constante $T_0$ .....	31
Procedimiento para obtención de constante $k_f$ .....	32
Procedimiento para obtención de constante $k_o$ .....	33
Procedimiento para obtención de constante $k_x$ .....	34
3.8 Diseño y Construcción del electroimán.....	36
3.9 Diseño y Construcción de adaptación electrónica.....	38
3.10 Montaje de elementos.....	40
3.11 Desarrollo de aplicación.....	41
<b>CAPÍTULO IV. PRÁCTICAS TUTORIALES.....</b>	<b>46</b>
Práctica 1: Determinación de parámetros del electroimán.....	46
Práctica 2: Control de Estabilidad con compensador P.....	49
Práctica 3: Control de Estabilidad con Compensador PI.....	51
Práctica 4: Control de Estabilidad con Compensador PD.....	55
Práctica 5: Control de Estabilidad con Compensador PID.....	58
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>61</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>62</b>
<b>CRONOGRAMA.....</b>	<b>63</b>
<b>PRESUPUESTO.....</b>	<b>64</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>67</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Imagen del levitador electromagnético.....	4
<b>Figura 2.1</b> Partes de un Electroimán. ....	9
<b>Figura 2.2</b> Sistema de la planta. ....	9
<b>Figura 2.3</b> Implementación del controlador Proporcional.....	11
<b>Figura 2.4</b> Implementación del Controlador Integral.....	12
<b>Figura 2.5</b> Implementación del Controlador Derivativo.....	12
<b>Figura 2.6</b> PID Lead Lag VI.....	13
<b>Figura 2.7</b> Esquema general de adquisición de datos .....	14
<b>Figura 2.8</b> Diagrama de conexiones.....	14
<b>Figura 2.9</b> Foto resistencia.....	15
<b>Figura 3.1</b> Diagrama general.....	17
<b>Figura 3.2</b> Secciones del circuito. ....	17
<b>Figura 3.3</b> Diagrama de cuerpo libre. ....	20
<b>Figura 3.4</b> Diagrama en punto de equilibrio.. ....	23
<b>Figura 3.5</b> Lazo de control cerrado.....	25
<b>Figura 3.6</b> Función de transferencia d un sistema L-R en serie.....	25
<b>Figura 3.7</b> Diagrama en lazo abierto del sensor.....	26
<b>Figura 3.8</b> Función de transferencia de la planta G(s) completa.....	26
<b>Figura 3.9</b> Sistema compensador.....	28
<b>Figura 3.10</b> “Control and Estimation Tool Manager de Matlab”.....	28
<b>Figura 3.11</b> Root Locus de lazo cerrado con valores de PID.....	29
<b>Figura 3.12</b> Grafico de parámetros del sistema de control.....	29
<b>Figura 3.13</b> Bloque controlador C(s) y planta G(s).....	30
<b>Figura 3.14</b> Gráfico de constante $k_{r1}$ .....	31
<b>Figura 3.15</b> Medición de la constante $\tau_0$ con osciloscopio.....	31
<b>Figura 3.16</b> Gráfico de constante $k_f$ .....	33
<b>Figura 3.17</b> Gráfico de constante $k_o$ .....	34
<b>Figura 3.18</b> Gráfico de constante $k_x$ .....	35
<b>Figura 3.19</b> Gráfico de la maqueta con estructura móvil.....	35
<b>Figura 3.20</b> Gráfico del electroimán.....	36
<b>Figura 3.21</b> Dimensiones del carrito.....	37

<b>Figura 3.22</b> Dimensiones del electro imán.....	37
<b>Figura 3.23</b> Carrete bobinado.....	38
<b>Figura 3.24</b> Adaptación electrónica de entrada.....	38
<b>Figura 3.25</b> Adaptación electrónica de salida.....	39
<b>Figura 3.26</b> Tarjeta PCB de adaptación electrónica.....	39
<b>Figura 3.27</b> Tarjeta PCB en 3D.....	40
<b>Figura 3.28</b> Vista lateral de la maqueta.....	40
<b>Figura 3.29</b> Maqueta de aluminio y acrílico.....	41
<b>Figura 3.30</b> Pantalla principal.....	41
<b>Figura 3.31</b> Salto de VI.....	42
<b>Figura 3.32</b> 3D Picture.....	42
<b>Figura 3.33</b> Creación de objetos.....	42
<b>Figura 3.34</b> Muestreo de señales.....	43
<b>Figura 3.35</b> Práctica con imagen en 3D.....	43
<b>Figura 3.36</b> Bloque de control.....	44
<b>Figura 3.37</b> Filtro de señal.....	44
<b>Figura 3.38</b> Corriente de salida.....	45
<b>Figura 4.1</b> Sensor en voltios.....	46
<b>Figura 4.2</b> Distancia de Objeto.....	47
<b>Figura 4.3</b> Corriente del electroimán.....	47
<b>Figura 4.4</b> Voltaje DAQ.....	48
<b>Figura 4.5</b> Localización de raíces.....	50
<b>Figura 4.6</b> Respuesta del sistema al escalón.....	51
<b>Figura 4.7</b> Grafico de ubicación de raíces.....	52
<b>Figura 4.8</b> Movimientos de las raíces.....	53
<b>Figura 4.9</b> Características del sistema.....	54
<b>Figura 4.10</b> Movimiento del cero del compensador $C(s)$ .....	56
<b>Figura 4.11</b> Grafico del dominio del tiempo.....	56
<b>Figura 4.12</b> PID en lazo cerrado.....	58
<b>Figura 4.13</b> Ajustes de raíces.....	58
<b>Figura 4.14</b> Características del sistema.....	59

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Tabla de datos obtenida para la constante $K_{r1}$ .....	30
<b>Tabla 2</b>	Tabla de datos obtenida para la constante $K_f$ .....	32
<b>Tabla 3</b>	Tabla de datos obtenida para la constante $K_o$ .....	33
<b>Tabla 4</b>	Presupuesto de gastos realizados para el diseño del proyecto.....	60

## RESUMEN

AÑO	ALUMNOS	DIRECTOR DE TESIS	TEMA DE TESIS
2015	JAVIER ANDRÉS GUIJARRO SOLÓRZANO  JISSELA TATIANA VIVAR MARTÍNEZ	ING. VICENTE PEÑARANDA	“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN LEVITADOR ELECTRO-MAGNÉTICO BASADO EN UN CONTROL PID UTILIZANDO LABVIEW”

La presente tesis: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN LEVITADOR ELECTRO-MAGNÉTICO BASADO EN UN CONTROL PID UTILIZANDO LABVIEW”**, consiste en el análisis del control de un sistema no lineal mediante la aplicación práctica en un sistema de levitación. Este se basa en un detallado análisis teórico que aplica técnicas de linealización y control PID para luego proceder a su implementación utilizando Labview, una foto resistencia y una tarjeta de adquisición de datos 6009 como interfaz entre el medio físico y el software.

Se realiza prácticas tutoriales para que los alumnos de la Universidad Politécnica Salesiana puedan entender conceptos teóricos y desarrollar los procedimientos aquí planteados, despertando el interés del estudiante por el análisis de sistemas de control utilizando herramientas de análisis teórico como root-locus y aplicación práctica de conocimiento adquiridos durante el proceso educativo.

Los resultados se muestran en un capítulo de desarrollo para que el estudiante pueda leer y entender los procedimientos matemáticos de forma precisa.

### **PALABRAS CLAVES**

Sistema no lineal, levitación, PID, Labview, tarjeta 6009.

## ABSTRACT

YEAR	STUDENTS	DIRECTOR OF THESIS	THESIS TOPIC
2015	JAVIER ANDRÉS GUIJARRO SOLÓRZANO  JISSELA TATIANA VIVAR MARTÍNEZ	ING. VICENTE PEÑARANDA	"DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN ELECTRO-MAGNETIC LEVITATOR BASED ON A PID CONTROL USING LABVIEW"

This thesis: "DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN ELECTRO-MAGNETIC LEVITATOR BASED ON PID CONTROL USING LABVIEW" consists in analyzing the control of a nonlinear system through practical application in levitation system on an axis. This is based on a detailed theoretical analysis applying linearization techniques PID control and then proceed to implementation using Labview, a photo resistance and a data acquisition card 6009 as an interface between the physical environment and software.

Practical tutorials are performed by students of the Universidad Politécnica Salesiana to understand theoretical concepts and develop procedures raised, arousing student interest in the analysis of control systems using theoretical tools as root-locus analysis and practical application of knowledge acquired during the educational process.

The results are shown in a chapter of development for the student to read and understand mathematical procedures accurately.

### KEYWORDS

Nonlinear system, levitation, PID, Labview, data acquisition card 6009.

# INTRODUCCIÓN

El siguiente proyecto de titulación trata del diseño e implementación de un levitador electromagnético basado en un control PID utilizando el programa de Labview.

El propósito de este proyecto es guiar al estudiante a la comprensión de temas teóricos de control por medio de una aplicación práctica, donde abarca una serie de temas específicos los cuales han sido seleccionados por su nivel de importancia en el entendimiento de los fenómenos que se presentan en el desarrollo de este trabajo de titulación, de tal forma que el estudiante tenga una fuente de información confiable que ayude a la consulta de los temas aquí expuestos.

En el **Capítulo 1** se describe los hechos preliminares tales como: el planteamiento y delimitación del problema, objetivos, justificación, metodologías, técnicas, beneficiarios e impacto del proyecto entre otros.

En el **Capítulo 2** se detalla los tópicos más relevantes para el desarrollo del proyecto dando a conocer teorías fundamentales y elementos específicos del proyecto en mención.

En el **Capítulo 3** se realiza un análisis general del modelamiento de los parámetros que intervienen en el sistema de levitación detallando paso a paso el desarrollo del levitador electromagnético y su determinado control PID.

En el **Capítulo 4** se realiza prácticas tutoriales para que el estudiante pueda seguir los procedimientos planteados desde un principio teórico sólido hacia prácticas de los temas expuestos.

# **CAPÍTULO I. EL PROBLEMA**

## **1.1 Planteamiento del problema.**

En la actualidad la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, se encuentra en una mejora continua de sus laboratorios aumentando módulos didácticos y dinámicos para que los estudiantes puedan fortalecer sus conocimientos teóricos realizando prácticas de procesos reales y poder así despejar interrogantes que se generan en el transcurso del semestre.

En la universidad los laboratorios existentes de la carrera de ingeniería electrónica han adquirido diversos módulos de aprendizaje abarcando varios contextos teóricos pero proveen de mínima aplicación de conceptos y conocimientos de control PID, por ésta razón los autores deciden implementar un levitador electromagnético donde los estudiantes pueden experimentar, verificar y comparar los conocimientos teóricos adquiridos en clases.

## **1.2 Delimitación del problema.**

El módulo didáctico del sistema de levitación electromagnético se desarrolla para uso del laboratorio de Teoría de Control de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil ubicada en las Calles Chambers entre 5 de Junio y Callejón Daule.

Se realiza el diseño del Sistema de levitación electromagnético aplicando Técnicas de Control Clásico y se usa métodos experimentales para hallar la función de transferencia (Planta) que rige el sistema, buscando estabilizar el levitador a través de un controlador.

Para la implementación del sistema se utiliza una tarjeta de adquisición de datos 6009, software Labview Edición estudiantil, un electroimán con una bobina tipo solenoide y núcleo compuesto por acero con bajo contenido de carbón envuelto con alambre de cobre esmaltado, una foto resistencia para detectar la posición del objeto a levitar, componentes eléctricos, electrónicos y demás elementos necesarios para la construcción del módulo.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general.**

Diseñar e implementar un Levitador Electro-magnético basado en un control PID utilizando Labview para los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil.

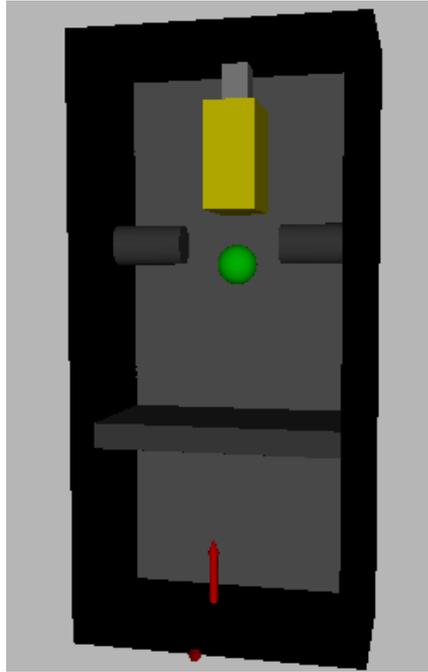
### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Construir un electroimán usando una bobina tipo solenoide.
- Utilizar la tarjeta 6009 como interfaz de entradas y salidas de datos entre el software Labview y el sistema de levitación.
- Diseñar una estructura de control en lazo cerrado para la obtención de un sistema estable aplicando PID.
- Crear un sistema interfaz de usuario en Labview donde permita la interacción dinámica entre el usuario y el sistema de Levitación.
- Elaborar 5 prácticas didácticas en la cual el estudiante interactúe con el sistema de levitación. Las prácticas a desarrollarse son:
  1. Determinación de parámetros del electroimán.
  2. Análisis de estabilidad con Compensador P.
  3. Análisis de estabilidad con Compensador PI.
  4. Análisis de estabilidad con Compensador PD.
  5. Análisis de estabilidad con Compensador PID.

## **1.4 Justificación**

Debido a la continua mejora de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil frente a los desarrollos tecnológicos en sus laboratorios, se decide diseñar e implementar un levitador electromagnético basado en un control PID en el laboratorio de Control, observar figura 1.1.

Esta implementación permite al estudiante consolidar los conocimientos teóricos teniendo la facilidad de manipular con Labview el cual permita la interacción dinámica entre el usuario y el sistema de Levitación.



**Figura 1.1** Imagen del levitador electromagnético. Momento en que el sistema encuentra su punto de equilibrio obteniendo estabilidad del objeto al levitar.

## 1.5 Variables e indicadores

### 1.5.1 Variables:

- Corriente
- Voltaje
- Distancia

### 1.5.2 Indicadores:

**Corriente:** Parámetro Eléctrico en unidades de Amperios [A] utilizada para controlar la fuerza magnética en el electro imán.

**Voltaje:** Parámetro Eléctrico en unidades de voltios [V] utilizado para medir la diferencia de potencial en el circuito eléctrico de fuerza como señal de entrada al módulo de adquisición de datos.

**Distancia:** Parámetro de retroalimentación, lectura que define la longitud [mm] desde la base del electro imán hasta la parte superior del objeto a levitar.

## **1.6 Metodología**

Para el desarrollo del sistema de levitación electromagnético se han usado los siguientes métodos, técnicas e instrumentación:

### **1.6.1 Métodos.**

#### **1.6.1.1 Método Deductivo:**

El método deductivo nos permite tener un enfoque general de los temas que conllevan el desarrollo de este proyecto, relacionándolo con los conocimientos adquiridos en el transcurso de la carrera de Ingeniería Electrónica.

#### **1.6.1.2 Método Inductivo:**

Se utiliza el método inductivo para partir de los principios del comportamiento de la fuerza magnética, lo que conlleva a un análisis más amplio debido a la no linealidad que provoca en el sistema de levitación.

### **1.6.2 Técnicas.**

#### **1.6.2.1 Técnicas matemáticas:**

Debido al comportamiento no lineal del sistema de levitación, se utiliza técnicas matemáticas de Taylor para linealizar la ecuación que gobierna al sistema de levitación.

#### **1.6.2.2 Técnica de localización de raíces:**

Para el análisis de estabilidad del sistema se utiliza la técnica de control clásico.

### **1.6.3 Instrumentos.**

#### **1.6.3.1 Instrumento de Investigación:**

Para el instrumento de investigación se utiliza como guía el libro de FEEDBACK CONTROL OF DYNAMIC SYSTEMS, Sexta Edición, autor Gene F. Franklin, D. Powell, Abbas Emami-Naeini.

## **1.7 Población y muestra**

### **1.7.1 Población**

Para el desarrollo de la aplicación del levitador electromagnético se toma como población a todos los estudiantes de la carrera de Ingeniería electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana.

### **1.7.2 Muestra**

Para el desarrollo de la aplicación del levitador electromagnético se toma como muestra a los estudiantes que cursan la materia de Teoría de Control y hacen uso del laboratorio.

## **1.8 Descripción de la propuesta**

Este proyecto se trata del diseño e implementación de un levitador electromagnético basado en un control PID utilizando Labview y como herramienta de adquisición de datos la tarjeta 6009.

Para la implementación de la aplicación se utiliza Labview Edición Estudiantil donde se realiza el programa y la interfaz para la interacción dinámica entre el usuario y la aplicación, un electroimán con una bobina tipo solenoide y un núcleo de acero con bajo contenido de carbón envuelto con alambre de cobre esmaltado, foto resistencia para detectar la posición del objeto a levitar, componentes eléctricos, electrónicos y elementos necesarios para la construcción del módulo. Adicional se proporcionan 5 prácticas para el desarrollo de

### **1.8.1 Beneficiarios**

El presente trabajo de titulación se dirige a los estudiantes de la carrera de ingeniería electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana.

### **1.8.2 Impacto**

Se brinda al estudiante una visión práctica y sencilla de un control no lineal por medio de una aplicación real, de manera que el estudiante observa de forma didáctica conceptos teóricos despertando la curiosidad por experimentar con estos.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes

Jordan (2010) indica que en 1800, el Italiano Alessandro Volta fue el inventor de la pila eléctrica y es donde tuvo su origen el electromagnetismo pero veinte años más tarde el físico danés Hans Christian Oersted descubrió el campo magnético empujando en forma accidental una brújula que se encontraba bajo un alambre conectado a una pila, el cual conducía una corriente eléctrica continua, observando como la aguja realizaba un giro de  $90^\circ$  para colocarse perpendicularmente al alambre, obteniendo como resultado que además de conducir electricidad, generaba a su alrededor una fuerza parecida a la de un imán. Posteriormente, el científico francés André Marie Ampere (1775-1836) descubrió que el campo magnético se intensificaba al enrollar el alambre conductor en forma de bobina. Luego de esto, el profesor estadounidense, Joseph Henry realiza el descubrimiento de los motores eléctricos y en 1821 se construyó el primer motor experimental por medio del físico Michael Faraday.

