



**Universidad
Carlos III de Madrid**

Trabajo de Fin de Grado

Título: Sistema de levitación magnética controlado por FPGA
Autor: Adrián Jurado Sánchez
Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales
Profesor: Luis Mengibar Pozo
Fecha: Febrero 2014





Agradecimientos

Quisiera dar las gracias a todas las personas que me han apoyado y en especial a mi familia por su confianza, su apoyo y paciencia conmigo.

También quería dar mi agradecimiento a mi tutor de proyecto Luis Mengibar Pozo por aceptar a ayudarme a llevar a cabo mi proyecto de fin de grado y aconsejarme en la realización de este.

No quería olvidarme de mis amigos y compañeros por todos los momentos buenos y malos que hemos pasado y que juntos hemos superado.





Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado consiste en el desarrollo, construcción y prueba de un sistema de levitación magnética implementado en una FPGA.

Para conseguir la levitación magnética se desarrollará un sistema realimentado con un control PID. El control PID recibirá la información de la posición de una esfera metálica, que será el objeto que se quiere hacer levitar, y ajustará la fuerza que un electroimán ejerce sobre la esfera metálica para vencer la fuerza de la gravedad que la tierra ejerce sobre la esfera metálica.

A lo largo del proyecto de fin de grado se explicarán las diferentes etapas de las que consta el sistema y del desarrollo que conlleva cada una de las partes, detallando los componentes, las simulaciones y pruebas de cada una de las partes por separado. El sistema de levitación magnética será un sistema modular que facilitara la depuración de errores.

El proyecto también incluye la realización de un sistema de adquisición de datos en paralelo que mostrará la información de lo que está ocurriendo en el sistema durante el transcurso de las pruebas de funcionamiento.

Palabras clave: Sistema de levitación magnética, System Generator, Simulink, Spartan 3E Starter Kit Board, Arduino, LabVIEW.



Abstract

This Bachelor Thesis consists in the development, construction and test of a magnetic levitation system implemented in a FPGA.

To reach the magnetic levitation it will be developed a feedback system with a PID control. The PID control will receive the information of the position of a metallic sphere, which is the object that it is wanted to levitate, and it will adjust the electromagnetic force exerted on the metallic sphere to overcome the gravity force, that the earth exerts on the metallic sphere.

Along this Bachelor thesis it will be explained the different stages of the system and the development of each part of the thesis, explaining the components, the simulations and tests of every part separately. The magnetic levitation system it will be a modulated system that it will facilitate debugging errors.

The thesis also includes the development of a parallel data acquisition system, which it will show the data of what is going on inside the system during the working test.

Keywords: Magnetic levitation system, System Generator, Simulink, Spartan 3E Starter Kit Board, Arduino, LabVIEW.



Índice General

Capítulo 1. Introducción y objetivos.....	15
1.1. Introducción.....	15
1.2. Objetivos.....	17
1.3. Estructura del proyecto.....	18
Capítulo 2. Estado de la Técnica.....	21
2.1. Sistema de levitación magnética.....	21
2.2. Sistema de control.....	22
2.3. FPGA.....	22
2.4. Spartan-3E Starter Kit.....	23
2.5. Arduino.....	24
2.6. Control PID.....	25
2.7. ISE Design Suite.....	26
2.8. MATLAB-Simulink.....	26
2.9. LabVIEW.....	27
2.10. Altium Designer.....	27
2.11. Interfaz de comunicación SPI.....	27
2.12. Sensores utilizados.....	28
2.12.1. Sensores infrarrojos.....	29
2.12.2. Sensores de corriente de efecto hall.....	29
2.13. Modulación por ancho de pulso.....	30
Capítulo 3. Diseño y construcción física del Sistema de Levitación Magnética.....	33
3.1. Introducción a un sistema de levitación magnética unidimensional.....	33
3.2. Diseño y construcción del hardware del sistema de levitación magnética.....	36
3.2.1. Estructura.....	36
3.2.2. Hardware de medida de posición.....	38
3.2.3. Electroimán.....	45
3.2.4. Hardware de control de la corriente de la bobina.....	49
3.2.5. Montaje físico de los circuitos.....	58
3.3. Configuración hardware de la FPGA.....	60



3.3.1.	Componentes usados de la tarjeta de desarrollo	60
3.3.2.	Pre-Amplificador.....	62
3.3.3.	Convertor Analógico-Digital (ADC).....	73
3.3.4.	Bloque de adaptación de la señal del ADC.....	85
3.3.5.	Control PID.....	90
3.3.6.	Generador PWM.....	98
Capítulo 4.	Modelización del sistema.....	101
4.1.	Introducción.....	101
4.2.	Cálculo del modelo matemático del sistema.....	102
4.2.1.	Equilibrio de fuerzas	102
4.2.2.	Aproximaciones para la linealización	104
4.2.3.	Cálculo del modelo linealizado.....	104
4.3.	Cálculo de la función de transferencia del sistema de levitación magnética	107
4.4.	Cálculo de la función de transferencia de la planta	107
4.5.	Cálculo de la función de transferencia del control PID	108
4.6.	Simulación del sistema de levitación magnética	109
Capítulo 5.	Diseño y construcción del sistema de adquisición de datos.....	115
5.1.	Selección de los puntos de medida	117
5.1.1.	Punto de medida y adaptación de la señal para la posición	117
5.1.2.	Punto de medida y adaptación de la señal para la corriente.....	119
5.1.3.	Curva de calibración de los sensores de posición y corriente.....	126
5.2.	Programación del sistema de adquisición en LabView.....	129
Capítulo 6.	Resultados del sistema.....	139
6.1.	Introducción.....	139
6.2.	Ajuste del control PID implementado.....	139
6.3.	Análisis de los recursos usados en la FPGA	143
6.4.	Respuesta real del sistema	144
Capítulo 7.	Conclusiones	149
7.1.	Introducción.....	149
7.2.	Conclusiones obtenidas	149
Capítulo 8.	Mejoras de diseño y trabajos futuros	151



8.1. Introducción.....	151
8.2. Numeración de las mejoras y trabajos futuros.....	151
Capítulo 9. Presupuesto	153
9.1. Introducción.....	153
9.2. Etapas del proyecto de fin de grado	153
9.3. Descripción del presupuesto	155
Anexos	161
Esquemáticos de los circuitos usados.....	161
Circuito de detección	161
Circuito de control de la corriente de la bobina	162
Configuración Hardware de la FPGA en Simulink.....	163
Glosario.....	165
Referencias Bibliográficas.....	167





Índice de Figuras

Figura 1. Diferencia entre dispositivos según su posibilidad de configuración hardware [6]	23
Figura 2. Spartan-3E Starter Kit Board [8].....	24
Figura 3. Control PID estándar	25
Figura 4. Esquema de comunicación serie SPI	28
Figura 5. Campo magnético alrededor de un conductor [19].....	30
Figura 6. Sensor de corriente de tipo toroidal con sensor hall [20].....	30
Figura 7. Señales implicadas en la implementación de la modulación por ancho de pulso [23]	31
Figura 8. Esquema general del sistema de levitación magnética	34
Figura 9. Esquema detallado del sistema de levitación magnética	35
Figura 10. Estructura del sistema de levitación magnética.....	37
Figura 11. Esquemático del circuito de detección	39
Figura 12. Ángulo de emisión del diodo emisor TSAL6100 [25].....	41
Figura 13. Barrera de IR para la detección de la esfera metálica.....	42
Figura 14. Curva de calibración del circuito de detección	43
Figura 15. Curva de calibración del circuito de detección linealizada en la zona de trabajo.	44
Figura 16. Proceso de construcción del electroimán. Desarme del transformador.	46
Figura 17. Proceso de construcción del electroimán. Núcleo del electroimán.	47
Figura 18. Proceso de construcción del electroimán. Enrollado de espiras.	47
Figura 19. Proceso de construcción del electroimán. Montaje en la estructura.	48
Figura 20. Curva de calibración del electroimán.....	49
Figura 21. Esquemático del circuito de control de la corriente de la bobina	50
Figura 22. Esquema de bloques de Xilinx del generador de onda cuadrada	54
Figura 23. Imagen tomada del osciloscopio mostrando la señal cuadrada de 25% de ciclo de trabajo generada.....	55
Figura 24. Imagen tomada del osciloscopio mostrando la señal cuadrada de 50% de ciclo de trabajo generada.....	55
Figura 25. Imagen tomada del osciloscopio mostrando la señal cuadrada de 75% de ciclo de trabajo generada.....	56
Figura 26. Curva de calibración del circuito de control de corriente.....	57
Figura 27. Foto real de la circuitería del sistema de levitación magnética	58
Figura 28. Foto real del circuito de control de corriente de la bobina del electroimán	59
Figura 29. Componentes usados de la tarjeta Spartan-3E Starter Kit Board	61
Figura 30. Sistema de captura analógica [29]	63
Figura 31. Tabla de trama de datos y ganancia del LTC6912-1 [29]	64
Figura 32. Trama de bits y sincronización de la comunicación del LTC6912 [40]	65
Figura 33. Programación del LTC6912, esquema general.....	66
Figura 34. Programación del LTC6912, bloque “Up Detector”	67
Figura 35. Programación del LTC6912, bloque AMP_CS Generator	67
Figura 36. Programación del LTC6912, bloque AMP_MOSI Generator	68
Figura 37. Programación del LTC6912, simulación	70

Figura 38. Programación del LTC6912, Comprobación del funcionamiento real de las señales CLK y AMP_CS.	71
Figura 39. Programación del LTC6912, Comprobación del funcionamiento real de las señales AMP_CS y SPI_MOSI.....	72
Figura 40. Programación del LTC6912, Comprobación del funcionamiento real de las señales AMP_SPI_MISO y SPI_MOSI.....	72
Figura 41. Trama de bits y sincronización de la comunicación del LTC1407A-1 [42].	74
Figura 42. Programación del LTC1407A-1, esquema general	75
Figura 43. Programación del LTC1407A-1, bloque ADC_CS Generator.....	76
Figura 44. Programación del LTC1407A-1, bloque ADC_Reader.....	77
Figura 45. Programación del LTC1407A-1, bloque ADC_Reader, ampliación de la imagen.	78
Figura 46. Programación del LTC1407A-1, simulación.....	80
Figura 47. Programación del LTC1407A-1, prueba de funcionamiento.	81
Figura 48. Programación del LTC1407A-1, prueba de funcionamiento, bloque LED array test.	82
Figura 49. Prueba realizada con $V_{IN}=2,765V$ y $V_{IN}=2,012V$	84
Figura 50. Prueba realizada con $V_{IN}=1,034V$ y $V_{IN}=0,372V$	85
Figura 51. Unidades de la posición a lo largo del sistema	87
Figura 52. Linealización de la curva de calibración	88
Figura 53. Posición del bloque de adaptación en el esquema general.....	89
Figura 54. Bloque de adaptación de la señal del ADC.....	89
Figura 55. Programación del control PID, esquema general [43]	91
Figura 56. Programación del control PID, esquema general con el bloque controlador PID	92
Figura 57. Programación del control PID, bloque controlador PID.....	93
Figura 58. Programación del control PID, bloque proporcional.....	94
Figura 59. Programación del control PID, bloque integral.....	94
Figura 60. Programación del control PID, bloque derivativo	95
Figura 61. Programación del control PID, Simulación y comparación con un PID ideal.	96
Figura 62. Programación del control PID, Simulación y comparación con un PID ideal, visualización de las señales.	97
Figura 63. Esquema general completo.....	99
Figura 64. Bloque generador PWM.....	100
Figura 65. Diagrama de bloques del sistema levitación magnética	102
Figura 66. Relación de fuerzas en el experimento de levitación magnética.....	103
Figura 67. Diagrama detallado de bloques del sistema de levitación magnética	107
Figura 68 Simulación del sistema de levitación magnética realizado en Simulink	110
Figura 69 Ajuste de parámetros PID con autotuning de Simulink. Configuración del tiempo de respuesta.....	111
Figura 70 Ajuste de parámetros PID con autotuning de Simulink. Muestra de los parámetros obtenidos.	112
Figura 71 Respuesta del sistema con los parámetros del PID ideal ajustado	113
Figura 72 Respuesta del sistema con los parámetros del PID discreto ajustado	114
Figura 73. Tarjeta “Arduino Mega 2560” (izquierda) y “Mega Sensor Shield” (derecha).....	116
Figura 74. Esquemático del circuito de detección con la toma de medida del sistema de adquisición de datos.	118



Figura 75. Dimensiones del sensor de corriente lineal CSLA2CF [55] 119

Figura 76. Sensor de corriente CSLA2CF mostrado con 10 vueltas de cable al toroide 120

Figura 77. Librería de Altium Designer mostrando la creación del nuevo componente 123

Figura 78. Librería de Altium Designer mostrando la creación del nuevo componente 124

Figura 79. Foto de la circuitería del sistema de levitación magnética con el sistema de adquisición de datos 125

Figura 80. Prueba de calibración del sensor lineal de corriente. Con 0mA (izquierda), con 37mA (derecha) 126

Figura 81. Prueba de calibración del sensor lineal de corriente. Con 317mA (izquierda), con 1236mA (derecha)..... 127

Figura 82. Curva de calibración del sensor de corriente..... 128

Figura 83. Imagen del Firmware en lenguaje Arduino tras ser cargado en la tarjeta Arduino Mega 2560..... 130

Figura 84. Programación del sistema de adquisición de datos. Programa completo 131

Figura 85. Programación del sistema de adquisición de datos. Diagrama de bloques..... 132

Figura 86. Programación del sistema de adquisición de datos. Panel de control 135

Figura 87. Programación del sistema de adquisición de datos. Prueba de funcionamiento del sensor de corriente 136

Figura 88. Programación del sistema de adquisición de datos. Prueba de funcionamiento del detector de posición 137

Figura 89. Simulación del control PID que se ha implementado en la FPGA 140

Figura 90. Respuesta del control PID realizado con bloques de Xilinx..... 141

Figura 91. Respuesta del control PID realizado con bloques de Xilinx..... 142

Figura 92. Recursos utilizados en la FPGA para el control PID..... 143

Figura 93. Creación del archivo .mcs para memoria flash 144

Figura 94. Sistema completo de levitación magnética 145

Figura 95. Respuesta del sistema de adquisición de datos..... 146

Figura 96. Prueba de respuesta del sistema ante cambios en la posición de la esfera metálica 1 147

Figura 97. Prueba de respuesta del sistema ante cambios en la posición de la esfera metálica 2 147

Figura 98. Prueba de respuesta del sistema ante cambios en la posición de la esfera metálica 3 148

Figura 99. Costes de personal 156

Figura 100. Constes de la estructura..... 156

Figura 101. Costes del hardware de detección de posición..... 156

Figura 102. Costes del hardware de control de la corriente de la bobina del electroimán..... 157

Figura 103. Costes del sistema de control 157

Figura 104. Costes del sistema de adquisición de datos..... 158

Figura 105. Coste de licencias de Software utilizados 158

Figura 106. Amortización del equipo utilizado 158

Figura 107. Presupuesto total del proyecto..... 159





Capítulo 1. Introducción y objetivos

1.1. Introducción

El electromagnetismo ha fascinado a la humanidad a lo largo de la historia por su complejo funcionamiento, sus grandes posibilidades y sobre todo debido a la invisibilidad de la mayoría de los fenómenos electromagnéticos.

Tras los estudios durante el siglo S-XIX de grandes físicos como Maxwell, Gauss o Faraday se pudo comprobar que el electromagnetismo podía ser entendido y controlado por el hombre abriendo así un infinito número de aplicaciones en las que el electromagnetismo tendría el papel protagonista como la aparición de la electricidad de consumo, motores eléctricos y telecomunicaciones.

Paralelamente a estos descubrimientos se estaba culminando la revolución industrial en el mundo occidental, que supondría una de las mayores transformaciones económicas de la historia pasando de una economía basada en el trabajo manual o animal a una economía basada en la maquinaria para la fabricación, transporte, etc.

La levitación magnética es uno de los múltiples usos del electromagnetismo. Este tipo de levitación es producida por una fuerza electromagnética controlada debidamente que hace vencer la fuerza gravitatoria que sufre el objeto que levita.

Como puede entenderse pronto aparecieron las primeras aplicaciones que usaban el principio de la levitación magnética para mejorar la eficiencia de las máquinas. Pero su uso no se generalizó debido a la gran cantidad de energía que requerían y de forma muy controlada y precisa.

Los esbozos del uso de la levitación magnética ya se plantearon a principios del siglo XX no ha sido hasta 1979, y de forma experimental, que se usó por primera vez un tren de levitación magnética completo y funcional. Esto es debido al desarrollo de la electrónica, tanto en la velocidad de los dispositivos electrónicos como de la electrónica de potencia con dispositivos electrónicos capaz de trabajar mayores potencias y corrientes.

Pero no ha sido hasta los últimos 20 años que la levitación magnética se ha empezado a usar de forma más general debido a reducción de los precios y aumento de capacidades de todo tipo de electrónica, solo entonces las enormes ventajas del transporte basado en la levitación magnética (sin rozamiento, mantenimiento mínimo,



capaz de alcanzar grandes velocidades) han empezado a superar los grandes costes iniciales que tiene esta tecnología.

No solo se han desarrollado más y mejores trenes de levitación magnética (el record actual de velocidad de un tren es el del tren de levitación magnética japonés JR-Maglev), si no que la levitación se ha extendido a más ámbitos como el de la industria con la mejora de máquinas que al usar elemento de levitación magnética (como los rodamientos magnéticos) evitan el rozamiento y mantenimiento.

Podríamos citar muchos ejemplos de la extensión de esta tecnología en ámbitos tan variados como los del ocio (patinetes magnéticos), militares (armas basadas en el llamado cañón Gauss), energéticos (turbinas eólicas magnéticas), publicidad y marketing (expositores en los que el producto levita), científico (confinar sustancias muy agresivas a través de campos magnéticos) y un largo etcétera.

El objetivo del presente trabajo de fin de grado es la aproximación a esta tecnología a través del diseño y construcción de un sistema de levitación magnética.

Este dispositivo consistirá en el control de la levitación de una esfera metálica que será suspendida en el aire en una posición fija. Este sistema de levitación se compondrá de un sistema de lectura de posición de la esfera, un control que tendrá como entrada la señal de la posición de la esfera y como salida la cantidad de corriente que debe circular por la bobina del electroimán para controlar la fuerza que este ejerce sobre la esfera metálica y así poder vencer la fuerza de la gravedad y conseguir que la esfera metálica quede suspendida en el aire.

Los dispositivos de levitación magnética son muy difíciles de controlar debido a su naturaleza no lineal, inestable y con bajo coeficiente natural de amortiguamiento, es decir que requieren de un control activo del electroimán para poder controlar de forma satisfactoria el sistema de levitación magnética.

El presente proyecto utilizará componentes electrónicos de bajo coste (como la tarjeta de desarrollo "Spartan 3E starter kit", o la tarjeta "Arduino Mega 2560") unido al uso de software de última generación (MATLAB-Simulink, LabView, Altium designer...) para realizar todo el sistema: diseño de los circuitos detectores y actuadores, configuración del control, registro y adquisición de datos en tiempo real, etc.



1.2. Objetivos

El objetivo del trabajo de fin de grado será el diseño y construcción de un sistema de levitación magnética de tipo SISO (single input single output) completo. Este trabajo estará compuesto de los siguientes hitos:

- Aprendizaje del programa de diseño de circuitos Altium Designer (usando una de las últimas versiones, la versión 13).
- Aprendizaje y dominio del programa MATLAB-Simulink y el uso del conjunto de bloques proporcionados por Xilinx a través de su programa ISE Design Suite.
- Para poder realizar el proyecto se necesitará el dominio en ambos programas para poder establecer la comunicación con la FPGA. Se usarán las versiones 2012b para Matlab y la versión 14.5 de ISE Design Suite.
- Aprendizaje del programa LabView y dominio de la toolkit de Arduino, para poder establecer comunicación con la tarjeta de Arduino se necesitará el dominio de los bloques de configuración de la misma en LabView. Se usará la versión 2011 de LabView.
- Diseño y construcción del sistema físico de levitación magnética, formado de los siguientes componentes:
 - Estructura soporte firme
 - Circuito de detección: realizará las tareas de creación de una barrera de luz infrarroja que detectará la posición la esfera metálica y adaptará la señal a una amplitud adecuada para el control. Para el diseño del esquemático del circuito se usará el software Altium designer.
 - Circuito de control de la corriente de la bobina: realizará las tareas de lectura de la señal que sale del control y la transformará en un valor de corriente que circulará por la bobina del electroimán para generar la fuerza electromagnética sobre la esfera. Para el diseño del esquemático del circuito se usará el software Altium designer.
- Programación en lenguaje hardware de una FPGA (en lenguaje de bloques de Xilinx en MATLAB-Simulink) para el uso de los componentes contenidos en la tarjeta “Spartan-3E Starter Kit Board” necesarios para la realización del proyecto (protocolo SPI con el amplificador programable, comunicación SPI con el conversor analógico digital, etc.).



- Programación en lenguaje hardware de una FPGA (en lenguaje de bloques de Xilinx en MATLAB-Simulink) del control PID del sistema de levitación magnética.
- Realización de un sistema de adquisición de datos en tiempo real y de forma paralela, con una tarjeta “Arduino Mega 2560” y la muestra por pantalla de las variables más importantes del sistema mediante una aplicación programada en LabVIEW.

El tipo de trabajo de fin de grado será de diseño de un caso práctico de control, por tanto se centrará en la programación, diseño, construcción y configuración del sistema de control, ayudándose en la utilización de las herramientas software indicadas anteriormente para el diseño e implementación del sistema de levitación.

1.3. Estructura del proyecto

A continuación, se detalla el contenido de los nueve capítulos que forman el presente trabajo de fin de grado:

- **Capítulo 1:** En el primer capítulo se realiza la presentación del proyecto con una breve introducción a los sistemas de levitación magnética, las ventajas e inconvenientes de su uso además de un breve desarrollo de los componentes que se usarán en el desarrollo del proyecto. En este capítulo también se describirán los objetivos del proyecto.
- **Capítulo 2:** En el segundo capítulo se desarrollará el estado de la técnica de los sistemas de levitación magnética. Además de describirá la función de los elementos principales que se usarán a lo largo del proyecto.
- **Capítulo 3:** En este capítulo se desarrolla y construye el sistema de levitación magnética. Este capítulo comienza con una introducción al sistema, en el que se plantea la estructura general del sistema de levitación magnética. A lo largo del capítulo se irá desarrollando la idea desarrollando, construyendo, simulando y probando cada parte individualmente, siguiendo la idea de un diseño modular.
- **Capítulo 4:** En el cuarto capítulo se desarrolla la modelización matemática del sistema de levitación magnética. Esta modelización matemática se usará de referencia en el ajuste del control PID del sistema
- **Capítulo 5:** En este capítulo de desarrolla, construye, programa y prueba un sistema de adquisición de datos con interface en PC. Este sistema de adquisición trabajará en paralelo al sistema de control.
- **Capítulo 6:** Se mostrarán los resultados obtenidos del sistema al configurar el sistema de levitación magnética completo



- **Capítulo 7:** El séptimo capítulo se desarrollan las conclusiones obtenidas en la realización del proyecto.
- **Capítulo 8:** En este capítulo se explican las mejoras de diseño y los trabajos futuros del sistema de levitación magnética.
- **Capítulo 9:** En el noveno y último capítulo se desarrolla el presupuesto del proyecto; contabilizando el tiempo invertido, los componentes electrónicos usados y las licencias de los software que se han utilizado.





Capítulo 2. Estado de la Técnica

2.1. Sistema de levitación magnética

Los sistemas de levitación magnética son desde la mitad del siglo XX hasta ahora, una de las tecnologías que más interés han despertado, tanto por lo espectacular de su funcionamiento como por las posibilidades técnicas que ofrecen es la tecnología de levitación magnética.

Aunque las primeras patentes de medios de transporte de pasajeros datan de 1905 [1] no fue hasta 1979 con motivo de la Exposición de Transporte Internacional de Hamburgo, Alemania, en la que se creó el primer tren de alta velocidad que funcionaba con el principio de levitación magnética.

Esta forma de transporte genera mucho interés ya que sus principales características son:

- La ausencia de fricción con el suelo, la única fricción que se produce en los trenes de levitación magnética se produce con el aire, pero esta fricción puede ser reducida gracias a la aerodinámica del tren.
- El menor peso de los coches ya que el sistema de propulsión se realiza entre la vía y el coche y no con un motor en el interior del tren como con los trenes tradicionales.
- Poseen otras ventajas como el menor gasto en mantenimiento y el menor ruido producido debido a la ausencia de rozamiento.

Estas características hacen del tren de levitación magnética más eficiente que los trenes convencionales, de hecho los trenes de levitación magnética poseen el record de velocidad para trenes [2], aunque el potencial de esta tecnología es de hasta miles de kilómetros por hora en el vacío [3]. Lo que le hace un competidor directo del transporte aéreo.

Entre las principales desventajas de este sistema está el mayor coste de las vías ya que están compuestas de imanes que tienen que estar alimentados para que pueda levitar el tren, lo que hace esta tecnología rentable solo para alcanzar altas velocidades.

La levitación magnética también se usa en el desarrollo de mecanismos sin rozamiento como son los cojinetes magnéticos que eliminan la necesidad de lubricación, también



se empieza a usar en la creación de energía de manera más eficiente con turbinas eólicas basadas en este principio de levitación para evitar el rozamiento.

En los últimos años y siguiendo el principio de levitación magnética de los sistemas de transporte ya desarrollados se han realizado muchos sistemas de levitación autónomos que usan esta tecnología para diversos usos, como es la publicidad, exposición de objetos, o esculturas (para museos o galerías de arte), debido al interés que suscita esta tecnología [4].

2.2. Sistema de control

A continuación se definirán los conceptos básicos que envuelve a los sistemas de control y que se necesitarán manejar para la realización del proyecto.

Los sistemas de levitación magnética como cualquier otro sistema controlado se componen de los siguientes elementos:

- **El sistema:** es el conjunto de componentes que actúan como un todo y cumplen con un objetivo [5]. Los ejemplos en la vida real son infinitos, desde la temperatura dentro de un coche hasta el nivel de agua en un depósito industrial. En nuestro caso el sistema será la posición de la propia bola metálica, que en su estado de levitación actuará como sistema.
- **Variables de entrada:** las variables de entrada son aquellas que estimulan el sistema produciendo una modificación del sistema.
- **Variables de salida:** son las variables que se miden del sistema y representan el estado de este.
- **El sistema de control:** es el conjunto de elementos que trabajan conjuntamente para lograr un objetivo de control [5]. El sistema de control trabaja de la siguiente manera: tiene como referencia la variable de “Set point” o SP y su objetivo será el de controlar el sistema mediante la variación de la variable de salida “Output Process” o OP. Consiguiendo así el valor de la variable del proceso deseada “Process Value” o PV.

2.3. FPGA

FPGAs o “Field Programmable Gate Array” son circuitos integrados que aparecieron comercialmente en 1984 y que combinan tres aspectos clave que los hacen únicos: son circuitos integrados estándar (bajo coste), (re)configurables y muy rápidos (ya que trabajan en paralelo, no tienen unidad central) Figura 1.

Lo que hace las FPGAs adecuadas a sistemas de control es su gran rapidez en la lectura, tratamiento y escritura de señales en paralelo (múltiple entrada y múltiple salida).

En la imagen de la Figura 1 muestra la diferencia entre diferentes tipos de dispositivos dependiendo de la capacidad de trabajar en paralelo y de su posibilidad de programación, en la imagen se muestra los dos extremos que son las CPUs (dispositivos sin posibilidad de configuración del hardware y con un solo núcleo que procesa una operación en cada ciclo de reloj) y al otro extremo las FPGA (con toda su circuitería capaz de ser (re)programable y con la posibilidad de trabajar con decenas o cientos de operaciones en paralelo en cada ciclo de reloj).

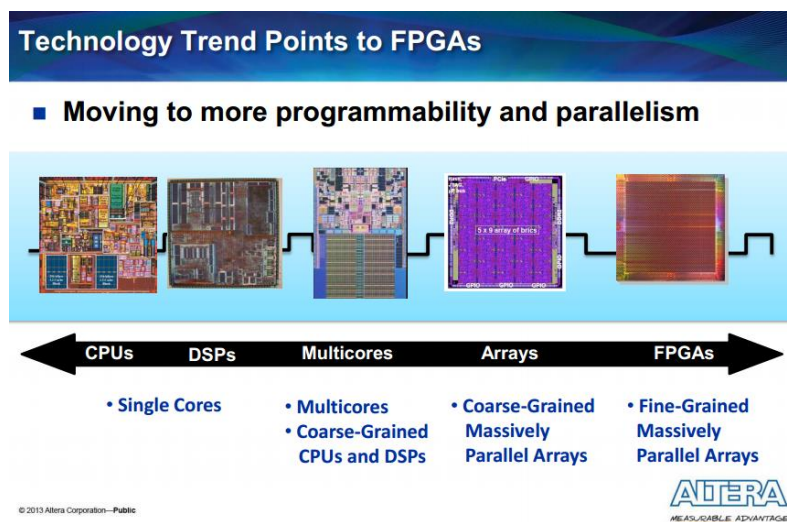


Figura 1. Diferencia entre dispositivos según su posibilidad de configuración hardware

[6]

2.4. Spartan-3E Starter Kit

Las "Starter Kit Board" son placas de desarrollo que incluyen, a parte de la FPGA como componente principal una serie de componentes básicos como convertidores analógico-digital, convertidores digital-analógico, circuitos acondicionadores, etc.

En el caso de nuestro proyecto usaremos la tarjeta Spartan-3E Starter Kit (**Figura 2**) debido a que las capacidades; tanto número de puertas lógicas (500.000) como de velocidad de reloj (50MHz), la hacen adecuada para conseguir una adquisición de datos, control y salida de datos lo suficientemente rápida para un control de levitación magnética. Ya que con un tiempo de muestreo del entorno 1-10KHz es suficiente para la mayoría de los controles [7].

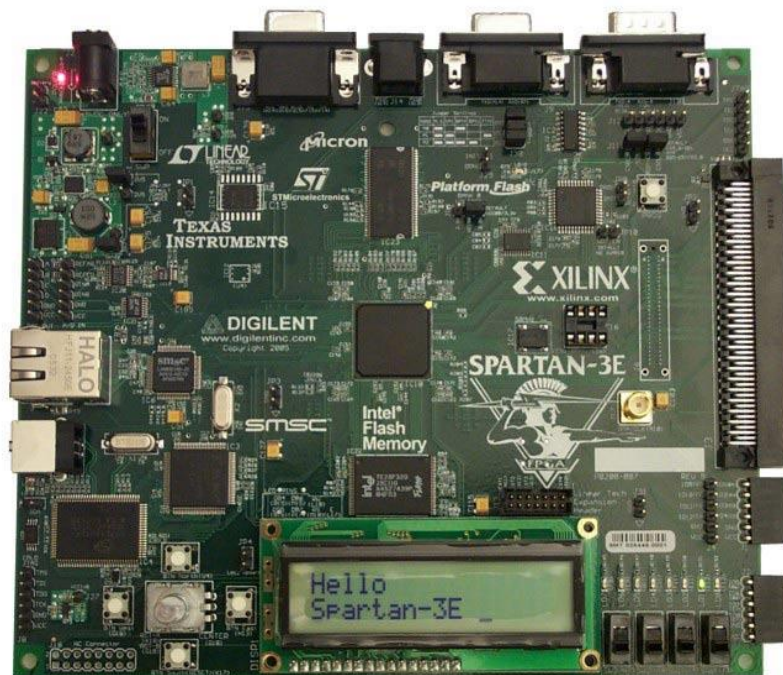


Figura 2. Spartan-3E Starter Kit Board [8]

2.5. Arduino

Arduino es una plataforma hardware libre basada en un microcontrolador de bajo coste de 8 o 32 bits de Atmel [9].

Arduino al usar microcontroladores de bajas prestaciones no tiene gran velocidad de adquisición o escritura necesaria para hacer controles rápidos de sistemas, pero si es perfecta para introducirse a la electrónica desde el punto de vista educativo, ya que se han desarrollado gran cantidad de dispositivos Plug-and-play de todo tipo (desde comunicación GSM a sensores de CO₂). El punto fuerte de la plataforma Arduino es que es hardware libre, es decir que cualquiera puede modificar el diseño original y adaptarlo a sus necesidades.

National Instruments llegó a un acuerdo con la plataforma Arduino que se plasmó en la creación de una librería para comunicarse desde LabVIEW con Arduino [10] lo que hace perfecta la utilización de Arduino (bajo coste) para aplicaciones de adquisición de datos en las que no sea necesaria una gran velocidad de muestreo (sensores de temperatura, de humedad, etc.).

2.6. Control PID

El control PID es el tipo de control más usado en la industria. Según el IEEE el 99% de los lazos de control usan controles PID, en España hay más de 1 millón de lazos en operación automática [11].

El control PID no es capaz de controlar satisfactoriamente algunas plantas que requieren controles avanzados (control PID predictivo, control PID adaptativo, control de redes neuronales, etc. Pero la implementación de un control PID es suficiente para un control satisfactorio de la mayoría de plantas.

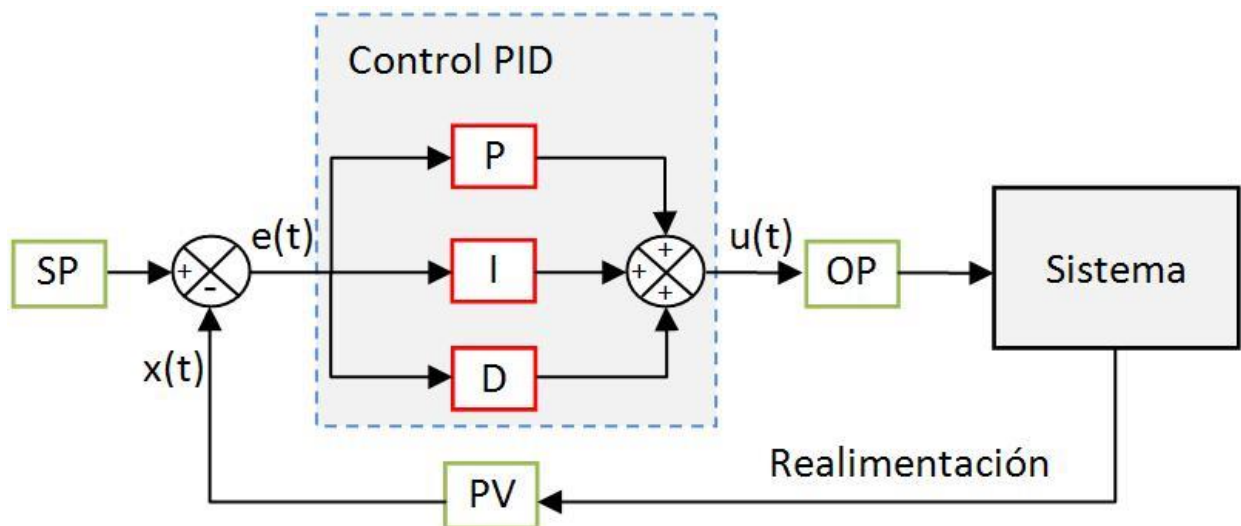


Figura 3. Control PID estándar

El lazo que se va a usar en el proyecto será el de tipo single input single output (SISO), como el mostrado en la **Figura 3**.

El sistema de control PID es un tipo de control que necesita realimentación y mediante la comparación entre la realimentación (variable de proceso o process value PV) y la variable de consigna o set point (SP) halla el error del sistema ($e(t)$).

Mediante la aplicación de las acciones proporcional, integral y derivativa (PID) del error, genera una señal de salida (output process o OP) que mediante actuadores modificará el sistema de tal forma que conseguirá reducir el error hasta llevarlo a cero de la forma configurable mediante la configuración de los parámetros proporcional (K_p), integrador (K_i) y derivativo (K_d).



2.7. ISE Design Suite

Es una herramienta software que sirve para la síntesis y análisis de diseños en lenguaje de descripción de hardware (o HDL por sus siglas en inglés) [12].

ISE Design Suite incluye todas las herramientas para diseñar un programa en HDL, compilarlo y cargarlo a la FPGA.

En las versiones más modernas incluye la posibilidad de coordinación con el software Simulink para poder usar el programa Simulink como entorno de programación.

2.8. MATLAB-Simulink

Simulink es un entorno de diagramas de bloque para simulación y diseño basado en modelos o bloques base (en los que se forma el programa al ir uniendo varios de estos bloques) [13]. Simulink forma parte del entorno MATLAB lo que permite añadir toda la funcionalidad de MATLAB al entorno de Simulink.

Simulink es una herramienta que se centra en la posibilidad del manejo a través de un entorno gráfico que permite mayor claridad y limpieza en el desarrollo de programas ya que se pueden crear nuevos bloques y así hacer ramificaciones en un diseño que permita la lectura del mismo por personas ajenas al diseño del programa.

Simulink y Xilinx llegaron a un acuerdo para poder disponer de una librería completa de bloques diseñados por Xilinx en el entorno gráfico de Simulink llamada “Xilinx SYSTEM GENERATOR For DSP” [14]. Ésta librería contiene un conjunto de bloques funcionales que permite la programación hardware de una FPGA directamente desde Simulink.

Es decir, cada bloque tiene un código HDL asignado, y desde el propio Simulink se puede crear un archivo que se puede cargar directamente en la FPGA (cuando antes solo podías hacerlo a través del programa de Xilinx ISE Design Suite).

Las posibilidades que ofrece la unión de Simulink y la posibilidad del uso de los bloques de Xilinx permite la generación de un programa para la FPGA, la posibilidad de simularlo antes de cargar el programa en la FPGA, a la vez que permite el uso de los bloques genéricos de Simulink. Lo que convierte el programa en una herramienta muy útil e intuitiva para usar en el diseño de lenguaje hardware.



2.9. LabVIEW

LabVIEW es una herramienta de programación gráfica [15]. LabVIEW está centrada en la reducción del tiempo que se necesita para crear aplicaciones, debido a su sistema de bloques y de amplias librerías (toolkits), es un sistema muy modular que permite la estructuración de un programa para que pueda ser leído fácilmente por personas ajenas al diseño del programa.

National Instruments también dispone de una amplia variedad de hardware de adquisición de datos y de salida de datos con librerías para su uso automático, reduciendo así el tiempo en crear aplicaciones funcionales.

2.10. Altium Designer

Altium Designer es una herramienta CAD para el diseño de circuitos impresos o PCB por sus siglas en inglés [16]. La herramienta es similar a OrCAD en la creación de PCB, pero Altium incorpora la creación de la PCB en 3D para la mejor aproximación al diseño definitivo de la PCB.

Altium Designer es una herramienta abierta a la importación de proyectos realizados con otros programas agilizando el trabajo modular de un diseño, permitiendo la importación de modelos creados en AUTOCAD o Solid Edge para la creación de modelos 3D y la importación de PCB creadas con otras herramientas CAD como ORCAD.

2.11. Interfaz de comunicación SPI

El estándar de comunicaciones serie SPI (serial peripheral interface) es un enlace de datos en serie y síncrono [17]. Aunque fue un estándar creado por Motorola se ha ampliado su uso a muchos dispositivos electrónicos debido a la sencillez en su implantación para dispositivos que requieren una velocidad de comunicación media (debido a la limitación en transmisión de datos que ofrecen las comunicaciones serie).

La comunicación SPI se basa en la asignación de maestro (al controlador) y esclavo/s (al los componentes periféricos).

El bus necesario para una comunicación mediante el interfaz de comunicación SPI es de cuatro hilos, que transportarán las señales de:

- SCK (reloj)
- CS (pulso de sincronización)
- SPI_MOSI (datos en serie de salida del maestro y entrada al esclavo)
- SPI_MISO (datos en serie de entrada al maestro y salida del esclavo)

El bus necesario para una comunicación mediante el interfaz de comunicación SPI es de cuatro hilos, que transportarán las señales de:

La imagen a continuación muestra el flujo de datos entre dos componentes en que aparece un Maestro y un esclavo.

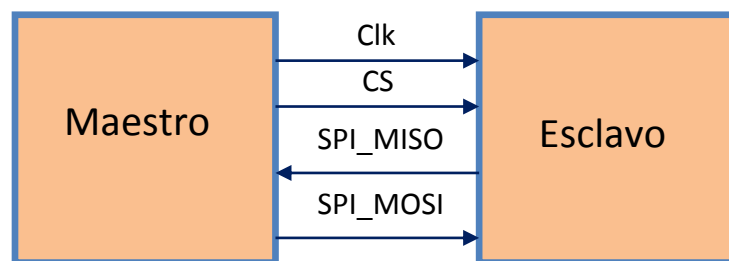


Figura 4. Esquema de comunicación serie SPI

2.12. Sensores utilizados

A continuación se explicarán los sensores que se van a utilizar en el proyecto. Es importante conocer la física que hay tras estos dispositivos para depurar los posibles fallos en el sistema.

Los sensores de tipo comerciales, por lo general, ya vienen encapsulados de forma que son fácilmente instalables en cualquier sistema.

Los sensores se pueden clasificar según el tipo de salida que tengan para dar la información de la medida tomada. Según esta clasificación hay dos tipos de sensores:

- Sensores con salida analógica: Son los sensores más sencillos de usar ya que el valor de la propia salida analógica transmite la información de la magnitud de la medida que se esté tomando.
- Sensores con salida digital: Estos dispositivos usan algún tipo de protocolo de comunicación (normalmente el interface SPI) para transmitir la información de la medida tomada. Estos sensores son los más complicados de usar ya que



necesitas un dispositivo de control que se comunice con el protocolo SPI y que use la información. Este tipo de sensores son los que se están imponiendo en el mercado ya que ofrecen una miniaturización de los sensores siendo esta crítica en muchos dispositivos (por ejemplo el mercado de los smartphones).

A continuación se detallará las características principales de los sensores que van a ser utilizados a lo largo del trabajo fin de grado.

2.12.1. Sensores infrarrojos

Los sensores infrarrojos son una tecnología de principios de los años 90, son dispositivos que detectan la radiación emitida por los materiales calientes [18].

Su función es principalmente la de la detección, clasificación y posicionamiento de objetos [18], las principales ventajas de estos dispositivos son las siguientes:

- Son muy direccionales: el emisor y el receptor requieren que ambos dispositivos estén alineados, lo que facilita la creación de barreras de IR muy definidas y precisas.
- Trabajan con una longitud de onda no visible al ojo humano (infrarrojo) lo que evita ser molesto cuando un sistema requiere varios de estos dispositivos.

Por estas características es ampliamente usada en dispositivos de control remoto o de detección para puertas automáticas.

2.12.2. Sensores de corriente de efecto hall

Son dispositivos usados como transductores de corriente. Estos dispositivos miden la corriente de forma indirecta, a través de la medición del campo magnético producido por las corrientes al circular a través de un conductor, la aparición de este campo magnético está predicho por la ley de Biot-Savart y es medida con un sensor de efecto hall.

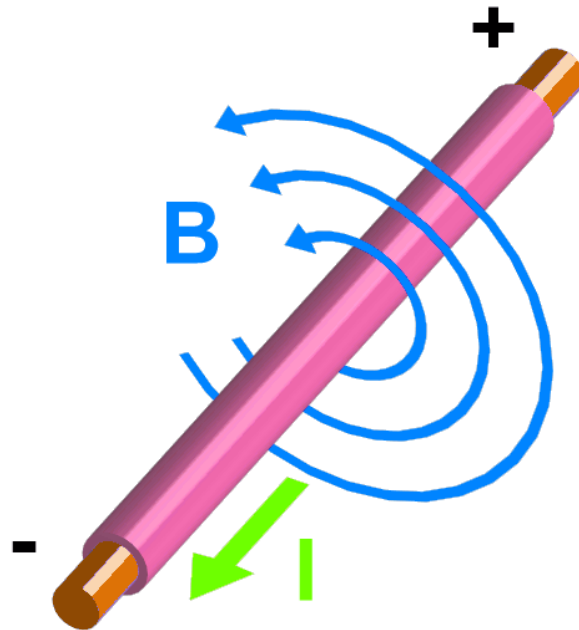


Figura 5. Campo magnético alrededor de un conductor [19]

Este tipo de sensor de medida indirecta son muy utilizados, ya que no requieren la modificación del circuito original para la medición y permiten la medición con seguridad de grandes cantidades de corriente (ante métodos menos seguros y que sí modifican el circuito original como el de la medición directa a través de una resistencia).

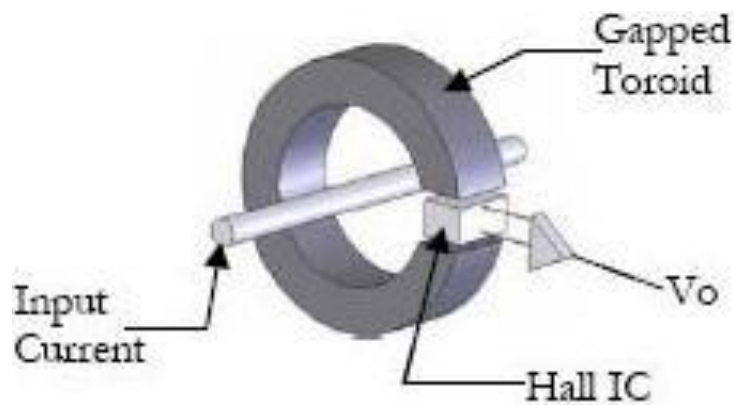


Figura 6. Sensor de corriente de tipo toroidal con sensor hall [20]

2.13. Modulación por ancho de pulso

La modulación por ancho de pulso o (PWM por sus siglas en inglés) está basada en el cambio del ciclo de trabajo de una señal cuadrada periódica [21].

La modulación por ancho de pulso es una de las modulaciones más sencillas de realizar por circuitos digitales, su funcionamiento y su implementación se basa en dos aspectos [22]:

1. Señal portadora triangular de alta frecuencia.
2. Señal modulada de baja frecuencia que se compara con la señal portadora. Esta señal de baja frecuencia contendrá la información que se quiere transmitir.

La comparación entre estas dos señales genera una señal cuadrada de ancho de pulso variable.

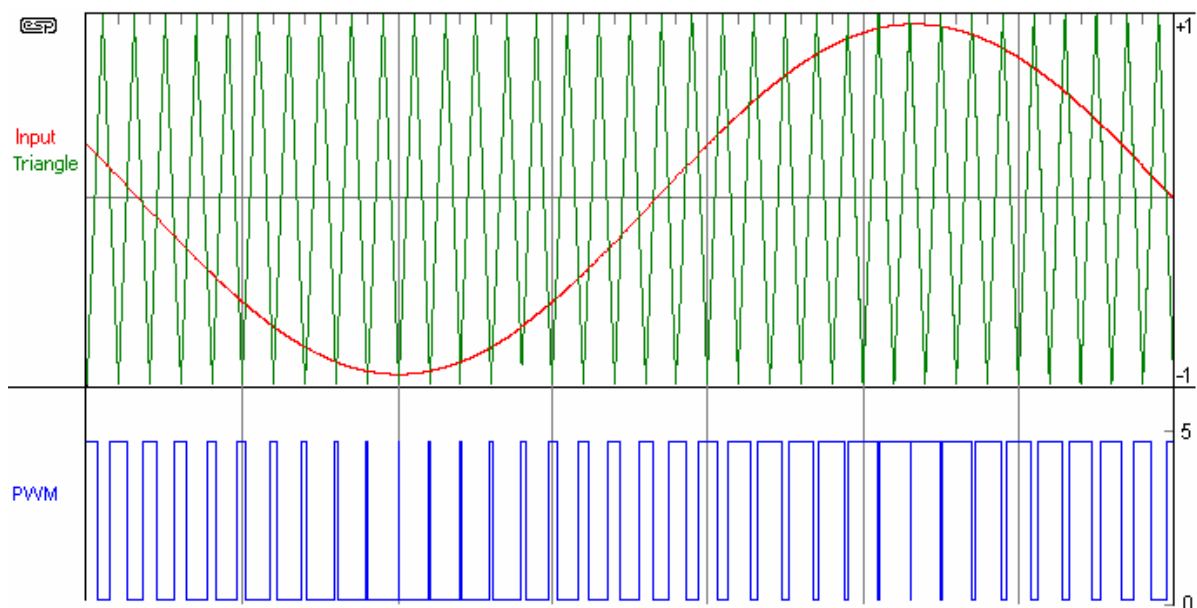


Figura 7. Señales implicadas en la implementación de la modulación por ancho de pulso [23]



Capítulo 3. Diseño y construcción física del Sistema de Levitación Magnética

En este capítulo se detallarán los pasos para construir el sistema de levitación magnética.

Empezaremos por una introducción a la estructura global del sistema que nos servirá de guía para el diseño y construcción del mismo. Tras ello continuaremos con la descripción del diseño, construcción y prueba de correcto funcionamiento de los circuitos de detección y de control de la corriente de la bobina, y terminaremos con el diseño, configuración, simulación y prueba de correcto funcionamiento de la FPGA para poder usar todos los elementos necesarios de la tarjeta “Spartan 3E Starter Kit Board” para la construcción de nuestro sistema de levitación magnética.

3.1. Introducción a un sistema de levitación magnética unidimensional

A continuación detallaremos las partes principales de las que se compone el sistema de levitación magnética, ayudándonos para ello de una imagen del esquema general del sistema (**Figura 8**).

Los sistemas de levitación magnética son sistemas inestables que requieren de un control activo del electroimán para poder hacer levitar el objeto metálico (en nuestro caso una esfera metálica).

Para conseguir este control se necesita de un sistema realimentado y controlado, este sistema contendrá los componentes necesarios para detectar la posición de la esfera metálica para mandársela al control. El control a su vez comparará la posición medida por el sistema con un valor de la posición deseado, esta diferencia provocará una respuesta que servirá para controlar la fuerza que ejerce el electroimán sobre la esfera a través del control de la corriente que circula por la bobina del electroimán.

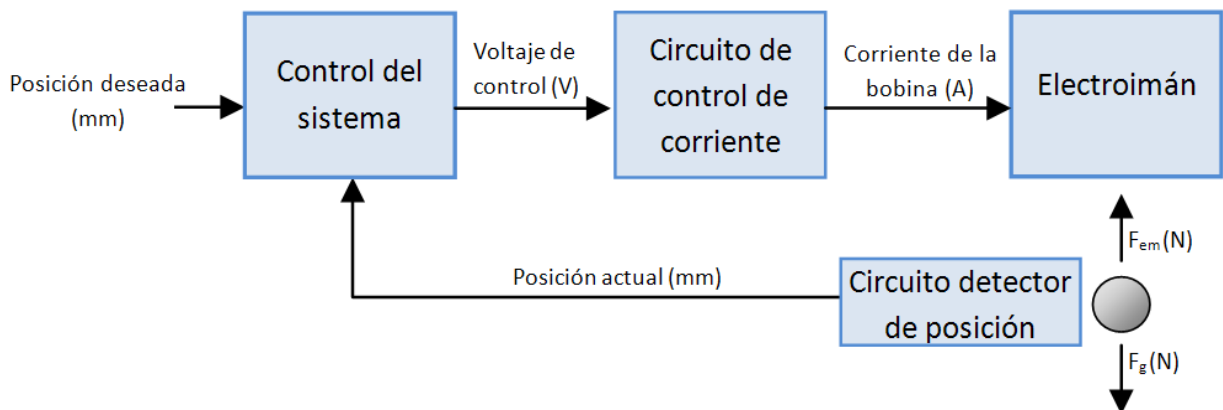


Figura 8. Esquema general del sistema de levitación magnética

En la **Figura 8** se muestra el esquema general del sistema de levitación magnética. Como muestra la imagen, el sistema está compuesto de los siguientes elementos principales:

- **Un circuito detector de la posición de la esfera metálica:** la posición en milímetros será medida con respecto al límite inferior del electroimán y será enviada al control como realimentación del sistema. Este circuito será de diseño propio.
- **Un sistema de control:** el sistema de control comprobará la posición actual de la esfera que ha recibido del circuito detector de la posición y la comparará con la posición de referencia que será una constante. Ésta diferencia provocará una respuesta de salida que será enviada al circuito de control de corriente, la señal de salida del sistema de control variará en voltaje. Para el sistema de control se utilizará la tarjeta de desarrollo "FPGA Spartan 3E Starter Kit Board".
- **Un circuito de control de corriente:** este circuito tendrá como entrada la señal de salida del sistema de control con la que regulará la corriente que circula a través de la bobina del electroimán. Este circuito será de diseño propio.
- **Un electroimán:** será el actuador de nuestro sistema, el electroimán ejercerá la fuerza electromagnética en la esfera en la misma dirección pero en sentido contrario a la fuerza de la gravedad que la esfera sufre, con la misión de contrarrestarla y hacer levitar la esfera. Este componente será de fabricación propia.

Una vez descrito el esquema general del sistema, podemos hacer un segundo esquema general del sistema más detallado **Figura 9** centrándose en los circuitos que contendrán los elementos descritos en la **Figura 8**.

