

# MODELO DE LEVITADOR MAGNÉTICO EXPERIMENTAL PARA PRÁCTICA DOCENTE

Juan Manuel Guariste

Ignacio Islas

Javier Mosconi

Este Trabajo Final de carrera fue presentado al Departamento de Electrónica y  
Computación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de  
Mar del Plata el **día X de Mayo del año 2022**, como requisito parcial para  
la obtención del título de

Ingeniero en Electrónica

Director: Ing. Walter Kloster

Co-Director: Ing. Gustavo Uicich

El presente trabajo fue realizado en el Laboratorio de Instrumentación y Control del Departamento de Electrónica y Computación, ICyTE, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata.

*MODIFICARRRRRRRRR LUEGO EN MASTER.tex*



# Índice general

Índice de tablas	IX
Índice de figuras	XI
<b>1. Introduccion</b>	<b>1</b>
1.1. Alcance del proyecto . . . . .	1
1.2. Contexto del proyecto . . . . .	2
1.3. Descripción del dispositivo . . . . .	2
<b>2. Caracterización del Electroimán</b>	<b>7</b>
2.1. Diseño del electroimán . . . . .	8
2.2. Modelado físico . . . . .	10
2.3. Cálculo de la fuerza magnética . . . . .	13
2.4. Análisis del electroimán . . . . .	14
2.5. Expresión de inductancia linealizada . . . . .	15
2.6. Mediciones sobre el electroimán . . . . .	15
2.7. Modelo de estado de la planta . . . . .	15
<b>3. Controlador de corriente</b>	<b>19</b>
3.1. Diseño y modelado . . . . .	19
3.1.1. Características del sistema . . . . .	20

3.1.2.	Circuito del controlador de corriente . . . . .	21
3.1.2.1.	Simulaciones de formas de onda . . . . .	23
3.1.2.2.	Simulación de un escalón en la referencia de co- rriente . . . . .	24
3.1.2.3.	Descripción general de la topología . . . . .	25
3.1.2.4.	Dimensionamiento de capacitor de bootstrap . . .	29
3.1.2.4.1.	Resistencia entre gate y source . . . . .	33
3.1.2.4.2.	Protección del gate . . . . .	33
3.1.2.4.3.	Tiempo muerto . . . . .	34
3.1.2.5.	Dimensionamiento de los capacitores de fuente . .	34
3.1.2.6.	Conmutación de alta frecuencia para el bootstrap	37
3.1.2.7.	Simulación del sistema con oscilador auxiliar . . .	39
3.1.3.	Características estáticas y dinámicas del controlador . . .	40
3.1.3.1.	Corriente media del electroimán . . . . .	40
3.1.3.2.	Frecuencia de conmutación de la corriente . . . . .	40
3.1.3.3.	Ancho de banda del controlador . . . . .	40
3.1.4.	Transferencia lineal del controlador de corriente . . . . .	42
<b>4.</b>	<b>Estimador Analogico</b>	<b>43</b>
4.1.	Diseño y modelado del Estimador Analogico . . . . .	43
4.1.1.	Análisis de la estimación . . . . .	44
4.1.2.	Modelo circuital del estimador de posición . . . . .	46
4.1.3.	Circuito del derivador compensado . . . . .	48
4.1.4.	Diseño del LPF . . . . .	50
4.1.5.	Compensación $I^*R$ . . . . .	52
4.1.6.	Rectificador, Restador y Filtrado . . . . .	57
4.1.6.1.	Rectificador . . . . .	57

4.1.6.2.	Restador . . . . .	59
4.1.6.3.	Etapas de filtrado . . . . .	60
4.1.7.	Circuito completo . . . . .	62
4.1.8.	Simulación de estimador completo . . . . .	63
4.1.9.	Transferencia final del estimador de posición: . . . . .	64
<b>5.</b>	<b>Compensador Analógico</b>	<b>67</b>
5.1.	Compensador Analógico . . . . .	67
5.1.1.	Diseño de compensador por adelanto de fase . . . . .	68
5.1.2.	Diseño circuital . . . . .	68
5.1.3.	Compensador con integrador . . . . .	70
5.1.3.1.	Implementación circuital del integrador . . . . .	70
5.1.3.2.	Cálculo de ganancia de entrada . . . . .	71
5.1.3.3.	Implementación circuital del bloque de ganancia de entrada “F” . . . . .	73
<b>6.</b>	<b>Implementación Digital</b>	<b>75</b>
6.1.	Descripción general . . . . .	75
6.2.	Determinación de la frecuencia de muestreo . . . . .	77
6.3.	Adquisición y procesamiento de las muestras . . . . .	78
6.4.	Estimación digital de la posición . . . . .	80
6.5.	Resolución en posición . . . . .	83
6.6.	Acondicionamiento de señales para el ADC . . . . .	86
6.6.1.	Referencia de posición . . . . .	86
6.6.2.	Componente continua de corriente del electroimán . . . . .	87
6.6.3.	Componente continua de corriente del electroimán . . . . .	88
6.7.	Acondicionamiento de señales para el DAC . . . . .	89
6.8.	Transferencias de la planta y del controlador de corriente . . . . .	90

6.9. Diseño de Compensador . . . . .	91
6.9.1. Análisis de estabilidad con masa de 30 Kg . . . . .	91
6.9.2. Análisis de estabilidad con masa de 1 Kg . . . . .	98
6.10. Diseño de lazo de realimentación externo . . . . .	100
6.11. Cálculo de los coeficientes del controlador . . . . .	105
6.11.1. Conexión entre el PCB y el microcontrolador . . . . .	106
<b>7. PCB . . . . .</b>	<b>107</b>
7.1. PCB . . . . .	107
<b>8. Bibliografía . . . . .</b>	<b>109</b>



# Índice de tablas

3.1. Valores calculados y medidos en función del Gap de aire. . . . .	42
4.1. $V_{yf}$ en función de la posición. . . . .	48
4.2. Resultados de simulación del estimador. . . . .	64
5.1. Tensión de referencia $[V_{in}]$ Vs separación deseada $[Y]$ . . . . .	72
6.1. Valores de frecuencia calculados a partir de las mediciones de in- ductancia realizadas. . . . .	77



# Índice de figuras

1.1. Esquema del producto. . . . .	3
1.2. Diagrama en bloques del sistema. . . . .	4
2.1. Dimensiones del electroimán . . . . .	8
2.2. Carrete de plástico para el bobinado . . . . .	9
2.3. Modelado físico. . . . .	10
2.4. Toroide con gap de aire. . . . .	12
3.1. Diagrama en bloques simplificado del controlador de corriente. . .	20
3.2. Etapa de entrada. . . . .	21
3.3. Comparador con histéresis. . . . .	22
3.4. Puente H y sensor de efecto Hall. . . . .	23
3.5. Resta del $V_{bias}$ al sensor de efecto Hall. . . . .	23
3.6. Formas de onda de corriente en el electroimán y salida del compa- rador. . . . .	24
3.7. Respuesta al escalón del circuito. . . . .	25
3.8. Topología elemental del puente H. . . . .	26
3.9. Configuración Bootstrap simplificada. . . . .	28
3.10. Puente H. . . . .	30
3.11. Forma de onda de la corriente en C1 y C2. . . . .	35

3.12. Capacitores de la fuente. . . . .	36
3.13. Circuito oscilador de frecuencia auxiliar. . . . .	39
3.14. Simulación de corriente en el electroimán, salida del comparador, y conmutación auxiliar. . . . .	39
4.1. Diagrama en Bloques del Estimador. . . . .	44
4.2. Circuito del electroimán con el driver de corriente. . . . .	45
4.3. Circuito derivador. . . . .	46
4.4. Circuito derivador compensado . . . . .	48
4.5. GH del derivador compensado.png . . . . .	49
4.6. Transferencia de lazo cerrado . . . . .	50
4.7. Filtro para la entrada del derivador . . . . .	51
4.8. Respuesta en frecuencia del filtro activo . . . . .	52
4.9. Forma de onda luego de rectificar sin compensación IR. . . . .	53
4.10. Esquema circuital del derivador. . . . .	54
4.11. Generación de Vbias. . . . .	55
4.12. Formas de onda obtenidas en la simulación . . . . .	56
4.13. Rectificador y restador. . . . .	57
4.14. Restador. . . . .	60
4.15. Esquema circuital del restador con una etapa de filtrado en $159,2\text{ Hz}$ . . . . .	62
4.16. Circuito estimador de posición completo . . . . .	63
4.17. Simulación final del estimador. . . . .	64
5.1. Diagrama del sistema completo. . . . .	67
5.2. Diseño circuital de una red de adelanto de fase. . . . .	68
5.3. Etapa de ganancia del compensador. . . . .	69
5.4. Implementación circuital del integrador. . . . .	71
5.5. Diagrama en bloques final. . . . .	72

5.6. Etapa de entrada. . . . .	73
6.1. Diagrama en bloques de la implementación digital. . . . .	76
6.2. Diagrama en bloques de la etapa digital simplificado. . . . .	76
6.3. Diagrama de flujo del procesamiento de las muestras adquiridas. .	79
6.4. Variación de pendiente ante mínimo cambio de posición. . . . .	84
6.5. Circuito acondicionador para componente alterna de corriente del electroimán. . . . .	87
6.6. Circuito acondicionador para componente alterna de corriente del electroimán. . . . .	88
6.7. Circuito acondicionador para componente continua de corriente del electroimán. . . . .	88
6.8. Circuito acondicionador para la salida del DAC correspondiente al compensador. . . . .	89
6.9. Circuito acondicionador para la salida del DAC correspondiente al estimador digital. . . . .	90
6.10. Diagrama de Bode de lazo abierto GHT con $M=30$ Kg. . . . .	92
6.11. Diagrama de Nyquist de GHT con $M=30$ Kg. . . . .	92
6.12. Forma del diagrama de Nyquist deseado. . . . .	93
6.13. Diagrama de Bode de $GHT*GC$ para $K=1$ y $M=30$ Kg. . . . .	95
6.14. Diagrama de Bode de $GHT*GC$ para $K=2630$ y $M=30$ Kg. . . . .	96
6.15. Diagrama de Nyquist de $GHT*GC$ para $K=2630$ y $M=30$ Kg. . .	97
6.16. Respuesta al escalón para $M=30$ Kg. . . . .	98
6.17. Diagrama de Bode de $GH_T * G_C$ para $M=1$ Kg. . . . .	99
6.18. Diagrama de Nyquist de $GH_T * G_C$ para $M=1$ Kg. . . . .	99
6.19. Respuesta al escalón para $M=1$ Kg. . . . .	100
6.20. Diagrama del sistema completo. . . . .	100

6.21. Lugar de raíces con el integrador. . . . .	102
6.22. Respuesta al escalón con integrador con $K_{int}=1$ y $M=30$ Kg. . .	103
6.23. Respuesta al escalón con integrador para $K_{int}=20$ y $M=30$ Kg. .	104
6.24. Respuesta al escalón con integrador para $K_{int}=20$ y $M=1$ Kg. .	105

# *Agradecimientos*

AI DIEGOTE PAPA

# Capítulo 1

## Introduccion

Ver de poner una intro general de levitación magnetica y la importancia de los sistemas de co

El desarrollo de este sistema de levitación magnética surge como idea de los responsables de la cátedra Sistemas de Control de la carrera de Ingeniería Electrónica, con el objetivo de disponer de una planta de control para realizar prácticas en clase. Una primera versión de este dispositivo fue desarrollada y construída por la cátedra. Los integrantes de este proyecto tuvieron la oportunidad de realizarle pruebas y modificaciones durante el cursado de la asignatura. Sin embargo, no se pudo lograr que el dispositivo funcionara correctamente al finalizar la cursada. Por este motivo, se propuso hacer un rediseño de todas las etapas que componen al sistema en el marco de un proyecto final.

### 1.1. Alcance del proyecto

El objetivo de este proyecto es diseñar un sistema de levitación magnética a partir de un electroimán de laminación normalizada con núcleo tipo “E”. Este sistema integra las etapas de driver de corriente de potencia, estimación de distancia de levitación, y control de la planta. Estas dos últimas deben implementarse tanto



en forma analógica como digital.

Este documento contempla el proceso de diseño y modelado de todas las etapas pertenecientes al sistema, junto con su implementación circuital y simulaciones. Además, se realiza el diseño del circuito impreso de la placa de control.

## **1.2. Contexto del proyecto**

El proyecto comenzó en junio del 2020. Inicialmente tenía como objetivo el diseño y la construcción de un prototipo funcional que permitiera a los alumnos de la asignatura de Sistemas de Control realizar mediciones y observar el comportamiento de las distintas etapas que componen el sistema. Sin embargo, debido a los retrasos ocasionados por la pandemia (COVID-19), los costos asociados a los componentes y a la fabricación de la placa de control, sumado a la necesidad de no extender indefinidamente el proyecto, se optó por acotar el alcance sólo al diseño teórico de todas las etapas y del circuito impreso.

Se espera que en el futuro se pueda construir el sistema de levitación magnética para que sirva como herramienta para los alumnos, de forma tal que les permita experimentar y afianzar los conceptos teóricos adquiridos durante el transcurso de la cursada.

## **1.3. Descripción del dispositivo**

El producto está compuesto por dos partes principales: un electroimán y una placa de control. El electroimán tiene dos piezas formadas por láminas de acero apiladas: una con forma de “E”, que tiene un cable bobinado en su rama central. y otra con forma de “I” que es atraída por la primera mediante una fuerza electromagnética. Esta fuerza es regulada por la placa de control, que mantiene la distancia de

separación o “gap” de aire deseado entre ellas mientras el objeto que se desea hacer levitar se sujeta de la pieza en forma de “I”. El sistema completo se muestra en la figura 1.1.

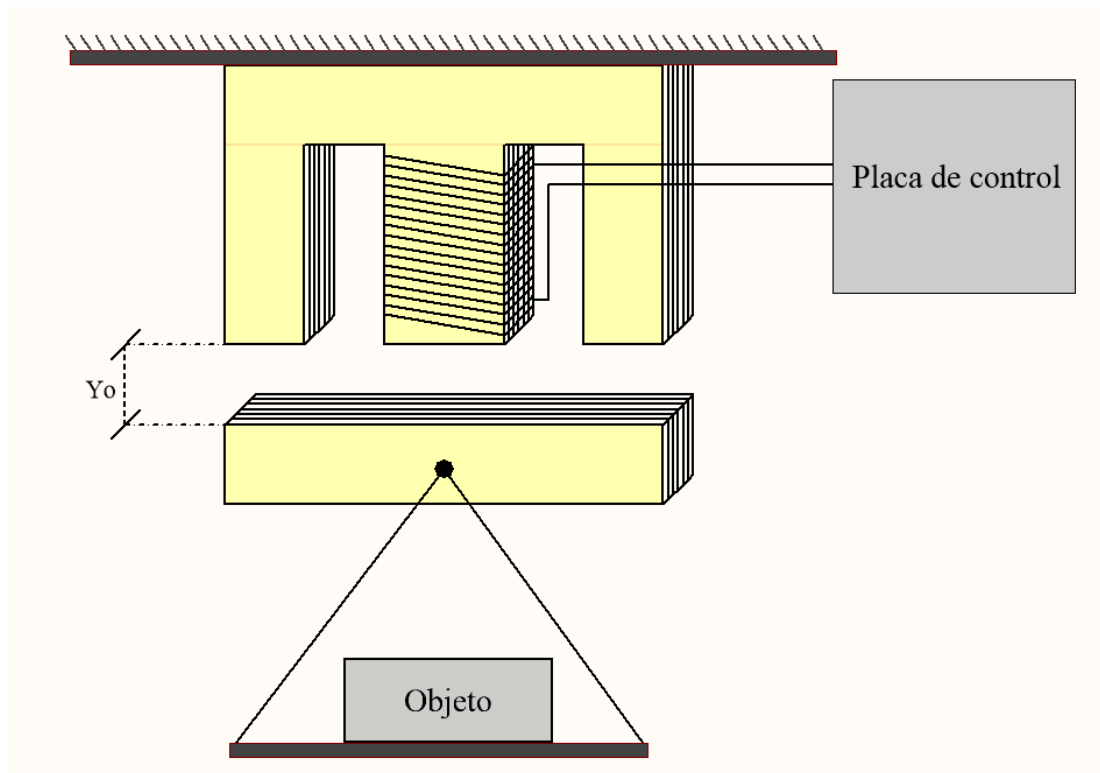


Figura 1.1: Esquema del producto.

La fuerza electromagnética es regulada por la placa de control con el objetivo de mantener fija la distancia  $Y_o$ , a pesar de las perturbaciones externas que el sistema pueda recibir.

El sistema solo ejerce control de posición en el eje vertical, por lo tanto no puede responder ante perturbaciones horizontales sobre el objeto.

El sistema está conformado por los bloques que se muestran en la Figura 1.2. Se utilizan dos controladores distintos: uno analógico y otro digital. Cada uno de ellos se compone de un compensador y un estimador de posición. El usuario

decidirá cual de estas implementaciones ejercerá el control mediante la utilización de un switch, por lo que solo una estará activa al mismo tiempo. El sistema analógico está formado por un conjunto de componentes pasivos y amplificadores operacionales, mientras que el digital está basado en un microcontrolador re-programable. Ponerle un signo menos al restador de la figura 1.2

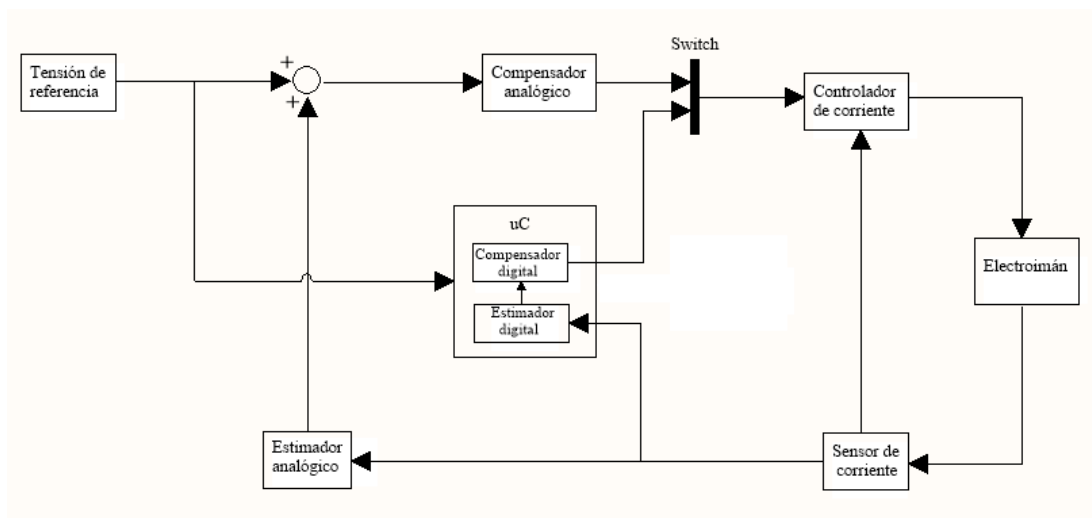


Figura 1.2: Diagrama en bloques del sistema.

El estimador de posición se encarga de entregar una tensión proporcional al gap de aire real en función de la corriente que circula por el electroimán. El usuario puede modificar el gap de aire que desea mediante un potenciómetro presente en la placa de control. Tanto la implementación analógica como la digital reciben como entrada esta tensión. Luego, es comparada con la estimación y se utiliza como entrada para el compensador.

La función del compensador es garantizar la estabilidad del sistema. Esto lo logra al modificar la referencia del controlador de corriente mediante una acción de control.

Por otro lado, el controlador de corriente se encarga de proveer corriente al electroimán de forma tal que le permita generar la fuerza electromagnética necesaria para mantener el gap de aire.



## Capítulo 2

# Caracterización del Electroimán

Para el desarrollo del proyecto se dispone ya de un electroimán que funcionará como actuador del sistema. A partir de sus características constructivas, y del modelo físico y dinámico del problema, se podrán determinar otros parámetros del sistema de control.



El bobinado está conformado por 150 vueltas de alambre de cobre esmaltado de  $2,5mm$  de diámetro enrollado alrededor de un carrete de plástico (figura 2.2) que luego se ubica en la rama central de la pieza E.

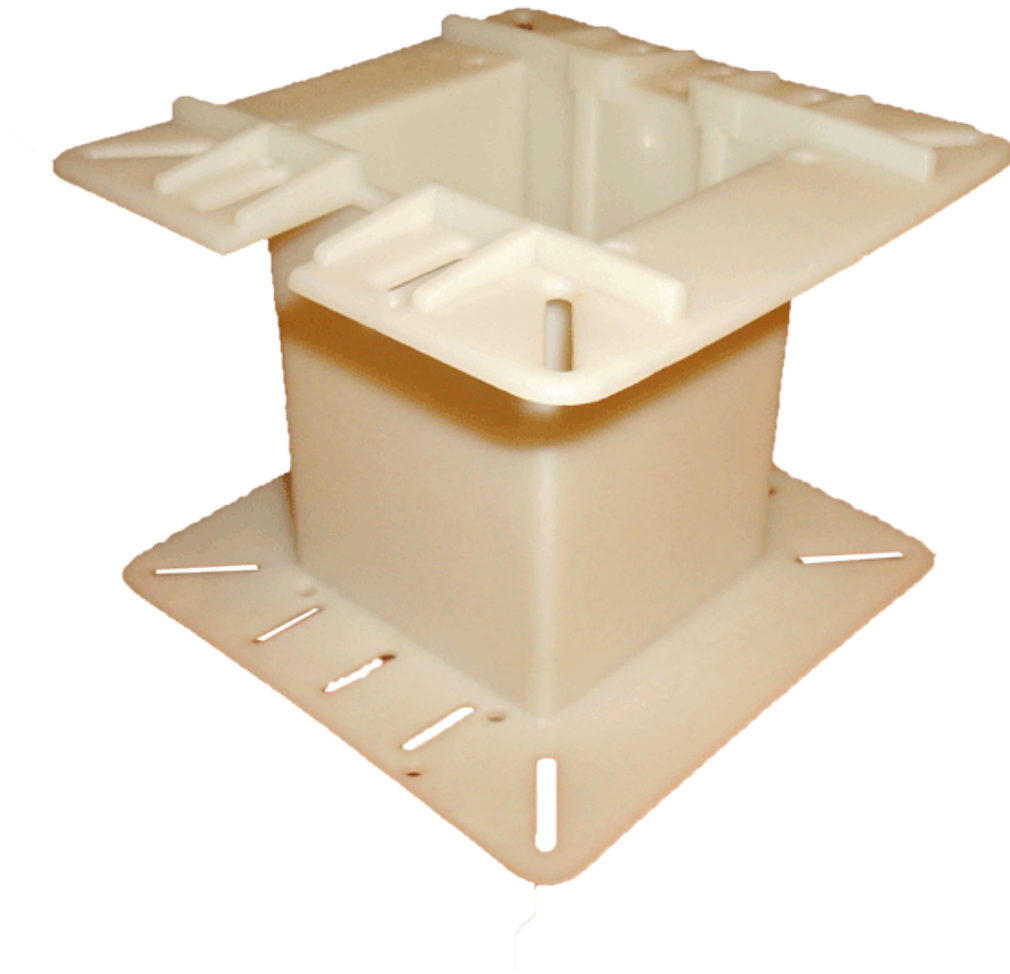


Figura 2.2: Carrete de plástico para el bobinado

Se utiliza un apilado de láminas cuyo exterior está recubierto por una pintura esmaltada para aislarlas entre sí con el fin de minimizar las pérdidas de energía causadas por las corrientes eléctricas que se generan en el núcleo debidas al flujo



magnético. . Está construido por una laminación normalizada sin desperdicio 600. Estas son útiles ya que cada par de laminas E y I puede fabricarse a partir de una lámina de acero rectangular, de manera de que no se desperdicia material durante la fabricación. **poner figura del electroimán real???**

## 2.2. Modelado físico

Se puede modelar el sistema como un objeto de masa puntual que es sometido a dos fuerzas opuestas en el eje “Y” de la figura 2.3: la de su propio peso hacia abajo, y una fuerza realizada por el electroimán en sentido contrario.

**MARCAR Y<sub>0</sub> EN LA IMAGEN**

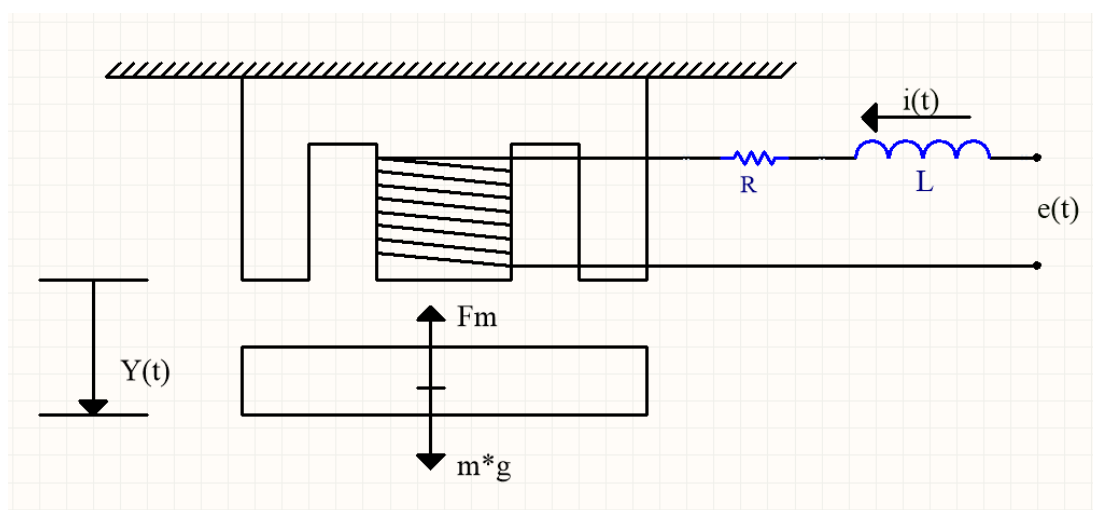


Figura 2.3: Modelado físico.

La fuerza correspondiente al peso del objeto es  $P = m \cdot g$ , donde  $m$  es la masa en kg y  $g$  es la aceleración de la gravedad en  $\frac{m}{s^2}$ . Para mantenerlo levitando en estado de equilibrio, el electroimán debe generar una fuerza de igual módulo y sentido contrario. Esto lo logra a partir de la circulación de un flujo magnético

entre su núcleo y la pieza con forma de I. Entre estas dos piezas se conforma lo que se conoce como circuito magnético, en el que la energía fluye impulsada por una fuerza magnetomotriz.

La fuerza magnetomotriz generada en el núcleo del electroimán es proporcional a la corriente que circula por su bobinado, y su módulo está dado por la ecuación 2.1, que también la relaciona con la reluctancia del circuito magnético y la magnitud del flujo magnético.

$$F_{mm} = N * i = R_m * \phi \quad (2.1)$$

$R_m$  corresponde a la reluctancia del circuito magnético,  $\phi$  indica la magnitud del flujo, es decir, la cantidad de campo magnético que atraviesa una superficie y  $F_{mm}$  es la fuerza magnetomotriz (que es distinta a la fuerza magnética  $F_m$ ). La ley de Hopkinson relaciona estos parámetros con la corriente que circula por el bobinado ( $i$ ) y la cantidad de vueltas de su núcleo ( $N$ ).

Por otro lado, la inductancia del bobinado está dada por la ecuación 2.2

$$L * i = N * \phi \quad (2.2)$$

El electroimán utilizado (figura 2.3) está compuesto por una pieza en forma de E y otra en forma de I, que se encuentran separadas por un espacio o gap de aire. Este circuito magnético se puede modelar como a un toroide con un corte o separación de longitud  $lA = 2 * y_o$ , como se muestra en la figura 2.4

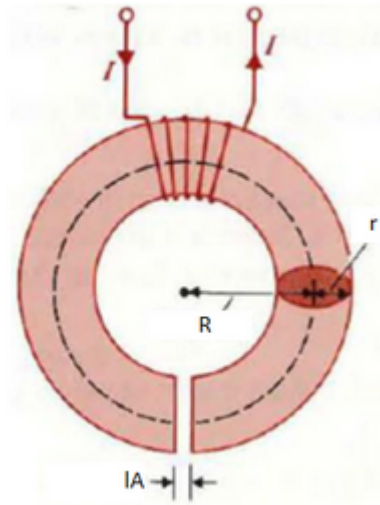


Figura 2.4: Toroide con gap de aire.