### 2.2 Fundamentación Teórica.

#### 2.2.1 Principios y teoría del electromagnetismo

Jordan (2010) indica que el electromagnetismo describe fenómenos físicos macroscópicos en los cuales intervienen las partículas cargadas con campos eléctricos y magnéticos, éstos se dividen en:

*Electroestática.* Es el estudio de las intervenciones entre cargas en reposo.

*Electrodinámica.* Es el estudio de las interacciones entre cargas en movimiento y la radiación.

La teoría del electromagnetismo es basada en la Fuerza de Lorentz y en las ecuaciones de Maxwell, esta es una teoría de campos que se considera el mayor logro de la Física del siglo 19; es decir, las explicaciones y predicciones que provee se basan en magnitudes físicas vectoriales o tensoriales dependientes de la posición en el espacio y del tiempo.

Las aplicaciones en la que se puede encontrar los principios electromagnéticos son las microondas, antenas, máquinas eléctricas, comunicaciones por satélite, bioelectromagnetismo, plasmas, investigación nuclear, la fibra óptica, la interferencia y la compatibilidad electromagnéticas, la conversión de energía electromecánica, la meteorología por radar y la observación remota.

### **2.2.2 Electroimán.**

“Se denomina electroimán al dispositivo u objeto que tiene la propiedad de adquirir propiedades magnéticas cuando su bobina es atravesada por una corriente eléctrica (...) transforma, de manera sencilla y eficaz para esto la energía eléctrica se convierte en mecánica” (Pulido, 2010)

Pulido (2010) explica que:

El tratamiento de los imanes naturales y los electroimanes es similar, unos tienen propiedades magnéticas permanentes (los imanes naturales) y los otros estas propiedades la adquieren en tanto esté circulando una corriente eléctrica por su bobina, pero una vez que los dos tienen propiedades magnéticas, su comportamiento y el tratamiento que hay que darles es el mismo (líneas de fuerza, polos, dirección del campo magnético, etc.).

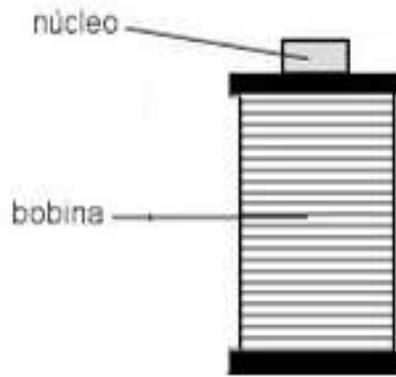
Con respecto a la electricidad se produce magnetismo en un electroimán cuando transporta corriente por las espiras de alambre envuelto en el núcleo magnético (Harper, 2004).

Fink , Beaty, & Carroll (1981) indica que los electroimanes son imanes que tienen cualidades magnéticas solo cuando hay fuerza magnetizante producida por una corriente eléctrica.

Las dos partes más importantes de un electroimán son:

*Circuito eléctrico:* El circuito eléctrico se encuentra formado únicamente por la bobina.

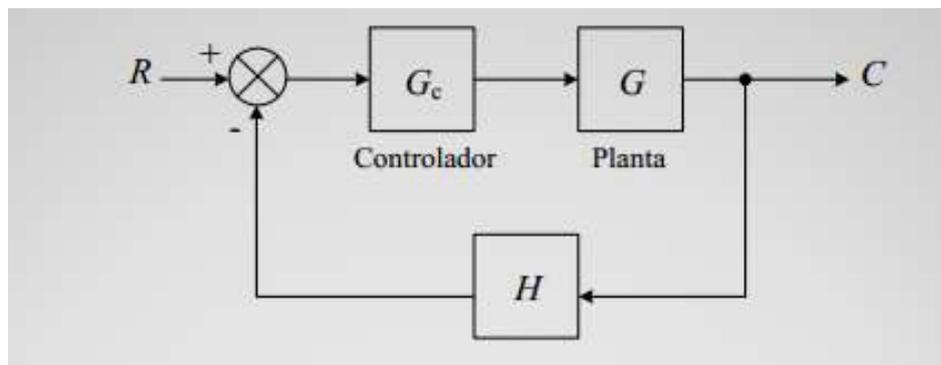
*Circuito magnético:* El circuito magnético se encuentra formado por la chapa magnética, la cual se compone de una parte fija y una parte móvil. Véase a continuación en la figura 2.1:



**Figura 2.1** Partes de un Electroimán. El electroimán está compuesto por un circuito eléctrico y un circuito magnético.

### 2.2.3 Teoría de Control

Lira Pérez & Núñez Gutiérrez (s.f.) indica que en su forma más básica nos indica que un sistema de control con retroalimentación negativa puede ser representado bajo el esquema mostrado en la siguiente figura 2.2.



**Figura 2.2** Sistema de la planta. Se observa la forma básica de un sistema de control con retroalimentación negativa. Por (Lira Pérez & Núñez Gutiérrez, s.f.)

$G$  es la función que caracteriza la planta.  $G(s)$  es la función del controlador (en nuestro caso será un PID), y  $H$  es la función de retroalimentación (en nuestro caso será la ganancia del sensor de foto resistencia).

La función de transferencia de lazo cerrado es  $\frac{C}{R} = \frac{G_c G}{1 + G_c G H}$  y los polos de lazo cerrado son las raíces de la ecuación característica  $1 + G_c G H = 0$ .

El lugar de las raíces muestra cómo esos polos se mueven en el plano “s”. Si los polos están en el lado derecho estos son inestables y deben ser estabilizados. Polos en el lado izquierdo son estables y no requieren compensación.

### 2.2.4 Root Locus, método de localización de raíces

Lira Pérez & Núñez Gutiérrez (s.f.) indica que los polos de lazo cerrado son las raíces de la ecuación característica  $1 + G_cGH = 0$ .

Se puede interpretar como que ambos lados son vectores en el plano s.

El vector -1 es un vector del origen al punto -1 en el eje real negativo. Este vector tiene una longitud o magnitud unitaria y un ángulo de fase que es un múltiplo impar de  $\pm 180^\circ$ , ó  $\pm(2i + 1)180^\circ$ , donde i es un entero. Por lo tanto, los polos de lazo cerrado son los valores de s para los cuales el vector  $G_cGH$  tiene una longitud unitaria y un ángulo de fase de  $\pm(2i + 1)180^\circ$ . Asumiendo que K es positiva.

$$\text{magnitud } (G_cGH) = K \frac{A_1 A_2 \dots A_m}{B_1 B_2 \dots B_n}$$

$$\text{fase } (G_cGH) = \alpha_1 + \dots + \alpha_m - \beta_1 - \dots - \beta_n$$

Por lo tanto, los polos de lazo cerrado son los valores de s que satisfacen las siguientes condiciones:

1. Condición de ángulo:

$$\text{fase } (G_cGH) = \alpha_1 + \dots + \alpha_m - \beta_1 - \dots - \beta_n = \pm(2i + 1)180^\circ$$

2. Condición de magnitud:

$$\text{magnitud } (G_cGH) = K \frac{A_1 \dots A_m}{B_1 \dots B_n} = 1 \text{ o } K = \frac{B_1 \dots B_n}{A_1 \dots A_m}$$

El lugar de las raíces se construye sólo a partir de la condición de ángulo, como el lugar de todos los puntos s para los cuales la suma de los ángulos de los vectores  $a_i$  de todos los ceros de lazo abierto a s, menos la suma de los ángulos de los vectores  $\beta_k$  de todos los polos de lazo abierto a s es igual a un múltiplo impar de  $\pm(2i + 1)180^\circ$

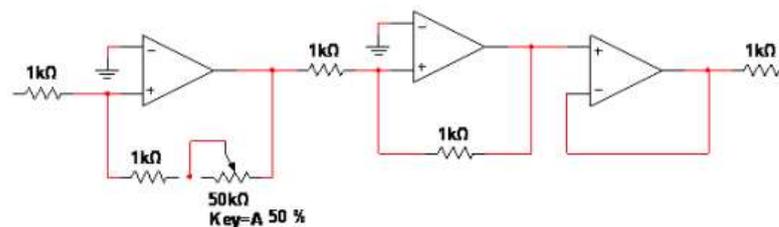
Después de que el lugar de las raíces se ha construido, la condición de magnitud muestra que el valor de K para el cual un polo de lazo cerrado será localizado en un punto dado s, será igual al producto de las longitudes de los vectores  $A_i$  de todos los ceros de lazo abierto a s.

### 2.2.5 Controlador PID.

Ortiz, y otros (2014) indica que un controlador PID es un control con retroalimentación que calcula el error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso. El algoritmo de cálculo del controlador PID se da en tres parámetros distintos: Proporcional, Integral y Derivativo.

*Aporte Proporcional:* indica que el aporte proporcional consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional para lograr que el error en estado estable se aproxime a cero, ver en la figura 2.3. En el aporte proporcional se presenta la forma matemática y la implementación del controlador Proporcional de la siguiente manera:

$$P_{sal} = k_p e(t)$$

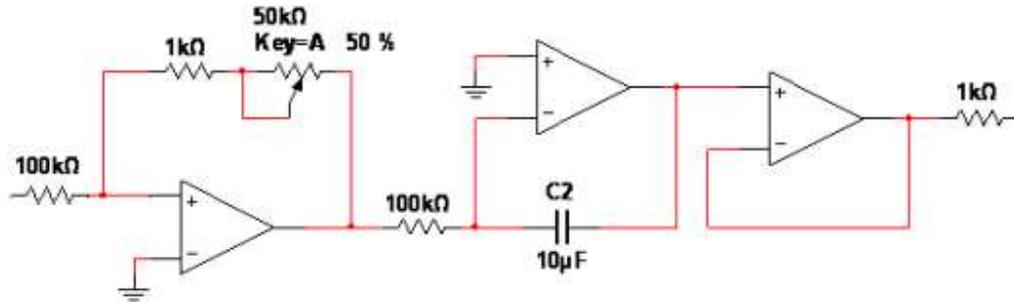


**Figura 2.3** Implementación del controlador Proporcional. Se observa la simulación del aporte Proporcional mediante amplificadores operacionales. Por Ortiz, y otros, 2014.

*Aporte Integral:* indica que el aporte Integral es el parámetro que elimina el error de estado estable, éste actúa cuando existe alguna desviación entre la variable y el punto de trabajo deseado, integrando esta derivación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional. El error es integrado, lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un período determinado para luego el valor resultante multiplicarlo con la constante  $k_i$ .

A continuación se observa la forma matemática y en la figura 2.4 la implementación del controlador Integral.

$$I_{sal} = k_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

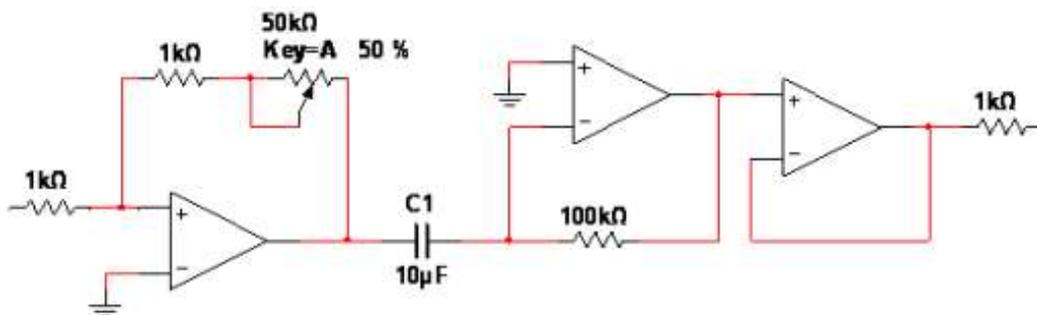


**Figura 2.4** Implementación del Controlador Integral. Se observa la simulación del aporte Integral mediante amplificadores operacionales. Por Ortiz, y otros, 2014

*Aporte Derivador:* indica que la función de actuación del derivador es corregir el error de la manera más rápida posible para evitar que el error incremente. Por esta razón si la ganancia del término derivación es alta se obtiene un proceso inestable y si la ganancia del término derivación es muy pequeño el proceso es oscilante.

Por consiguiente se muestra la forma matemática del aporte derivativo y la implementación del Controlador Derivativo en la figura 2.5.

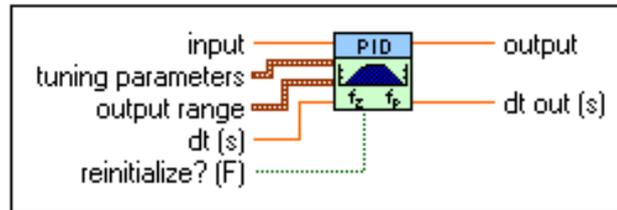
$$D_{sal} = k_d \frac{de}{dt}$$



**Figura 2.5** Implementación del Controlador Derivativo. Se observa la simulación del aporte Derivativo mediante amplificadores operacionales. Por Ortiz, y otros, 2014.

## 2.2.6 El PID Lead-Lag VI

Instruments (s.f) indica que un PID Lead Lag VI implementa un controlador PID con una función de avance / retardo y éste se lo utiliza como un compensador dinámico en los esquemas de control anticipativo.



**Figura 2.6** PID Lead Lag VI. Ilustración de las entradas y salidas un bloque PID lead lag.

Instruments (s.f) a continuación indica el significado de cada parámetro:

- **input** especifica el valor de entrada.
- **tuning parameters** especifica los parámetros de ajuste.
- **gain** especifica la ganancia DC. El valor predeterminado es 1. Ajuste la ganancia a un valor negativo produce un amplificador inversor con un turno adicional de fase de 180 grados.
- **lag time** especifica el retardo de fase en cuestión de minutos. Un valor de cero desactiva el retardo.
- **lead time** especifica el adelanto de fase en cuestión de minutos. Un valor de cero desactiva el plomo. Los grandes valores de tiempo de plomo podrían dar lugar a una oscilación natural de la salida.
- **output range** de salida especifica el rango al que coaccionar a la salida de control. El rango predeterminado es de -100 a 100, lo que corresponde a los valores especificados en términos de porcentaje de la escala total.
- **output high** especifica el valor máximo de la salida del controlador. El valor predeterminado es 100.
- **output low** especifica el valor mínimo de la salida del controlador. El valor predeterminado es -100.
- **output** devuelve la salida de control del algoritmo PID que se aplica al proceso controlado.

## 2.2.7 Adquisición de datos

Se conoce como Adquisición de datos (DAQ) al proceso de medir un fenómeno físico o eléctrico como el voltaje, corriente temperatura presión o sonido a través de una PC. Instruments (s.f).



**Figura 2.7** Esquema general de adquisición de datos. Ejemplos de equipos / dispositivos que se usan en un sistema de Adquisición de Datos. Por Instruments (s.f)

### 2.2.7.1 Funcionamiento

Un sistema de Adquisición de datos básicamente está conformado por sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable. Este sistema aprovecha la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable, en comparación con los sistemas de medidas tradicionales. Esta relación se puede apreciar en la siguiente figura 2.10. Instruments (s.f)



**Figura 2.8** Diagrama de conexiones. Se observa en la figura las conexiones básicas de los componentes de un sistema de Adquisición de datos. Por Instruments, (s.f.)

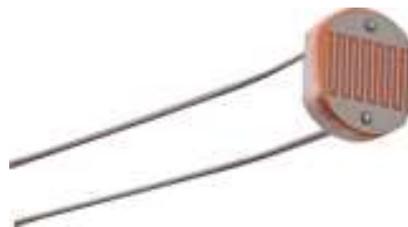
*Sensores:* el sensor también conocido como transductor es el encargado de convertir un fenómeno físico en una señal eléctrica que se puede medir, la salida eléctrica del sensor puede ser en voltaje, corriente o resistencia dependiendo del tipo de sensor que se seleccione.

*Dispositivos y tarjetas DAQ:* El Hardware DAQ actúa como la interfaz entre una PC y señales del mundo exterior. La función primordial es digitalizar señales analógicas entrantes para que una PC pueda interpretarlas, si la DAQ es usada para medir una señal tiene tres componentes esenciales que son: circuito de acondicionamiento de señales, convertidor analógico-digital (ADC) y un bus de PC.

*PC y software:* La función de una PC en un sistema DAQ es controlar la operación del dispositivo DAQ y se usa para procesar, visualizar y almacenar datos de medida. Para el uso de una PC es importante saber que según la aplicación que utiliza el usuario es el tipo de PC.

### **2.2.8 Foto resistencia**

*Ingeniatic.* (s.f.) explica que la foto resistencia o LDR por sus siglas en inglés luz dependent resistor pertenece al grupo de los fotoeléctricos debido a que obedecen al cambio de intensidad de luz y generalmente utilizan una fuente de luz led. Realmente la foto resistencia es una resistencia que varía su valor dependiendo de la cantidad de luz que ilumine, en especial, disminuye su valor al estar expuesto a la intensidad de luz incidente, el valor de la resistencia cuando incide la luz puede variar entre 1k, 1000ohm hasta 50 ohmios y es bastante alto cuando está en oscuridad aproximadamente 50k. La foto resistencia consta de una célula o celda y dos pastillas. Su cuerpo está compuesto por sulfuro de cadmio un material semiconductor que hace variar la resistencia dependiendo de la incidencia de luz en el mismo.



**Figura 2.9** Foto resistencia. Modelo físico de una foto resistencia. Por Ingeniatic,( s.f.)

## CAPÍTULO III. DESARROLLO DEL PROYECTO

### 3.1 Introducción al Desarrollo.

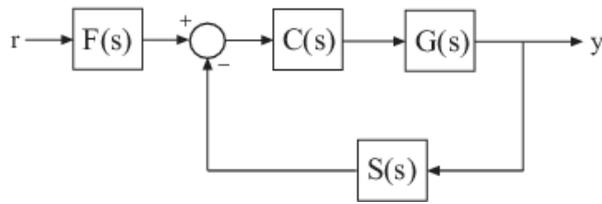
El presente desarrollo abarca una serie de resultados obtenidos durante el proceso de construcción del sistema de levitación, el modelado matemático del sistema de levitación plantea un método teórico experimental para hallar la función de transferencia del sistema.