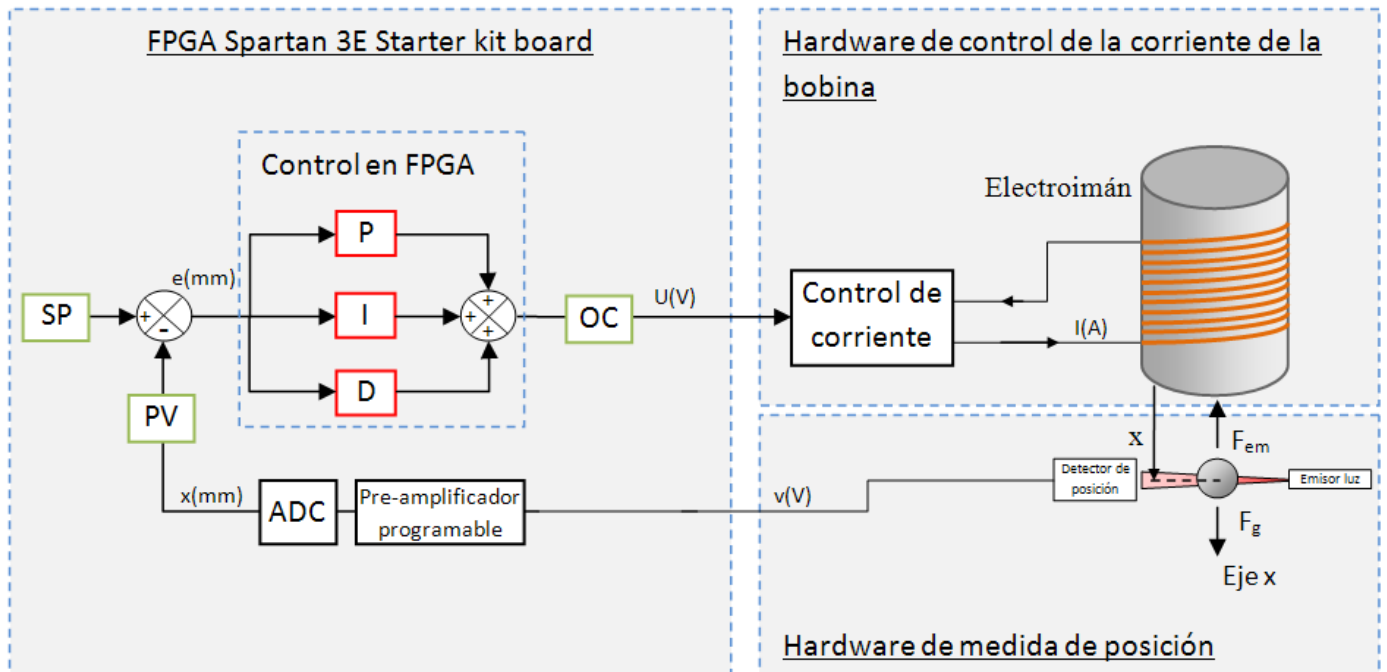


Figura 9. Esquema detallado del sistema de levitación magnética

El esquema detallado del sistema mostrado en la **Figura 9** muestra los elementos del sistema físico pero detallando los componentes electrónicos y físicos del sistema que son los siguientes:

- **Hardware de medida de posición:** que contendrá el circuito detector de posición, que medirá la posición de la esfera con respecto al extremo inferior del electroimán gracias a un emisor y detector de luz. Este componente tendrá como salida una señal de voltaje variable que dependerá de la posición de la esfera y será enviado a la tarjeta “FPGA Spartan 3E Starter kit Board”.
- **Tarjeta de desarrollo “FPGA Spartan 3E Starter Kit Board”:** que contendrá el control del sistema que tendrá como entradas la posición de la esfera metálica (PV) y la medida de referencia (ST) que comparará entre ellas para producir la salida del control (OC).
- El sistema de control estará configurado en la FPGA Spartan 3E y para poder digitalizar la señal de entrada de la posición el sistema de control usará un conjunto pre-amplificador y convertor analógico digital incluido en la tarjeta de desarrollo. La salida del sistema usará un puerto digital de salida con una señal modulada en ancho de pulso (PWM) que será enviada al circuito de control de corriente.

- **Hardware de control de la corriente de la bobina:** que contendrá el circuito de control de la corriente y el electroimán, este circuito controlará la fuerza electromagnética que genera el electroimán a través del control de la corriente que circula por la bobina del electroimán. Esta corriente será controlada por la señal **OC** que viene del sistema de control contenido en la tarjeta de desarrollo “FPGA Spartan 3E Starter Kit Board”.

3.2. Diseño y construcción del hardware del sistema de levitación magnética

En este apartado se describirá el proceso de diseño, construcción y prueba de correcto funcionamiento de los componentes diseño y construcción propia.

Estos componentes son la estructura, el electroimán y los circuitos de detección de la posición de la esfera metálica y de control de la corriente de la bobina del electroimán.

3.2.1. Estructura

Es una parte importante del hardware de nuestro sistema de levitación magnética ya que la estructura debe ser robusta y firme para poder fijar el electroimán y los elementos del circuito detector de posición.

La estructura consistirá en un soporte de madera (elegida debido a su fácil trabajo) para sostener de manera firme el electroimán.

Debajo del electroimán se encuentra el sistema de detección de la esfera metálica, éste sistema consistirá en un emisor de infrarrojos y un detector de infrarrojos al mismo nivel (para que haga el efecto de barrera de detección por infrarrojos). Tanto el emisor como el receptor estarán embebidos en cilindros negros para minimizar lo máximo posible el efecto del ruido producido por luz infrarroja de los alrededores en el sistema de detección, lo cual implica que la estructura deberá ser lo suficientemente amplia para que quepan todos estos elementos.

La estructura también dispondrá de una clema para organizar todo el cableado que tendrán estos tres elementos. La imagen mostrada a continuación, Figura **10**, muestra la estructura construida para la realización de nuestro experimento indicando las partes más importantes de la misma.

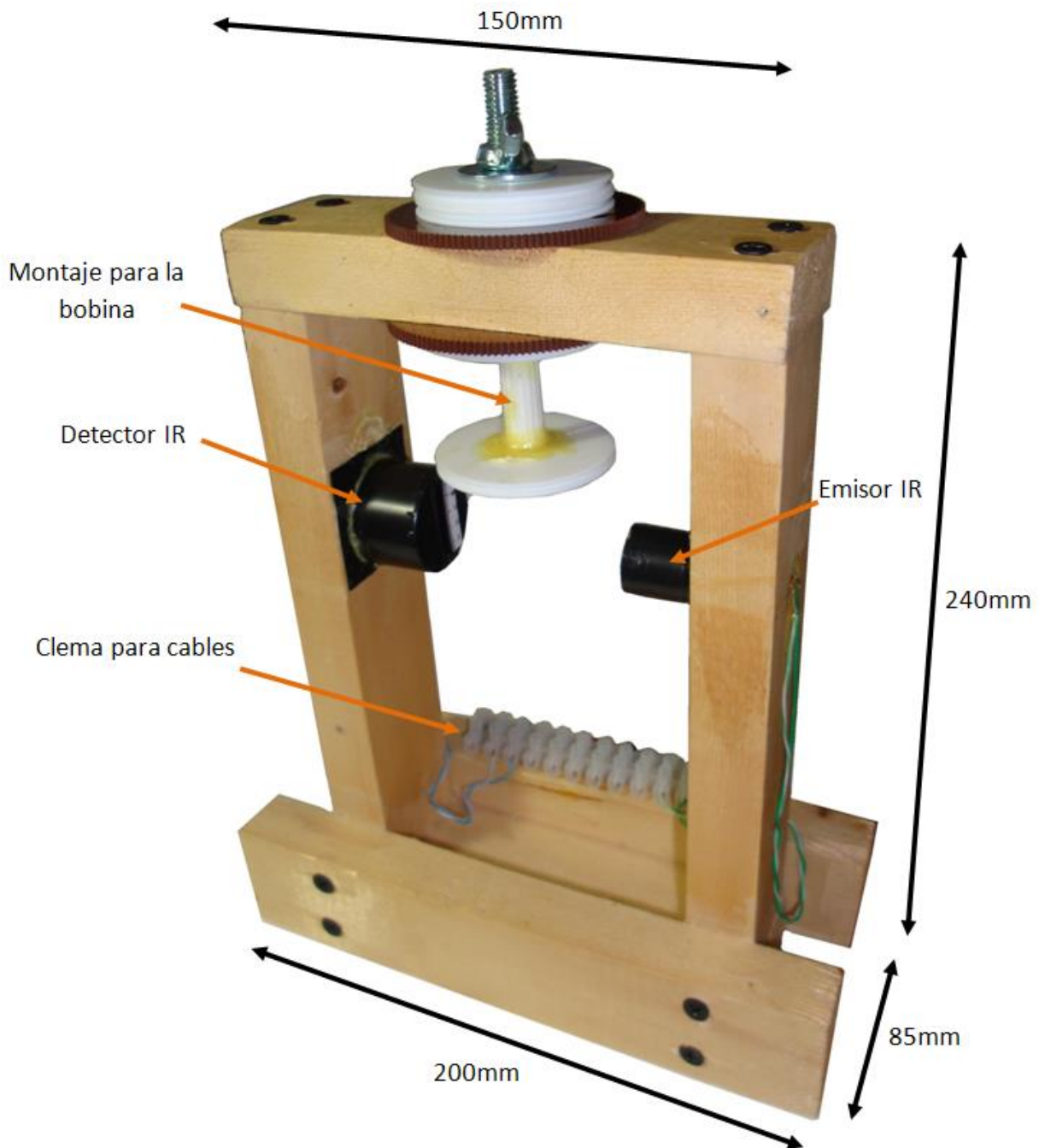


Figura 10. Estructura del sistema de levitación magnética

La imagen mostrada en la **Figura 10** muestra la estructura de madera que se va a utilizar a lo largo del proyecto como soporte del electroimán y del emisor y sensor de posición del circuito de detección de sistema. En esta estructura estará el montaje para la bobina del electroimán. Las dimensiones de la estructura (200x240mm) son suficientes para albergar el electroimán y la

barrera de luz infrarroja que detectará la posición de la esfera metálica y para poder maniobrar en la realización de las pruebas.

3.2.2. Hardware de medida de posición

En este apartado se describirán todos los componentes electrónicos del hardware de medida de posición de la esfera metálica.

Para crear el sistema de detección de posición se han barajado las siguientes posibilidades:

- Conjunto de led emisor de luz blanca y un fotorresistor.
- Conjunto de led emisor de luz infrarroja y fototransistor de luz infrarroja.

Aunque los dos conjuntos tienen características similares se ha decidido el uso del conjunto de un emisor y receptor de luz infrarroja debido a sus dos principales ventajas sobre la alternativa:

1. Es menos sensible al ruido, ya que únicamente trabaja en la longitud de onda de los 940nm (infrarrojo) y no percibe todas las longitudes de onda del espectro visible como el conjunto de led blanca y fotorresistor.
2. Es invisible al ojo humano lo que mejora el aspecto estético del experimento de levitación magnética.

En la **Figura 11** que se muestra a continuación se muestra el circuito, realizado con la herramienta software Altium Designer, que compone el sistema de detección de la posición del objeto a levitar.

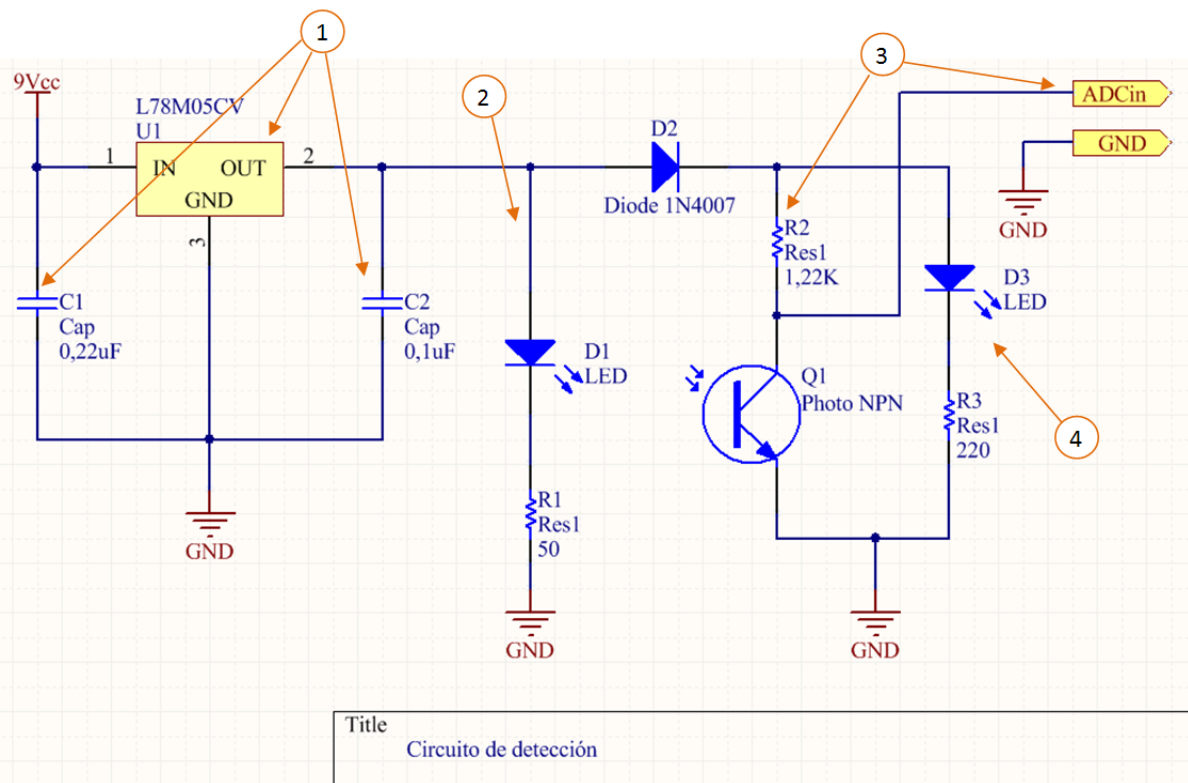


Figura 11. Esquemático del circuito de detección

Para el circuito mostrado en la **Figura 11** se han utilizado los siguientes elementos:

- x1 Condensador 0,22uF (**C1**).
- x1 Condensador 0,1uF (**C2**).
- x1 Resistencia 50Ω (**R1**).
- x1 Resistencia 1220Ω (**R2**).
- x1 Resistencia 220Ω (**R3**).
- x1 Diodo TSAL6100 (**D1**).
- x1 Diodo 1N4007 (**D2**).
- x1 Diodo LED luz blanca (**D3**).
- x1 Fototransistor NPN L-53P3C (**Q1**).
- x1 Regulador de tensión L7805CV (**U1**).
- x1 Fuente de alimentación externa de 9V

En la **Figura 11** se han indicado mediante números las partes principales que componen el circuito de detección, a continuación se describirá cada una de las partes indicadas:

1. El circuito de detección contiene un regulador de tensión positiva de 5V modelo **L7805CV [24]** llamado **U1**. El regulador de tensión **U1** está acompañado de dos condensadores **C1** y **C2** de filtrado de la señal en la entrada y en la salida de **U1**, que evitan ruido en la señal de alimentación de 5 voltios que salga del regulador **U1**.
2. Esta rama contiene el diodo emisor **TSAL6100 [25]**, llamado **D1**. La resistencia **R1** que está en la misma rama, sirve para limitar la corriente que circula por el diodo. El cálculo del valor de la resistencia se hace mediante la ley de ohm **(1)**:

$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

La corriente nominal que debe circular por el diodo para su correcto funcionamiento es de 100 mA **[25]**. Para conseguir este nivel de corriente sustituimos los valores en **(1)**:

$$I_F = 100\text{mA} = \frac{5\text{V}}{50\Omega}$$

Hallamos así que el valor de la resistencia **R1** de limitación de la corriente es de 50Ω.

3. El modelo de diodo emisor **D1** de infrarrojos es el **TSAL6100** y se ha elegido por su gran potencia de emisión y su corto ángulo de emisión de $\pm 10^\circ$ (ver **Figura 12**), lo que hace la detección del objeto más precisa al ser la emisión de infrarrojos muy direccional, el ruido ambiental es proporcionalmente muy bajo con respecto a la señal emitida por **D1**.

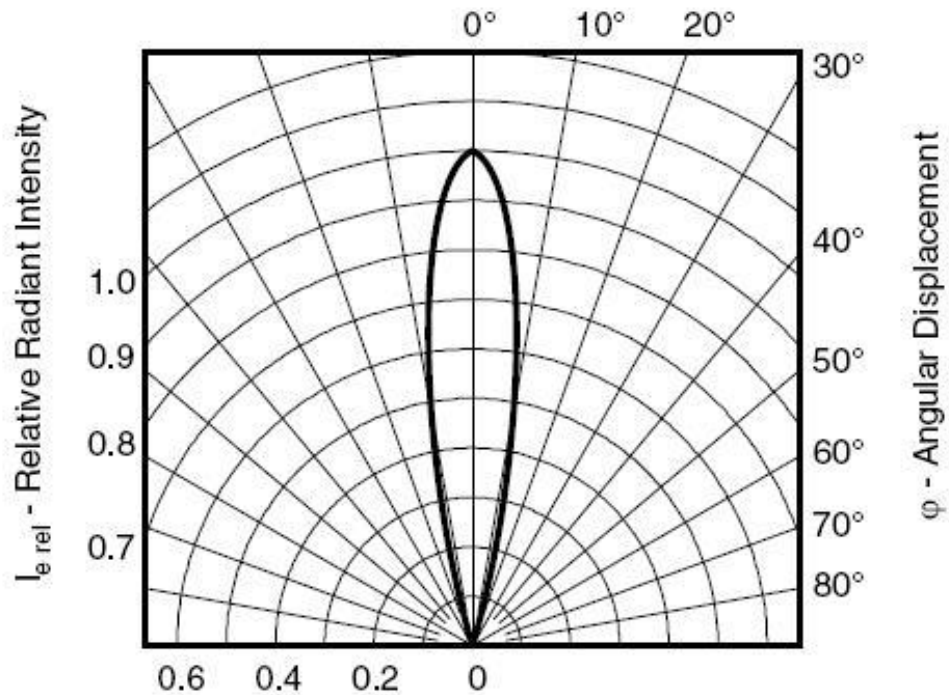


Figura 12. Ángulo de emisión del diodo emisor TSAL6100 [25]

4. Esta es la rama del fototransistor NPN (llamado **Q1**) modelo **L-53P3C** [26]. Este fototransistor será polarizado como “emisor común” [27]. La alimentación del fototransistor pasa por un diodo **1N4007** [28] y una resistencia de $1,22k\Omega$ que tienen la función de limitar la corriente y adaptar el voltaje para que la salida del fototransistor esté en el rango del pre-amplificador de la tarjeta “Spartan 3E starter kit”, que es de 0,4V a 2,9V en su menor ganancia [29].

Como podemos ver a la patilla del emisor del fototransistor **L-53P3C** se conecta los puertos de salida del circuito “ADCin” y “GND” que son, respectivamente, la señal y la referencia que le llegará al pre-amplificador de la tarjeta “Spartan 3E starter kit” [29].

5. Por último **D3** y **R3** son un diodo LED de luz blanca (de corriente nominal de 20mA) y su resistencia para limitar la corriente **R3**, por lo tanto la corriente que pasará por esa rama se calcula según **(1)** como:

$$I_F = 23\text{mA} = \frac{5\text{V}}{220\Omega}$$

Obteniendo que una resistencia de 220Ω (que tenemos disponible para su uso) será adecuada para que el LED funcione sin problemas.

- **NOTA:** la foto real del circuito completo de detección se mostrará en la **Figura 27**.

El emisor de infrarrojos **TSAL6100** y el fototransistor **L-53P3C** estarán situados en la estructura de madera del sistema de levitación magnética y al mismo nivel para hacer el efecto de barrera de luz infrarroja y así detectar mejor el objeto que levita, tal y como muestra la

Figura 13.



Figura 13. Barrera de IR para la detección de la esfera metálica

Como se puede ver en la

Figura 13 el fototransistor de infrarrojos está dentro de un cilindro negro con una abertura vertical que le permitirá la detección del objeto en el eje X, minimizando así la luz ambiental que pueda percibir el fototransistor.

Para finalizar la construcción del hardware de medida de posición de la esfera metálica se realizará una prueba real del circuito con la que obtendremos la curva de calibración del hardware, que usaremos en etapas posteriores para la lectura de la posición a través de la señal de salida del circuito de detección.

La curva de calibración del sistema de detección se mostrará a continuación en la



Figura 14. Esta curva de calibración se ha realizado mediante la medida del voltaje de la señal de salida ante cambios en la posición de la esfera metálica desde el límite inferior del electroimán, 0mm, hasta una distancia de 20mm desde del extremo inferior del electroimán.

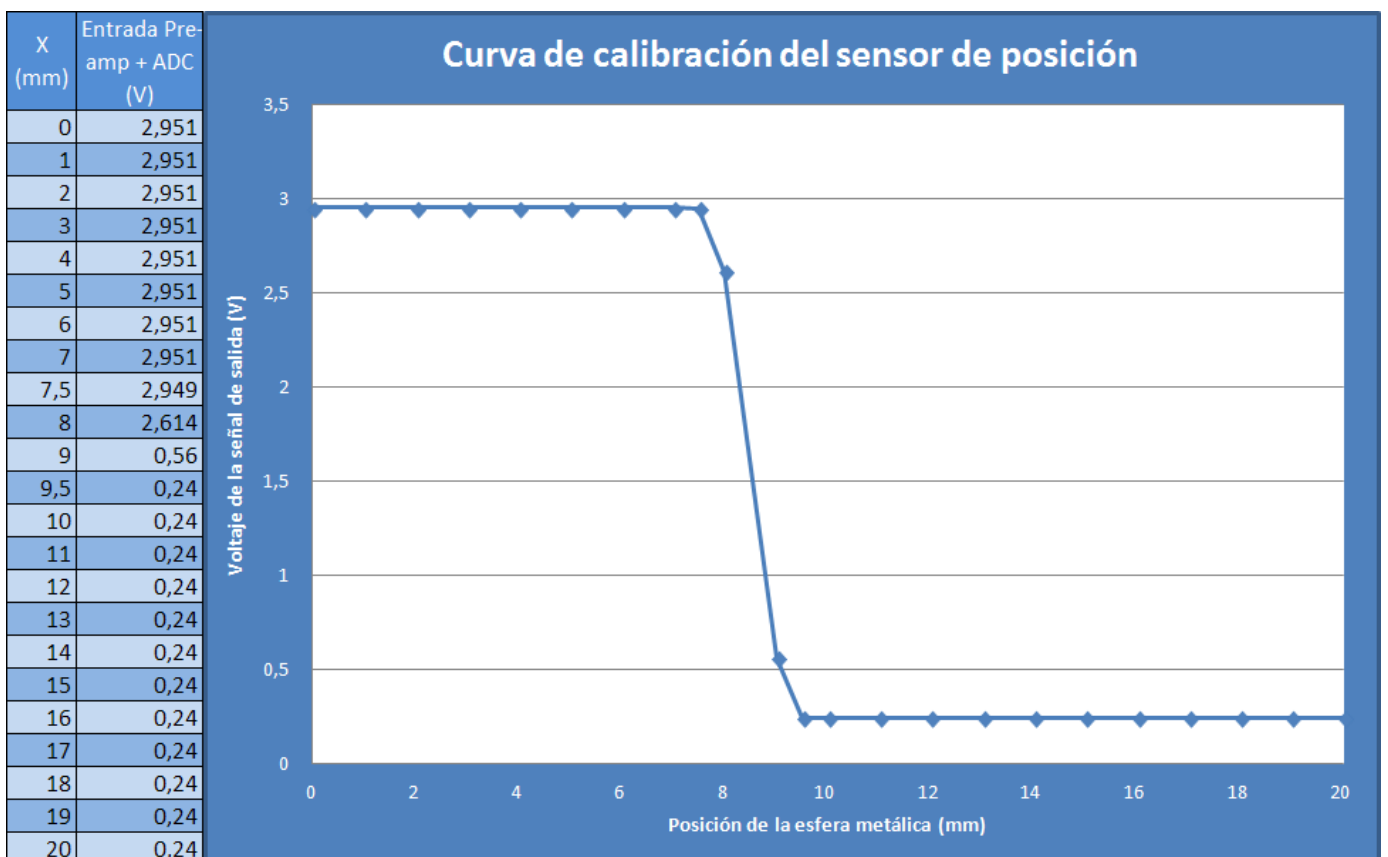


Figura 14. Curva de calibración del circuito de detección

La curva de calibración de la **Figura 14** nos muestra un cambio muy pronunciado en la zona que comprende desde los 7,5mm a los 9,5mm, que será donde se va a establecer el punto de levitación, la zona de trabajo. Este escalón tan pronunciado nos dará una señal clara de la posición del objeto, lo que facilitará el diseño del control de levitación magnética.

Para poder digitalizar correctamente la posición medida por el circuito de detección necesitamos linealizar el comportamiento del sensor en la zona de trabajo. La linealización en la zona de trabajo se muestra en la

Figura 15 que muestra en rojo los puntos desechados por localizarse fuera de la zona de trabajo, y los puntos azules que son los que se consideran para la linealización ya que se encuentran dentro de la zona de trabajo.

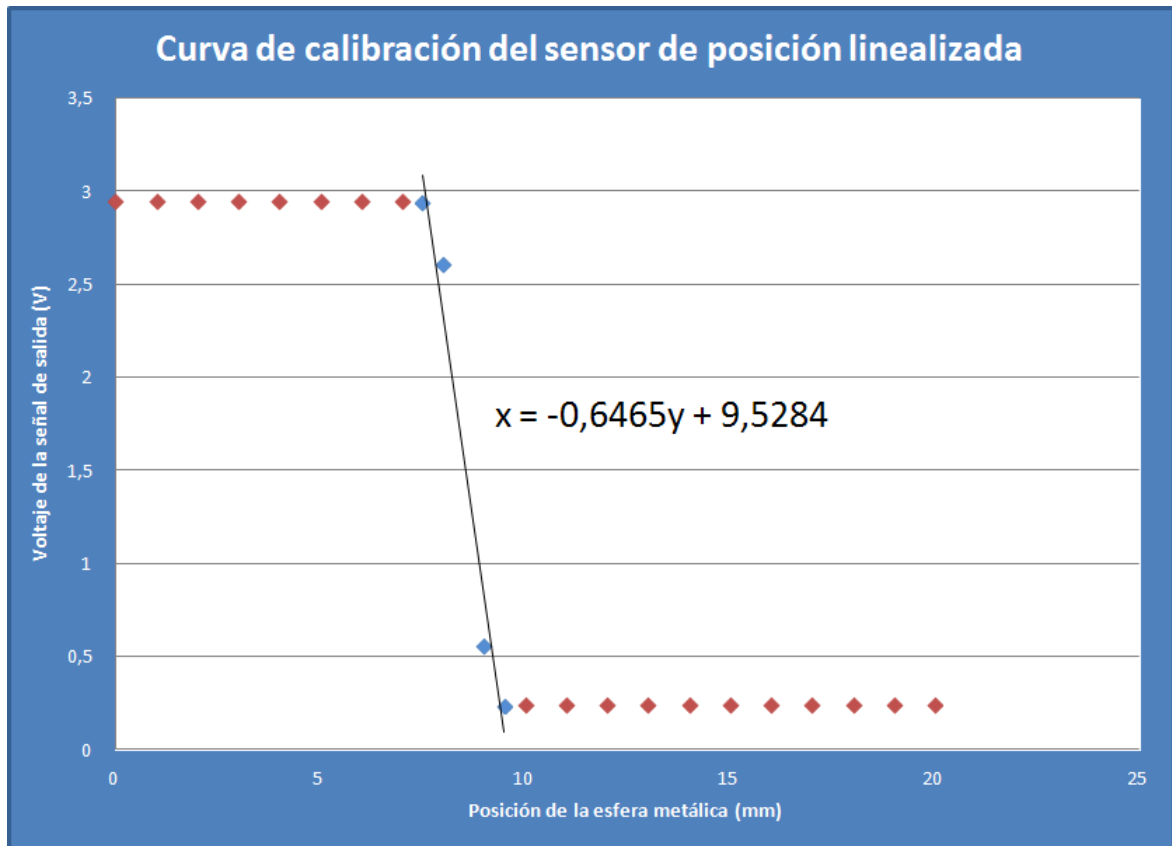


Figura 15. Curva de calibración del circuito de detección linealizada en la zona de trabajo.

Como podemos observar en la figura la ecuación que obtenemos de la linealización del sensor dentro de la zona de trabajo será la siguiente:

$$x(mm) = -0.6465 y(V) + 9.5284 \quad (2)$$

Siempre que se mantenga en la zona de trabajo de $7,5mm < x < 9,5mm$

Esta ecuación será usada posteriormente por el sistema de control y el sistema de adquisición de datos para leer la posición de la esfera metálica con la señal de salida del circuito de detección.

3.2.3. Electroimán

Las características del electroimán son de gran importancia en un sistema de levitación magnética, ya que es el actuador del sistema.

Para la construcción de este elemento crítico se seguirá las indicaciones de [30].

Para la construcción del electroimán se recomienda que la resistencia del bobinado del electroimán sea de entorno a 12-15Ω para que con un voltaje de alimentación de 12Vdc la corriente se mantenga siempre por debajo de 1A, ya que esto evita problemas de exceso de temperatura en el electroimán y en la estructura lo que conllevaría un riesgo en la integridad de los componentes.

La tensión de 12Vdc se ha elegido porque las fuentes de alimentación de este voltaje son muy comunes y accesibles, encontrándose en las fuentes de alimentación de ordenadores y de diversos dispositivos electrónicos.

Además una tensión mayor conllevaría riesgos de seguridad en el manejo del equipo.

La fuerza de un electroimán es una función que depende de [31]:

$$F(N) = \left(\frac{(N \times I)^2 \times k \times A}{2 \times d^2} \right) \quad (3)$$

Donde:

- N: es el número de espiras del electroimán.
- I (A): es la corriente que circula por el electroimán.
- K: una constante.
- A (m²): es el área de la sección del electroimán.
- d (m): es la distancia al objeto sobre el que ejerce la fuerza el electroimán.

Para construir nuestro sistema de levitación magnética tenemos que conseguir que nuestro electroimán sea lo más potente posible [32] para 1A de corriente máxima, ya que una vez conseguido una gran potencia a esa corriente, podremos ajustar la potencia fácilmente bajando la corriente hasta establecer la levitación en la zona deseada. Como podemos deducir de la ecuación (3) el cable que debemos usar será de tamaño medio.

El cable deberá ser de calibre grueso para que no ofrezca mucha resistencia y se pueda construir un electroimán con un gran número de espiras antes de ofrecer gran resistencia al paso de la corriente, pero no puede ser excesivamente grueso debido a la necesidad de construir un electroimán compacto y manejable para instalarlo en la estructura.

Para la construcción del electroimán se ha desarmado un transformador de 220VAC a 12VAC para conseguir el cable de cobre que se usará en el bobinado del electroimán (**Figura 16**). Con esto conseguiremos reducir el presupuesto necesario para la construcción del sistema de levitación magnética.

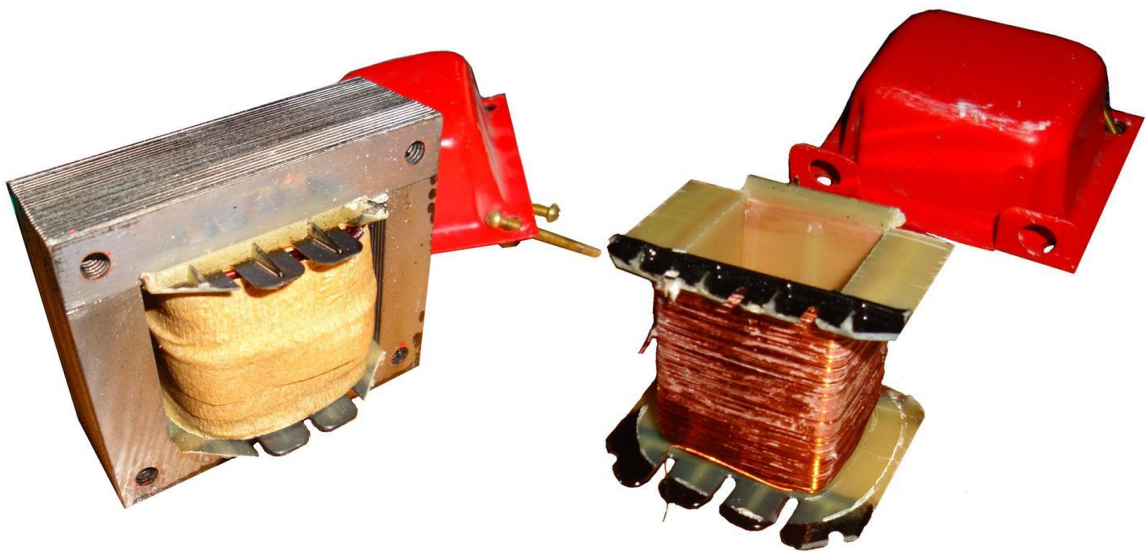


Figura 16. Proceso de construcción del electroimán. Desarme del transformador.

El cable de cobre que obtenemos del electroimán es de 0.4mm, es decir un AWG-26 en la escala logarítmica que se usa mayoritariamente para los cables de cobre. El cable de cobre de calibre AWG-26 tiene una resistencia de $0.134\Omega/m$ [33]. Así que para conseguir 15Ω necesitamos aproximadamente 112 metros de cable, que podemos obtener del transformador desarmado **Figura 16**.

Continuando con la construcción del electroimán, enrollamos los 112 metros de cable AWG-26 alrededor de un núcleo de material ferromagnético, como se recomienda para aumentar la fuerza del electroimán [32].

El núcleo ferromagnético será un tornillo de 130mm de largo y 7mm de diámetro. Un núcleo de acero como el que proporciona el tornillo usado tiene unas cualidades ferromagnéticas inferiores a un núcleo de hierro dulce o

ferrita, pero las ventajas de mayor disponibilidad y de facilidades en la instalación lo hacen más apropiado para el sistema de levitación magnética.

En la siguiente imagen (

Figura 17) se muestra la estructura de plástico alrededor del núcleo del electroimán en la que será enrollado el cable de cobre

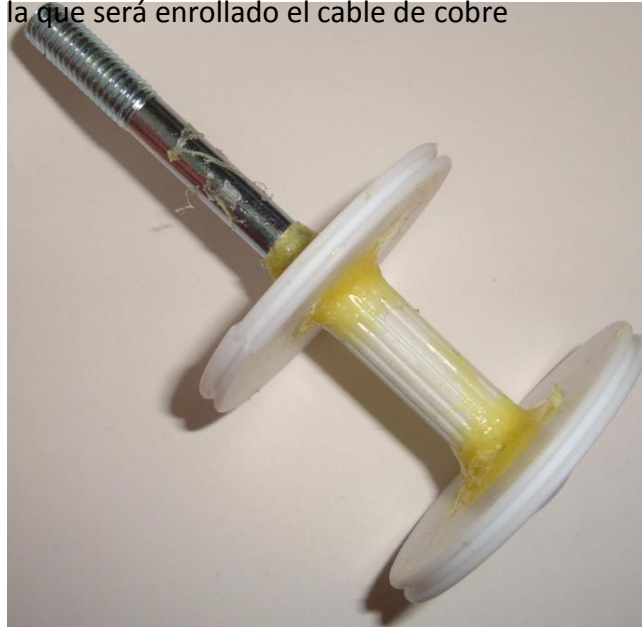


Figura 17. Proceso de construcción del electroimán. Núcleo del electroimán.

Como podemos observar en la anterior imagen (

Figura 17), se ha construido una base para poder enrollar el cable de la manera más compacta y firme.

En las siguientes imágenes (

Figura 18 y Figura 19) vemos el proceso de enrollado de cable e instalación del electroimán en la estructura de madera.

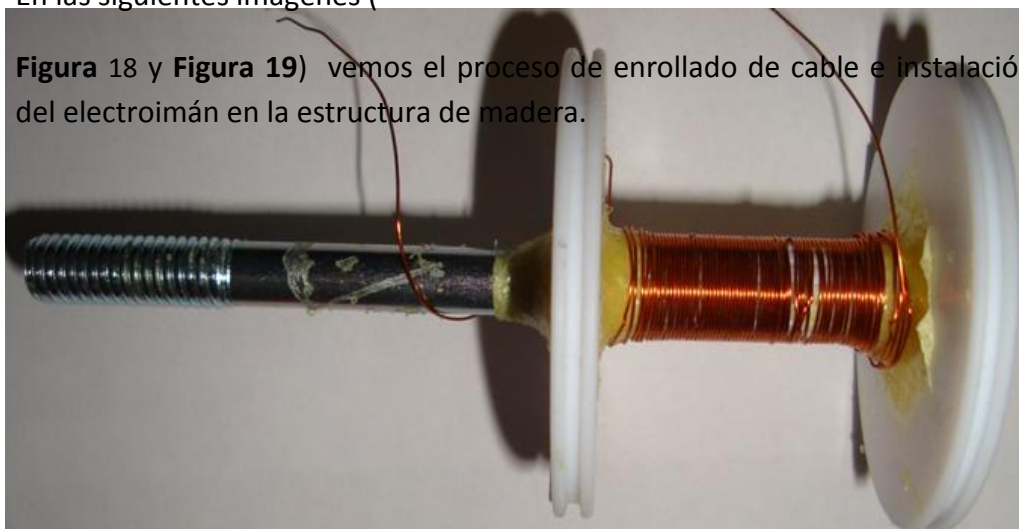


Figura 18. Proceso de construcción del electroimán. Enrollado de espiras.

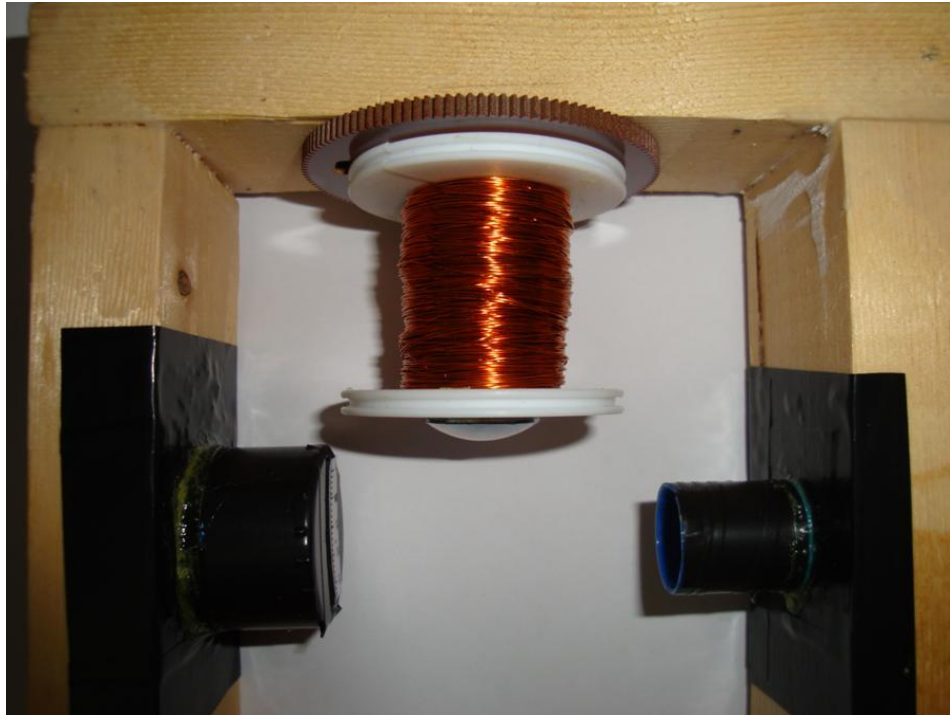


Figura 19. Proceso de construcción del electroimán. Montaje en la estructura.

Como podemos ver en la **Figura 19** el electroimán está instalado encima de la barrera de luz infrarroja para detectar y actuar sobre la esfera metálica que estará situado en el eje vertical del electroimán.

Las características del electroimán son las mostradas en la siguiente tabla:

- Resistencia eléctrica: 15Ω .
- Número de espiras de la bobina: 1400 espiras.
- Calibre del cable de cobre usado: AWG-26.
- Metros de cable usados: 112 metros.

Tras la construcción del electroimán se ha realizado una prueba de calibración de la fuerza electromagnética que ejerce el electroimán. La medida de la fuerza se ha realizado con ayuda de un dinamómetro unido a una pesa de **10 gramos** y con el electroimán dado la vuelta para facilitar los cálculos. La fuerza total medida por el dinamómetro será la suma de la fuerza de la gravedad y

de la fuerza electromagnética producida por el electroimán, así que hay que tenerla en cuenta para restarla y así obtener la fuerza electromagnética.

La **Figura 20** muestra la curva de calibración del electroimán con una corriente de hasta 1 amperio. Debido a que la fuerza que el electroimán depende de la corriente y la posición del objeto a levitar, la calibración del electroimán se realizará con la pesa siempre fija en la posición donde vamos a realizar la levitación (es decir en 8,5mm).

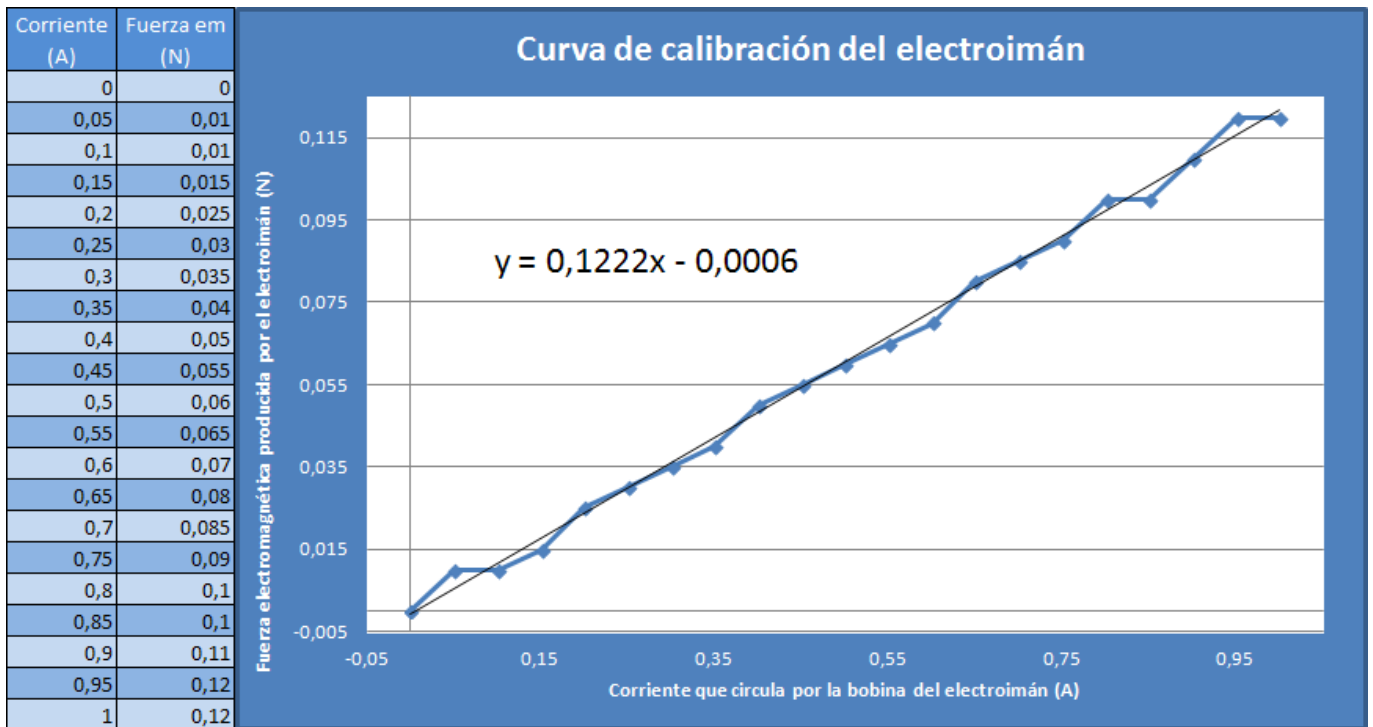


Figura 20. Curva de calibración del electroimán

Como se puede observar en la **Figura 20** la recta a la que tiende el electroimán es **(4)**:

- $y(N) = 0.1222 x(A)$ **(4)**

En la ecuación **(4)** ha eliminado la componente fija de la ecuación linealizada ya que es aproximadamente cero.

3.2.4. Hardware de control de la corriente de la bobina

El sistema de levitación magnética dispone de un circuito que controla la potencia del electroimán a través del control de la corriente que circula por él.

La entrada del “circuito de control de la corriente de la bobina” es la señal de control que sale de la FPGA, ésta señal está modulada en ancho de pulso (PWM), de forma que, habrá una relación directa entre el ancho de pulso de esta señal y la corriente que circula por la bobina.

El circuito de control tendrá la característica de ser un circuito con dos masas (como podemos ver en el esquemático de la

Figura 21) siendo la primera, la masa de señales digitales (**GND**) y la segunda, la masa de señales de potencia (**GND_POT**) y tendrán las siguientes características:

- Masa de señales digitales (**GND**): Esta masa será la referencia de los circuitos que sean de baja potencia como son el circuito de detección, la propia tarjeta “FPGA Spartan 3E Starter Kit Board”, y la primera parte del circuito de control de la bobina (hasta el optoacoplador).
- Masa de señales de potencia (**GND_POT**): Esta masa será la referencia de los circuitos de potencia, como son el electroimán y la circuitería de potencia que controla el electroimán.

Esta separación sirve para evitar que se propague el ruido producido por la rápida conmutación de los transistores de potencia, **Q3** y **Q4**, al controlar la corriente que circula por el electroimán.

En la

Figura 21 que se muestra a continuación se muestra el circuito, realizado con la herramienta software Altium Designer, que compone el sistema de control de la corriente de la bobina del electroimán.

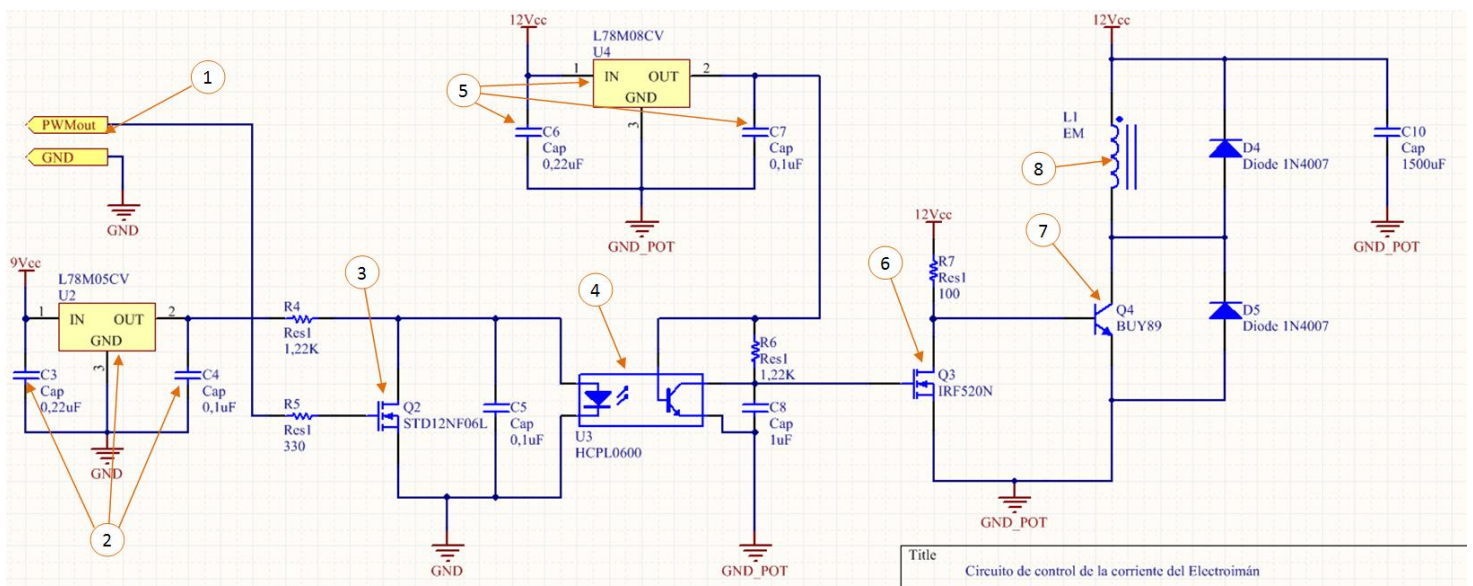


Figura 21. Esquemático del circuito de control de la corriente de la bobina

Para el circuito mostrado en la

Figura 21 se han utilizado los siguientes elementos:

- x2 Condensador 0,22uF (**C3** y **C6**).
- x3 Condensador 0,1uF (**C4**, **C5** y **C7**).
- x1 Condensador 1uF (**C8**).
- x1 Condensador 1500uF (**C10**).
- x2 Resistencia 1220 Ω (**R4** y **R6**).
- x1 Resistencia 330 Ω (**R5**).
- x1 Resistencia 100 Ω (**R7**).
- x2 Diodo 1N4007 (**D4** y **D5**).
- x1 Regulador de tensión L7805 (**U2**).
- x1 Optoacoplador HCPL0600 (**U3**).
- x1 Regulador de tensión L7808 (**U4**).
- x1 MOSFET canal N STD12NF06L (**Q2**).
- x1 MOSFET canal N IRF520N (**Q3**).
- x1 Transistor NPN BUY89 (**Q4**).
- x1 Electroimán (**L1**).
- x1 Fuente de alimentación externa de 9V (compartida con la fuente de alimentación externa del circuito de detección).
- x1 Fuente de alimentación externa 12V de 30W.

En la

Figura 21 se han indicado mediante números las partes principales que componen el circuito de control de la corriente que circula por la bobina del electroimán, a continuación se describirá cada una de las partes indicadas:

1. Es la entrada al circuito, viene directamente de la tarjeta “FPGA Spartan 3E starter kit Board”, y contendrá la señal de control modulada en PWM. Esta señal viene acompañada de su referencia que está conectada a la masa de señales.



2. El circuito de control de la corriente contiene un regulador de tensión positiva de 5V modelo L7805CV [24] llamado **U2**. El regulador de tensión **U2** está acompañado de dos condensadores **C3** y **C4** de filtrado de la señal en la entrada y salida del **U2**, y evitar así ruido indeseado que venga de la fuente de alimentación y se propague a la salida de 5 V del regulador.

3. Es un transistor tipo MOSFET de canal N modelo STD12NF06L [35] llamado **Q2**. Este transistor será polarizado en modo de “drenador común” [34]. La función de **Q2** es la de amplificar la señal que proviene de la FPGA y adaptarla a los requisitos de corriente del optoacoplador modelo HCPL0600 y la salida de la FPGA. El objetivo de esta etapa intermedia es la de proteger la FPGA ante excesos de corriente solicitadas por el optoacoplador, su uso se justifica de la siguiente manera:

- En primer lugar como podemos ver en la página 124 del documento [29] todos los pines del conector J4 son IOSTANDARD LVTTTL. Este tipo de entrada/salida IOSTANDARD LVTTTL de la FPGA Spartan 3E, según la hoja de características del fabricante, página 121 de [36], tienen como corriente de salida entre 2 y 16mA
- En segundo lugar la corriente necesaria para el funcionamiento del optoacoplador HCLP0600 [37] entre 7 y 15 mA.

Para asegurar el funcionamiento esta etapa amplificadora se compone del MOSFET **Q2**, que amplificará la señal y suministrará la corriente que necesita el optoacoplador y sin apenas retardo en su respuesta, ya que los tiempos de bajada y subida son de pocos nanosegundos [35].

4. Es el optoacoplador HCPL0600 [37] que separa dos zonas, la zona que tiene como referencia la masa de señales digitales (**GND**) y la zona que tiene como referencia la masa de señales de potencia (**GND_POT**).

5. El circuito de control de la corriente contiene un regulador de tensión positiva de 8V modelo L7808CV [24] llamado **U4**. El regulador de tensión **U4** está acompañado de dos condensadores **C6** y **C7** de filtrado de la señal en la entrada y salida del **U4**, y evitar así ruido indeseado que

venga de la fuente de alimentación y se propague a la salida de 8 V del regulador.

6. Es un transistor tipo MOSFET de canal N modelo IRF520N [38] llamado **Q3**. Este transistor será polarizado en modo de “drenador común” [34]. La función de **Q3** es la de amplificar la señal que proviene del optoacoplador modelo HCPL0600 [37] para poder excitar correctamente el transistor BJT de potencia **Q4**.
7. Es un transistor de unión bipolar o BJT de tipo NPN modelo BUY89 [39] llamado **Q4**. Este transistor será polarizado como “emisor común” [27]. Este transistor es el encargado de suministrar la corriente a la bobina del electroimán a través de la conmutación de la salida de la bobina del electroimán con masa, la señal de control de la conmutación del transistor **Q4** será la señal de control modulada en PWM salida de la tarjeta “FPGA Spartan 3E Starter Kit Board” tras ser aislada y amplificada por el circuito de control de la corriente.
Debido a que el transistor **Q4** va a conmutar con una señal PWM una corriente de alrededor de 1 amperio, en el transistor **Q4** va a ser instalado un disipador de calor que asegure la integridad del transistor frente a largos periodos de funcionamiento.
8. Esta es la bobina del electroimán, que estará instalada en la estructura de madera, ya explicada en el apartado anterior (**Figura 19**).