Partiendo del caso de un toroide sin gap de aire, se puede modelar su reluctancia con la ecuación 2.3. En la que  $A$  es el área transversal,  $\mu_r$  es la permeabilidad relativa del material,  $\mu_o$  es la permeabilidad magnética en el vacío y  $l_h$  es la longitud del circuito magnético.

$$R_m = \frac{l_h}{\mu_o * \mu_r * A} \quad (2.3)$$

Combinando las ecuaciones 2.1, 2.2, y 2.3, se llega a la expresión de la inductancia del toroide sin gap de aire:

$$L = \frac{N}{i} * \phi = \frac{N}{i} * \frac{N * i}{R_m} = \frac{N^2 * A * \mu_o * \mu_r}{l_h} \quad (2.4)$$

Al agregar un gap de aire, se genera una discontinuidad en el medio magnético de distancia  $l_A$  (longitud en el aire).

El flujo magnético atraviesa esta discontinuidad sin desviaciones (siempre que  $l_A$  sea pequeña comparada con el área transversal  $A$ ).

Al haber un gap de aire la reluctancia del sistema aumenta, por lo que se debe

sumar, en serie a  $R_m$ , la reluctancia en el aire  $R_a$ . Por otro lado,  $l_h$  prácticamente no se ve modificada ya que es una pequeña incisión en el circuito magnético. De esta forma, se obtiene la ecuación 2.5.

$$L = \frac{N^2}{R_m * R_a} = \frac{N^2}{\frac{l_h}{A * \mu_o * \mu_r} + \frac{l_a}{A * \mu_o}} = \frac{N^2 * A * \mu_o}{l_a + \frac{l_h}{\mu_r}} \quad (2.5)$$

Debido a que  $l_a$  es el gap de aire, se debe reemplazar por la distancia de separación entre las dos piezas magnéticas, que está representada por la variable  $y_o$ . En el caso de nuestro electroimán, las líneas de fuerza atraviesan dos veces y, por lo tanto  $l_a = 2 * y_o$ .

Además, en la ecuación 2.5  $\mu_r \gg 1$  entonces  $2 * y_o \gg \frac{l_h}{\mu_r}$ , se obtiene la inductancia en función de la distancia del gap de aire:

$$L(y) = \frac{N^2 * A * \mu_o}{2 * y_o} \quad (2.6)$$

## 2.3. Cálculo de la fuerza magnética

La fuerza magnética de atracción que ejerce el electroimán sobre la pieza en forma de I se puede modelar a partir de la energía almacenada en un inductor y al considerar que esta es igual al trabajo:

$$E(i, y) = W = \int F_m * dy \Rightarrow F_m = \frac{\partial E(i, y)}{\partial y} \quad (2.7)$$

Siendo  $E(i, y)$  la energía que almacena un inductor en su campo magnético:

$$E(i, y) = \frac{L(i, y) * i^2}{2} \quad (2.8)$$

La expresión anterior indica que la cantidad de energía que almacena el sistema

es función del gap de aire ( $y$ ) y de la corriente que circula por el electroimán ( $i$ ).

Combinando las ecuaciones 2.6, 2.7 y 2.8:

$$|F_m| = \frac{\partial E(i, y)}{\partial y} = \frac{i^2}{2} * \frac{\partial \frac{N^2 * A * \mu_o}{2 * y}}{\partial y} = \frac{i^2 * N^2 * \mu_o * A}{4 * y^2} \quad (2.9)$$

Como se puede apreciar en la ecuación 2.9 la fuerza es proporcional al cuadrado de la acción de control (es decir, de la corriente), e inversamente proporcional al cuadrado de la variable que se desea controlar (es decir, de la distancia). Por lo tanto, el problema adquiere un comportamiento no lineal.

## 2.4. Análisis del electroimán

Utilizando los datos de construcción del electroimán mencionados en el apartado 2.1 se puede determinar qué corriente será necesaria para sostener el objeto del peso deseado.

Para obtener una expresión de diseño, partimos de la ecuación 2.9 y la igualamos a la fuerza ejercida por el peso del objeto que se debe hacer levitar ( $|F_m| = m * g$ ):

$$m * g = \frac{i^2 * N^2 * \mu_o * A}{4 * y^2} \quad (2.10)$$

De la ecuación 2.10, y a partir de las condiciones de diseño del problema, se puede determinar la corriente necesaria para mantener el objeto en suspensión:

$$i_{nom} = \sqrt{\frac{4 * m * g * y^2}{N^2 * \mu_o * A}} \quad (2.11)$$

Considerando las condiciones mas exigentes para el sistema, con  $m = m_{max} = 30kg$  e  $y = y_{max} = 5mm$ :

$$i_{nom} = 20,4A \quad (2.12)$$

Aunque esta corriente es suficiente para mantener el objeto en estado de equilibrio, se necesita una corriente mayor para poder responder ante perturbaciones en la distancia de separación, por lo tanto se define la corriente máxima  $i_{max} = 30A$ .

## 2.5. Expresión de inductancia linealizada

Volviendo a la ecuación 2.6, se realiza una expansión por serie de Taylor y se desprecian los términos de orden mayor o igual a 2, con el objetivo de llegar a una expresión lineal para la inductancia se obtiene:

$$L(y)[mH] = -2,2089 * y[mm] + 17,67[mH] \quad (2.13)$$

## 2.6. Mediciones sobre el electroimán

esto iría acá??

## 2.7. Modelo de estado de la planta

Al plantear un diagrama de cuerpo aislado del sistema **poner imagen** y plantear la sumatoria de fuerzas en el eje y:

$$\sum F_y = m * a \Rightarrow m * g - F_m = m * \ddot{y} \quad (2.14)$$

De la ecuación 2.9 se convierte la ecuación 2.14 en:

$$m * \ddot{y} = m * g - K * \frac{i(t)^2}{y(t)^2} \quad (2.15)$$

Donde K es una constante de valor:

$$K = \frac{N^2 * \mu_o * A}{4} = 1,77 * 10^{-5} \left[ \frac{N * m^2}{A^2} \right] \quad (2.16)$$

Teniendo en cuenta que  $i(t)$  es la entrada a la planta, se puede plantear un modelo con las siguientes variables de estado:

se puede poner mas grande??

$$x_1 = y(t) \quad (2.17)$$

$$x_2 = \dot{x}_1 \quad (2.18)$$

$$u = i(t) \quad (2.19)$$

Por lo tanto se obtienen dos ecuaciones de estado:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2.20)$$

$$\dot{x}_2 = g - \frac{K}{m} * \frac{u^2}{x_1^2} \quad (2.21)$$

El modelo es no lineal, por lo tanto se utiliza el método de linealización por serie de Taylor. En primer lugar se deben encontrar los puntos de equilibrio del sistema; por las condiciones del problema se define  $x_{1o} = 4mm$ . El resto de los puntos de equilibrio se encuentra igualando las derivadas a cero:

$$x_{1o} = 4mm \quad (2.22)$$

$$x_{2o} = 0 \quad (2.23)$$

$$u_o = \sqrt{\frac{m * g}{K}} * x_{1o} \quad (2.24)$$

Por lo tanto las ecuaciones linealizadas quedan:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2.25)$$

$$\dot{x}_2 = 2 * \frac{K * u_o^2}{m * x_{1o}^3} * x_1 - 2 * \frac{K * u_o}{m * x_{1o}^2} * u \quad (2.26)$$

Las matrices del modelo quedan:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{2 * g}{y_o} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{2}{y_o} * \sqrt{\frac{K * g}{m}} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Es posible obtener la función transferencia de la planta utilizando:

$$G_{planta} = C * (S * I - A)^{-1} * B \quad (2.30)$$

Finalmente, se obtiene para  $m = 30kg$  e  $y_o = 4mm$ :

$$G_{planta} = -\frac{2}{y_o} * \frac{\sqrt{\frac{K * g}{m}}}{S^2 - \frac{2 * g}{y_o}} = \frac{-1,201}{S^2 - 4900} \quad (2.31)$$

La planta tiene dos autovalores en  $+ - \sqrt{\frac{2 * g}{y_o}} = + - 70[\frac{rad}{s}]$ . Es decir, uno en el semiplano izquierdo y otro en el derecho, lo que provoca que la planta sea inestable y se deba buscar una estrategia de control apropiada para controlarla.



Al trabajar con una planta cuya masa es variable, conviene dejar  $m$  como incógnita:

$$G_{planta}(m) = -\sqrt{\frac{30}{m}} * \frac{1,201}{S^2 - 4900} \quad (2.32)$$

De la transferencia de la planta en [2.32](#) se observa que la ganancia del sistema depende de la masa del objeto, pero no se modifica la ubicación de los polos. A menor masa, mayor es la ganancia del sistema; Se debe escoger una estrategia de control que tenga en cuenta los cambios que puede sufrir la ganancia del sistema.

# Capítulo 3

## Controlador de corriente

### 3.1. Diseño y modelado

Para regular la fuerza ejercida por el electroimán es necesario controlar la corriente que circula por él. Para ello, se modela a la planta como la impedancia de un inductor con una resistencia serie, cuya inductancia varía con el gap de aire:

$$\frac{1}{sL(y) + R_L} \quad (3.1)$$

Para realizar este control se utiliza un sistema realimentado, como el que se muestra en la figura 3.1. Se puede ver que se ingresa con una tensión de referencia ( $V_{in}$ ) proporcional a la corriente de salida deseada, que luego se multiplica por la ganancia de entrada ( $K_{in}$ ). La corriente del electroimán se realimenta en forma de una tensión proporcional a ella ( $V_{iF}$ ). Ambas tensiones son restadas y el resultado (e) ingresa al bloque de comparador con histéresis, que actúa en conmutación, por lo que su salida tiene dos estados posibles:  $\pm V_L$ .

Al ser aplicadas al inductor se producirá una rampa de corriente: si la tensión es positiva, la rampa crece, y si es negativa decrece. De esta forma, debido a la

conmutación del comparador se obtiene, a la salida, una forma de onda triangular  $I_L$ , cuyo valor medio es la corriente deseada y se corresponde a la tensión de referencia.

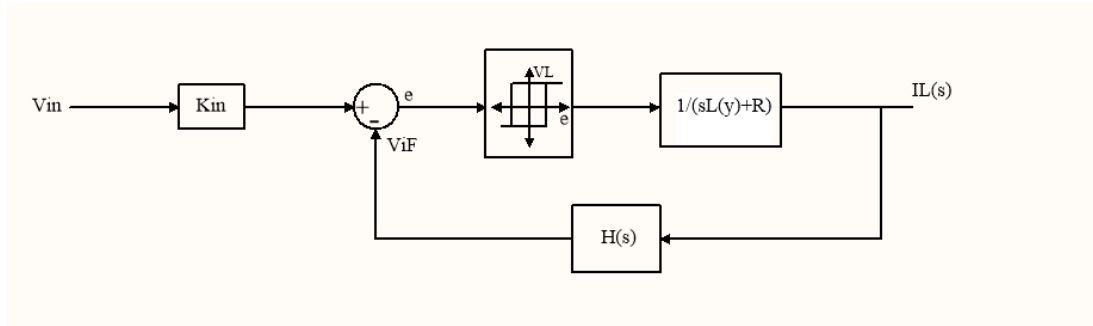


Figura 3.1: Diagrama en bloques simplificado del controlador de corriente.

### 3.1.1. Características del sistema

- Para sensar la corriente se utiliza un sensor de efecto Hall HO 15-NP, con una transconductancia de  $H(s) = 53.3 \text{ mV/A}$ .
- Para la ganancia de entrada  $K_{in}$  se utiliza un valor de 0.32 puesto que  $V_{in}$  varía entre 0 V y 5 V y debe mapearse con una corriente variable entre 0 A y 30 A.
- Se adopta una variación de la corriente en torno a su valor medio (ripple) de 500 mA, por lo que resulta en un ancho de histéresis de 26.665 mV.
- Según mediciones realizadas sobre el electroimán, la inductancia en el punto de equilibrio  $y_0=4\text{mm}$  es de 16.44 mHy (considerando la inductancia de dispersión de 8.89 mHy) y la resistencia serie es de  $0.2 \Omega$ .
- La tensión aplicada sobre el electroimán es +24 V para el estado ON y -24 V para el estado OFF.

- Se utiliza un driver de corriente que trabaja en conmutación mediante un puente H con 4 N-MOS.

### 3.1.2. Circuito del controlador de corriente

Se plantea la etapa de entrada que consiste en la ganancia  $K_{in}$  y el restador con la realimentación. El objetivo es imponer una ganancia de entrada de 0.32, y que la salida de esta etapa tenga un punto de operación de 2.5V para poder utilizar una fuente de alimentación entre 0 y 5 V para los operacionales. Para lograr esto se utiliza un circuito como el que se muestra en la figura 3.2.

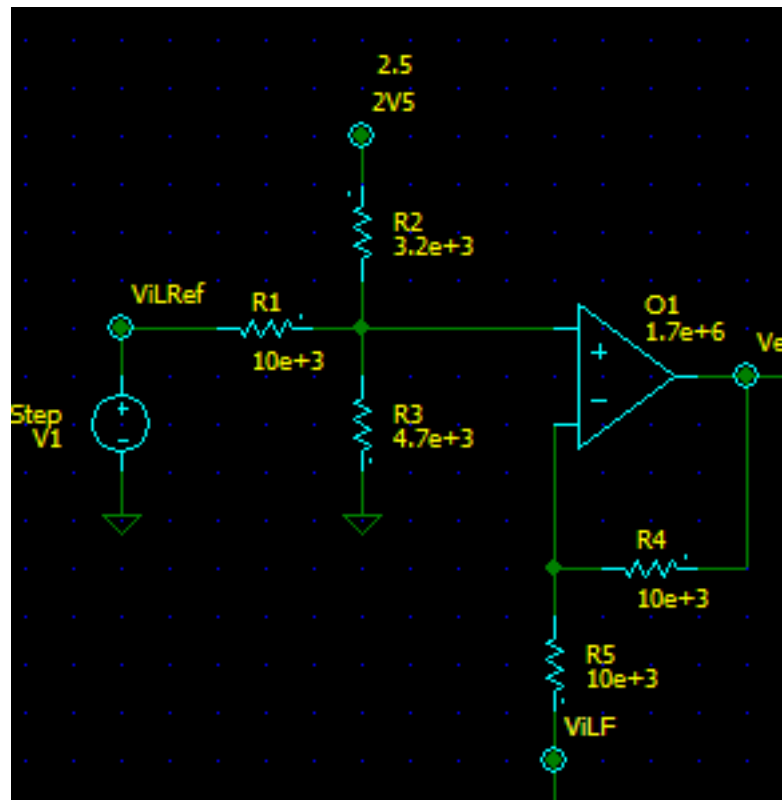


Figura 3.2: Etapa de entrada.

Para la implementación del comparador con histéresis se utiliza un amplificador

operacional realimentado positivamente. Se implementa un ancho de histéresis de 26.665 mV, alrededor de un punto de operación de 2.5 V, como se muestra en la figura 3.3.

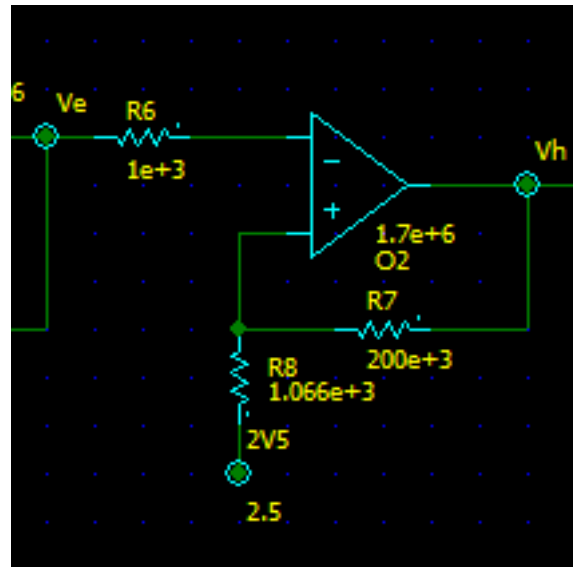


Figura 3.3: Comparador con histéresis.

Para controlar la corriente en el electroimán se utiliza una topología en puente H, que permite conmutar la polaridad de la tensión aplicada a la bobina. Para medir la corriente se utiliza un sensor de efecto Hall, que es modelado en la simulación como una fuente de tensión controlada por corriente, con una ganancia de 53.3 mV/A correspondiente a su transconductancia. Esta implementación puede observarse en la figura 3.4. A continuación, su salida es realimentada a la etapa de entrada luego de restarle la tensión de referencia  $V_{bias}$  de 2.5V, como se muestra en la figura 3.5.

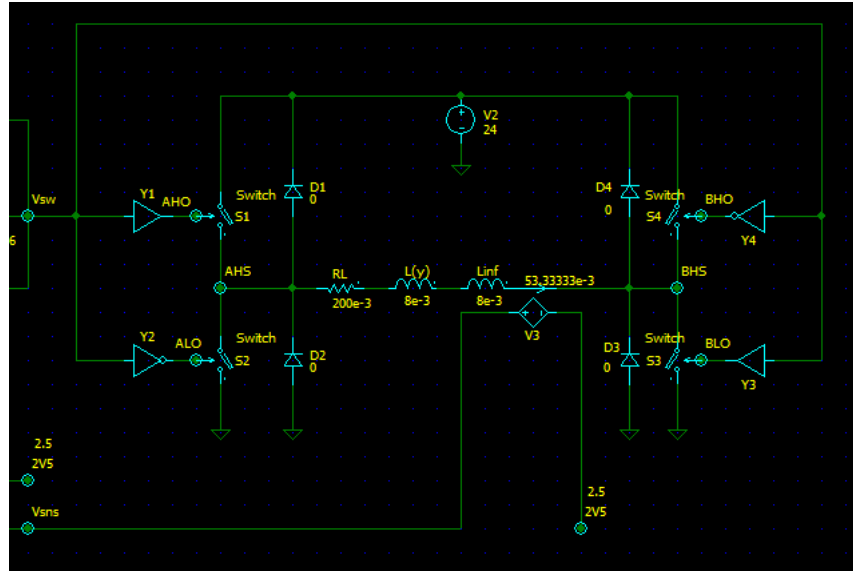
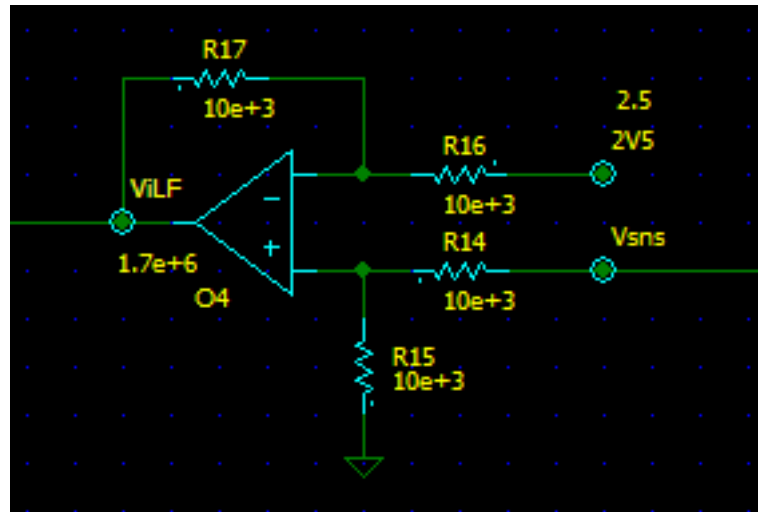


Figura 3.4: Puente H y sensor de efecto Hall.

Figura 3.5: Resta del  $V_{bias}$  al sensor de efecto Hall.

### 3.1.2.1. Simulaciones de formas de onda

En la figura 3.6 se pueden observar dos formas de onda. La inferior se corresponde con la salida del comparador con histéresis y la superior con la corriente en el

electroimán. Para la simulación se utilizó una tensión de referencia de entrada de 1 V, por lo tanto el valor medio de la corriente en la salida es 6 A con un ripple de 500 mA.

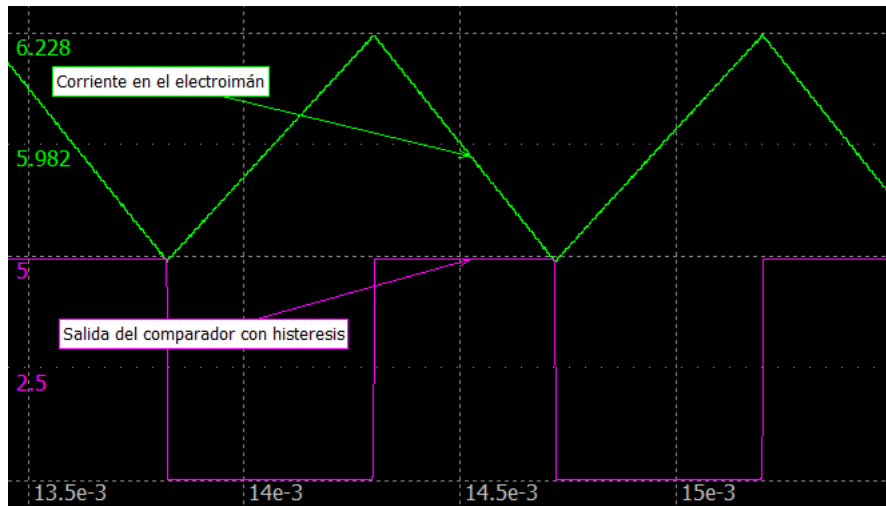


Figura 3.6: Formas de onda de corriente en el electroimán y salida del comparador.

### 3.1.2.2. Simulación de un escalón en la referencia de corriente

En la figura 3.7 se muestra cómo cambia la corriente en el electroimán al aplicarle a la entrada del controlador un escalón de tensión entre 1 V y 3 V. Se puede observar cómo la conmutación del comparador se detiene para ajustar la corriente con la referencia.

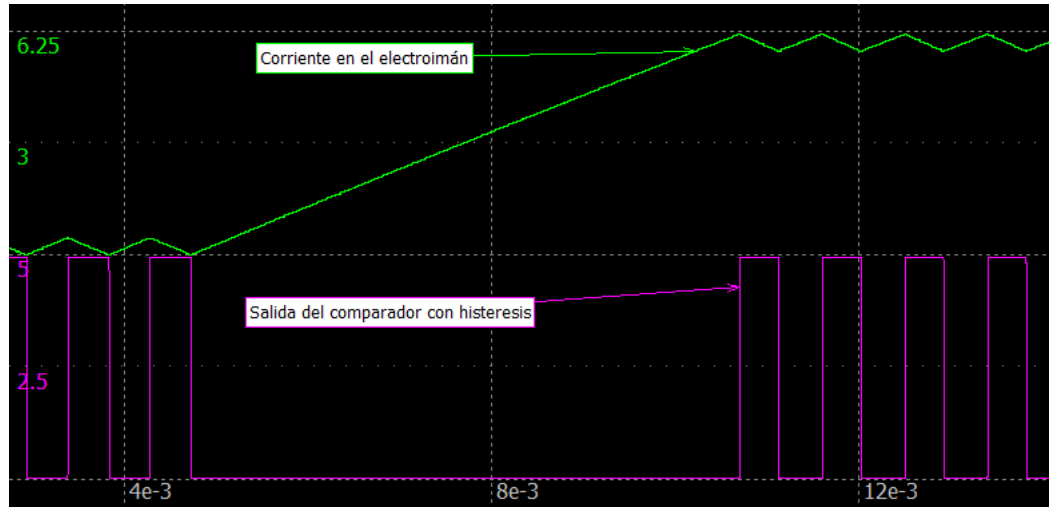


Figura 3.7: Respuesta al escalón del circuito.

### 3.1.2.3. Descripción general de la topología

La corriente que se desea controlar es la que circula por el electroimán y, debido a que el sistema va a trabajar con corrientes elevadas, es importante que la implementación del controlador de corriente sea eficiente. Por lo tanto, para disminuir la disipación de potencia del circuito se utiliza un controlador que funciona en conmutación.

Para lograr una corriente continua en el electroimán utilizando una fuente conmutada se debe alternar la polaridad de la tensión aplicada en los bornes del inductor. Al hacer esto, la corriente crece y decrece (según la polaridad) con forma exponencial debido a la resistencia interna del electroimán. Sin embargo, como el intervalo de tiempo de esta conmutación es pequeño comparado con la constante de tiempo de la planta, el incremento de corriente será pequeño y puede ser aproximado a una recta. Por lo tanto se obtiene una corriente continua con un ripple superpuesto de forma triangular.

Para lograr alternar la polaridad de la fuente sobre el inductor se utiliza una topología en puente H con 4 MOSFET que funcionan con un ciclo de trabajo



determinado (manejado por el controlador por histéresis) como se observa en la figura 3.8. Pueden diferenciarse dos semiciclos de trabajo: uno de estado ON y otro de estado OFF. El primero se define como el semiciclo durante el cual la corriente en el inductor crece (pendiente positiva), mientras que el segundo se da cuando la corriente decrece.

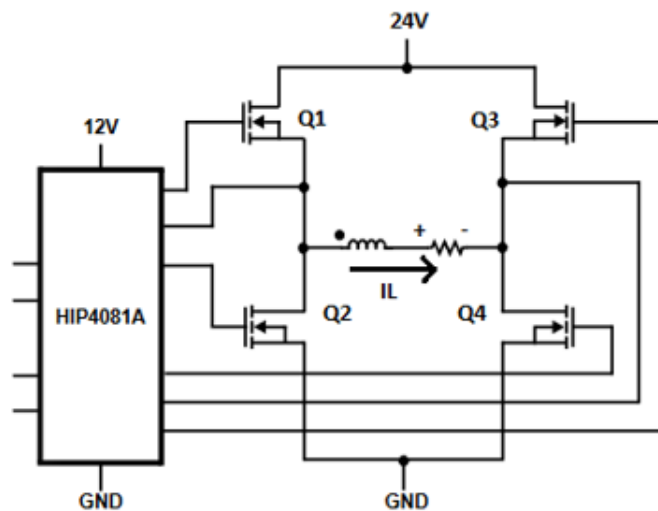


Figura 3.8: Topología elemental del puente H.

El electroimán se conecta entre los puntos medios de cada par de transistores. De esta manera se puede conmutar la polaridad de la tensión que se le aplica. Sólo se permite que dos transistores se enciendan a la vez, y esto se realiza de manera diagonal. Es decir, en la figura 3.8, Q1 y Q4 pueden estar encendidos, mientras que Q3 y Q2 están apagados, y viceversa. De otra forma, se podría generar un cortocircuito entre la fuente de alimentación y GND, que produciría una circulación de corriente denominada shoot-through.

Los 4 MOSFET utilizados para el puente H son de tipo N. Para que estos puedan funcionar correctamente en conmutación es necesario que en el estado ON, la

diferencia de tensión entre gate y source sea mayor o igual a 7 V. Esto no es un problema para los dos MOS inferiores del puente H (Q2 y Q4), ya que la tensión en source está fijada en GND y el driver puede aplicar 12 V al gate (superando los 7 V entre gate y source). El problema radica en los transistores superiores del puente H, ya que la tensión en source varía entre 0 V y 24 V, por lo que en el gate debería haber, por lo menos, 31 V con respecto a GND. Sin embargo, la tensión máxima disponible entregada por la fuente es de 24 V. Para resolver este problema se utiliza un driver flotante con bootstrap.

Para controlar la conmutación se utiliza un mosfet driver HIP4081A que se encarga de encender y apagar los transistores según las entradas de control. Además permite la configuración de un tiempo muerto para evitar que se enciendan dos transistores de un lado a la vez. También provee la circuitería necesaria para implementar la fuente flotante que enciende los mosfet del lado superior para lo cual solo se debe agregar un diodo y un capacitor de manera externa. Para la implementación circuital se van a utilizar los MOSFET IPB160N04.