En todo sistema de control existe una estructura estándar. Esta estructura, en general, consiste de:

- a. El sistema que se controla, generalmente denominado planta y que se expresa a través de  $G(s)$ . En este caso, esta planta es el sistema Electroimán/Sensor de Posición foto resistencia.
- b. El Controlador, que en este caso es el PID lead lag, es el elemento que ayuda a estabilizar la planta  $G(s)$  que es siempre de naturaleza no lineal.
- c. Finalmente, todo está enlazado en un lazo cerrado con retroalimentación negativa.
- d. Es estándar definir a la entrada como  $R(s)$  y la salida como  $Y(s)$ .
- e.  $S(s)$  es la función de transferencia que va desde la salida  $Y(s)$  y que retroalimenta negativamente al sistema. En general esta función es independiente de la frecuencia y asumida como una amplificación constante.
- f.  $F(s)$  es la función de transferencia asociada con la entrada  $R(s)$ . En general esta función es también independiente de la frecuencia y asumida como una amplificación constante.

Para poder realizar el control del sistema de levitación electromagnético, es necesario lograr los siguientes pasos:

- a. Modelar la planta  $G(s)$  representada por la combinación del Electroimán y el Sensor de Posición Foto resistivo. Este modelado es complejo debido a la no-linealidad del mismo. En las próximas secciones se utiliza un método de linealización matemático y un método teórico experimental de modelado.
- b. El sistema de control  $C(s)$  es un PID cuyos parámetros son derivados a través de la herramienta de localización de raíces, ver figura 3.1.



**Figura 3.1** Diagrama general. Diagrama de Bloques estándar del sistema de control retroalimentando negativamente.

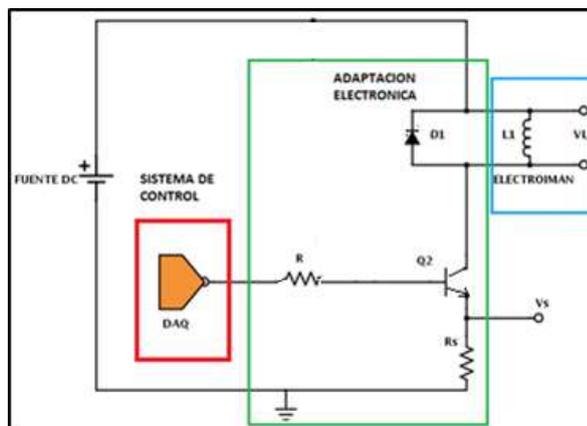
### 3.2 Implementación

El proceso de levitación se logra creando una fuerza opuesta e igual al de la gravedad generada por un campo magnético de un electroimán.

Este Electroimán es diseñado utilizando alambre de cobre esmaltado y acero con bajo contenido de carbón en las proporciones y cantidades adecuadas para crear un campo magnético lo suficientemente fuerte para levantar el peso del objeto a levitarse. Para más información revisar la sección de “Diseño y Construcción del Electroimán.”.

El sistema de levitación consta de 3 partes principales:

- 1) Un sistema de control que es implementado utilizando una DAQ.
- 2) Un Electroimán
- 3) Un sistema de adaptación electrónica que va desde el DAQ hasta el electroimán, ver figura 3.2.



**Figura 3.2** Secciones del circuito. Se muestra la unión del sistema de control, adaptación electrónica en general y el electroimán.

### 3.3 Ecuaciones magnéticas.

Partiendo de la cantidad de trabajo por unidad de tiempo.

$$P = \frac{dW}{dt}$$

El trabajo se puede expresar en:

$$dW = P dt$$

Como:

$$P = V \times I$$

$$dW = V I dt$$

$$\int dW = \int V I dt$$

$$W = \int V I dt \quad (\text{ECUACIÓN 1})$$

El voltaje según Faraday es:

$$V = \frac{d\lambda}{dt} ; \text{Donde } \lambda: \text{link magnético} \quad (\text{ECUACIÓN 2})$$

Uniendo ECUACIÓN 1 y 2:

$$W = \int V I dt = \int \frac{d\lambda}{dt} I dt = \int I d\lambda$$

$$W = \int I d\lambda \quad (\text{ECUACIÓN 3})$$

Dado que para circuitos magnéticos:

$$\lambda = N\phi ; \text{Donde } \phi \text{ es el flujo magnético} \quad (\text{ECUACIÓN 4})$$

$F = N I$  ; Donde F es la fuerza magneto-motiva y N el número de espiras  
(ECUACIÓN 5)

Uniendo ECUACIÓN 3, 4 y 5:

$$W = \int I dx = \int \frac{F}{N} d(N\Phi) = \int \frac{FN}{N} d\Phi$$

$$W = \int F d\Phi \quad (\text{ECUACIÓN 6})$$

Si se desea mantener constante la fuerza magneto-motiva (F), la ECUACIÓN 6 se puede expresar como:

$$W = \int \Phi dF \quad (\text{ECUACIÓN 7})$$

En un circuito magnético:

$$\Phi = \frac{F}{R}; \text{ Donde } R \text{ es la reluctancia del circuito (ECUACIÓN 8)}$$

$$R = \frac{x}{\mu A}$$

Donde x es la distancia del espacio entre el núcleo y el objeto.

$$\Phi = \frac{F}{\frac{x}{\mu A}} \quad (\text{ECUACIÓN 10})$$

En el sistema de levitación, la corriente (I) puede ser controlada usando la ECUACIÓN 7 y 10.

$$W = \int \frac{F}{\frac{x}{\mu A}} dF = \frac{\mu A}{x} \int F dF = -\frac{\mu AF^2}{2x}$$

$$W = \frac{\mu AF^2}{2x}$$

La fuerza del sistema es:

$$F = \frac{dW}{dx} = \frac{\mu AF^2}{2} \left(\frac{-1}{x^2}\right) = -\frac{\mu AF^2}{2x^2}$$

$$F = -\frac{\mu AF^2}{2x^2} \quad (\text{ECUACIÓN 12})$$

Usando ECUACIÓN 12 y 5:

$$F = -\frac{\mu A}{2x^2} (NI)^2$$

$$F = -\frac{\mu AN^2 \times I^2}{2x^2}$$

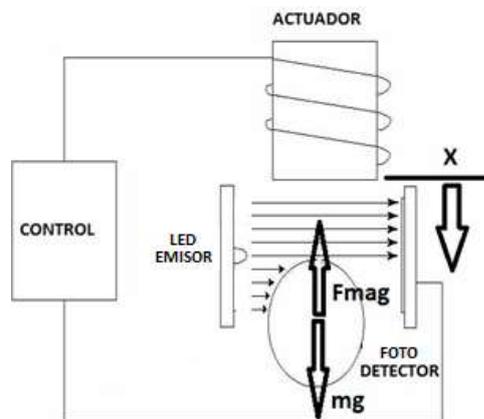
$$F = -\frac{\mu AN^2}{2} \left(\frac{I}{x}\right)^2$$

$$F = K \left(\frac{I}{x}\right)^2$$

### 3.4 Linealización.

El proceso de creación de una fuerza magnética que contrarreste la gravedad es no-lineal, es decir, no se cumplen las condiciones para un sistema lineal.

Se define el diagrama de cuerpo libre de un objeto metálico siendo levantado por un electroimán. Véase la siguiente Figura 3.3, para observar los componentes y las fuerzas que actúan en el sistema de levitación.



**Figura 3.3** Diagrama de cuerpo libre. Descripción de coordenadas generales.

Las ecuaciones de movimiento Newtonianas indican lo siguiente:

$$\text{Peso} - F_{\text{magnética}} = ma$$

La F magnética está relacionada con la corriente que pasa por el inductor (i) y la distancia del objeto metálico al electroimán (x).

$$F_{\text{magnética}} = K \left(\frac{i}{x}\right)^2 ; \text{donde } K \text{ es una constante cualquiera}$$

Por lo que Newton nos dice que:

$$mg - F_{magnética} = ma$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = mg - F_{magnética} \quad \text{ECUACION A}$$

Como se puede observar,  $F_{magnética}$ , no cumple con las condiciones de linealidad ya que es proporcional al cuadrado de la corriente sobre el cuadrado de la distancia. Por este motivo las transformadas de Laplace no son aplicables en esta ecuación. Sin embargo, podemos hacer uso de herramientas matemáticas para poder eliminar esta relación cuadrática y llegar a una relación como la que se muestra abajo:

$$F_{magnética} = A \times i + B \times x; \text{ donde } A \text{ y } B \text{ son constantes. FORMA A}$$

Para obtener la relación lineal mostrada anteriormente se utilizan series de Taylor de variables múltiples.

La aplicación de Taylor demanda la definición de un punto de equilibrio que en este caso es  $(i_{eq}, x_{eq})$ . En ese nivel de corriente  $i$  y distancia  $x$  se dice que la función  $F_{magnética}$  es igual al peso  $mg$ . Este punto, hablando en términos de control, es el *setpoint*, pero geoméricamente este punto es cualquier punto  $x$  alejado del electroimán donde el sistema esté en equilibrio.

Como un tema que vale mencionar, el punto geométrico donde  $x=0$  (es decir, justo en la superficie del electroimán) no se debe considerar como punto de equilibrio ( $x_{eq}$  no es cero) ya que no es una posición en la que el objeto levite sino que más bien sería una posición en donde el objeto está pegado contra el electroimán.

El punto de equilibrio lleva a redefinir las variables  $(i,x)$  hacia un nuevo sistema de coordenadas definidas por:

$$i = i_{eq} + \Delta i, \quad x = x_{eq} + \Delta x \quad \text{ECUACION B}$$

Aplicando estas nuevas coordenadas a la Ecuación A y usando Taylor a la  $F_{magnética}$  para linealizar y cambiar al mismo tiempo de coordenadas, tenemos la siguiente ecuación:

$$m \frac{d^2(x_{eq} + \Delta x)}{dt^2} = mg - Taylor[Fmagnetica] \text{ ECUACION C}$$

Utilizando Taylor a la ecuación se obtiene el punto de equilibrio:

$$\begin{aligned} Taylor[Fmagnetica] &= K \left( \frac{i_{eq}}{x_{eq}} \right)^2 + \frac{\partial Fmagnetica}{\partial i} \Big|_{(i_{eq}, x_{eq})} (i - i_{eq}) \\ &+ \frac{\partial Fmagnetica}{\partial x} \Big|_{(i_{eq}, x_{eq})} (x - x_{eq}) \end{aligned}$$

+ terminos de mayor orden que son descartados

$$Taylor[Fmagnetica] = mg + \frac{2Ki_{eq}}{x_{eq}^2} (i - i_{eq}) - \frac{2Ki_{eq}}{x_{eq}^3} (x - x_{eq})$$

Observar lo siguiente en la última ecuación:

- 1) El término  $K \left( \frac{i_{eq}}{x_{eq}} \right)^2$  tiene un valor especial, es exactamente el peso mg. Esto es debido a que el punto de equilibrio por necesidad debe ser igual al peso del cuerpo levitado.
- 2) Los términos  $(i - i_{eq})$  y  $(x - x_{eq})$  son sustituidos por  $\Delta i$  y  $\Delta x$  respectivamente de acuerdo a la Ecuación B que representan un cambio de coordenadas.
- 3) Recordar que los valores  $(i_{eq}, x_{eq})$  son solo valores en Amperios o mm que producen equilibrio en el sistema. Por lo tanto, a pesar que son términos que cambian, son valores numéricos.

La ecuación ahora es:

$$Taylor[Fmagnetica] = mg + \frac{2Ki_{eq}}{x_{eq}^2} (\Delta i) - \frac{2Ki_{eq}}{x_{eq}^3} (\Delta x)$$

Se puede reinsertar esta serie de Taylor en la Ecuación C, por lo que ahora se tiene:

$$m \frac{d^2(x_{eq} + \Delta x)}{dt^2} = mg - \left[ mg + \frac{2Ki_{eq}}{x_{eq}^2} (\Delta i) - \frac{2Ki_{eq}}{x_{eq}^3} (\Delta x) \right]$$

Se observa que:

$$\frac{d^2(x_{eq} + \Delta x)}{dt^2} = \frac{d^2(\Delta x)}{dt^2} \text{ ya que la derivada de la constante } x_{eq} \text{ es cero}$$

$$\frac{2Ki_{eq}}{x_{eq}^2} = A \text{ ya que } (x_{eq}, i_{eq}) \text{ son constantes}$$

$$-\frac{2Ki_{eq}}{x_{eq}^3} = B \text{ ya que } (x_{eq}, i_{eq}) \text{ son constantes}$$

Finalmente, la ecuación linealizada en el punto de equilibrio es:

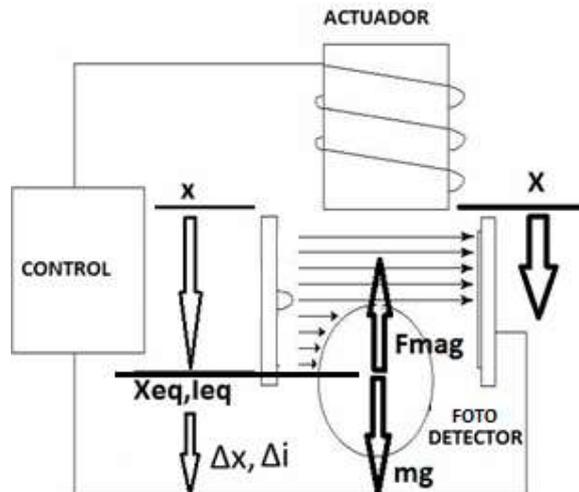
$$m \frac{d^2(\Delta x)}{dt^2} = mg - mg - \frac{2Ki_{eq}}{x_{eq}^2}(\Delta i) + \frac{2Ki_{eq}}{x_{eq}^3}(\Delta x)$$

$$m \frac{d^2(\Delta x)}{dt^2} = -\frac{2Ki_{eq}}{x_{eq}^2}(\Delta i) + \frac{2Ki_{eq}}{x_{eq}^3}(\Delta x)$$

$$m \frac{d^2(\Delta x)}{dt^2} = A(\Delta i) + B(\Delta x); \text{ donde } A = -\frac{2Ki_{eq}}{x_{eq}^2} \text{ y } B$$

$$= \frac{2Ki_{eq}}{x_{eq}^3} \text{ segun FORMA A}$$

Para facilidad de interpretación de la última ecuación que contiene las nuevas coordenadas  $\Delta i$  y  $\Delta x$  se tiene la siguiente figura 3.4.



**Figura 3.4** Diagrama en punto de equilibrio. Se cambia la referencia a un punto de equilibrio.

Como se aprecia en la figura 3.4, la nueva ecuación linealizada ha pasado de un eje de coordenadas  $x$  que empezaba en el electroimán hacia un nuevo eje de coordenadas que está centrado en el punto de equilibrio  $(i_{eq}, x_{eq})$  con las nuevas coordenadas  $(\Delta x, \Delta i)$ .  $A$  y  $B$  son constantes. Entiéndase que a pesar de que se habla de coordenadas, no necesariamente representan un lugar geométrico ( $x$  obviamente es una representación geométrica, pero  $i$  es un valor de sistema) sino un valor del sistema en sus totalidad.

### 3.5 Modelado del Sistema.

Se procede a construir bloques para obtener una planta  $G(s)$  que represente a la planta.

De la linealización se dedujo la siguiente fórmula:

$$m \frac{d^2(\Delta x)}{dt^2} = A(\Delta i) + B(\Delta x)$$

Esta fórmula representa las fuerzas que actúan sobre nuestro objeto a levitar por lo que se puede escribir de la siguiente manera:

$$m \frac{d^2(\Delta x)}{dt^2} = F_{neta} = A(\Delta i) + B(\Delta x)$$

Aplicando Laplace se obtiene lo siguiente

$$ms^2\Delta X(s) - s\Delta x(0) - \Delta x'(0) = F_{neta}(s)$$

El término  $\Delta x(0)$  es cero porque representa la posición inicial de la masa  $m$  que en estado de equilibrio empieza en el punto cero. El término  $\Delta x'(0)$  también es cero porque representa la velocidad inicial de la masa  $m$  (el sistema está estático al empezar). Dadas estas condiciones se tiene:

$$ms^2\Delta X(s) = F_{neta}(s)$$

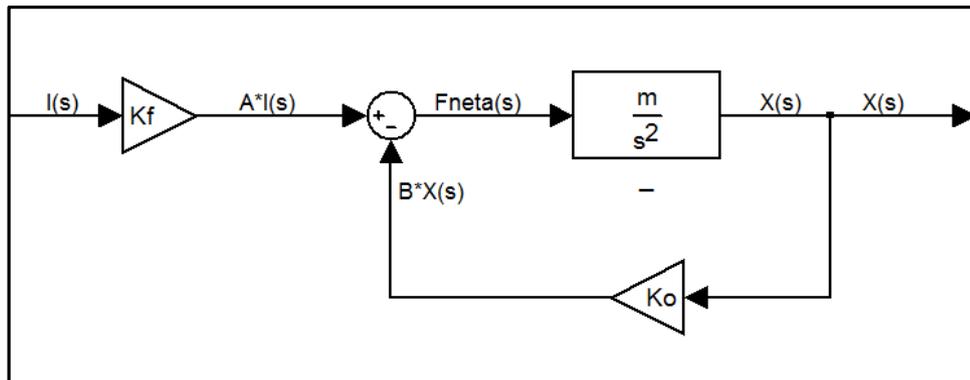
$$\frac{\Delta X(s)}{F_{neta}(s)} = \frac{1}{ms^2} \quad ECUACION(1)$$

Se observa que:

$$F_{neta} = A \times \Delta I(s) + B \times \Delta X(s) \quad ECUACION(2)$$

ECUACIÓN (2) ya está en una forma lineal que es utilizable bajo el concepto de lazos de control. Se procede a hacer un cambio de nomenclatura y se lleva la ECUACIÓN (1) y ECUACIÓN (2) a una forma de lazo de control como se muestra en la figura 3.5.

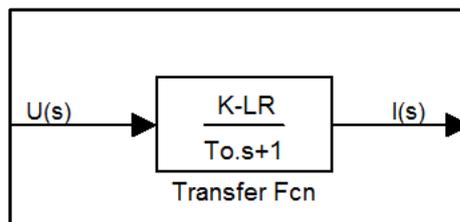
**Nota:** Se usa la terminología  $X(s)$  en lugar de  $\Delta X(s)$  únicamente porque el software de edición de bloques no permite el uso del símbolo  $\Delta$ .