NOTA: la foto real del circuito completo de control de la corriente se mostrará en la **Figura 27**.

Para finalizar la construcción del hardware de control de la corriente de la bobina se realizará una prueba real del circuito con la que obtendremos la curva de calibración del hardware, que usaremos en etapas posteriores para la configuración de la señal de salida del control modulada en ancho de pulso (PWM).

La curva de calibración del hardware de control de la corriente de la bobina se ha realizado mediante la medida de la corriente que circula por la bobina del electroimán mediante cambios en el ancho de pulso de una señal cuadrada de 5Khz de frecuencia (que será la frecuencia de la señal portadora en la salida del control, la justificación de esta frecuencia está explicada en el apartado de generador de señal PWM dentro del apartado de “Configuración hardware de la FPGA”).

La señal cuadrada utilizada en la prueba será generada por la propia FPGA Spartan 3E. La generación de la señal cuadrada de prueba por parte de la FPGA que se usará en el sistema de levitación magnética nos dará una medida más real del comportamiento del hardware de control de la corriente y por eso se ha decidido su utilización en vez del uso de un generador de funciones comercial.

El uso de la FPGA como generador de funciones conlleva un trabajo extra ya que se debe crear una configuración del hardware para la generación de la señal cuadrada.

A continuación en la imagen de la

Figura 22 se muestra el generador de onda cuadrada realizado en bloques de Xilinx dentro de Simulink, para la creación del generador se ha seguido los principios del generador de señales moduladas en ancho de pulso mediante una señal portadora en forma de sierra y de 5 KHz de frecuencia.

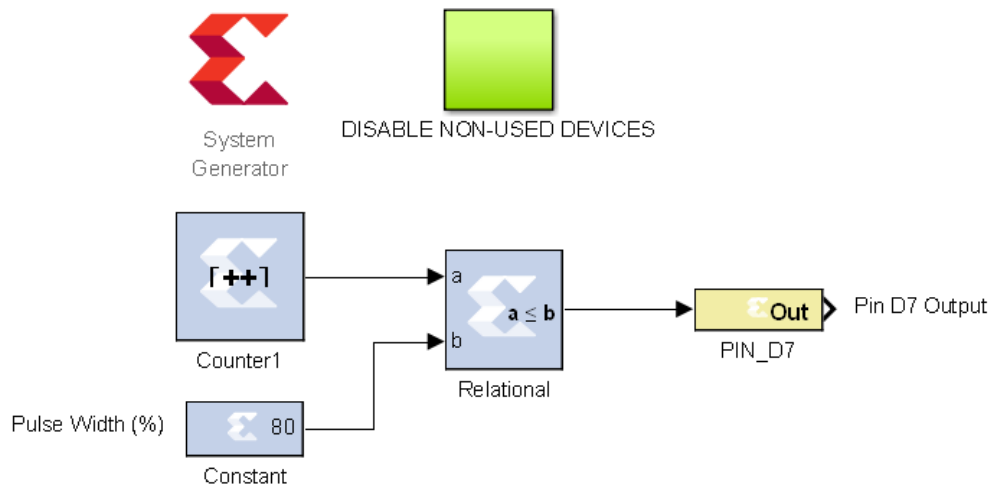


Figura 22. Esquema de bloques de Xilinx del generador de onda cuadrada

El generador mostrado en la

Figura 22 se compone de un contador de 7 bits, limitado a 100 estados, desde 0 hasta 99, con una frecuencia de 5KHz, es decir, que tardará 0.2ms en pasar por todos los estados y volver al estado inicial. Por otro lado tendremos una constante que será el ancho de pulso de la señal de salida del generador. El tercer elemento es un comparador que compara el estado del contador con el de la constante obteniendo como salida una señal cuadrada con el ancho de pulso deseado (en la imagen aparece como ejemplo de ancho de pulso el 80%). Cambiando este ancho de pulso se obtiene la curva de calibración completa.

A continuación se muestran las imágenes (**Figura 23,**

Figura 24,

Figura 25) tomadas desde un osciloscopio de mesa, señales de salida con diferentes anchos de pulso para comprobar que el generador de onda cuadrada funciona correctamente:

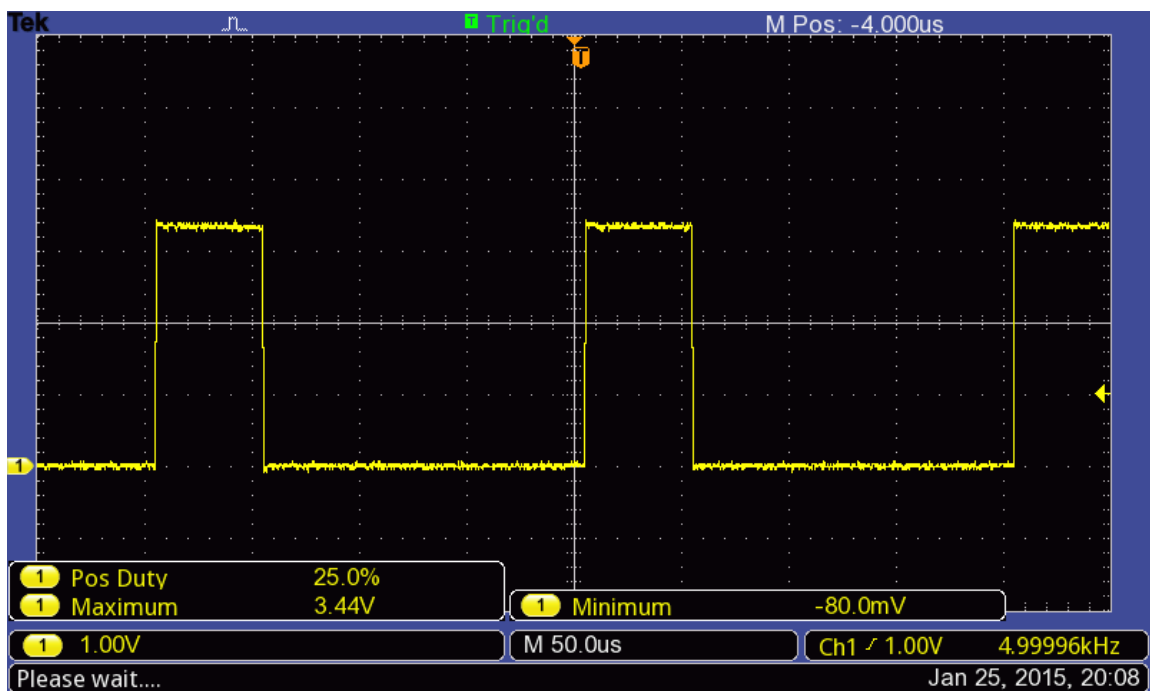


Figura 23. Imagen tomada del osciloscopio mostrando la señal cuadrada de 25% de ciclo de trabajo generada.

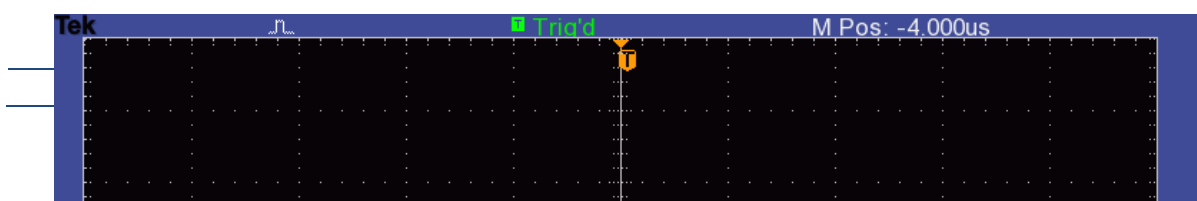


Figura 24. Imagen tomada del osciloscopio mostrando la señal cuadrada de 50% de ciclo de trabajo generada.

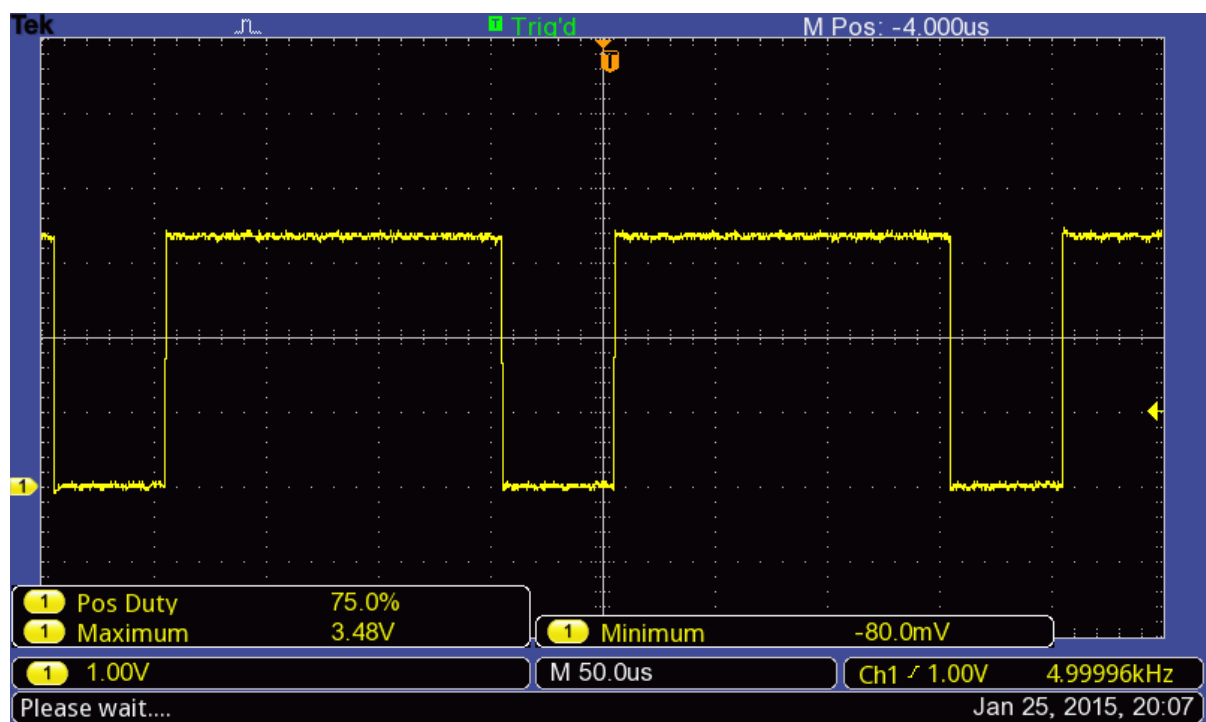


Figura 25. Imagen tomada del osciloscopio mostrando la señal cuadrada de 75% de ciclo de trabajo generada.



Como podemos observar en las imágenes anteriores de las señales reales de las ondas cuadradas generadas (**Figura 23**,

Figura 24,

Figura 25), tienen el ancho de pulso requerido.

Una vez comprobado que la señal cuadrada está correctamente generada, se conecta la señal generada a la entrada del hardware de control de la corriente (
(

Figura 28) y se mide la corriente que circula por la bobina del electroimán para cada una de los ciclos de trabajo de las señales cuadradas generadas, obteniéndose como resultado la curva de calibración mostrada en la

Figura 26.

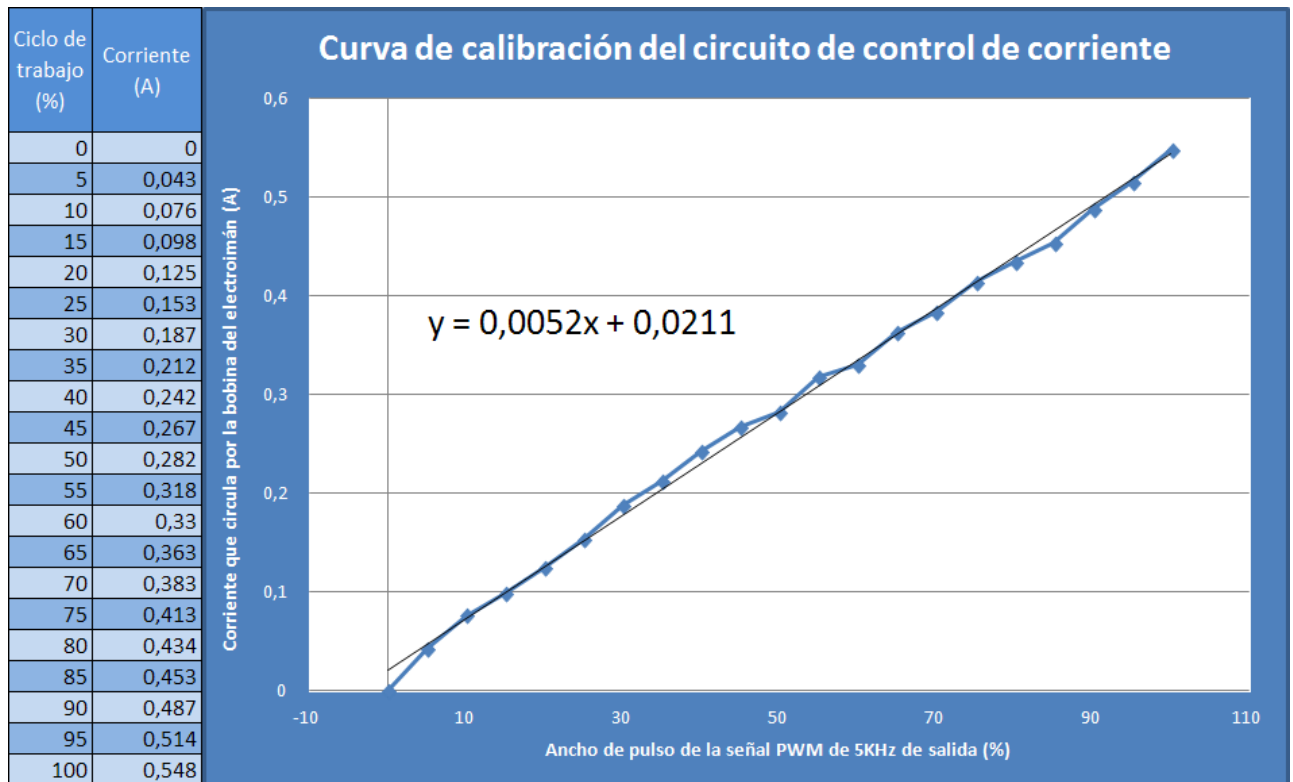


Figura 26. Curva de calibración del circuito de control de corriente

La curva de calibración de la

Figura 26 nos muestra una relación lineal entre el ciclo de trabajo de la señal cuadrada de entrada al circuito de control de la corriente con el nivel de corriente que circula por la bobina del electroimán.

Para poder usar el ciclo de trabajo como una función lineal a la corriente se ha linealizado la curva de calibración, mostrándose la linealización sobre el gráfico de la

Figura 26.

Como podemos observar en la figura la ecuación que obtenemos de la linealización del hardware de control de la corriente será la siguiente:

$$y(A) = 0,0052 x(D\%) \quad (5)$$

En la ecuación (5) ha eliminado la componente fija de la ecuación linealizada ya que es aproximadamente cero.

Esta ecuación será usada posteriormente por el sistema de control para adaptar la señal de salida del control a los requisitos del sistema.

La ecuación (5) muestra que la corriente es menor de la deseada, ya que para un ancho de pulso del 100% la corriente llega a sólo 548 mA, lo que conllevará problemas en la fuerza del electroimán necesaria para conseguir la levitación.

3.2.5. Montaje físico de los circuitos

En este apartado se mostrará el montaje real de los circuitos utilizados. Este montaje sigue el “esquema detallado del sistema de levitación magnética” mostrado en la **Figura 9**.

En la siguiente imagen (**Figura 27**) se muestra el montaje real y las conexiones de los circuitos que se usaran en el sistema.

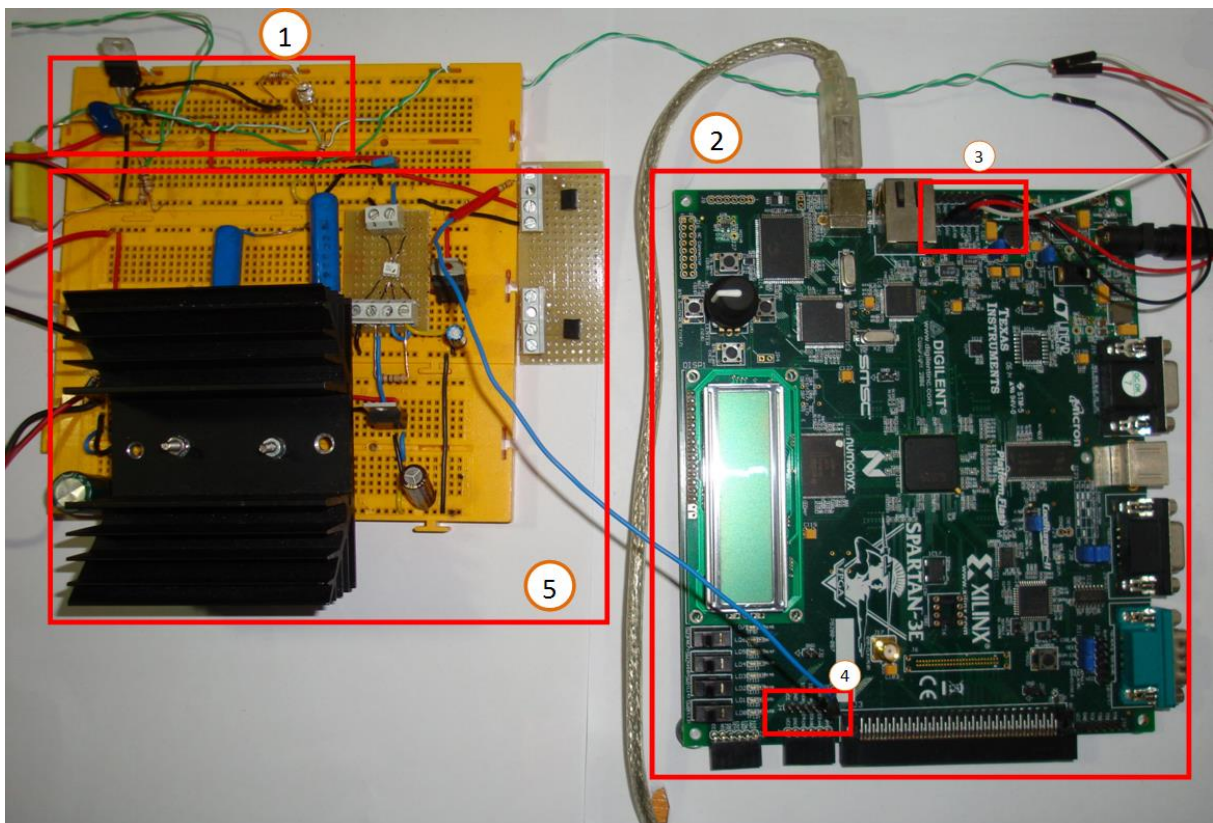


Figura 27. Foto real de la circuitería del sistema de levitación magnética

En la **Figura 27** se han indicado mediante números las partes principales que componen la circuitería del sistema de levitación magnética. Estos grupos son los mismos que los mostrados anteriormente en el “esquema detallado del sistema de levitación magnética” de la **Figura 9** pero la imagen de la **Figura 27** no contienen los componentes que están instalados en la estructura de madera. A continuación se describirá cada una de las partes indicadas:

1. Es el circuito de detección que tiene como entradas una alimentación de 9V y tiene las conexiones del emisor y receptor de IR que estarán instalados en la estructura de madera. Su salida es la que está conectada al conector A/D in (3 en la foto). Este circuito forma parte, junto a la barrera de infrarrojos instalada en la estructura de madera, del “Hardware de medida de posición” indicado en la **Figura 9**.
2. Es la tarjeta “FPGA Spartan 3E Starter kit Board”, que contendrá el sistema de control, tal y como indica la **Figura 9**.
3. Es la entrada de la señal analógica que contiene la información de la posición de la esfera metálica.
4. Es el conector J4, que es donde estará el pin de la señal modulada en ancho de pulso (PWM) que controlará la corriente de la bobina.
5. Es el circuito de control de la corriente de la bobina del electroimán (**Figura 28** muestra con más detalle este circuito). Este circuito forma parte, junto al electroimán instalado en la estructura de madera, del “Hardware de control de la corriente de la bobina” indicado en la **Figura 9**.

En la siguiente imagen (

Figura 28) se muestra con más detalle el montaje del circuito de control de la corriente.

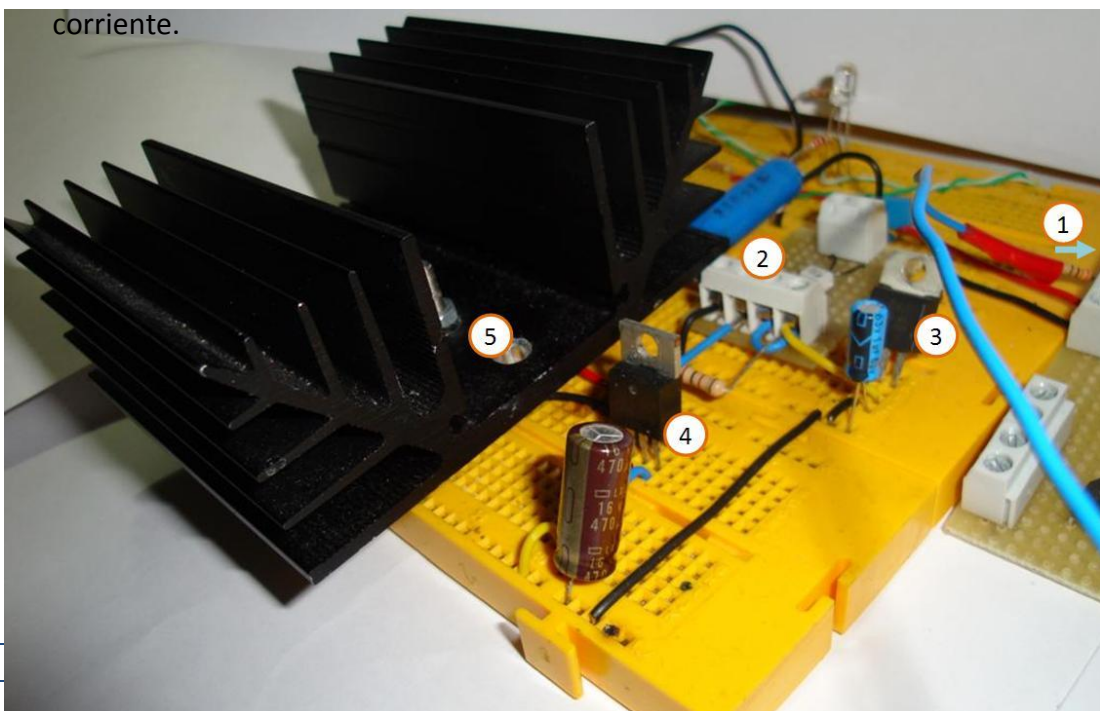


Figura 28. Foto real del circuito de control de corriente de la bobina del electroimán

En la

Figura 28 se han indicado mediante números las partes principales que componen el circuito de control de la corriente, a continuación de describirá cada una de las partes indicadas:

1. Es la entrada de la señal PWM, la flecha indica el lugar donde está el transistor MOSFET STD12NF06L.
2. Es una placa PCB donde está soldado el optoacoplador HCLP0600 que separará la zona de potencia de la zona de señales digitales.
3. Es el regulador de tensión L7808CV.
4. Es el transistor MOSFET IRF520N.

Es el transistor BJT NPN de potencia BUY89 con el disipador de calor instalado.

3.3. Configuración hardware de la FPGA

A continuación se va a desarrollar la configuración hardware de la FPGA Spartan 3E de la tarjeta de desarrollo “FPGA Spartan 3E Starter Kit Board”.

La configuración del hardware de la FPGA Spartan 3E se debe incluir, tal y como muestra el esquema detallado del sistema de la **Figura 9**, un sistema de comunicación para controlar el pre-amplificador y el convertor analógico-digital, incluido en la placa de desarrollo, un control PID y generador de señal modulada en ancho de pulso (PWM) para crear la señal de salida del control.

La configuración hardware de la FPGA Spartan 3E se va a realizar a través del uso de la herramienta software Simulink de MATLAB, pero usando los bloques de Xilinx que tienen asociado un código HDL evitando la necesidad de usar el programa ISE Design Suite, salvo en ciertas pruebas puntuales. En otras palabras, gracias al uso de bloques de Xilinx en Simulink podremos crear todos los archivos necesarios para configurar el hardware de la FPGA sin necesitar terceros programas.

Antes de comenzar con la explicación de la configuración hardware de la FPGA Spartan 3E se va a describir todos los componentes y conectores usados por el sistema de la tarjeta de desarrollo usada: “FPGA Spartan 3E Starter Kit”.

3.3.1. Componentes usados de la tarjeta de desarrollo

En este apartado se describirá el proceso de diseño, construcción y prueba de correcto funcionamiento de los componentes diseño y construcción propia.

Estos componentes son la estructura, el electroimán y los circuitos de detección de la posición de la esfera metálica y de control de la corriente de la bobina del electroimán.

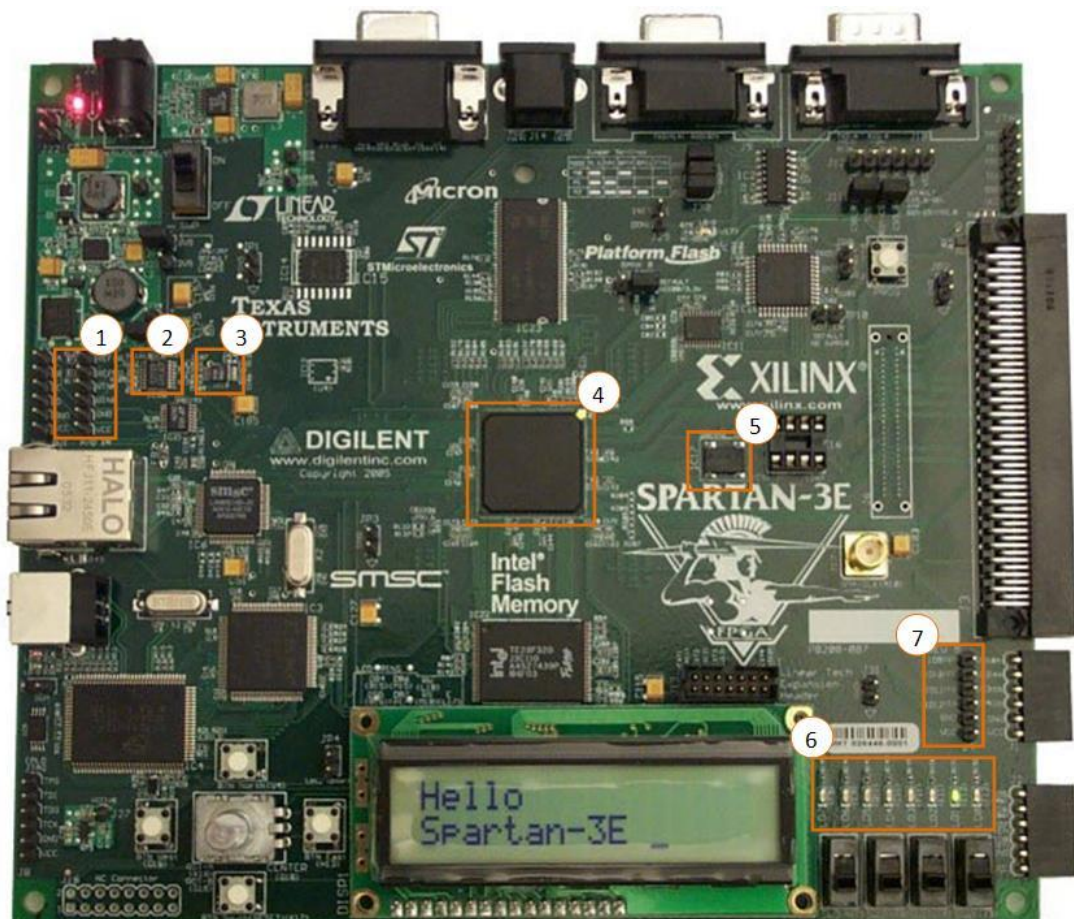


Figura 29. Componentes usados de la tarjeta Spartan-3E Starter Kit Board

La **Figura 29** muestra los componentes principales que se han usado y su ubicación en la tarjeta “FPGA Spartan-3E Starter Kit Board”. Los componentes que vamos a usar para la realización del proyecto son los siguientes:

1. Pines de entrada para señales analógicas, usaremos esta tira de pines para conectar la señal analógica PV que nos indicará la posición de la esfera al levitar.
2. Pre-amplificador programable LTC6912 de Linear Technology [40]. El pre-amplificador trabaja junto al conversor analógico para capturar señales analógicas.
3. Conversor analógico-digital LTC1407A de Linear Technology [42].
4. FPGA Spartan 3E de Xilinx [36].
5. Oscilador de 50MHz usado como reloj en la FPGA.
6. Array de LEDs usado para la visualización rápida de la posición del objeto levitante.
7. Conector J4 contiene los pines de salida para la señal modulada en PWM que usaremos para controlar la corriente que circula por la bobina del electroimán.

Para realizar la descripción hardware del circuito en lenguaje de descripción hardware se usarán dos software, el ISE Design Suite de Xilinx y el Simulink-MATLAB de Mathworks. Estos dos software, en sus versiones más modernas, incluyen la posibilidad de usar el entorno gráfico de Simulink con bloques de Xilinx asociados a lenguaje de descripción hardware. Esto permite el uso del entorno de Simulink, con todas sus herramientas de simulación avanzadas, en paralelo con los nuevos bloques que proporciona Xilinx con el ISE Design Suite [41].

Esta combinación facilitará la configuración del hardware, facilitando su desarrollo modular, de sistemas y sub-sistemas, como se mostrará en el desarrollo a continuación.

A continuación se detallará paso a paso la programación en bloques de Xilinx en Simulink necesaria para controlar los componentes anteriormente señalados. Para el orden de la descripción de la configuración hardware se ha seguido el esquema de la **Figura 9**.

3.3.2. Pre-Amplificador

La señal de posición del objeto que levita va a venir dada por una señal analógica que tendrá una amplitud configurable y su respuesta en voltaje es lineal en la zona en la que se va a trabajar (**Figura 15**). Éste rango se elegirá teniendo en cuenta el rango de entrada del conversor A/D.

Para adaptar la señal analógica de entrada al convertor A/D usamos un pre-amplificador modelo LTC6912-1 [40] integrado en la tarjeta “FPGA Spartan 3E starter kit”.

El componente LTC6912-1 es un pre-amplificador de dos canales con ganancia programable a través de un interface SPI, su misión es la de adaptar la señal analógica entrante, que para cada aplicación tendrá un rango variable, a un rango de salida fijo de -1,25V a +1,25V que es el rango de entrada del convertor A/D que vendrá tras el pre-amplificador.

Para controlar el pre-amplificador debemos establecer, al igual que con el convertor analógico digital, una comunicación por protocolo SPI que se configurará a través de bloques de Xilinx en el entorno gráfico de Simulink.

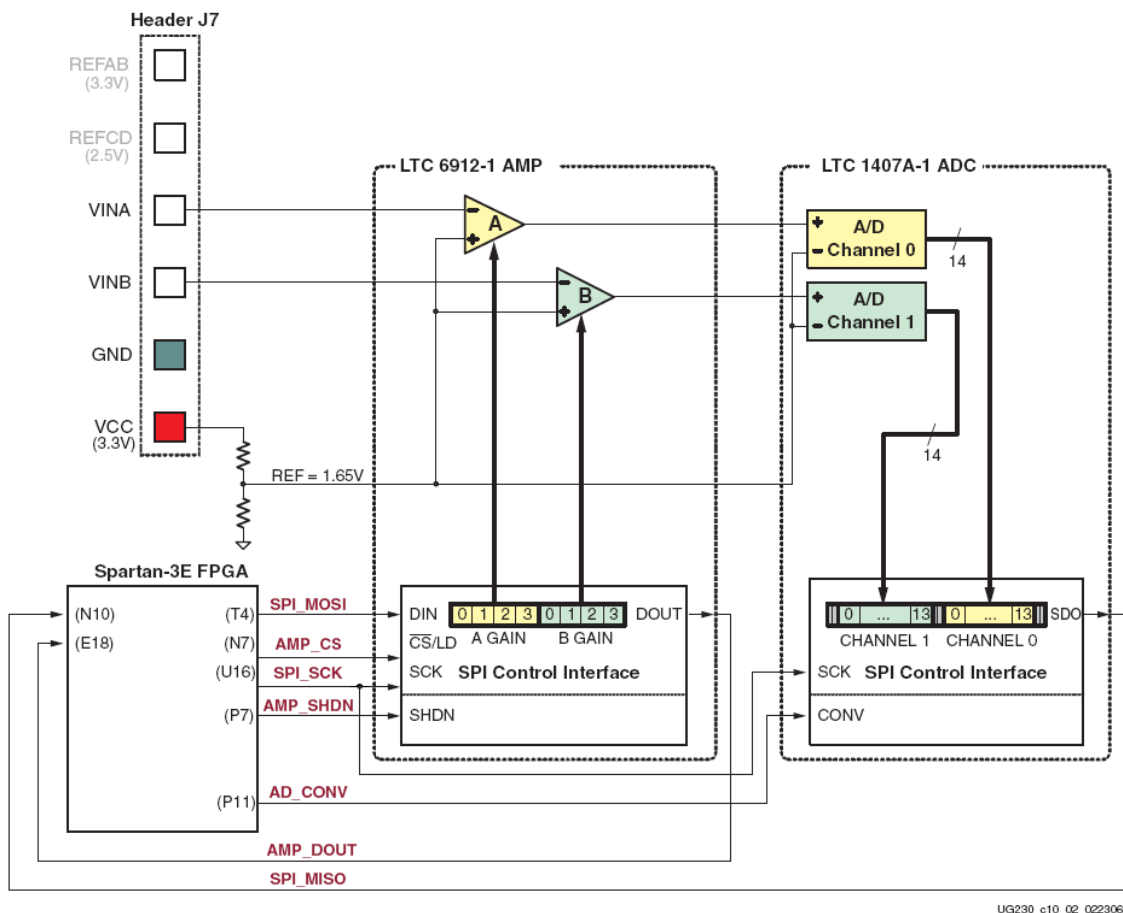


Figura 30. Sistema de captura analógica [29]

En la **Figura 30** podemos observar los bloques básicos del conjunto pre-amplificador y convertor analógico digital, los puertos a los que están conectados en la FPGA y los componentes de la comunicación SPI que necesita cada uno de los dispositivos.

En la **Figura 30** podemos observar los puertos de la FPGA a los que están rutados en la tarjeta “FPGA Spartan 3E starter kit Board” los cuatro componentes de la comunicación SPI (SCK, CS, SPI_MISO y SPI_MOSI) y componentes particulares del amplificador LTC 6912 como el AMP_SHDN que no se usarán para éste proyecto:

- SCK (reloj) al puerto “**U16**”
- AMP_CS (pulso de sincronización) al puerto “**N7**”
- SPI_MOSI (datos en serie de salida del maestro y entrada al esclavo) al puerto “**T4**”
- SPI_MISO (datos en serie de entrada al maestro y salida del esclavo) no necesitará enviar datos desde el amplificador a la FPGA.

Una vez localizados los puertos que vamos a usar, reproduciremos la trama de bits necesaria **Figura 31**, para configurar el valor de ganancia deseado.

Table 10-2: Programmable Gain Settings for Pre-Amplifier

Gain	A3	A2	A1	A0	Input Voltage Range	
	B3	B2	B1	B0	Minimum	Maximum
0	0	0	0	0		
-1	0	0	0	1	0.4	2.9
-2	0	0	1	0	1.025	2.275
-5	0	0	1	1	1.4	1.9
-10	0	1	0	0	1.525	1.775
-20	0	1	0	1	1.5875	1.7125
-50	0	1	1	0	1.625	1.675
-100	0	1	1	1	1.6375	1.6625

Figura 31. Tabla de trama de datos y ganancia del LTC6912-1 [29]

En la **Figura 31** se muestra la tabla de ganancia, la trama de bits que se ha de enviar al pre-amplificador y el rango de entrada mínimo y máximo.

La ganancia que elegiremos será de “-1”, ya que nuestro circuito detector de posición ha sido diseñado a propósito para que genere una señal analógica de 0,4V a 2,9V. Con el rango de salida del circuito de detección y ganancia elegidos se conseguirá un menor ruido en la señal de entrada al convertor analógico digital, ya que la señal no necesita ser amplificada.

Para conseguir ésta ganancia de “-1” la trama de bits debe ser “0001” y al ser el pre-amplificador de dos canales se deberá enviar la trama de bits dos veces [40].

Esta trama de bits debe ser coordinada con AMP_CS y por SCK. La trama de datos que se enviará por SPI_MOSI será de la siguiente manera:

- Primero la trama de bits para configurar la ganancia del primer canal
- A continuación la trama de bits para configurar la ganancia en el segundo canal

Este orden está definido por el fabricante del pre-amplificador, mostrado en la **Figura 32**.

SERIAL INTERFACE SPECIFICATIONS

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Serial Interface Timing, Dual $\pm 4.5V \sim \pm 5.5V$ Supplies (Note 10)						
t_1	D_{IN} Valid to CLK Setup		●	30		ns
t_2	D_{IN} Valid to CLK Hold		●	0		ns
t_3	CLK High		●	50		ns
t_4	CLK Low		●	50		ns
t_5	\overline{CS}/LD Pulse Width		●	40		ns
t_6	LSB CLK to \overline{CS}/LD		●	40		ns
t_7	\overline{CS}/LD Low to CLK		●	20		ns
t_8	D_{OUT} Output Delay	$C_L = 15pF$	●		85	ns
t_9	CLK Low to \overline{CS}/LD Low		●	0		ns

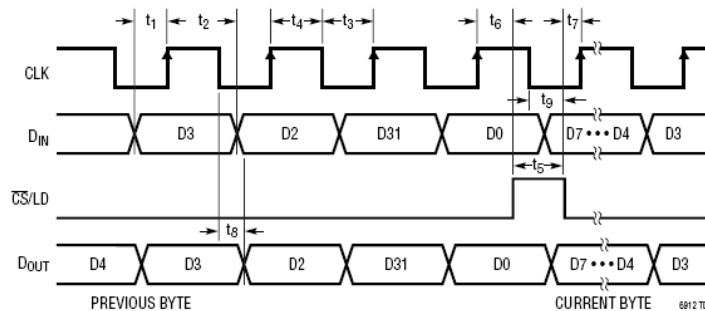


Figura 32. Trama de bits y sincronización de la comunicación del LTC6912 [40]

Aunque solo vamos a usar el segundo canal o canal B para la entrada del control, configuraremos la ganancia de los dos pre-amplificadores con la misma ganancia para facilitar la configuración del hardware, al ser la trama de bits enviada repetitiva.

La frecuencia del reloj recomendada del pre-amplificador la calculamos con la suma de t_3 y t_4 (**Figura 32**) que es el tiempo de establecimiento de la señal de reloj que da como resultado el tiempo de un ciclo completo de reloj.

$$t_{clk} = t_3 + t_4 = 100ns \text{ (6)}$$

$$f_{clk} = \frac{1}{t_{clk}} = \frac{1}{100ns} = 10MHz \text{ (7)}$$

Por tanto la frecuencia de reloj recomendada por el fabricante es de 10 MHz. Para facilitar la programación del convertor A/D (que trabaja con frecuencias de hasta 50MHz [42]) estableceremos la frecuencia de reloj en 25MHz debido a que las señales se compartirán por ambos dispositivos.

El funcionamiento del pre-amplificador a esta frecuencia superior a la recomendada será simulado y probado con una configuración de hardware que permita afirmar o refutar el uso de este valor de frecuencia.

Por tanto a modo de resumen la trama completa de bits que se enviarán al pre-amplificador será:

- **SCK:** Reloj a una frecuencia de 25MHz.
- **AMP_CS:** Estará normalmente alto y cada 8 ciclos de reloj deberá ser señal baja durante un ciclo de reloj.
- **SPI_MOSI:** enviará la trama de bit para establecer la ganancia deseada, ésta se enviará cada vez que se desactive **AMP_CS** repitiéndose cada vez y deberá estar duplicada (para cada canal). La trama deseada será "0001" por tanto desde el reinicio de **AMP_CS** se enviará "00010001" una y otra vez durante el funcionamiento del pre-amplificador.

En la

Figura 33 se mostrará la configuración hardware escrita en Simulink con bloques de Xilinx, necesaria para enviar la trama completa al pre-amplificador:

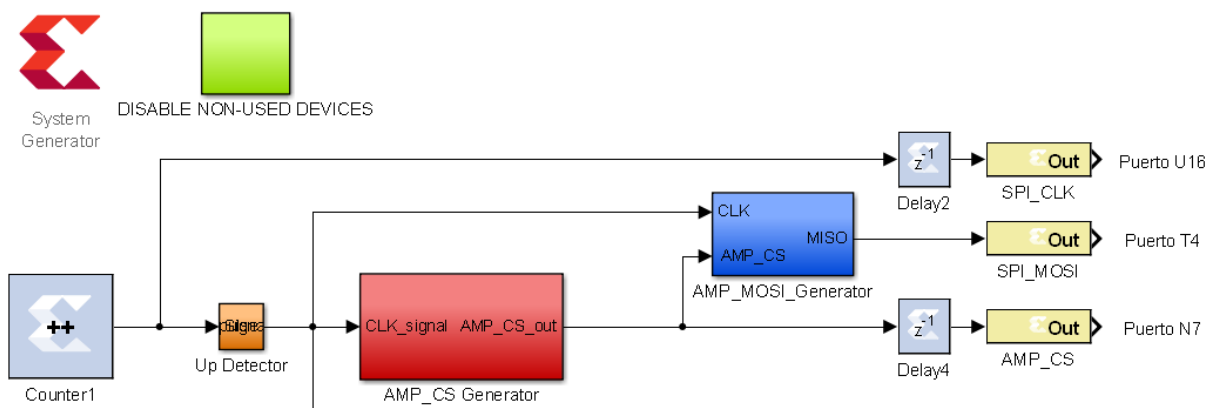


Figura 33. Programación del LTC6912, esquema general

Como se puede ver en la

Figura 33 el reloj es generado con un contador (**CLK Generator**), el cual solo tendrá dos estados (0 y 1) y estará configurado con la opción de “**free running**” la cual hace reiniciar al contador cuando llega a su máximo número posible.

Este contador nos da una señal cuadrada de 25MHz que usaremos como reloj (por eso la salida del contador está unida directamente con el puerto de salida **SPI_CLK** en la

Figura 33).

A continuación se describirán todos los bloques que aparecen en la

Figura 33, explicando el funcionamiento interno de cada uno de ellos:

- El bloque “**NON-USED DEVICES**” bloquea todos los dispositivos que usan el interface SPI de la tarjeta de desarrollo “FPGA Spartan 3E Starter kit” y que no vamos a usar, como el convertor digital analógico, SPI serial flash, etc. Tal y como recomiendan en el documento [29].
- El bloque detector de flanco de subida “**Up Detector**” se muestra en la **Figura 34**.

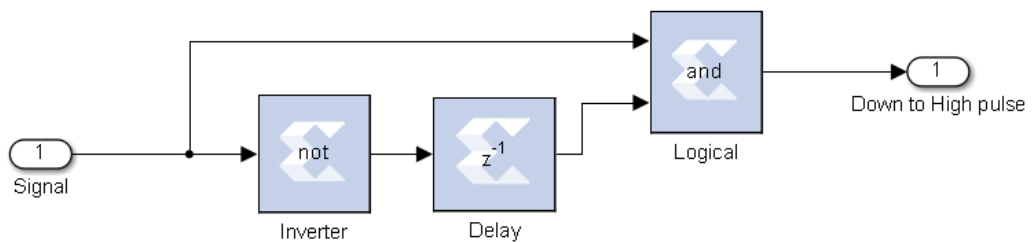


Figura 34. Programación del LTC6912, bloque “Up Detector”

El bloque “**Up Detector**” realiza la función de detección de flanco de subida de una señal digital. El bloque produce como salida un pulso de duración de un ciclo de reloj este bloque es muy útil para evitar fallos en los que la FPGA detecte señales erróneas. El bloque “**Up Detector**” Será

muy usado en la configuración hardware del resto del sistema de control.

- El bloque generador de la señal de **AMP_CS** se muestra en la
- **Figura 35.**

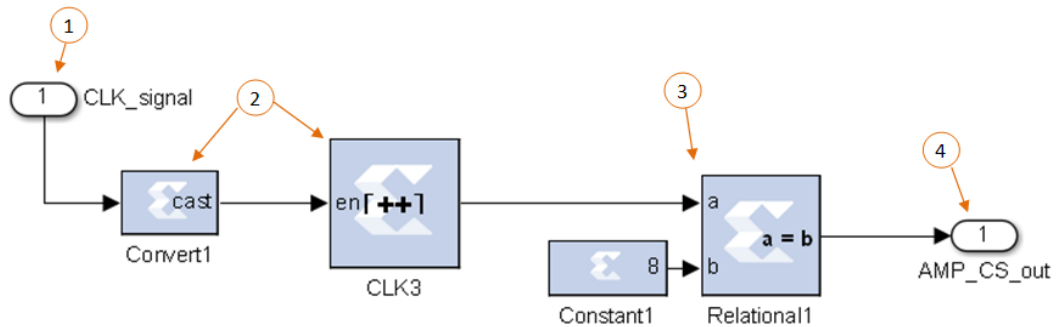


Figura 35. Programación del LTC6912, bloque AMP_CS Generator

En la

Figura 35 se muestra el generador de la señal de **AMP_CS**, se ha indicado mediante números las partes más importantes del bloque, y van a ser descritas a continuación:

1. Es la entrada al bloque, por donde vendrá la señal de reloj
2. Es un contador de 3 bits (8 estados distintos, de 0 a 7), cambiando de estado con cada señal de enable, es decir, cambiará de estado cuando reciba una señal de reloj de la FPGA si la señal de enable está activada.
El bloque "cast" reconvierte la señal de reloj definida como unsigned a formato bool para que pueda interpretarlo el bloque contador.
3. Es un comparador, cada vez que el contador anterior llegue al último estado (estado 7) emitirá una señal true.
4. Es la salida del bloque.

La salida del bloque AMP_CS Generator está unido directamente con el puerto de salida **AMP_CS**.

- El bloque generador de la señal de **SPI_MOSI** se muestra en la **Figura 36**

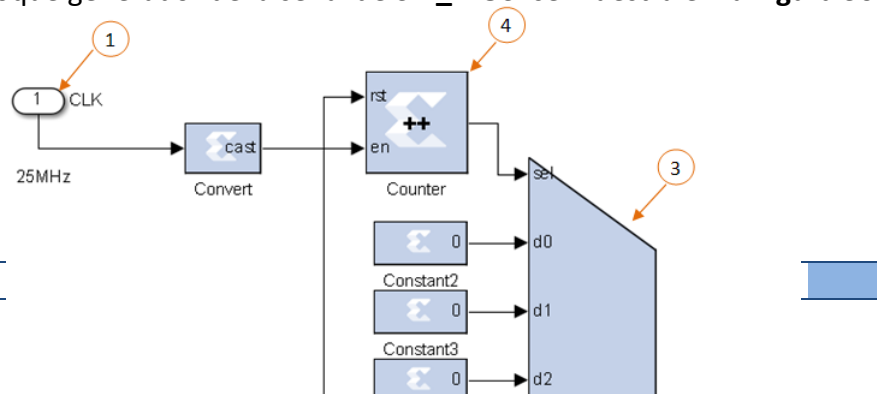


Figura 36. Programación del LTC6912, bloque AMP_MOSI Generator

En la **Figura 36** en la que se muestra el generador de la señal de **SPI_MOSI** se ha indicado mediante números las partes más importantes del bloque, y van a ser descritas a continuación:

1. Es la entrada al bloque, por donde se recibe la señal de reloj.
2. Es la entrada al bloque, por donde vendrá la señal de **AMP_CS**.
3. Es un multiplexor que tiene la trama de bit deseada en cada una de sus entradas: "00010001", su selector está dirigido por la señal de reloj y su señal de enable estará dirigida por la señal de **AMP_CS**.
4. Es un contador de 3 bits y su salida será el selector del multiplexor. El contador cambia de estado cada vez que recibe una señal de flanco de subida de reloj, y se reseteará con cada señal alta (o TRUE) de **AMP_CS**.
5. Es un inversor que hará que la señal de **AMP_CS** sea normalmente TRUE y será la señal de enable del multiplexor.
6. Es la salida del bloque.

Tras el desarrollo de la descripción hardware de la comunicación SPI con el pre-amplificador se mostrará la simulación de la generación de las señales.

Antes de enviar las señales generadas se usará la opción de simular el código HDL contenido en los bloques de Xilinx para observar una simulación de la generación de señales y así evitar posibles daños al pre-amplificador



producidos por una generación de señales errónea. Para la simulación se observarán las señales de reloj **SPI_CLK**, **SPI_MOSI** y **AMP_CS**.

Los resultados de la simulación serán mostrados a continuación en la **Figura 37**.

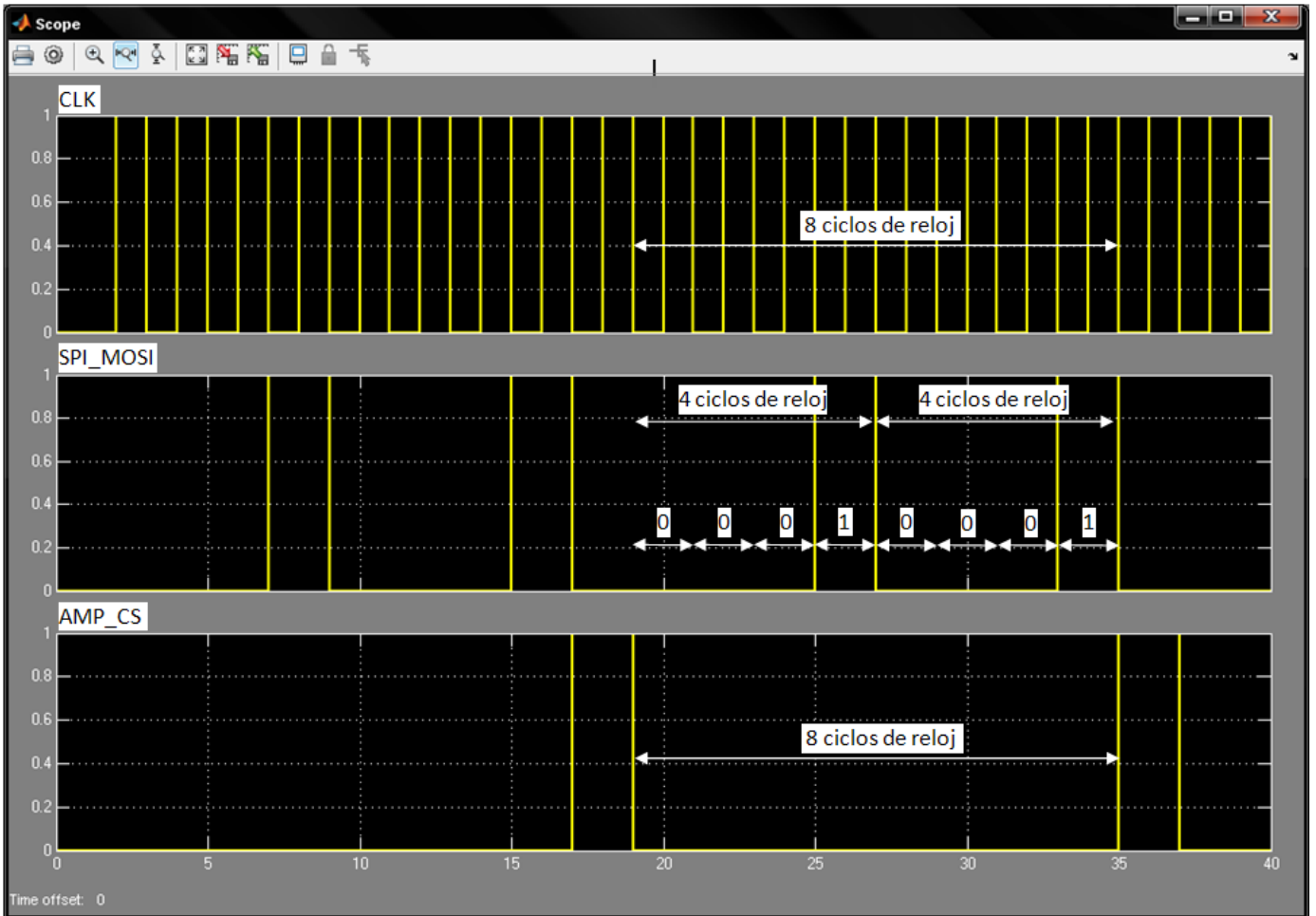


Figura 37. Programación del LTC6912, simulación

Como podemos observar en la **Figura 37** las señales son generadas de acuerdo a las especificaciones del fabricante del pre-amplificador [40].

Tras obtener unos resultados en la simulación correctos, **Figura 37**. Se carga la configuración hardware en la FPGA y se comprueba la generación real de las señales simuladas. Esta comprobación se realizará con ayuda de un osciloscopio, mostrando capturas de pantalla del osciloscopio en las siguientes imágenes (

Figura 38, Figura 39, Figura 40).

