



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE INGENIERÍAS

CARRERA: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Tesis previa a la obtención del Título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

TEMA:

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA INERCIAL DE
DOS GRADOS DE LIBERTAD Y EVALUACIÓN DEL MODELADO
MATEMÁTICO A TRAVÉS DE MATLAB/SIMULINK”**

AUTORES:

VANESSA INDAURA ALCÍVAR CEVALLOS

IRENE TAMARA PARRALES DUARTE

DIRECTOR DE TESIS:

ING. RICARDO CAJO

GUAYAQUIL, MAYO 2015

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Vanessa Indaura Alcívar Cevallos portador de cédula de ciudadanía N° 093052791-6 e Irene Tamara Parrales Duarte portador de cédula de ciudadanía N° 092722011-1 estudiantes de la Universidad Politécnica Salesiana declaramos que la responsabilidad del contenido de este proyecto de titulación, nos corresponde exclusivamente y es propiedad intelectual de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, Mayo del 2015

(f) _____

Vanessa Indaura Alcívar Cevallos

CI: 0930527916

(f) _____

Irene Tamara Parrales Duarte

CI: 092722011-1

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de titulación a Dios quien guía mi vida por buen camino, a mis padres Roberto Alcívar y Narcisa Cevallos por brindarme su apoyo incondicional, y en especial a mi hermano Diego quien ha sido el pilar fundamental para culminar mis estudios de Ingeniería. A mis hermanos Julio y Leonor que creyeron siempre en mí y a toda mi familia y amigos que me han apoyado con sus buenos consejos para poder culminar una de mis metas que es de ser una gran profesional.

Vanessa Alcívar C.

DEDICATORIA

Les dedico este logro a mis padres Juan Parrales y Anita Duarte por brindarme su apoyo ante cualquier circunstancia, a mi esposo Julio por su apoyo y entrega al necesitar de él en cualquier momento del transcurso de mi carrera, a mi hermano Jorge quien ha aportado económicamente para la culminación mis estudios de Ingeniería. A quienes creyeron siempre en mí, a mi familia y amigos que me han apoyado con sus buenos consejos para poder culminar mi carrera.

Irene Parrales D.

AGRADECIMIENTO

Agradezco ante todo a Dios quien ha estado siempre conmigo ya que con su amor me ha dado conocimiento y sabiduría para terminar mi carrera con éxito.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres que se han esforzado y sacrificado mucho por darme los estudios y hacer de mí una persona de bien.

Gracias a mis hermanos y hermana quienes han estado siempre conmigo apoyando, guiando y aconsejando para salir adelante.

A mi tutor, docentes y compañeros que con sus conocimientos me ha sabido guiar para culminar satisfactoriamente mi proyecto de titulación y a todas aquellas personas que de una u otra forma supieron creer en mí en todo momento.

Vanessa Alcívar C.

AGRADECIMIENTO

Doy gracias a Dios, que me brindo la sabiduría y paciencia en los momentos difíciles y por ponerme a las personas indicadas en mi vida, permitiéndome ser mejor persona.

A toda mi familia, mis padres, mi esposo, mi hermano y mi hijo por darme la fuerza de seguir adelante a culminar mis estudios profesionales lo cual me ayudaron con sus palabras y buenos deseos.

A mis compañeros de curso con los que siempre nos apoyamos para cumplir nuestro objetivo de ser profesionales a los mismo que les deseo éxito en su vida profesional.

Y a la Universidad Politécnica Salesiana y sus docentes por permitir cumplir mis metas.

Irene Parrales D.

ÍNDICE

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XV
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XVII
RESUMEN.....	XVIII
ABSTRACT.....	XX
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA	2
1.1 Planteamiento del Problema	2
1.2 Delimitación	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
1.4 Justificación	3
1.5 Variables e Indicadores	3
1.6 Metodología.....	3
1.6.1 Métodos	4
1.6.1.1 Método Deductivo	4
1.6.1.2 Método Inductivo	4
1.6.1.3 Método Analítico.....	4
1.6.2 Técnicas	4
1.6.2.1 Técnica Experimental	4
1.7 Población y Muestra	4
1.7.1 Población	4
1.7.2 Muestra	4
1.8 Descripción de la propuesta.....	5
1.8.1 Beneficiarios	5
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	6