**Figura 3.5** Lazo de control cerrado. Se observa en el sistema de control la ecuación de fuerza linealizada.

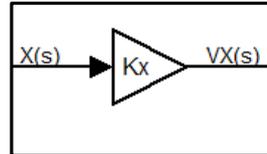
Recordar que la fuente DC, la cual se nombra como  $u(t)$  en dominio de tiempo y  $U(s)$  en frecuencia, es controlada por medio de un BJT que funciona en zona lineal permitiendo que el electroimán aumente y disminuya su fuerza; es decir que su salida es la corriente  $i(t)$  y se llama  $IL(t)$ .

El electroimán al ser un inductor con resistencia propia y una resistencia en serie  $R_s$  se comporta como un sistema R-L en serie. El sistema R-L en serie, ver figura 3.6 se conoce en teoría de control y se sabe que su función de transferencia es de primer orden y de la siguiente forma.



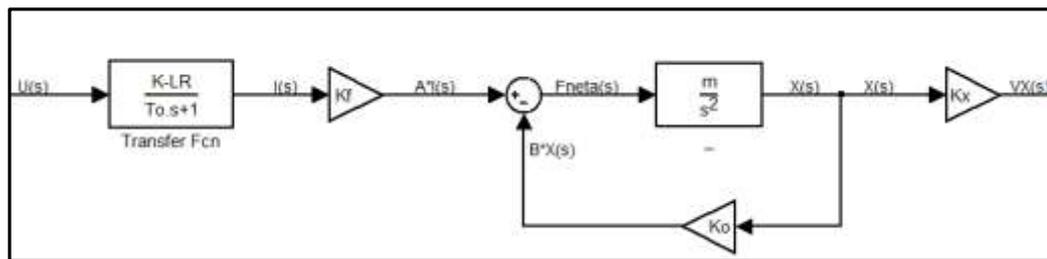
**Figura 3.6** Función de transferencia de un sistema L-R en serie. Ilustración de la función de transferencia en lazo abierto.

Los valores de  $K_{lr}$  y  $\tau_o$  son calculados experimentalmente en la sección de “Método experimental para obtención de constantes”. El sensor foto resistivo puede ser modelado como un voltaje de salida que llamaremos  $V_x(t)$  que es proporcional a la distancia entre el electroimán y la masa  $m$ . Esto puede ser llevado a una función de transferencia de la siguiente manera, ver figura 3.7



**Figura 3.7** Diagrama en lazo abierto del sensor. Ilustración de la función de transferencia de la foto resistencia.

Poniendo las 3 funciones de transferencia que generadas se observa que la función de transferencia completa de la planta  $G(s)$ , ver figura 3.8.



**Figura 3.8** Función de transferencia de la planta  $G(s)$  completa. Se compacta las 3 funciones de transferencia obtenidas para obtener la planta.

Se puede observar que el sistema tiene como entrada el voltaje análogo que se llama  $U(s)$  y que su salida final es  $VX(s)$  el cual es un voltaje que representa la posición de la masa  $m$ .  $VX(s)$  es una entrada analógica hacia DAQ.

Reduciendo la expresión:

$$\frac{VX(s)}{U(s)} = \left(\frac{K_{lr}}{\tau_o \times s + 1}\right)(K_f) \left(\frac{\frac{m}{s^2}}{1 + \left(\frac{m}{s^2} \times K_o\right)}\right)(K_x)$$

$$\frac{VX(s)}{U(s)} = \frac{K_f K_x K_{lr}}{(\tau_o \times s + 1)} \left(\frac{\frac{m}{s^2}}{s^2 + m K_o}\right)$$

Se puede observar que la función de la planta  $G(s)$  es:

$$G(s) = \frac{VX(s)}{U(s)} = K_f K_x K_{LR} \frac{m}{(s^2 + mK_o)(\tau_o s + 1)}$$

Donde, haciendo una sustitución final, tenemos  $G(s)$  en forma polar y polinómica:

$$G(s) = \frac{K_{total}}{(s^3 + \frac{s^2}{\tau_o} + mK_o s + \frac{mK_o}{\tau_o})}$$

Donde  $K_{total} = K_f K_x K_{lr} m$

Teniendo  $G(s)$  se puede notar lo siguiente:

El par de polos  $(s^2 + mK_o)$  tiene raíces reales (esto debido a que  $K_o$  es un valor negativo) y están dadas por  $s_{1,2} = \sqrt{-m * -K_o} = \pm \sqrt{mK_o}$ .

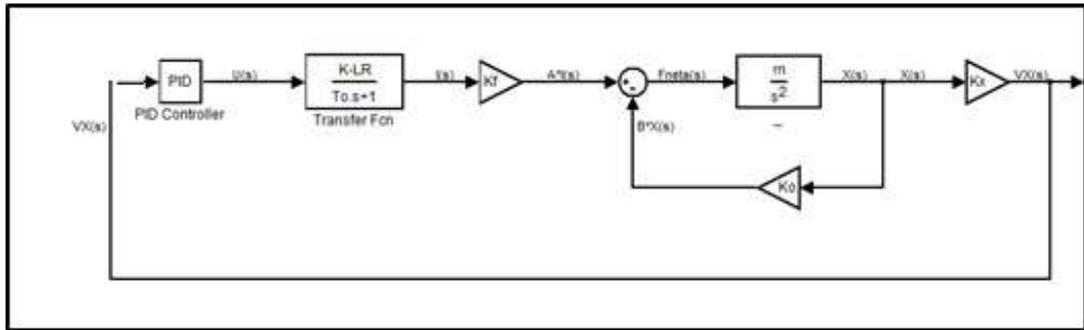
Uno de esos polos está en el lado positivo del plano de localización de raíces lo que indica que ese polo es INESTABLE.

El polo  $(\tau_o s + 1)$  es también de una raíz real y está localizado en el lado izquierdo del plano en la posición  $s = -\frac{1}{\tau_o}$ . Este polo está extremadamente alejado a la izquierda del eje y debido a que el valor de  $\tau_o$  está en el orden de los nano. Este polo está muy alejado de las raíces principales que manejan la dinámica del sistema por lo que es posible ignorar este polo.

### 3.6 Estabilidad del sistema de levitación.

Como ya se ha determinado que el sistema es inestable, se procede a utilizar un controlador para estabilizarlo pudiendo así lograr levantar el objeto deseado. Se muestra en la figura 3.9 la ubicación de controlador PID en el lazo de control.

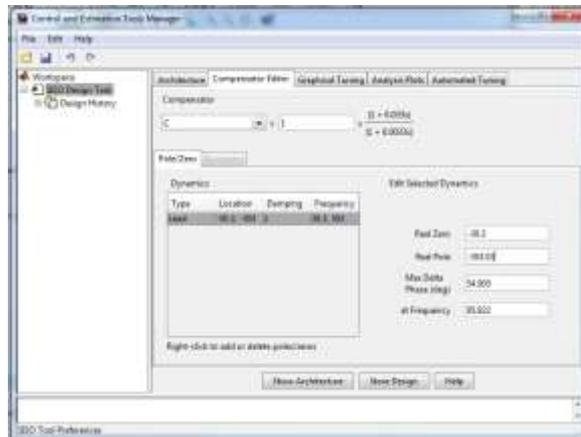
Existen múltiples combinaciones de polos reales o imaginarios y con ceros reales o imaginarios. Para encontrar los valores eficientes de las ganancias que son necesarios para el controlador se procede a utilizar la herramienta root-locus de Matlab.



**Figura 3.9** Sistema compensador. Diagrama de la planta con compensador.

Del análisis se sabe que  $(\tau_o s + 1)$  representa un polo estable que está significativamente alejado del origen, por lo que se puede omitir este polo sin afectar a la función de transferencia. Se observa el polo que se encuentra en el lado derecho del eje imaginario, ese es el polo inestable que se intenta estabilizar con el controlador.

Se utiliza la herramienta “Control and Estimation Tool Manager de Matlab” para estimar el valor de los polos y ceros que hacen que el sistema sea estable, ver figura 3.10.

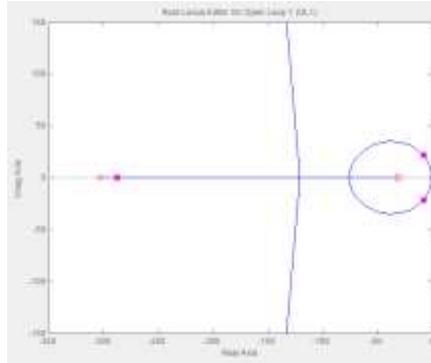


**Figura 3.10** “Control and Estimation Tool Manager de Matlab”. Con la herramienta establecida se obtienen los posibles valores de estabilización.

Mover los ceros y el polo del compensador de tal forma que se adapte a las condiciones del sistema., ver figura 3.11

Hallar la mejor posición de los polos y ceros, entonces:

$$C(s) = 0.2016 \times \frac{(1+0.033*s)}{(1+0.0033*s)}$$



**Figura 3.11** Root Locus de lazo cerrado con valores de PID. Gráfico de los polos y polos de la función de transferencia completa.

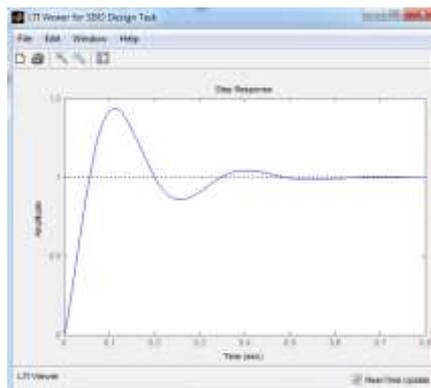
Se puede observar las características del sistema en el dominio del tiempo.

Se obtiene entonces:

El sistema se estabiliza en 0,8 segundos

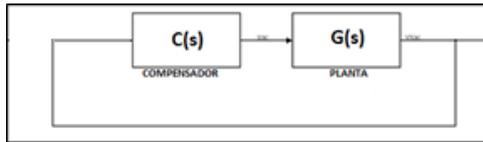
Los valores de PID son tal que no permiten un “overshoot” mayor al 50%.

El tiempo de respuesta es suave y sin aceleraciones lo cual permite tener una transición sin movimientos torpes de la masa m, ver figura 3.12



**Figura 3.12** Gráfico de parámetros del sistema de control. Visualización de los parámetros en la respuesta STEP de lazo cerrado.

Finalmente, se establece el lazo de control cerrado completo que contiene la planta  $G(s)$  y el controlador  $C(s)$ , ver figura 3.13



**Figura 3.13** Bloque controlador C(s) y planta G(s). Ilustración del diagrama del sistema de control estable.

### 3.7 Método experimental para la obtención de constantes.

#### Procedimiento para obtención de constante $K_{rl}$ .

La constante  $K_{rl}$  es una ganancia que relaciona el voltaje de la salida de la tarjeta de adquisición de datos en unidades de voltios sobre la corriente en el inductor en unidades de amperios.

Se debe seguir el siguiente procedimiento:

- Inyectar al circuito, distintos valores de voltajes.
- Tomar el valor del de corriente del inductor por medio de la medición de la entrada análoga AI0.

$$IL = \frac{Vs}{Rs} \quad ; \quad Rs = 0,47\Omega$$

- Llenar una tabla de datos con las mediciones tomadas.

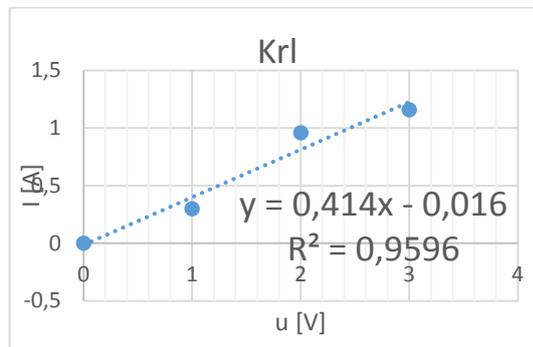
**Tabla 1**

Tabla de datos obtenida para la constante  $K_{rl}$ .

KLR	
u [V]	I [A]
0	0
1	0,3
2	0,96
3	1,16

**Nota:** Datos adquiridos para la obtención de la constante  $K_{rl}$  relacionando el voltaje de la salida de la tarjeta de adquisición de datos sobre la corriente.

- Mostrar gráfico con línea de tendencia, que muestre el R cuadrado coeficiente de determinación estadística para cada tabla expuesta.



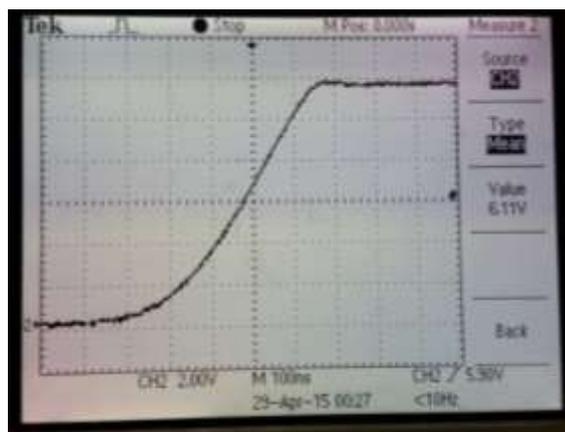
**Figura 3.14:** Gráfico de constante  $k_{rl}$ . Se observa la pendiente de la ecuación con su determinado valor de  $k_{rl}$ .

- Se obtiene la constante  $K_{rl}=0,414$  que representa la pendiente de la ecuación lineal resultante de los datos tomados.

### Procedimiento para obtención de constante $T_0$ .

La constante  $T_0$  es una constante en unidades de tiempo que mide el tiempo que demora la onda en elevarse hasta el 63% de su estabilización.

Se toma el valor de  $T_0$  midiendo el valor del voltaje del electroimán para un tren de pulsos simulado con el objetivo de verificar el tiempo de respuesta de la señal.



**Figura 3.15** Medición de la constante  $T_0$  con osciloscopio. Medición de  $T_0$  para la determinación del tiempo que demora la onda en elevarse hasta el 63% de su estabilización.

Para medir el  $T_0$  de las señales a distintas frecuencias debemos usar un osciloscopio. Véase figura 3.15.

El valor de  $T_0$  resultante de la medición es 320 nano segundos.

### Procedimiento para obtención de constante $k_f$ .

La constante  $K_f$  es una ganancia que relaciona la corriente del electroimán en unidades de amperios [A] sobre la fuerza del electroimán en unidades de Newton [N] medida con diferentes masas.

- Se coloca el objeto en una posición fija cercana a la zona de levitación.
- Se inyecta de forma incremental valores de corriente al electroimán.
- Se toma el dato de corriente que logra que el objeto con esta masa se eleve.
- Repetir el procedimiento para distintas masas.
- Llenar la respectiva tabla.

### Tabla 2

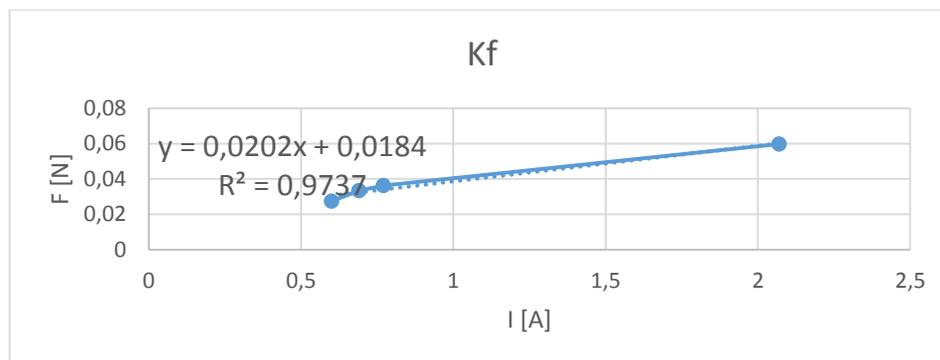
Tabla de datos obtenida para la constante  $K_f$ .

Kf		
i [A]	f [N]	m[Kg]
0,6	0,027468	0,003
0,69	0,033354	0,003
0,77	0,036297	0,004
2,07	0,059841	0,006

**Nota:** Datos adquiridos para la obtención de la constante  $K_f$ . Relaciona la corriente del electroimán sobre la fuerza del electroimán.

Mostrar gráfico con línea de tendencia, que muestre el R cuadrado coeficiente de determinación estadística para cada tabla expuesta.

Se obtiene la constante  $K_f=0,0202$  que representa la pendiente de la ecuación lineal resultante de los datos tomados. Véase figura 3.16.



**Figura 3.16** Gráfico de constante  $k_f$ . Se observa la pendiente de la ecuación con su determinado valor de  $k_f$ .

### Procedimiento para obtención de constante $k_o$ .

La constante  $K_o$  es una ganancia que relaciona la posición del objeto sobre la fuerza del electroimán siendo los objetos con distintas masas.

- Fijar la base de la estructura móvil de tal forma que el objeto esté en el centro del electroimán.
- Colocamos un voltaje fijo de 1,8 a la salida de la tarjeta de adquisición de datos.
- Elevar incrementalmente la posición del objeto hasta que este se eleve al electroimán.
- Tomar el dato de medición de posición del objeto en el cual este eleve al electroimán.
- Tomar puntos de medición para obtener la respectiva tabla.

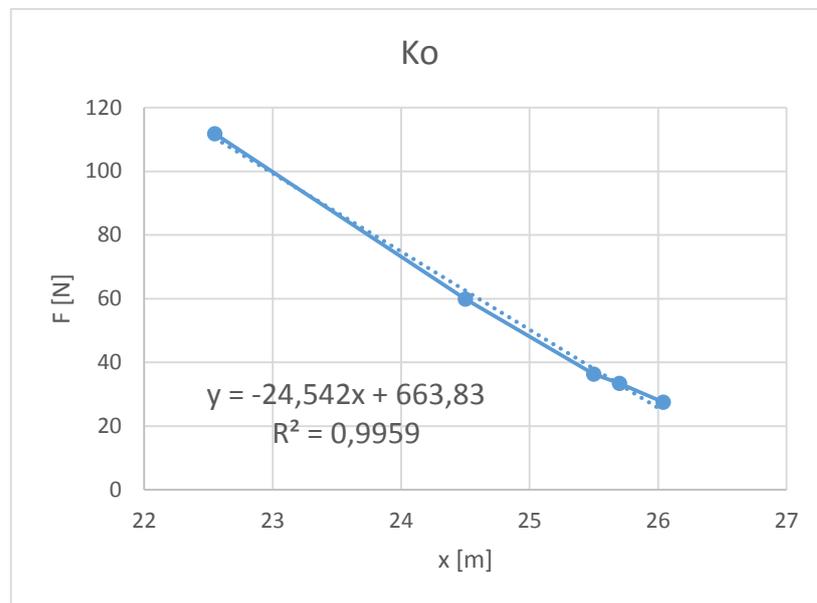
**Tabla 3**

Tabla de datos obtenida para la constante  $K_o$ .