Para poder hacer tomas de medidas correctas se duplicarán las señales enviadas al pre-amplificador hacia los pines del conector J4 mostrado en la **Figura 29**.

Al usar un osciloscopio de mesa de dos canales, se han realizado tres capturas de pantalla:

La primera captura del osciloscopio (

Figura 38) corresponde a la toma de medida de la señal de **CLK** frente a la señal de **AMP_CS**.

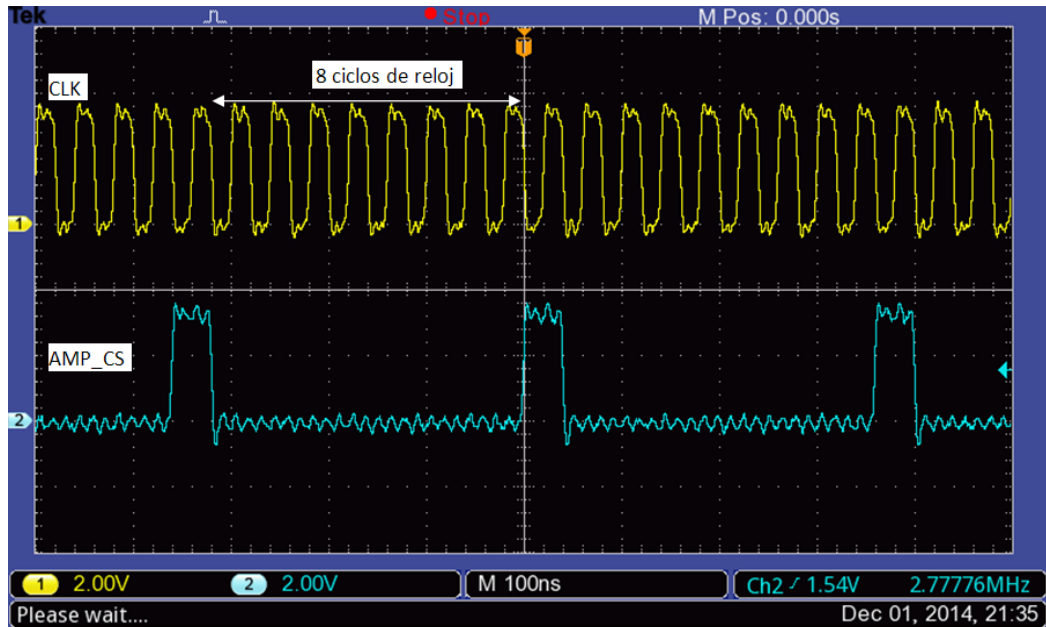


Figura 38. Programación del LTC6912, Comprobación del funcionamiento real de las señales CLK y AMP_CS.

La

Figura 38 muestra la señal de **CLK** y de **AMP_CS** para medir la coordinación entre ambas, para ello se ha indicado los ocho ciclos de reloj que hay entre dos señales de **AMP_CS** tal y como requiere el fabricante del pre-amplificador [40].

La segunda captura del osciloscopio (**Figura 39**) corresponde a la toma de medida de la señal de **AMP_CS** frente a la señal de **SPI_MOSI**.

La **Figura 39** muestra la señal de **AMP_CS** y de **SPI_MOSI** para medir la coordinación entre ambas, para ello se ha indicado los ocho ciclos de reloj que hay entre dos señales de **AMP_CS** mostrado en la

Figura 38 para poder señalar la trama de bits enviada por **SPI_MOSI** correspondiendo esta a la trama de bits de configuración de la ganancia “-1” deseada **Figura 31**.

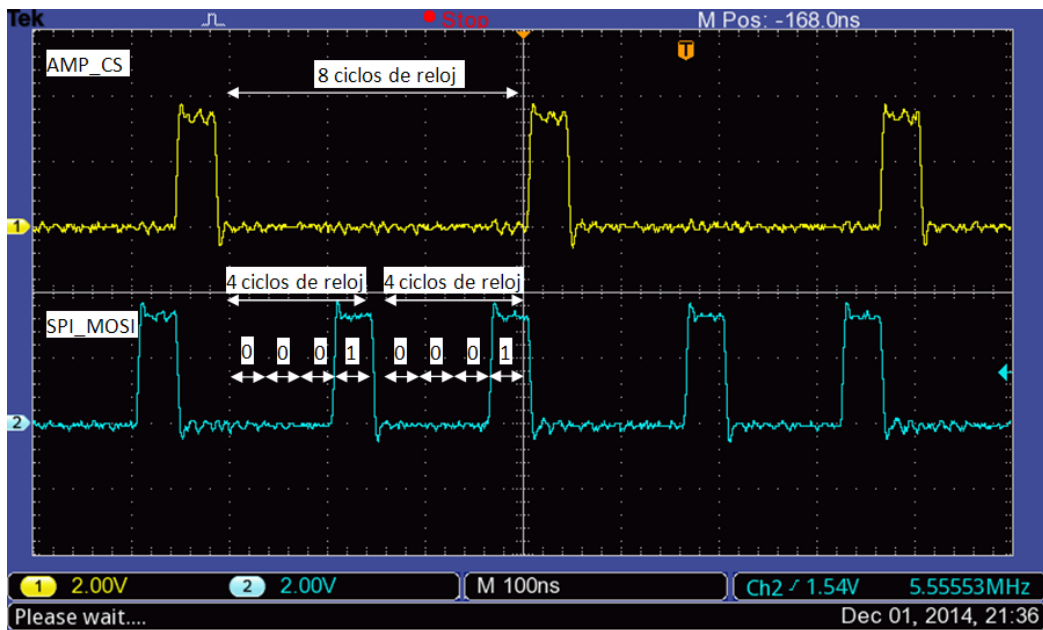


Figura 39. Programación del LTC6912, Comprobación del funcionamiento real de las señales AMP_CS y SPI_MOSI

La tercera captura del osciloscopio (**Figura 40**) corresponde a la toma de medida de la señal de **SPI_MISO** frente a la señal de **SPI_MOSI**.

Tal y como se describe [40] en pre-amplificadores que funcionan correctamente la señal **SPI_MISO** es una copia de la señal **SPI_MOSI** pero retrasado un ciclo de reloj, tal y como muestra la **Figura 40**.

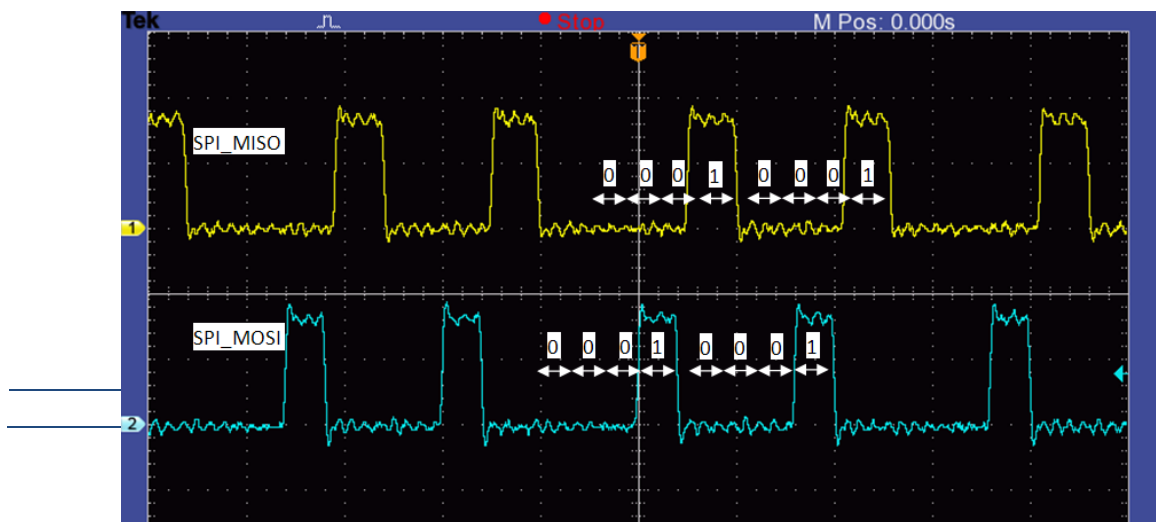


Figura 40. Programación del LTC6912, Comprobación del funcionamiento real de las señales AMP_SPI_MISO y SPI_MOSI

Por tanto se comprueba así que el pre-amplificador funciona correctamente a pesar de trabajar a una frecuencia de reloj superior a la recomendada.

3.3.3. Conversor Analógico-Digital (ADC)

El ADC que usaremos será el LTC1407A-1 como ya hemos expuesto antes [42].

El componente LTC1407A-1 es un conversor analógico digital de dos canales que convierte señales analógicas de rango -1.25V a 1.25V a un número binario de 14 bits codificado en complemento a 2. La velocidad de muestreo alcanzada es de hasta 1,5 Msps (1,5 millones de muestras por segundo) para cada uno de los canales y la comunicación con el componente para leer los datos que registra será mediante una interface SPI [42].

Como podemos ver en la **Figura 30** los puertos a los que la FPGA está rutada con los pines del bus SPI con el conversor A/D son los siguientes:

- **SCK** (reloj) al puerto “U16”
- **AD_CONV** (pulso de sincronización) al puerto “P11”
- **SPI_MISO** (datos en serie de entrada del maestro y salida del esclavo) al puerto “N10”
- **SPI_MOSI** (datos en serie de salida del maestro y entrada en el esclavo) no necesitará enviar datos desde la FPGA hacia el conversor A/D ya que el modelo LTC1407A-1 no es programable y solo es un dispositivo de lectura.

Una vez localizados los puertos que vamos a usar, vamos a la hoja de características del fabricante del componente LTC1407A-1 para configurar las señales de reloj y de CS para sincronizar el dispositivo y los tiempos para la lectura de los datos de los canales del conversor.

LTC1407-1/LTC1407A-1

TIMING CHARACTERISTICS

The ● denotes the specifications which apply over the full operating temperature range, otherwise specifications are at $T_A = 25^\circ\text{C}$. $V_{DD} = 3\text{V}$.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
$f_{\text{SAMPLE(MAX)}}$	Maximum Sampling Frequency per Channel (Conversion Rate)		●	1.5		MHz
$t_{\text{THROUGHPUT}}$	Minimum Sampling Period (Conversion + Acquisition Period)		●		667	ns
t_{SCK}	Clock Period	(Note 16)	●	19.6	10000	ns
t_{CONV}	Conversion Time	(Note 6)		32	34	SCLK cycles
t_1	Minimum Positive or Negative SCLK Pulse Width	(Note 6)		2		ns
t_2	CONV to SCK Setup Time	(Notes 6, 10)		3	10000	ns
t_3	SCK Before CONV	(Note 6)		0		ns
t_4	Minimum Positive or Negative CONV Pulse Width	(Note 6)		4		ns
t_5	SCK to Sample Mode	(Note 6)		4		ns
t_6	CONV to Hold Mode	(Notes 6, 11)		1.2		ns
t_7	32nd SCK↑ to CONV↑ Interval (Affects Acquisition Period)	(Notes 6, 7, 13)		45		ns
t_8	Minimum Delay from SCK to Valid Bits 0 Through 11	(Notes 6, 12)		8		ns
t_9	SCK to Hi-Z at SDO	(Notes 6, 12)		6		ns
t_{10}	Previous SDO Bit Remains Valid After SCK	(Notes 6, 12)		2		ns
t_{12}	V_{REF} Settling Time After Sleep-to-Wake Transition	(Notes 6, 14)		2		ms

LTC1407A-1 Timing Diagram

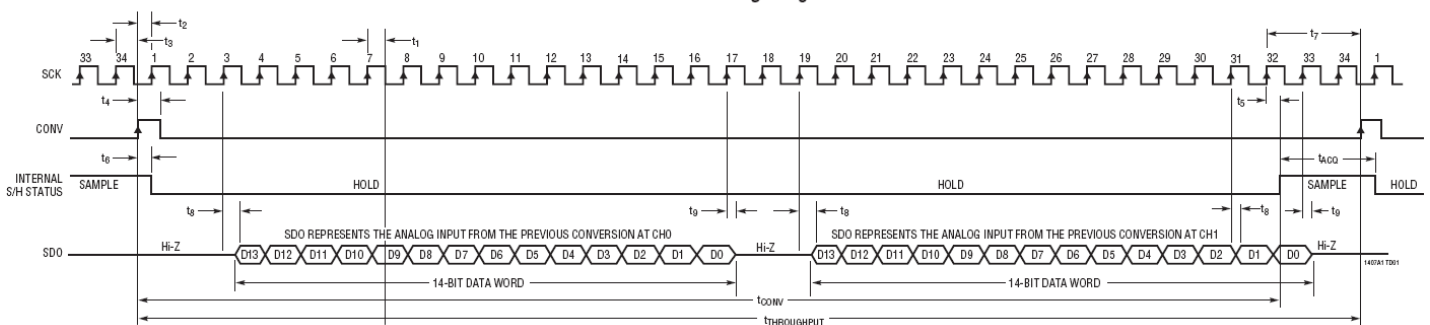


Figura 41. Trama de bits y sincronización de la comunicación del LTC1407A-1 [42].

Como podemos ver la

Figura 41 el tiempo de reloj mínimo (t_{SCK}) es de aproximadamente 20ns. Usando las ecuaciones siguientes obtenemos la frecuencia mínima de reloj recomendada.

$$f_{clk\ máx} = \frac{1}{t_{SCK}} = \frac{1}{20ns} = 50MHz \quad (8)$$

El tiempo máximo que admite el conversor A/D según es de 10000 ns. Es decir que la frecuencia máxima recomendada es:

$$f_{clk\ mín} = \frac{1}{t_{SCK}} = \frac{1}{10000ns} = 0,1MHz \quad (9)$$

Por lo tanto nuestro conversor A/D LTC1407A-1 aceptará sin problemas la frecuencia de reloj de 25 MHz que establecimos para el interface SPI del pre-amplificador LTC6912-1 y que como vemos en el esquema de la circuitería mostrado en la **Figura 30** ambos comparten.

Teniendo en cuenta la

Figura 41 la trama de datos que se debe lanzar y recibir al conversor A/D desde la FPGA será:

- **SCK:** Reloj a una frecuencia de 25MHz
- **AD_CS:** Estará normalmente baja y cada 34 ciclos de reloj deberá ser señal alta durante un ciclo de reloj.
- **SPI_MISO:** recibirá la señal analógica convertida a un número binario. La trama será de 14 bits codificado en complemento a 2 por cada uno de los canales.

En la

Figura 33 se mostrará la configuración hardware escrita en Simulink con bloques de Xilinx, necesaria para comunicarse con el conversor analógico digital:

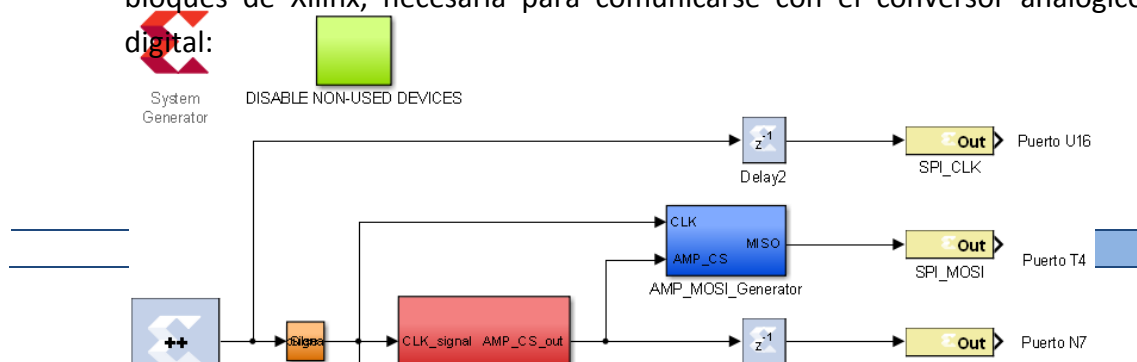


Figura 42. Programación del LTC1407A-1, esquema general

A continuación se describirán todos los bloques que aparecen en la **Figura 33**, explicando el funcionamiento interno de cada uno de ellos:

- El bloque generador de la señal de **ADC_CS** se muestra en la **Figura 43**:

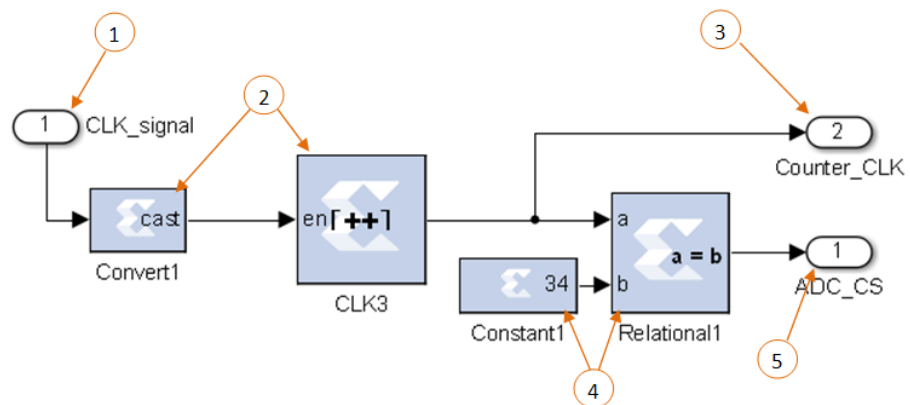


Figura 43. Programación del LTC1407A-1, bloque ADC_CS Generator

En la **Figura 43** se muestra el generador de la señal de **ADC_CS**, se ha indicado mediante números las partes más importantes del bloque, y van a ser descritas a continuación:

1. Es la entrada al bloque, por donde vendrá la señal de reloj

- Es un contador de 6 bits limitado a contar de 33 (tendrá en total 34 estados que repetirá continuamente, desde 0 a 33), con una señal de “enable”, es decir, incrementará estado con cada señal de reloj.

El bloque “cast” reconvierte la señal de reloj definida como “unsigned” a formato “bool” para que pueda interpretarlo el bloque contador.

- Es la salida del bloque contador (**Counter_CLK**) de 6 bits anterior. La señal de salida será el estado actual del contador de 6 bits anterior. Esta señal será usada en el bloque que leerá el conversor analógico digital, así que la salida de este bloque estará conectada con el bloque lector del conversor analógico digital (bloque **ADC_Reader**).
- Es un comparador, cada vez que el contador anterior llegue a valor 33 emitirá una señal true durante un ciclo de reloj.
- Es la salida del bloque para la señal de **ADC_CS**. La salida de este bloque estará conectada directamente con el puerto P11 para la salida **ADC_CS**.

➤ El bloque lector del conversor (**ADC_Reader**) está descrito en la **Figura 44**.

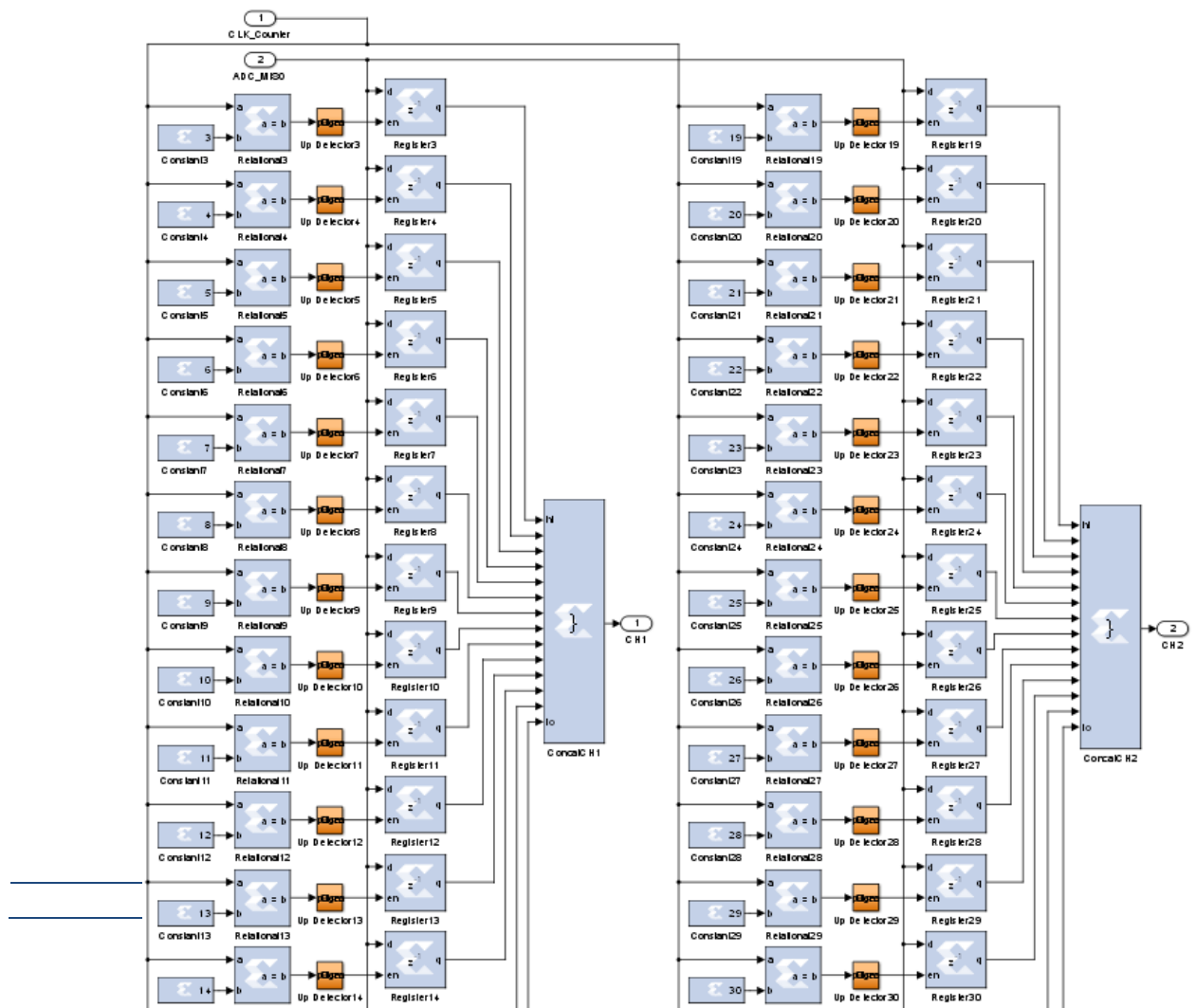


Figura 44. Programación del LTC1407A-1, bloque ADC_Reader

La **Figura 44** muestra el bloque **ADC_Reader**. El bloque **ADC_Reader** está dividido en dos columnas (cada columna lee un canal de entrada). Las columnas están compuestas de bloques repetidos que leerán el dato que le llega por **SPI_MISO**, coordinado la lectura con la señal **CLK_counter** (señal definida en el bloque **ADC_CS**).

A continuación se muestra una ampliación de la primera columna que corresponde al canal A.

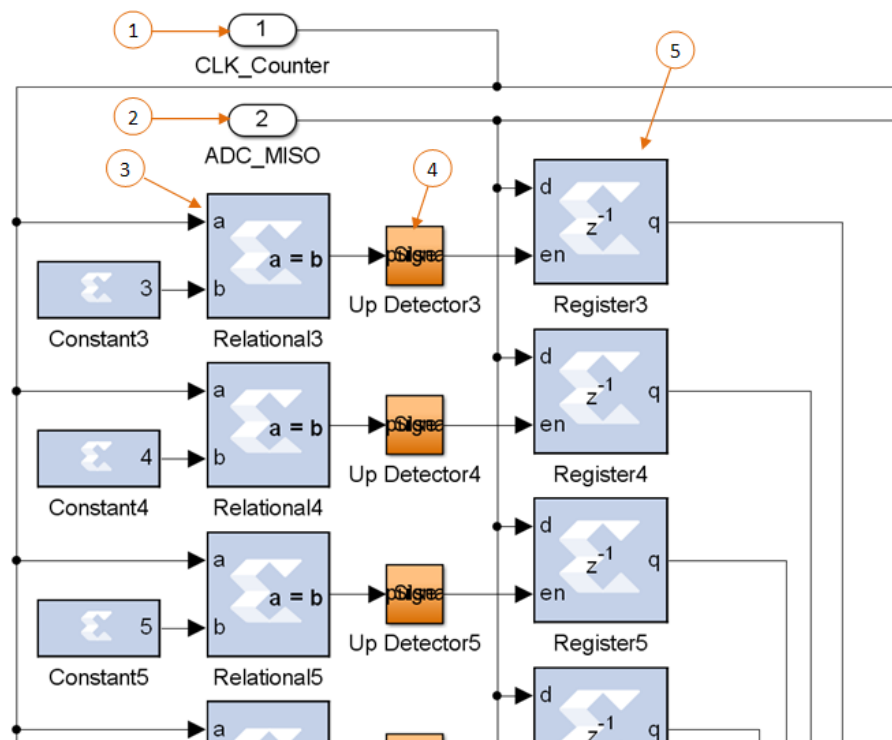


Figura 45. Programación del LTC1407A-1, bloque ADC_Reader, ampliación de la imagen.

En la **Figura 45** se muestra en detalle los bloques de los que están compuestas las dos columnas del **ADC_Reader**. Se ha indicado con números las partes más importantes del **ADC_Reader** que serán explicadas a continuación:

1. Es la entrada al bloque, por donde vendrá la señal de **CLK_counter** (señal definida en el bloque **ADC_CS**).
2. Es la entrada al bloque de la señal **ADC_MISO** que vendrá directamente del conversor analógico digital.
3. Es un comparador que lanzará una señal True cuando la señal **CLK_counter** llegue al valor de la constante. Estas contantes marcan los tiempos de lectura, que están definidos por la hoja del fabricante (**Figura 45**). Así la primera columna lee los datos desde el 3º al 16º ciclo de reloj para leer los 14 bits del primer canal y del 19º al 32º ciclo de reloj para leer los 14 bits del segundo canal.
4. Este bloque es un detector de flanco de subida (este bloque esta explicado en el apartado de programación del pre-amplificador).
5. Es el registro que mantiene el dato leído y que se actualiza según le llegue la señal de que el tiempo de lectura es el correcto.

Cada columna tiene un bloque concatenador que forma un bus de 14 bits juntando las señales de cada bloque. Este bus formará un número binario de 14 bits codificado en complemento a 2 para cada uno de los canales. Teniendo cada canal una salida del bloque.

A continuación realizaremos la simulación del código HDL escrito con bloques de Xilinx en Simulink de la generación de las señales generadas. En la

Figura 46 se mostrará una captura de la generación de las señales de **CLK** y **AMP_CS** para comprobar la coordinación entre ellas, y que coinciden con las especificaciones del fabricante mostrado en la

Figura 41.

Con esta simulación evitaremos posibles daños en el conversor A/D derivados de una generación de señales errónea.



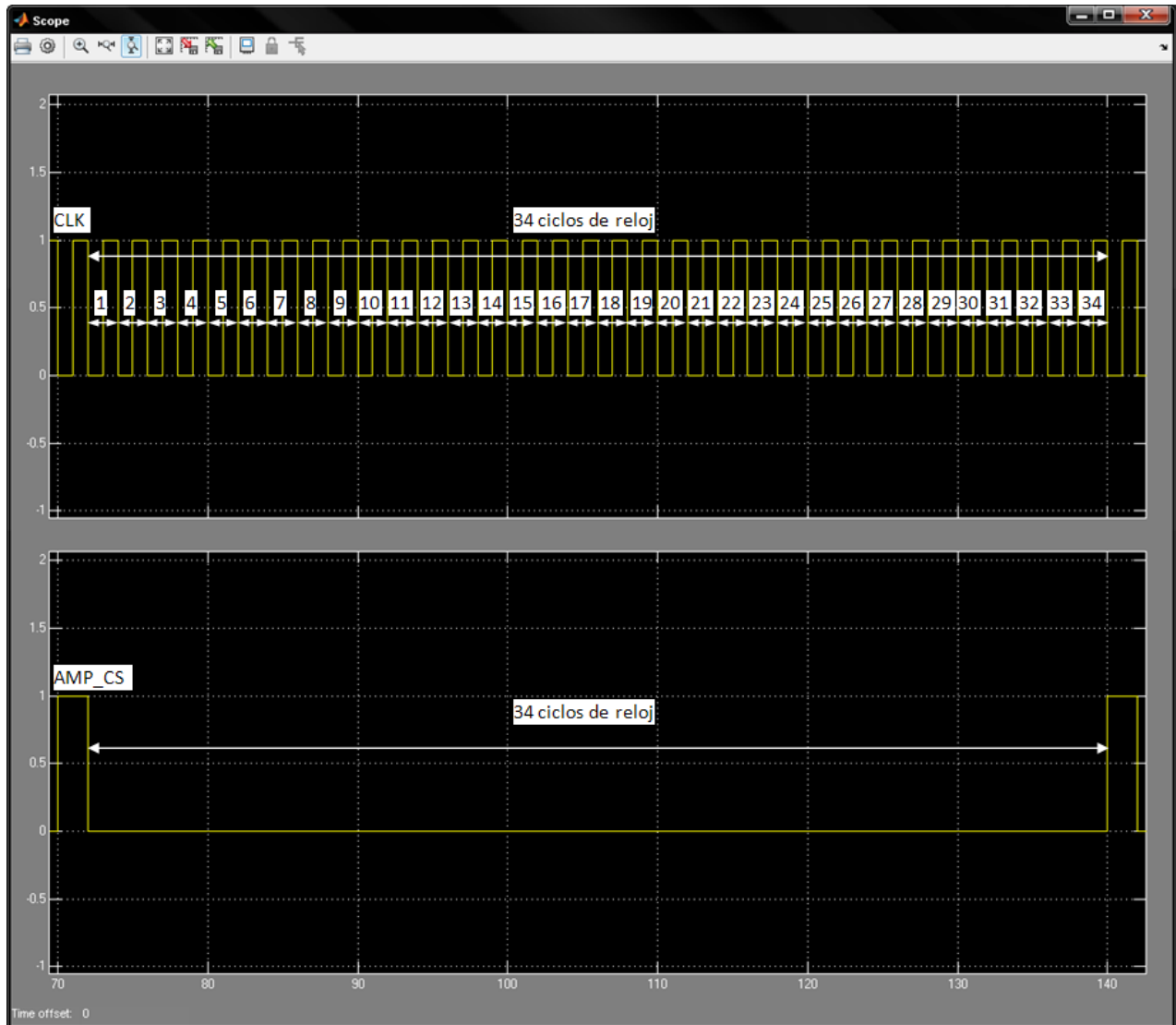


Figura 46. Programación del LTC1407A-1, simulación.

Para finalizar comprobamos que la lectura real de los datos es correcta, para ello usamos:

- Una señal analógica de voltaje variable, de rango entre 0.4V y 2.9V, como entrada que simulará la salida del hardware detector de posición.
- Pre-amplificador LTC6912 configurado con ganancia “-1” **Figura 29**.
- Conversor analógico digital LTC1407A **Figura 29**.
- Array de LEDs de la placa “FPGA Spartan 3E Starter Kit Board” **Figura 29**.

Para poder usar el array de LEDs, se debe crear una configuración de hardware extra mostrada en la **Figura 47**.

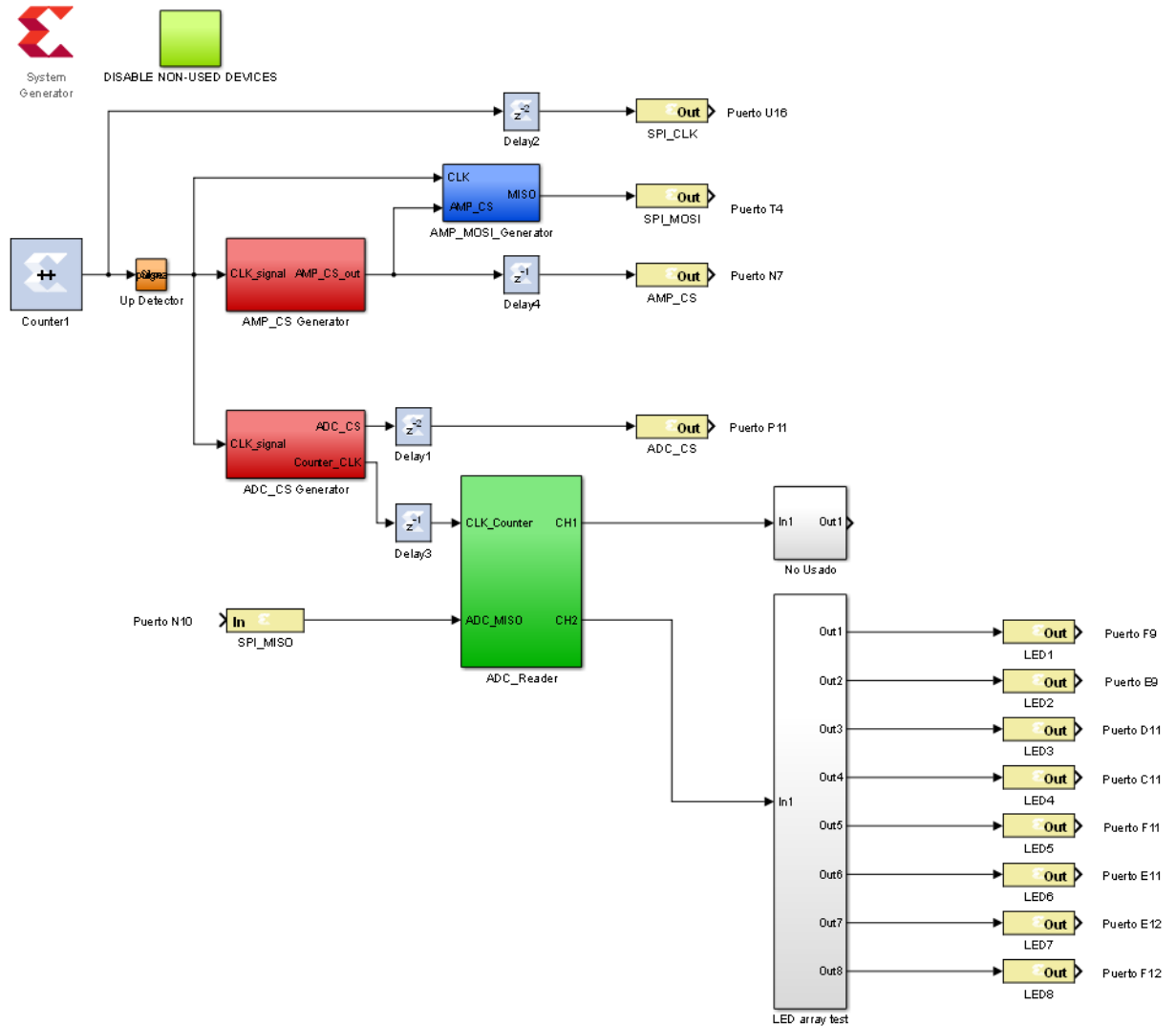


Figura 47. Programación del LTC1407A-1, prueba de funcionamiento.

El bloque LED array test mostrado en la **Figura 47** se basa en ocho comparadores de la señal que proviene del **ADC_Reader** con ocho constantes, el esquema del bloque LED array test será mostrado con detalle en la **Figura 48**.

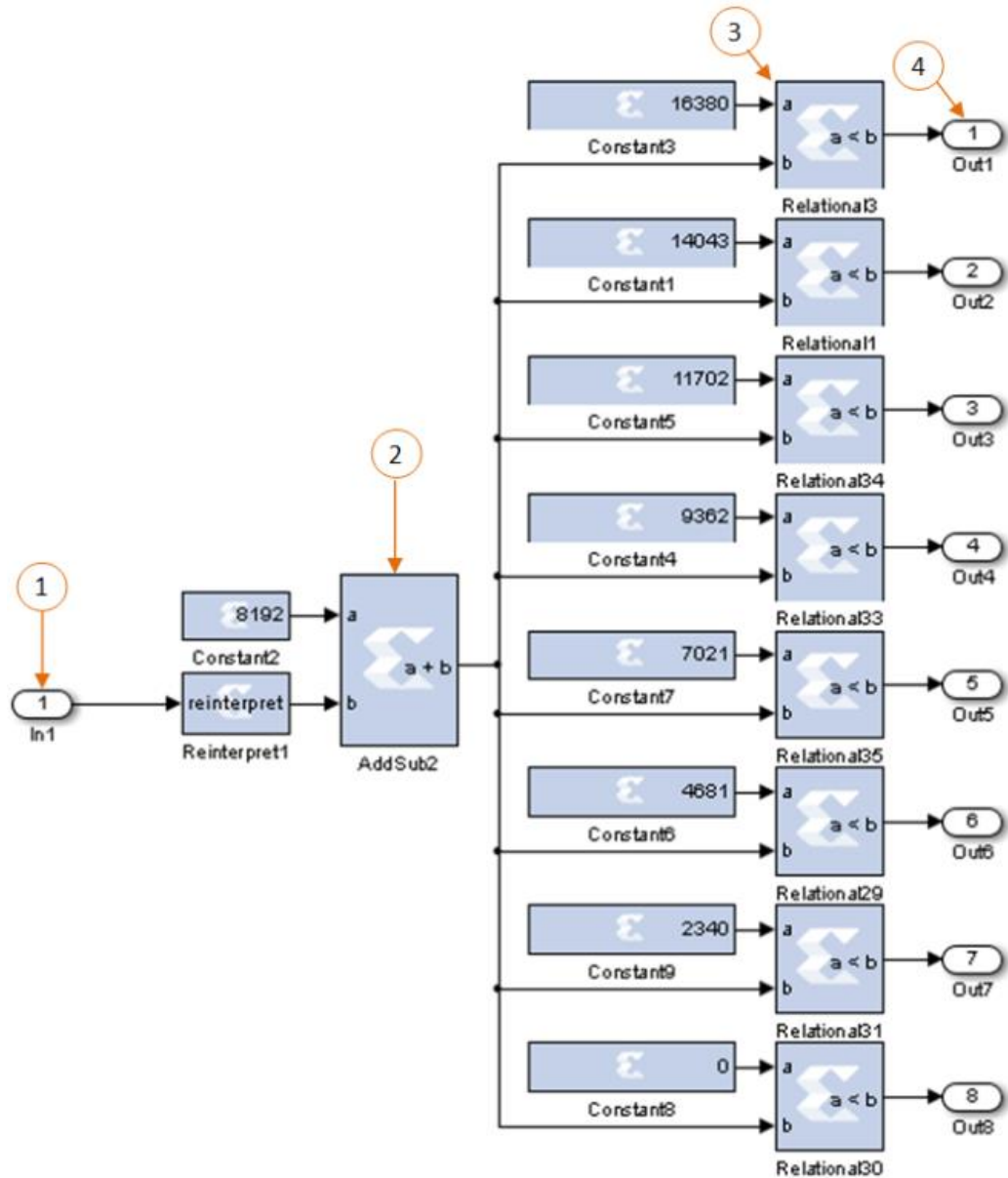


Figura 48. Programación del LTC1407A-1, prueba de funcionamiento, bloque LED array test.

En la **Figura 48** del bloque de LED array test se ha indicado con números las partes más importantes del bloque, que serán explicados en detalle a continuación:

1. Es la entrada al bloque, por donde vendrá el número de 14 bits codificado en complemento a 2.
2. Este bloque reinterpreta el número en complemento a 2 a un número binario normal (unsigned), y le suma la mitad de $2^{14} - 1$ que es 8192. Así el número binario saliente, será un número binario de 14 bits del tipo "unsigned", es decir que tendrá el rango entre 0 y $2^{14} - 1$.

3. Estos ocho bloques repetidos son comparadores que detectan si el número leído es mayor o igual a la constante asociada. Así los LEDs se encenderán de la siguiente manera:
- El **LED8** se encenderá cuando el número leído sea mayor de 0.
 - El **LED7** se encenderá cuando el número leído sea mayor de 2340.
 - El **LED6** se encenderá cuando el número leído sea mayor de 4581.
 - El **LED5** se encenderá cuando el número leído sea mayor de 7021.
 - El **LED4** se encenderá cuando el número leído sea mayor de 9362.
 - El **LED3** se encenderá cuando el número leído sea mayor de 11702.
 - El **LED2** se encenderá cuando el número leído sea mayor de 14043.
 - El **LED1** se encenderá cuando el número leído sea mayor de 16380.

Sabiendo que la ganancia del pre-amplificador es “-1” según la tabla de la **Figura 31** y usando la fórmula del pre-amplificador y el convertor A/D [29].

$$N^{\circ}Binario = \left((-8192) \times \frac{(V_{IN} - 1.65V)}{1.25V} \right) + 8192 \quad (10)$$

Cada LED se encenderá con el siguiente voltaje de entrada analógica.

- El **LED8** se encenderá cuando el voltaje sea menor de 0,4V.
- El **LED7** se encenderá cuando el voltaje sea menor de 0,7V.
- El **LED6** se encenderá cuando el voltaje sea menor de 1,1V.
- El **LED5** se encenderá cuando el voltaje sea menor de 1,5V.
- El **LED4** se encenderá cuando el voltaje sea menor de 1,8V.
- El **LED3** se encenderá cuando el voltaje sea menor de 2,2V.
- El **LED2** se encenderá cuando el voltaje sea menor de 2,5V.
- El **LED1** se encenderá siempre.

Tras realizar las primeras pruebas se requiere la necesidad de ajustar los tiempos entre señales añadiendo retardos a las señales (Delays), estos ajustes se realizan debido a que las señales reales no son exactamente iguales a las señales simuladas. En algunas ocasiones los tiempos de subida de las señales al ser no ideales se adelanta su detección y las señales se descoordinan entre sí, para ello coordinaremos las señales añadiendo delays, que son retardos de un ciclo de reloj, para conseguir el correcto funcionamiento del sistema.

La disposición de estos retardos son mostrados en la **Figura 33** y

Figura 42. Tras el ajuste se comprueba el funcionamiento en las **Figura 49** y **Figura 50**.

En la **Figura 49** se muestra la siguiente prueba realizada:

- Para el voltaje de entrada 2,765V se enciende **LED 8**.
- Para el voltaje de entrada 2,012V se encienden los **LED 8, 7 y 6**.

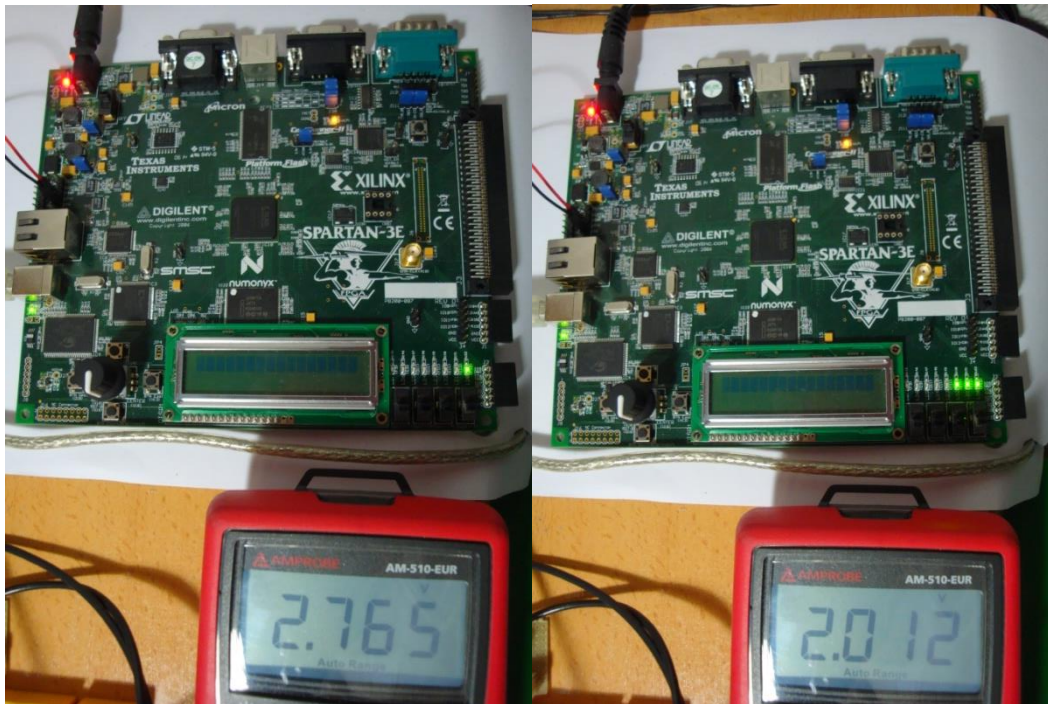


Figura 49. Prueba realizada con $V_{IN}=2,765V$ y $V_{IN}=2,012V$

En la

Figura 50 se muestra la siguiente prueba realizada:

- Para el voltaje de entrada 1,034V se encienden los **LED 8, 7, 6, 5, 4, 3**.
- Para el voltaje de entrada 0,372V se encienden todos los LEDs.

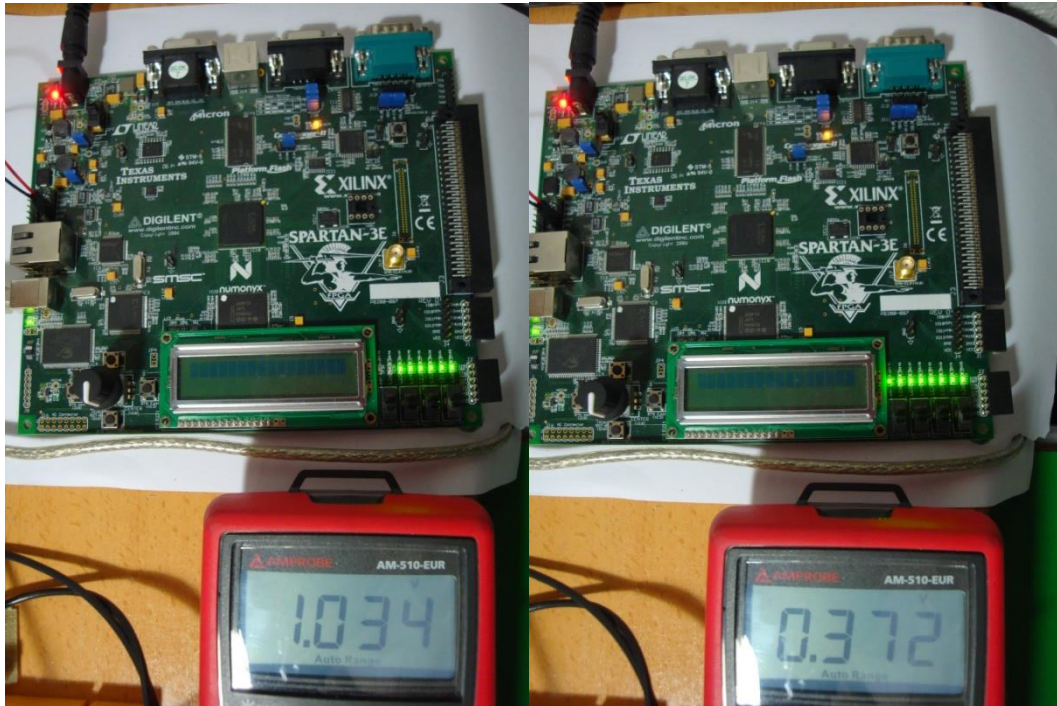


Figura 50. Prueba realizada con $V_{IN}=1,034V$ y $V_{IN}=0,372V$

Por tanto se cumple todos los cálculos previos, y por tanto consideramos que el funcionamiento del pre-amplificador y el conversor analógico digital es correcto con la configuración hardware descrita.

3.3.4. Bloque de adaptación de la señal del ADC

Para traducir la salida binaria del conversor analógico digital a una señal que corresponda con las unidades del sistema, se ha ideado un bloque que traducirá la salida binaria a milímetros.

Como ya hemos explicado antes (ver **Figura 9**), la posición del objeto que levita es la registrada por el “hardware de medida de la posición” que tiene una salida analógica que será adaptada por el pre-amplificador y registrada por el conversor analógico digital.

El conversor analógico digital dará un número binario en complemento a dos que será proporcional al voltaje de entrada y en última instancia será proporcional a la posición del objeto siguiendo la ecuación **(2)**.

Por tanto para poder realizar el posterior ajuste del control, el bloque de “Adaptación de la señal del ADC” convertirá de nuevo la señal de la posición a milímetros.

Para saber cuál es la conversión que tiene que realizar este bloque recurrimos a la ecuación **(2)** mostrada en el apartado de Hardware de medida de posición, y a la ecuación **(10)**.

1. Para saber la equivalencia entre voltaje de entrada al pre-amplificador y la posición del objeto, recurriremos a la curva de calibración linealizada del circuito de detección mostrado en la **Figura 15** y a la ecuación **(2)**.
2. Para saber la equivalencia entre el voltaje de entrada y el número binario en complemento a dos que tiene como salida el conversor analógico digital recurriremos a la ecuación **(10)**.

Así nuestro bloque de adaptación del conversor analógico digital realizará las siguientes funciones:

- Si la posición es menor a 7.5 mm saturará la salida a su límite inferior.
- Si la posición es mayor a 9.5 mm saturará la salida a su límite superior.
- Si la posición está entre 7.5 y 9.5 mm aplicará la fórmula mostrada en la **Figura 15**.

La siguiente tabla (

Figura 51) muestra la conversión de varias posiciones a lo largo del sistema:

X(mm)	Entrada Pre-amp + ADC (V)	Salida ADC	Salida Bloque Adaptador (mm)
0	2,951	limite inf	7
1	2,951	limite inf	7
2	2,951	limite inf	7
3	2,951	limite inf	7
4	2,951	limite inf	7
5	2,951	limite inf	7
6	2,951	limite inf	7
7	2,951	limite inf	7
7,5	2,949	0	7,5
8	2,614	1874	8
9	0,56	15335	9
9,5	0,24	16384	9,5
10	0,24	limite sup	10
11	0,24	limite sup	10
12	0,24	limite sup	10
13	0,24	limite sup	10
14	0,24	limite sup	10
15	0,24	limite sup	10
16	0,24	limite sup	10
17	0,24	limite sup	10
18	0,24	limite sup	10
19	0,24	limite sup	10
20	0,24	limite sup	10

Figura 51. Unidades de la posición a lo largo del sistema

La

Figura 52 muestra la linearización de la zona comprendida entre 7,5mm y 9,5mm, la figura muestra una ampliación de la zona de trabajo de la **Figura 15**.