En la figura 3.9 se observa solo una de las mitades del puente H (lado A) junto con las señales de control provistas por el driver HIP4081A. El análisis para la otra mitad es análogo, por lo que se evita por simplicidad. La implementación del driver bootstrap permite obtener en el gate del MOS superior, una tensión de 36 V respecto a GND, logrando así una diferencia de tensión mayor a 7 V entre gate y source.

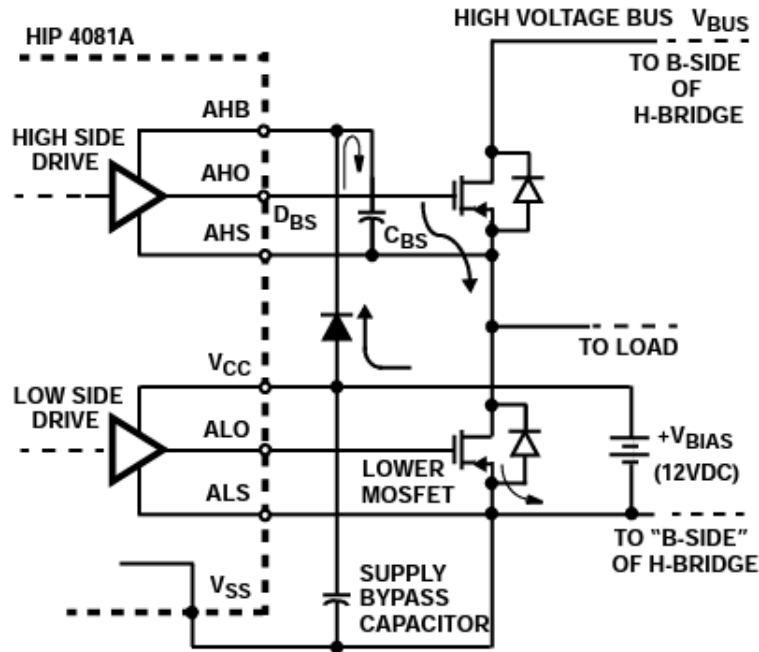


Figura 3.9: Configuración Bootstrap simplificada.

El driver bootstrap consiste en un capacitor ( $C_{BS}$ ), un diodo, y la circuitería interna del HIP4081A. Para garantizar el correcto funcionamiento del bootstrap, al encender el sistema, la secuencia de inicio del HIP4081A enciende las dos salidas de la parte inferior del puente H: ALO y BLO con el fin de encender Q2 y Q4 durante un tiempo que se conoce como periodo de refresco de bootstrap. De esta forma, los capacitores de bootstrap de ambos lados quedan conectados a GND y se pueden cargar completamente. Durante este tiempo, las salidas a los gates AHO y BHO se mantienen en bajo continuamente lo que asegura que no se produzca corriente de shoot-through durante el período nominal de refresco del bootstrap. Al final de este período las salidas responden normalmente al estado de las señales de entrada de control.

Para comprender su funcionamiento se hará un breve análisis del sistema. Para ello, se parte suponiendo que el sistema se encuentra funcionando: con el transistor

Q2 encendido ( $ALO = V_{CC}$ ), Q1 apagado ( $AHO = AHS = 0$  V) y la corriente circulando de izquierda a derecha como lo indica la figura 3.9. En ese caso, el capacitor  $C_{BS}$  se carga a 12 V, ya que en un terminal tiene la fuente de 12 V (a través del diodo  $D_{BS}$ ) y el otro está conectado a GND por medio de Q2.

Una vez que se apaga el transistor inferior, empieza a transcurrir el tiempo muerto. Teniendo en cuenta que la carga es inductiva, el valor medio de la corriente mantiene su sentido circulando por los diodos antiparalelos del MOS inferior del lado A y el superior del lado B. Esto provoca que el source del MOS superior del lado A tenga una tensión negativa igual a la caída de tensión en directa del diodo antiparalelo de Q2.

Una vez finalizado el tiempo muerto, se enciende el MOS Q1. Para encenderlo, la señal AHO se pone en nivel alto. Durante el tiempo que Q1 pasa de estar apagado a encendido, la tensión en el source cambia de  $-V_d$  a  $V_{bus}$  de manera gradual mientras se carga el gate, y AHO pasa a ser igual a AHB, que es igual a la tensión entregada por el capacitor de bootstrap sumada a la tensión en el source de Q1. De esta manera se logra una tensión de 36 V con respecto a GND en el gate y genera una diferencia entre gate y source de 12 V.

Para lograr un funcionamiento adecuado del Bootstrap es necesario dimensionar correctamente al capacitor  $C_{BS}$  con el fin de que pueda proveer la carga suficiente durante el tiempo en el que el MOS esté encendido.

#### 3.1.2.4. Dimensionamiento de capacitor de bootstrap

Para el dimensionamiento se tuvieron en cuenta sugerencias y procedimientos descriptos en [1] y [2].

Para encender un NMOS es necesario proveer corriente a su gate hasta cargar las capacidades parásitas entre gate-source y gate-drain. Una vez cargadas, el MOS queda en estado encendido y no consume más corriente en el gate. En el caso de

los MOS del lado superior, esta corriente proviene del capacitor de bootstrap. En la implementación del puente H se decidió colocar resistencias entre gate y source. Estas aparecen como R1, R2, R3 y R4 en la figura 3.10. Debido a la diferencia de tensión entre gate-source, se genera una corriente constante en estas resistencias durante el tiempo que el MOS esté encendido, que también debe ser provista por el bootstrap.

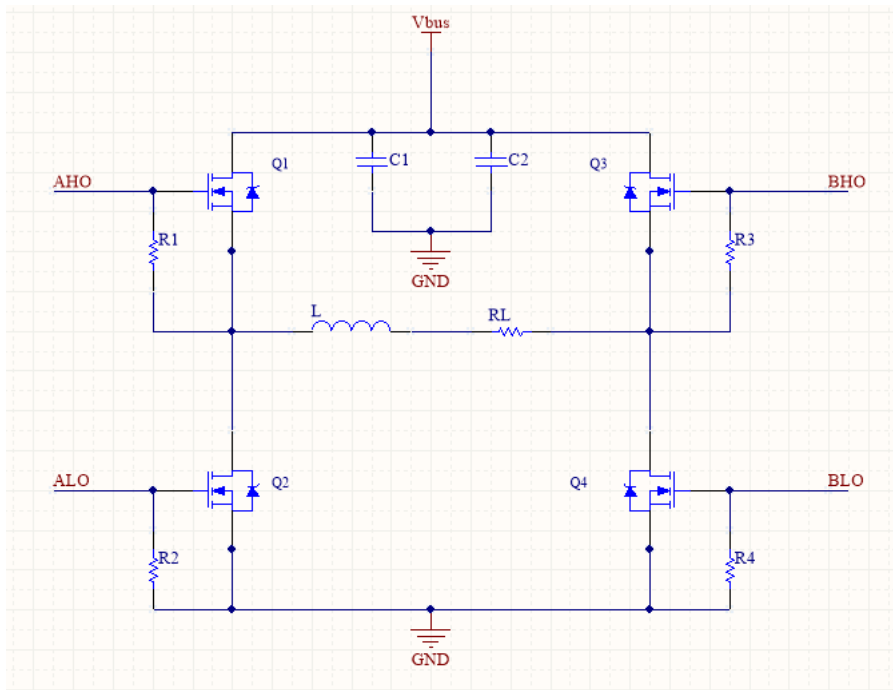


Figura 3.10: Puente H.

Por otro lado, el capacitor debe entregar corriente al diodo de bootstrap cuando este queda en inversa ( $I_{DR}$ ), y también entregar una corriente de fuga al circuito integrado HIP ( $I_{QBS}$ ). Esta última se desprecia ya que es compensada internamente por la bomba de carga del HIP.

Por lo tanto, para poder dimensionar correctamente el capacitor de bootstrap es necesario tener en cuenta todos estos efectos mencionados anteriormente. Para

ello se parte planteando la carga que almacena el capacitor bootstrap:

$$Q_B = C_B * V_B \quad (3.2)$$

En la ecuación 3.2,  $Q_B$  es la carga total del capacitor de bootstrap,  $C_B$  es la propia capacidad del capacitor, y  $V_B$  es la diferencia de tensión entre sus terminales.

Para evitar sufrir una caída de tensión tal que afecte el encendido de los MOS, es necesario que  $Q_B$  pueda abastecer también al gate, a la resistencia entre gate-source y al diodo en inversa. Por lo tanto:

$$Q_B > Q_G + Q_{RR} + \frac{I_{DR} + I_{GS}}{f_{PWM}} \quad (3.3)$$

Donde:

- $Q_G$  = Carga total que se debe entregar al gate del MOS.
- $Q_{RR}$  = Carga entregada al diodo en inversa durante el tiempo de recovery (cuando pasa de modo conducción a inversa).
- $I_{DR}$  = Corriente de fuga del diodo en inversa
- $I_{GS}$  = Corriente que circula por la resistencia de gate-source
- $f_{PWM}$  = frecuencia de conmutación

Por lo tanto, al reemplazar la ecuación 3.2 en la 3.3 se obtiene:

$$C_{BS} > \frac{Q_G + Q_{RR} + \frac{I_{DR} + I_{GS}}{f_{PWM}}}{\Delta V_B} \quad (3.4)$$

Según la hoja de datos [5] del MOSFET IPB160N04,  $Q_G = 170$  nC. Por lo tanto, adoptando una caída de tensión tolerable en el capacitor de  $\Delta V_B = 0.1$  V y

considerando la información brindada por las hojas de datos, es posible dimensionar el capacitor para que este posea una carga suficiente para mantener siempre encendido al MOSFET utilizando la inecuación 3.4 .

Para el cálculo de la carga de recuperación  $Q_{RR}$  se puede considerar que la forma de onda de la corriente de recuperación es triangular. De esta forma,  $Q_{RR}$  es aproximadamente igual a la mitad del producto entre el pico de la magnitud de corriente inversa y la duración del tiempo de recuperación. Debido a que se usa el diodo RSX205LAM30TR, se obtiene a partir de [3] que  $I_R$  es igual a 0.1 A y el tiempo de recuperación de inversión es de 12.5 ns. Por lo tanto, la carga de recuperación resulta de 0.625 nC.

Para la corriente inversa de fuga del diodo de bootstrap se obtiene un valor de  $I_{DR}=2$  mA (@ T=75°, VR= 24V).

La corriente  $I_{GS}$  tiene forma exponencial pero se aproxima a una constante debido a que el intervalo de tiempo es pequeño. Por lo tanto, puede calcularse como la diferencia de tensión del capacitor de bootstrap ( $V_B=12V$ ) dividido el valor de la resistencia gate-source. Esta resistencia es de 4.7 kOhm. Por lo tanto  $I_{GS}=2.55$  mA.

Debido a que el controlador por histéresis no asegura que haya una conmutación en un tiempo constante (como se observa en la figura 3.7), se decidió superponer una conmutación auxiliar de 50 kHz.

$$C_{BS} > \frac{Q_G + Q_{RR} + \frac{I_{DR} + I_{GS}}{f_{PWM}}}{\Delta V_B} > \frac{170nC + 0,625nC + \frac{2mA + 2,55mA}{50KHz}}{0,1V} F \quad (3.5)$$

$$C_{BS} > 2,61\mu F \quad (3.6)$$

Por lo tanto, una capacidad mayor a  $2,61\mu F$  resultará en una caída menor a 0.1 V en el capacitor de bootstrap durante el tiempo de encendido de los MOSFET. Podría usarse un capacitor más pequeño, a costa de permitir una mayor caída de tensión en el capacitor.

Finalmente, se decidió utilizar 2 capacitores de bootstrap en paralelo de  $5,6\mu F$  cada uno con el objetivo de reducir la resistencia serie.

#### 3.1.2.4.1 Resistencia entre gate y source

Se colocan resistencias que conectan el gate y el source de cada MOS en el puente H. Estas se observan en la figura 3.10 como R1, R2, R3, R4. Su propósito es evitar que el gate del mosfet se encuentre cargado cuando el circuito se enciende y el driver de corriente aún no puede descargarlo. Además ayuda a evitar que se encienda el mosfet por ruido acoplado capacitivamente.

Se utiliza una resistencia de  $4.7 k\Omega$  debido a que permite que el gate se descargue en un tiempo rápido, consumiendo solo 2.55 mA del capacitor de bootstrap.

#### 3.1.2.4.2 Protección del gate

El gate de los MOS es sensible a las sobretensiones. Soporta como máximo  $\pm 20V$ . Una descarga electrostática (ESD) puede sobrepasar ampliamente este valor de tensión, pudiendo dañar el MOS al acercar la mano o la sonda del osciloscopio. Para protegerlo en estos casos se coloca un diodo TVS entre el gate y source, de manera de limitar la tensión que se desarrolla en el gate a un valor seguro.

Se eligen los TVS SMAJ15 con una tensión bidireccional de  $\pm 15V$ . y se colocan entre el gate y source de cada transistor.



### 3.1.2.4.3 Tiempo muerto

Para evitar generar un cortocircuito durante la conmutación de los transistores, el driver HIP4081A permite configurar un tiempo muerto que debe transcurrir desde que se apaga un transistor y se enciende el próximo. Esto se configura mediante dos resistencias conectadas a los pines LDEL y HDEL del HIP4081A.

Para saber el tiempo muerto necesario, debe conocerse el tiempo que tarda en apagarse un mosfet IPB160N04. De [5] se obtiene que este tiempo es 63 ns. Este valor se obtiene de tener en cuenta el  $T_{OFF}$  y el  $T_{FALL}$  de la hoja de datos. Por lo tanto se elige que el deadtime sea de 100 ns, para tener un margen, además de que esta aplicación específica no requiere un tiempo de encendido rápido de los mosfets.

Según la hoja de datos del HIP4081A, para obtener ese tiempo muerto, las resistencias en HDEL y LDEL deben ser 200 K $\Omega$ .

### 3.1.2.5. Dimensionamiento de los capacitores de fuente

Para reducir el consumo de potencia de la red se utilizan capacitores en paralelo a la fuente de +24V. Esto permite que, una vez que la fuente cargó inicialmente el inductor, en las conmutaciones sucesivas la carga del inductor pase a dichos capacitores en un semiciclo y viceversa en el otro ciclo de conmutación. Idealmente, esta transferencia de energía no tiene pérdidas. Por lo tanto, el consumo de potencia queda reducido a la pérdida por disipación de los MOSFET y los demás componentes del controlador de corriente.

Estos capacitores deben tener una baja resistencia equivalente serie (ESR) ya que, de lo contrario, disipan mucha potencia en forma de calor y se acorta su vida útil. Además generan ripple en la tensión  $V_{BUS}$ .

En la figura 3.10 los capacitores de la fuente están representados por C1 y C2.

Para poder dimensionarlos correctamente hay que tener en cuenta que la forma de onda de la corriente que circula por el electroimán en régimen permanente es aproximadamente triangular. Esta corriente es conducida durante medio ciclo desde estos capacitores y hacia el electroimán por Q1 y Q4. Luego, durante la otra mitad del ciclo, la corriente regresa a estos capacitores a través de Q2 y Q3. Esto provoca que la corriente en los capacitores sea, durante el semiciclo encendido, igual al valor medio de la corriente del electroimán, con  $\pm \frac{\Delta I_L}{2}$ . Similarmente ocurrirá en el semiciclo apagado, pero con valor medio  $-I_L$ . Por lo tanto, la corriente tendrá la forma que se muestra en la figura 3.11

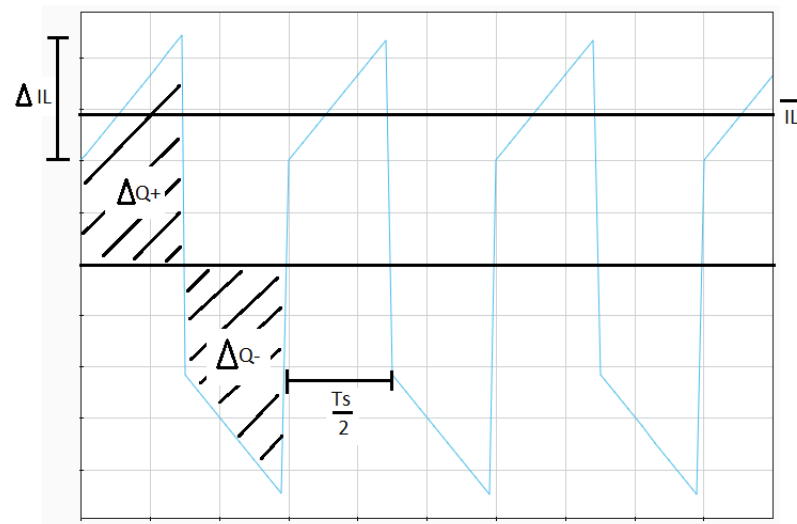


Figura 3.11: Forma de onda de la corriente en C1 y C2.

Sabiendo que por el electroimán circulará una corriente media de 21 A en condiciones normales de trabajo, la carga del capacitor se puede calcular como:

$$\begin{aligned}
\Delta Q &= \int I dt \\
\Delta Q^+ &= \frac{T_S}{2} * \Delta I_L * \frac{1}{2} + (< I_L > - \frac{\Delta I_L}{2}) * \frac{T_S}{2} \\
\Delta Q^+ &= < I_L > * \frac{T_S}{2}
\end{aligned} \tag{3.7}$$

Considerando  $\Delta I_L = 500mA$  y  $T = 0,47ms$  que corresponde a  $Y = 2mm$  según la tabla 3.1

$$\Delta Q = 21A * \frac{0,47ms}{2} \approx 5mC \tag{3.8}$$

Al considerar que un ripple de  $V=500\text{ mV}$  es aceptable, se obtiene un valor de:

$$c = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = 10mF \tag{3.9}$$

Para obtener este valor de capacidad utilizamos varios capacitores en paralelo para disminuir la ESR, como se muestra en la figura 3.12. Esto es porque por los capacitores circula una corriente de hasta 21.25 A. Por lo tanto, al colocarlos en paralelo se reduce la corriente que circula (en partes iguales), por cada capacitor:

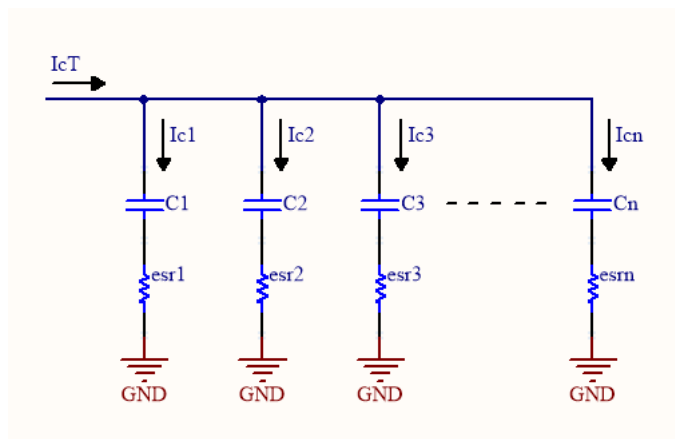


Figura 3.12: Capacitores de la fuente.

$$C = C1 + C2 + \dots + C_n \quad (3.10)$$

Si todos los valores de ESR son iguales obtenemos

$$R_T = \frac{R_{ESR}}{n} \quad (3.11)$$

Por lo tanto reemplazando se puede calcular la potencia que disipan como:

$$P = I^2 * R_T = 21,25^2 * \frac{R_{ESR}}{n} \quad (3.12)$$

Se decidió utilizar 6 capacitores de 2200 uF/50V con una ESR de 17  $\Omega$  (datos obtenidos de [4]).

Por lo tanto reemplazando en la ecuación 4.4 se obtiene que la potencia disipada es de:

$$P = 1,28W \quad (3.13)$$

#### 3.1.2.6. Conmutación de alta frecuencia para el bootstrap

Cuando el mosfet driver recibe una entrada que activa un MOS del lado superior, este comienza a cargar el gate con ayuda de la tensión que brinda el capacitor de bootstrap asociado a ese MOS. El capacitor de bootstrap entrega energía durante la carga del gate y durante todo el tiempo que el MOS esté activo (debido a la resistencia  $R_{GS}$ ). Para poder recargar el capacitor, debe esperarse a que el driver reciba la entrada necesaria para apagar el MOS. Debido a que la implementación del driver de corriente utiliza un controlador por histéresis, no es posible asegurar que haya una conmutación en un periodo regular.

Para poder asegurar un periodo de conmutación constante y conocido se agrega un bloque que superpone una conmutación de alta frecuencia a la señal de control

que ingresa al mosfet driver. De esta manera se producen conmutaciones en un intervalo regular y se cargan regularmente los capacitores de bootstrap.

Se adopta una frecuencia de conmutación auxiliar de 50KHz y se hace variar el ciclo de trabajo de la salida del comparador con histéresis entre dos valores. Durante la carga del inductor, el ciclo de trabajo será del 90 % mientras que durante la descarga será del 10 %.

Para generar esta conmutación se agrega el oscilador que se observa en la figura 3.13 a la salida del comparador con histéresis. La frecuencia de conmutación se puede obtener en función de C1 como:

$$F_{aux} = \frac{4,5 * 10^{-5}}{C1} [Hz] \quad (3.14)$$

Esta frecuencia debe ser mucho mayor a la fundamental de la corriente triangular para evitar problemas en el funcionamiento del sistema y, además, debe ser lo suficientemente alta para poder ser filtrada sin inconvenientes en la etapa de estimación de posición. Por lo tanto, al adoptar una frecuencia auxiliar de 50 KHz, resulta en C1= 900 pF.

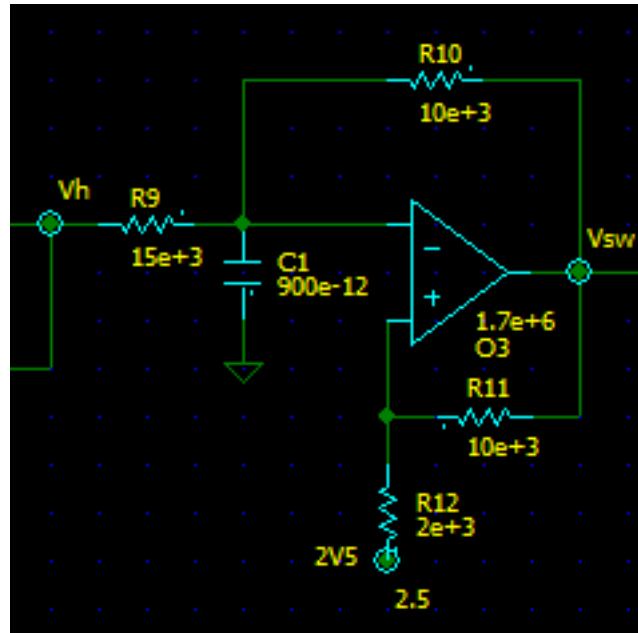


Figura 3.13: Circuito oscilador de frecuencia auxiliar.

### 3.1.2.7. Simulación del sistema con oscilador auxiliar

En la figura 3.14 se muestran las formas de onda obtenidas considerando el oscilador auxiliar necesario para el funcionamiento del bootstrap.

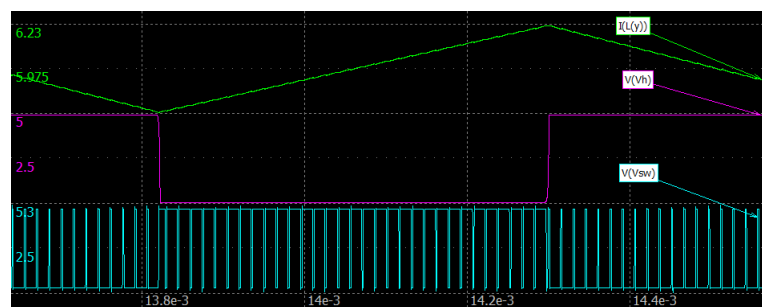


Figura 3.14: Simulación de corriente en el electroimán, salida del comparador, y conmutación auxiliar.

### 3.1.3. Características estáticas y dinámicas del controlador

#### 3.1.3.1. Corriente media del electroimán

Para saber la corriente media que habrá a la salida con cierta tensión de entrada, se utiliza la transferencia de lazo cerrado (sin considerar polos, y suponiendo una alta ganancia de lazo abierto):

$$I_L = V_{i.ref} * \frac{K_{in}}{H(s)} = V_{i.ref} * 6 \frac{A}{V} \quad (3.15)$$

#### 3.1.3.2. Frecuencia de conmutación de la corriente

La frecuencia de conmutación del sistema se obtiene con:

$$f_{sw} = \frac{V_{BUS}}{2 * \Delta I_L * L(y)} \quad (3.16)$$

Para  $y = 4$  mm se tiene una inductancia  $L(4\text{mm}) = 16.44$  mHy, lo cual resulta en una frecuencia  $f_{sw} = 1460$  Hz.

#### 3.1.3.3. Ancho de banda del controlador

La dinámica del controlador, al depender de la inductancia, lo hace también del gap de aire. El ancho de banda (o velocidad con que responde) está limitado por la constante de tiempo del inductor con su resistencia serie. Juntas forman un sistema lineal de primer orden, con un polo en:

$$f_{polo} = \frac{1}{2\pi * L(y)} \quad (3.17)$$

Al convertirlo a frecuencia angular:

$$\omega_{polo} = \frac{1}{2\pi * L(y)} \quad (3.18)$$

Tomando las condiciones del problema con  $Y_o = 4\text{mm}$ ,  $L = 7.55 \text{ mHy} + 8.89 \text{ mHy}$ , y  $R_l = 0.2\Omega$  el polo se ubica:

$$\omega_{polo} = \frac{0,2}{16,44\text{mHy}} = 12,17\text{r/s} \quad (3.19)$$

La Tabla 4.2 muestra entre qué valores de frecuencia se verá afectada la forma de onda al modificarse la distancia de separación.

$$\Delta T[s] = \frac{\Delta I_L * (L(y) + L_\infty)}{V_{BUS}} \quad (3.20)$$

Considerando  $R_l = 0.2 \Omega$

En la ecuación 3.20,  $\Delta T$  representa el tiempo de crecimiento o de decrecimiento de la rampa de corriente (despreciando la resistencia del bobinado) en torno al valor nominal. El doble de este tiempo es igual al periodo de la corriente triangular ( $2 * T = \frac{1}{F_{sw}}$ ).

Según las mediciones de inductancia realizadas y aplicando las ecuaciones 3.16, 3.18 y 3.20 se armó la tabla 3.1.



Y[mm]	L(Y)[mHy]	$\Delta T$ [ms]	$f_{SW}$ [Hz]	$\omega_{polo}$ [r/s]
0	76.45	1.59	313.93	2.62
1	33.42	0.70	718.13	5.98
2	22.64	0.47	1,060.07	8.83
3	18.8	0.39	1,276.60	10.64
4,4	15.5	0.32	1,548.39	12.90
5,2	14.7	0.31	1,632.65	13.61
6,5	14.4	0.30	1,666.67	13.89
8,23	12.4	0.26	1,935.48	16.13
inf	8.89	0.19	2,699.66	22.5

Tabla 3.1: Valores calculados y medidos en función del Gap de aire.

### 3.1.4. Transferencia lineal del controlador de corriente

En la ecuación 3.21 se muestra la transferencia linealizada del controlador de corriente.

$$TLC_{CC} = \frac{6}{1 + \frac{s}{\omega_{polo}}} \quad (3.21)$$

## Capítulo 4

# Estimador Analógico

### 4.1. Diseño y modelado del Estimador Analógico

Para controlar la distancia de separación del entrehierro del electroimán es necesario conocer el gap de aire para poder realimentarlo en el lazo de control. Para ello, se utiliza un estimador de posición que aprovecha la forma de onda triangular de la corriente que circula por el electroimán.

Para estimar la distancia se hace la derivada de la corriente, puesto que las pendientes de crecimiento y decrecimiento varían con la separación. Es importante tener en cuenta que durante el diseño de la etapa de controlador de corriente, se eligió una topología que mantiene el sistema conmutando continuamente (incluso para corriente nula) para tener siempre una estimación disponible.