Ko		
x [m]	f [N]	m[g]
26,04	27,468	2,8
25,7	33,354	3,4
25,5	36,297	3,7
24,5	59,841	6,1
22,55	111,834	11,4

**Nota:** Datos adquiridos para la obtención de la constante  $K_o$ . Relaciona la posición del objeto a diferentes masas sobre la fuerza del electroimán.

- Mostrar gráfico con línea de tendencia, que muestre además el R cuadrado coeficiente de determinación estadística para cada tabla expuesta.



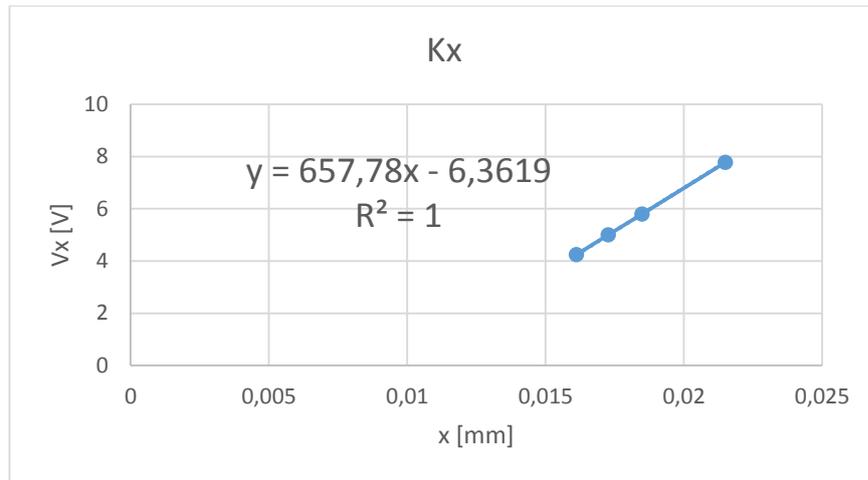
**Figura 3.17** Gráfico de constante  $k_o$ . Se observa la pendiente de la ecuación con su determinado valor de  $k_o$ .

De esta forma obtenemos nuestra constante  $K_o=24,542$  como valor absoluto.

### Procedimiento para obtención de constante $k_x$

La constante  $K_x$  es una ganancia que relaciona la distancia en mm del objeto midiendo su distancia en milímetros hacia abajo tomando como referencia la base del núcleo del electroimán sobre el voltaje del sensor de posición medido unidades de voltios.

- Fijar la base de la estructura móvil.
- Desplazar el objeto de forma ascendente.
- Medir el voltaje del sensor utilizando la entrada analógica AI0 de la tarjeta de adquisición de datos.
- Tomar datos de distancia en la estructura móvil y llenar las respectivas tablas.
- Mostrar gráfico con línea de tendencia, que muestre además el R cuadrado coeficiente de determinación estadística para cada tabla expuesta.



**Figura 3.18** Gráfico de constante  $k_x$ . Se observa la pendiente de la ecuación con su determinado valor de  $k_o$ .

- De esta forma obtenemos nuestra constante  $K_x=657,78$  que representa la pendiente de la ecuación lineal que se asemeja a los datos tomados.

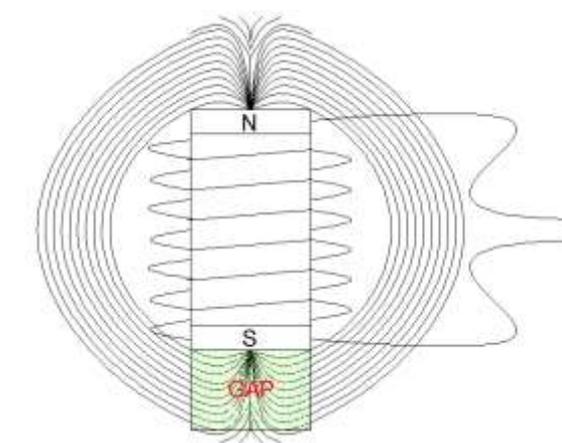


**Figura 3.19** Gráfico de la maqueta con estructura móvil. Se utiliza una estructura móvil para obtener las constantes.

### 3.8 Diseño y Construcción del electroimán.

Para la construcción del electroimán es necesario tomar ciertas consideraciones en el diseño, tales como Fuerza del electroimán medido en Newton, masa del objeto a levitar medido en Kg, distancia de la fuerza del campo electromagnético desde la base del núcleo (GAP) medido en mm, material del núcleo, número de espiras del cobre, así como el calibre de la sección del conductor a utiliza.

Se define un límite de masa en gramos del objeto el cual queremos levitar, así como la distancia en mm desde el núcleo, la cual podrá ser atraído el objeto, ver figura 3.20



**Figura 3.20** Gráfico del electroimán. Ilustración del espacio de fuerza del electroimán generado por el campo electromagnético.

Para tener una referencia del comportamiento de la fuerza de un electroimán, se utiliza una fórmula que relaciona la constante magnética del material del núcleo, el número de espiras del inductor, la corriente que va a circular por el alambre y la fuerza del espacio entre la bobina y el objeto a levitar.

$$F = \frac{(n * i)^2 * \mu m * a}{(2 * g^2)}$$

Donde:

F = Fuerza

i = Corriente en el Inductor

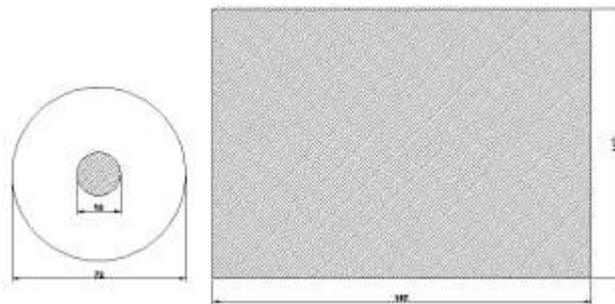
$g$  = Distancia del espacio entre la bobina y el objeto a levitar.

$a$  = Área

$n$  = Número de espiras

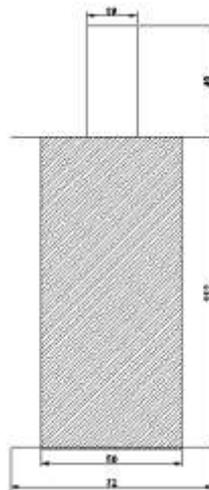
$\mu m$  = Constante Magnética =  $4 \times \text{PI} \times 10^{-7}$ .

El carrete es la base para el bobinado del inductor, el cual mantiene uniformidad en el alambre y evita que se disperse, además de mantener consistencia en la bobina. Para la construcción del carrete se utiliza cartón prensado de 2 mm de espesor, ver figura 3.21; el cual tiene un recubrimiento de barniz dieléctrico para aislar la bobina del núcleo.



**Figura 3.21** Dimensiones del carrete. Diseño de carrete para bobinado de electro imán.

La bobina tiene 2123 espiras, para esto se utilizan 250 m de alambre esmaltado de cobre calibre #20, el cual tiene una resistencia aproximada de  $8.2 \Omega$ .



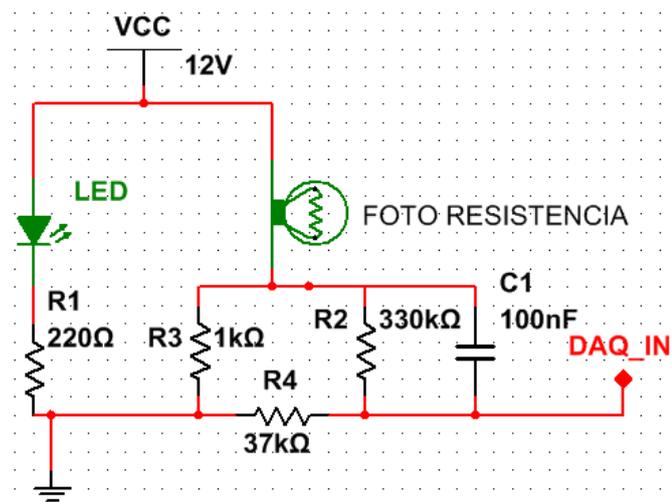
**Figura 3.22** Dimensiones del electro imán. Ilustración del diseño del electroimán.



**Figura 3.23** Carrete bobinado. Imagen de bobina terminada.

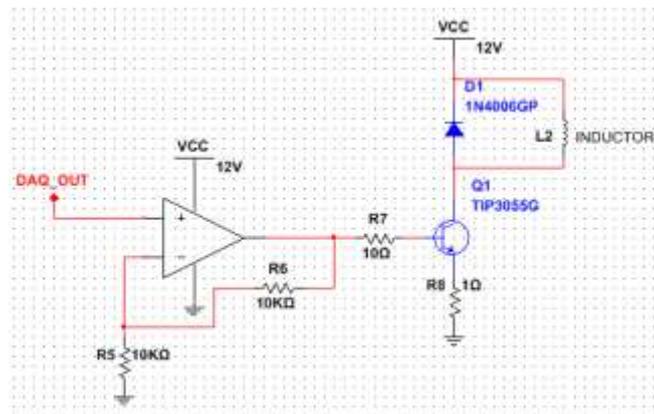
### 3.9 Diseño y Construcción de adaptación electrónica.

El Led emite luz blanca hacia la foto resistencia, la cual varía su resistencia proporcional a la cantidad de luz que le llega, el objeto se desplaza impidiendo que la luz llegue al LDR, es necesario colocar filtros para que la señal llegue como señal de voltaje a la DAQ, ver figura 3.24

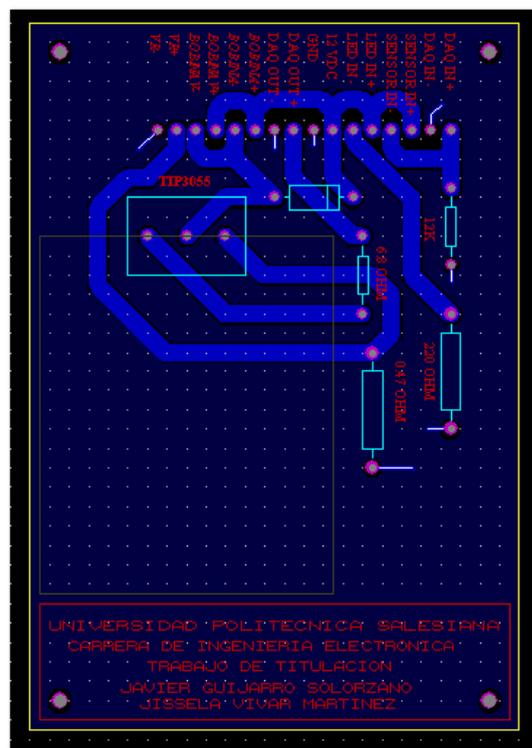


**Figura 3.24** Adaptación electrónica de entrada. Circuito donde se observa filtros para la obtención de señal de voltaje.

Se utiliza un transistor de potencia TIP3055 para controlar la corriente que pasa por el electroimán. La DAQ envía señal de voltaje por sus terminales por lo que se utiliza un operacional debido a su alta velocidad y resistencias de salida convertir la señal de voltaje a una señal de corriente para controlar al transistor BJT en zona lineal, ver figura 3.25

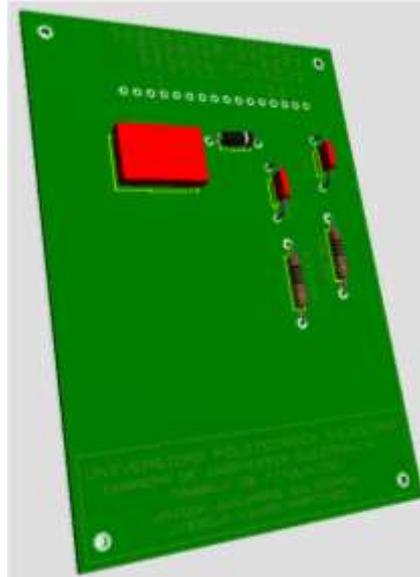


**Figura 3.25** Adaptación electrónica de salida. Circuito de conexiones para la adaptación de la salida.



**Figura 3.26** Tarjeta PCB de adaptación electrónica. Imagen del circuito impreso de la adaptación electrónica.

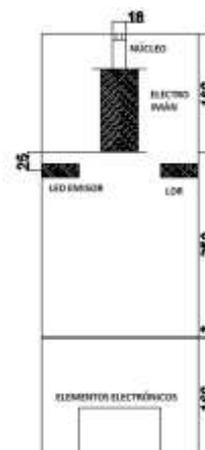
Se diseña una tarjeta de circuito impreso para la adaptación electrónica, ver figura 3.27.



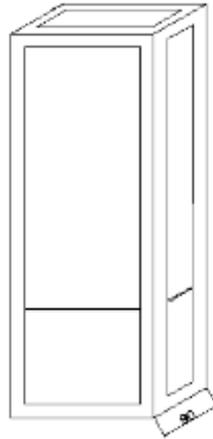
**Figura 3.27** Tarjeta PCB en 3D. Se visualiza el circuito de la adaptación electrónica en 3D.

### 3.10 Montaje de elementos.

Para el montaje de la bobina se consideró una estructura de aluminio debido a su rigidez y su bajo peso, las caras laterales son de material acrílico. Se tiene un compartimiento en la parte inferior donde se ubica la fuente de voltaje, la DAQ, la tarjeta electrónica y las borneras, las cuales están montadas en un riel DIN. En la parte superior se tiene una manigueta para ser transportado de manera fácil.



**Figura 3.28** Vista lateral de la maqueta. Se observa el montaje de los elementos.



**Figura 3.29** Maqueta de aluminio y acrílico. Parte externa de la maqueta.

### 3.11 Desarrollo de aplicación.

La aplicación en Labview del sistema de levitación magnética trata de ser didáctico e intuitivo para que el estudiante pueda entender la aplicación desde su forma básica.

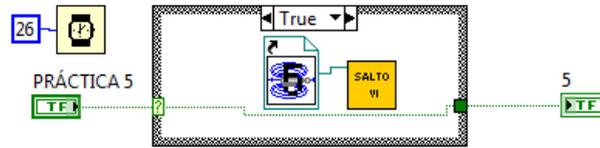
La pantalla principal consta de un menú con cinco prácticas didácticas las cuales ayudan al entendimiento de los fenómenos que intervienen en el sistema de levitación magnético, además la pantalla principal tiene un gráfico en 3D que simula la maqueta del levitador y puede ser desplazada y puesta en rotación por el usuario.

Esta pantalla tiene además un botón para parar y salir de la aplicación.



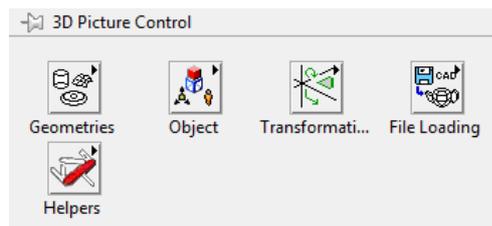
**Figura 3.30** Pantalla principal. Las pantallas se muestran en un menú principal de pantallas.

Para mostrar pantallas con un menú es necesario el uso de herramientas que permitan el salto de Vis, mostrando en la nueva pantalla un nuevo VI el cual es ejecutado automáticamente inhabilitando el VI anterior. Para esto es necesario la creación de un proyecto con sub VIs



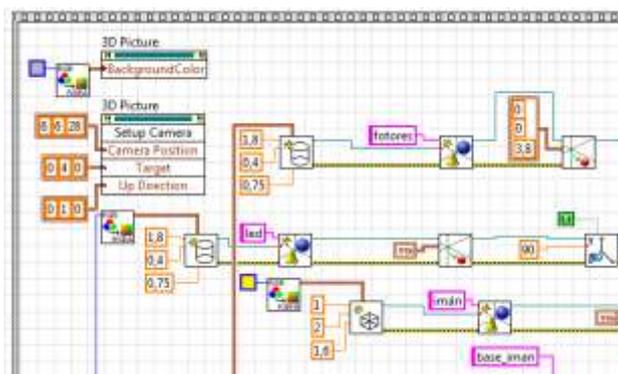
**Figura 3.31** Salto de VI. Se utilizan saltos para ejecutar varias pantallas controladas por un menú.

Para colocar objetos en 3D con movimiento se utiliza la librería 3D Picture Control la cual proporciona herramientas para mostrar objetos en 3D con referencia a un plano determinado.



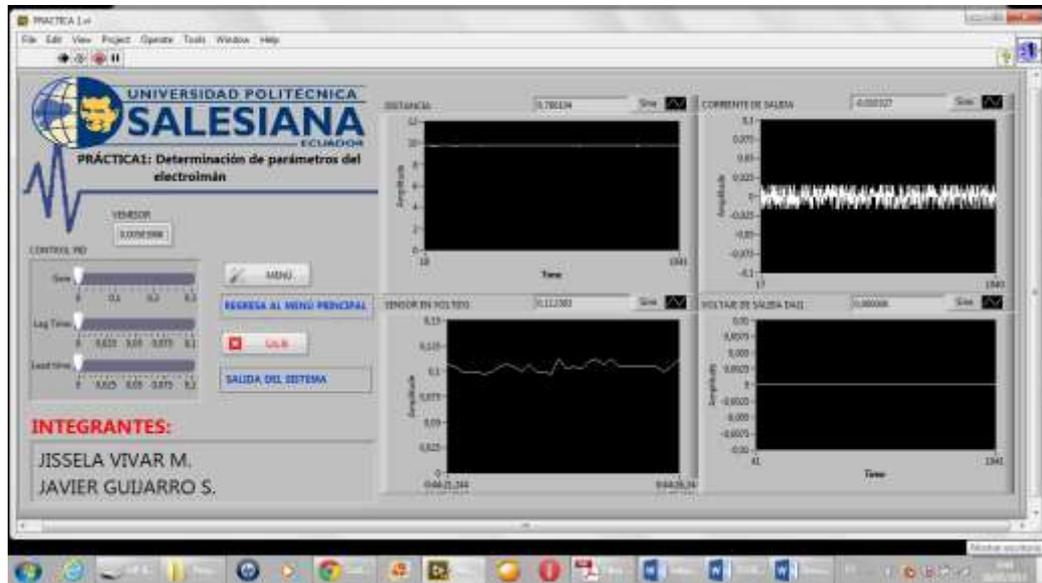
**Figura 3.32** 3D Picture. Librería para colocar objetos con movimiento.