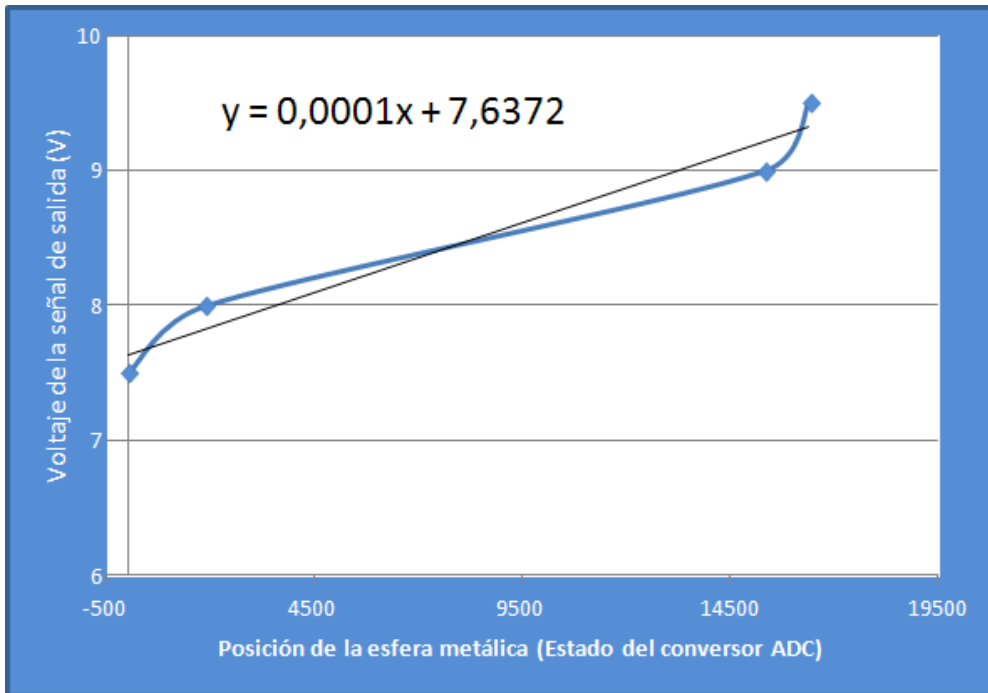


Figura 52. Linealización de la curva de calibración

De acuerdo con los datos mostrados en la

Figura 52 la ecuación que tiene que ser implementada en el bloque adaptador es:

$$y = 0.0001X + 7.6372 \quad (11)$$

Donde:

- **y**: es la posición del objeto en milímetros
- **x**: es el voltaje de salida del sensor en voltios

La

Figura 53 muestra la posición del bloque en el esquema general, que es justo detrás del bloque “ADC_Reader”:

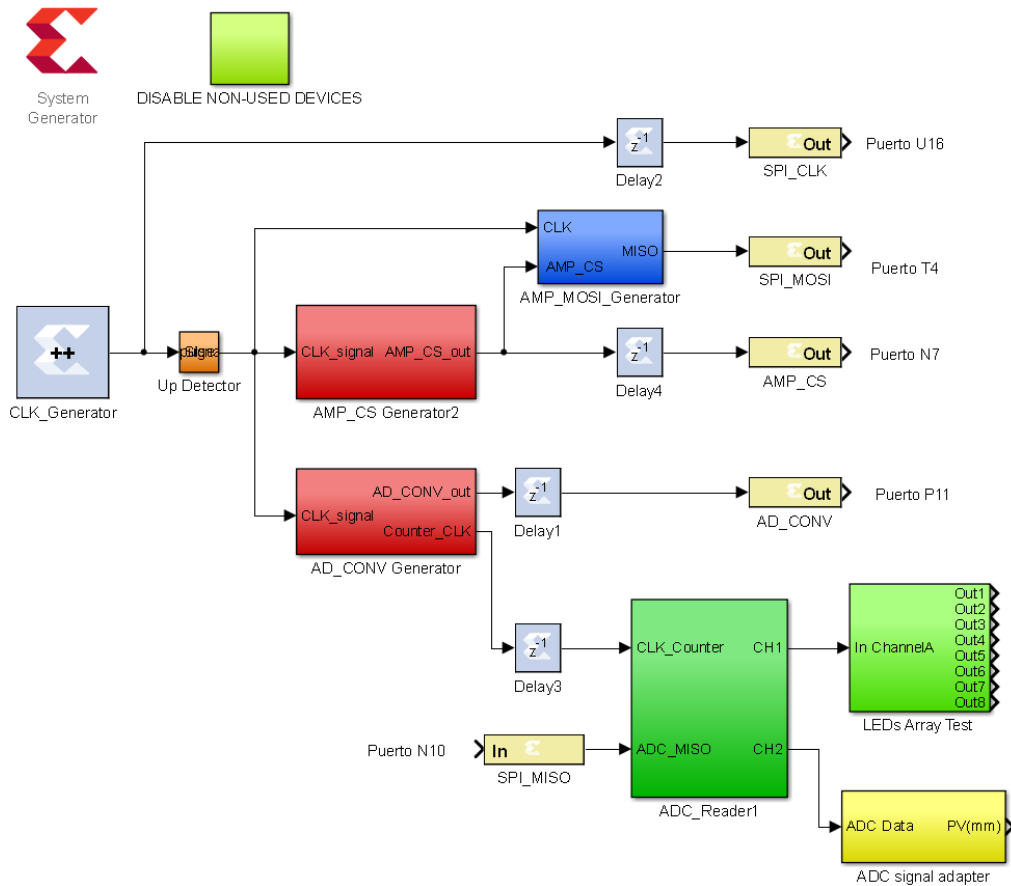


Figura 53. Posición del bloque de adaptación en el esquema general

La **Figura 54** muestra en detalle el bloque “ADC signal adapter” que será nuestro bloque de adaptación de la señal del ADC:

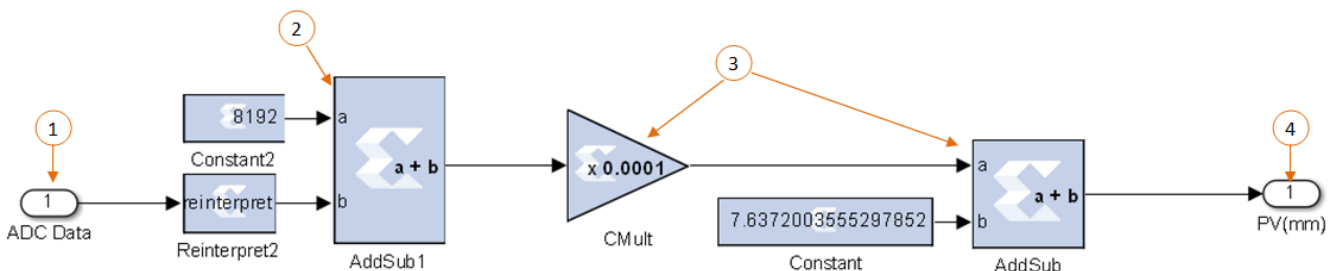


Figura 54. Bloque de adaptación de la señal del ADC

En la **Figura 54** se indica con números las partes más importantes del bloque “**ADC signal adapter**”:

1. Es la entrada al bloque, por donde vendrá el número de 14 bits codificado en complemento a 2.
2. Este bloque convierte el número en complemento a 2 a un número binario natural (unsigned), y le suma la mitad de $2^{14} - 1$ que es 8192. Así el número binario saliente, será un número binario de 14 bits del tipo “unsigned”, es decir que tendrá el rango entre 0 y $2^{14}-1$.
3. Este conjunto de bloques es que implementa la ecuación **(11)**.
4. Es la salida del bloque, dando la medida de la posición en milímetros.

La salida del bloque “**ADC signal adapter**” dará la posición de la esfera metálica en milímetros lo que facilitará el ajuste del control ya que tendremos una medida representativa.

3.3.5. Control PID

Para realizar el control realimentado del sistema de levitación magnética se usará un control PID implementado en la FPGA Spartan 3E.

La implementación del control PID ha sido ampliamente estudiada y desarrollada. El control PID discreto implementado en el sistema de levitación magnética debe tener las siguientes características:

- No consumir muchos recursos ya que la FPGA Spartan 3E es una FPGA económica de bajo perfil.
- Ser un control robusto.

La comprobación del correcto funcionamiento de un control PID para el sistema de levitación magnética será explicado en el “**Capítulo 4. Modelización del Sistema**”.

Para conseguir la programación del control PID discreto necesario para nuestro sistema de control, se ha escogido entre los muchos modelos de controles PID discretos desarrollados e implementados en System Generator.

Uno de las implementaciones más usadas es la descrita en los documentos; **[43]**, **[44]**, **[45]**, **[46]** y **[47]**. El control utilizado por los anteriores documentos

es un control robusto y simplificado del control PID, por lo que es idóneo para el sistema de levitación magnética.

A continuación se describirá la configuración hardware necesaria para implementar el control PID utilizado en el sistema, para ello se utilizará los bloques de Xilinx en Simulink (System Generator).

La base del control PID simplificado descrito en [43], [44], [45], [46] y [47], parte de la función de transferencia del PID que será calculada en el apartado de “Cálculo de la función de transferencia del control PID”

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (46)$$

Tras discretizarlo mediante el uso de la transformada Z, de se obtiene la siguiente ecuación que es en la que se basará el control simplificado [43]:

$$D_{PID}(z) = K_P + K_I \frac{T(z+1)}{2(z-1)} + \frac{K_D(z-1)}{Tz} \quad (12)$$

La imagen mostrada en **Figura 55** es la representación en bloques básicos de la ecuación (12) desarrollada [43]:

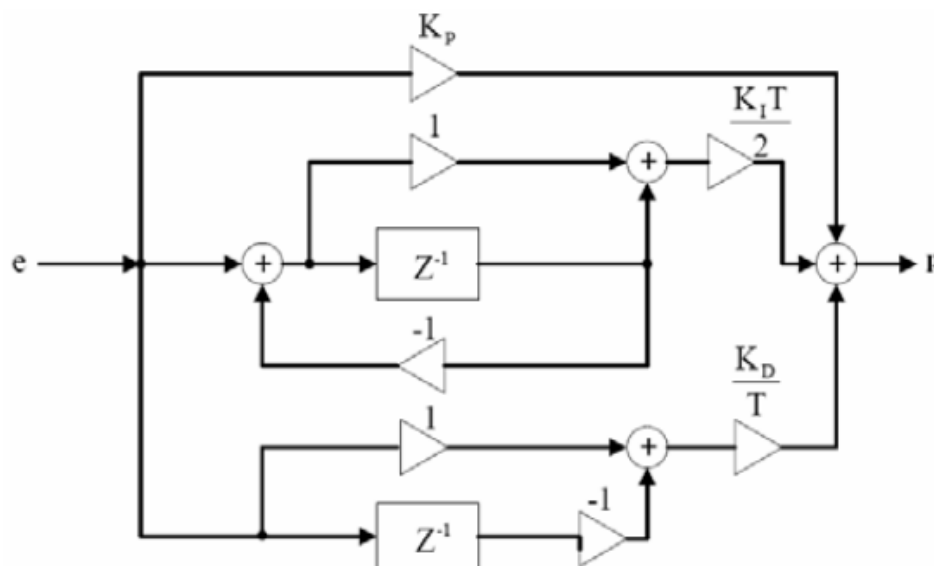


Figura 55. Programación del control PID, esquema general [43]

Como se puede observar en la figura **Figura 55**, cada uno de los canales en paralelo corresponde a la parte proporcional (canal superior), parte integral (canal medio) y parte derivativa (canal inferior).

A continuación se describirá la implementación en bloques de Xilinx del control PID que estará basado en la estructura de la **Figura 55** y en la ecuación **(12)**.

En la

Figura 56 se muestra la posición del control PID dentro del esquema general del sistema. El control PID tendrá como entrada la posición en milímetros que nos proporcionará el **bloque adaptador de la señal del ADC** y tendrá como salida la señal moduladora de la señal modulada en ancho de pulso PWM que será generada en el bloque **PWM Generator** que será descrito posteriormente.

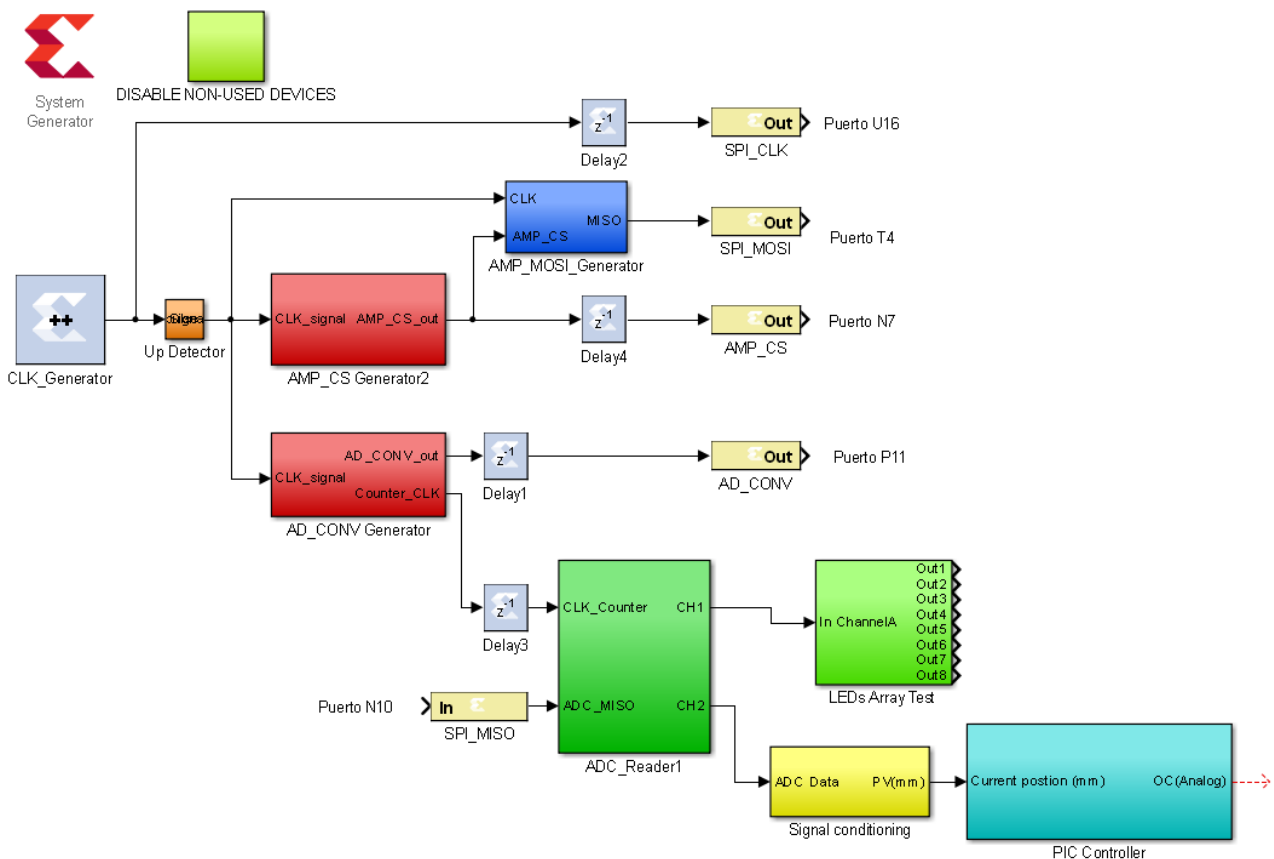


Figura 56. Programación del control PID, esquema general con el bloque controlador PID



En la **Figura 55** se muestra la posición del bloque **PID_Controller** (azul claro) que es el bloque que contendrá el controlador PID, este bloque está mostrado con más detalle en la **Figura 57**.

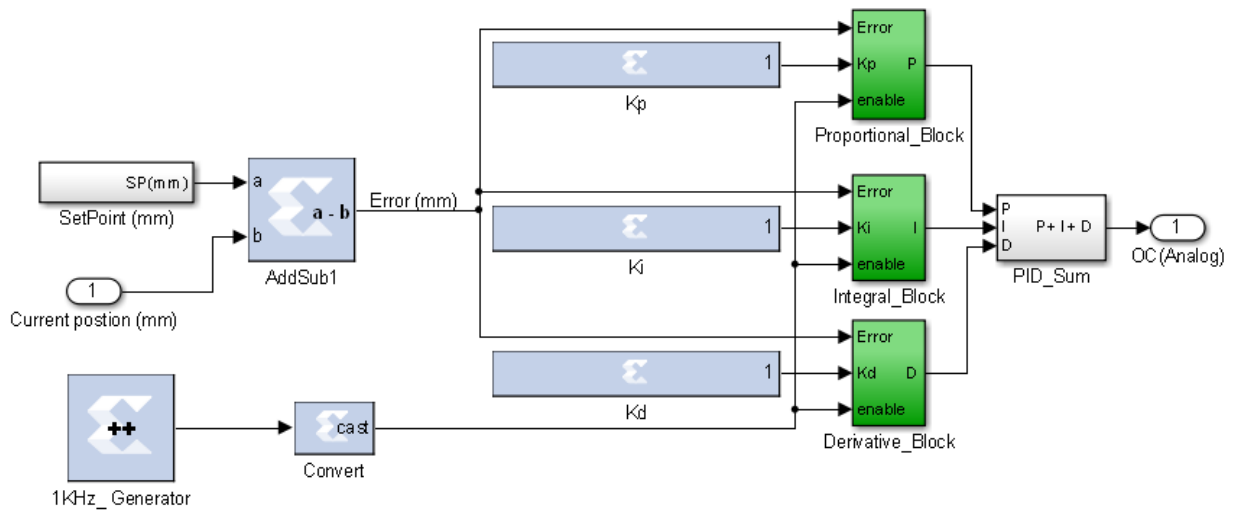


Figura 57. Programación del control PID, bloque controlador PID

En la **Figura 57** se muestra que la entrada al bloque proveniente del bloque de adaptación de la señal del conversor analógico digital es el sustraendo de la resta que se realiza a la posición de referencia a la que se quiere llegar (variable de consigna o Set point) dada en milímetros. La diferencia entre la consigna y la posición actual de la esfera metálica será el error de nuestro sistema. El error es la entrada del controlador PID formado en paralelo por los bloques proporcional, integral y derivativo.

En la **Figura 57** se muestran los bloques que compondrán el control que corresponden a los bloques que realizarán las funciones: proporcional (**Proportional_Block**), integral (**Integral_Block**) y derivativa (**Derivative_Block**) del control PID. La señal de “enable” que recibe cada bloque del control PID es generada por un contador de dos bits, que generará una señal de “enable” a 1kHz. La señal de “enable” a un 1kHz de frecuencia sirve para que la velocidad del control PID discreto sea de 1kHz, la selección de esta velocidad está justificada en el “**Capítulo 4. Modelización del sistema**”.

A continuación se detallará el contenido de cada uno de los bloques mostrados en la **Figura 57**:

- El bloque proporcional (**Proportional_Block**) está descrito en la **Figura 58**:

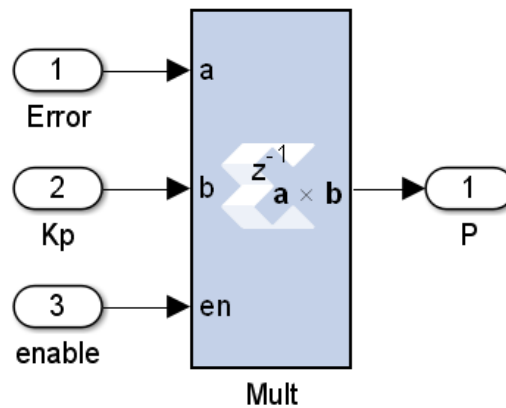


Figura 58. Programación del control PID, bloque proporcional

El bloque proporcional descrito en la **Figura 58** consiste en un multiplicador del error por la constante **K_p**. Es la implementación de la parte de la ecuación (12) que corresponde a la parte proporcional del control PID.

$$D_P(z) = K_p \quad (13)$$

➤ El bloque integrador (**Integral_Block**) está descrito en la **Figura 59**:

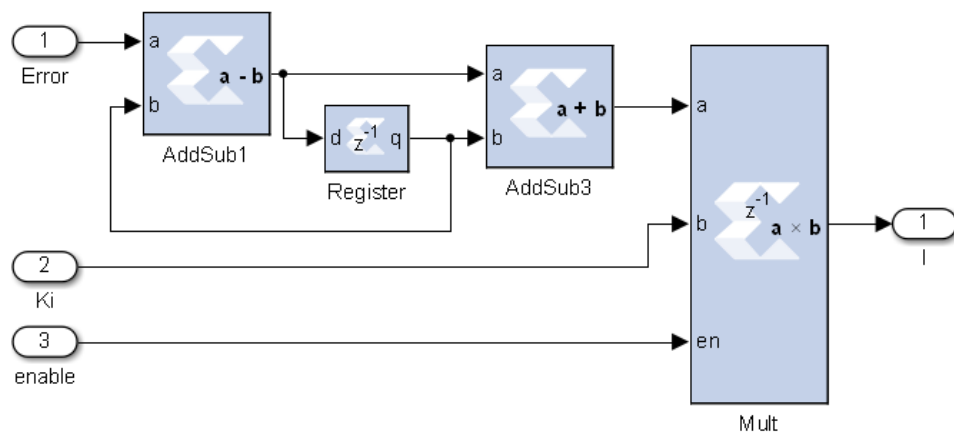


Figura 59. Programación del control PID, bloque integral.

Es la implementación de la parte de la ecuación (12) que corresponde a la parte integral del control PID.

$$D_I(z) = K_I \frac{T(z+1)}{2(z-1)} \quad (14)$$

- El bloque derivativo (**Derivative_Block**) está descrito en la **Figura 60**:

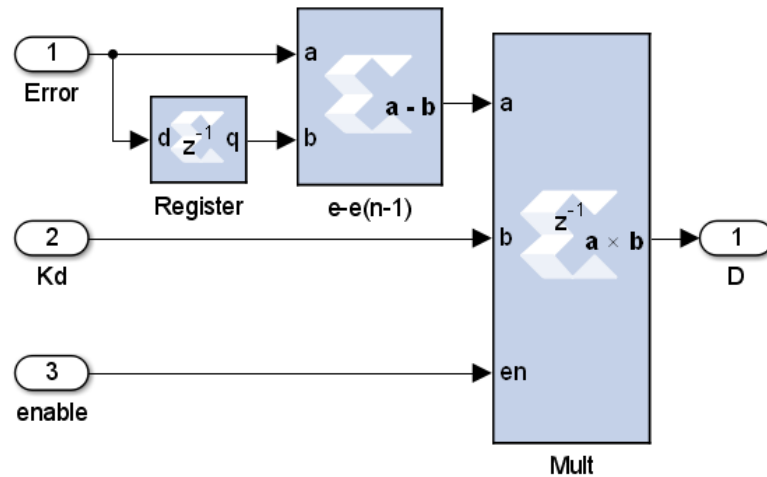


Figura 60. Programación del control PID, bloque derivativo

Es la implementación de la parte de la ecuación (12) que corresponde a la parte derivativa del control PID.

$$D_D(z) = \frac{K_D}{T} \frac{(z-1)}{z} \quad (15)$$

Para comprobar la correcta implementación del control PID se simulará la respuesta del control implementado actuando sobre un sistema de segundo orden ante una entrada escalón, frente a la respuesta que ofrece un control PID no discreto realizado por Simulink que se considerará ideal. Para comprobar el efecto del control PID se simulará también la respuesta del sistema de segundo orden en bucle abierto.

La simulación descrita se muestra en la **Figura 61**.

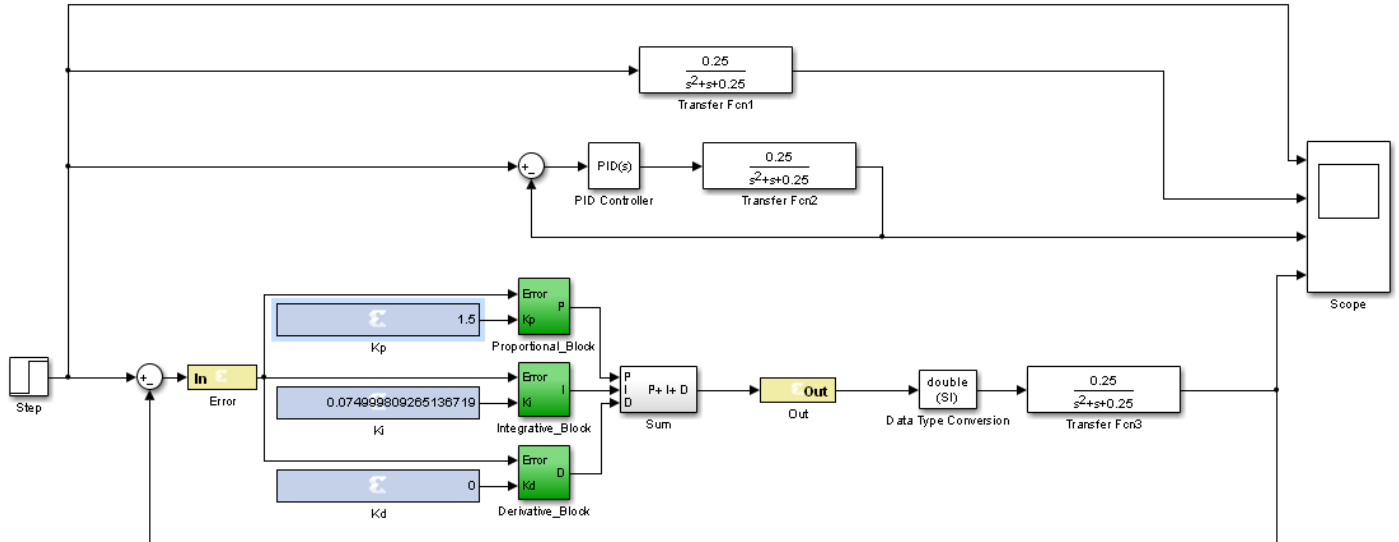


Figura 61. Programación del control PID, Simulación y comparación con un PID ideal.

La simulación descrita mostrada en la **Figura 61** se compone de cuatro canales que surgen del generador de la señal escalón y que terminan en el visor de Simulink.

Estos canales corresponden a los visores de la **Figura 62**, el primero es la señal escalón pura (canal superior), el segundo es el sistema de segundo orden en bucle abierto, el tercer canal corresponde con el sistema realimentado con el control PID ideal y el último canal corresponde a la prueba de funcionamiento con el controlador PID implementado (canal inferior).

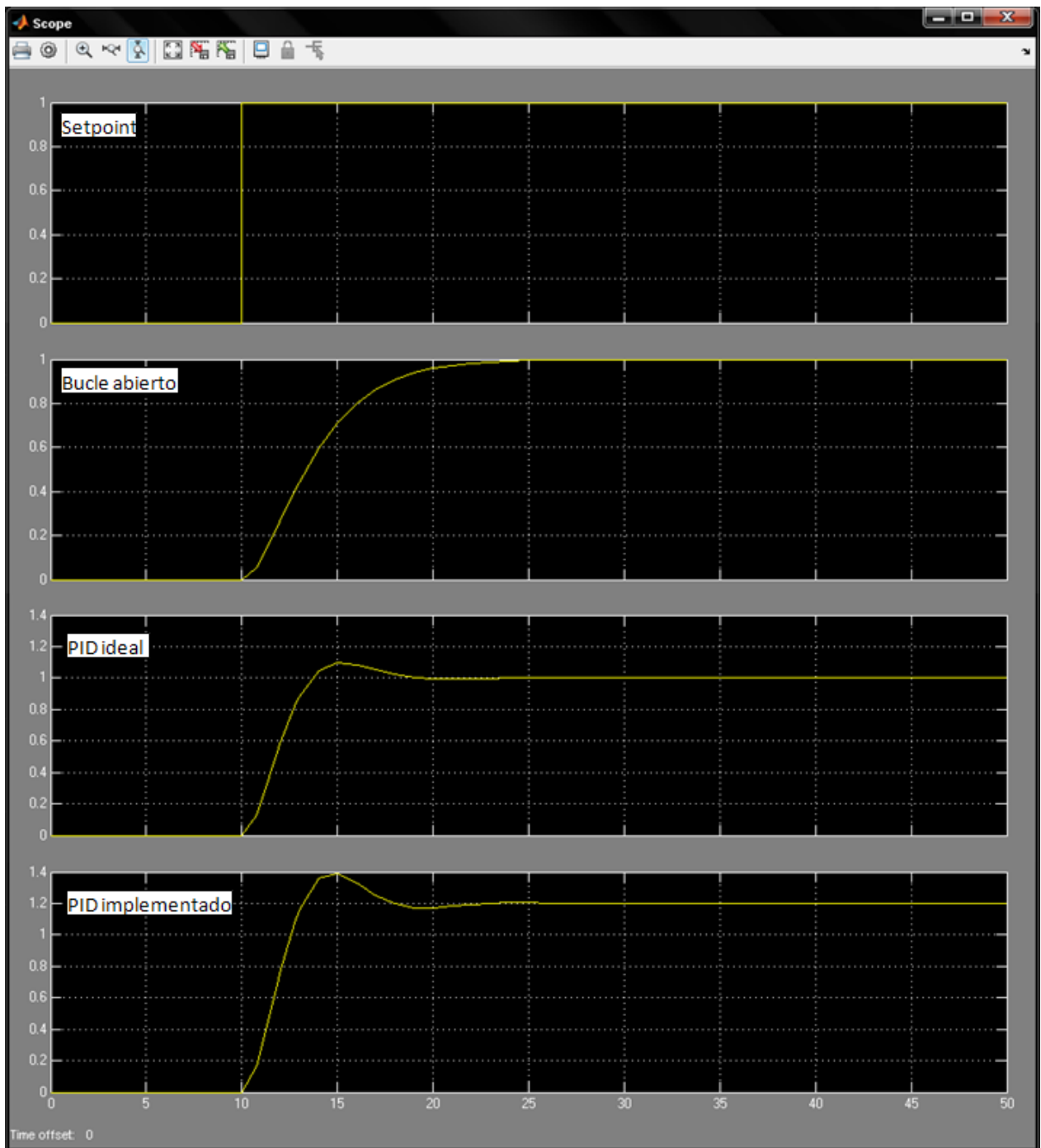


Figura 62. Programación del control PID, Simulación y comparación con un PID ideal, visualización de las señales.

Como podemos observar en la **Figura 62** la velocidad de respuesta de ambos controles es similar, lo que cambia es que para los mismos parámetros el control implementado obtiene más sobre-oscilaciones, debido a las diferencias entre ambos, pero estas diferencias no son significativas.



3.3.6. Generador PWM

La señal de salida del sistema de control controlará la fuerza que ejerce el electroimán sobre la esfera metálica a través del control de la corriente que circula por la bobina del electroimán tal y como muestra la **Figura 9**.

La señal que controlará la corriente es una señal modulada en ancho de pulso por la señal de salida del control PID. Esta generación de la señal PWM es generada por el bloque generador de señal PWM.

Este bloque será la última configuración hardware que albergará la FPGA. Tendrá como entrada la variable de salida del control PID y como salida el pin D7 de la tarjeta "FPGA Spartan 3E Starter Kit Board".

En la **Figura 63** se muestra el esquema completo de la configuración hardware que se llevará a cabo en la FPGA. El esquema muestra la posición que tendrá el bloque generador de la señal PWM como último bloque entre el bloque de control PID y el puerto de salida D7.

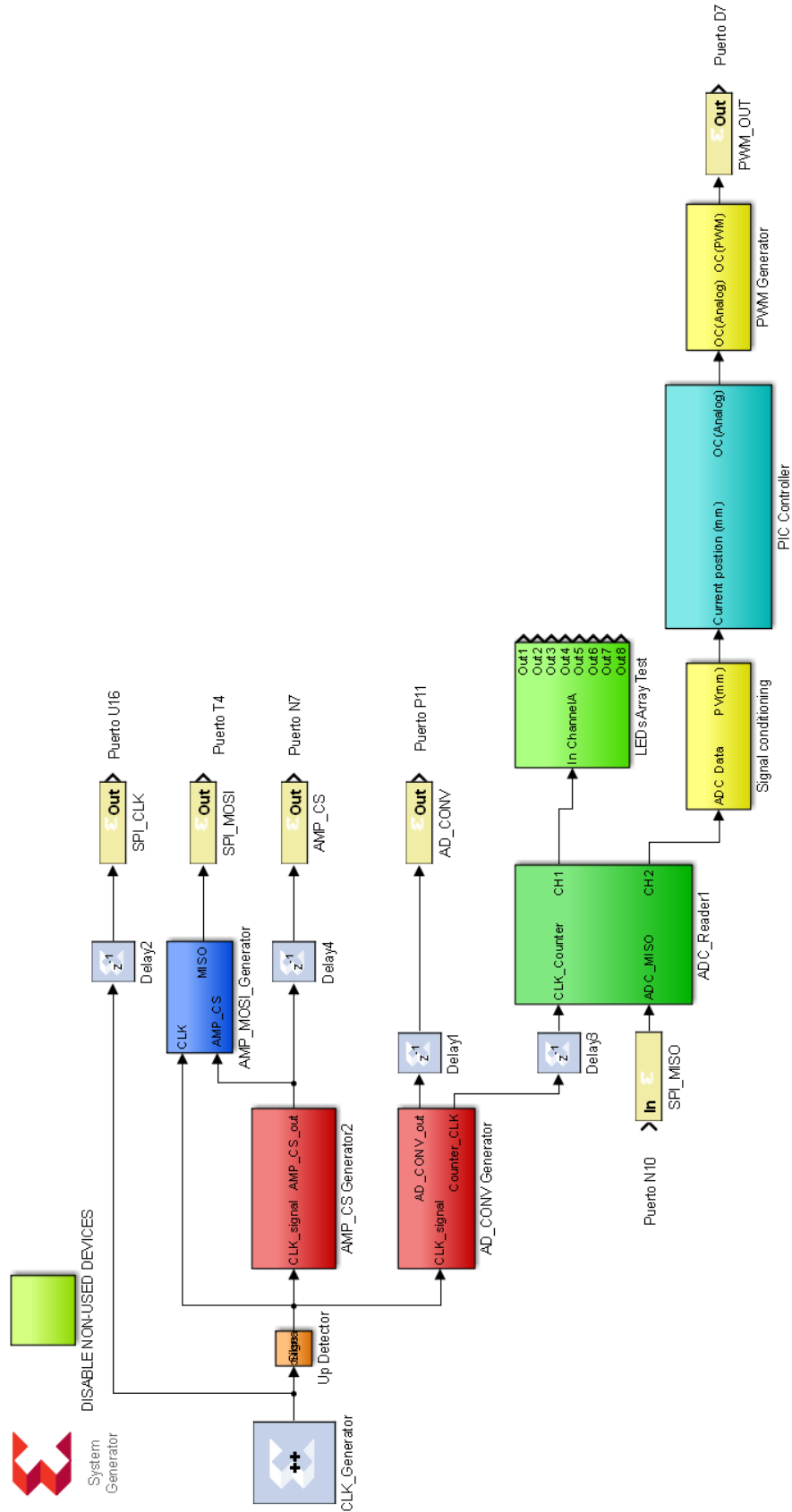


Figura 63. Esquema general completo

En la **Figura 64** en el contenido del bloque generador de PWM. El generador de PWM es un bloque sencillo que basado en las señales implicadas en la generación de una señal PWM a través de una señal moduladora y una señal portadora triangular

Figura 7.

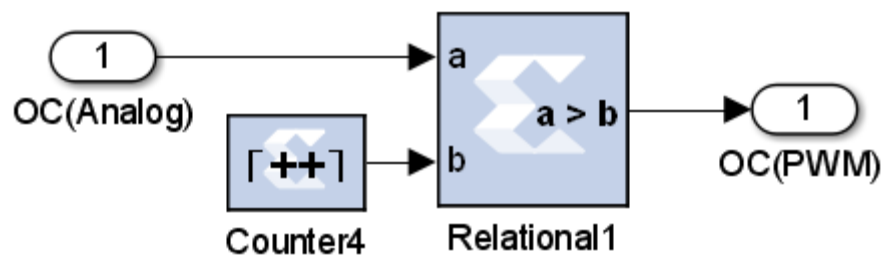


Figura 64. Bloque generador PWM

En la **Figura 64** se muestra el comparador que dará como respuesta la señal PWM, en la entrada “a” del comparador se conecta la señal analógica de salida del control PID (señal moduladora), en la entrada “b” del comparador se conecta la señal triangular (señal portadora).

La configuración del contador del la **Figura 64** constituye la frecuencia de la señal portadora. La frecuencia de la señal portadora será de 5 KHz ya que es la máxima frecuencia que soporta los componentes del hardware de control de la corriente que circula por la bobina del electroimán. En concreto el optoacoplador **HCPL0600**, es el componente que limitará la frecuencia de la señal portadora de la señal PWM, debido a que es el componente con menor velocidad de subida y bajada del circuito [37].

Capítulo 4. Modelización del sistema

4.1. Introducción

En el capítulo cuarto se desarrollará el modelo matemático del sistema de levitación magnética. Este modelo matemático contendrá todas las características del sistema de levitación magnética que se ha diseñado y construido en el **Capítulo 3**.

Una vez obtenido el modelo matemático del sistema de levitación podremos ajustar los parámetros del control para que ambos sistemas (el modelo matemático y el modelo real actúen de la misma manera), este ajuste del control se llevará a cabo en el **Capítulo 6** de resultados del sistema.

Para realizar la simulación de nuestro sistema de levitación magnética debemos realizar el cálculo de la función de transferencia del sistema de levitación magnética completo, lo que incluye:

- Cálculo de la función de transferencia del actuador: fuerza que ejerce el electroimán sobre la esfera metálica dependiendo de la corriente que circule por la bobina del electroimán y de la posición de la esfera metálica.
- Cálculo de la función de transferencia de la planta: fuerza de la gravedad que ejerce la tierra sobre la esfera metálica.
- Cálculo de la función de transferencia del control PID.

Como ya se ha comentado para conseguir un correcto diseño del control del sistema de levitación magnética es importante poder simular el comportamiento del sistema matemáticamente, ya que así se podrá ajustar el control para conseguir la levitación, y de haber algún problema se podrá tener una guía de la respuesta ideal del sistema.

El sistema de levitación magnética es un sistema inestable en bucle abierto, de naturaleza no lineal y con un amortiguamiento natural muy bajo (lo que hace que tenga gran tendencia a oscilar hasta perder el control ante pequeñas perturbaciones). Por esta causa, para conseguir la levitación, se necesita que el sistema de levitación magnética sea realimentado y controlado en lazo cerrado, tal y como muestra la **Figura 65**.

Para calcular la modelización del sistema de levitación magnética vamos a seguir el procedimiento propuesto por [49], este cálculo es similar en todos los sistemas de

levitación magnética, aunque hay que particularizar los datos de nuestro sistema real, para obtener una simulación lo más cercana al sistema real posible.

Este procedimiento parte del esquema general de un sistema de levitación magnética. La siguiente imagen (**Figura 65**), muestra el diagrama de bloques para un sistema de levitación magnética.

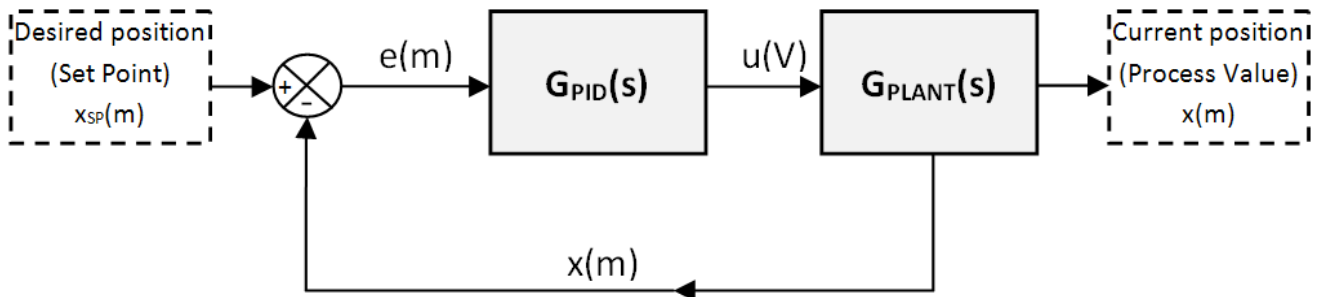


Figura 65. Diagrama de bloques del sistema levitación magnética

4.2. Cálculo del modelo matemático del sistema

En el siguiente apartado se realizará el cálculo de las ecuaciones que rigen el sistema de levitación magnética. Una vez obtenidas las ecuaciones del sistema, se podrá obtener la función de transferencia del sistema de levitación magnética, es decir la función de transferencia que describe la relación entre la corriente que circula por la bobina del electroimán y la posición de la esfera del electroimán.

4.2.1. Equilibrio de fuerzas

El experimento de levitación magnética consistirá en vencer la fuerza de la gravedad (F_g) mediante la generación de una fuerza electromagnética (F_{em}) en sentido contrario a la fuerza de la gravedad. Esta fuerza electromagnética será producida por un electroimán.

La siguiente imagen (**Figura 66**) muestra el esquema del equilibrio de fuerzas que se producirá en el sistema de levitación magnética.

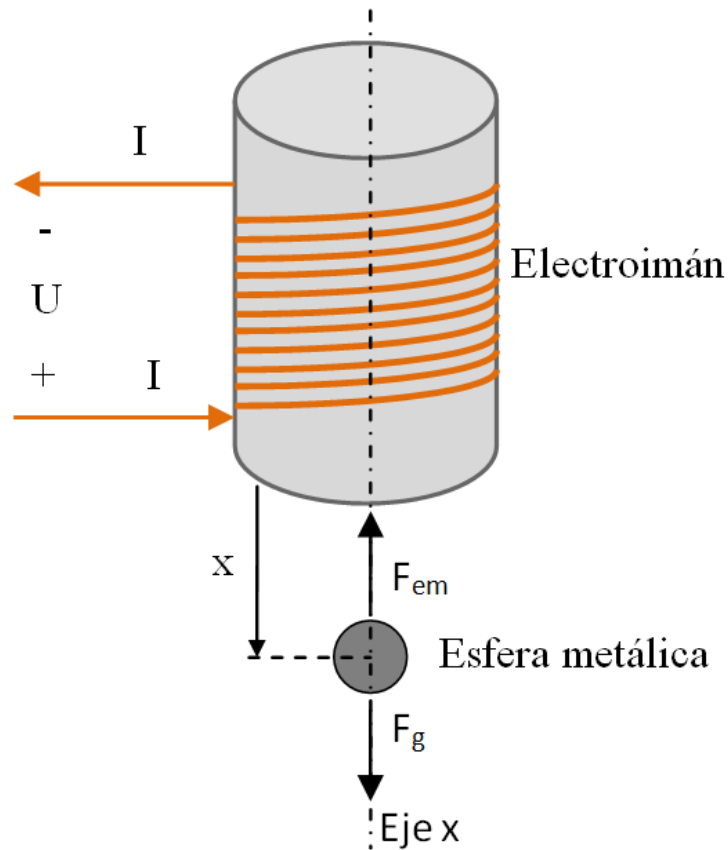


Figura 66. Relación de fuerzas en el experimento de levitación magnética

El equilibrio de fuerzas quedaría definido por la siguiente ecuación:

$$\vec{F}_{Res} = \vec{F}_g + \vec{F}_{em} \quad (16)$$

Desarrollando los componentes de la ecuación (16) obtenemos que:

- Fuerza resultante se desarrolla según la segunda ley de Newton como:

$$F_{Res} = m \times \ddot{x} \quad (17)$$

- Fuerza de la gravedad se desarrolla según la segunda ley de Newton como:

$$F_g = m \times \vec{g} \quad (18)$$

- Fuerza electromagnética queda definida por una función no lineal ya que depende de dos variables: la posición de la esfera y la corriente que circula por la bobina:

$$F_{em} = f(I, x) \quad (19)$$

4.2.2. Aproximaciones para la linealización

El siguiente paso es la linealización del sistema, pero para eso debemos definir el punto de equilibrio para la ecuación (19), es decir unos valores de referencia para la corriente que circula por la bobina del electroimán y para la posición de la esfera metálica.

El **punto de equilibrio** será el estado de referencia en la que estará la esfera metálica y a partir de esos valores serán modificados. En nuestro caso la posición de equilibrio será la de **8,5mm** ya que está en el centro de la zona de detección y la corriente en el punto de equilibrio será de **0,8A**.

Esta corriente está justificada por la curva de calibración del electroimán **Figura 20** que muestra que la fuerza necesaria para hacer levitar la esfera metálica se encuentra en la zona cercana a los 0,8A.

En la anterior imagen (**Figura 14**) podemos definir las variables mostradas añadiendo el concepto de posición en equilibrio ([50] y [51]):

- Para la posición:

$$x = x_0 + \Delta x$$

$$\Delta x = x - x_0 \quad (20)$$

- Para la corriente:

$$I = I_0 + \Delta I$$

$$\Delta I = I - I_0 \quad (21)$$

4.2.3. Cálculo del modelo linealizado

Una vez definido el concepto de punto de equilibrio (x_0 y I_0), ya podemos proceder con la linealización del sistema de levitación magnética.

Los sistemas de levitación magnética son sistemas no lineales y para poder trabajar con un modelo útil necesitamos **linealizarla**. Para realizar esta linealización se deben asumir como ciertas las siguientes **aproximaciones**:

1. Si consideramos que las propiedades de los materiales usados son lineales, y la esfera usada de acero/hierro, podemos aproximar según [5] lo siguiente:

El valor de la inductancia dependiente de la distancia se aproxima como:

$$L(x) = L(\infty) + \left(\frac{L(0)}{1 + \left(\frac{x}{a}\right)} \right) \quad (22)$$

2. La constante inductiva fija (para la esfera metálica colocada a una distancia infinitamente lejana es mucho mayor que la inductancia generada por la esfera metálica colocada en la posición de equilibrio

$$L(0) \ll L(\infty) \quad (23)$$

Una vez asumidas estas aproximaciones podemos proceder al cálculo de la fuerza electromagnética producida por el electroimán.

La energía magnética del sistema está definida por:

$$W = \int_{i(0)}^{i(t)} \lambda \, dI \quad (24)$$

El acoplamiento inductivo λ (producido por la interacción entre el electroimán y la esfera) se puede aproximar según [52].

$$\lambda = L(x) \times I(t) \quad (25)$$

La fuerza electromagnética sobre la esfera metálica se desarrolla integrando (23) respecto a la posición de la esfera:

$$F_{em} = \frac{dW}{dx} = -\frac{I^2}{2} \times \frac{dL(x)}{dx} \quad (26)$$

La fuerza electromagnética sustituyendo (22) en (26) se define como [52]:

$$F_{em} = -\left(\frac{L(0)I^2}{2a\left(1 + \frac{x}{a}\right)^2} \right) \quad (27)$$

Sustituyendo en la ecuación (16) la ecuación (27) y sabiendo que todas las fuerzas aparecen en la dirección vertical obtenemos la ecuación (28):

$$m\ddot{x} = mg - \left(\frac{L(0) \times I^2}{2a \left(1 + \frac{x}{a}\right)^2} \right) \quad (28)$$

El método usado para la linealización del sistema, será mediante el desarrollo por series de Taylor de la ecuación no lineal (28), el desarrollo del cálculo seguido está mostrado en [51] siendo el resultado de la linealización por series de Taylor:

$$f(\Delta I, \Delta x) \cong f(I_0, X_0) + \frac{\partial f(I, x)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f(I, x)}{\partial I} \Delta I \quad (29)$$

Así podremos sustituir nuestra ecuación no lineal (19) por la lineal (29). Realizado este cambio y sustituyendo (16), (20) y (21) en (29) obtenemos [51]:

$$m \Delta \ddot{x} = mg - f(\Delta I, \Delta x) \quad (30)$$

Sustituyendo y simplificando obtenemos la ecuación que describe el modelo del sistema de levitación magnética en bucle abierto (sin ningún tipo control sobre el sistema) [51]:

$$\Delta \ddot{x} - \left(\frac{2mg}{a+X_0} \right) \Delta x + \left(\frac{2mg}{I_0} \right) \Delta I = 0 \quad (31)$$

Para realizar la simulación de nuestro sistema de levitación magnética debemos realizar el cálculo de la función de transferencia del sistema.

Realizando la transformada de Laplace de la ecuación (31) conseguiremos como resultado la **función de transferencia de nuestro sistema de levitación magnética** mostrado en la ecuación (32) [51]:

$$\frac{\Delta x(s)}{\Delta I(s)} = \left(\frac{-\left(\frac{2mg}{I_0}\right)}{s^2 - \left(\frac{2mg}{a+X_0}\right)} \right) \quad (32)$$

Siendo “x” e “I” la posición y la corriente en la posición de equilibrio.

4.3. Cálculo de la función de transferencia del sistema de levitación magnética

En este apartado se desarrollará el modelo del sistema de levitación magnética a partir de los cálculos de la función de transferencia del control PID, el hardware de control de corriente, el electroimán, la planta, el hardware de detección de la posición y el hardware del conversor analógico digital.

Para realizar el modelo del sistema se ha seguido como guía el esquema general del sistema de la **Figura 65** pero detallado por bloques más básico, como los que se muestran en la **Figura 67**.

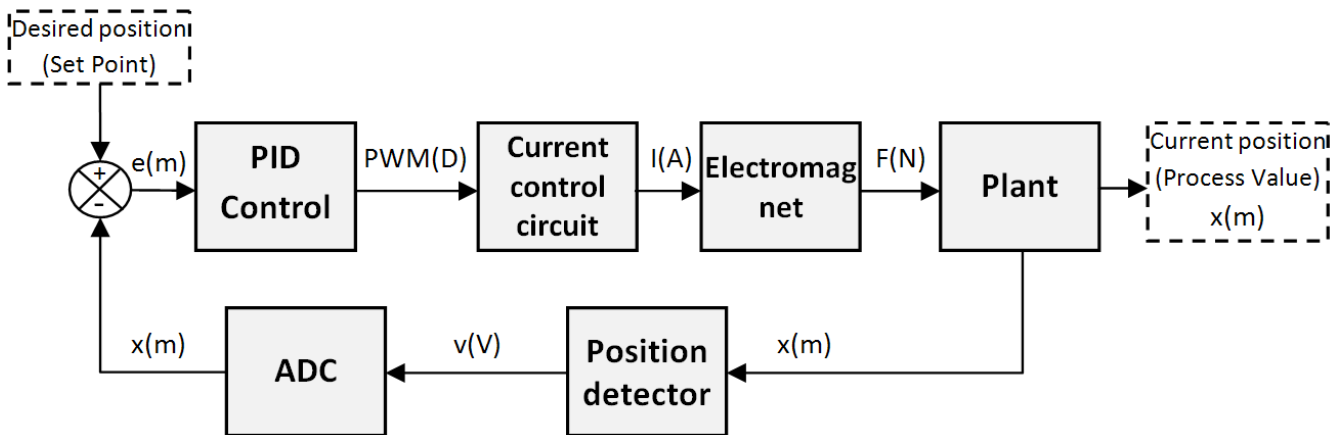


Figura 67. Diagrama detallado de bloques del sistema de levitación magnética

4.4. Cálculo de la función de transferencia de la planta

La planta del sistema de levitación magnética es muy simple, ya que consiste en la fuerza de gravedad que sufre la esfera metálica y que hay que vencer con la fuerza electromagnética como ya se ha explicado anteriormente **(33)**:

$$F_{Res} = m \times \ddot{x} \quad (33)$$

Realizando la transformada de Laplace de la ecuación **(33)** conseguiremos como resultado la **función de transferencia de la planta** mostrado en la ecuación **(34)** [51]:

$$\frac{x(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2} \quad (34)$$

4.5. Cálculo de la función de transferencia del control PID

La acción de control proporcional se genera mediante la multiplicación del error por el parámetro proporcional K_p como muestra la ecuación (35):

$$u_p(t) = K_p e(t) \quad (35)$$

La misión de la acción proporcional sirve para dar una respuesta proporcional al error dado.

La acción de control integral se genera mediante la multiplicación de la integral del error por el parámetro integrador K_i como muestra la ecuación (36):

$$u_i(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (36)$$

La misión de la acción integral es la de la eliminación del error estacionario provocado por la acción proporcional.

La acción de control derivativo se genera mediante la multiplicación de la derivada del error por el parámetro derivativo K_d como muestra la ecuación (37):

$$u_d(t) = K_d \left(\frac{\partial e(t)}{\partial t} \right) \quad (37)$$

La misión del control derivativo es el aumento de la velocidad de respuesta frente a cambios en el valor del error.

El sumatorio de todas las salidas es sumado para formar la variable de salida (OP) quedando la ecuación del control PID como (38):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \left(\frac{\partial e(t)}{\partial t} \right) \quad (38)$$

Los parámetros integral K_i y derivativo K_d también son definidos por su relación con el valor del parámetro proporcional K_p según las ecuaciones (39) y (40):

$$K_i = \left(\frac{K_p}{T_i} \right) \quad (41)$$

$$K_d = K_p T_d \quad (42)$$

La función de transferencia de la acción de control proporcional-integral-derivativo (PID) se puede calcular por la transformada de Laplace, quedando definidas las distintas funciones de transferencia como:

- La función de transferencia de la acción proporcional:

$$G_P(s) = K_p \quad (43)$$

- La función de transferencia de la acción integral:

$$G_I(s) = K_p \frac{1}{T_i s} \quad (44)$$

- La función de transferencia de la acción derivativa:

$$G_D(s) = K_p T_d s \quad (45)$$

La función de transferencia del control PID (46), se calcula sumando (43), (44) y (45) y combinándolas con las ecuaciones (41) y (42):

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_p}{s} + K_d s \quad (46)$$

4.6. Simulación del sistema de levitación magnética

Tras el cálculo de todas las funciones de transferencia que componen el sistema de levitación magnética, mostrados en la **Figura 67**, se va a recopilar cada ecuación asociada a cada uno de los bloques:

- **Control PID:**

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_p}{s} + K_d s \quad (46)$$

- **Circuito de control de corriente:**

$$y(A) = 0,0052 \times (D\%) \quad (5)$$

- **Electroimán:**

$$y(N) = 0.1222 \times (A) \quad (4)$$

- **Planta:**

$$\frac{x(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2} \quad (34)$$

La ecuación (33) tiene como variable “m”, que es la masa de la esfera metálica. La masa de la esfera metálica utilizada en el sistema es de 0,0086 kg.

$$\frac{x(s)}{F(s)} = \frac{1}{0.0086s^2} \quad (47)$$

Las ecuaciones del circuito de control de la corriente y del electroimán se pueden unir para formar un bloque amplificador que los unifique a ambos. El bloque amplificador que resulta de la unión de (4) y (5) tiene ganancia (47):

$$\text{Ganancia} = 0.00063544 \quad (48)$$

La ganancia (48) es resultado de la multiplicación de (4) por (5).

A continuación se realiza los modelos de levitación magnética en lazo abierto, con un control ideal y con un control discreto (a 1kHz de velocidad) para poder ajustar correctamente los parámetros del control PID que tendrá el sistema de levitación magnética implementado.

La **Figura 68** muestra el sistema de levitación magnética realizado en Simulink.