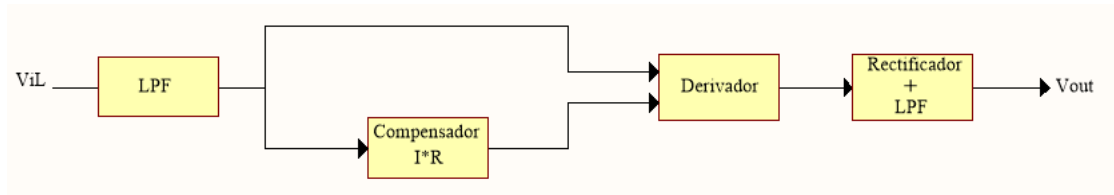


Figura 4.1: Diagrama en Bloques del Estimador.

Se implementa un estimador compuesto por los bloques mostrados en la figura 4.1. A este le ingresa una tensión triangular ( $V_{iL}$ ) que es la salida del sensor de efecto Hall. Para eliminar las componentes de alta frecuencia se aplica un filtro pasa bajos dejando pasar hasta la quinta armónica. Esta señal filtrada conserva la forma triangular de la corriente.

Al ingresar al derivador con  $V_{iL}$ , la forma de onda resultante a su salida es aproximadamente cuadrada, y sus valores de alto y bajo se corresponden con las pendientes de bajada y subida multiplicadas por una constante de tiempo del derivador. Estas pendientes deberían ser simétricas alrededor del punto de operación de 2.5V, pero no lo son debido a la resistencia interna del electroimán, que provoca que la pendiente de bajada sea mayor (en módulo) que la de subida. Por ello, se implementa la compensación  $I \cdot R$ , cuya salida ingresa al derivador y logra mantener la simetría alrededor de 2.5V. Esta señal ingresa al último bloque que rectifica y filtra la forma de onda, obteniéndose una tensión continua ( $V_{out}$ ) proporcional a la distancia de separación del gap ( $Y_o$ ).

#### 4.1.1. Análisis de la estimación

La ecuación que gobierna la corriente en el electroimán se puede calcular aplicando las leyes de Kirchoff correspondientes al circuito que se ve en la figura 4.2.

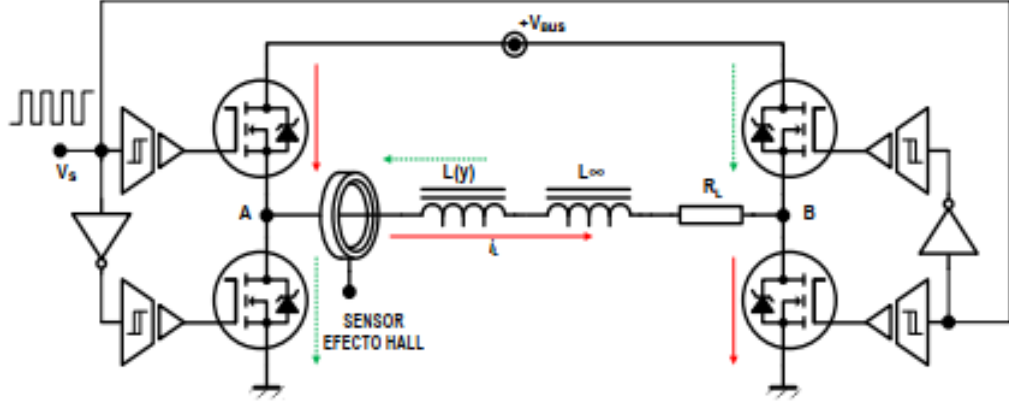


Figura 4.2: Circuito del electroimán con el driver de corriente.

Sabiendo que  $L(y)$  se puede aproximar como en la ecuación 4.1, y que  $L_\infty$  (inductancia de dispersión) es la inductancia del electroimán sin la pieza en forma de “T” :

$$L(y) \approx \mu_0 \frac{N^2 * A}{2Y} \quad (4.1)$$

$$\pm V_{BUS} - L(y) * \left| \frac{di_L}{dt} \right| - L_\infty * \left| \frac{di_L}{dt} \right| - R_L * I_L = 0 \quad (4.2)$$

Asumiendo que:

$$V_{BUS} \gg i_L * R_L \quad (4.3)$$

Se aproxima la derivada de la corriente como:

$$\left| \frac{di_L}{dt} \right| \simeq \frac{V_{BUS}}{L(y) + L_\infty} = \frac{V_{BUS}}{L_T(y)} \quad (4.4)$$

Según mediciones realizadas, se tienen los valores de  $L_T(y)$  correspondientes a cada posición. En base a ellos se hace una aproximación lineal para obtener la

expresión de la derivada de la ecuación 4.4.

$$\left| \frac{di_L}{dt} \right|_{Lineal} = 194690 * Y[m] + 676 \text{ A/s} \quad (4.5)$$

#### 4.1.2. Modelo circuital del estimador de posición

Para poder obtener  $\left| \frac{di_L}{dt} \right|$  se utiliza un circuito derivador con un amplificador operacional como se observa en la figura 4.3.

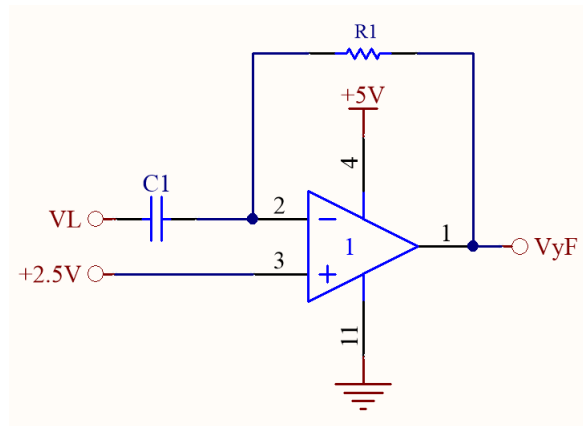


Figura 4.3: Circuito derivador.

La salida del circuito,  $V_{yf}(t)$ , ante una entrada  $V_L$  es:

$$V_{yf}(t) = 2,5V - \frac{dV_L}{dt} * C_1 * R_1 \quad (4.6)$$

Considerando  $V_L = K_h * i_L$ , donde  $K_h$  es la constante del sensor de efecto Hall, se obtiene:

$$V_{yf}(t) = 2,5V - \frac{di_L}{dt} * K_h * C_1 * R_1 \quad (4.7)$$

$V_{yf}(t)$  tiene variaciones alrededor del setpoint de 2.5 V. Por lo tanto, para evitar

la saturación del derivador se debe cumplir que:

$$\left| -\frac{diL}{dt} * K_h * C_1 * R_1 \right| \leq 2,5V \quad (4.8)$$

Por lo tanto, con la ecuación 4.4 y 4.5:

$$C_1 * R_1 \leq \frac{2,5 V * L_{min}}{V_{BUS} * K_h} \quad (4.9)$$

Con  $L_{min} = L_T(5 mm) = 14,9 mH$  (teniendo en cuenta la inductancia de dispersión) se obtiene:

$$C_1 * R_1 \leq 29,1 ms \quad (4.10)$$

Este derivador tendrá como salida una onda pulsada, cuyo flanco superior es proporcional a la pendiente de bajada de la corriente en el electroimán, y el flanco inferior es proporcional a la pendiente de subida de la corriente.

Para los cálculos se utilizó  $C_1 * R_1 = 25 mS$ , para dar un margen y evitar la saturación del amplificador operacional.

Usando la ecuación 4.5 y 4.8, y considerando una variación en torno a 2.5V se obtiene:

$$Vyf(y) = |Kh * C_1 * R_1 * di/dt| + 2,5V = 0,2595 * y(mm) + 3,4V \quad (4.11)$$

Se puede observar en la tabla 4.1 que para el rango de valores posibles en los que el electroimán trabajará, el estimador posee un rango de salida  $\Delta Vyf_{Lineal}(5 - 2 mm) = 0,78 V$ .

$Y[\text{mm}]$	$V_{yf}(y)_{\text{Lineal}}$
2	3.92
3	4.18
4	4.44
5	4.7

Tabla 4.1:  $V_{yf}$  en función de la posición.

### 4.1.3. Circuito del derivador compensado

Puesto que los circuitos derivadores pueden presentar inestabilidad a alta frecuencia, es necesario compensarlo agregando una resistencia en serie al capacitor, para que genere un cero en la transferencia de realimentación (ecuación 4.13), como se observa en la figura 4.4.

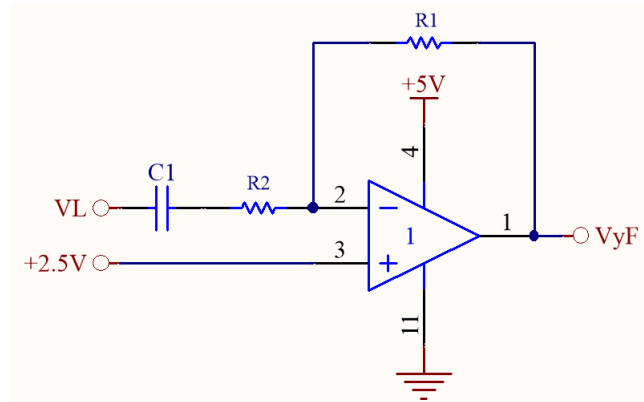


Figura 4.4: Circuito derivador compensado

El operacional es internamente compensado, por lo que todos sus otros polos los tiene luego de el cruce por 0 dB de la ganancia. Para simplificar el análisis no se tienen en cuenta estos, ya que están fuera de la zona de interés.

$$A(w) = \frac{1778279}{\left(\frac{s}{2\pi \cdot 20} + 1\right)} \quad (4.12)$$

$$\frac{1}{H(w)} = \frac{1 + s * C_1 * (R_1 + R_2)}{1 + s * C_1 * R_2} \simeq \frac{1 + s * C_1 * R_1}{1 + s * C_1 * R_2} \quad (4.13)$$

Para compensar el circuito se coloca un polo en 16 kHz, dando como resultado  $R_2 = 10 \text{ ohm}$ ,  $C_1 = 1 \text{ uF}$  y  $R_1 = 25 \text{ kOhm}$  y un margen de fase de  $\phi = 49,6^\circ$ , como se puede observar en la figura 4.5.

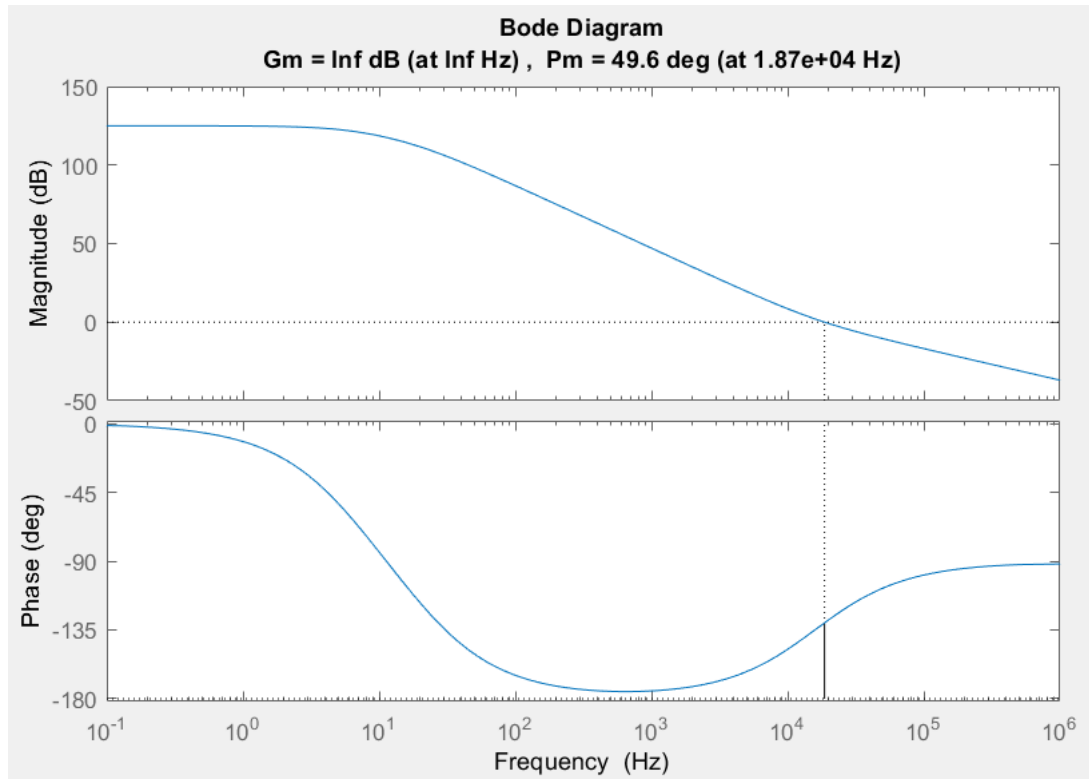


Figura 4.5: GH del derivador compensado.png



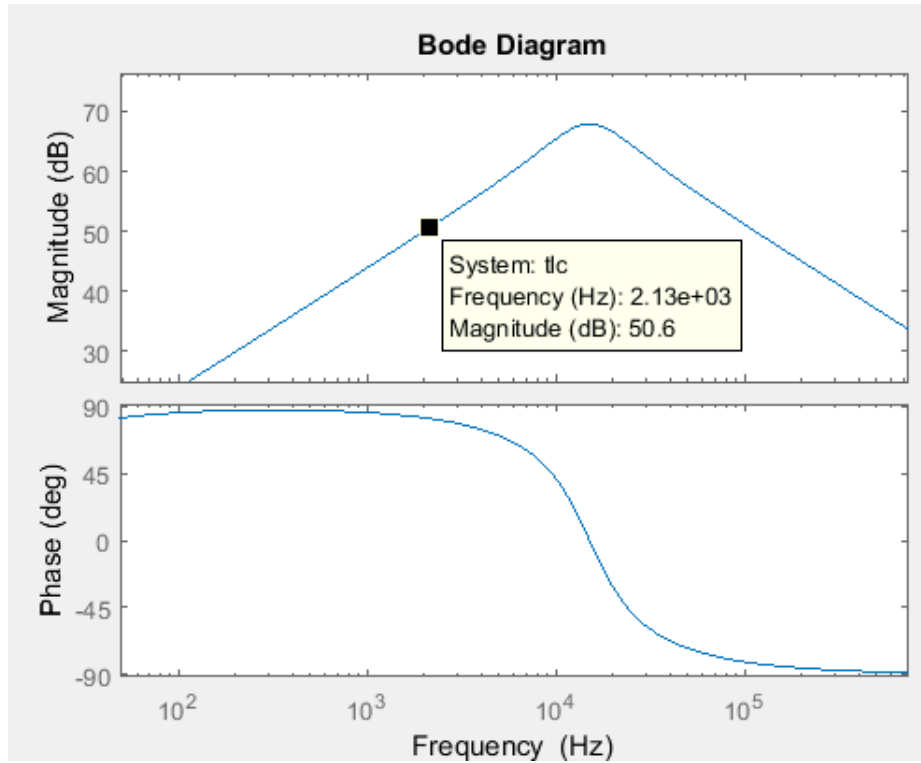


Figura 4.6: Transferencia de lazo cerrado

Como se observa en la figura 4.6 la transferencia de lazo cerrado (TLC) tiene un comportamiento derivativo en las frecuencias cercanas a 2 kHz, como es deseado. A continuación se muestra la TLC del circuito derivador:

$$Tlc_{derivador} = \frac{V_{yf}}{V_{il}} = \frac{-0,025 * s}{1 + \left(\frac{2*0,473}{94,5 \text{ krad/s}}\right) * s + \left(\frac{s}{94,5 \text{ krad/s}}\right)^2} \quad (4.14)$$

#### 4.1.4. Diseño del LPF

Debido a que el derivador amplifica las señales de alta frecuencia es necesario agregar un filtro pasa bajos en su entrada. Como la señal que va a ingresar al derivador es  $V_{iL}$ , la cual es una onda triangular de frecuencia fundamental de 2KHz se dejará pasar hasta la 5<sup>o</sup> armónica. Para su implementación se utiliza

un filtro activo Butterworth de orden 2, con una frecuencia de corte en 20 KHz. En la figura 4.7 se puede ver el filtro utilizado y en la figura 4.8, su respuesta en frecuencia.

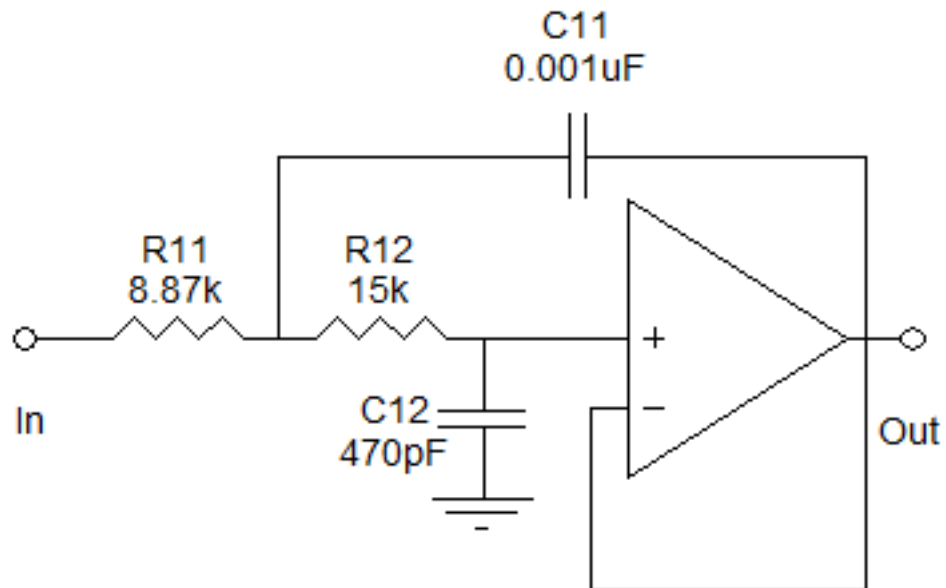


Figura 4.7: Filtro para la entrada del derivador

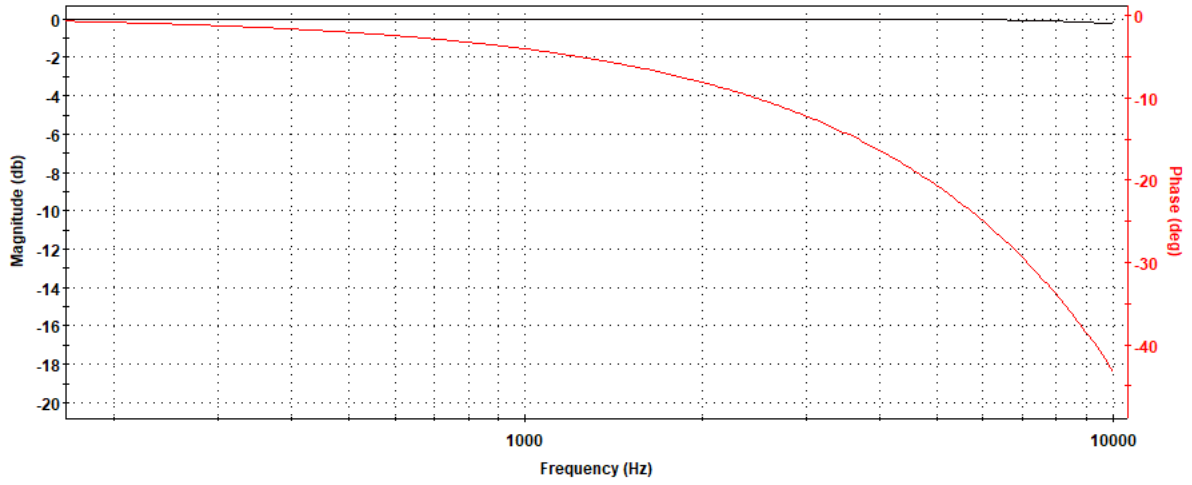


Figura 4.8: Respuesta en frecuencia del filtro activo

#### 4.1.5. Compensación $I \cdot R$

Al circular corriente siempre en el mismo sentido por el electroimán, se produce una caída de tensión casi constante en la resistencia interna, haciendo que no siempre estén aplicados  $\pm 24V$  al electroimán sino que durante el  $T_{ON}$  se aplican  $24V - I \cdot R$  y durante el  $T_{OFF}$  se aplican  $-24V - I \cdot R$ , haciendo que las pendientes sean distintas.

$$\pm V_{BUS} - L(y) * \left| \frac{di_L}{dt} \right| - L_{\infty} * \left| \frac{di_L}{dt} \right| - R_L * I_L = 0 \quad (4.15)$$

Cómo  $R_L = 0,2 \, \Omega$  y suponiendo una corriente de  $21 \, A$

$$\pm V_{BUS} - R_L * I_L = \pm 24 - 4,2 \quad (4.16)$$

Por lo tanto, para  $V_{BUS} = 24 \, V$ :

$$V_{BUS} - R_L * I_L = +24 - 4,2 = 19,8V \quad (4.17)$$

Para  $V_{BUS} = -24 \text{ V}$

$$V_{BUS} - R_L * I_L = -24 - 4,2 = -28,2V \quad (4.18)$$

Por lo tanto, sobre el electroimán se aplicarán dos tensiones distintas, en valor absoluto, durante la carga y descarga. Esto provoca que la rampa de corriente sea asimétrica.

Como luego se utilizará un rectificador de onda completa, se desea que la rectificación de cada una de estas pendientes resulte en el mismo valor. En la figura 4.9 se muestra el efecto luego de la rectificación sin realizar ninguna compensación:

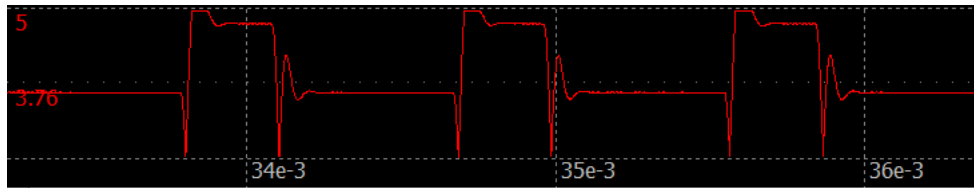


Figura 4.9: Forma de onda luego de rectificar sin compensación IR.

Se busca corregir esto en la estimación variando el setpoint de la salida del derivador. Para lograrlo se debe cambiar la tensión en la entrada figura no inversora ( $V_{bias}$ ) como se muestra en la figura 4.10.

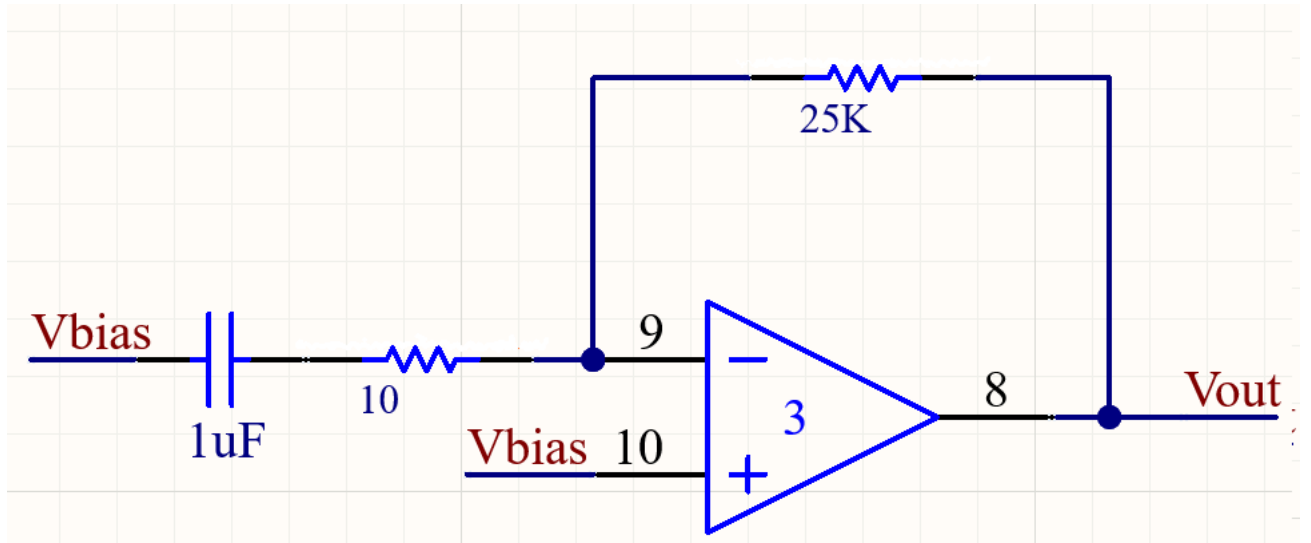


Figura 4.10: Esquema circuital del derivador.

Se tiene que la pendiente de bajada de la onda triangular, en módulo, es mayor que la de subida. Por lo tanto, al derivar (con la inversión de signo), esta quedará por encima del setpoint, y la pendiente de subida quedará por debajo. Se debe compensar ese setpoint para que la forma de onda sea simétrica alrededor de 2.5 V.

Para la pendiente de bajada, la salida del derivador será:

$$Vyf_{off} = V_{bias} + Kh * \tau * \frac{V_{bus} + Il * R}{L} \quad (4.19)$$

Para la pendiente de subida se tiene:

$$Vyf_{on} = V_{bias} - Kh * \tau * \frac{V_{bus} - Il * R}{L} \quad (4.20)$$

Queremos que se cumpla:

$$Vyf_{off} - 2,5 V = 2,5 V - Vyf_{on} \quad (4.21)$$

Se despeja  $V_{bias}$  y se llega a:

$$V_{bias} = 2,5 V - Kh * Il * \tau * \frac{R}{L} \quad (4.22)$$

Se tiene  $Kh = 53,3 \frac{mV}{A}$ ,  $R = 0,2 \Omega$ ,  $\tau = 25 ms$ . En cuanto a la inductancia, se utiliza:  $L_T(y) = 16,44 mHy$  (para  $Y_o = 4mm$ ).

$ViL$  es la tensión de salida del sensor de efecto Hall menos un setpoint de 2.5V. Sin embargo, debido al offset agregado al sensor para llevar su valor medio a 2.6V, al restarle 2.5V no se produce una cancelación completa sino que quedan 0.1V de error. Por ello, para implementar la ecuación 4.21 se utiliza el circuito mostrado en la figura 4.11 Este circuito compensa la diferencia de pendientes, el error de 0.1V y genera  $V_{bias}$  para ingresar al derivador.

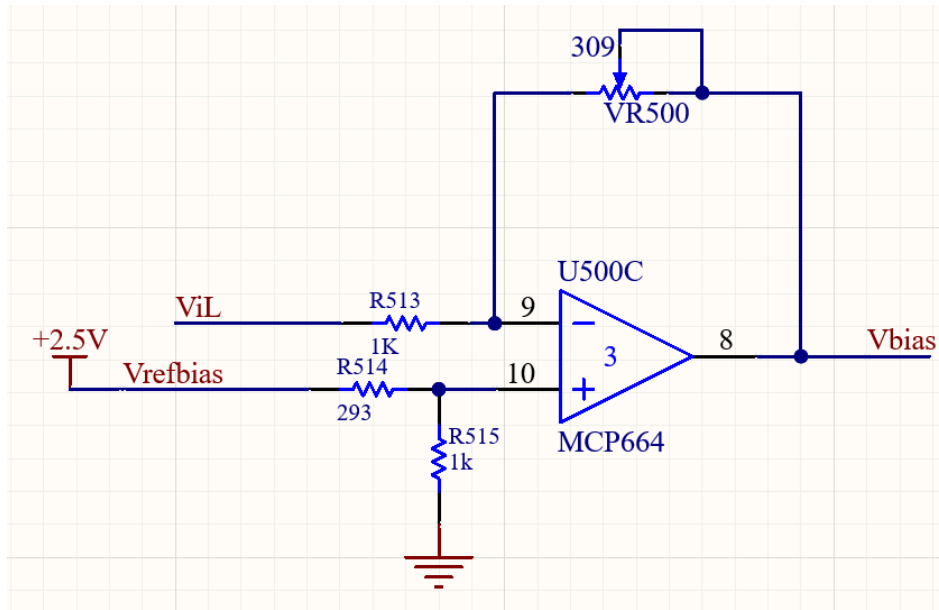


Figura 4.11: Generación de  $V_{bias}$ .