Se debe escoger un punto de referencia en el plano 3D, crear objetos de distinta geometría y asignar colores a los mismos.



**Figura 3.33** Creación de objetos. Se crea objetos en 3D y se asignan colores a los mismos.

Las señales son captadas por la tarjeta de adquisición de datos y mostradas en gráficos en el tiempo para poder determinar de forma sencilla las formas de onda presentes en el sistema.

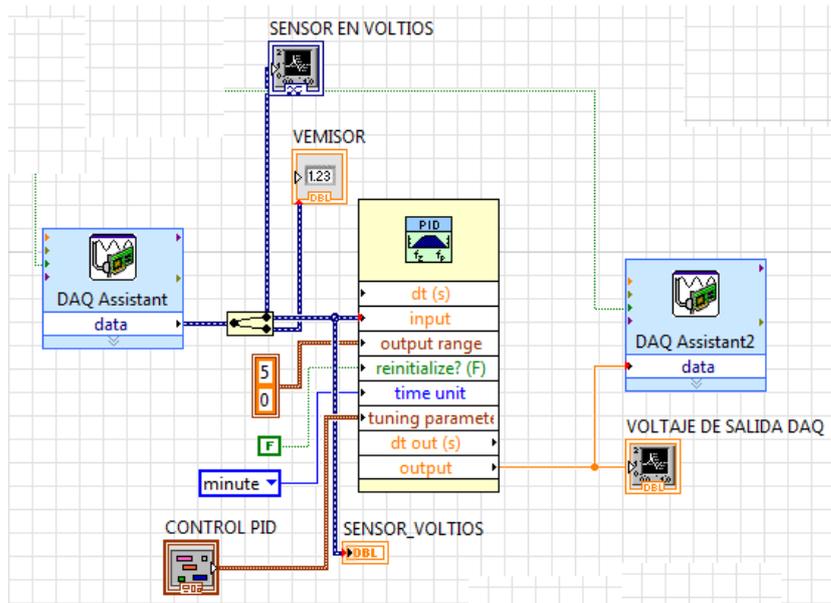


**Figura 3.34** Muestreo de señales. Se monitorean las señales del sistema en tiempo real.

En las pantallas es posible ajustar ganancias para los controladores descritos en la misma las cuales deben ser ajustadas de acuerdo al modelado de la planta del sistema de levitación magnético.



**Figura 3.35** Práctica con imagen en 3D. Se utiliza imagen con movimiento monitoreo en línea.

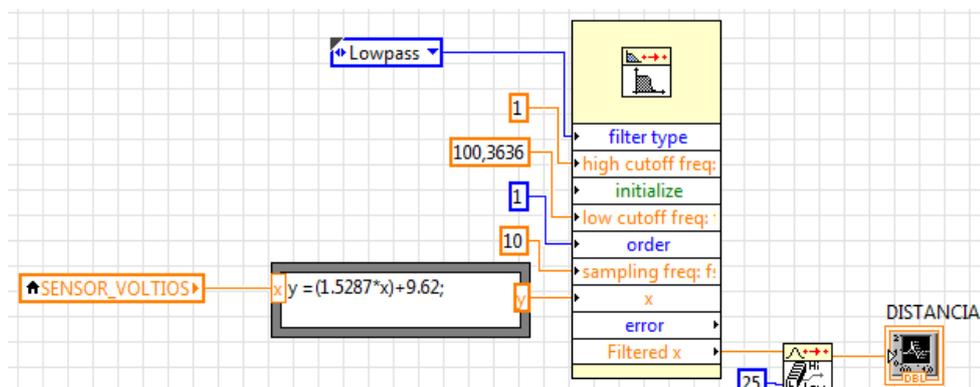


**Figura 3.36** Bloque de control. Se utiliza un bloque PID LEAD/LAG para estabilizar el sistema.

Es necesario un controlador que estabilice la planta, por lo que se utiliza un bloque de control PID LEAD/LAG debido a que tiene un polo y un cero desplazables los cuales se ajustan a la estabilidad del sistema, este controlador tiene la forma:

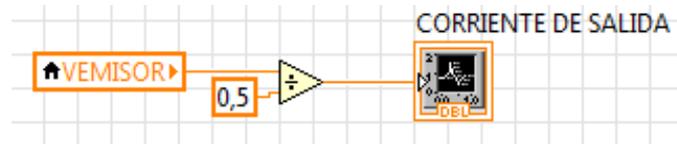
$$Y(s) = K \frac{s.Tlead + 1}{s.Tlag + 1} U(s)$$

Se realiza un escalamiento de la señal de voltaje de entrada para ser convertida en mm, esta señal presenta ruidos por lo que se aplica un filtro pasa bajo para poder ser mostrada en un gráfico en el tiempo. Ver figura 3.36.



**Figura 3.37** Filtro de señal. Se filtra la señal de entrada para ser mostrada en pantalla.

La corriente del electro imán es calculada mediante el voltaje de la entrada analoga AI1 la cual mide la caída de voltaje de la resistencia de potencia de 0,5 ohm cerrando la trayectoria de corriente de la bobina. Ver figura 3.37



**Figura 3.38** Corriente de salida. Se calcula la corriente de salida mediante la entrada AI0.

## CAPÍTULO IV. PRÁCTICAS TUTORIALES

### Práctica 1: Determinación de parámetros del electroimán.

#### Objetivo General.

Fomentar al estudiante al desarrollo de pantallas en Labview para el monitoreo de sistemas.

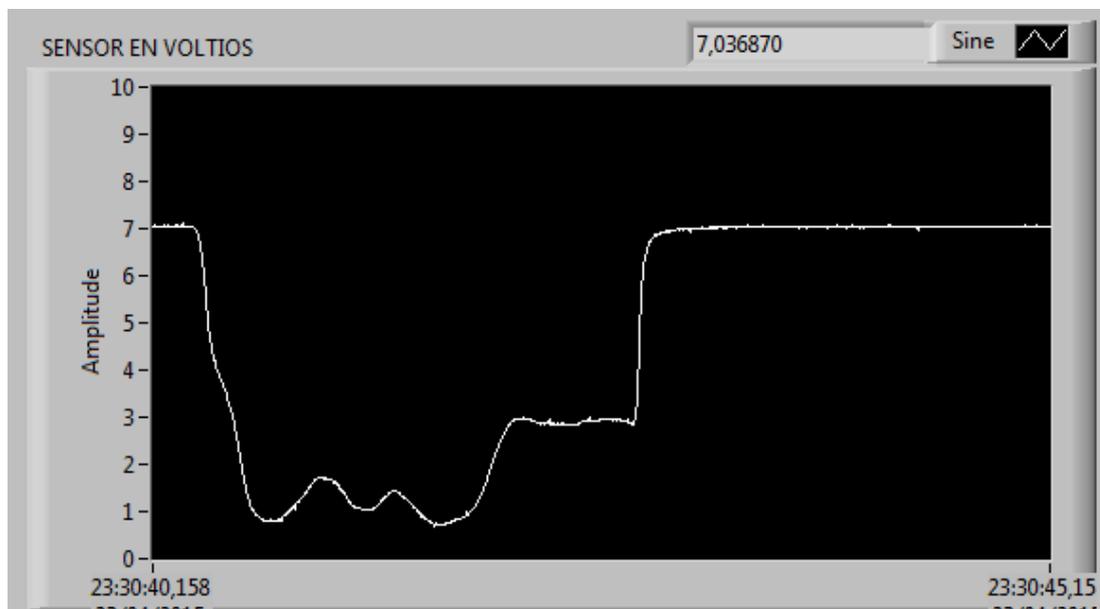
#### Objetivo Específico.

Realizar una pantalla de práctica en la cual el estudiante pueda leer y analizar las señales que gobiernan al sistema de levitación electromagnético.

#### Desarrollo

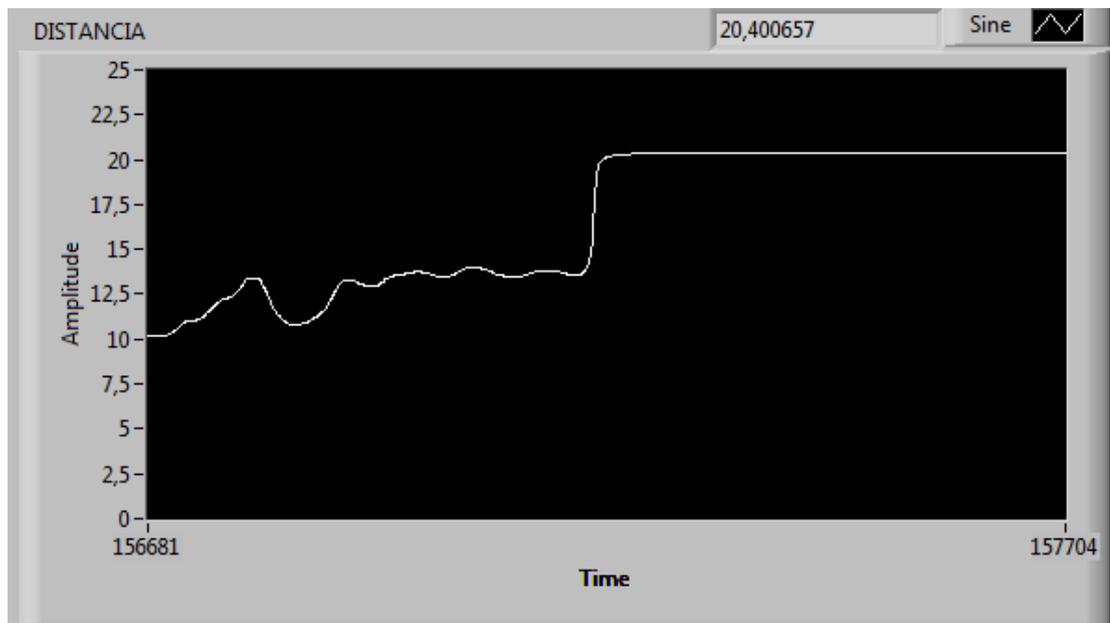
Para la obtención de los parámetros realizamos lo siguiente:

Se toma los valores máximos y mínimos de la señal de voltaje del sensor utilizando la entrada análoga AI1.



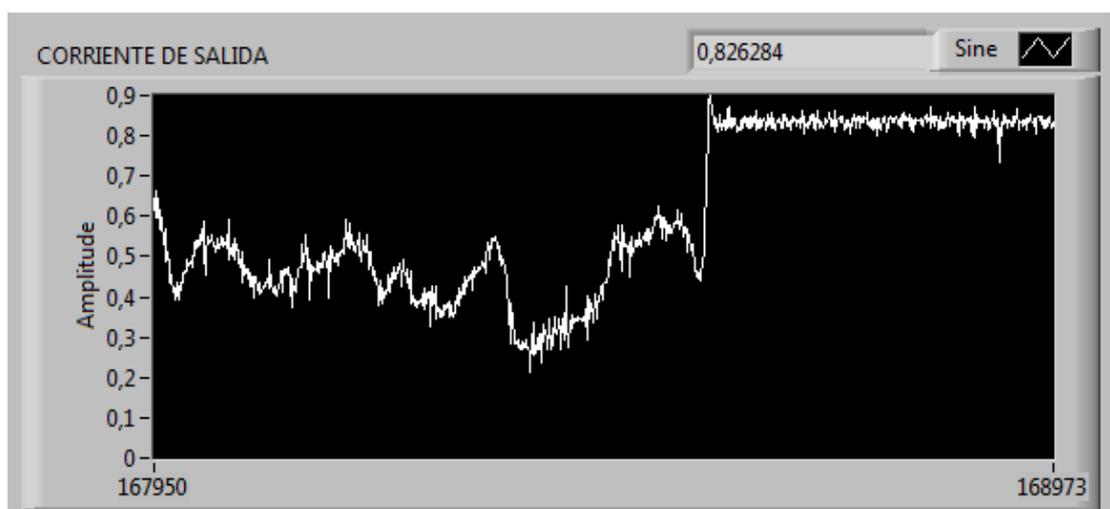
**Figura 4.1** Sensor en voltios. Se mide el voltaje del sensor foto resistivo para utilizarlo como variable de control. P

Se compara la señal del sensor foto resistivo con la posición física utilizando una herramienta de medición.



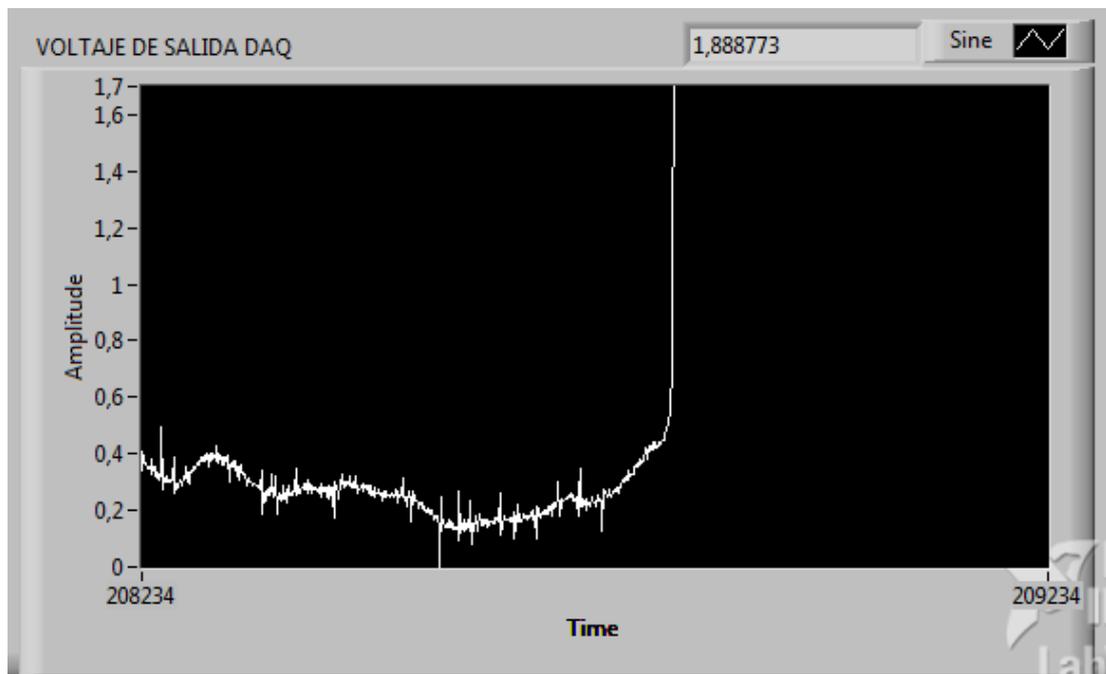
**Figura 4.2** Distancia de Objeto. Se mide la distancia del objeto una vez que se ha escalado la señal de voltaje del sensor.

Se mide la corriente del electroimán por medio de la caída de voltaje del resistor de 0,47 ohm utilizando la entrada analógica AI1.



**Figura 4.3** Corriente del electro imán. Se mide corriente del electro imán por medio del voltaje diferencial de la resistencia de 0,47 ohm.

Se observa la salida del bloque del control PID Lead a la salida física, esta señal sale por la salida análoga de la DAQ.



**Figura 4.4** Voltaje DAQ. Se muestra el voltaje generado por la salida análoga A00.

Se puede leer el comportamiento del voltaje del electro imán por medio de dos puntales situados en la parte externa del levitador.

### **Conclusión**

Se realizó una interfaz de usuario para que el estudiante realice el monitoreo de las señales del sistema de levitación de forma intuitiva.

Se realizó un análisis de las señales de levitación, tomando en cuenta la diferencia de la forma de onda cuando el objeto está en la estabilidad.

### **Recomendación**

Utilizar filtros para la entrada y salida del sistema de control podría afectar a la velocidad de muestreo de las señales del voltaje del sensor y salida de la DAQ.

## Práctica 2: Control de Estabilidad con compensador P.

### Objetivo General.

- Analizar el comportamiento y la estabilidad de la función de transferencia  $G(s)$  de la planta que caracteriza al sistema de levitación magnética.

### Objetivo Específico.

- Añadir a la planta  $G(s)$  un compensador  $C(s)$  Proporcional y verificar su mejora en estabilidad.

### Desarrollo

- Como sabemos, la función de transferencia  $G(s)$  que caracteriza al sistema de levitación magnética está dada por:

$$G(s) = \frac{VX(s)}{U(s)} = K_f K_x K_{LR} \frac{m}{(s^2 + mK_o)}$$

- Introducir los valores en el editor de matlab.

```
clear all;
clc;
m=3.7;    %Define la masa
KLR=0.414; %Constante KLR
Kf=0.0202; %Constante Kf
Kx=657.78; %Constante Kx
Ko=24.542; %Constante Ko
s = tf('s'); %Define plano complejo
G1=(KLR*Kf*Kx)%Numerador de G(s)
G2= (0.27*s^2)+Ko; %Denominador de G(s)
G=G1/G2
zpk(G) %Define forma Polo/Cero
rltool(G) %Llama a libreria RootLocus
```

- Ejecutar el código.