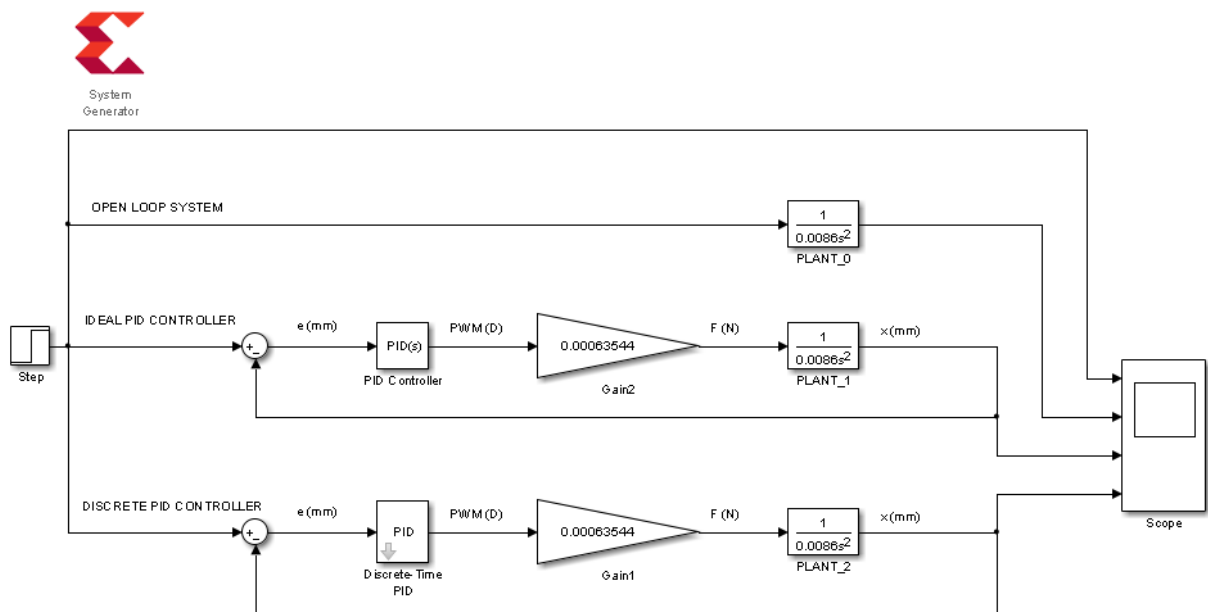


Figura 68 Simulación del sistema de levitación magnética realizado en Simulink

En la figura **Figura 68** se realizan cuatro visualizaciones de datos a través del bloque Scope:

1. Señal escalón de entrada.
2. Señal de salida del sistema en bucle abierto.
3. Señal de salida del sistema en bucle cerrado con control PID ideal.
4. Señal de salida del sistema en bucle cerrado con control PID discreto, realizado con una velocidad de muestreo de 1kSps (1000 muestras por segundo).

Para realizar un ajuste correcto de los parámetros del control PID se ha usado la función autotuning realizado por Simulink para la rama del control ideal PID, La función autotuning realiza muchas pruebas de entradas escalón al sistema con diferentes parámetros del control PID.

El autotuning permite realizar el ajuste de los parámetros del control PID mediante la respuesta del sistema ante una entrada escalón. En la **Figura 69** Se muestra la ventana del control PID en la que ajusta el tiempo de respuesta del sistema.

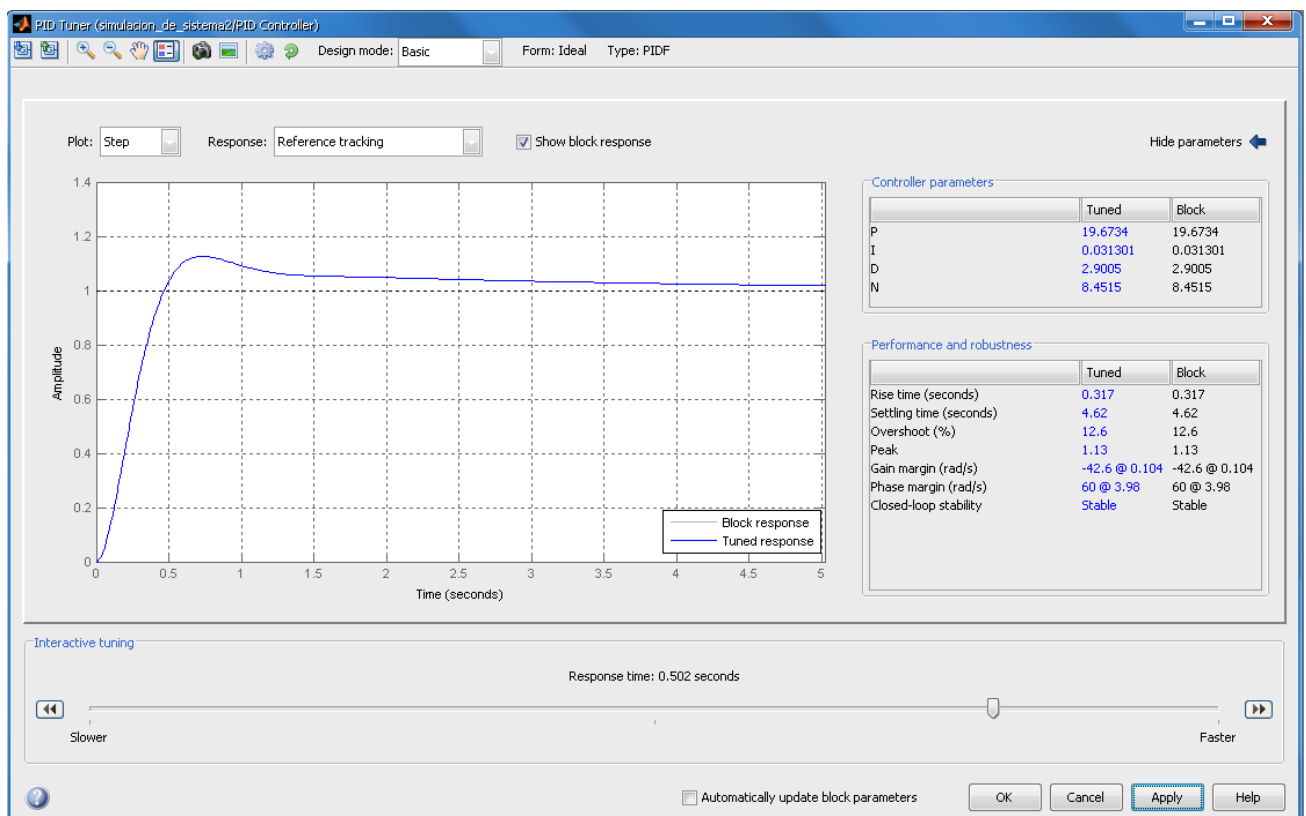


Figura 69 Ajuste de parámetros PID con autotuning de Simulink. Configuración del tiempo de respuesta

En la **Figura 69** se muestra el ajuste de los parámetros del control PID mediante el ajuste del tiempo de respuesta del sistema. El tiempo de respuesta del sistema será de medio segundo, ya que a partir de medio segundo comienza a haber demasiadas sobreoscilaciones en la respuesta del sistema.

En la **Figura 70** se muestra el establecimiento de los parámetros del control PID ideal para conseguir la respuesta deseada, mediante el uso de “autotuning” de Simulink.

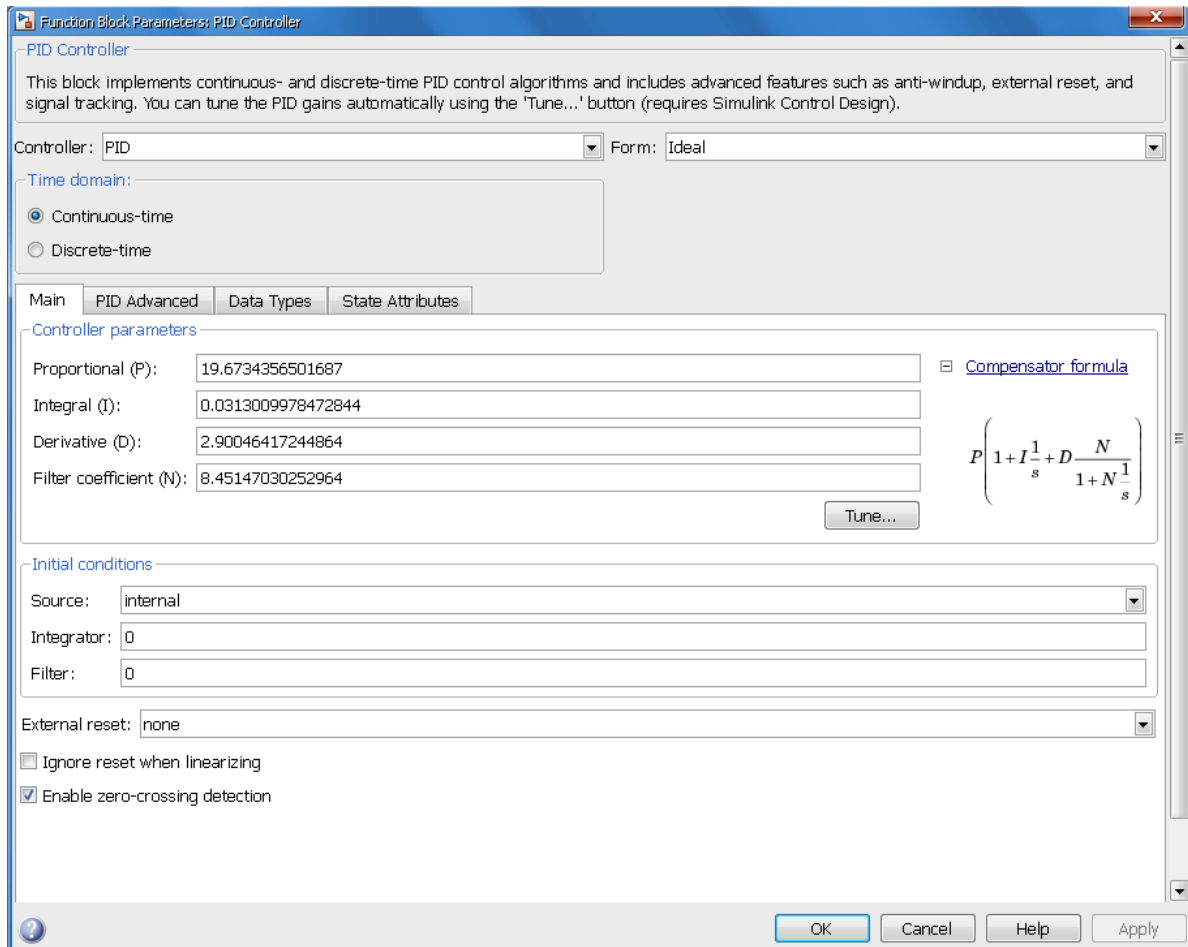


Figura 70 Ajuste de parámetros PID con autotuning de Simulink. Muestra de los parámetros obtenidos.

En la **Figura 70** se muestra el establecimiento de los parámetros del control PID ideal para conseguir la respuesta deseada ($k_p=19,7$ $k_i=0.03$ y $k_d=2.6$). Estos valores de constante proporcional, integral y derivativa serán copiados al control PID discreto, para estudiar su respuesta.

En la

Figura 71 se muestra la respuesta de las cuatro ramas de los diferentes sistemas (Figura 68), ante una respuesta escalón.

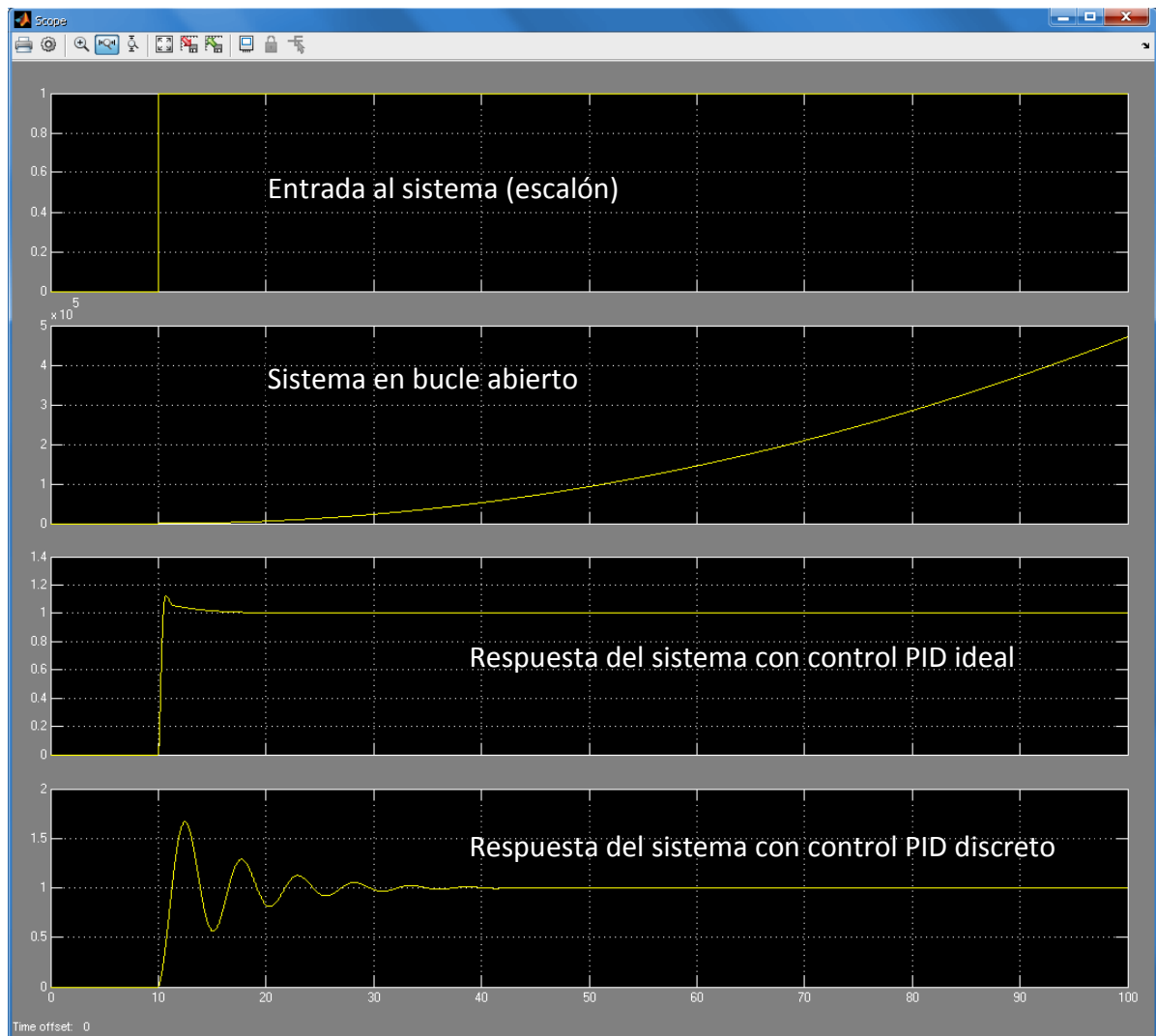


Figura 71 Respuesta del sistema con los parámetros del PID ideal ajustado

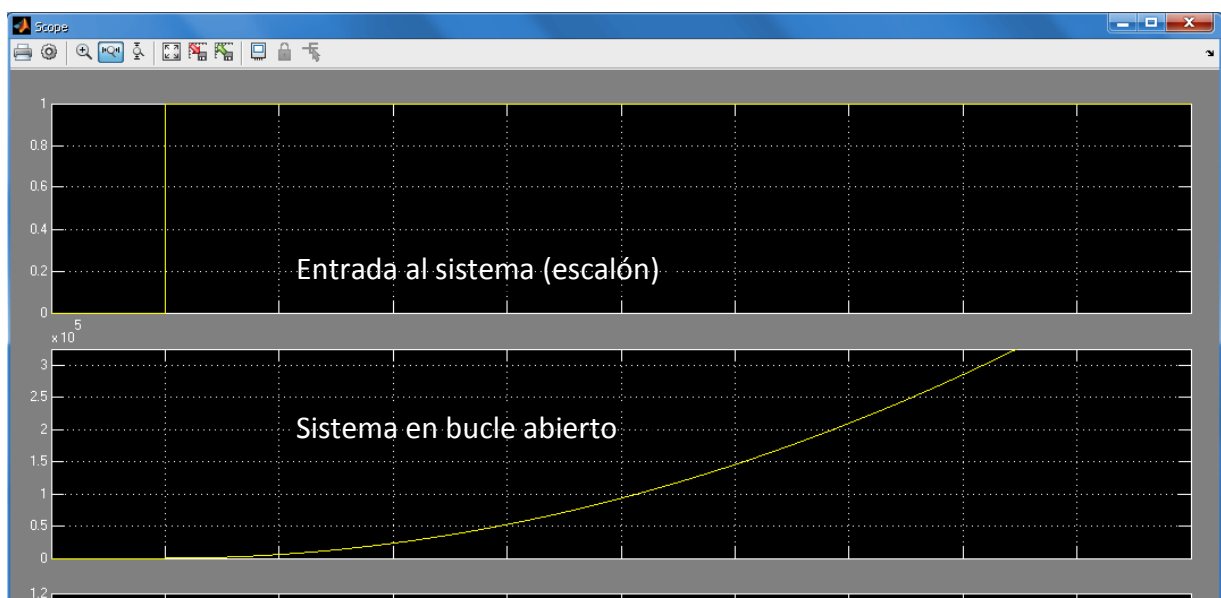
En la

Figura 71 se muestra la respuesta de las cuatro ramas de los diferentes sistemas (**Figura 68**), ante una respuesta escalón. Como podemos observar el sistema en bucle abierto (sistema de levitación magnética en el que el electroimán no ejerce ninguna fuerza sobre la esfera metálica y solo aparece la fuerza de la gravedad. La esfera cae sin control hasta salirse de la zona en la que el electroimán puede ejercer la fuerza suficiente como para controlar la levitación de la misma (zona de trabajo) lo que justifica el desarrollo del sistema de bucle cerrado.

En la

Figura 71 también se muestra las respuestas del sistema en bucle cerrado con control PID ideal y PID discreto con los parámetros ajustados de igual manera. Como se puede observar a pesar de tener los mismos parámetros de ajuste del control, la respuesta del sistema con control PID discreto sobre oscila demasiado, debido a las diferencias de un control ideal a un control discreto.

Tras ajustar los valores del control PID discreto aumentando la parte derivativa para reducir las sobreoscilaciones ($k_p=15$ $k_i=0.03$ y $k_d=15$), se obtiene una respuesta del sistema en bucle cerrado con el control PID discreto cercana a la respuesta del sistema con un control ideal. Como se puede ver en la **Figura 72** la respuesta del sistema con el control PID discreto muestreado a 1kSps es algo más lenta que la respuesta del control ideal, pero estas diferencias son inherentes al cambio de un PID ideal a un control PID discreto.



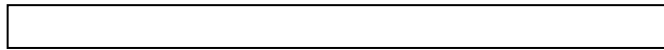


Figura 72 Respuesta del sistema con los parámetros del PID discreto ajustado

Capítulo 5. Diseño y construcción del sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos consistirá en un hardware que tomará las medidas de la posición de la esfera metálica y del valor de la corriente que circulará por el electroimán. Las dos medidas que toma el sistema de adquisición son las señales más importantes del sistema de levitación magnética (**Figura 9**), y además las curvas de calibración de los hardware de medida de posición y de control de la corriente están referenciadas a ellas (ver **Figura 14** y **Figura 26**).

Para la realización del sistema de adquisición de datos, se usará como hardware principal una tarjeta Arduino Mega 2560 [53] basada en el controlador de 8 bits de ATMEL ATmega2560 [54]. Esta tarjeta contiene los componentes para poder usarse como tarjeta de adquisición:

- Contiene el hardware para la comunicación USB con el ordenador.
- Contiene un sistema de adquisición de señales analógicas formado por un convertor analógico digital de 10 bits. El sistema dispondrá de 16 entradas analógicas que tendrán acceso al convertor analógico digital a través de multiplexación, lo que reduce la velocidad de muestreo drásticamente.

La principal ventaja de usar una tarjeta Arduino como principal componente en un sistema de adquisición de datos es su reducido precio y el principal inconveniente es su baja velocidad de muestreo. La reducida velocidad de muestreo del sistema de adquisición de datos no influirá negativamente en el sistema de levitación magnética ya que es un sistema paralelo y autónomo al sistema de control.

Para facilitar la conexión de la tarjeta Arduino mega 2560 se ha incluido un adaptador que proporciona mejor accesibilidad a las entradas y salidas de la tarjeta Arduino, su nombre se llama “MEGA Sensor Shield v2.0”.

La imagen de la **Figura 73** muestra la imagen de la tarjeta Arduino mega 2560 y del adaptador “MEGA Sensor Shield v2.0”.

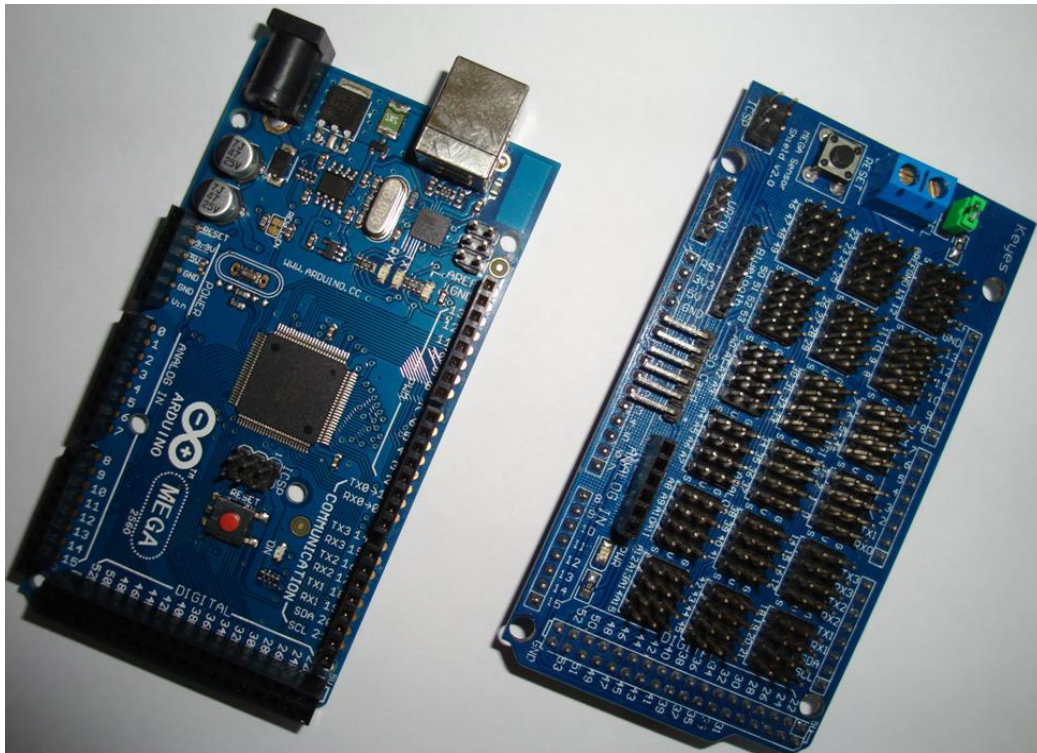


Figura 73. Tarjeta “Arduino Mega 2560” (izquierda) y “Mega Sensor Shield” (derecha)

Como muestra la **Figura 9** las variables más importantes para mostrar en nuestro sistema son las de posición del objeto que levita y del valor corriente que circula por la bobina del electroimán.

- La posición del objeto es la variable de entrada a nuestro sistema de control
- El valor de la corriente que circula por la bobina del electroimán es la salida del sistema de control.

Nuestro sistema de adquisición registrará ambas medidas y las mostrará en la pantalla del ordenador al instante, a fin de conseguir un sistema de adquisición de datos representativo de las variables de nuestro sistema.

El sistema de adquisición de datos está conformado por los siguientes puntos, que son introducidos a continuación:

1. Seleccionar los puntos del circuito de donde se va a hacer la medida.
2. Una vez seleccionados los puntos, adaptar la señal (si procede) de salida de esos puntos de medida al rango de entrada del convertidor analógico digital integrado en el controlador ATmega2560.
3. En la última etapa se describe el diseño y la programación de la aplicación para adquirir los datos y mostrarlos en pantalla de forma representativa usando para ello el software LabVIEW [15].

Los punto anteriormente introducidos, se desarrollarán con más detalle a continuación.

5.1. Selección de los puntos de medida

Para hacer la selección de los puntos de medida tenemos que acudir esquema general del sistema de levitación magnética mostrado en la **Figura 9**. En este esquema podemos observar que las señales buscadas de posición y corriente están accesibles en el “Hardware de medida de posición” y en el “Hardware de control de la corriente de la bobina” respectivamente.

5.1.1. Punto de medida y adaptación de la señal para la posición

Para seleccionar el punto de medida para la posición del objeto iremos al circuito de detección mostrado en la **Figura 11** del apartado “Hardware de medida de posición”.

Como podemos observar en el circuito, la toma de medida para el conversor analógico digital de la tarjeta “FPGA Spartan 3E starter kit board” se hace en los terminales del fototransistor. Para el sistema de adquisición de datos se tomará el mismo punto de medida.

- Una vez localizado el punto desde se tomará la medida se necesita comparar la resolución del conversor con el rango de la señal analógica que contiene la información de la posición, para comprobar si es adecuado o necesita un circuito intermedio de adaptación de la señal.
- Se comprueba las características del conversor analógico digital de la tarjeta Arduino Mega 2560 y del controlador que contiene la tarjeta, el ATmega2560 ([53] y [54]). El conversor analógico digital incluido en el controlador tiene las siguientes características:
 - Rango de entrada: 0V a 5V.
 - Nº de bits de resolución: 10 bits.

Con los datos obtenidos se calcula la resolución del conversor aplicando la ecuación (49), la resolución es la mínima diferencia de voltaje de entrada que produce un cambio en la salida:

$$\text{Resolución} = \frac{\text{Rango de } V_{in}}{2^{n^{\circ}\text{bits}} - 1} \quad (49)$$

$$\text{Resolución} = \frac{5V}{2^{10}-1} = 4.88mV \quad (50)$$

Por tanto la resolución del convertor será de 4,88mV. Esta resolución es suficientemente pequeña para que los datos de la posición de la esfera que levita sean representativos, ya que como se puede ver en **Figura 14**, la precisión que se consigue con esta resolución es de menos de medio milímetro.

La siguiente imagen (

Figura 74) muestra el circuito de detección con la salida de la señal analógica que será enviada a la entrada analógica "A4" de la tarjeta Arduino Mega2560.

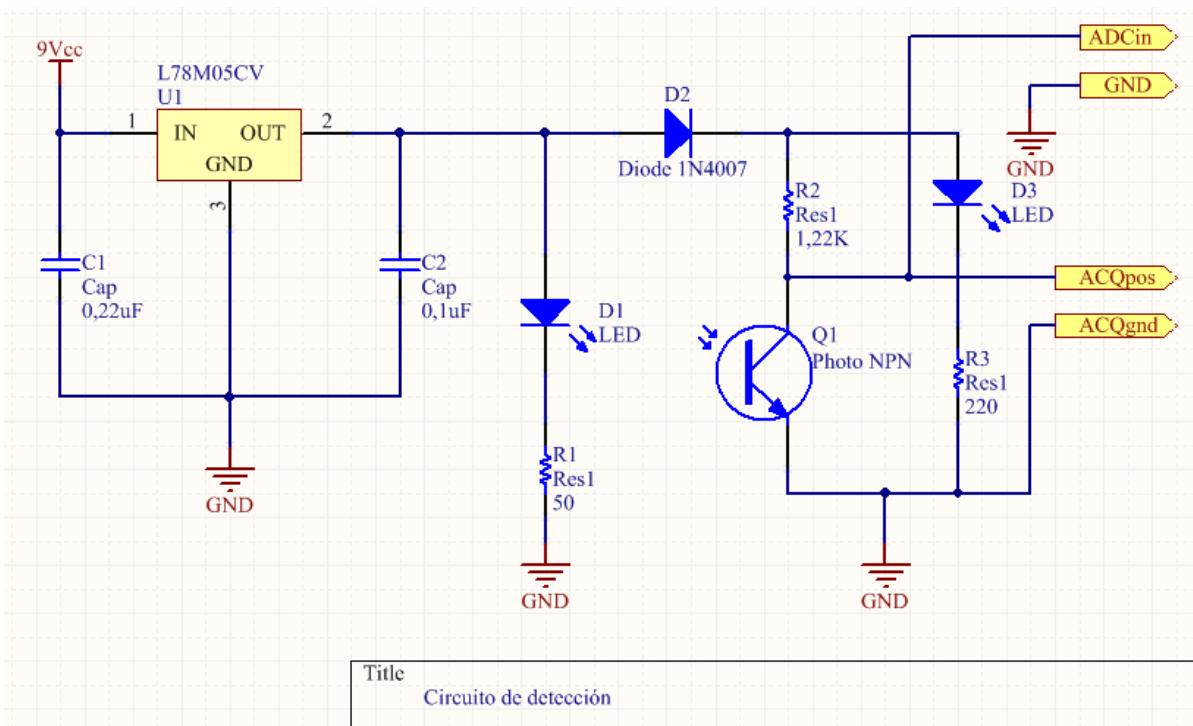


Figura 74. Esquemático del circuito de detección con la toma de medida del sistema de adquisición de datos.

5.1.2. Punto de medida y adaptación de la señal para la corriente

Para seleccionar el punto donde se medirá la corriente que circula por la bobina del electroimán iremos al circuito de control de la corriente de la bobina mostrado en la **Figura 21** del apartado “Hardware de control de la corriente de la bobina”.

Como podemos observar (**Figura 21**), el circuito de control de la corriente no dispone de una salida que proporcione directamente la medida del valor de la corriente.

- Por lo tanto se debe diseñar un circuito transductor que haga una toma del valor de la corriente y tenga como salida una señal analógica de voltaje variable para que pueda ser leída por el conversor analógico digital de la tarjeta Arduino Mega 2560.
- Se usará como transductor de corriente un sensor de corriente lineal de tipo toroidal modelo CSLA2CF [55].

Este sensor tiene las siguientes características:

1. Sensibilidad: $20\text{mV} \cdot \text{N}$ (para $V_{cc} = 8\text{Vdc}$).
2. Tensión de alimentación (V_{cc}): desde $5,4\text{Vdc}$ hasta $13,2\text{Vdc}$
3. Offset de salida: $V_{cc}/2$.

La **Figura 75** muestra las dimensiones y la forma del sensor.

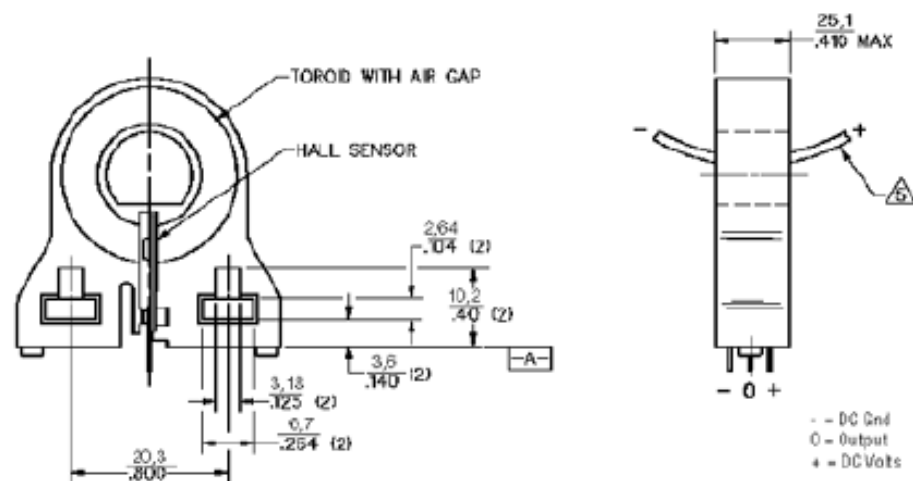


Figura 75. Dimensiones del sensor de corriente lineal CSLA2CF [55]

La corriente que vamos a registrar será de entorno a 1 amperio (para asegurar la corriente máxima será de 1,5 amperios), según las especificaciones proporcionadas por el fabricante [55] la sensibilidad del sensor es de $20\text{mV} \cdot \text{N}$

(el número de vueltas que daremos con el cable al toroide). Daremos el número máximo de vueltas posible al toroide para mejorar la precisión de la medida.



Figura 76. Sensor de corriente CSLA2CF mostrado con 10 vueltas de cable al toroide

Por motivos de espacio (ver **Figura 76**), al toroide del sensor se darán 10 vueltas.

Es decir, que la variación del voltaje de salida para una variación de 0 a 1.5A será de **[55]**:

$$1.5A = 20mV \times 10vueltas = 300mV \quad (51)$$

Teniendo en cuenta que la resolución del conversor es de 4,88mV (como ya se ha calculado anteriormente), calculamos el error en la medida de la corriente, con una regla de tres, ya que el sensor es lineal **[55]**, de la siguiente forma:

$$\frac{4,88mV \times 1500mA}{300mV} = 24.4mA \quad (52)$$



Es decir que el uso de este sistema para hacer la medida de corriente tiene un error de 24,4mA. Una resolución suficiente para el sistema de adquisición de datos.

La curva de calibración teórica para el sensor, teniendo en cuenta el offset y el incremento del voltaje por aumento de intensidad de corriente será de:

$$x(V) = \left(\frac{V_{cc}}{2}\right) + (20mV \times N \times y(A)) \quad (53)$$

Sustituyendo la tensión de alimentación y el número de espiras que daremos al toroide (8Vdc y 10 vueltas) y despejando la corriente de la ecuación obtenemos:

$$x(V) = \left(\frac{8V}{2}\right) + (0,02V \times 10 \times y(A)) \rightarrow$$

$$-y(A) = -\frac{x(V)}{0,2} + \frac{4}{0,2} \rightarrow$$

$$y(mA) = \frac{1000}{0,2} x(V) - \frac{4000}{0,2} \rightarrow$$

$$y(mA) = 5000x(V) - 20000 \quad (54)$$

Esta ecuación **(54)** es la que tenderá la curva de calibración del sensor de corriente, y por tanto es la ecuación que deberemos configurar en el software para calcular el nivel de corriente dado en mA a partir de la señal de salida del sensor lineal de corriente.

La señal de salida del sensor de corriente es de 4 Vdc para 8 Vdc de alimentación **[55]**. Es decir, que la señal de salida del sensor de corriente para 0mA (4Vdc) está próxima a saturar el conversor analógico digital (0-5Vdc de rango), por lo que se instalará el sensor de corriente en sentido contrario. Este modo de instalación asegura que el conversor no se saturará y provoca que la ganancia de 20mV por espira sea negativa al cambiar el sentido de la corriente por lo tanto reformularemos **(53)** en la siguiente ecuación **(55)**:

$$x(V) = \left(\frac{V_{cc}}{2}\right) - (20mV \times N \times y(A)) \quad (55)$$

Sustituyendo los valores por los usados en el sistema obtenemos la reformulación de (54) con el nuevo sentido de la corriente en la ecuación (56).

$$y(mA) = -5000x(V) + 20000 \quad (56)$$

Una vez calculados los valores que usaremos, realizaremos el diseño del circuito de adaptación de la señal del sensor de corriente para la adquisición de datos y se comprobará de forma experimental la ecuación (56) obtenida de forma teórica.

Para poder realizar una simulación realista del bloque de medida de corriente, es necesario disponer de un modelo del transformador de corriente. A continuación se describirá el proceso de diseño del esquemático del circuito de control de la corriente con el sensor de corriente lineal toroidal:

- Debido a que el sensor de corriente no es un componente común contenido en las librerías de Altium Designer, se ha creado un componente ex profeso para el circuito de adaptación de la señal del sensor lineal de corriente. Para crear el esquemático en Altium designer, se ha creado el componente de cero siguiendo en la medida de lo posible la forma real del componente para que sea representativo del mismo.

La siguiente imagen (

Figura 77) muestra el editor de componentes de Altium Designer con el sensor lineal CSLA2CF ya creado.

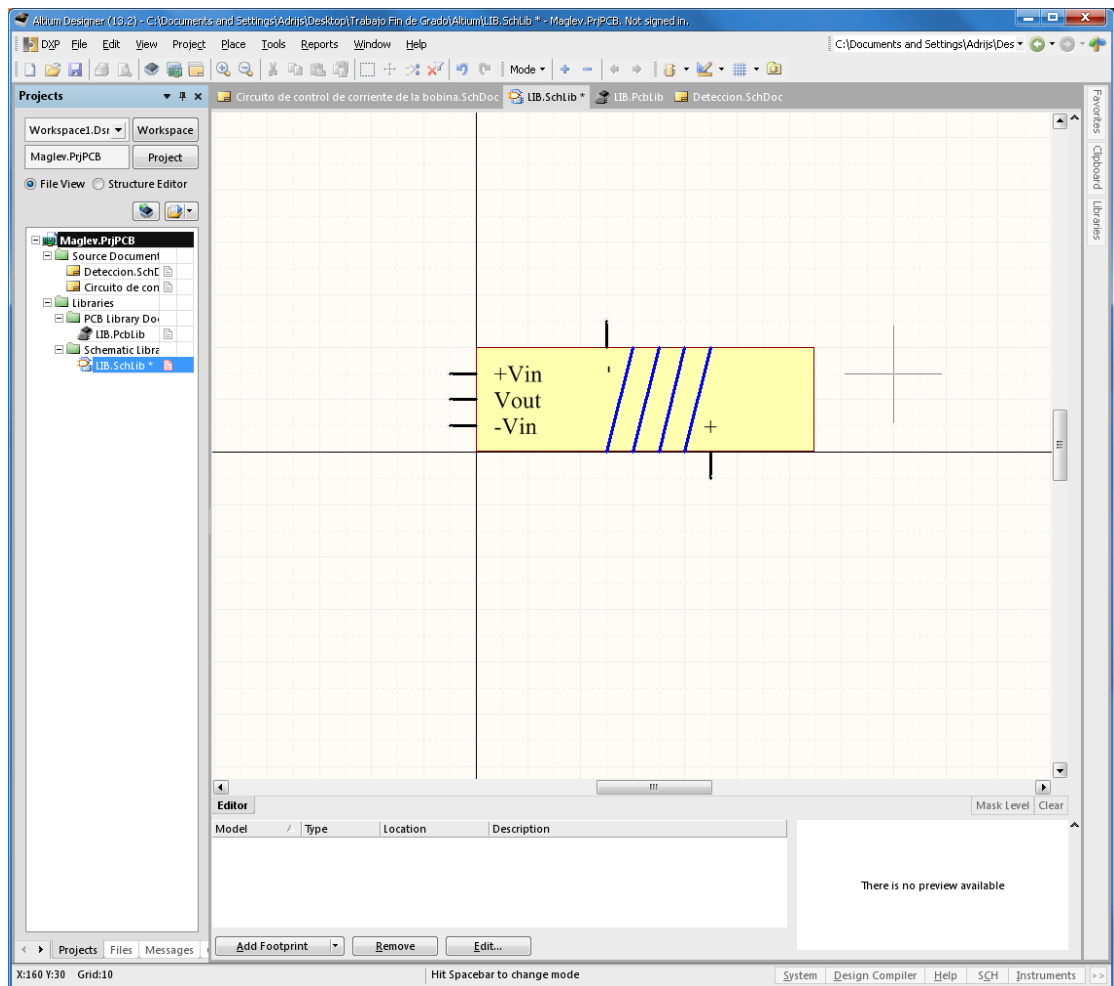


Figura 77. Librería de Altium Designer mostrando la creación del nuevo componente

- Como podemos ver en la
-
- **Figura 77** los terminales añadidos son los 3 de señales agrupados (+Vcc, Vout y -Vcc) y los terminales del cable que transporta la corriente que se quiere medir, indicando el sentido de la corriente que el sensor detectará como positivo y negativo.
- Una vez compilado la librería con el nuevo componente, usamos el nuevo componente en el circuito de control de la corriente mostrado a continuación en la **Figura 78**.

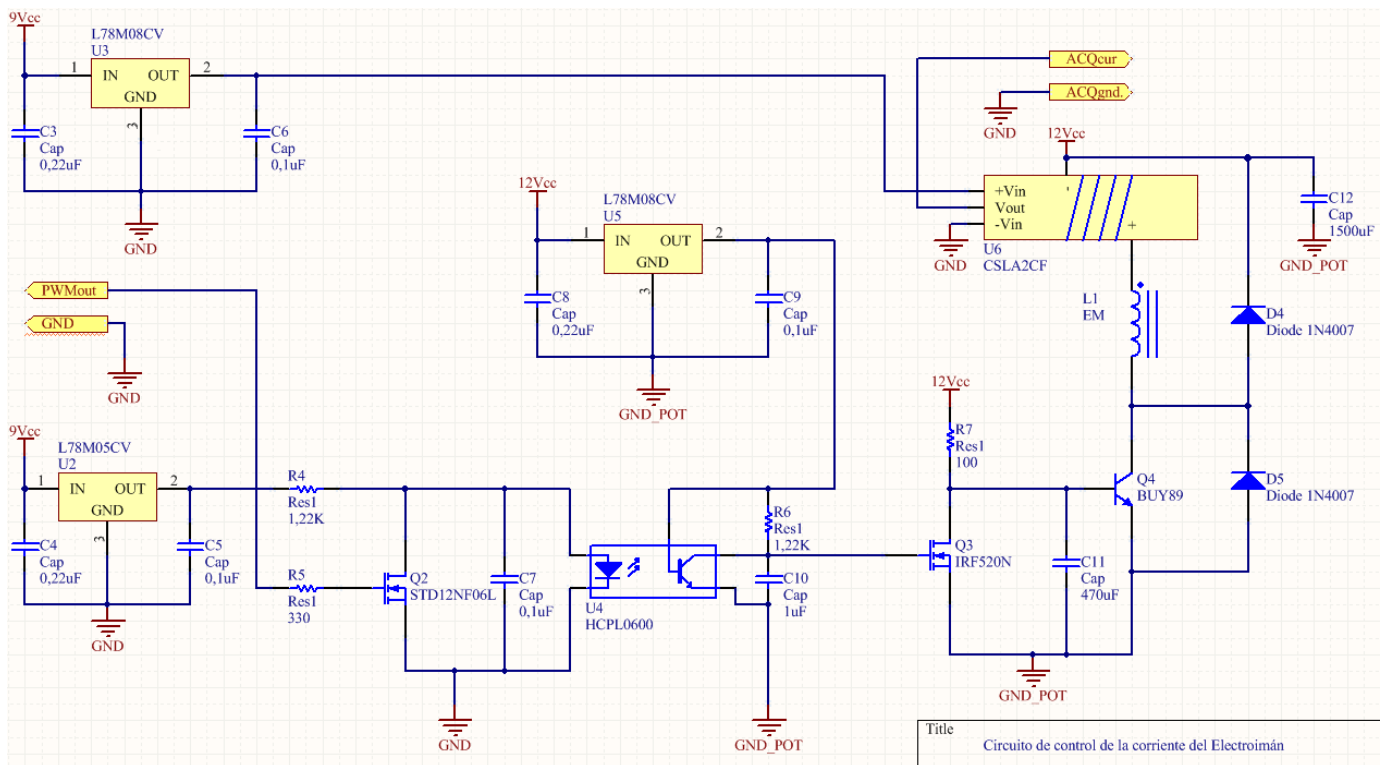


Figura 78. Librería de Altium Designer mostrando la creación del nuevo componente

- Como se puede observar en la **Figura 78** se ha alimentado el sensor con los 8V de tensión en continua con un nuevo regulador de tensión conectado a la masa de señales.
- El sentido de la corriente que quiere ser medida es negativa, lo que indica que la ganancia del sensor será negativa, por los motivos expuestos anteriormente.
- La conexión con la tarjeta Arduino Mega 2560 será a través de la entrada analógica "A0".

Una vez se ha concluido con los esquemáticos de los dos circuitos, añadimos los cambios a los circuitos de detección de posición y de control de la corriente. La siguiente imagen (**Figura 79**) muestra la foto del circuito real tras añadirle los cambios que implica el sistema de adquisición de datos.

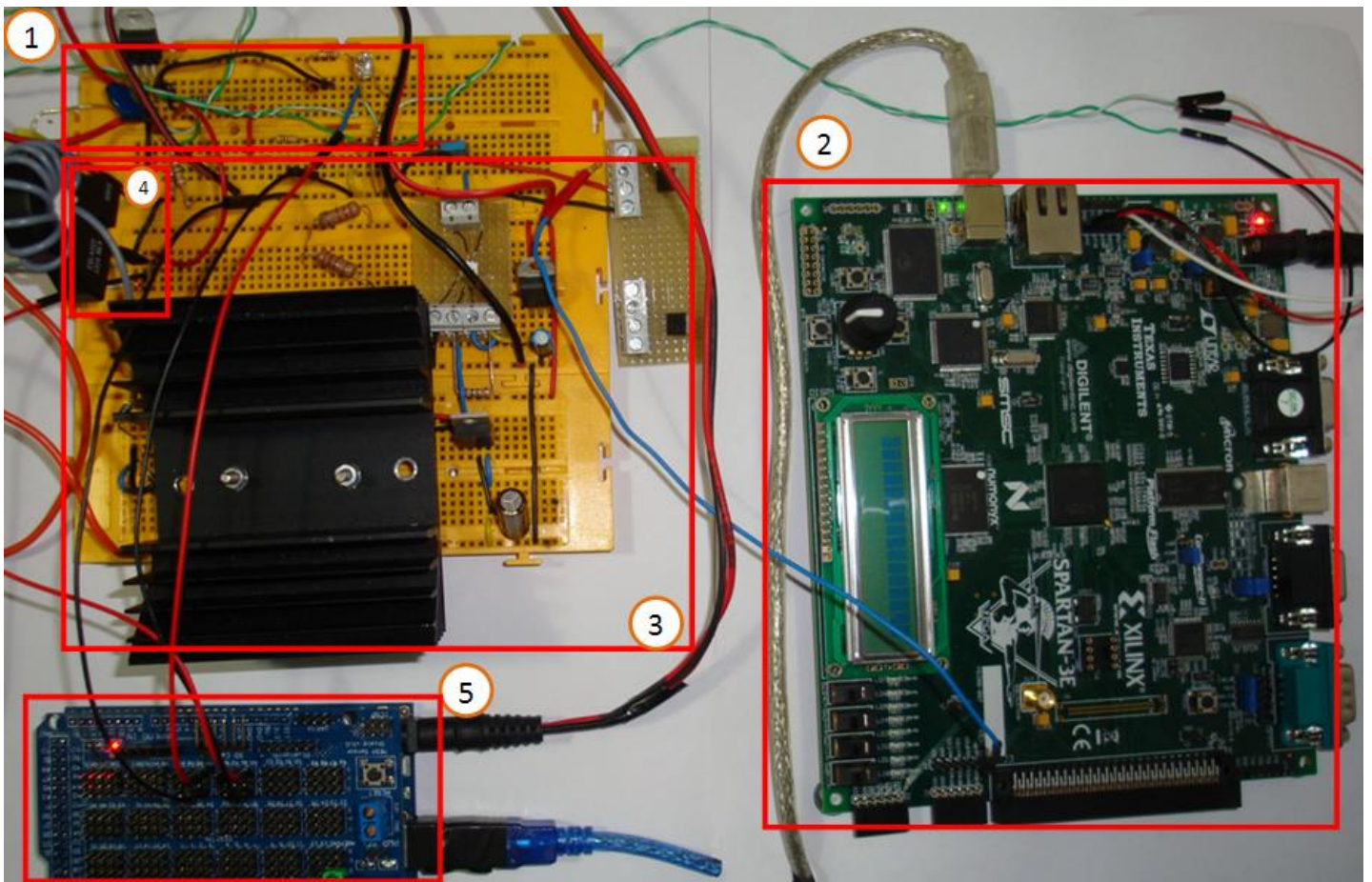


Figura 79. Foto de la circuitería del sistema de levitación magnética con el sistema de adquisición de datos

En la **Figura 79** se observan los siguientes elementos indicados con números:

1. Circuito de detección de posición, la señal analógica de la posición conectado a la entrada “A4” de la tarjeta Arduino.
2. Tarjeta “FPGA Spartan 3E Starter Kit Board”.
3. Circuito de control de la corriente de la bobina.
4. Sensor lineal de corriente de tipo toroidal modelo CSLA2CF, la señal de salida del sensor está conectado a la entrada “A0” de la tarjeta Arduino.



5. Tarjeta Arduino Mega 2560, con la alimentación externa y la conexión USB al ordenador conectada.

5.1.3. Curva de calibración de los sensores de posición y corriente

En este apartado se comprobará la señal de salida de cada una de las medidas ante varias medidas para comprobar su correcto funcionamiento.

Estas comprobaciones se realizan por seguridad ya que el conversor analógico digital de la tarjeta Arduino es un componente delicado con un rango de entrada de 0V a 5V y por tanto debemos asegurarnos que nuestros sensores no alcancen nunca valores fuera del rango de nuestro conversor ya que podrían dañarlo permanentemente.

1. La curva de calibración de la medida de la posición ya está realizada en la **Figura 14** dentro del apartado de diseño del circuito de detección. Así que no es necesario hacer comprobaciones extras.
2. La curva de calibración de la medida de la corriente de la bobina la realizaremos con un reóstato (o regulador de intensidad), para medir el voltaje de salida del sensor y la intensidad de corriente que circula por el reóstato para ver si la salida se ajusta a los valores calculados.

Las imágenes siguientes muestran el montaje para la calibración del sensor

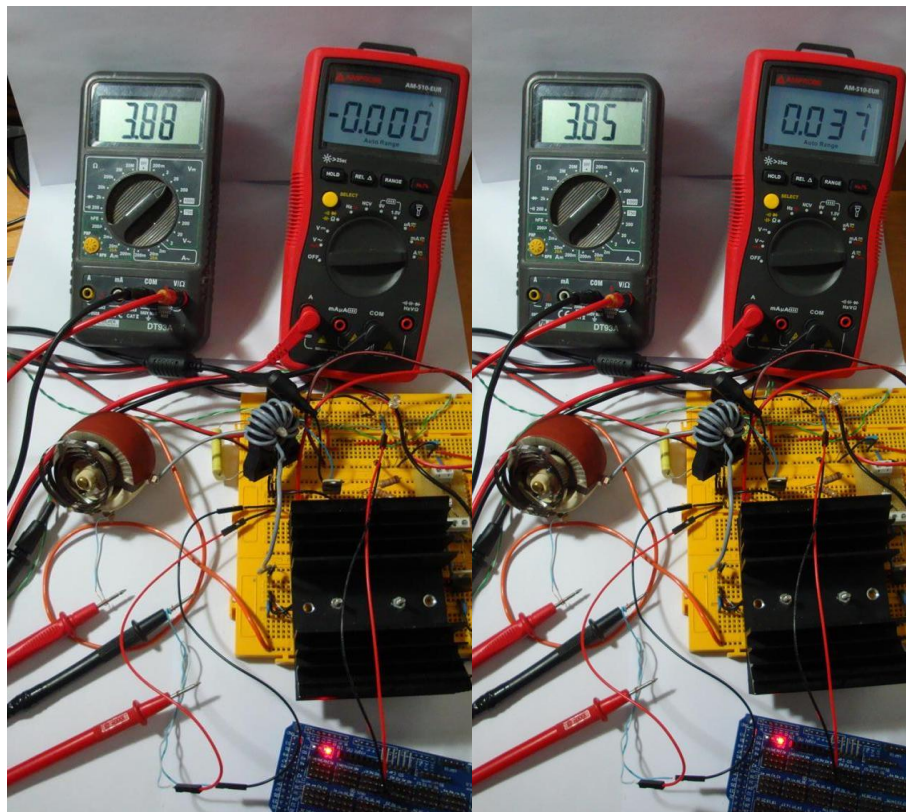


Figura 80. Prueba de calibración del sensor lineal de corriente. Con 0mA (izquierda), con 37mA (derecha)

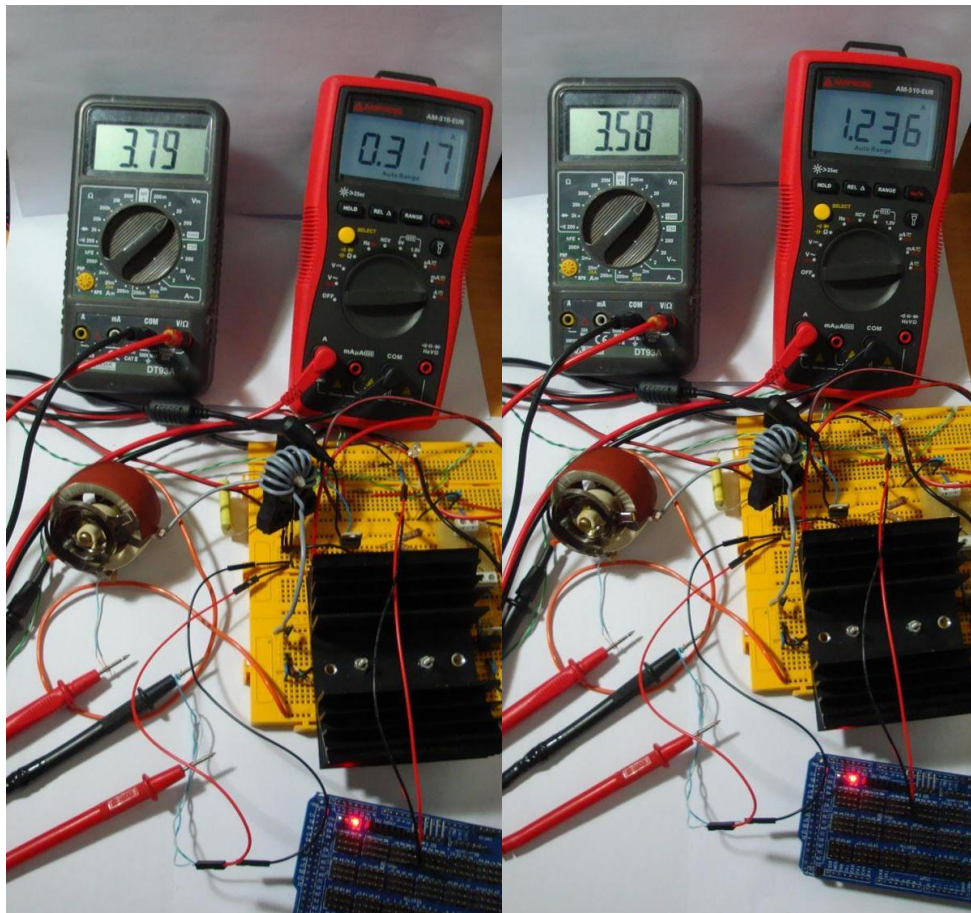


Figura 81. Prueba de calibración del sensor lineal de corriente. Con 317mA (izquierda), con 1236mA (derecha)

La linealización de la respuesta del sensor lineal de corriente se ha realizado con diez medidas de corriente diferentes, repitiendo el proceso mostrado en las **Figura 80** y **Figura 81**.