A partir del circuito de la figura 4.11 se obtiene:

$$V_{bias} = -\frac{R_4}{R_3}(K_h I_L + 0,1V) + V_{Ref_{bias}}(1 + \frac{R_4}{R_3}) * (\frac{R_1}{R_1 + R_2}) \quad (4.23)$$

Para poder llegar a la expresión de la ecuación 4.16 se debe cumplir que:

1.  $-\frac{R_4}{R_3} = -\tau * \frac{R}{L} = -0,304$
2.  $-\frac{R_4}{R_3}(0,1V) + V_{Ref_{bias}}(1 + \frac{R_4}{R_3}) * (\frac{R_1}{R_1 + R_2}) = 2,5V$

Por lo tanto, resolviendo la condición 1) se elige  $R_4 = 304 \Omega$  y se obtiene  $R_3 = 1 k\Omega$ . Luego, resolviendo la condición 2) con  $V_{Ref_{bias}} = 2,5V$  se elige  $R_1 = 1k\Omega$  y se obtiene  $R_2 = 291,8\Omega$ .

En la figura 4.12 se muestra como cambia la forma de onda.

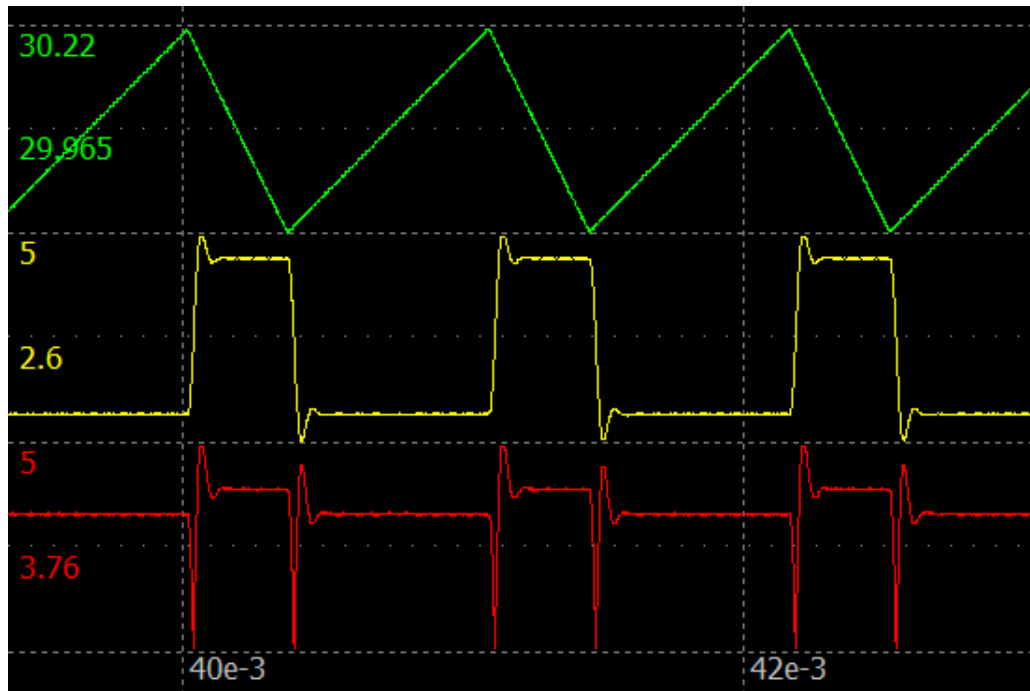


Figura 4.12: Formas de onda obtenidas en la simulación

La onda superior corresponde a la corriente en el electroimán (verde), la onda

que se encuentra al medio (amarilla) corresponde a la salida del derivador  $[V_{bias}]$  y la inferior (roja) corresponde a la onda rectificada con la corrección de  $I \cdot R$ .

### 4.1.6. Rectificador, Restador y Filtrado

#### 4.1.6.1. Rectificador

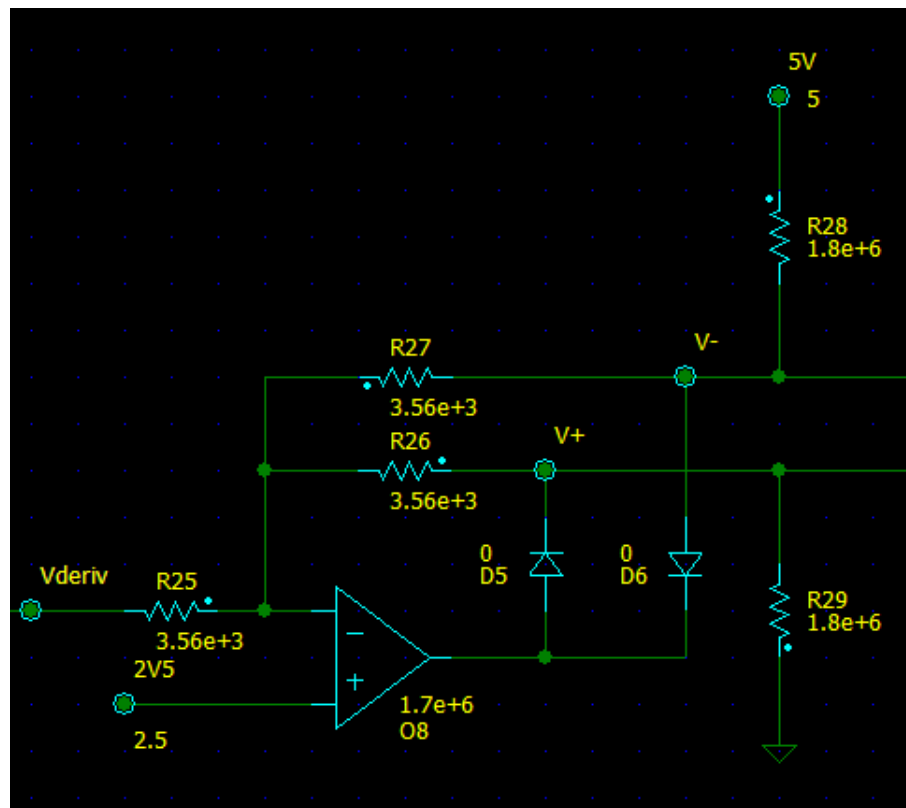


Figura 4.13: Rectificador y restador.

Para poder tener finalmente la estimación de la posición, debemos rectificar la salida del derivador alrededor de 2.5V. Esto se hace para hacer coincidir la pendiente positiva de la corriente triangular, con la pendiente negativa, y tener a la salida del estimador una señal aproximadamente continua.



Para entender el funcionamiento de este rectificador, se comienza analizando únicamente la etapa del primer amplificador operacional. Se parte de la suposición de que en un amplificador ideal, la tensión diferencial ( $V_d$ ) es igual a cero. Por lo tanto, como la entrada no inversora está fijada en 2.5V, la misma tensión se encuentra en la entrada inversora.

Al analizar la corriente en la resistencia  $R_{25}$  (adoptando sentido positivo hacia la izquierda) en función de  $V_{deriv}$ , resulta:

$$I_{R25} = \frac{2,5V - V_{deriv}}{R_{25}} \quad (4.24)$$

En el caso de que  $V_{deriv} < 2.5V$ , la corriente será positiva. Esta misma corriente proviene desde la salida del operacional, a través del diodo D5 y por la resistencia  $R_{26}$ . Si se desprecia la tensión del diodo en directa, nos queda que la salida del operacional es igual a  $V^+$ , y esta es igual a:

$$V^+ = I_{R25} * R_{26} + 2,5V = \frac{2,5V - V_{deriv}}{R_{25}} * R_{26} + 2,5V \quad (4.25)$$

Como  $R_{25} = R_{26}$

$$V^+ = 2,5V - V_{deriv} + 2,5V = 5V - V_{deriv} \quad (4.26)$$

Análogamente, si  $V_{deriv} > 2.5V$ , se puede encontrar:

$$V^- = 5V - V_{deriv} \quad (4.27)$$

Cuando D5 está activo,  $V^- = 2,5 V$  y cuando lo está D6,  $V^+ = 2.5 V$

#### 4.1.6.2. Restador

Se utiliza un amplificador operacional en modo diferencial como restador como se observa en la figura 4.14 y se obtiene lo siguiente.

Cuando  $V_{deriv} < 2.5V$ :

$$V_{estim} = V^+ - V^- + 2,5V = (5V - V_{deriv}) - (2,5V) + 2,5V = 5V - V_{deriv} \quad (4.28)$$

Cuando  $V_{deriv} > 2.5V$ :

$$V_{estim} = V^+ - V^- + 2,5V = 2,5V - (5V - V_{deriv}) + 2,5V = V_{deriv} \quad (4.29)$$

Si tomamos a  $V_{deriv}$  como  $V_{deriv} = \Delta V_{deriv} + 2,5V$ , reemplazando en los dos casos

obtenemos que:

$$V_{estim} = 2,5V + |\Delta V_{deriv}| \quad (4.30)$$

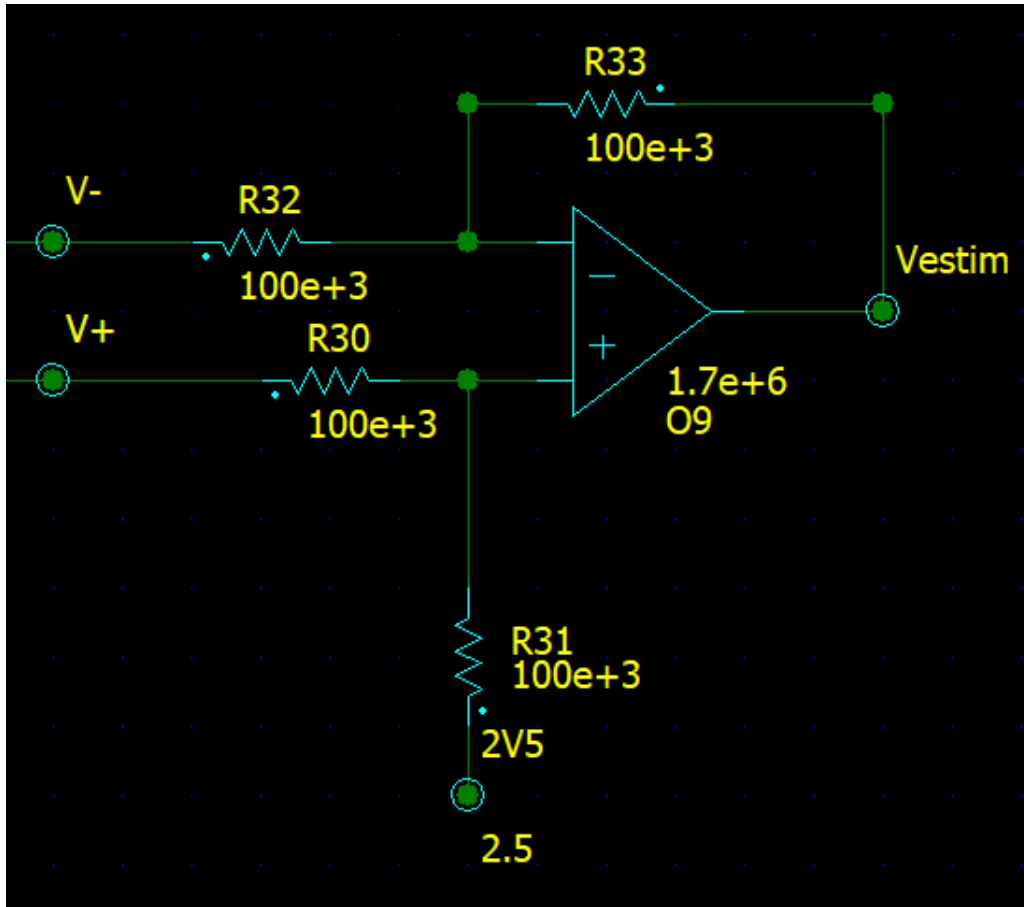


Figura 4.14: Restador.

#### 4.1.6.3. Etapa de filtrado

En el restador se implementa un filtrado adicional a la señal de salida como se observa en la figura 4.15. De esta última etapa, considerando que  $C_5 = C_6 = C$  y  $R_{33} = R_{31} = R$ , se obtiene:

$$V_{estim} = \frac{1}{1 + S * C * R} * (V^+ - V^- + 2,5V) = \frac{1}{1 + S * C * R} * (2,5V + |\Delta V_{deriv}|) \quad (4.31)$$

$$V_{estim} = \frac{1}{1 + S * C * R} * |\Delta V_{deriv}| + 2,5V \quad (4.32)$$

Puesto que la salida  $V_{estim}$  debe ser una continua, es importante eliminar cualquier posible ripple permitiendo solo el paso de continua. Por ello, se escogen los siguientes valores para los componentes:

1.  $C = 10 \text{ nF}$
2.  $R = 100 \text{ Kohm}$
3.  $\frac{1}{2 * \pi * C * R} = 159,2 \text{ Hz}$

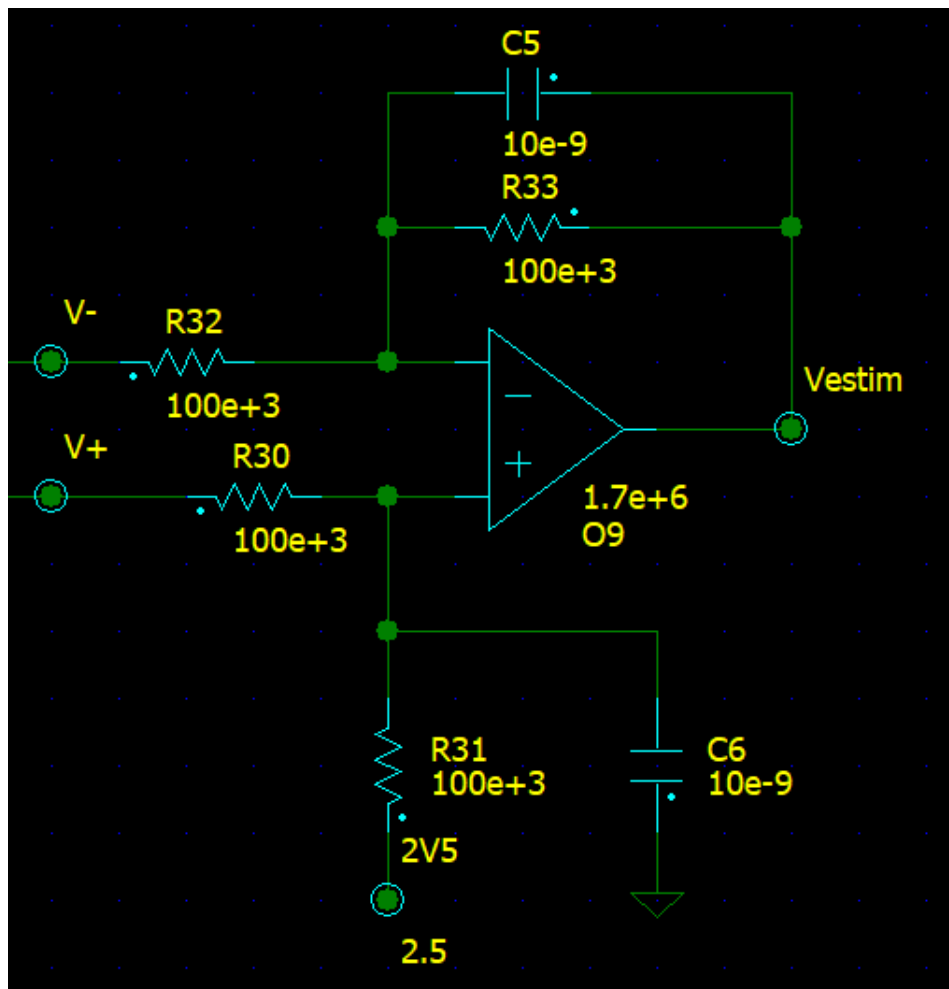


Figura 4.15: Esquema circuital del restador con una etapa de filtrado en  $159,2 \text{ Hz}$ .

#### 4.1.7. Circuito completo

En la figura 4.16 se puede observar el circuito completo utilizado para la implementación del rectificador, restador y filtrado.

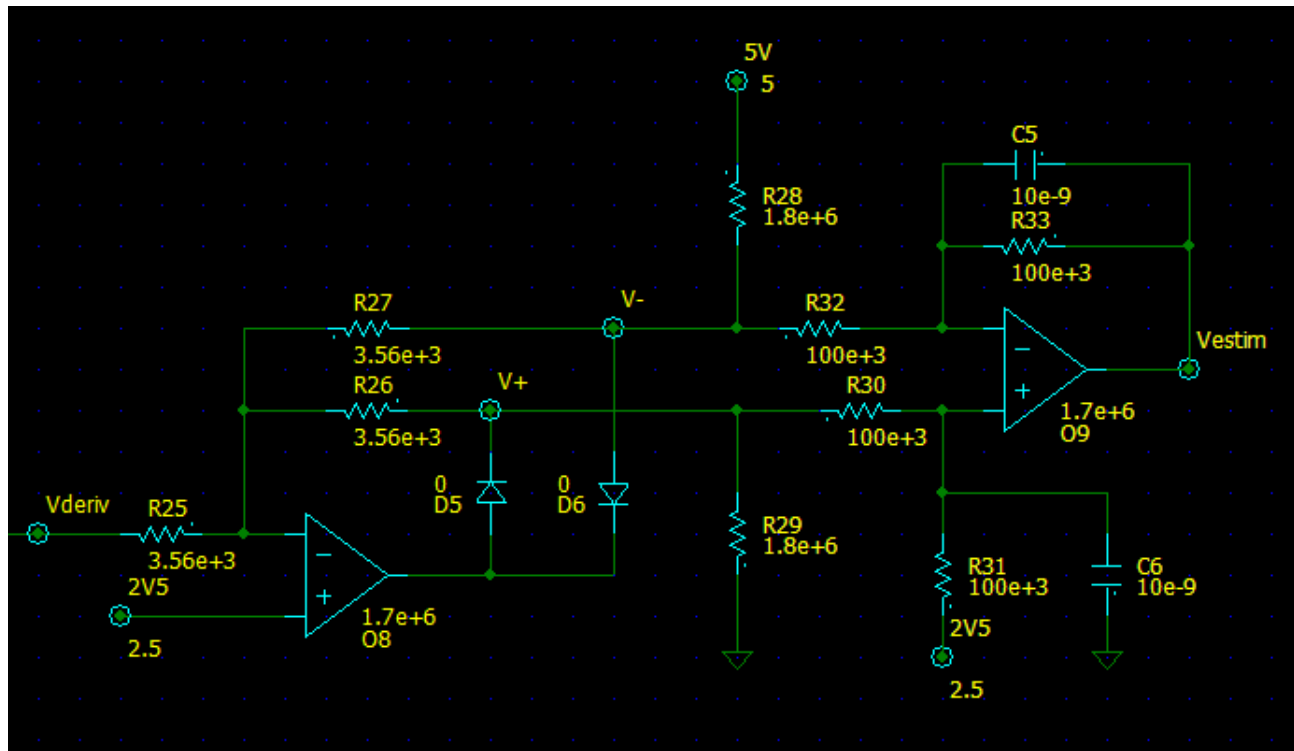


Figura 4.16: Circuito estimador de posición completo

#### 4.1.8. Simulación de estimador completo

En la figura 4.17 se pueden observar 3 formas de onda. La superior (verde) corresponde a la corriente del electroimán, la del medio (amarilla) a la salida del derivador y la inferior (roja) es la salida Vestim. Utilizando cursores se midió un ripple de 52.66mV en Vestim.

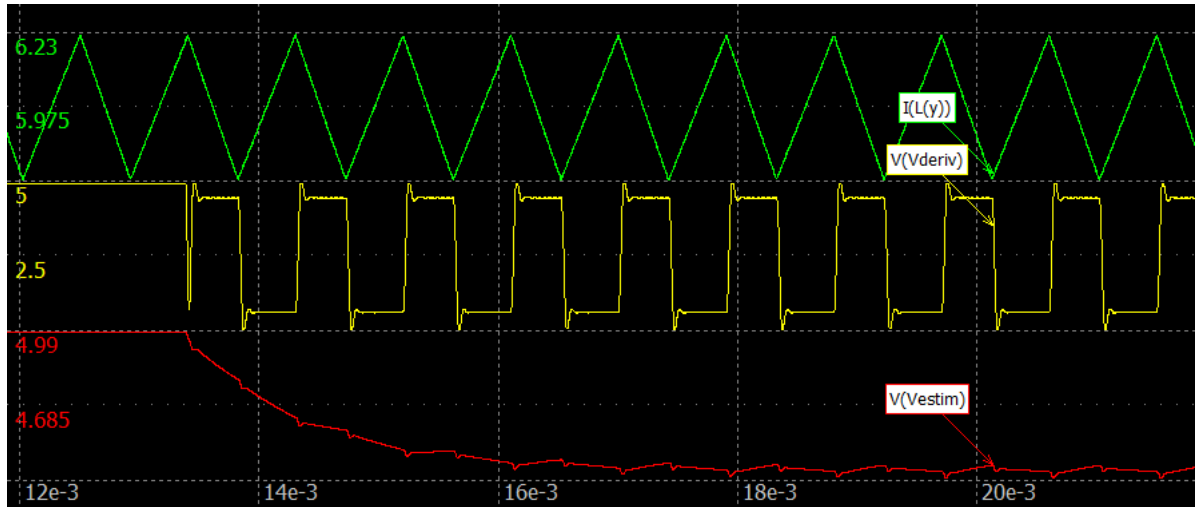


Figura 4.17: Simulación final del estimador.

En la figura 4.2 se muestran valores medidos de Vestim en función de la posición.

y [mm]	L(y) [mH]	Vestim [V]
2	22.64	3.86
3	18.8	4.13
4	16.44	4.36
5	14.9	4.55

Tabla 4.2: Resultados de simulación del estimador.

#### 4.1.9. Transferencia final del estimador de posición:

Para la transferencia de lazo cerrado del derivador se obtiene:

$$Tl_{c_{derivador}} = \frac{V_{deriv}}{V_{il}} = \frac{-0,025 * s}{1 + \left(\frac{2*0,473}{94,5 \text{ krad/s}}\right) * s + \left(\frac{s}{94,5 \text{ krad/s}}\right)^2} \quad (4.33)$$

De esta forma, se obtiene un sistema con un cero en el origen y dos polos complejos

conjugados con una  $W_n = 2\pi * 15000 \text{ Hz}$  y un  $\xi = 0,473$ .

Por otro lado, al considerar el polo aportado por la etapa de restado y filtrado situado en  $10 \text{ Krad/s}$  y considerar la inversión de signo que genera el rectificador, se obtiene:

$$Tlc_{estimador} = \frac{V_{estim}}{Vil} = \frac{0,025 * s}{(1 + \frac{s}{1 \text{ Krad/s}}) * [1 + (\frac{2*0,473}{94,5 \text{ Krad/s}}) * s + (\frac{s}{94,5 \text{ Krad/s}})^2]} \quad (4.34)$$

Para poder obtener la transferencia del diagrama en bloques:  $V_{estim}/Y$ :

$$Tlc' = \frac{V_{estim}}{s * Vil} = \frac{V_{estim}}{kh * s * I_L} = \frac{0,025}{(1 + \frac{s}{1 \text{ Krad/s}}) * [1 + (\frac{2*0,473}{94,5 \text{ Krad/s}}) * s + (\frac{s}{94,5 \text{ Krad/s}})^2]} \quad (4.35)$$

Como  $s * I_L \equiv \frac{dI}{dt}$ , se puede usar la expresión linealizada:

$$\left| \frac{di_L}{dt} \right|_{Lineal} = 194690 * Y[m] + 676 \text{ A/s} \quad (4.36)$$

De esta forma,  $s * I_L \equiv 194690 * Y$  (sin considerar la componente de continua)

Reemplazando se obtiene:

$$Tlc' = \frac{V_{estim}}{Y[m]} = \frac{259,6}{(1 + \frac{s}{1 \text{ Krad/s}}) * [1 + (\frac{2*0,473}{94,5 \text{ Krad/s}}) * s + (\frac{s}{94,5 \text{ Krad/s}})^2]} \quad (4.37)$$

Considerando la etapa de filtrado de la entrada, que tiene dos polos en  $2\pi * 10 \text{ KHz} \simeq 60 \text{ Krad/s}$  se obtiene:



$$Tlc' = \frac{V_{estim}}{Y[m]} = \frac{259,6}{(1 + \frac{s}{1 \text{ Krad/s}}) * [(1 + \frac{s}{60 \text{ Krad/s}})]^2 * [1 + (\frac{2*0,473}{94,5 \text{ Krad/s}}) * s + (\frac{s}{94,5 \text{ Krad/s}})^2]} \quad (4.38)$$

Finalmente, despreciando los polos en alta frecuencia, la transferencia queda:

$$Tlc' = \frac{V_{estim}}{Y[m]} = \frac{259,6}{(1 + \frac{s}{1 \text{ Krad/s}}) * (1 + \frac{s}{60 \text{ Krad/s}})^2} \quad (4.39)$$

# Capítulo 5

## Compensador Analogico

### 5.1. Compensador Analogico

Se plantea una compensación como la que se muestra en la figura 5.1. Está compuesta por un lazo de control interno con un controlador por adelanto de fase para lograr estabilizar el sistema, y un lazo de control externo con un integrador para eliminar el error en régimen permanente.

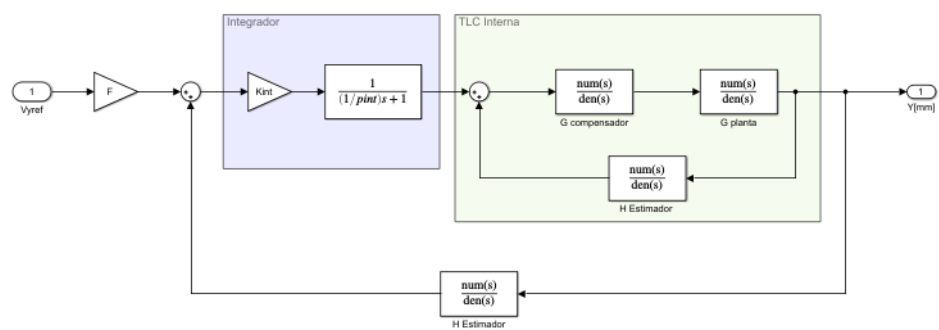


Figura 5.1: Diagrama del sistema completo.

### 5.1.1. Diseño de compensador por adelanto de fase

A partir de las transferencias de la planta, el controlador de corriente y el estimador de posición, se realizó el diseño de un compensador analógico por el método de adelanto de fase. Se llegó a la siguiente transferencia:

$$G_c(s) = 10 * [20,346 * \frac{(s + 44,3)}{(s + 902,1)}]^2 \quad (5.1)$$

A continuación se diseña un circuito analógico correspondiente a este compensador.

### 5.1.2. Diseño circuital

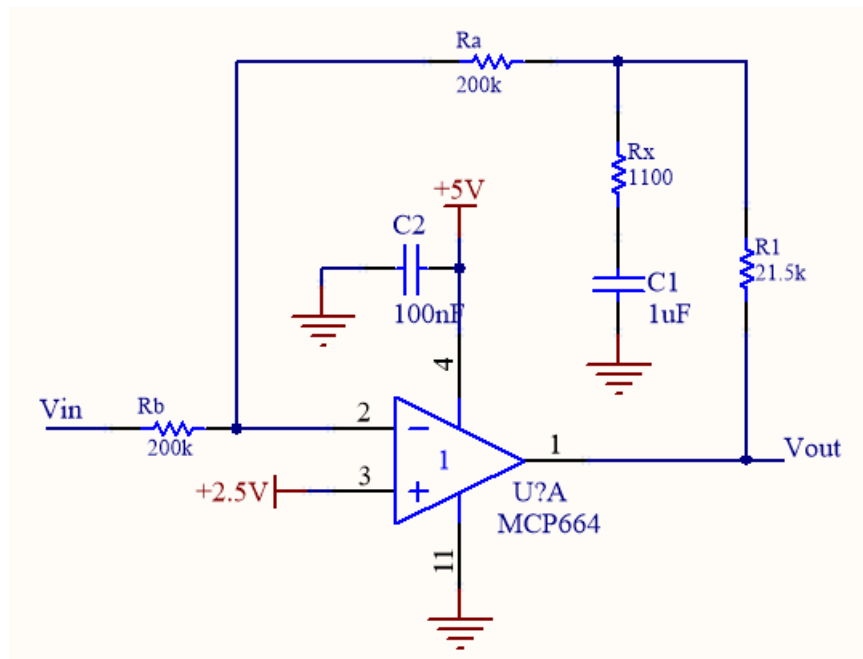


Figura 5.2: Diseño circuital de una red de adelanto de fase.