2.1	Sistema de Navegación Inercial (INS)	6
2.2	Motor de Corriente Continua.....	6
2.2.1	Ventajas que aportan los motores de corriente continua	6
2.2.2	Encoder de un motor.....	7
2.2.2.1	Tipos de encoder de motores DC	8
2.2.2.1.1	Encoder incremental	8
2.2.2.1.2	Encoder absoluto:	9
2.3	Matlab.....	10
2.4	Simulink	10
2.4.1	Bloque To Workspace	11
2.4.2	Bloque Ramp	11
2.4.3	Bloque Step	11
2.4.4	Signal Generator (Generador de Señal).....	12
2.4.5	Pulso Generator (Generador de Pulso)	13
2.4.6	Bloque Subsistemas	13
2.5	Programa CAD Inventor.....	14
2.6	Protocolo RS-232	14
2.7	Tarjeta controladora Puente H.....	15
2.8	Microcontroladores.....	15
2.9	Touch Screen Resistive (Panel Táctico Resistivo).....	16
2.10	Acelerómetro	17
2.11	Tarjeta de circuito impreso PCB (Printed Circuit Board)	17
2.12	Amplificadores Operacionales OPAM.....	18
2.13	Modulación por ancho de pulso PWM (Pulse Width Modulation).....	18
2.14	Tarjeta de Adquisición de Datos	18
CAPÍTULO III. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PLATAFORMA INERCIAL DE DOS GRADOS DE LIBERTAD		20
3.1	Diseño de la Plataforma Inercial	20
3.1.1	Estructura Mecánica	21
3.1.1.1	Dimensiones de la Estructura Mecánica.....	21
3.1.1.2	Partes de la Estructura Mecánica.....	21
3.1.1.3	Implementación	24
3.1.2	Elementos y componentes de la plataforma inercial de 2-GDL.....	27
3.1.2.1	Motor reductor de 12VDC.....	27

3.1.2.1.1	Encoder del motor	28
3.1.2.2	Tarjeta Puente H (Sparkfun Monster)	29
3.1.2.2.1	Características de la Tarjeta Puente H (Sparkfun Monster)	29
3.1.2.3	Acelerómetro Analógico AXDL-335	29
3.1.2.3.1	Características del Acelerómetro AXDL-335	30
3.1.2.4	Panel Táctico Resistivo (Touch Screen Resistive).....	30
3.1.2.5	Microcontroladores.....	31
3.1.2.6	Tarjeta de Adquisición de Datos PCI-1711	32
3.1.2.6.1	Características de la Tarjeta PCI 1711	32
3.1.2.7	Amplificador operacional LM358 (OPAMP).....	33
3.1.2.7.1	Características del OPAM LM358	33
3.1.2.8	Diseño de tarjeta de circuito impreso, PCB (Printed Circuit Board).....	33
3.1.3	Distribución de tarjetas y fuentes de poder en la base de la plataforma inercial de 2-GDL.....	38
CAPÍTULO IV. MODELADO DE LA PLATAFORMA INERCIAL DE DOS GRADOS DE LIBERTAD		40
4.1	Configuración de la tarjeta de adquisición de datos	41
4.1.1	Bloque de parámetros	41
4.2	Obtención del modelo matemático del acelerómetro analógico ADXL-335 en Matlab/Simulink.	43
4.3	Obtención del modelo matemático del puente H SparkFun	50
4.3.1	Programación del puente H SparkFun.....	52
4.4	Programación de encoder de motores de 12VDC	54
4.5	Obtención del modelo matemático de los motores reductores de 12VDC.....	55
4.5.1	Comparación modelo real y modelo simulado del motor 1	71
4.5.2	Comparación modelo real y modelo simulado del motor 2	72
4.6	Obtención de lectura de coordenadas del panel táctico resistivo.	73
4.7	Programación Panel Táctico Resistivo	76
4.8	Momentos de Inercia de la plataforma de 2-GDL.....	78
4.8.1	Cálculo del momento de Inercia de la carga para el eje X	78
4.8.2	Cálculo del momento de Inercia de la carga para el eje Y	81
CONCLUSIONES		83
RECOMENDACIONES		84
CRONOGRAMA		85