La linealización del sensor lineal de corriente se muestra en la **Figura 82**

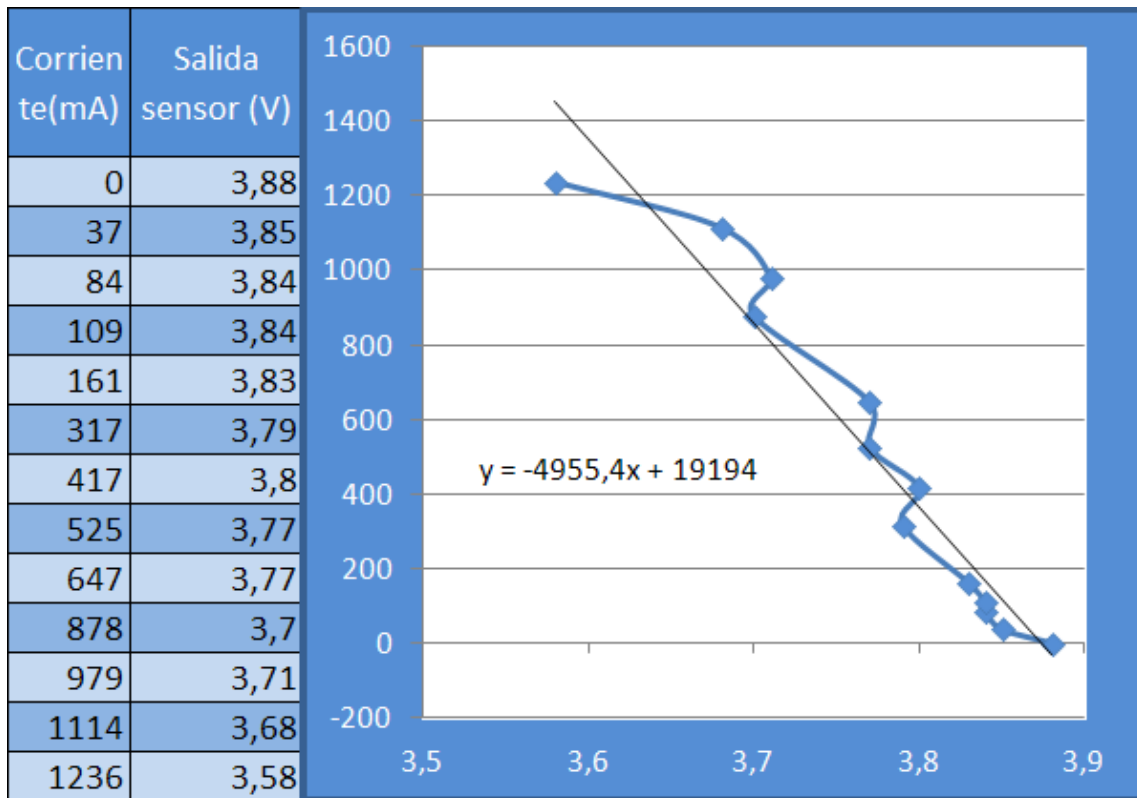


Figura 82. Curva de calibración del sensor de corriente

La imagen anterior (**Figura 82**) muestra la curva completa de calibración y la ecuación linealizada.

Como podemos ver la ecuación linealizada es:

$$y(mA) = -4955x(V) + 19194 \quad (57)$$

Donde:

- Y: La medida de la corriente en mA
- X: La medida de la tensión de salida del sensor de corriente.

La ecuación linealizada de la curva de calibración coincide aproximadamente con la calibración del fabricante (**32**), ya calculada anteriormente. Por tanto podemos asegurar que la conexión del sensor lineal de corriente CSLA2CF es correcta y responde a la calibración del fabricante.

Así que podemos conectar ambas medidas (posición y corriente) a la entrada analógica "A0" de la tarjeta Arduino mega para empezar a programar el sistema de adquisición en LabView.

5.2. Programación del sistema de adquisición en LabView

En la elección del software para la programación de la interfaz del sistema de adquisición de datos se han barajado varias posibilidades, como programarla en el propio lenguaje de Arduino, usar el software Simulink [57] o usar el finalmente elegido LabVIEW. Se ha decidido LabVIEW por ser el software que más desarrollado tiene las herramientas de creación de un interfaz gráfico de adquisición de datos (medidores de aguja, botones, selectores, etc. Ya prediseñados en las librerías de LabVIEW).

En primer lugar hay que destacar que la plataforma Arduino está pensada para programarse con su propio lenguaje de alto nivel. Así que para poder usarse como tarjeta de adquisición de datos controlada por LabView hay que seguir unos sencillos pasos descritos a continuación [56].

La propia compañía National Instruments lanzó hace tiempo y de manera gratuita un firmware programado en el código de Arduino junto a una Toolkit propia de Arduino para LabView. Esta Toolkit es una expansión del programa que incluye los elementos básicos para poder hacer uso de las entradas y salidas analógicas o digitales de varios modelos de tarjeta Arduino, incluido el modelo que vamos a usar el Arduino Mega 2560.

Este Firmware sirve de enlace entre el hardware de Arduino y el software LabView. Una vez cargado en la tarjeta Arduino, LabView es capaz de comunicarse con la tarjeta Arduino directamente sin ningún programa intermedio. Para este proyecto no es necesario modificar el Firmware suministrado por National Instruments [arduino labview], así que solo tenemos que cargarlo en la tarjeta Arduino Mega 2560.

La imagen

Figura 83 contiene el firmware de National Instrument justo después de ser cargado en la tarjeta Arduino.



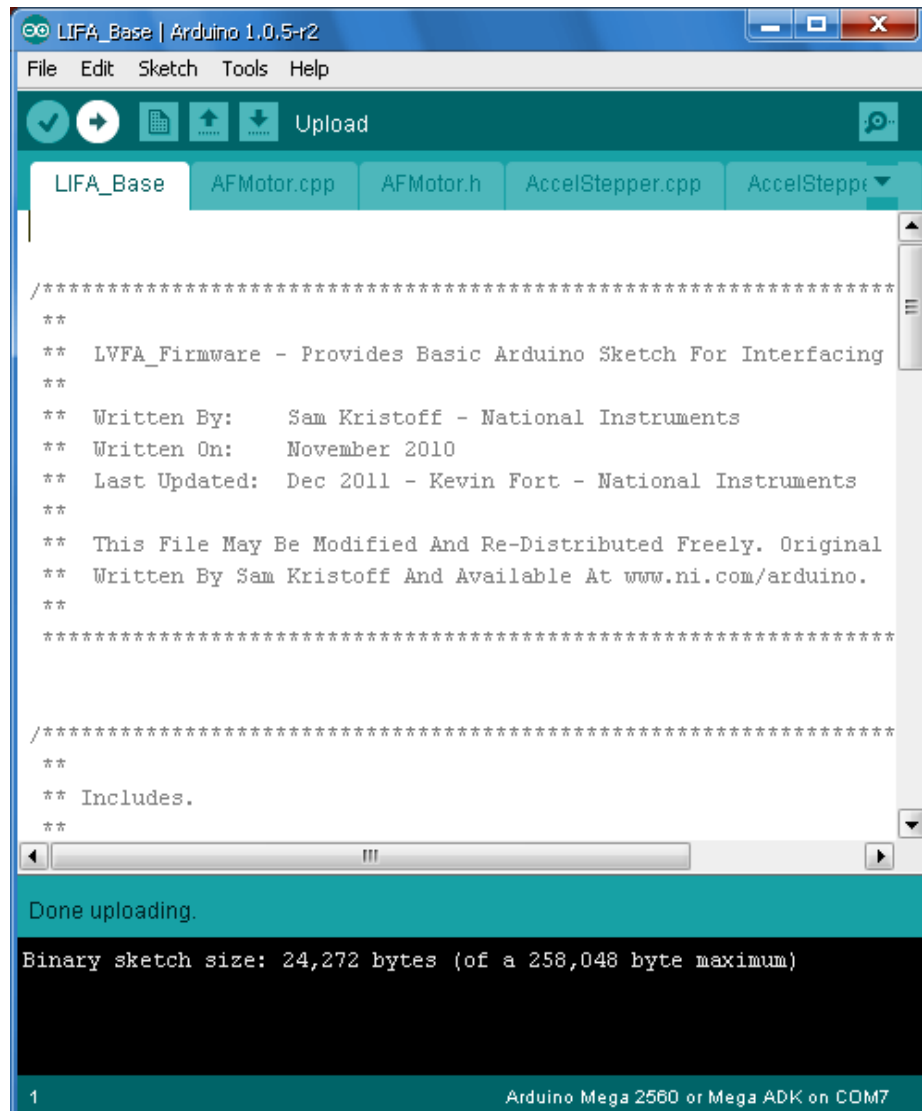


Figura 83. Imagen del Firmware en lenguaje Arduino tras ser cargado en la tarjeta Arduino Mega 2560

Una vez tengamos la tarjeta lista para usarse nos disponemos a crear el programa de adquisición de datos en LabView.

Para ello tenemos que tener en cuenta los siguientes aspectos que se han descrito anteriormente:

- El sistema de adquisición tiene dos entradas analógicas diferentes
- Las entradas analógicas necesitan ser adaptadas vía software para mostrar los datos en las unidades correctas

En las siguientes imágenes (**Figura 84** y **Figura 85**) se mostrará la programación del interfaz gráfico en LabView del sistema de adquisición de datos.

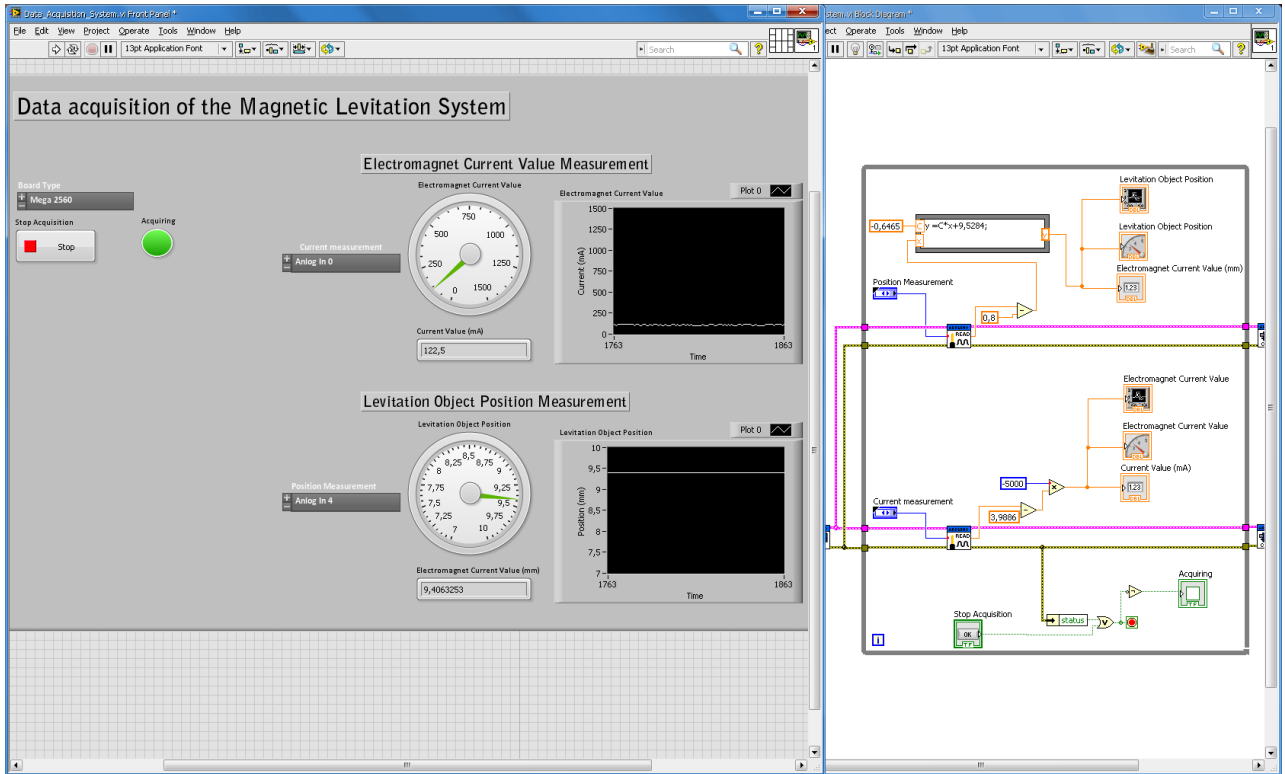


Figura 84. Programación del sistema de adquisición de datos. Programa completo

Primero se mostrará el Diagrama de bloques explicándose la programación por bloques funcionales. Tras ello se explicara el Panel de control asociando cada conjunto de elementos a los bloques vistos anteriormente. Por último se realizará las pruebas funcionales para comprobar que el sistema de adquisición de datos funciona correctamente y está calibrado.

En la **Figura 85** se muestra el Diagrama de bloques del programa de adquisición de datos:

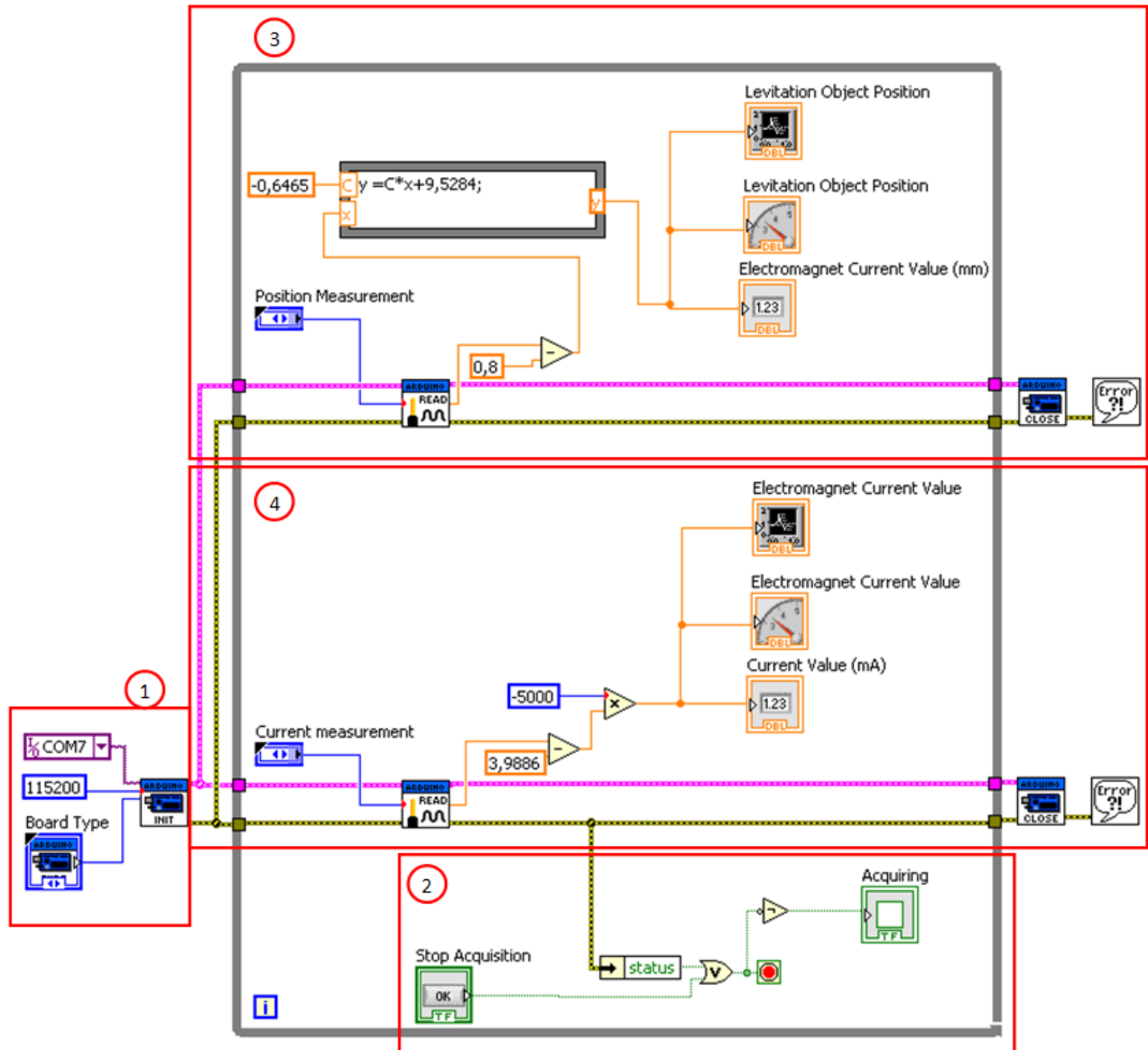


Figura 85. Programación del sistema de adquisición de datos.
Diagrama de bloques

En la **Figura 85** se han indicado con números las partes más importantes del diagrama de bloque, a continuación se describirá brevemente cada una de las partes indicadas:

1. Es la entrada de la información proveniente de la tarjeta Arduino. Este bloque establece la comunicación por USB entre la tarjeta Arduino y el ordenador, para ello hay que configurar los parámetros de la comunicación.

- El primer bloque es el selector interno de NI-VISA (National Instrument Virtual Instrument Architecture API)
Es el bloque que se utiliza para establecer comunicación entre diferentes hardware y el software de LabView. Este bloque soporta muchos tipos de protocolos de comunicación como: USB, comunicación Serie, Ethernet, etc.
En este caso el puerto de entrada/salida del ordenador que se va a usar, en este caso es el puerto COM7 y el protocolo de comunicación será USB.
 - El segundo bloque es la velocidad en baudios de la comunicación, estableceremos la velocidad de USB estándar para las tarjetas Arduino de 115200 baudios.
 - El último bloque es un selector (que se mostrará en la imagen del “Panel de control”) que establece el tipo de tarjeta que se va a usar, en nuestro caso será la tarjeta Arduino Mega 2560.
2. Es el conjunto de bloques que controlará el bucle “while” (cuadrado gris). El bucle “while” repetirá la acción de adquirir datos, para así obtener una medida continua y en tiempo real. Este conjunto de bloques sirve para salir del bucle cuando presionemos el botón de Stop del Panel de control, indicando también si está adquiriendo datos con el indicador luminoso “Acquiring” del Panel de control.
3. Es el conjunto de bloques que adapta la señal recibida de la posición para expresarla en milímetros.
Para ello se usa el bloque de adquisición de entrada analógica (que nos dará una salida del valor en voltios que está recibiendo). A esta señal hay que restarle el offset de error que contiene medida a 0V de entrada (de 0,8V).
Para convertir la salida en milímetros debemos ir a la curva de calibración del sistema de detección (**Figura 15**) y aplicar la ecuación de la posición linealizada, que es la siguiente:

$$\begin{cases} 0 < x < 7.5 & y(\text{mm}) = 7.5 \\ 7.5 \leq x \leq 9.5 & y(\text{mm}) = 0.6465x + 9.5284 \\ 9.5 < x & y(\text{mm}) = 9.5 \end{cases} \quad (58)$$

Tras aplicarle la ecuación a la señal, la mostramos por tres vías diferentes: Un gráfico de Posición vs Tiempo, un medidor de aguja móvil y un display simple.

Por último la adquisición de este canal se cierra con el bloque “Close” que mostrará un mensaje de error cuando haya algún problema interno en este canal.

4. Es el conjunto de bloques que adapta la señal recibida de la medición de corriente por el sensor linear CSLA2CF, para expresarla en miliamperios.

Para ello se usa el bloque de adquisición de entrada analógica (que nos dará una salida del valor en voltios que está recibiendo). A esta señal hay que restarle el offset que tiene el sensor [55], que como ya vimos era la mitad del voltaje de alimentación (en nuestro caso 8V) así que debería ser 4V, pero como se comprueba con una corriente de 0A el sistema tiene un error de offset, así la señal que hay que restar finalmente es de 3.9886V.

Tras esto amplificamos e invertimos siguiendo el procedimiento que explicamos al diseñar el hardware, que es el siguiente:

- La señal está invertida para evitar saturación.
- La respuesta del sensor con 10 espiras es de 0,2V por cada 1A. Por tanto multiplicaremos por 5000 para obtener 1000 unidades por cada amperio. Es decir obtendremos el valor de la corriente en mA.

Tras aplicarle la adaptación a la señal, la mostramos por tres vías diferentes: Un gráfico de Posición vs Tiempo, un medidor de aguja móvil y un display simple.

Por último la adquisición de este canal se cierra con el bloque “Close” que mostrará un mensaje de error cuando haya algún problema interno en este canal.

En la **Figura 86** se muestra el Panel de control del programa de adquisición de datos:

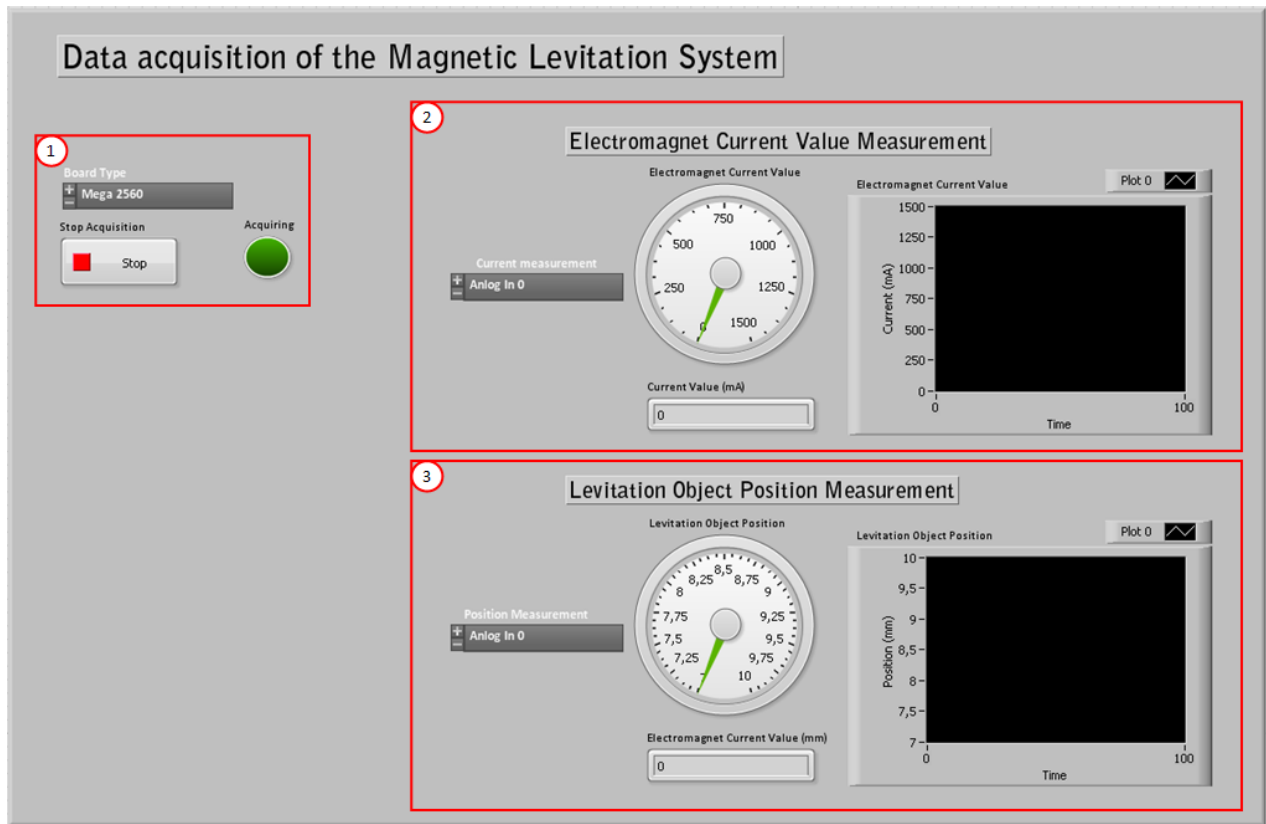


Figura 86. Programación del sistema de adquisición de datos. Panel de control

En la **Figura 86** se han indicado con números las partes más importantes del Panel de control, a continuación se describirá brevemente cada una de las partes indicadas:

1. Son los botones de control del sistema de adquisición, este conjunto incluye:
 - El selector de tipo de tarjeta Arduino (antes descrito en el Diagrama de bloques).
 - El Botón de “Stop” para parar el programa de adquisición de datos.
 - Indicador luminoso de funcionamiento.
2. Zona de medida de la corriente de la bobina del electroimán. Como se puede ver incluye el canal al que se le va a introducir la señal analógica de la medida de la corriente, con los tres medios para mostrar el valor de la corriente ya descritos antes:
 - Gráfico corriente vs tiempo.
 - Indicador de aguja móvil.
 - Display simple.

3. Zona de medida de la posición del objeto que levita. Como se puede ver incluye el canal al que se le va a introducir la señal analógica de la medida de la posición del objeto, con los tres medios para mostrar la posición, igual que la medida de corriente.

Por último haremos una prueba final del funcionamiento completo del sistema de adquisición de datos:

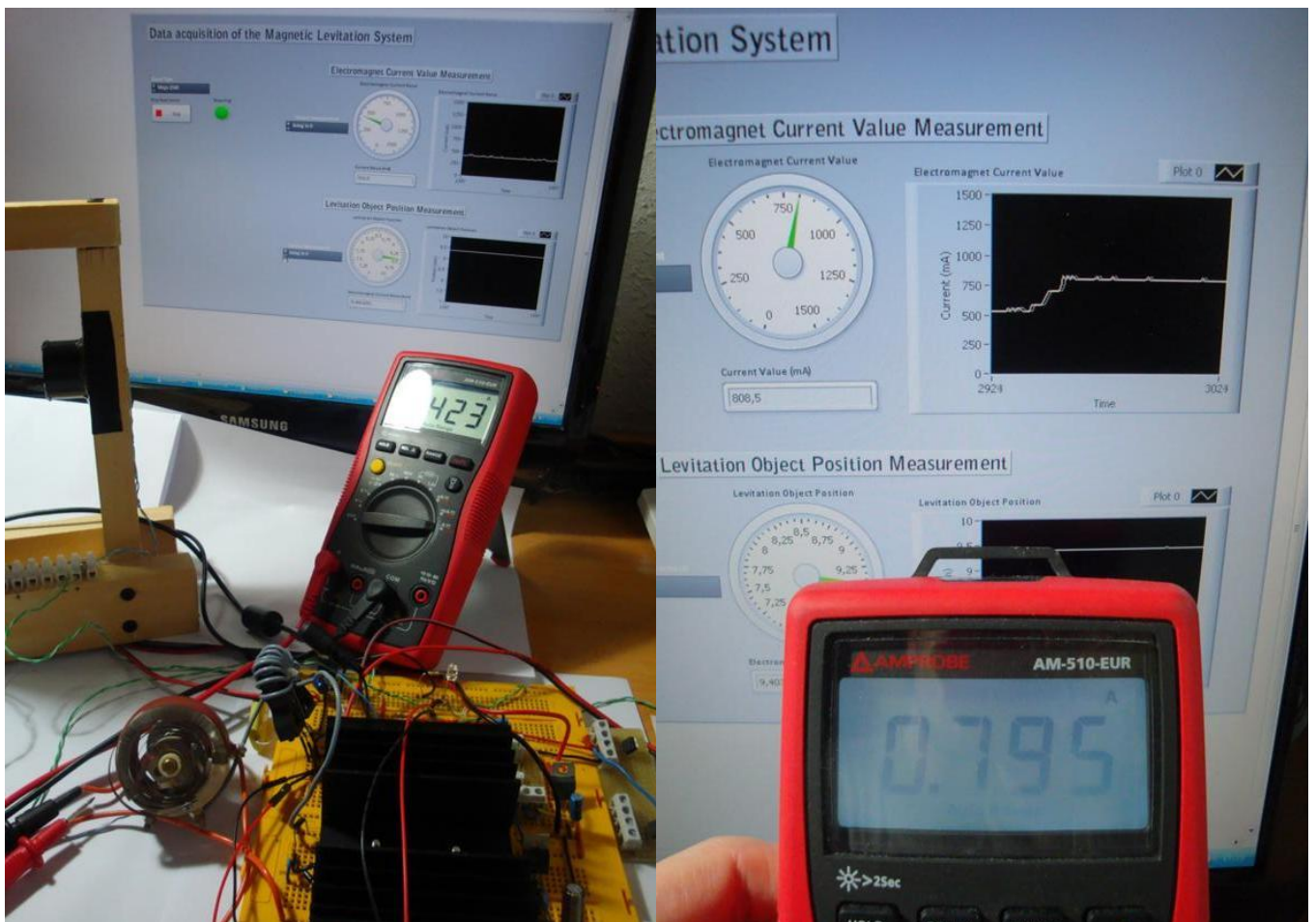


Figura 87. Programación del sistema de adquisición de datos. Prueba de funcionamiento del sensor de corriente

En la **Figura 87** se ha realizado el montaje con reóstato similar al montaje de la **Figura 80** y **Figura 81** para poder controlar el nivel de corriente que pasa por el sensor y comprobar así la medida realizada por el sistema de adquisición con el de un polímetro de uso general.

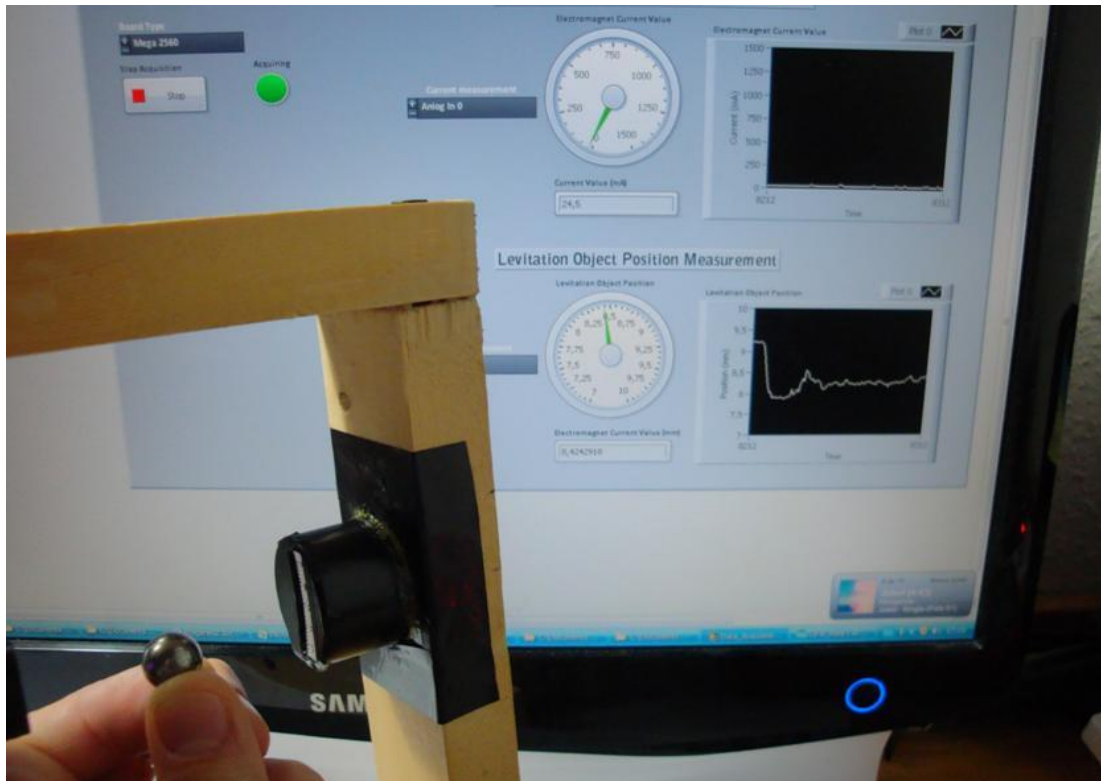


Figura 88. Programación del sistema de adquisición de datos. Prueba de funcionamiento del detector de posición

En la **Figura 87** y **Figura 88** se comprueba como los valores mostrados por el sistema de adquisición de datos son los introducidos en el sistema.



Capítulo 6. Resultados del sistema

6.1. Introducción

En el Capítulo 6 se mostrarán los resultados del sistema de levitación magnética. En el presente capítulo se han unido las diferentes partes del sistema para conseguir todos los componentes necesarios para realizar el sistema completo de levitación magnética.

En la primera parte del Capítulo 6 se ajustará el control PID que ha sido implementado en la FPGA en el Capítulo 3, tras la simulación del sistema en el Capítulo 4. Una vez obtenido la configuración hardware completa y con el control PID ajustado se procederá a cargar la configuración en la memoria de la FPGA y analizar la cantidad de recursos de la FPGA usados.

6.2. Ajuste del control PID implementado

Tras el desarrollo del control PID implementado en la FPGA, se requiere el ajuste de los parámetros del control PID teniendo en cuenta la simulación del sistema en el Capítulo 4.

Para ello se va a comparar la respuesta del sistema en bucle cerrado con un control PID discreto de 1kSps ya analizado en el Capítulo 4 con la respuesta del sistema en bucle cerrado con el control PID implementado en la FPGA. Esta comparación se muestra es mostrada en la

Figura 89.

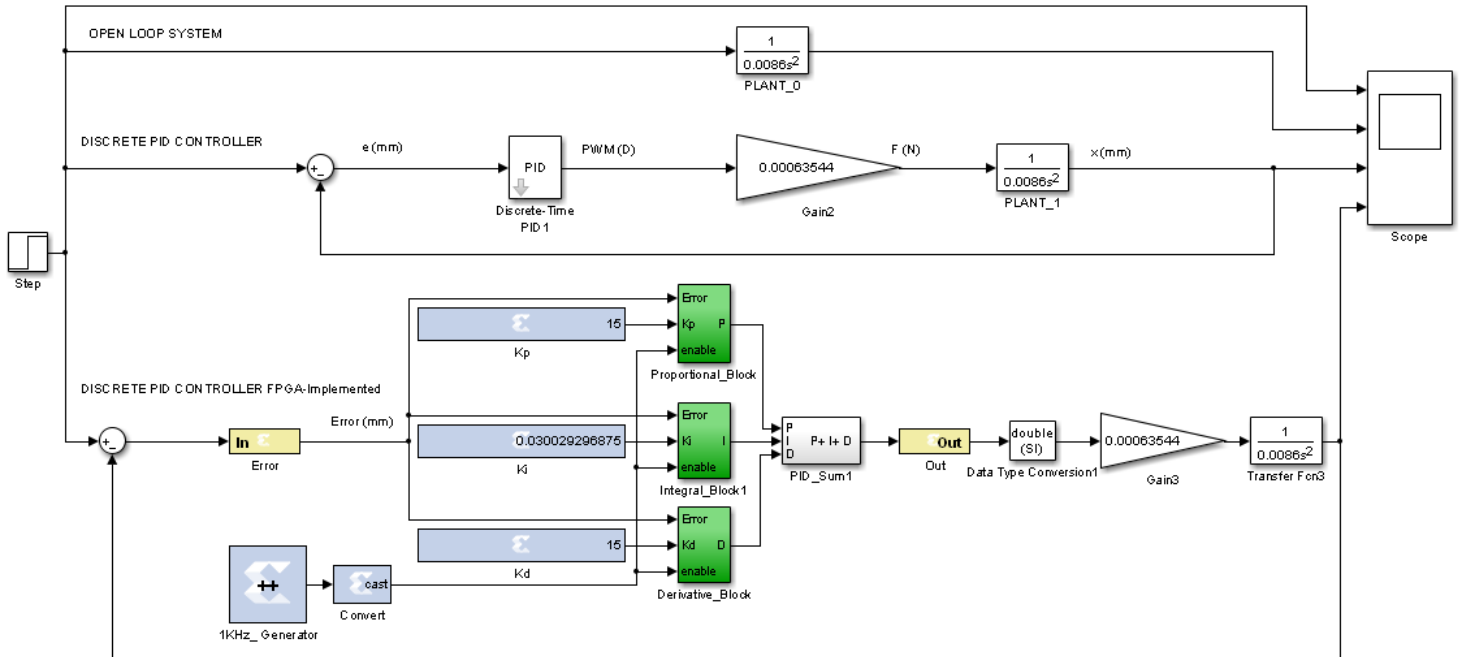


Figura 89. Simulación del control PID que se ha implementado en la FPGA

Como muestra la

Figura 89 los parámetros del control PID implementado en la FPGA serán los mismos que el control PID discreto.

En la **Figura 90** se muestran cuatro señales que corresponden:

1. Entrada escalón de 7,5mm a 8,5mm, es decir, se simula el control de la levitación de una esfera metálica colocada en la posición de 7,5mm, y el sistema de levitación magnética elevará la esfera metálica a la posición de 8,5mm y la mantendrá levitando en esa posición.
2. Respuesta del sistema en bucle abierto.
3. Respuesta del sistema en bucle cerrado con el control PID discreto de 1000 muestras por segundo.
4. Respuesta del sistema en bucle cerrado con el control PID discreto implementado en la FPGA con los parámetros ajustados.

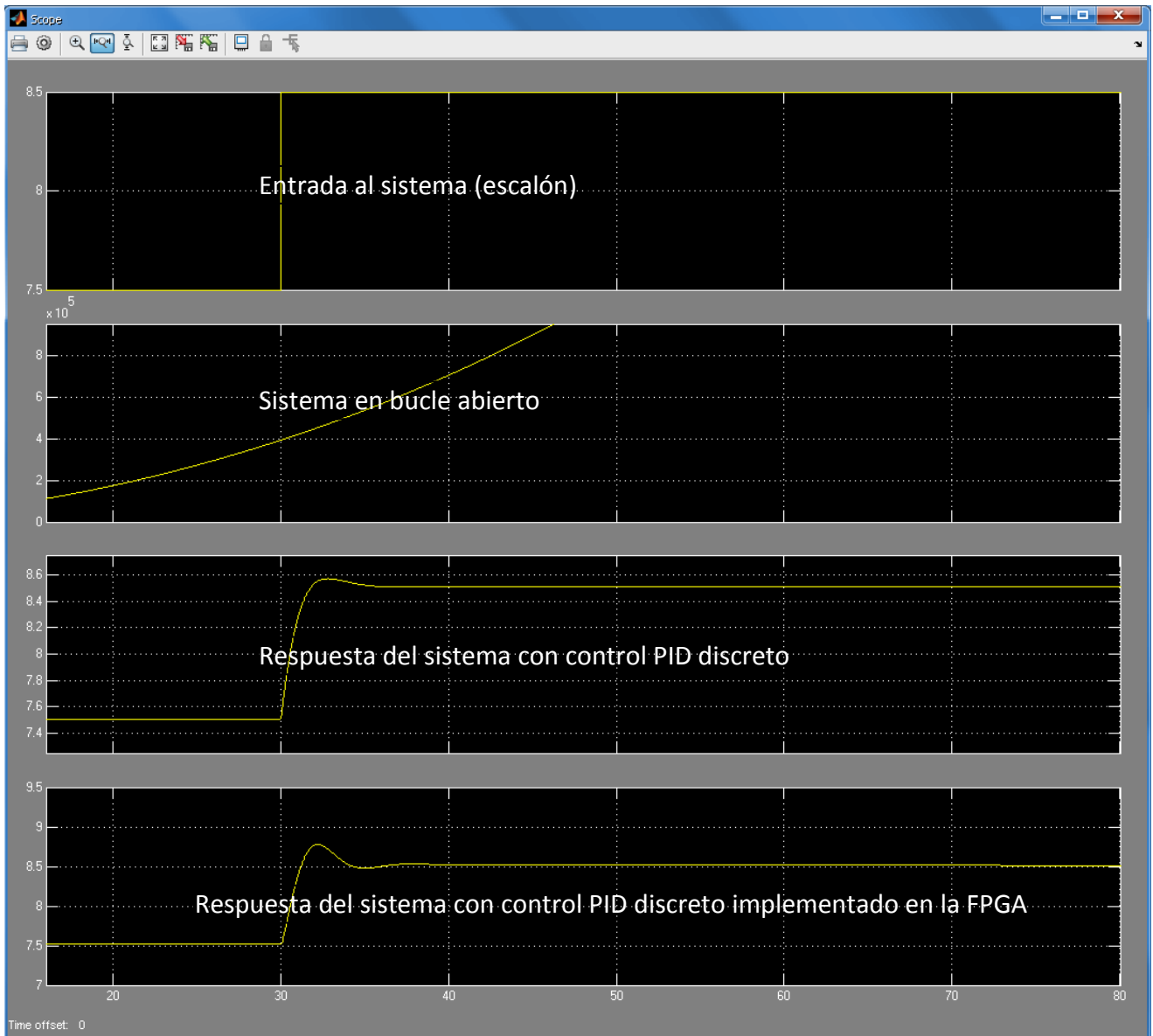


Figura 90. Respuesta del control PID realizado con bloques de Xilinx

Como se puede observar en la **Figura 90** los rangos de la posición para el control de la levitación de la esfera metálica se mantienen dentro de los rangos de la zona de trabajo definidos en **Figura 15** para la posición de la esfera metálica.

A continuación, en la

Figura 91, se comprobará la salida del control PID que envía al hardware de control de corriente para comprobar que se mantiene dentro del rango del ancho de pulso admitido de entre 0 y 100% de ancho de pulso.

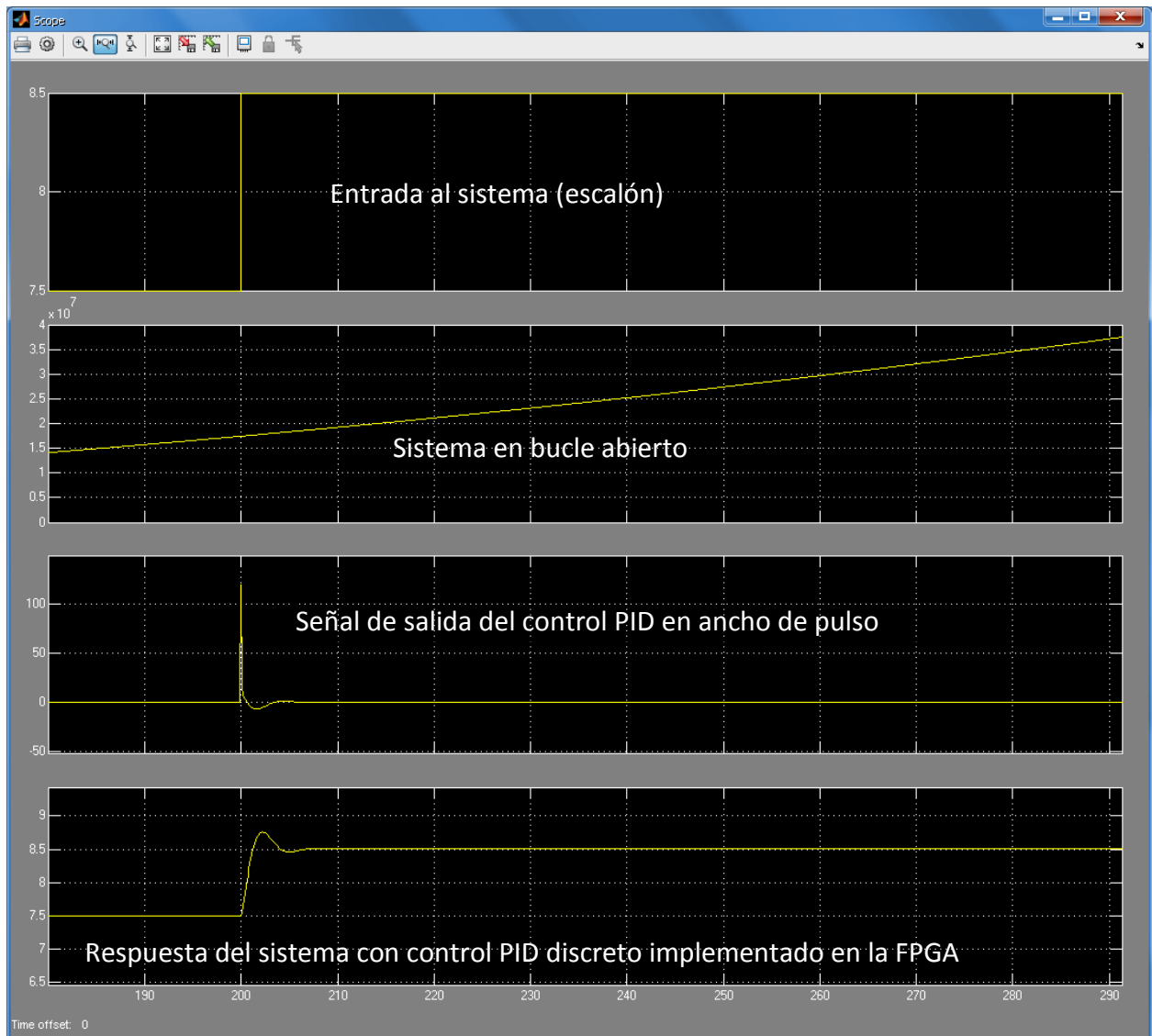


Figura 91. Respuesta del control PID realizado con bloques de Xilinx

Como se puede observar en la

Figura 91 los rangos de la señal de ancho de pulso se salen del rango del sistema de levitación.

La señal de salida mostrada en la

Figura 91 muestra que el control envía una señal que se desvía más del 20% el límite máximo de nuestro sistema. Los datos mostrados en la

Figura 91 muestran que el control requiere que la fuerza del electroimán sea mayor para poder realizar el control requerido.

El problema de la baja potencia del electroimán se ha observado durante la calibración del circuito de control de la corriente que circula por la bobina del electroimán, mostrado en la **Figura 26**, ya que la corriente máxima que consigue suministrar el circuito de control de la corriente es apenas 0,550 Amperios cuando lo deseable es de al menos 0,850 Amperios. **Esta circunstancia hace inviable la levitación magnética de la esfera metálica con el hardware de control de la corriente descrito en el Capítulo 3.**

6.3. Análisis de los recursos usados en la FPGA

En este apartado analizaremos el uso de recursos utilizados en la FPGA para la configuración hardware del control PID, el control del pre-amplificador y el convertor analógico digital utilizado para el sistema de levitación magnética.

En la **Figura 92** se muestra el análisis que proporciona el ISE Designe Suite tras compilar el código HDL realizado en bloques de Xilinx **Figura 63**.

Device Utilization Summary			
Logic Utilization	Used	Available	Utilization
Number of Slice Flip Flops	245	9,312	2%
Number of 4 input LUTs	424	9,312	4%
Number of occupied Slices	347	4,656	7%
Number of Slices containing only related logic	347	347	100%
Number of Slices containing unrelated logic	0	347	0%
Total Number of 4 input LUTs	524	9,312	5%
Number used as logic	424		
Number used as a route-thru	100		
Number of bonded IOBs	19	232	8%
Number of BUFGMUXs	1	24	4%
Number of MULT18X18SIOs	10	20	50%
Average Fanout of Non-Clock Nets	1.92		

Figura 92. Recursos utilizados en la FPGA para el control PID

En la **Figura 92** se puede observar que el nivel de utilización de la FPGA es muy bajo ya que el número de flip-flops (FF) y de look up tables (LUT) es en ambos casos menor del 5% disponible en la FPGA Spartan 3E. En cambio en el empleo de multiplicadores específicos el código implementado requiere de 10 multiplicadores de 20 disponibles, siendo los multiplicadores los componentes más limitados en la FPGA. Aún así el código HDL está bastante optimizado, permitiendo la introducción de mejoras en el futuro.

6.4. Respuesta real del sistema

En este apartado se cargará la configuración hardware en la memoria flash PROM de 4MB y se analizará la respuesta del sistema con ayuda del osciloscopio.

En la **Figura 93** se puede observar el proceso de creación de archivo .mcs para cargarlo en la memoria flash de la tarjeta “FPGA Spartan 3E Starter Kit”

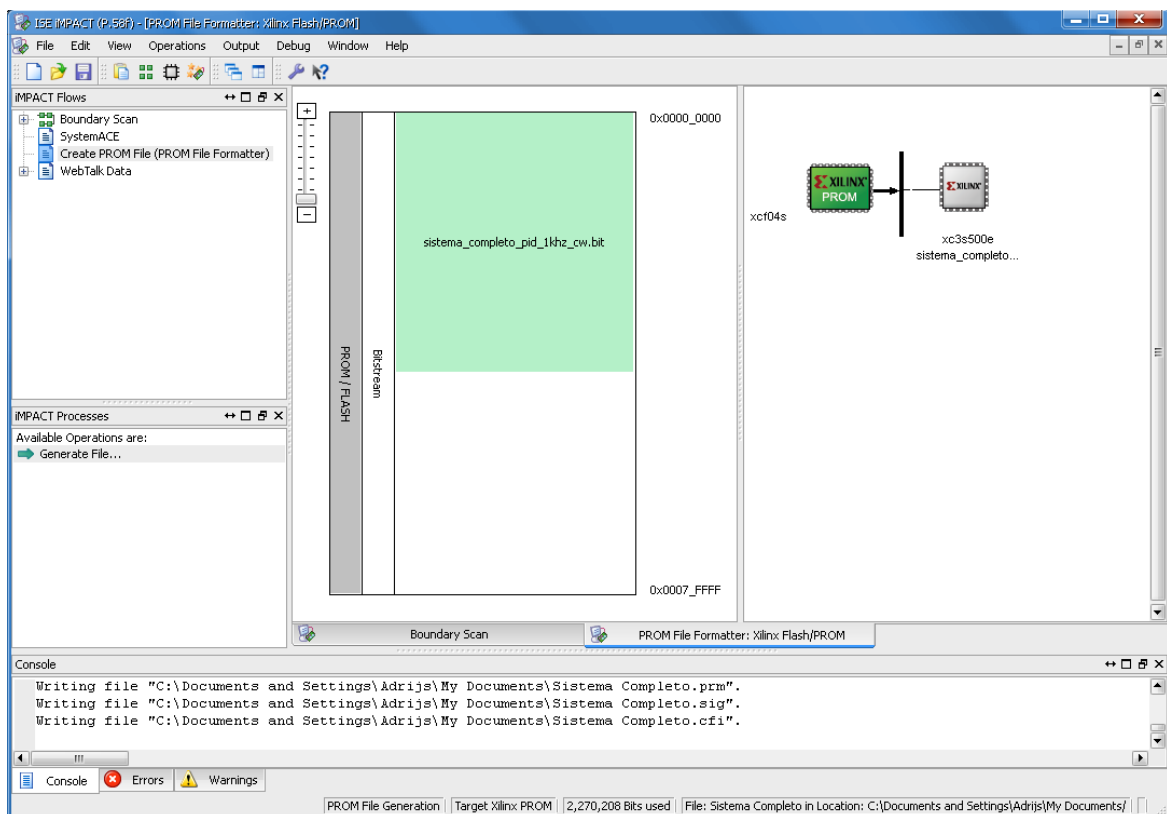


Figura 93. Creación del archivo .mcs para memoria flash

En la **Figura 94** se muestra el montaje completo del sistema de levitación magnética con el sistema de adquisición de datos y la FPGA configurada correctamente. Para

probar la respuesta del sistema se ha incorporado al sistema un polímetro que medirá la corriente de la bobina del electroimán y un osciloscopio que medirá la señal PWM negada a la puerta del transistor de potencia (ya que como se ha explicado anteriormente el transistor de potencia está configurado en modo emisor común).