Para cada etapa del compensador por adelantado, se utilizará la topología mostrada en la figura 5.2. Consiste en un polo y cero con ganancia unitaria (si  $R_a = R_b$ ).

Luego se agrega la ganancia como una etapa separada.

La transferencia de lazo cerrado de esta etapa es:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_a}{R_b} * \frac{1 + sC(R_x + R1)}{1 + sCR_x} \quad (5.2)$$

Por lo tanto, para tener polo = 902.1 Hz y zero = 44.3, y eligiendo el capacitor  $C = 1\mu F$ , resulta  $R_x = 1100$  y  $R1 = 21.5K$ . Además, se elige  $R_a = R_b = 200k$  para ganancia unitaria. Luego, la ganancia del compensador se obtiene con una etapa amplificadora. Para ello, se utiliza un amplificador operacional como se muestra en la figura 5.3. Para lograr una ganancia de  $K=10$  se utiliza  $R_{322} = 1K$  y  $R_{323} = 10K$ .

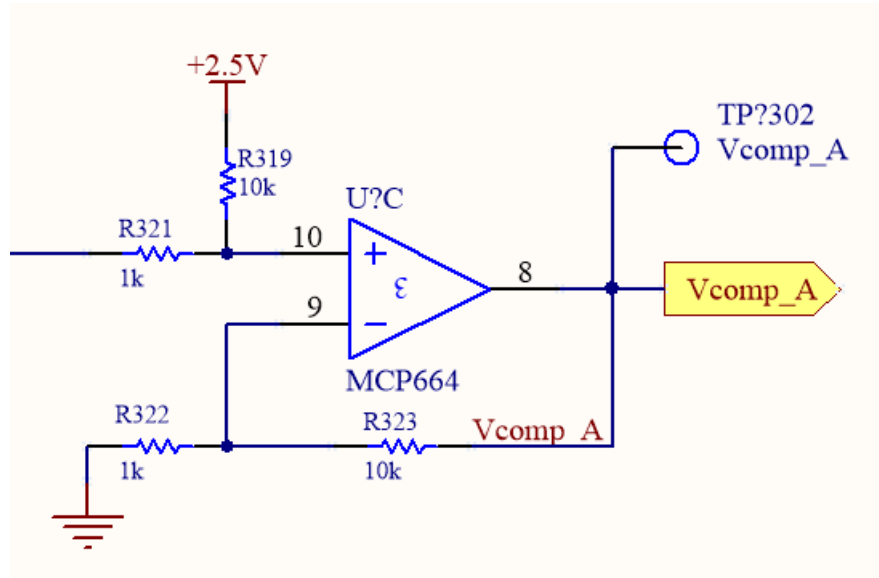


Figura 5.3: Etapa de ganancia del compensador.

### 5.1.3. Compensador con integrador

Para el análisis se tiene que la realimentación es:

$$H_{estim} = \frac{V_{estim}}{Y[m]} = -\frac{259,6}{(1 + \frac{s}{1Kr/s}) * (1 + \frac{s}{60Kr/s})^2} \quad (5.3)$$

Y la cadena de avance, con  $m=30$  Kg e  $Y_o=5$ mm, es

$$G[m = 30Kg] = TLC[m = 30Kg] * G_{integrador} \quad (5.4)$$

Podemos plantear un compensador del tipo:

$$G_{int} = K_{int} * \frac{1}{\frac{s}{P_{int}} + 1} \quad (5.5)$$

Por medio de la técnica de lugar de raíces y considerando  $P_{int}=0.1$  r/s se concluye que la ganancia del integrador que garantiza la estabilidad del sistema es  $K_{int} = 50$ .

#### 5.1.3.1. Implementación circuital del integrador

En la figura 5.4 se puede observar la topología y los valores utilizados en cada componente para el diseño del circuito integrador.

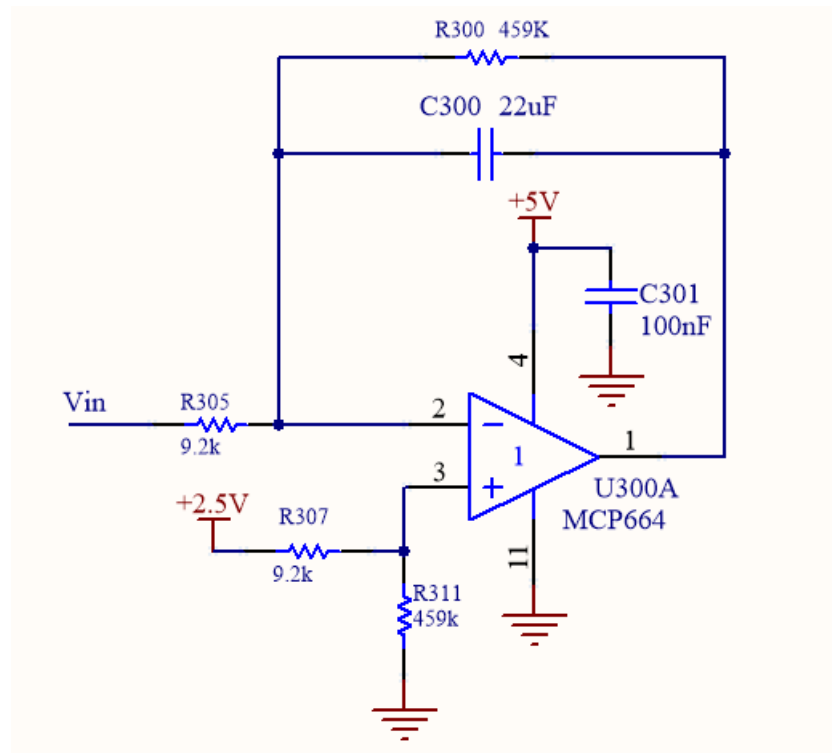


Figura 5.4: Implementación circuital del integrador.

### 5.1.3.2. Cálculo de ganancia de entrada

Tomando la  $TLC'$  que corresponde a la ganancia total de los bloques con el integrador ya incorporado, la ganancia resulta:

$$Ganancia_{TLC'} \simeq \frac{1}{H_{estim}} = -\frac{1}{260} \quad (5.6)$$

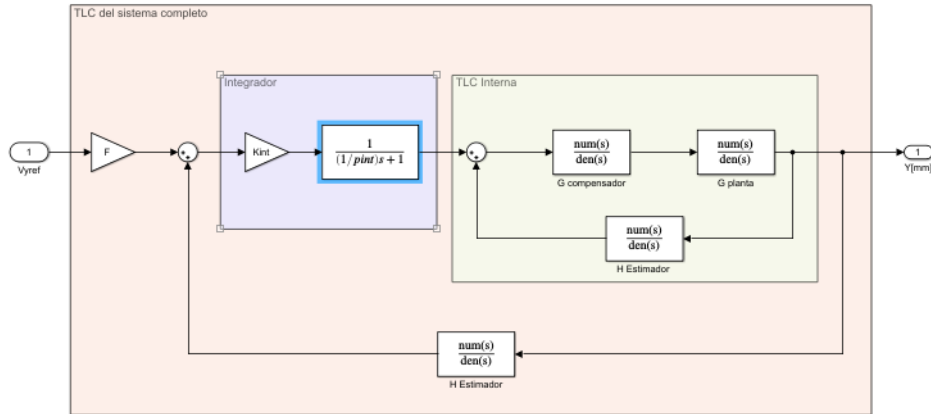


Figura 5.5: Diagrama en bloques final.

Por lo tanto teniendo tomando  $F=-1$  y los rangos de posición de 1 mm a 5 mm como mínimo y máximo respectivamente se llega a lo siguiente:

$$Y[m] = F * \left(-\frac{1}{260}\right) * V_{in} = \frac{1}{260} * V_{in} \quad (5.7)$$

La realimentación tiene un set-point de 3.4 V por lo tanto se le suma a  $V_{in}$  el mismo valor.

Los valores finales son:

Y[mm]	$V_{in}[V]$
5	4.7
4	4.44
3	4.78
2	3.92

Tabla 5.1: Tensión de referencia  $[V_{in}]$  Vs separación deseada  $[Y]$ .

### 5.1.3.3. Implementación circuital del bloque de ganancia de entrada “F”

Para poder modificar la distancia de separación se ingresa al sistema con una tensión variable, la cual corresponde a una posición de referencia. Para ello se utiliza el circuito mostrado en la figura 5.6.

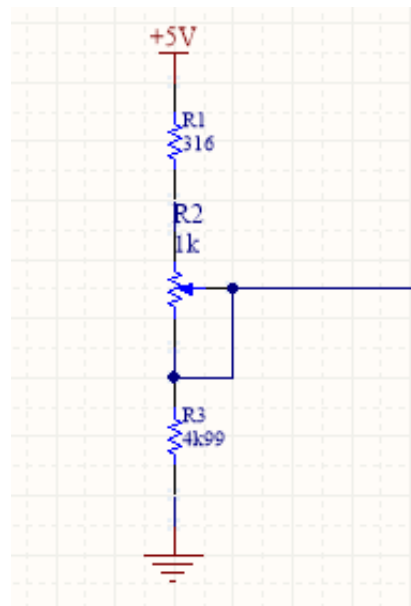


Figura 5.6: Etapa de entrada.

Se utiliza una resistencia variable de 1K y dos fijas. Para poder excursionar la tensión de referencia entre 3.92V y 4.7V, los valores de las resistencias R1 y R3 deben ser de 4911 y 313.5 respectivamente.

Por lo tanto, adoptando un valor comercial para ellas, resulta:

$$R1 = 316 \, \Omega$$

$$R3 = 4990 \, \Omega$$

De esta forma, los valores de tensión para la referencia de posición quedan:

$$\text{Tensión máxima} = 4.69V$$



Tensión mínima = 3.96V

# Capítulo 6

## Implementacion Digital

### 6.1. Descripción general

La implementación digital consiste, básicamente, en realizar la estimación de posición y el control de la planta por medio de un microcontrolador. Se utiliza un kit de desarrollo basado en el microcontrolador STM32F072, que contiene un ADC de 12 bits y 3.3V de referencia, un DAC 12 bits y 3.3V de referencia.

En la figura 6.1 se muestra un diagrama en bloques general de la implementación digital del sistema. Es posible observar que se ingresa al microcontrolador a través de un ADC, con una tensión de referencia ( $V_{ref}$ ) proporcional a la distancia de separación deseada. Esa posición de referencia es comparada con la posición estimada  $Y(z)$  y el resultado  $e(z)$  es afectado por el compensador digital  $C(z)$ . Por medio de un DAC, la salida del compensador ingresa al controlador de corriente  $G_{iL}(s)$ , el cual actúa sobre la planta  $G_P(s)$ , modificando así la distancia de separación.

Por medio de un ADC y el sensor de Efecto Hall, se muestrea una tensión proporcional a la corriente que circula por el electroimán. De esta forma, es posible obtener una posición estimada  $Y(z)$  al multiplicar esta tensión por la transferencia

$H(Z)$ .

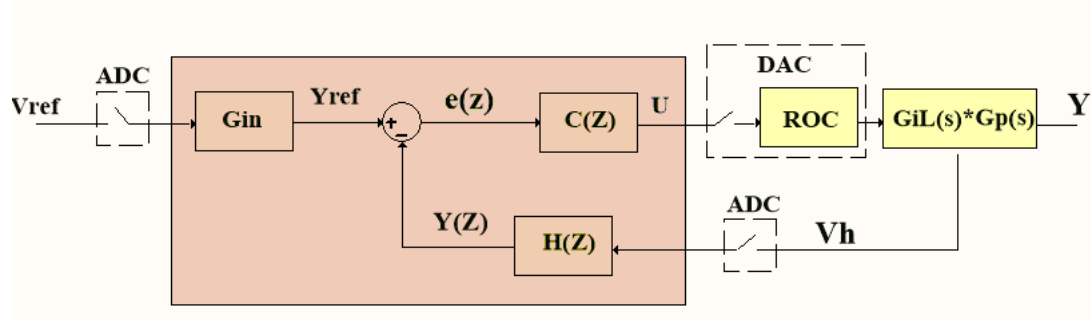


Figura 6.1: Diagrama en bloques de la implementación digital.

Abstrayéndose de la matemática que se realiza dentro del micro para la estimación de posición, podemos simplificar el diagrama al que se muestra en la figura 6.2, en la que:

$$G_T(s) = G_P(s) * G_{iL}(s). \quad (6.1)$$

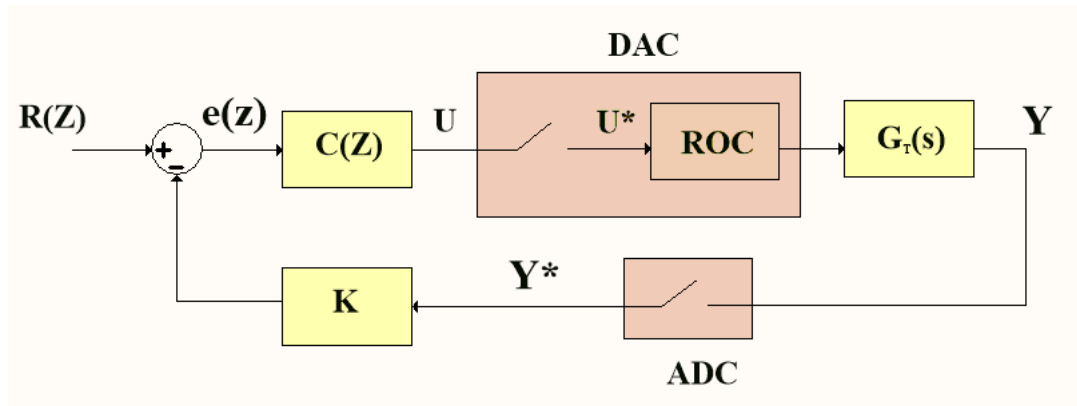


Figura 6.2: Diagrama en bloques de la etapa digital simplificado.

## 6.2. Determinación de la frecuencia de muestreo

Se desea realizar una estimación de la posición del electroimán  $Y(z)$  a partir de las muestras tomadas por el ADC de la tensión de salida del sensor de efecto HALL.

La forma de onda de la salida del sensor es triangular y presenta una frecuencia variable en función de la inductancia del electroimán, la que, depende de la distancia de separación. Se puede calcular como:

$$F_{SW} = \frac{V_{BUS}}{2 * L(y) * \Delta I_H} \quad (6.2)$$

Dadas las mediciones realizadas sobre el electroimán, se obtuvieron los valores de inductancia al variar la distancia de separación del entrehierro. Al aplicar en la ecuación 5.1 los valores de inductancia obtenidos en la medición ( $L[\text{mHy}]$ ), se calcula la frecuencia de conmutación ( $F_{SW}[\text{Hz}]$ ). Los resultados se muestran en la tabla 6.1.

$Y[\text{mm}]$	$L[\text{mHy}]$	$F_{SW}[\text{Hz}]$
2	22.64	1060
3	18.8	1276
4.4	15.5	1548
5.2	14.7	1632
6.5	14.4	1666

Tabla 6.1: Valores de frecuencia calculados a partir de las mediciones de inductancia realizadas.

Para la estimación de la posición es necesario medir la pendiente de la onda triangular. Por lo que, para reconstruir su forma de onda es necesario muestrear la señal con cierta cantidad de armónicos para no afectar demasiado la pendiente. Se determinó que la frecuencia de muestreo del ADC debe ser al menos el doble de la frecuencia de la 5<sup>o</sup> armónica para el caso de la mayor frecuencia. Por lo tanto, se adopta 2.5 veces. Es decir:

$$F_S \geq 2,5 * 5 * f_{max} \Rightarrow F_S \geq 2,5 * 5 * 1666Hz \Rightarrow F_S \geq 20825Hz \quad (6.3)$$

De esta forma, se adopta una frecuencia de muestreo para el ADC de 25 kHz. Por lo tanto, es posible obtener 15 muestras en un período de la triangular para el caso de la frecuencia máxima. Como la señal crece o decrece durante medio ciclo, se pueden tomar 7 muestras para identificar la pendiente. En el caso de que la señal presente la frecuencia mínima, se pueden tomar 23 muestras en un ciclo, lo cual se traduce en 11 muestras para la pendiente de subida o bajada.

### **6.3. Adquisición y procesamiento de las muestras**

Considerando el caso de máxima frecuencia, en el que solo se podrán tomar 7 muestras durante el tiempo de crecimiento o decrecimiento, se describe el procedimiento para determinar la posición estimada.

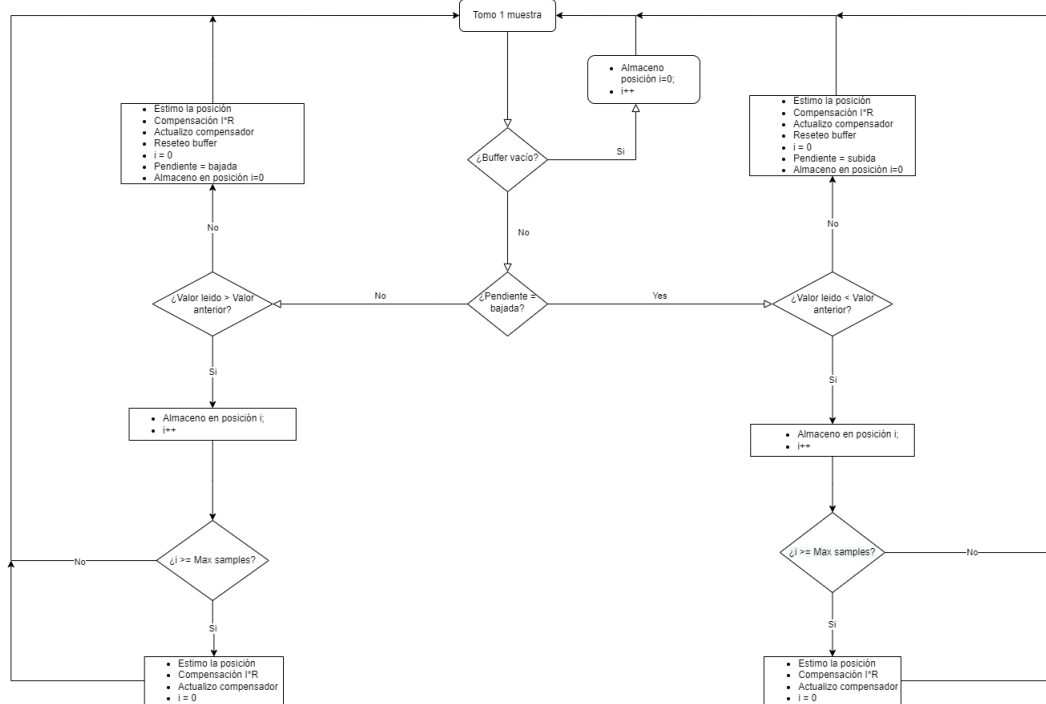


Figura 6.3: Diagrama de flujo del procesamiento de las muestras adquiridas.

Como se observa en el diagrama de flujo de la figura 6.3, cada muestra de tensión tomada del sensor de efecto hall, se almacena en un buffer de 7 posiciones. Para poder discernir entre pendientes de bajada y de subida, se verifica en cada muestra si el valor leído es mayor o menor al almacenado en la posición anterior. En caso de que sea mayor al anterior, significa que se está muestreando la pendiente positiva de la onda triangular. El hecho de poder discernir entre pendientes positivas y negativas, permite aplicar la compensación  $I \cdot R$  al igual que se realiza en el estimador analógico.

Cada vez que el buffer se complete, se realiza el cálculo de la derivada con el valor máximo y mínimo almacenado. Con este resultado, se hace la estimación de la posición y se actualiza la entrada al compensador digital.

En caso de haber completado las 7 posiciones del buffer y la pendiente persiste con el mismo signo, el buffer comienza a llenarse nuevamente desde la posición

inicial, sobrescribiendo los valores de mayor vejez. Por lo tanto, pueden ocurrir dos situaciones. La primera es que se detecte un cambio de pendiente antes de completar nuevamente el buffer, con lo cual se calcula la derivada con los valores extremos almacenados sin importar su vejez y se actualiza la entrada al compensador. La segunda, es que se vuelva a completar el buffer, en cuyo caso también se hace la actualización. La diferencia entre estas dos situaciones es el tiempo transcurrido. En este último, se hace cada 7 períodos de muestreo mientras que en el primero se realiza “N” períodos de muestreo luego de la última actualización, donde “N” representa la cantidad de muestras que se almacenaron en el buffer incompleto.

Luego de cada actualización, el proceso vuelve a iniciar con el buffer vacío.

Utilizando este método de estimación, puede ocurrir que se obtenga una nueva estimación en 7 periodos de muestreo del ADC, o incluso en menos. Por lo tanto se podría decir que se tiene un estimador de posición con frecuencia de actualización variable. Esto es importante al momento de diseñar un compensador digital para el sistema. Para hacerlo, se debe considerar el caso en que la frecuencia de actualización es la menor, por lo tanto podríamos decir que el compensador digital se debe diseñar con una frecuencia de muestreo de  $25/7 \text{ KHz} = 3.5 \text{ KHz}$ .

## 6.4. Estimación digital de la posición

De las mediciones realizadas se llegó a la expresión que relaciona la distancia de separación con la pendiente de la corriente en el electroimán:

$$\left| \frac{di_L}{dt} [A/s] \right| = 194690 * Y[m] + 676 [A/s] \quad (6.4)$$

Por lo tanto, la posición en metros puede despejarse como:

$$Y = 5,136 * 10^{-6} * \left| \frac{di_L}{dt} \right| - 3,472 * 10^{-3} [m] \quad (6.5)$$

Es importante notar que la resistencia interna ( $R$ ) del electroimán genera una caída de tensión cuando circula corriente. Esta caída provoca que la tensión efectiva aplicada sobre la inductancia sea distinta para el semiciclo de subida que el de bajada, generando que la onda triangular tenga diferentes pendientes (en valor absoluto) para cada caso. Esta se representa como  $(\frac{di_L}{dt})_{Real}$  y es la que se mide al utilizar el ADC.

Es decir:

$$(\frac{di_L}{dt})_{Real} = (\frac{di_L}{dt})_{Teorica} - \frac{R * I_L}{L(y)} \quad (6.6)$$

Aproximando la derivada real como la resta entre la muestra en un instante menos el anterior sobre el período de muestreo y compensando el error que introduce la resistencia interna, se obtiene:

$$Y = 5,136 * 10^{-6} * \left| \frac{I_L[n] - I_L[n-1]}{T_S} + \frac{R * i_L}{L(y)} \right| - 3,472 * 10^{-3} [m] \quad (6.7)$$

Considerando a  $V_h$  como la tensión entregada por el sensor de efecto hall, proporcional a la corriente que circula por el electroimán multiplicada por una ganancia  $K_h$  de 53.3mV/A, donde  $(\hat{V}_h)$  corresponde a la componente alterna de tensión y  $(\bar{V}_h)$  la continua, resulta:

$$V_h[n] = \bar{V}_h[n] + \hat{V}_h[n] = K_h * (\bar{I}_L[n] + \hat{I}_L[n]) \quad (6.8)$$

Para la estimación de la posición se utiliza el término de alterna mientras que para compensar el error introducido por la resistencia interna del electroimán se



utiliza el de continua. Por lo tanto, se obtiene:

$$Y = 5,136 * 10^{-6} * \left| \frac{\hat{V}_h[n] - \hat{V}_h[n-1]}{K_h * T_S} + \frac{R * \bar{V}_h[n]}{K_h * L(y)[n-1]} \right| - 3,472 * 10^{-3} [m] \quad (6.9)$$

El valor de corriente  $\bar{V}_h[n]$  se obtiene de sensar el valor medio de tensión entregado por el sensor de efecto Hall mediante otro canal del ADC.

Por otro lado, el valor de  $L(y)[n-1]$  se obtiene de aplicar el valor anterior estimado de posición en la ecuación 6.10. El cálculo de esta expresión se obtiene a partir de la linealización de la inductancia en función de las mediciones realizadas sobre el electroimán.

$$L(y)[n-1] = -2,56 * Y[n-1] + 0,0271Hy \quad (6.10)$$

Por lo tanto la ecuación correspondiente en el tiempo discreto:

-acomodar tamaño de ecuaciones-

$$Y = 5,136 * 10^{-6} * \left| \frac{\hat{V}_h[n] - \hat{V}_h[n-1]}{K_h * T_S} + \frac{R * \bar{V}_h[n]}{K_h * (2,56 * Y[n-1] + 0,0271)} \right| - 3,472 * 10^{-3} [m] \quad (6.11)$$

$$Y = 96,3 * 10^{-6} * \left| \frac{\hat{V}_h[n] - \hat{V}_h[n-1]}{T_S} + \frac{R * \bar{V}_h[n]}{(2,56 * Y[n-1] + 0,0271)} \right| - 3,472 * 10^{-3} [m] \quad (6.12)$$

Donde n representa el número de muestras. Es decir,  $V_h[n]$  se refiere a la muestra más reciente en el buffer y  $V_h[n-1]$  a la más vieja.

Es importante notar que los coeficientes deben calcularse antes de actualizar el compensador en función de la cantidad de períodos de muestreo transcurridos desde la última actualización. Estos deben calcularse en ese momento puesto que

el compensador digital presenta una frecuencia de actualización variable y los coeficientes del estimador dependen de ella.

Por otro lado, el bloque K mostrado en la Figura 6.2 resulta en una transferencia unitaria.

## 6.5. Resolución en posición

Una variación de posición ( $\Delta Y$ ) produce un cambio de inductancia ( $\Delta L[y]$ ) que se traduce en un cambio de frecuencia ( $\Delta f$ ). Para poder detectar el mínimo cambio de posición en un período de muestreo se debe tener una resolución tal que permita discernir ese cambio de frecuencia.

A partir de los valores de inductancia obtenidos con las mediciones, es posible realizar una aproximación lineal como se muestra en la ecuación 6.13.

$$L[Hy] = -2,56 * Y[m] + 0,0271Hy \quad (6.13)$$

Aplicando la expresión linealizada de la inductancia y la ecuación 6.2 es posible obtener el valor de frecuencia para una separación de  $Y=2.1\text{mm}$ . Este resulta de  $f_{sw}[2,1\text{mm}] = 1104,8\text{Hz}$ . De esta forma, conociendo el valor de frecuencia para 2 mm, el cual es de  $f_{sw}[2\text{mm}] = 1060\text{Hz}$ , es posible obtener la variación de frecuencia para un  $Y$  mínimo de 0.1mm. Este valor puede obtenerse como:

$$\Delta F_{sw}(\text{Teorico}) = f_{sw}[2,1\text{mm}] - f_{sw}[2\text{mm}] = 44,8\text{Hz} \quad (6.14)$$

Las pendientes para el peor caso se da con la menor variación de tensión entre muestras. Es decir, para el caso de frecuencia mínima. En la ecuación 6.15 se muestra el cálculo de la pendiente de la onda triangular en función de la frecuencia de conmutación.

$$P(f_{SW}) = \frac{\Delta V}{T_{SW}/2} = 2 * K_H * \Delta i_L * f_{SW} = 2 * 0,0533 * 0,5 * f_{SW} \quad (6.15)$$

A partir de la ecuación 6.15 es posible obtener el valor de la pendiente para la frecuencia mínima de conmutación y la de su incremento correspondiente a una variación en la posición de 0.1mm. Esta situación se representa en la figura 6.4.

$$\begin{aligned} P(f_{SW_{min}}) &= 56,49[V/s] \\ P(f_{SW_{min}} + \Delta f_{SW}) &= 58,89[V/s] \end{aligned} \quad (6.16)$$

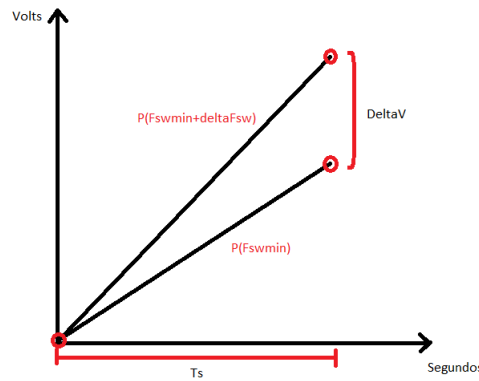


Figura 6.4: Variación de pendiente ante mínimo cambio de posición.