Transfer function:

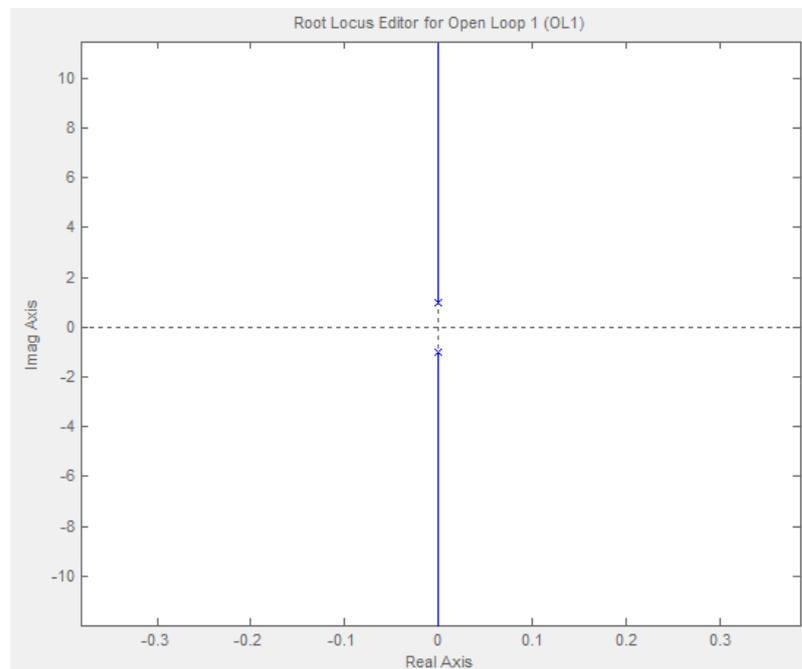
$$135$$

-----

$$0.27 s^2 + 0.27$$

Se tiene una función de transferencia  $G(s)$  con 2 polos.

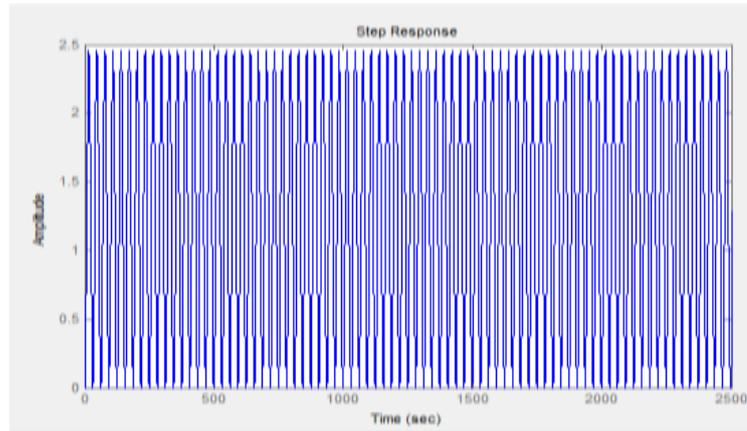
El Polo 1 está ubicado en  $+1$  del plano complejo lo que denota que no es un polo estable.



**Figura 4.5** Localización de raíces. Ubicación de polos y ceros.

- Con un compensador P mayor a cero se observa que mientras incrementa el valor, dos polos imaginarios se alejan del cero en el eje imaginario.
- Con un compensador C menor a cero se observa que mientras disminuye el valor, dos polos se desplazan desde el eje real hasta sus lados infinitos.

Con la herramienta de Visor de Sistemas Invariantes en el Tiempo LTI se observa que el sistema oscila entre 0 a 2.5 y nunca se logra estabilizar.



**Figura 4.6** Respuesta del sistema al escalón. Se observa gráfico de respuesta con un compensador P.

### Conclusión

No es posible estabilidad el sistema de levitación mediante un compensador P ya que el efecto de incrementar o aumentar una ganancia  $C$  no resuelve el problema de la inestabilidad.

### Recomendación

Colocar distintos valores al compensador  $C$  mayores y menores a cero, viendo así el efecto que causa en el plano imaginario y en el dominio del tiempo.

## Práctica 3: Control de Estabilidad con Compensador PI.

### Objetivo General.

- Analizar el comportamiento y la estabilidad de la función de transferencia  $G(s)$  de la planta que caracteriza al sistema de levitación magnética.

### Objetivo Específico.

- Añadir a la planta  $G(s)$  un compensador  $C(s)$  Proporcional Integral y verificar su mejora en estabilidad.

### Desarrollo

Como se sabe, la función de transferencia  $G(s)$  que caracteriza al sistema de levitación magnética está dada por:

Transfer function:

135

$$\frac{135}{0.27 s^2 + 0.27}$$

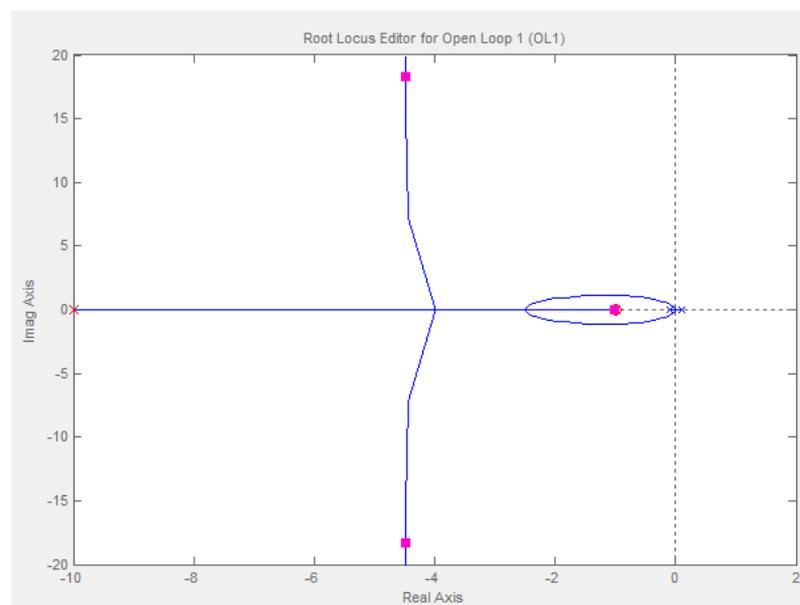
- Hallar un controlador PI de la forma:

$$G(s) = \frac{Kp (1+Ki*s)}{Ki*s}$$

Crear un compensador C(s) con un cero real y un polo.

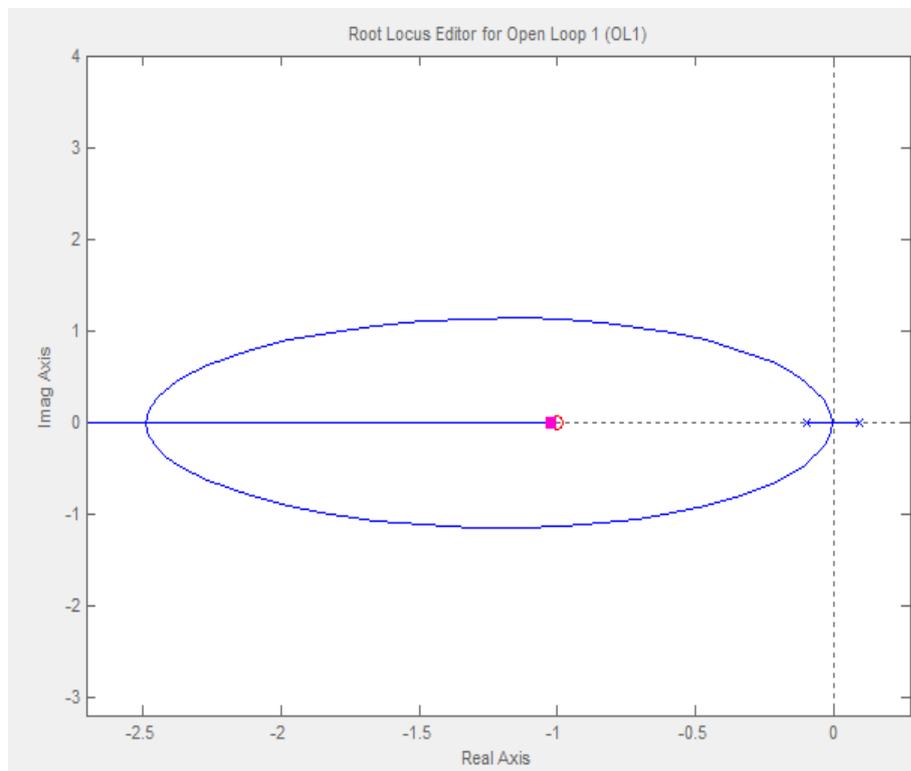
Mover el polo y el cero del compensador C(s) a la parte positiva del plano agrandaría el problema de estabilidad. Desplazar el cero en la posición -1 y desplazando el polo a la posición negativa -10 se va mejorando aparentemente la estabilidad del sistema, pero fíjese que mientras se va alejando el polo a una ubicación negativa, va creciendo la ganancia proporcional, lo que no es conveniente ya que no hay certeza de que la electrónica del circuito pueda soportar dichas ganancias en tiempos cortos.

$$C(s) = 731.9 \times \frac{(1+s)}{(1+0.1s)}$$



**Figura 4.7** Grafico de ubicación de raíces. Movimiento del polo y cero del compensador C(s).

Aplicando una ampliación se observa que el problema de inestabilidad aún está presente en la parte positiva del plano s.



**Figura 4.8** Movimientos de las raíces. Ubicación de polo inestable del sistema.

Se puede observar las características del sistema en el dominio del tiempo.

Tenemos entonces:

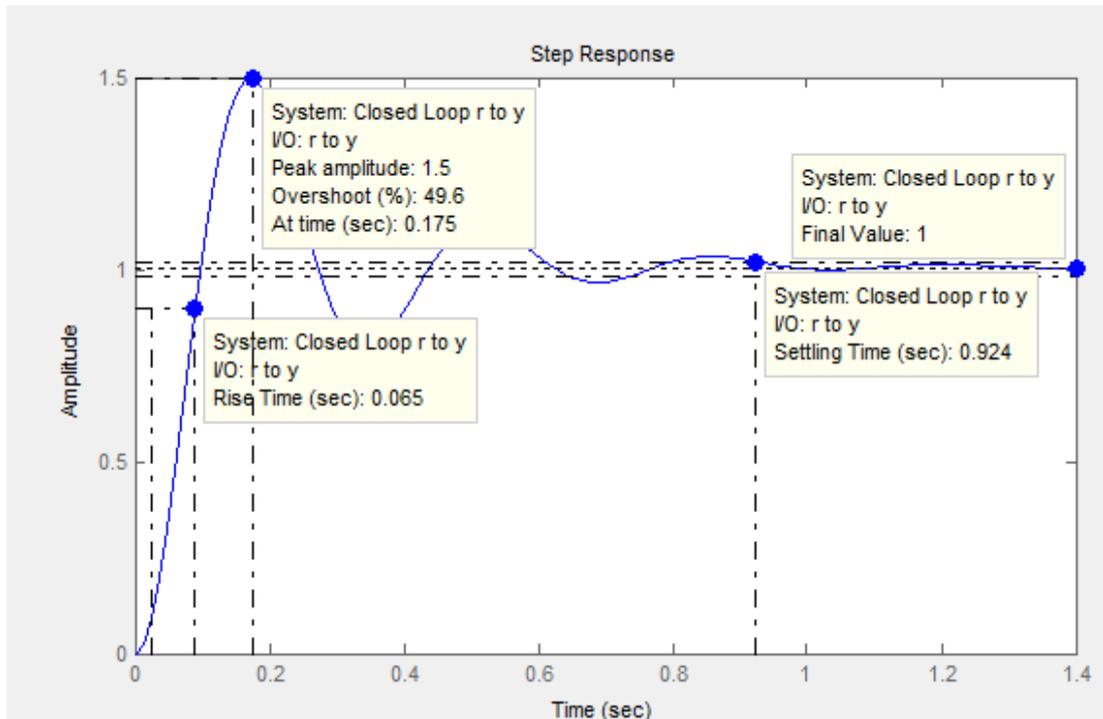
Rise Time = 0.065 segundos que es el tiempo de subida que tarda el sistema en llegar del 10% al 90% del punto de ajuste al ser aplicado una función escalón.

Peak Amplitude = 1.5 es el valor máximo de subida de la amplitud.

Overshoot = 49.6 % es el porcentaje de subida con respecto al punto de ajuste.

Settling Time = 0.924 segundos es el tiempo que demora el compensador en situarse en un 2% del error.

Steady State = 1 nos indica el punto en el cual el sistema es estable, esto nos ayuda a estimar el tiempo en el que el sistema se estabiliza por completo en este caso en 1.4 segundos.



**Figura 4.9** Características del sistema. Análisis en el dominio del tiempo de compensador PI.

Estas son las características del sistema de levitación luego de aplicarse un compensador PI lo cual no es aplicable al sistema de levitación ya que no se resuelve completamente el problema de inestabilidad, un overshoot muy alto haría que el objeto se pegue al electro imán, los tiempos de estabilización son largos.

### Conclusión

Se realiza el análisis de estabilidad mediante el uso de un control PI y se deduce que no es posible estabilidad el sistema de levitación mediante un compensador Proporcional Integral PI debido a que no resuelve el problema de inestabilidad del sistema de levitación magnética.

### Recomendación

Colocar distintos valores al polo y cero del compensador  $C(s)$  Proporcional Integral para observar el comportamiento de la estabilidad y las características en el tiempo al aplicarse la señal de escalón al sistema de levitación.

## Práctica 4: Control de Estabilidad con Compensador PD.

### Objetivo General.

- Analizar el comportamiento y la estabilidad de la función de transferencia  $G(s)$  de la planta que caracteriza al sistema de levitación magnética.

### Objetivo Específico.

- Añadir a la planta  $G(s)$  un compensador  $C(s)$  Proporcional Derivativo y verificar su mejora en estabilidad.

### Desarrollo

- Como se sabe, la función de transferencia  $G(s)$  que caracteriza al sistema de levitación magnética está dada por:

Transfer function:

135

-----

$$0.27 s^2 + 0.27$$

Hallar un controlador PD de la forma:

$$G(s) = Kp(1 + \frac{Kd}{Kp} * s)$$

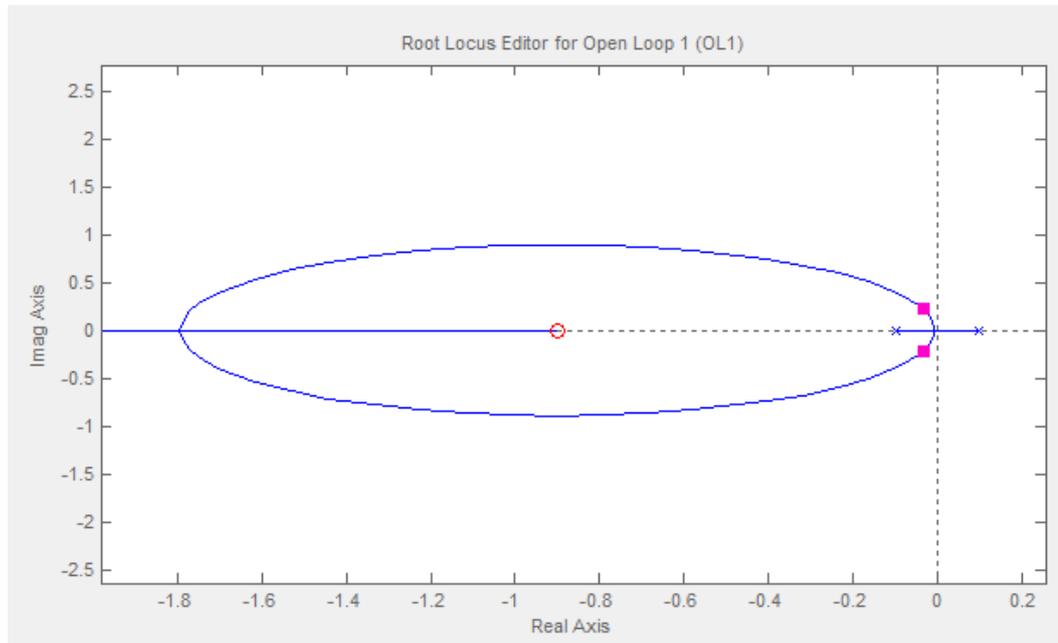
Crear un compensador  $C(s)$  con un cero real.

Mover el cero del compensador  $C(s)$  a la parte positiva del plano agrandaría el problema de estabilidad.

Desplazar el cero a posiciones negativas, es decir, menores a 1.

Encontrar la mejor posición del cero en -0.9, teniendo entonces:

$$C(s) = 1.2248 (1 + 1.1*s)$$



**Figura 4.10** Movimiento del cero del compensador  $C(s)$ . Ajustes de ubicación de raíces.

Se puede observar las características del sistema en el dominio del tiempo.

Se tiene entonces:

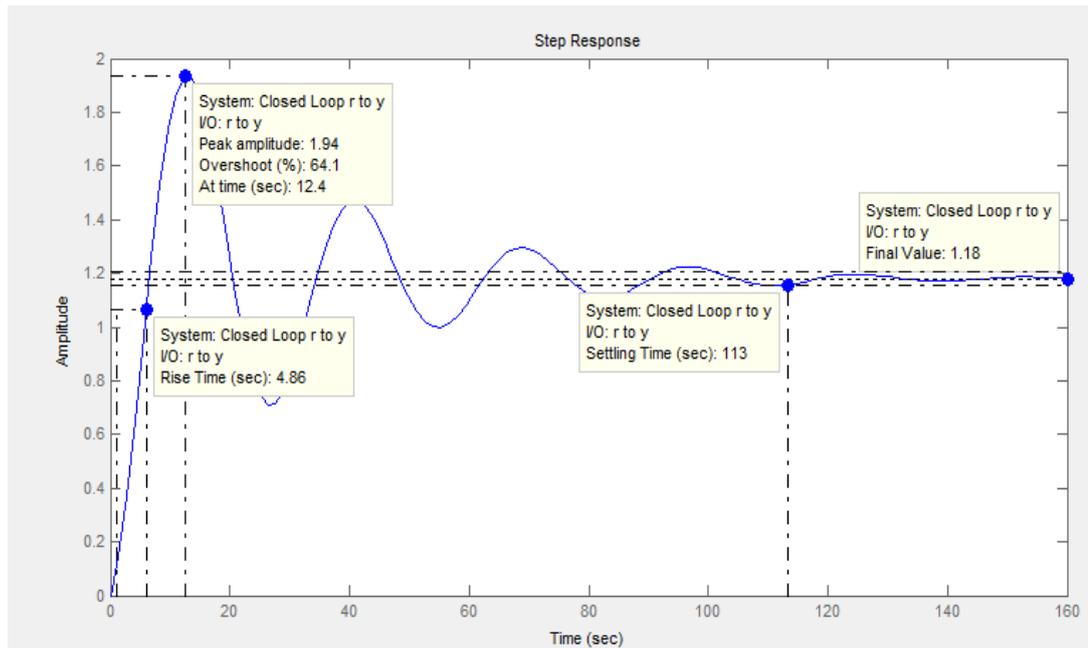
Rise Time = 4.86 segundos que es el tiempo de subida que tarda el sistema en llegar del 10% al 90% del punto de ajuste al ser aplicado una función escalón.