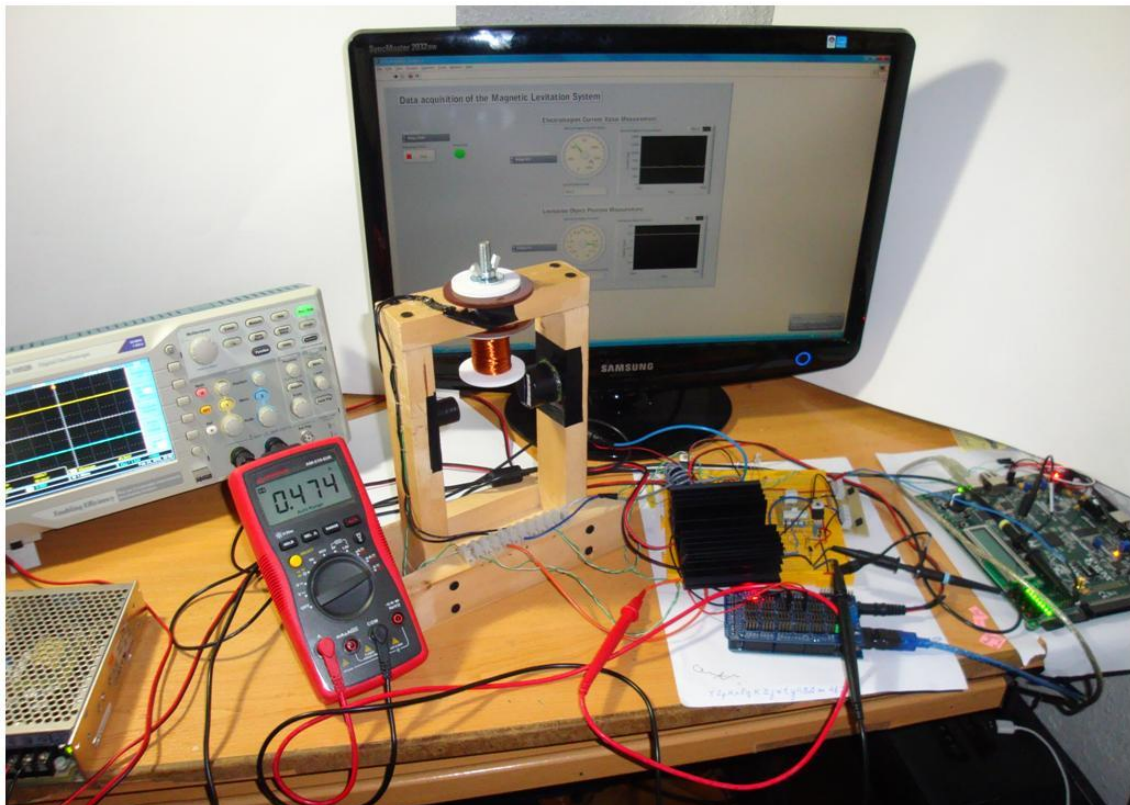


Figura 94. Sistema completo de levitación magnética

A continuación se mostrará la respuesta del sistema, ya que el electroimán no tiene fuerza suficiente para hacer levitar la esfera metálica.

En la **Figura 95** se muestra la respuesta del sistema de adquisición de datos. Podemos comprobar cómo la corriente es máxima cuando el objeto está a mayor distancia y se va reduciendo hasta llegar a cero según vamos haciendo ascender la esfera metálica, mostrando el correcto funcionamiento del control realizado.

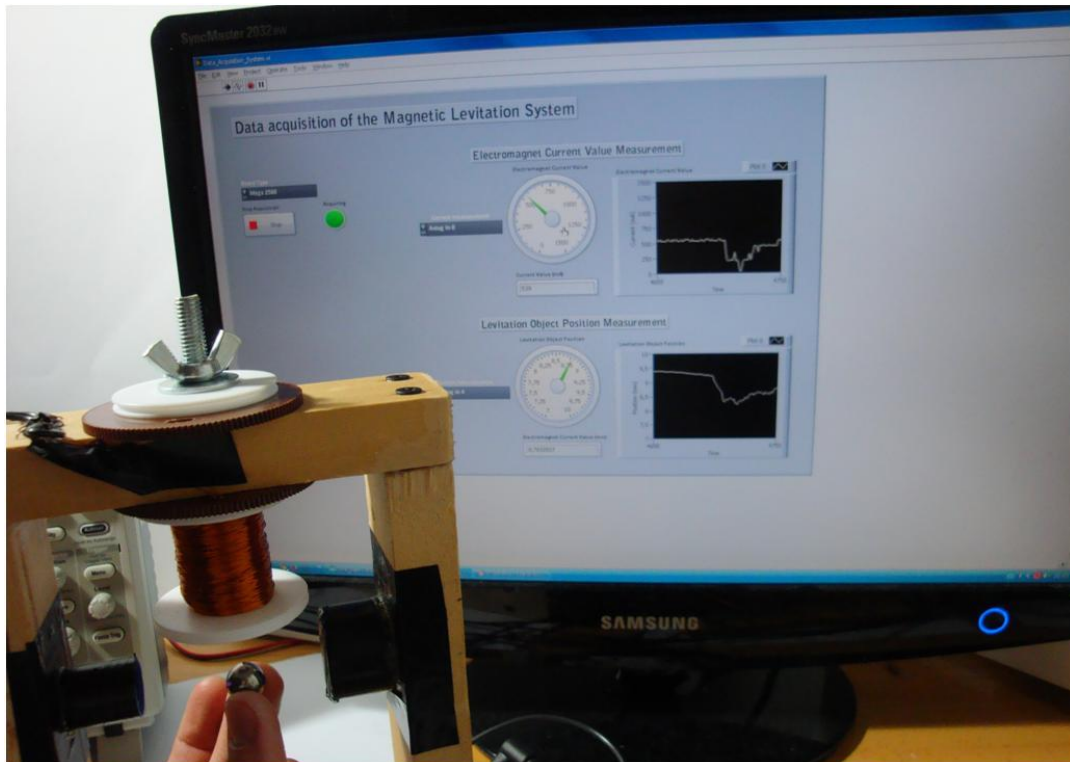


Figura 95. Respuesta del sistema de adquisición de datos

En las siguientes imágenes (**Figura 96,**

Figura 97 y **Figura 98**) se muestra la respuesta del control ante cambios en la posición de la esfera metálica realizados manualmente.

Como podemos observar el control detecta correctamente la posición de la esfera metálica y actúa en consecuencia reduciendo la cantidad de corriente que circula por la bobina del electroimán (la señal PWM del osciloscopio es negada), para ello va aumentando del ancho de pulso de la señal PWM negada para controlar la posición de la esfera metálica.

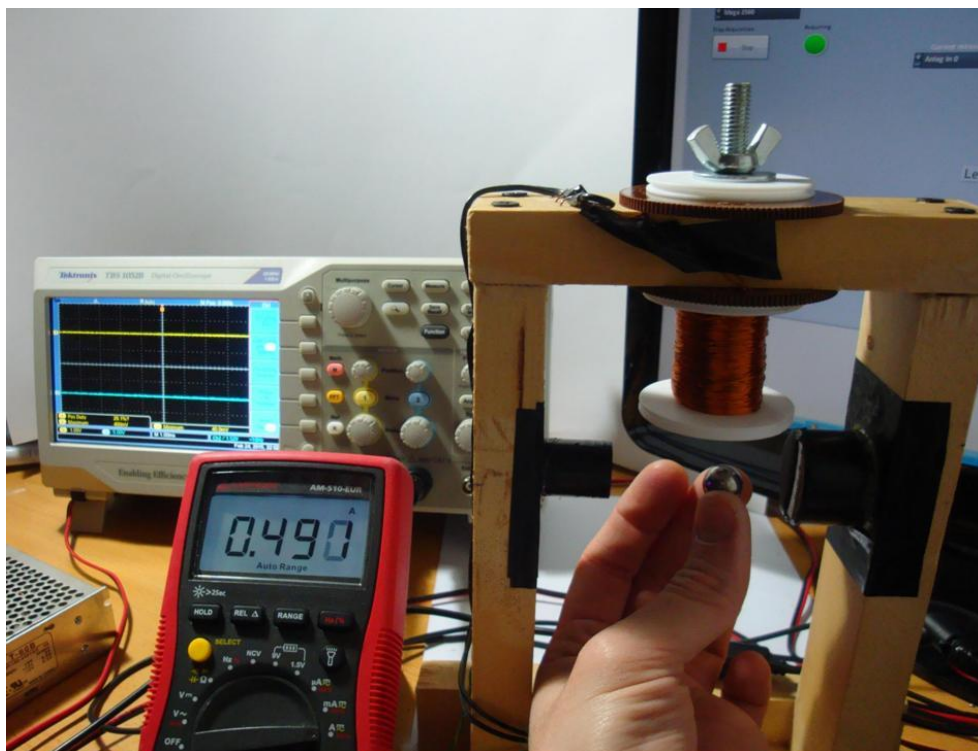


Figura 96. Prueba de respuesta del sistema ante cambios en la posición de la esfera metálica 1

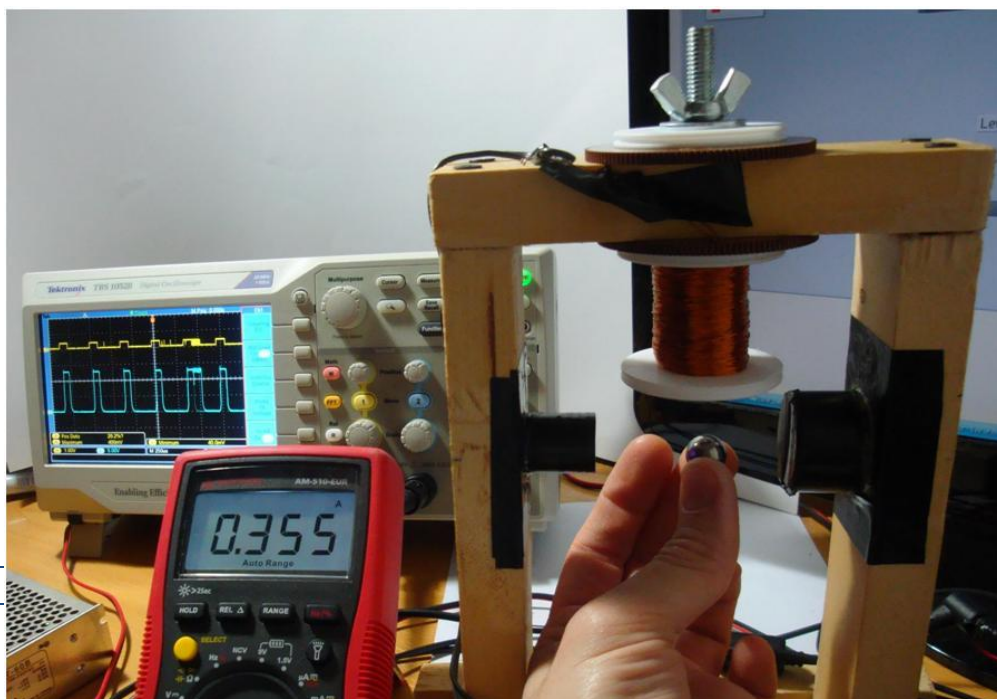


Figura 97. Prueba de respuesta del sistema ante cambios en la posición de la esfera metálica 2

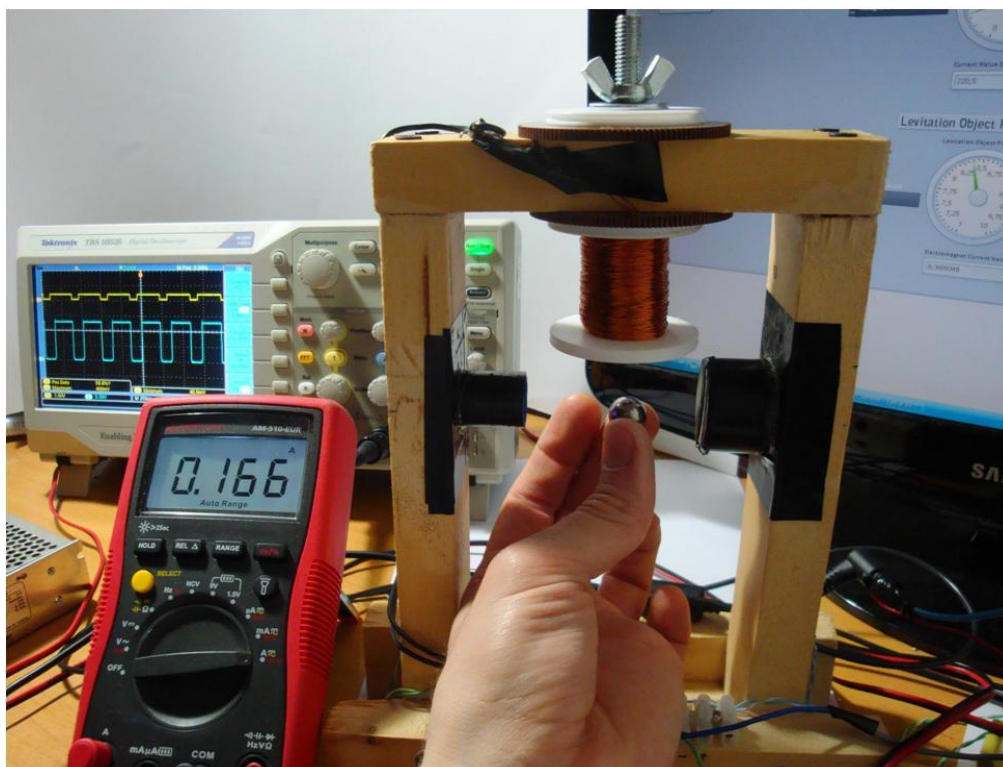


Figura 98. Prueba de respuesta del sistema ante cambios en la posición de la esfera metálica 3



Capítulo 7. Conclusiones

7.1. Introducción

En este capítulo se desarrollarán las conclusiones obtenidas durante la realización del proyecto.

7.2. Conclusiones obtenidas

Tras la realización del proyecto se puede confirmar el cumplimiento de casi todos los objetivos propuestos.

En la realización del proyecto se han cumplido todos los objetivos referentes al aprendizaje de los programas necesarios para llevar a cabo el diseño y construcción del sistema de levitación magnética:

- El manejo de los programas ISE Design Suite y de Matlab Simulink para la configuración hardware de la FPGA y del resto de los componentes usados en la tarjeta “FPGA Spartan 3E Starter Kit Board”.
- El manejo del software LabVIEW para el desarrollo de la aplicación para ordenador del sistema de adquisición de datos.
- El manejo del software para el diseño de los esquemáticos de los circuitos de detección de posición y de control de corriente de la bobina del electroimán.

Se han cumplido los objetivos referentes a la construcción de la estructura y de los circuitos:

- Construcción de la estructura soporte del electroimán y del emisor y receptor para la detección de la posición de la esfera metálica.
- Construcción del electroimán.
- Construcción de los circuitos de detección de la posición de la esfera metálica y del circuito de control de corriente de la bobina del electroimán.
- Construcción del sistema de adquisición de datos.

También se han cumplido con los objetivos referentes a la creación del código HDL (lenguaje hardware) para configurar el hardware de la FPGA Spartan 3E que contiene



un control PID y controla el pre-amplificador y el conversor analógico digital de la tarjeta “FPGA Spartan 3E Starter Kit Board”.

El diseño modular del sistema de levitación magnética ha permitido que podamos afirmar que se han cumplido los objetivos de los componentes del sistema por separado, y que una vez unido todos los componentes se han determinado los errores que no han hecho posible la levitación completa de la esfera metálica.

Los resultados obtenidos confirman el buen funcionamiento del control PID implementado en la FPGA y del sistema de adquisición de la posición de la esfera metálica que realiza la FPGA a través del sistema de detección de posición.

Sin embargo el hardware de control de la corriente que circula por la bobina del electroimán y el electroimán construidos tienen una respuesta peor de lo esperado, como se puede observar en las pruebas realizadas a ambos componentes del sistema. Esta respuesta provoca que el control PID no sea capaz de controlar satisfactoriamente la posición de la esfera metálica y, al ser el sistema de levitación magnética un sistema inestable con bajo factor natural de amortiguamiento, provoca que la esfera se salga fuera de la zona de trabajo haciendo imposible la vuelta a ella mediante los recursos propios del sistema (al ser un sistema inestable, una vez se ha descontrolado el sistema, se requiere de una fuerza externa que coloque la esfera metálica de nuevo en la zona de trabajo para que pueda ser controlado).

La fuerza electromagnética del electroimán debe ser mayor a la requerida por los cálculos obtenidos durante la simulación del sistema, ya que una vez se obtenga un actuador potente se podrá regular la fuerza del electroimán en caso de ser excesiva para la zona de trabajo. Esta regulación se realizará mediante una resistencia en serie con la bobina del electroimán, lo que reducirá la fuerza ejercida gradualmente. Con este sistema de regulación podremos obtener la fuerza requerida por el sistema, evitando los problemas actuales. Este sistema de regulación puede ser fácilmente ajustado gracias al sistema de adquisición de datos desarrollado en el proyecto.

Capítulo 8. Mejoras de diseño y trabajos futuros

8.1. Introducción

En el Capítulo 8 se ha desarrollado las mejoras del diseño del sistema de levitación magnética que se pueden realizar en el futuro para conseguir el objetivo de la levitación de la esfera metálica.

8.2. Numeración de las mejoras y trabajos futuros

A continuación se describirán brevemente las mejoras que se pueden desarrollar en el sistema de levitación magnética:

- Para conseguir la fuerza necesaria para que el sistema pueda realizar la levitación magnética se debe rehacer el electroimán con un cable de cobre de mayor calibre que permitirá mayor número de espiras sin aumentar la resistencia actual.
- Sistema de regulación de la fuerza del electroimán emplazando un reóstato en serie con la bobina del electroimán, con el que se podrá regular la corriente que circula por la bobina del electroimán y por tanto la fuerza que ejerce este.
- También se tiene que cambiar el núcleo del electroimán actual por el de una barra de hierro dulce, ya que el hierro dulce es un material que solo se magnetiza si hay una corriente circulando por la bobina del electroimán, al contrario que el acero del tornillo actual que se mantiene magnetizado tras el paso de la corriente. Ésta circunstancia influye negativamente en el control preciso de la levitación magnética.
- Cambiar el transistor de potencia BUY89, ya que como muestra la **Figura 26** la corriente máxima que deja circular por la bobina del electroimán es de 0,550 amperios. De lo que se deduce que la resistencia del propio transistor es demasiado alta. Se recomendaría instalar un MOSFET de potencia con baja resistencia y alta velocidad de conmutación.
- Fabricación de los circuitos de detección de posición y de control de la corriente de la bobina del electroimán en circuito impreso. En el proyecto ya se han realizado los esquemáticos de los circuitos, en este trabajo futuro se



requiere desarrollar la placa de circuito impreso en una herramienta software y usar la información obtenida para fabricar la placa de los circuitos.

- Usar el sistema de adquisición de datos es Altium para cambiar los parámetros del control PID en la FPGA y cambiar la variable de consigna del sistema de levitación. Este sistema incluiría modificaciones en el programa de adquisición de datos para poder enviar la información a la FPGA a través de la tarjeta Arduino.

Capítulo 9. Presupuesto

9.1. Introducción

En el capítulo 9 se expondrá el coste del proyecto. Para ello se tendrán en cuenta los componentes electrónicos usados, las licencias de los programas usados y las horas de trabajo invertidas en el proyecto. Para poder contabilizar las horas que se han necesitado para la realización del proyecto se describe en primer lugar las etapas del proyecto, detallando su contenido y tiempo necesario para llevarla a cabo.

9.2. Etapas del proyecto de fin de grado

A continuación se detallan las etapas de las que se compone el proyecto de fin de grado:

- **1º Etapa. Búsqueda de información relacionada con sistemas de control de levitación magnética (tiempo requerido: 35 horas):**
En esta primera etapa se ha recopilado información general para la construcción de un sistema de levitación magnética, investigando las diferentes maneras de realizar el diseño del sistema. En esta primera etapa de introducción se ha buscado información de sistemas de control que se pudieran usar adaptándolos al sistema de levitación del proyecto. Tras la investigación se ha fijado el tipo de hardware que albergará el control, los circuitos de adaptación necesarios, tipo de sensores para el control y el sistema de adquisición, etc. También se han fijado los software que se van a utilizar a lo largo del proyecto.

- **2º Etapa. Diseño de los circuitos y materiales necesarios (tiempo requerido: 50 horas):**
En esta segunda etapa del proyecto se han diseñado los circuitos de detección y de control de la corriente, enumerando los componentes electrónicos necesarios para su construcción. Se han fijado los modelos de las tarjetas que albergará el control y realizarán la tarea de adquisición.



- **3º Etapa. Recopilación de materiales necesarios para la construcción física del sistema de levitación magnética (tiempo requerido: 10 horas):**

En esta etapa se ha hecho acopio de todo el material necesario para la construcción del sistema de control y de toda la circuitería necesaria para el proyecto. Se ha intentado usar en la medida de lo posible materiales ya disponibles para reducir el precio final. Se ha detallado los materiales necesarios antes de la compra de los mismos para realizar la compra en los menores pedidos posibles para reducir los costes de transporte.

En esta etapa se ha procedido a la instalación y configuración de los software de Matlab-Simulink, ISE Design Suite, LabVIEW y Altium Designer.

- **4º Etapa. Aprendizaje del software Altium Designer (tiempo requerido: 35 horas):**

En esta etapa se ha conseguido el manejo de la herramienta Altium Designer, para poder realizar los esquemáticos necesarios para la construcción del sistema de levitación magnética. Para conseguir el objetivo se han utilizado los numerosos tutoriales sobre la creación de esquemáticos contenidas en Internet y en la propia página web de Altium Designer.

- **5º Etapa. Aprendizaje de configuración hardware con System Generator (Simulink-Xilinx) (tiempo requerido: 105 horas):**

En esta etapa se ha hecho una investigación de documentos relacionados con la configuración hardware a través de System Generator. Para manejar System Generator se ha aprendido a implementar configuraciones hardware sencillas y se ha ido aumentando en complejidad. Para el aprendizaje de System Generator ha sido de gran ayuda la tarjeta "FPGA Spartan 3E Starter Kit" ya que incluye manuales y ejemplos sencillos para poder realizar diseño desde un conocimiento cero en el manejo de System Generator.

- **6º Etapa. Construcción física del sistema de levitación magnética (tiempo requerido: 100 horas):**

En esta etapa se ha procedido a la construcción física del sistema de levitación, incluyendo la construcción de la estructura, la circuitería y el conexionado de todos los elementos. En esta etapa se han realizado las



pruebas de funcionamiento de cada parte de cada circuito, de cada circuito completo y de la interacción de los circuitos completos entre sí, generado las señales mediante configuraciones de hardware en la FPGA o a través de potenciómetros y reóstatos.

➤ **7º Etapa. Aprendizaje de programación con LabVIEW (tiempo requerido: 50 horas):**

En esta etapa se ha conseguido el manejo de la herramienta de programación gráfica de LabVIEW, para poder realizar el sistema de adquisición de datos. Para poder utilizar con soltura el software se han realizado los ejercicios prácticos relacionados con Arduino que se ha encontrado en páginas web de aficionados y de la propia página de National Instruments, en los que la complejidad se incrementa con cada ejercicio lo que ayuda a realizar un aprendizaje del software desde cero.

➤ **8º Etapa. Construcción y programación del sistema de adquisición de datos (tiempo requerido: 45 horas):**

En esta etapa se ha procedido a la construcción física del sistema de adquisición de datos y la programación de la aplicación de adquisición y muestra de datos. En esta etapa se han realizado las pruebas de funcionamiento necesarias para confirmar la correcta adquisición de datos del sistema de levitación magnética.

➤ **9º Etapa. Realización de la memoria del proyecto (tiempo requerido: 240 horas):**

En esta etapa se ha realizado la redacción de la memoria. La redacción de la memoria se ha realizado en paralelo a la realización del proyecto para la realización de las numerosas fotografías y capturas de imágenes realizadas a lo largo del proyecto.

9.3. Descripción del presupuesto

Tras explicar las etapas que conforman el trabajo, en este apartado se realiza el presupuesto general del proyecto. Para ello se han realizado un presupuesto individual por cada parte del proyecto sumando el resultado en una tabla final que sumará los diversos costes de cada parte para dar el presupuesto total del proyecto.

- **Costes de personal:** En la **Figura 99** se muestran los costes de personal, contabilizando las horas invertidas por el propio estudiante y por el profesor tutor del proyecto.

Personal	Proveedor	Cantidad	Precio unidad	Precio conjunto
Horas alumno	-	670	16,00 €	11.390,00 €
Horas Tutor	-	16	40,00 €	640,00 €
			Total	12.030,00 €

Figura 99. Costes de personal

- **Estructura:** En la **Figura 100** se muestran los costes de la estructura soporte del electroimán y de la barrera detectora de infrarrojos (foto de la estructura mostrada en la **Figura 10**).

Estructura	Proveedor	Cantidad	Precio unidad	Precio conjunto
Listón pino cepillado 21x44x2400	Bricomart	1	7,60 €	7,60 €
Clema 12 elementos 4mm 380Vac (pack 4)	Bricomart	1	1,20 €	1,20 €
Tornillería al peso	Bricomart	1	1,00 €	1,00 €
Cola blanca uso general	Bricomart	1	1,50 €	1,50 €
			Total	11,30 €

Figura 100. Constes de la estructura

- **Costes del hardware de detección de posición:** En la **Figura 101** se muestran los costes del hardware de detección de posición.

Hardware de detección de posición	Proveedor	Cantidad	Precio unidad	Precio conjunto
Condensador 0,22uF	Telkron	1	0,20 €	0,20 €
Condensador 0,1uF	Telkron	1	0,20 €	0,20 €
Resistencia 50Ω	Telkron	1	0,04 €	0,04 €
Resistencia 1220Ω	Telkron	1	0,04 €	0,04 €
Resistencia 220Ω	Telkron	1	0,04 €	0,04 €
Diodo TSAL6100	Farnell	1	0,30 €	0,30 €
Diodo 1N4007	Telkron	1	0,05 €	0,05 €
Diodo LED luz blanca	Farnell	1	0,15 €	0,15 €
Fototransistor NPN L-53P3C	Farnell	1	0,14 €	0,14 €
Regulador de tensión L7805CV	Telkron	1	0,80 €	0,80 €
Fuente de alimentación externa de 9V	-	1	- €	- €
			Total	1,96 €

Figura 101. Costes del hardware de detección de posición

En la **Figura 101** se muestra que la fuente de alimentación externa no tiene coste, esto es debido a que es un material reutilizado, y por tanto no conlleva coste alguno.

- **Costes del hardware de control de la corriente de la bobina del electroimán:**
En la **Figura 102** se muestran los costes del hardware de control de la corriente de la bobina del electroimán

Hardware de control de corriente de la bobina del electroimán	Proveedor	Cantidad	Precio unidad	Precio conjunto
Condensador 0,22uF	Telkron	2	0,20 €	0,40 €
Condensador 0,1uF	Telkron	3	0,20 €	0,60 €
Condensador 1uF	Telkron	1	0,20 €	0,20 €
Condensador 1500uF	Telkron	1	0,20 €	0,20 €
Resistencia 1220Ω	Telkron	2	0,04 €	0,08 €
Resistencia 330Ω	Telkron	1	0,04 €	0,04 €
Resistencia 100Ω	Telkron	1	0,04 €	0,04 €
Optoacoplador HCPL0600	Farnell	1	2,17 €	2,17 €
Diodo 1N4007	Telkron	2	0,05 €	0,10 €
Transistor BJT BUY89	-	1	- €	- €
MOSFET STD12NF06L	Farnell	1	0,75 €	0,75 €
MOSFET IRF520N	Telkron	1	1,40 €	1,40 €
Regulador de tensión L7805CV	Telkron	1	0,80 €	0,80 €
Regulador de tensión L7808CV	Telkron	1	0,80 €	0,80 €
Fuente de alimentación externa de 12V	-	1	- €	- €
Bobina cobre AWG-26 112m	-	1	- €	- €
			Total	7,58 €

Figura 102. Costes del hardware de control de la corriente de la bobina del electroimán

En la **Figura 102** se muestra que varios componentes no tienen coste, esto es debido a que son materiales reutilizados, y por tanto se ha considerado que no conlleva coste alguno.

- **Costes del sistema de control:** En la **Figura 103** se muestran los costes del sistema de control, como el control estará configurado en la FPGA Spartan 3E, el único coste del sistema de control será el de la tarjeta de desarrollo Spartan 3E Starter kit board.

Sistema de control	Proveedor	Cantidad	Precio unidad	Precio conjunto
Spartan 3E Starter Board	Trenz Electronic	1	277,00 €	277,00 €
			Total	277,00 €

Figura 103. Costes del sistema de control

- **Costes del sistema de adquisición de datos:** En la **Figura 104** se muestran los costes del sistema de adquisición de datos.

Sistema de adquisición	Proveedor	Cantidad	Precio unidad	Precio conjunto
Arduino Mega 2560 + Mega sensor shield	DX Dealextrême	1	22,00 €	22,00 €
Sensor lineal de corriente CSLA2CF	Farnell	1	13,29 €	13,29 €
Total				22,00 €

Figura 104. Costes del sistema de adquisición de datos

- **Coste de licencias de Software utilizados:** En la
- **Figura 105** se muestran los costes de las licencias de software utilizadas. Las licencias utilizadas son casi todas versiones de estudiante. El coste de la versión de estudiante de ISE Design Suite se ha puesto como coste cero debido al convenio que tiene la universidad con la empresa para su uso gratuito en los laboratorios.

Licencias de Software	Proveedor	Cantidad	Precio unidad	Tiempo de uso	Amortización
Matlab 2012 Student Version	Mathworks	1	70,00 €	5 meses	70,00 €
ISE Design Suite Student Version	Xilinx	1	- €	5 meses	- €
Altium Designer 13	Altium	1	150€ /mes	1 mes	150,00 €
LabVIEW 2011 Student edition	National instruments	1	40,00 €	5 meses	40,00 €
Total					260,00 €

Figura 105. Coste de licencias de Software utilizados

- **Coste de amortización del equipo utilizado:** En la
- **Figura 106** se muestran los costes de amortización del equipo utilizado. Para calcular el coste de amortización se ha establecido como regla general que el periodo de depreciación total de los equipos electrónicos es de 5 años.

Amortización de Equipo utilizado	Proveedor	Cantidad	Precio unidad	Periodo de depreciación	Tiempo de uso	Amortización
Ordenador personal	Pc Components	1	890,00 €	5 años	5 meses	74,16 €
Polímetro AM-510-EUR	Farnell	1	60,00 €	5 años	5 meses	5,00 €
Osciloscopio TBS1052B	Tektronix	1	450,00 €	5 años	5 meses	37,50 €
Total					Total	116,66 €

Figura 106. Amortización del equipo utilizado

- **Presupuesto total del proyecto:** En la
- **Figura 107** se muestra el sumatorio de todas las partes del presupuesto del proyecto.

Presupuesto total del proyecto	Precio conjunto
Personal	12.030,00 €
Estructura	11,30 €
Hardware de detección de posición	1,96 €
Hardware de control de corriente de la bobina del electroimán	7,58 €
Sistema de control	277,00 €
Sistema de adquisición	22,00 €
Licencias de Software	260,00 €
Amortización de equipo utilizado	116,66 €
Total	12.726,50 €

Figura 107. Presupuesto total del proyecto

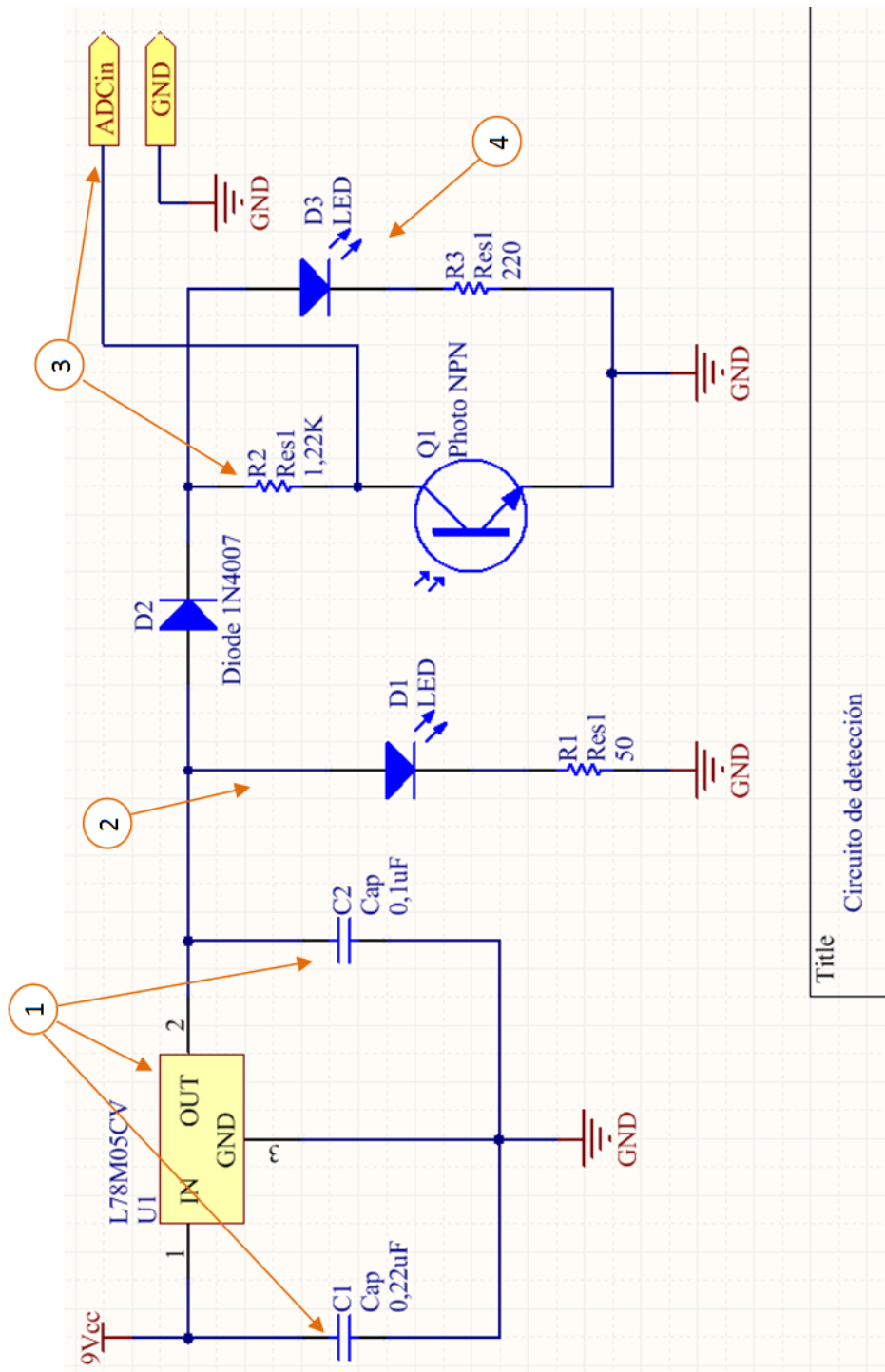
Los costes totales del proyecto ascienden a **12726,5€** siendo la mayor parte del coste los gastos de personal. Para la realización del presupuesto se han despreciado costes indirectos como luz, calefacción, etc.



Anexos

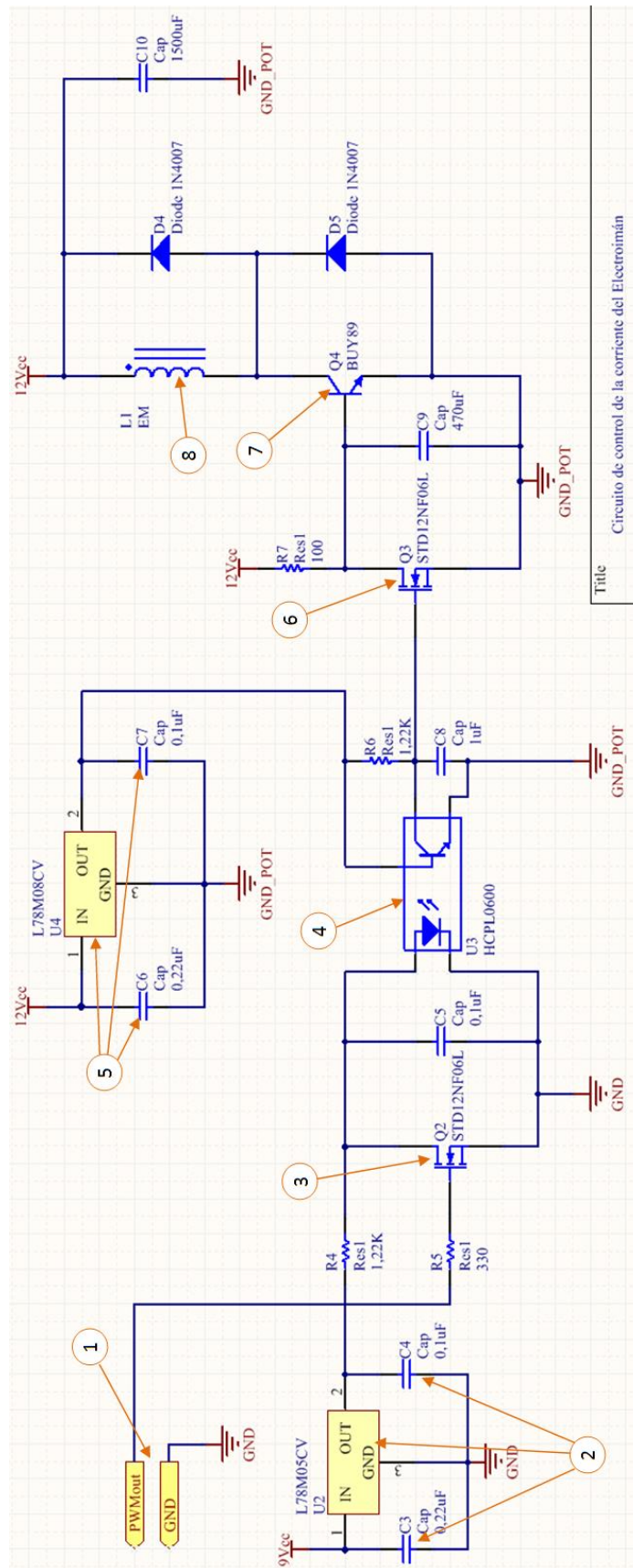
Esquemáticos de los circuitos usados

Circuito de detección

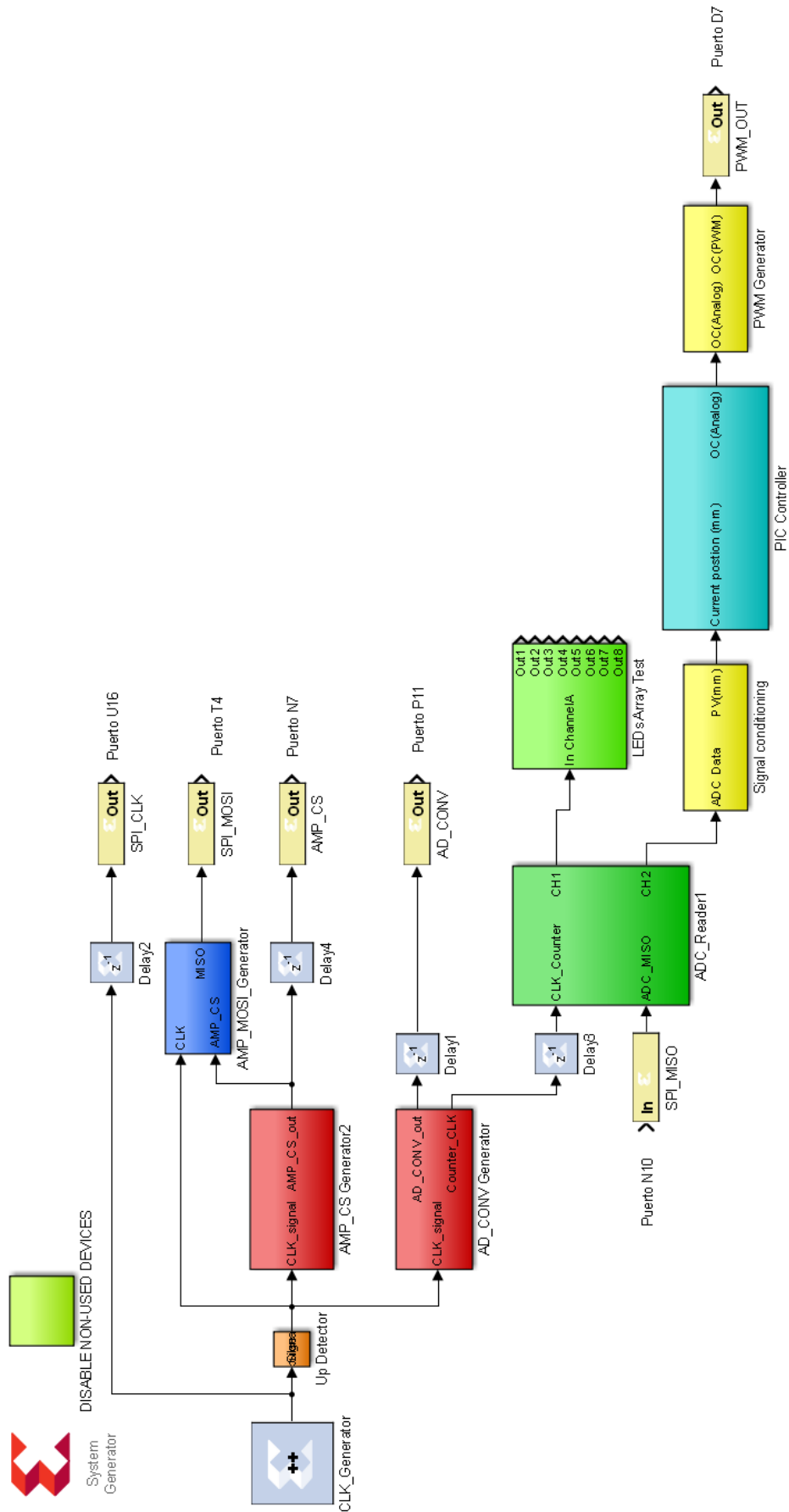


Title
Circuito de detección

Circuito de control de la corriente de la bobina



Configuración Hardware de la FPGA en Simulink







Glosario

L(x): Inductancia total de la bobina del electroimán.

L: Es el valor fijo de la inductancia del electroimán

L(∞): Inductancia con la esfera puesta a una distancia infinitamente lejana.

L(0): Inductancia con la esfera en la posición de equilibrio.

x: Distancia de la esfera a la bobina del electroimán.

Δx : Desviación de la posición de la esfera metálica de la posición de equilibrio.

x₀: Es el valor de la posición de la esfera metálica en la posición de equilibrio.

I: Corriente que circula por la bobina del electroimán.

ΔI : Desviación de la corriente que circula por la bobina del electroimán respecto de la corriente en la posición de equilibrio.

I₀: Corriente que circula por la bobina del electroimán en la posición de equilibrio.

R: Es la resistencia del electroimán.

F_{Res}: Fuerza resultante en la esfera metálica en dirección del eje x.

F_g: Fuerza de la gravedad en dirección del eje x.

F_{em}: Fuerza electromagnética en dirección del eje x.

a: Es una constante.

m: Masa de la esfera metálica.

g: Aceleración de la gravedad (9,81m/s²).

f(i, x): Es una función no-lineal dependiente de i (la corriente que pasa por la bobina) y x (la posición de la esfera metálica al extremo de la bobina del electroimán).

v(t): Es el valor de la señal analógica que genera el circuito de detección de la posición.

U(t): Es el voltaje variable controlado por la señal de salida del control PID.



V_R : Es la caída de voltaje en la resistencia del electroimán.

V_L : Es la caída de voltaje en la inductancia del electroimán.

T_i : Constante de tiempo integral, que es el tiempo que tarda la acción integral en igualar el valor de la acción proporcional.

T_d : Constante de tiempo derivativa, que es el intervalo de tiempo que la acción derivativa adelanta a la acción proporcional.



Referencias Bibliográficas

- [1] "Electric traction apparatus" [Online]. Available: <http://www.google.com/patents/US782312> [Accessed: 09-Feb-2015].
- [2] "Fastest maglev train" *Guinness World Records*. [Online]. Available: <http://www.guinnessworldrecords.com/world-records/fastest-maglev-train> [Accessed: 09-Feb-2015].
- [3] "China prueba un tipo de tren que podría alcanzar los 3.000 kilómetros por hora - RT," *RT en Español*. [Online]. Available: <http://actualidad.rt.com/ciencias/view/127742-china-prueban-modelo-tren-velocidad-increible> [Accessed: 09-Feb-2015].
- [4] "Floating Maglev Technology Design Display and Levitation" *CREALEV*. [Online]. Available: <http://www.crealev.com/> [Accessed: 09-Feb-2015].
- [5] "Introducción a los sistemas de control." *Universidad de Valladolid*. [Online]. Available: http://www.isa.cie.uva.es/~felipe/docencia/ra12itielec/tema1_trasp.pdf [Accessed: 09-Feb-2015].
- [6] "Technology Trend Points to FPGAs". [Online]. Available: <https://lazure2.files.wordpress.com/2013/11/image1.png> [Accessed: 09-Feb-2015].
- [7] "Sistemas muestreados". *Universidad Politécnica de Madrid*. [Online]. Available: http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/Servos/practicas/prac10_sis_mestr.pdf [Accessed: 09-Feb-2015].
- [8] "Imagen FPGA Spartan 3E Starter Kit Board". [Online]. Available: http://hep.bu.edu/~jlraaf/Xilinx/S3Estarterkit_crop.png [Accessed: 09-Feb-2015].
- [9] "Web Arduino". [Online]. Available: <http://www.arduino.cc/> [Accessed: 09-Feb-2015].
- [10] "LabVIEW Interface for Arduino". [Online]. Available: <https://decibel.ni.com/content/groups/labview-interface-for-arduino> [Accessed: 09-Feb-2015].
- [11] "Los sistemas de control en estos últimos diez años". *Automática e Instrumentación*. [Online]. Available: [http://www.ieee-ias-css.es/docs/articles/aei400\(88-91\)especial_laura.pdf](http://www.ieee-ias-css.es/docs/articles/aei400(88-91)especial_laura.pdf) [Accessed: 09-Feb-2015]
- [12] "Xilinx ISE". [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Xilinx_ISE [Accessed: 09-Feb-2015]
- [13] "Web Simulink". *MathWorks*. [Online]. Available: <http://es.mathworks.com/products/simulink/> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [14] "System Generator for DSP, User Guide". [Online]. Available: http://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx14_1/sysgen_user.pdf [Accessed: 09-Feb-2015]



- [15] "Software de Desarrollo de Sistemas NI LabVIEW". *National Instruments* [Online]. Available: <http://www.ni.com/labview/esa/> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [16] "Web Altium". *Altium* [Online]. Available: <http://www.altium.com/> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [17] "El estándar SPI para comunicación síncrona de velocidad". [Online]. Available: <http://www.puntoflotante.net/COMUNICACION-SPI-TUTORIAL.htm> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [18] "Sensor Infrarrojo". *Universidad Politécnica de Valencia* [Online]. Available: <http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/PAEEES/2008-09/Sensor%20Infrarrojo%20-%20Grupo%20Naranja.pdf> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [19] "Campo magnetic alrededor de un conductor". [Online]. Available: <http://electronicacompleta.com/lecciones/el-inductor/attachment/inductor-1/> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [20] "Como medir corriente y hacer mediciones de potencia". [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/8198/es/> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [21] "Modulación por ancho de pulsos". [Online]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Modulaci%C3%B3n_por_ancho_de_pulsos [Accessed: 09-Feb-2015]
- [22] "Implementación de PWM monofásicos". *Universidad Nacional de Rosario* [Online]. Available: <http://potencia.eie.fceia.unr.edu.ar/Implementacion%20de%20PWM%20monofasico.pdf> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [23] "Modulación mediante circuito". [Online]. Available: <http://www.foroselectronica.es/f43/modulacion-mediante-circuito-982.html> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [24] "L78xx Positive voltage regulator ICs". [Online]. Available: <http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/L7805.pdf> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [25] "TSAL6100". [Online]. Available: <http://www.vishay.com/docs/81009/tsal6100.pdf> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [26] "L-53P3C". [Online]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/1683594.pdf> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [27] "Amplificador NPN". [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/electronic/npnce.html> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [28] "1N4001-1N4007 1.0A Rectifier". [Online]. Available: <http://www.diodes.com/datasheets/ds28002.pdf> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [29] "Spartan-3E FPGA Starter Kit Board User Guide". [Online]. Available: http://www.xilinx.com/support/documentation/boards_and_kits/ug230.pdf [Accessed: 09-Feb-2015]
- [30] "Infrared Magnetic Levitator". [Online]. Available: <http://uzzors2k.4hv.org/index.php?page=magneticlevitation> [Accessed: 09-Feb-2015]



- [31] "Solenoid (Electromagnet) Force Calculator". [Online]. Available: <http://www.daycounter.com/Calculators/Magnets/Solenoid-Force-Calculator.phtml> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [32] "How Do You Make an Electromagnet Stronger?". [Online]. Available: http://www.ehow.com/how_7556505_do-make-electromagnet-stronger.html [Accessed: 09-Feb-2015]
- [33] "Wire Gauge and Current Limits Including Skin Depth and Strength". [Online]. Available: http://www.powerstream.com/Wire_Size.htm [Accessed: 09-Feb-2015]
- [34] "MOSFET Common Drain (Source Follower) Amplifier". [Online]. Available: <http://whites.sdsmt.edu/classes/ee320/notes/320Lecture36.pdf> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [35] "STD12NF06L". [Online]. Available: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/stmicroelectronics/8179.pdf> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [36] "Spartan-3E FPGA Family Data Sheet". [Online]. Available: http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds312.pdf [Accessed: 09-Feb-2015]
- [37] "HCPL0600". [Online]. Available: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/HC/HCPL0611.pdf> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [38] "IRF520N". [Online]. Available: http://www.redrok.com/MOSFET_IRF520N_100V_9.7A_200mO_Vth4.0_TO-220.pdf [Accessed: 09-Feb-2015]
- [39] "BUY89". [Online]. Available: http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/15/118201_DS.pdf [Accessed: 09-Feb-2015]
- [40] "LTC6912". [Online]. Available: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/6912fa.pdf> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [41] "System generator for DSP ver. 9.1.01". [Online]. Available: http://www.xilinx.com/support/sw_manuals/sysgen Ug.pdf [Accessed: 09-Feb-2015]
- [42] "LTC1407-1/LTC1407A-1". [Online]. Available: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/14071fb.pdf> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [43] "Efficient FPGA implementation of 2nd order digital controllers using Matlab/Simulink". *Asian Research Publishing Network* [Online]. Available: http://www.arpnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2011/jeas_0811_544.pdf [Accessed: 09-Feb-2015]
- [44] "PID Regulator using system generator". [Online]. Available: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB10/full_text/038_Hock.pdf [Accessed: 09-Feb-2015]
- [45] "Efficient Design and FPGA Implementation of Digital Controller Using Xilinx SysGen". *International Journal of Electronics Engineering* [Online]. Available: <http://www.csjournals.com/IJEE/PDF%202-1/20.pdf> [Accessed: 10-Feb-2015]



- [46] "Design of FPGA-based Digital PID Controller Using Xilinx SysGen For Regulating Blood Glucose Level of Type-I Diabetic Patients". [Online]. Available: [http://www.auso.org/Vol.3/Vol.3\(7\),%20Apr,%202013/Design%20of%20FPGA-based%20Digital%20PID%20Controller%20Using%20Xilinx%20SysGen%20AE%20For%20Regulating%20Blood%20Glucose%20Level%20of%20Type-I%20Diabetic%20Patients.pdf](http://www.auso.org/Vol.3/Vol.3(7),%20Apr,%202013/Design%20of%20FPGA-based%20Digital%20PID%20Controller%20Using%20Xilinx%20SysGen%20AE%20For%20Regulating%20Blood%20Glucose%20Level%20of%20Type-I%20Diabetic%20Patients.pdf) [Accessed: 10-Feb-2015]
- [47] "Design & Implementation of FPGA Based On PID Controller with Motor & Sensor". *International Journal of Emerging Science and Engineering* [Online]. Available: <http://www.ijese.org/attachments/File/v1i3/C0122011313.pdf> [Accessed: 10-Feb-2015]
- [48] "Flotating-Point PID Controller Design with Vivado HLS and System Generator for DSP". [Online]. *Xilinx* Available: http://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp1163.pdf [Accessed: 10-Feb-2015]
- [49] "System of automatic control". *AT&P Journal plus* [Online]. Available: http://www.atpjournalsk.com/buxus/docs/casopisy/atp_plus/plus_2010_1/ATP_journal_PLUS_1_2010.pdf [Accessed: 09-Feb-2015]
- [50] "Modeling and Control of a Magnetic Levitation System". *Polytechnic School of engineering* [Online]. Available: http://mechatronics.poly.edu/mpcrl/experiment_4_protected.pdf [Accessed: 09-Feb-2015]
- [51] "Design, Fabrication, and Control of a Single Actuator Magnetic Levitation System". [Online]. Available: http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/Laboratorio/Videos%20y%20fotos%20LabControl/VideosFotos/Levitador%20Magnetico/DocsPDF/maglev_thesis.pdf [Accessed: 09-Feb-2015]
- [52] "Electromechanical Dynamics". *Woodson, Herbert H., and James R. Melcher* [Online]. Available: http://www.rle.mit.edu/cehv/documents/emd_part1.pdf [Accessed: 09-Feb-2015]
- [53] "Arduino Mega 2560". [Online]. Available: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [54] "8-Bit Atmel Microcontroller AT mega 2560". [Online]. *Atmel* Available: <http://www.atmel.com/images/doc2549.pdf> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [55] "CSLA2CF". [Online]. Available: <http://www.kosmodrom.com.ua/pdf/CSLA2CF.pdf> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [56] "LabVIEW Interface for Arduino". *National Instruments* [Online]. Available: <https://decibel.ni.com/content/groups/labview-interface-for-arduino> [Accessed: 09-Feb-2015]
- [57] "Arduino Support from Simulink". [Online]. Available: <http://es.mathworks.com/hardware-support/arduino-simulink.html> [Accessed: 09-Feb-2015]