Por lo tanto, para poder diferenciar las pendientes, la resolución del ADC debe ser menor o igual a  $\Delta V$ .

$$\begin{aligned} V1 &= P(f_{SW_{min}} + \Delta f_{SW}) * T_S \\ V2 &= P(f_{SW_{min}}) * T_S \end{aligned} \quad (6.17)$$

Al considerar  $T_s = 125kHz$ :

$$\Delta V_{ADC} = T_S * [P(f_{SW_{min}} + \Delta f_{SW}) - P(f_{SW_{min}})] = 96\mu V \quad (6.18)$$

Este resultado indica que al usar un ADC de 12 bits, se necesitaría una tensión de referencia  $V_{ref} = 0,393216V$ . Sin embargo, este valor resulta demasiado bajo y no sirve si se quiere medir la salida del sensor de efecto Hall de manera directa. Por lo tanto, se decide diseñar un circuito que permita realizar la estimación manteniendo la tensión de referencia en 3.3V

La corriente que circula por el electroimán presenta una componente de continua y otra de alterna. La primera excursiona entre 0A y 30A mientras que la segunda varía entre  $\pm 250mA$  en torno al valor medio, con forma de onda triangular. Es posible hacer una adquisición separada de ambas componentes con el ADC para que luego sean procesadas. La señal que ingresa al circuito corresponde a la tensión de salida del sensor de efecto Hall sin el set point de 2.5V.

Si se tiene en cuenta la ganancia del sensor de efecto Hall, a su salida se obtiene una señal cuyo valor medio varía entre 0 y 1.6 V, y un valor de alterna de  $26,7mV_{pp}$ . Debido a que el ADC permite una excursión entre 0V y 3.3V, la máxima ganancia posible es de 60 veces para la señal de alterna. Por otro lado, para medir con la resolución en posición deseada de 0.1 mm se debe amplificar la señal triangular 9 veces como mínimo.

Por lo tanto, se adopta una ganancia de 50, obteniendo así una excursión máxima de 3.17V (0.67V sobre el set-point).

Las características del circuito son:

- Ganancia: 50
- Set-point de 2.5V
- Frecuencia de corte inferior: 100 Hz

- Frecuencia de corte superior: 12,5 kHz

Teniendo en cuenta la ganancia elegida, la pendiente de la onda triangular resulta:

$$P(F_{SW}) = 50 * [0,0533 * 0,5 * (F_{SW} * 2)] \left[ \frac{V}{s} \right] \quad (6.19)$$

Reemplazando para el incremento de frecuencia se obtiene los valores

$$\begin{aligned} P(f_{SW_{min}}) &= 2824,9 \left[ \frac{V}{s} \right] \\ P(f_{SW_{min}} + \Delta f_{SW}) &= 2944,29 \left[ \frac{V}{s} \right] \end{aligned} \quad (6.20)$$

Entonces,

Ver largo de ecuación

$$\Delta V_{ADC} = T_S * [P(f_{SW_{min}} + \Delta f_{SW}) - P(f_{SW_{min}})] = 0,1177V - 0,1129V = 4,7mV \quad (6.21)$$

Por lo tanto, como la resolución del ADC es de 0.8mV, resulta suficiente para identificar el mínimo cambio de pendiente.

## 6.6. Acondicionamiento de señales para el ADC

### 6.6.1. Referencia de posición

Para indicar al microcontrolador la distancia de separación deseada se utiliza una señal continua como referencia que se ajusta desde un potenciómetro ubicado en el PCB (al igual que para el compensador analógico) e ingresa al circuito mostrado en la figura 6.5. Debido a que entrega una tensión entre 3.96V y 4.69V, se implementa un circuito de acondicionamiento para esta señal.

A la señal de entrada se le resta el setpoint de 2.5 V, para lograr señales que van desde 1.42V a 2.2V. Luego dentro del microcontrolador se debe mapear el valor leído por el ADC con la posición deseada usando la ganancia del estimador analógico según la fórmula:

$$Y_{ref} = \frac{V_{pos_{ref\_ADC}} + 2,5V}{259,6} [m] \quad (6.22)$$

Además se implementa un filtro anti-aliasing con frecuencia de corte en 9.9 kHz.

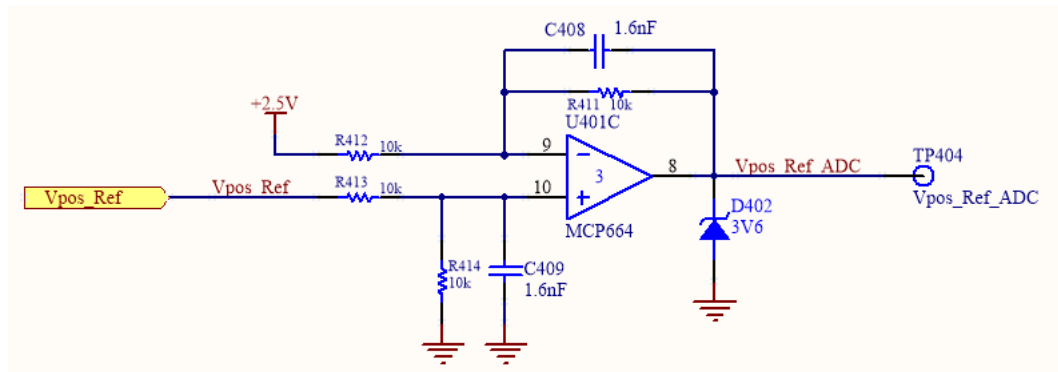


Figura 6.5: Circuito acondicionador para componente alterna de corriente del electroimán.

### 6.6.2. Componente continua de corriente del electroimán

Para obtener solamente la componente alterna de la corriente, se implementa un circuito con característica pasa-banda que se muestra en la figura 6.6. La frecuencia de corte inferior es de 100Hz, con el objetivo de eliminar el valor medio de señal. Por otro lado, la superior es de 12 KHz, que actúa como filtro anti-aliasing. Luego la salida es amplificada con una ganancia de 50 veces (con el objetivo de mejorar la medición de la pendiente por el ADC) y montada sobre un set-point de 2.5V.

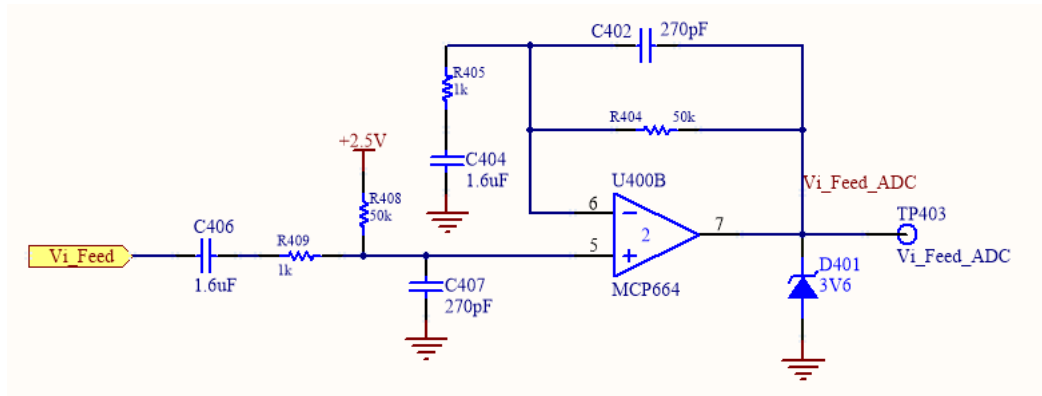


Figura 6.6: Circuito acondicionador para componente alterna de corriente del electroimán.

### 6.6.3. Componente continua de corriente del electroimán

Para obtener la componente de continua se utiliza un filtro pasa-bajos con frecuencia de corte en 106 Hz. Se eligió esta frecuencia para que se ubique por lo menos una década por debajo de la frecuencia fundamental de la onda triangular. La implementación circuital puede observarse en la figura 6.7

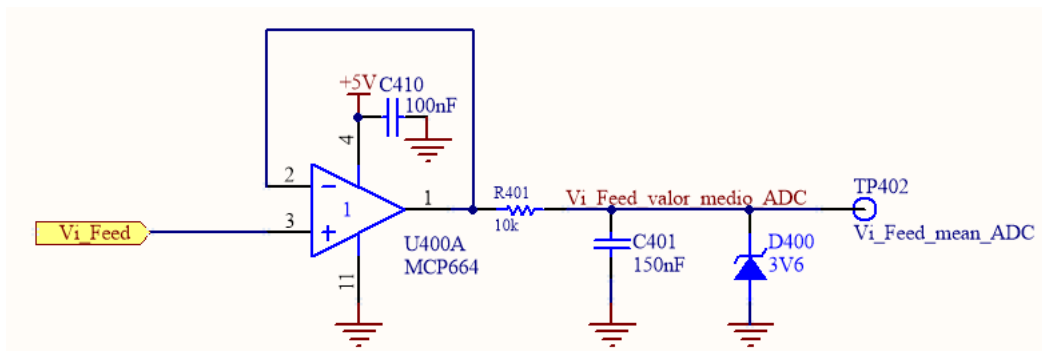


Figura 6.7: Circuito acondicionador para componente continua de corriente del electroimán.

## 6.7. Acondicionamiento de señales para el DAC

Para convertir los valores digitales de la estimación de posición y de la compensación al dominio analógico, se utilizan los DAC del microcontrolador. La tensión entregada es afectada por una circuitería de filtrado, ganancia y protección como se muestra en las figuras 6.8 y 6.9. Debido a que el DAC se actualiza con una frecuencia mínima de 3.5 KHz, se utilizan filtros con frecuencia de corte en 1.75KHz.

Por otro lado, como el controlador de corriente funciona con tensiones de hasta 5 V en su entrada y el compensador fue diseñado teniendo en cuenta este nivel de tensión, se agrega una ganancia por firmware de 0,66, mapeando así los 5 V a 3,3 V, que es la máxima tensión entregada por el DAC. Luego, para compensar esta ganancia y no afectar a la transferencia de la planta, se la afecta por un factor de  $\frac{5V}{3,3V}$  por medio del circuito de acondicionamiento.

De esta forma, se logra convertir correctamente la señal digital en analógica.

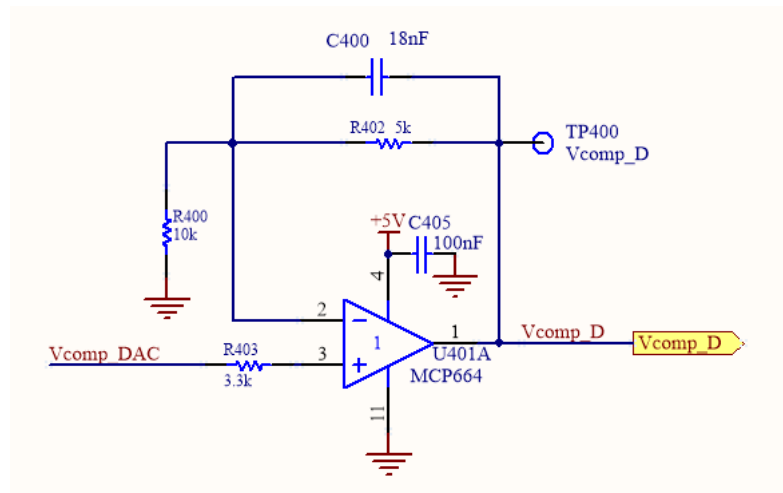


Figura 6.8: Circuito acondicionador para la salida del DAC correspondiente al compensador.



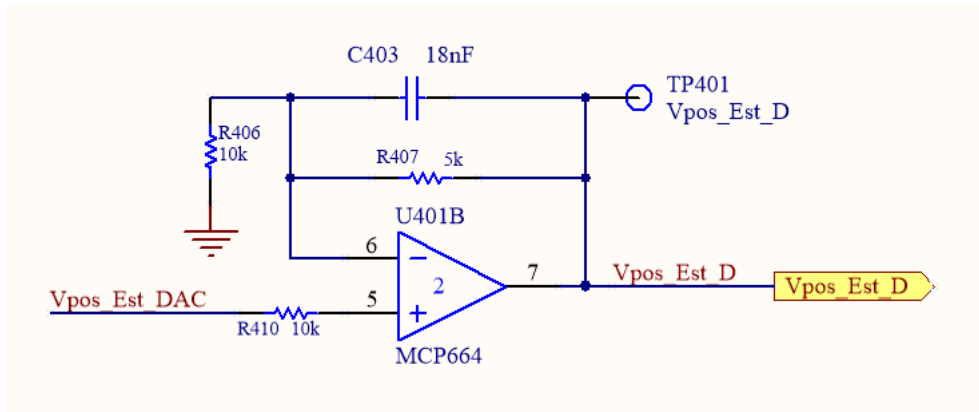


Figura 6.9: Circuito acondicionador para la salida del DAC correspondiente al estimador digital.

## 6.8. Transferencias de la planta y del controlador de corriente

Para el análisis del compensador digital, se parte de las transferencias de la planta  $G_P(s)$  y del controlador de corriente  $G_{iL}(s)$  en dominio analógico para una masa de 30 Kg.

$$\begin{aligned}
 G_T(s)[30Kg] &= G_P(s) * G_{iL}(s) \\
 G_T(s)[30Kg] &= \frac{245 * 10^{-6}}{1 - \left(\frac{s}{70}\right)^2} * \frac{6}{\frac{s}{12,17} + 1} \\
 G_T(s)[30Kg] &= \frac{-87,7}{(s - 70) (s + 70) (s + 12,17)}
 \end{aligned} \tag{6.23}$$

Al aplicar la transformada  $z$  por invarianza al impulso, considerando una  $f_s = 3,5 \text{ KHz}$ , se obtiene:

$$G_T(Z)[m = 30 \text{ Kg}] = \frac{-3,4 * 10^{-10}(z + 3,7)(z + 0,3)}{(z - 0,9965) (z + 0,9802) (z + 0,2677)} \tag{6.24}$$

Luego, usando la transformada bilineal para volver al dominio analógico:

—————-ver largo de ecuacion—————

$$G_T(w)[m = 30 \text{ Kg}] = \frac{-8,5 * 10^{-11}(w - 1,21 * 10^4)(w - 7000)(w + 1,21 * 10^4)}{(w - 70) (w + 70) (w + 12,17)} \quad (6.25)$$

Con las expresiones en [W], es posible diseñar un controlador de manera analógica, para luego transformarlo al dominio digital.

## 6.9. Diseño de Compensador

### 6.9.1. Análisis de estabilidad con masa de 30 Kg

Considerando que la ganancia de avance está formada por la planta y el controlador de corriente y que el lazo de realimentación es unitario, se procede a analizar la respuesta en frecuencia de  $GH_T$  para una masa de 30 Kg y a diseñar un compensador adecuado. Luego, se verifica la estabilidad para una masa de 1 Kg, que corresponde a la mínima con la que trabaja el sistema.

$$G_T(w) * H(w) = \frac{-8,5 * 10^{-11}(w - 1,21 * 10^4)(w - 7000)(w + 1,21 * 10^4)}{(w - 70) (w + 70) (w + 12,17)} \quad (6.26)$$

Con la transferencia de la ecuación 6.26 se grafica el diagrama de Bode y el diagrama de Nyquist que se muestran en las figuras 6.10 y 6.11 respectivamente.

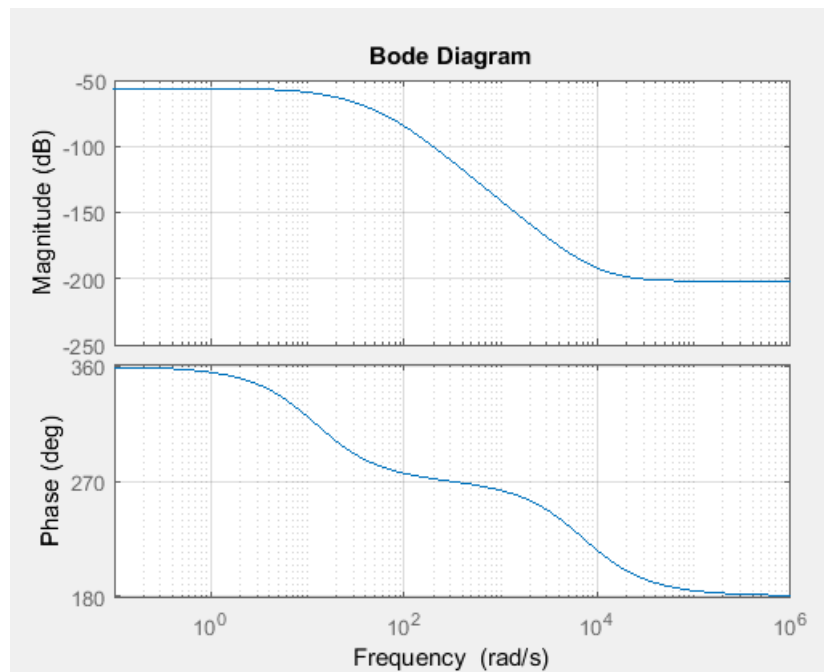


Figura 6.10: Diagrama de Bode de lazo abierto GHT con  $M=30$  Kg.

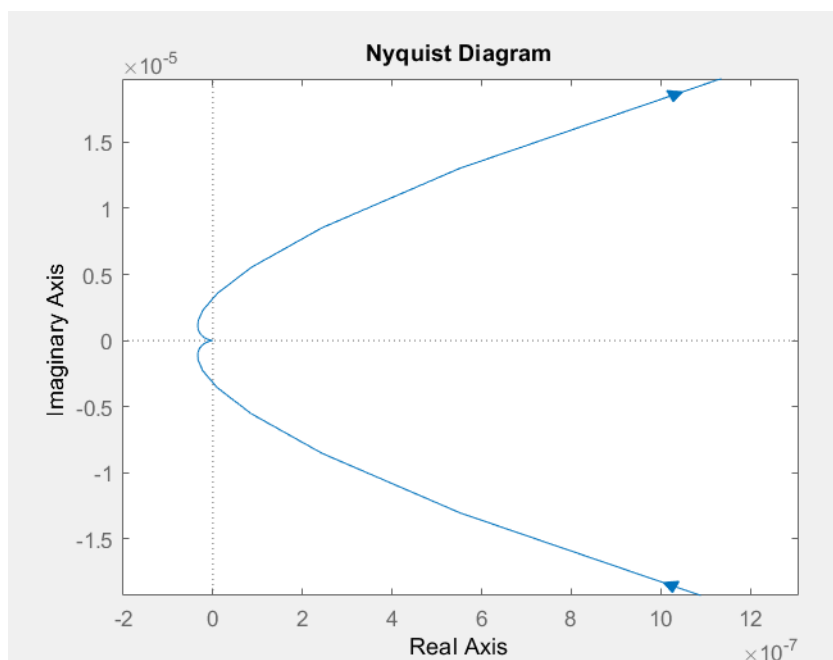


Figura 6.11: Diagrama de Nyquist de GHT con  $M=30$  Kg.

Considerando que  $GH_T$  tiene un polo en el semiplano derecho, a partir del Nyquist se puede determinar:

Zona 1:  $Z=N+P=0+1=1 \rightarrow$  Inestable

Zona 2:  $Z=N+P=1+1=2 \rightarrow$  Inestable

De esta forma, no es posible que el sistema sea estable. Para lograrlo se realimentará positivamente y se generará una zona en el diagrama de Nyquist donde  $N=-1$ . Para ello es necesario aumentar la fase para que pueda superar el valor de  $0^\circ$ . Para que esto se cumpla, el diagrama de Nyquist debería tener una forma como la mostrada en la figura 6.12.

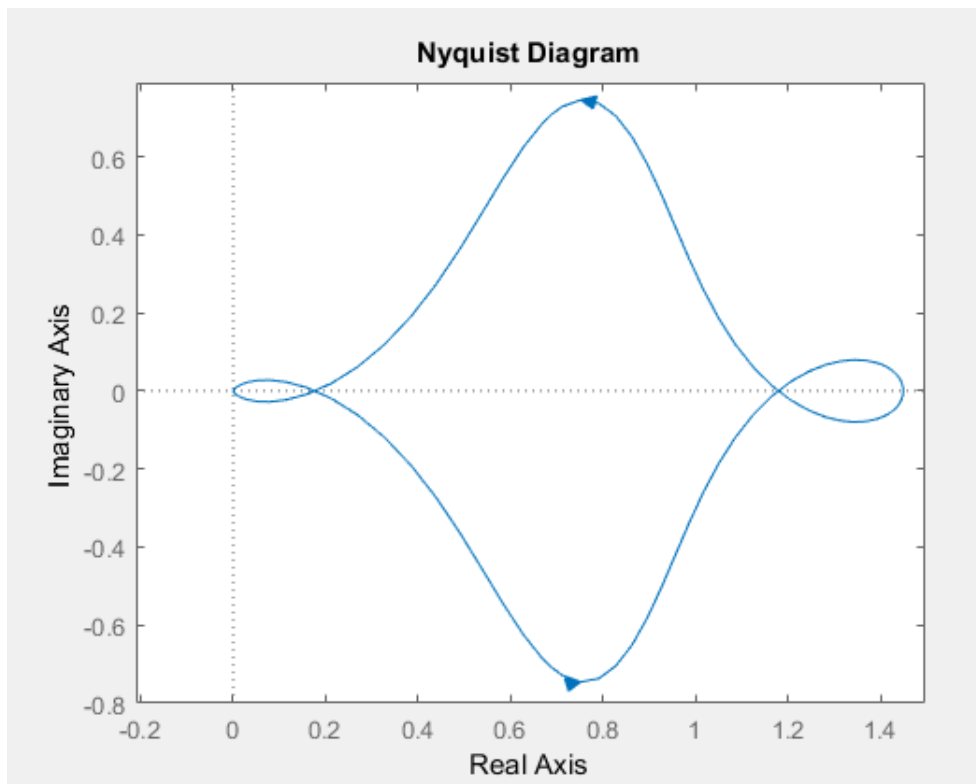


Figura 6.12: Forma del diagrama de Nyquist deseado.

Para poder lograr el aumento de fase mencionado se utiliza una red de adelanto de fase. Se debe tener en cuenta que el módulo de la transferencia de lazo abierto

en el primer cruce de la fase por  $0^\circ$  debe ser mayor a 0 dB y, en el segundo cruce, menor. De esta forma, al observar la figura 6.10 se decide adelantar la fase  $100^\circ$  en aproximadamente 200 rad/s. Esto se logra usando dos redes de adelanto de fase de  $65^\circ$  cada una.

Ecuaciones de diseño:

$$\begin{aligned}
 W_0 &= 200 \text{ r/s} \\
 \varphi_{max} &= 65^\circ \\
 \alpha &= \frac{1 + \text{sen}\varphi_{max}}{1 - \text{sen}\varphi_{max}} = 20,346491 \\
 W_c &= \frac{W_0}{\sqrt{\alpha}} = 44,3 \text{ r/s} \\
 W_p &= \sqrt{\alpha} * W_0 = 902,1 \text{ r/s}
 \end{aligned} \tag{6.27}$$

Finalmente se llega a la transferencia del controlador:

$$G_c(s) = K * [20,346 * \frac{(s + 44,3)}{(s + 902,1)}]^2 \tag{6.28}$$

En la figura 6.13 se muestra el diagrama de bode de  $GH_T * G_C$  con  $K = 1$ . Se puede observar que la ganancia  $K$  puede adoptar valores desde 64 dB hasta 89.5 dB. Considerando que el sistema debe soportar una masa variable entre 1 kg y 30 kg, y que la ganancia de la transferencia de la planta para 1 kg es de 5.5 veces (14 dB) mayor que para 30 kg, se puede adoptar una ganancia del compensador que mantenga la estabilidad para estos dos casos. Es decir, la ganancia mínima es de 64 dB y la máxima es de  $89.5 \text{ dB} - 14 \text{ dB} = 75.5 \text{ dB}$ . Por lo tanto, se elige que el cruce por cero de la ganancia se encuentre ahora en 88 rad/s, lo que significa que  $K = 68,4 \text{ dB} \equiv 2630 \text{ veces}$ .

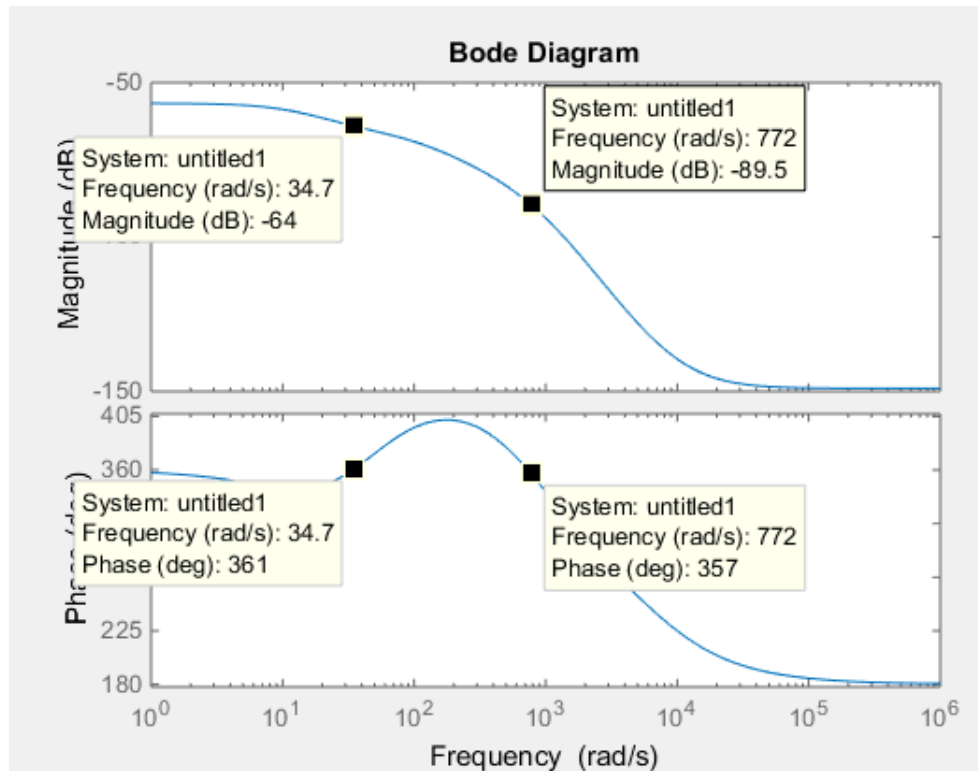


Figura 6.13: Diagrama de Bode de GHT\*GC para  $K=1$  y  $M=30$  Kg.

En la figura 6.14 se muestra el diagrama de Bode considerando la ganancia del compensador. En ella se puede observar que se cumple con el criterio de estabilidad, puesto que en el primer cruce por  $0^\circ$ , la magnitud es mayor a 0 dB y en el segundo cruce, menor. Además, en la figura 6.15 se puede ver que la forma del diagrama de Nyquist es como la deseada.