Peak Amplitude = 1.94 es el valor máximo de subida de la amplitud.

Overshoot = 64.1 % es el porcentaje de subida con respecto al punto de ajuste.

Settling Time = 113 segundos es el tiempo que demora el compensador en situarse en un 2% del error.

Steady State = 1.18 indica el punto en el cual el sistema es estable, esto ayuda a estimar el tiempo en el que el sistema se estabiliza por completo en este caso en 1.4 segundos.



**Figura 4.11** Grafico del dominio del tiempo. Análisis en el dominio del tiempo de compensador PD.

Estas son las características del sistema de levitación luego de aplicarse un compensador PD lo cual no es aplicable al sistema de levitación ya que no se resuelve completamente el problema de inestabilidad, el sistema tiene un tiempo de estabilización de 160 segundo lo que es demasiado largo, un pico de subida de 64.1% del punto de ajuste lo que en el sistema levitador haría que el objeto se pegue al electro imán.

### Conclusión

Se realiza el análisis de estabilidad del sistema y se concluye que no es posible estabilidad el sistema de levitación mediante un compensador Proporcional Derivativo PD debido a que no resuelve el problema de inestabilidad del sistema de levitación magnética.

### Recomendación

Colocar distintos valores al cero del compensador  $C(s)$  Proporcional Derivativo para observar el comportamiento de la estabilidad y las características en el tiempo al aplicarse la señal de escalón al sistema de levitación.

## Práctica 5: Control de Estabilidad con Compensador PID.

### Objetivo General.

- Analizar el comportamiento y la estabilidad de la función de transferencia  $G(s)$  de la planta que caracteriza al sistema de levitación magnética.

### Objetivo Específico.

- Añadir a la planta  $G(s)$  un compensador  $C(s)$  Proporcional Integral Derivativo PID y verificar su mejora en estabilidad.

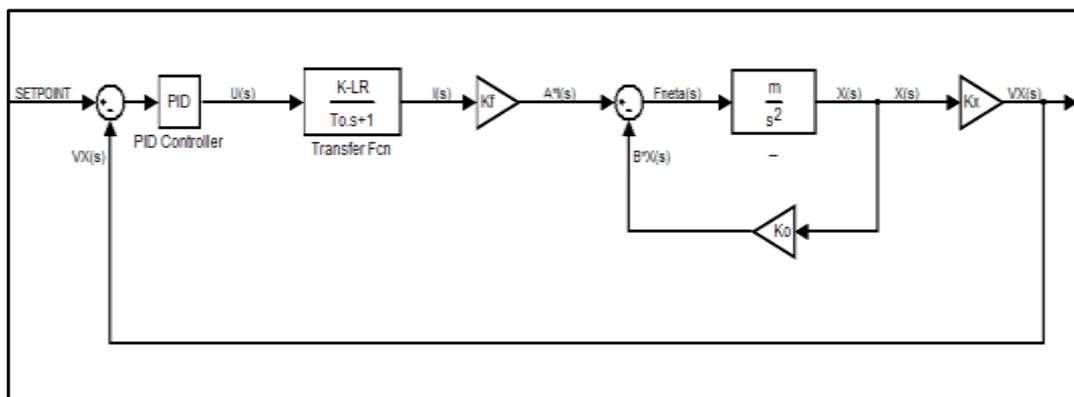
### Desarrollo

- Como se sabe, la función de transferencia  $G(s)$  que caracteriza al sistema de levitación magnética está dada por:
  - Transfer function:

135

$$0.27 s^2 + 0.27$$

Hallar un controlador PID para conseguir estabilidad.

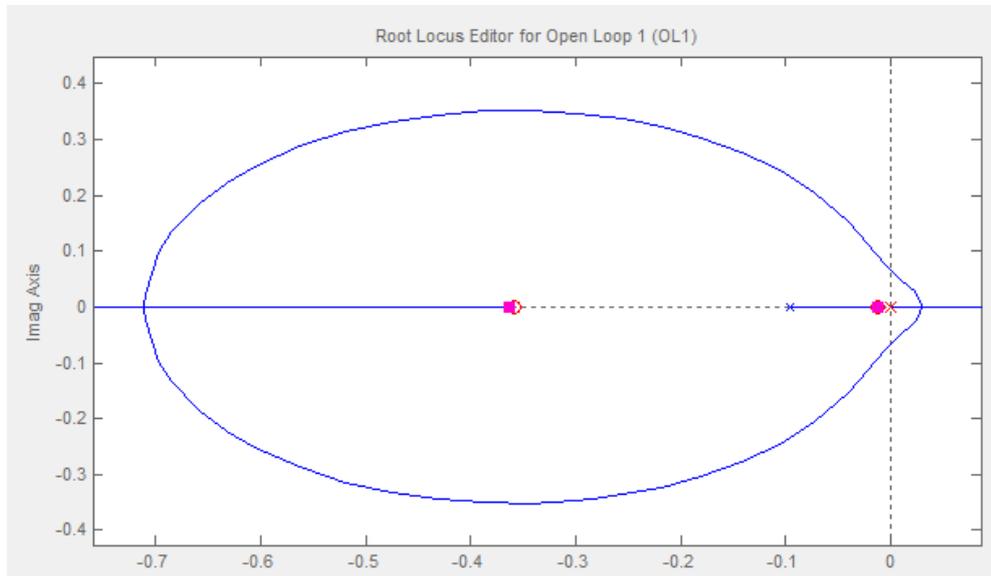


**Figura 4.12** PID en lazo cerrado. Sistema de control en lazo cerrado de la planta completa.

Mover los ceros y el polo del compensador de tal forma que se adapte a las condiciones del sistema.

Hallar la mejor posición de los polos y ceros, entonces:

$$C(s) = 2.6277 \times \frac{(1+2.8*s)(1+87*s)}{s}$$



**Figura 4.13** Ajustes de raíces. Movimiento de ceros y polo del compensador  $C(s)$ .

Se puede observar las características del sistema en el dominio del tiempo.

Tenemos entonces:

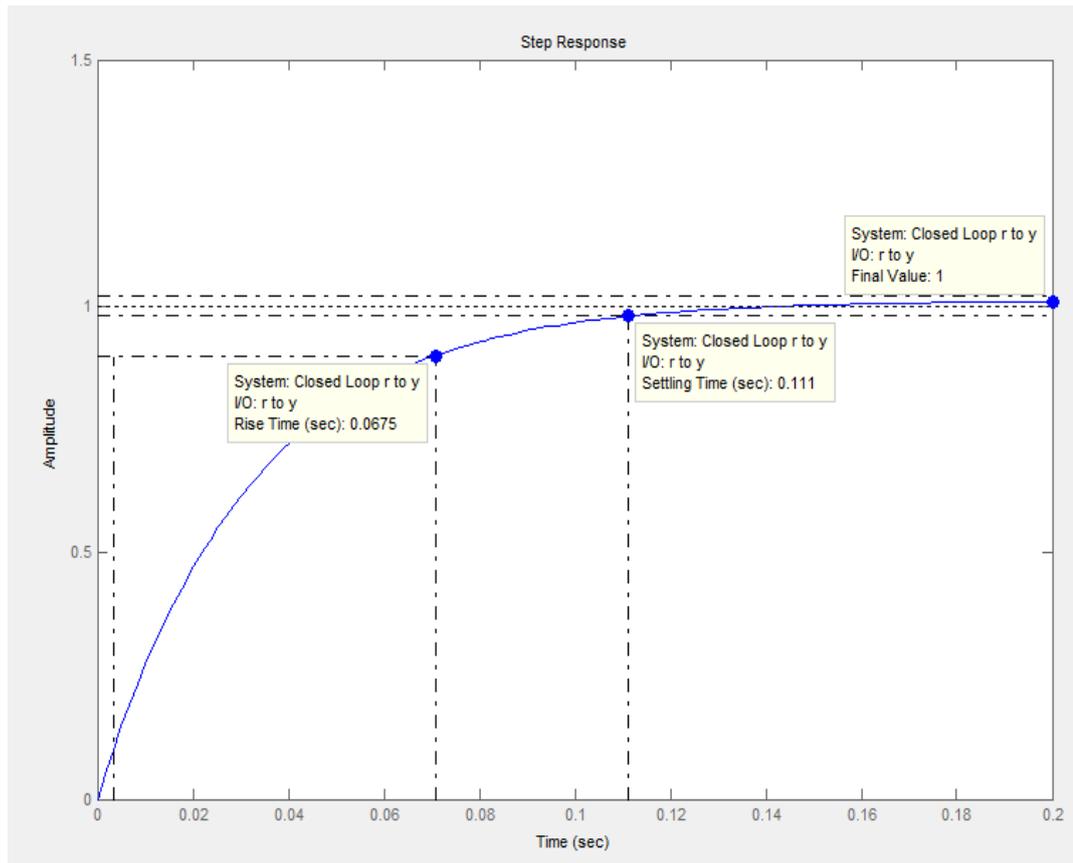
Rise Time = 0.0675 segundos que es el tiempo de subida que tarda el sistema en llegar del 10% al 90% del punto de ajuste al ser aplicado una función escalón.

Peak Amplitude = 0 es el valor máximo de subida de la amplitud.

Overshoot = 0 % es el porcentaje de subida con respecto al punto de ajuste.

Settling Time = 0.111 segundos es el tiempo que demora el compensador en situarse en un 2% del error.

Steady State = 1 indica el punto en el cual el sistema es estable, esto ayuda a estimar el tiempo en el que el sistema se estabiliza por completo en este caso es en 0.2 segundos.



**Figura 4.14** Características del sistema. Análisis en el dominio del tiempo de compensador PID.

Estas son las características del sistema de levitación luego de aplicarse un compensador PID lo cual indica que el controlador PID es el más adecuado para mejorar la estabilidad del sistema de levitación.

### Conclusión

Para estabilizar el sistema es necesario utilizar un compensador LEAD el cual agrega un cero y un polo al sistema, se lo puede encontrar en Labview como PID LEAD/LAG el cual se ajusta a la forma del compensador que hace estable al sistema.

### Recomendación

Utilizar un PID LEAD/LAG en Labview para estabilizar el sistema de levitación ya que se ajusta a los valores de estabilidad real.

## CONCLUSIONES

Se diseña e implementa un Levitador Electro-magnético basado en un control PID utilizando Labview para los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil.

Se construye un electro-imán usando una bobina tipo solenoide utilizando la tarjeta 6009 como interfaz de entradas y salidas de datos entre el software Labview y el sistema de levitación.

Se diseña una estructura de control en lazo cerrado para la obtención de un sistema estable aplicando PID y adicional se crea un sistema de interfaz de usuario en Labview el cual permite la interacción dinámica entre el usuario y el sistema de Levitación.

Se elaboran 5 prácticas didácticas para que el estudiante pueda interactuar con el sistema de levitación. Las prácticas a desarrollarse son:

1. Determinación de parámetros del electroimán.
2. Análisis de estabilidad con compensador P.
3. Análisis de estabilidad con compensador PI.
4. Análisis de estabilidad con compensador PD.
5. Análisis de estabilidad con compensador PID.

## RECOMENDACIONES

El modelado de la planta G del sistema de levitación utiliza un método teórico experimental, por lo que hay que hacer algunos ajustes al momento de poner los valores de ganancia en el sistema de control real, para ello es necesario leer y entender los temas aquí propuestos.

Para la construcción de la bobina se recomienda utilizar un alambre esmaltado #20 ya que si se usa un calibre menor el electroimán sería más grande y pesado teniendo los mismos resultados y la misma fuerza.

Para evitar inestabilidad el objeto a levitar debe tener una masa promedio de 3.7 gramos.

## CRONOGRAMA.

Actividad	oct-14				nov-14				dic-14				ene-15				feb-15				mar-15			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Recopilación de Información	■	■	■																					
Compra y adquisición de los dispositivos			■	■																				
Desarrollo de ecuaciones matemáticas.			■	■	■																			
Construcción de bobina solenoide							■	■																
Construcción de Estructura de soporte.							■	■																
Acoplamiento de dispositivos de medición.									■	■	■	■												
Diseño de Interfaz Gráfica para el usuario.													■	■	■									
Pruebas de señal I/O.															■	■	■	■						
Pruebas de funcionamiento del sistema.															■	■	■	■	■					
Elaboración de Manual de Prácticas																							■	■

## PRESUPUESTO

**Tabla 4**

Presupuesto de gastos realizados para el diseño del proyecto.

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	UNIDAD	P/U.	TOTAL
1	Tarjeta de Adquisición de Datos	1	U.	\$ 505,00	\$ 505,00
2	Transformador 120/24/24/8A	1	U.	\$ 80,00	\$ 80,00
3	Tarjeta Electrónica de Circuito Impreso	1	U.	\$ 100,00	\$ 100,00
4	Tablero rectangular PVC 40x30	1	U.	\$ 50,00	\$ 50,00
5	Componentes Electrónicos Generales	1	U.	\$ 150,00	\$ 150,00
6	Bobina Solenoide de prueba	1	U.	\$ 100,00	\$ 100,00
7	Núcleo de acero de Prueba	1	U.	\$ 50,00	\$ 50,00
8	Placas de Acero al Silicio	1	U.	\$ 100,00	\$ 100,00
9	Alambre de Cobre Esmaltado #14	20	Lbs.	\$ 8,50	\$ 170,00
10	Estructura Soporte en acrilico.	1	U.	\$ 200,00	\$ 200,00
11	Resma de hojas A4 (500 hojas)	2	U.	\$ 4,00	\$ 8,00
12	Cartuchos para impresión	5	U.	\$ 30,00	\$ 150,00
13	Movilización	2	U.	\$ 150,00	\$ 300,00
14	Materiales Varios	1	U.	\$ 200,00	\$ 200,00
	<b>TOTAL</b>				\$ 2.163,00

**Nota:** Estos gastos son los obtenidos durante el desarrollo.

El levitador electro-magnético será para uso de los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana.

## BIBLIOGRAFÍA

*Corriente de Foucault.* (s.f.). Recuperado el 12 de 02 de 2015, de Ecuared:  
[http://www.ecured.cu/index.php/Corriente\\_de\\_Foucault](http://www.ecured.cu/index.php/Corriente_de_Foucault)

Coughlin, Driscoll, Frederick, & Robert F. (1999). *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales.* Mexico.

Donald G., Fink , Wayne, Beaty , & John M. Carroll. (1981). *Manual práctico de electricidad para ingenieros.* New York.

*El transistor MOS.* (s.f.). Recuperado el 05 de 02 de 2015, de  
<http://www.iuma.ulpgc.es/~benito/Docencia/TyCEyF/PDF/apuntes/teoria/Cap4.pdf>

Harper, G. E. (2004). *Guía para el diseño de instalaciones eléctricas, residenciales, industriales y comerciales.* Mexico: 2004.

*Ingeniatic.* (s.f.). Recuperado el 10 de 04 de 2015, de  
<http://ingeniatic.euitt.upm.es/index.php/tecnologias/item/500-lrdfotorresistencia>

Instruments, N. (s.f). *Adquisición de datos.* Recuperado el 05 de 02 de 2015, de National Instruments: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>

Jordan, J. M. (2010). *REseña Historia del Electromagnetismo.* Recuperado el 05 de 02 de 2015, de Teoría electromagnética 502:  
<http://teoriaelectromagneticated502.pbworks.com/w/page/20548742/Rese%C3%B1a%20Historia%20del%20Electromagnetismo>

Lira Pérez , J., & Núñez Gutiérrez, C. (s.f.). *Método de localización de raíces.* Recuperado el 05 de 02 de 2015, de Ingeniería de Control I:  
[http://ciep.ing.uaslp.mx/njiccontrol/images/pdf/c\\_tema\\_4.pdf](http://ciep.ing.uaslp.mx/njiccontrol/images/pdf/c_tema_4.pdf)

Maciel, J. (2004). *Fuentes de alimentación.* Mexico.

Melero, J. F. (16 de 02 de 2011). *Sensores infrarrojos.* Recuperado el 05 de 02 de 2015, de xataka ciencia: <http://www.xatakaciencia.com/tecnologia/sensores-infrarrojos>

Ortiz , P., Dutan, B., Jaramillo, L., Avila-Campoverde, R., Aleman, M., Montedeoca-Contreras, J., & Morales-Garcia, J. (11 de 2014). *Linearization of mass spring damper system for applying linear control PID techniques*. Recuperado el 16 de 02 de 2015, de 2014 IEEE International Autumn Meeting on: <http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2065/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7036300&isnumber=7036277>

Pulido, M. A. (2010). *Electroimanes*. Alicante: 2012.

s.a, G. A.-A. (1998). *Teoría de control: Diseño electrónico*. Barcelona: 1998.

Seippel, R. G. (1977). *Fundamentos de electricidad. principios de electricidad, control y ordenadores*. Barcelona: Reverté, S. A.

Staff, E. E. (1981). *Circuitos magneticos y transformadores*. Barcelona: 2003.

# ANEXOS

## ANEXO 1: Nomenclatura

Fuente DC: Fuente de Voltaje Continuo de 29.54 VDC.

IL: Corriente del Inductor [A] está dado por el voltaje  $V_s$  de la resistencia  $R_s$ , por tanto

$$IL = \frac{V_s}{R_s}.$$

VL: Voltaje RMS del Inductor [V].

Q1: Transistor NPN BC547

Q2: Transistor TIP 3055.

$R_s$ : Resistencia  $1\Omega$  lectura de corriente [ $\Omega$ ].

$V_s$ : Voltaje RMS en Resistencia lectura de corriente [V].

m: Masa del objeto a levitar [Kg].

x: Posición del objeto medido desde la base del núcleo. [mm]

$V_x$ : Voltaje RMS de la salida del sensor de posición [V].

$F_{magnetica}$ : Fuerza magnética del Electro Imán [N].