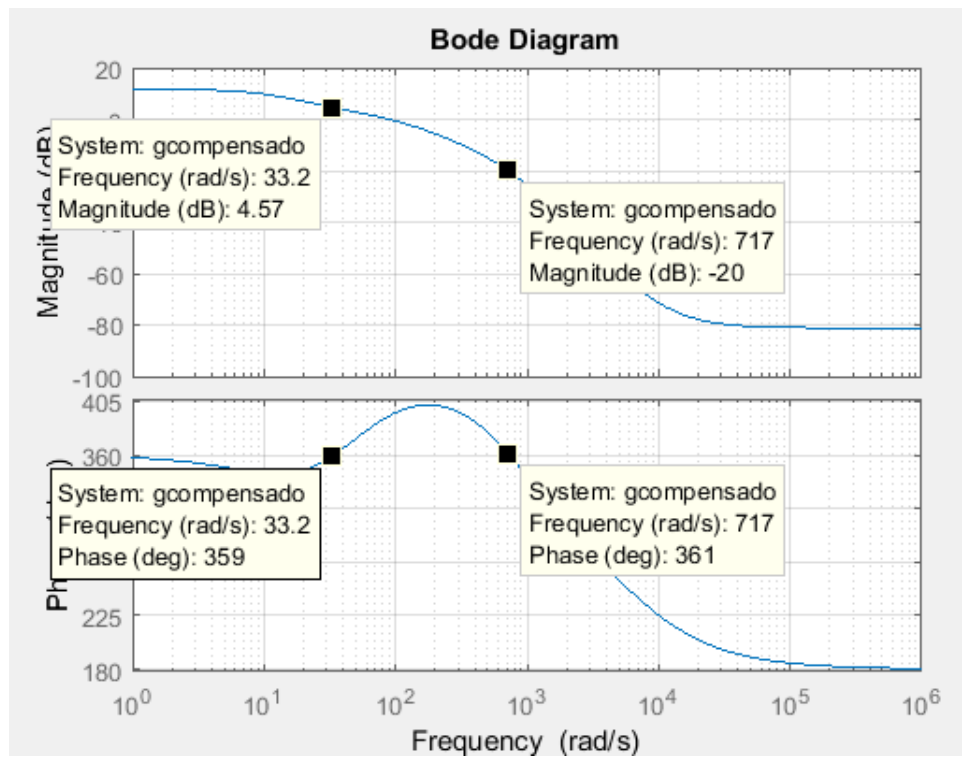


Figura 6.14: Diagrama de Bode de GHT\*GC para  $K=2630$  y  $M=30$  Kg.

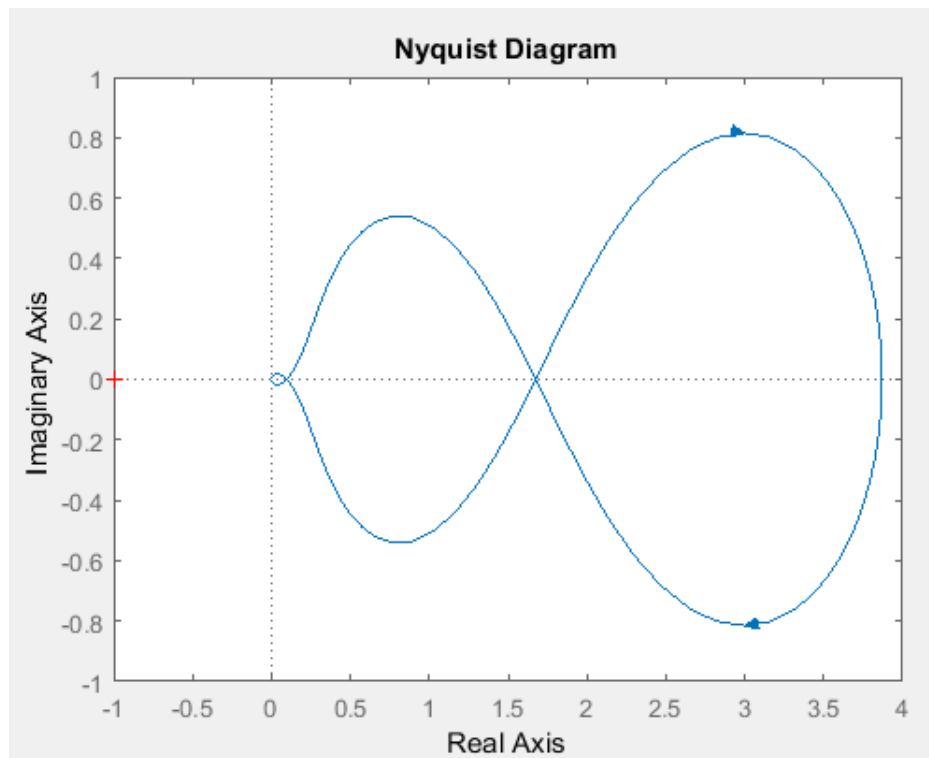


Figura 6.15: Diagrama de Nyquist de  $GHT*GC$  para  $K=2630$  y  $M=30$  Kg.

En la figura 6.16 se puede observar la respuesta al escalón del sistema con masa de 30 Kg.



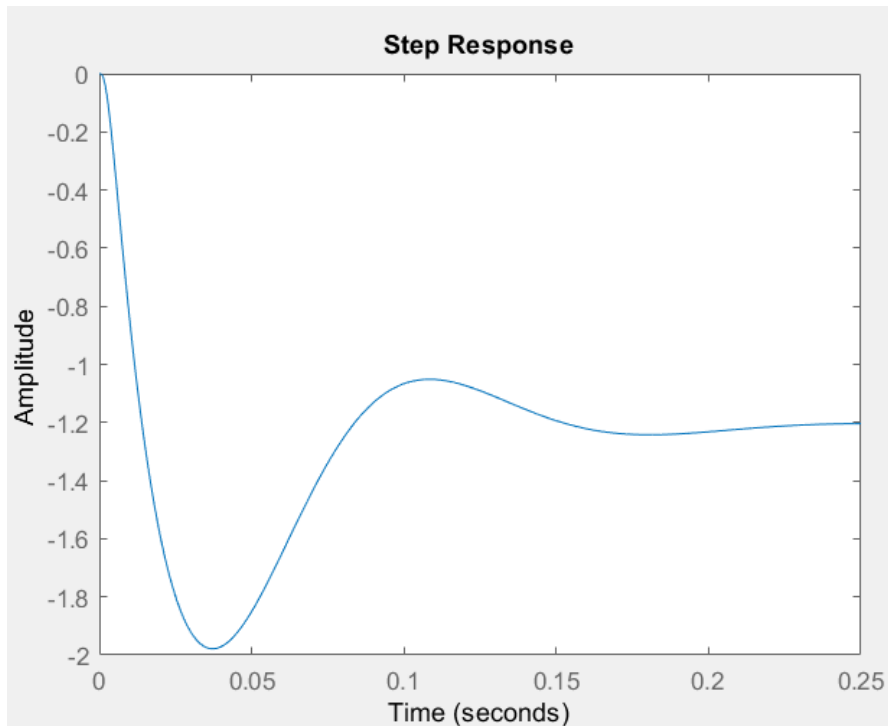


Figura 6.16: Respuesta al escalón para  $M=30$  Kg.

### 6.9.2. Análisis de estabilidad con masa de 1 Kg

En esta sección se verifica la estabilidad del sistema para el caso en que la masa sea de 1 Kg, utilizando el compensador diseñado para el caso de masa máxima. Para ello, se analizan los diagramas de Bode y Nyquist mostrados en las figuras 6.17 y 6.18. Además, en la figura 6.19 puede observarse la respuesta al escalón. A partir de ellos, es posible verificar que efectivamente el sistema resulta estable para todo el rango de masas en el que opera el sistema.

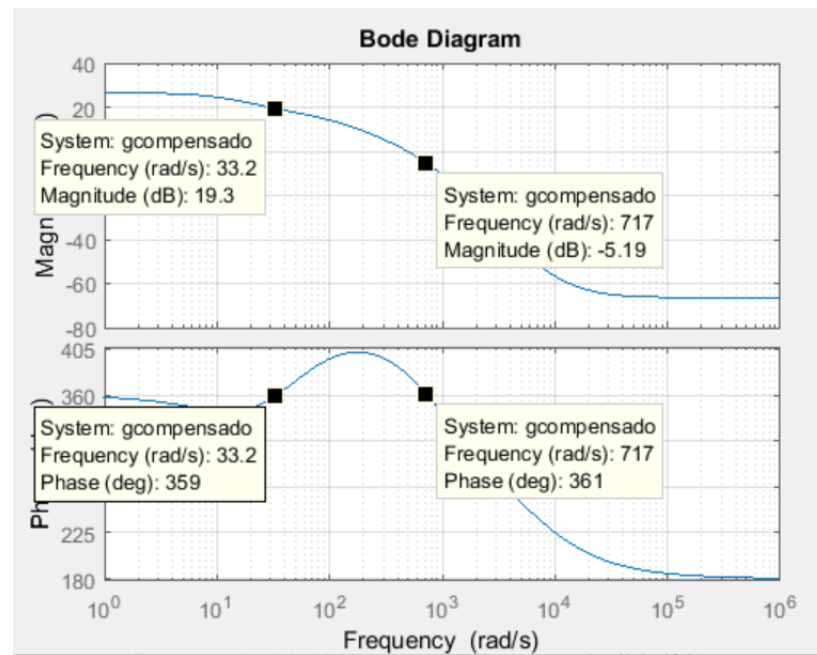


Figura 6.17: Diagrama de Bode de  $GH_T * G_C$  para  $M=1$  Kg.

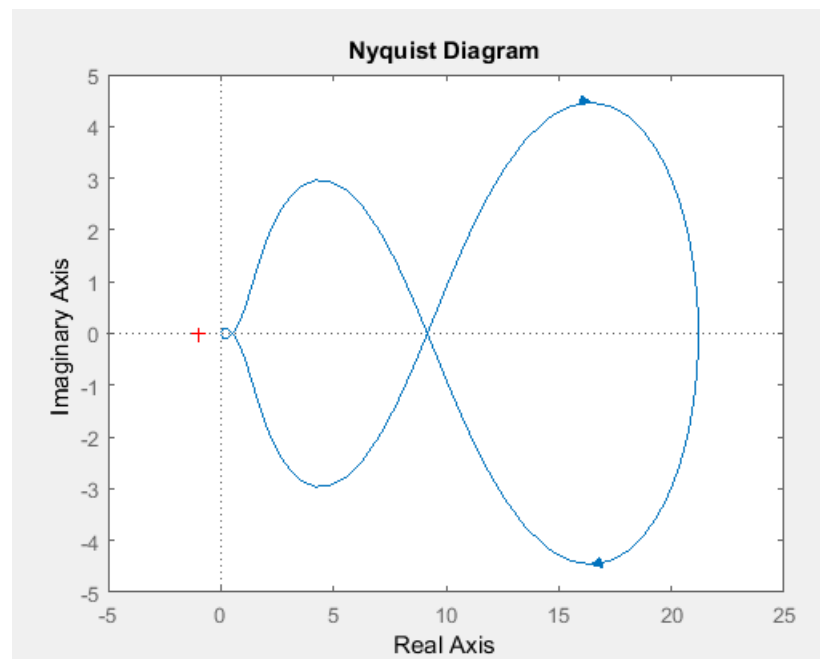


Figura 6.18: Diagrama de Nyquist de  $GH_T * G_C$  para  $M=1$  Kg.

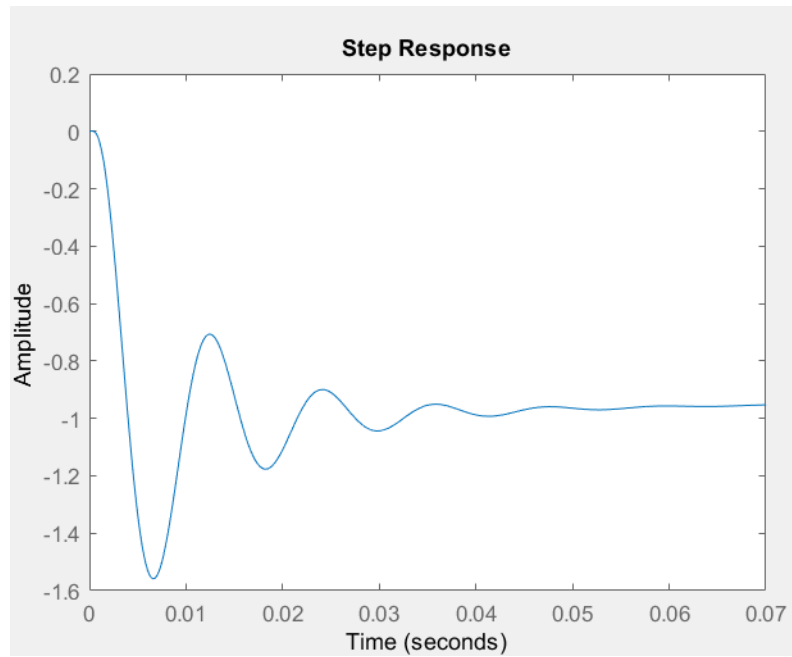


Figura 6.19: Respuesta al escalón para  $M=1$  Kg.

## 6.10. Diseño de lazo de realimentación externo

Se plantea un lazo de realimentación externo como se muestra en la figura 6.20.

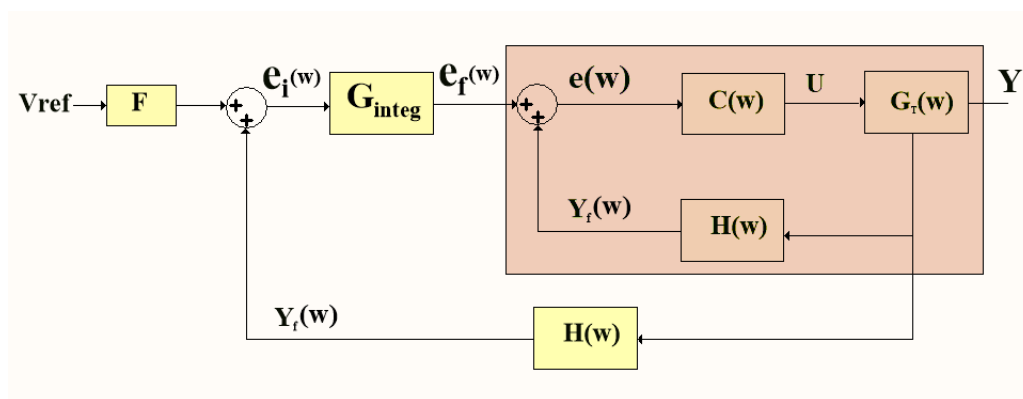


Figura 6.20: Diagrama del sistema completo.

En el lazo de realimentación interno actúa el compensador por adelanto de fase

diseñado previamente y, en el externo, un controlador del tipo integral. De esta forma, se logra suavizar la respuesta al escalón del sistema y eliminar el error en régimen permanente.

Para el análisis se considera como realimentación:

$$H(w) = 1$$

La cadena de avance con masa de 30 Kg es:

$$G[m = 30] = Tlc(W)[m = 30] * G_{Integrador}$$

Se plantea un compensador del tipo :

$$G_{integ} = k_{int} * \frac{1}{w}$$

La ganancia del bloque de entrada (F) se establece igual a la ganancia del estimador (H) pero cambiada de signo, debido a que la transferencia de lazo cerrado tiene una inversión de fase. Por lo tanto, se toma  $F = -H = -1$ .

Inicialmente se adopta  $k_{int} = 1$  para poder evaluar, por medio de lugar de raíces mostrado en la figura 6.21, la estabilidad del sistema. Para este lazo de realimentación externo también debe utilizarse realimentación positiva, puesto que los polos de la TLC interna están en el semiplano izquierdo pero presenta una inversión de signo.

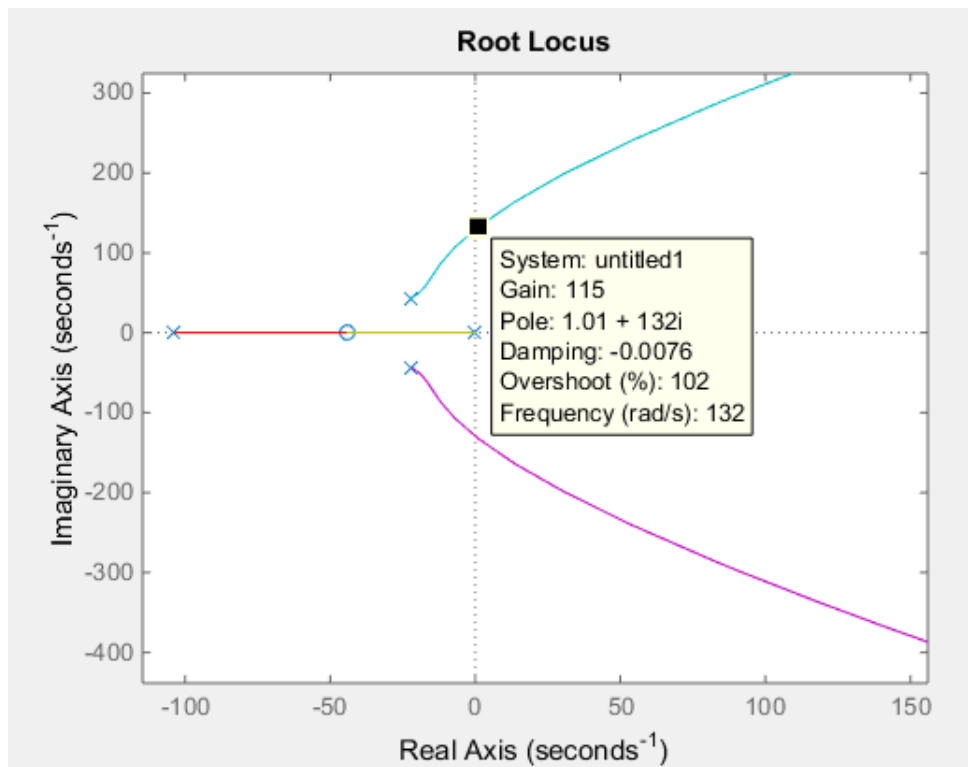


Figura 6.21: Lugar de raíces con el integrador.

En la figura 6.21 se puede observar que, para que se mantenga la estabilidad del sistema, la ganancia del integrador ( $K_{int}$ ) debe ser menor a 115. Teniendo esto en cuenta, en la figura 6.22 se muestra la respuesta al escalón del sistema compensado con el integrador para una ganancia de  $K_{int} = 1$ . Es posible observar que, si bien no presenta oscilaciones, el tiempo de establecimiento es de aproximadamente 3 segundos. Por lo tanto, se decide aumentar el valor de ganancia hasta obtener una relación aceptable entre el tiempo de respuesta y el sobrepico.

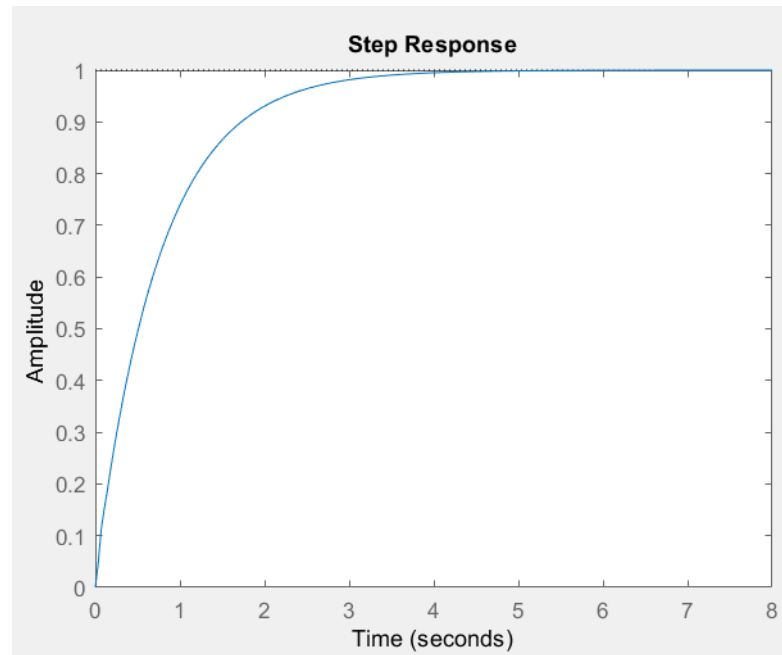


Figura 6.22: Respuesta al escalón con integrador con  $K_{int} = 1$  y  $M = 30$  Kg.

En la figura 6.23, se observa la respuesta al escalón para una ganancia del integrador de  $K_{int} = 20$  que resulta en un tiempo de establecimiento de 0.22 segundos y un overshoot de 4.41 %. Por lo tanto, se adopta este valor de ganancia para el diseño del integrador.

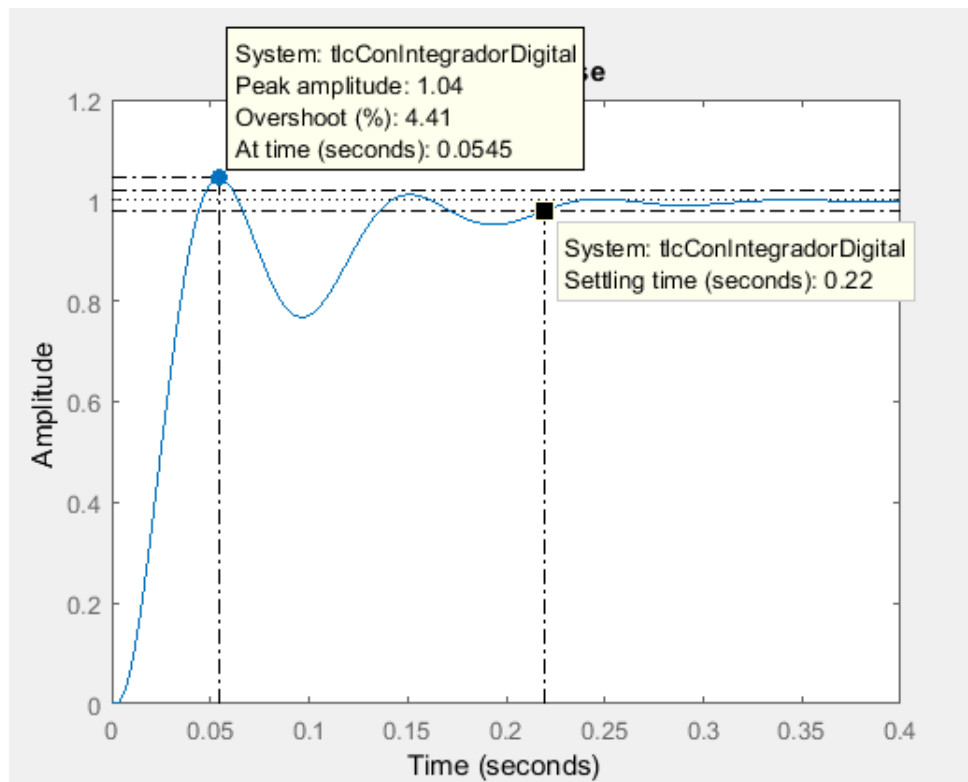


Figura 6.23: Respuesta al escalón con integrador para  $K_{int} = 20$  y  $M = 30$  Kg.

La respuesta al escalón cuando la masa es de 1 Kg se muestra en la figura 6.24. Allí se puede observar que el tiempo de crecimiento es de 0.104s y el de establecimiento de 0.196s. Además, es posible notar que no presenta sobrepicos.

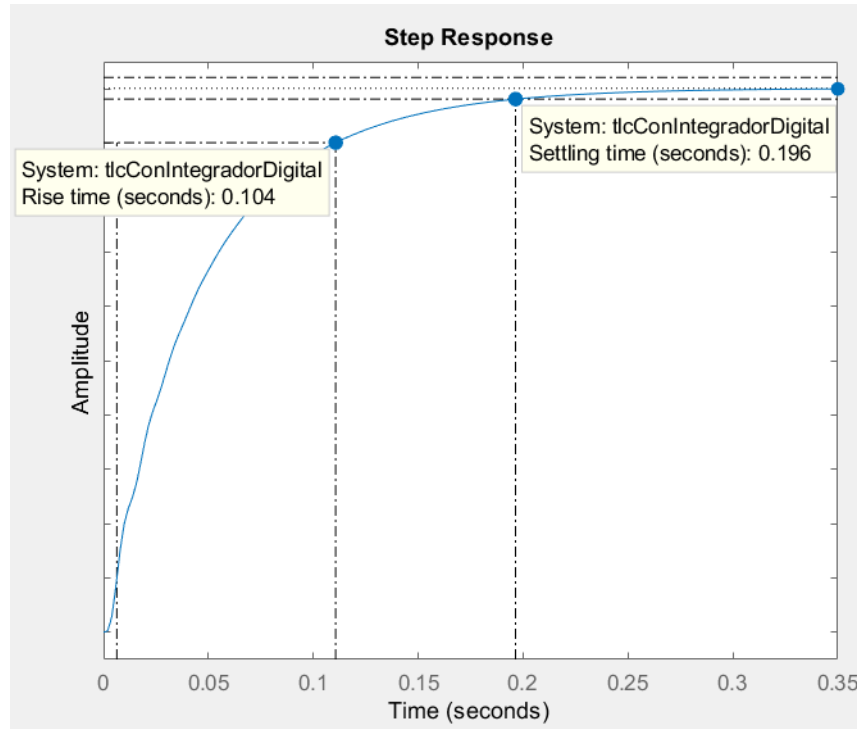


Figura 6.24: Respuesta al escalón con integrador para  $K_{int} = 20$  y  $M = 1$  Kg.

## 6.11. Cálculo de los coeficientes del controlador

Para implementar el algoritmo de control en el microcontrolador se aplica la transformada bilineal inversa a las transferencias del compensador por adelanto de fase  $C(W)$  y al integrador  $G_{integ}(W)$ .

Por lo tanto, se obtiene:

$$C(Z) = \frac{U(z)}{e(z)} = \frac{8,6896 * 10^5 (z - 0,9877)^2}{(z - 0,7757)^2} \quad (6.29)$$

$$G_{integrador}(Z) = \frac{e_f(z)}{e_i(z)} = \frac{0,0028 (z + 1)}{(z - 1)} \quad (6.30)$$

Considerando  $H(z) = 1$  se obtiene que:



$$e(z) = e_f(Z) + Y(z) \quad (6.31)$$

$$e_i(Z) = F * Vref + Y(z) \quad (6.32)$$

Al aplicar la partir de las ecuaciones 6.29 y 6.30 se obtiene las expresiones a implementar en el microcontrolador:

$$\begin{aligned} U[n] = & 8,651 * 10^5 e[n] - 1,709 * 10^6 e[n - 1] + 0,843 * 10^6 e[n - 2] + \\ & + 1,5514 U[n - 1] - 0,60171 U[n - 2] \end{aligned} \quad (6.33)$$

$$e_f[n] = 0,0028 * e_i[n] + 0,0028 * e_i[n - 1] + e_f[n - 1] \quad (6.34)$$

Luego, para dejar el algoritmo de control en función de las entradas del sistema, se debe reemplazar en las ecuaciones 6.33 y 6.34 las expresiones mencionadas en las ecuaciones 6.35 y 6.36

$$e[n] = e_f[n] + Y[n] \quad (6.35)$$

$$e_i[n] = F * Vref + Y[n] \quad (6.36)$$

### 6.11.1. Conexión entre el PCB y el microcontrolador

Se utiliza un conector tipo DB9 hembra como vía de conexión para las distintas salidas y entradas digitales. Además, en la placa se dispone de un led que se enciende cuando se detecta una correcta conexión con el microcontrolador.

# Capítulo 7

## PCB

### 7.1. PCB

En la Figura 3.1 se puede observar una representación física del problema.

A partir del modelado físico del electroimán se llega a la expresión de la inductancia ( $L$ ) en función del gap de aire ( $Y$ ) (ecuación 3.1) y de la fuerza magnética ejercida por el electroimán ( $F_m$ ) (ecuación 3.2):



# Capítulo 8

## Bibliografía

- [1] Renesas. HIP4081A, 80v High Frequency H-Bridge Driver. AN9405. Rev 6.00.  
Dec 2014.
- [2] Renesas. HIP4081A 80v/2.5A Peak, High Frequency Full Bridge FET Driver.  
FN3659. Rev 8.00. Sep 2015.