PRESUPUESTO	86
BIBLIOGRAFÍA	87
ANEXOS	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estructura de un encoder de un motor DC.....	7
Figura 2.2 Encoder incremental.	8
Figura. 2.3. Encoder absoluto.	9
Figura 2.4 Bloque “To Workspace”.....	11
Figura 2.5 Bloque Ramp.....	11
Figura 2.6 Bloque Step.....	11
Figura 2.7 Generador de señal.	12
Figura 2.8 Generador de Pulso.....	13
Figura 2.9 Bloque Subsistema.....	14
Figura 2.10 Circuito de un puente H.....	15
Figura 2.11 Tipos de Microcontroladores.....	16
Figura 2.12 Touch panel o pantalla táctil.....	16
Figura 2.13 Tarjeta de circuito impreso.....	17
Figura 2.14 Como funciona una DAQ.	18
Figura 2.15 Ejemplo con Bloque de entradas/salidas analógicas.	19
Figura 3.1: Diseño de la plataforma inercial de 2 grados de libertad.	20
Figura 3.2 Ajustador, Sujetador, Ruliman..	22
Figura 3.3 Ajustador, Sujetador, Ruliman (en conjunto)..	22
Figura 3.4 Soporte Lateral.....	22
Figura 3.5 Acople para motores.....	23
Figura 3.6 Varilla de acero inoxidable.....	23
Figura 3.7 Bases de Motores DC.	23
Figura 3.8 Plancha de aluminio.....	24
Figura 3.9 Visualización de soporte lateral.....	24

Figura 3.10 Unión de soportes laterales y plancha de aluminio..	24
Figura 3.11 Bases de la plataforma y bases de motores.....	25
Figura 3.12 Colocación de motores DC.....	25
Figura 3.13: Plataforma Inercial.	25
Figura 3.14: Perforaciones bajo la plancha de aluminio.....	26
Figura 3.15 Perforación para Switch-Indicador on/off.....	26
Figura 3.16 Perforaciones laterales de la base de la plataforma.....	26
Figura 3.17 Perforaciones en base de la plataforma.....	27
Figura 3.18 Vista superior de la plataforma.....	27
Figura 3.19 Motor reductor Pololu de 12VDC.....	28
Figura 3.20 Encoder de cuadratura de 3-20VDC.....	28
Figura 3.21 Acelerómetro AXDL-335 de 3 ejes.....	30
Figura 3.22 Panel Táctico Resistivo.....	31
Figura 3.23 Estructura física del microcontrolador PIC18F6722.....	31
Figura 3.24 Estructura física del microcontrolador PIC16F886.).....	31
Figura 3.25 Tarjeta de Adquisición de Datos PCI-1711.....	32
Figura 3.26 Amplificador operacional LM358.....	33
Figura 3.27 Esquema de filtro activo paso bajo RC.....	34
Figura 3.28 Diagrama de conexión Touch.....	35
Figura 3.29 Diagrama de conexión puente H.....	35
Figura 3.30 Esquema de alimentación de 12VDC y 5VDC.....	36
Figura 3.31 Diagrama Esquemático de la tarjeta de circuito impreso.....	37
Figura 3.32 Diagrama electrónico de la tarjeta de circuito impreso.....	37
Figura 3.33 Distribución de tarjetas y componentes en base de la plataforma de 2- GDL.....	39

Figura 4.1 Diagrama de Bloques de la Plataforma de 2-GDL	40
Figura 4.2 Bloque de parámetros..	41
Figura 4.3 Asignación de tarjeta de adquisición de datos.....	42
Figura 4.4 Selección de archivo rtwin.tlc..	42
Figura 4.5 Función de transferencia del acelerómetro.	43
Figura 4.6 Programación en arduino Uno.	43
Figura 4.7 Conexión para obtener los ángulos del acelerómetro AXDL-335.....	44
Figura 4.8 Acoplamiento entre servomotor y acelerómetro AXDL-335.....	44
Figura 4.9 Diagrama de Bloques con respecto al eje X.	45
Figura 4.10 Diagrama de Bloques con respecto al eje Y.	45
Figura 4.11 Líneas de código para polinomio eje X y Y.	46
Figura 4.12 Comparación del acelerómetro eje X.....	47
Figura 4.13 Comparación del acelerómetro eje Y.	47
Figura 4.14 Función de transferencia del acelerómetro en el eje X.....	48
Figura 4.15 Función de transferencia del acelerómetro en el eje Y.....	48
Figura 4.16 Función de transferencia eje X desarrollada en simulink.....	48
Figura 4.17 Función de transferencia eje Y desarrollada en simulink.....	49
Figura 4.18 Codificación para calcular porcentaje de error de los ángulos X y Y. ...	50
Figura 4.19 Programación del PIC 16f886..	52
Figura 4.20 Programación del PIC 16F886.....	53
Figura 4.21 Líneas de códigos para graficar comportamiento puente H.	54
Figura 4.22: Comportamiento puente H.....	54
Figura 4.23: Frecuencia a 3VDC..	56
Figura 4.24: Tao (τ) a 1 VDC para motor 1.....	59
Figura 4.25: Frecuencia a 6VDC para motor 2.	63

Figura 4.26: Tao (τ) a 12VDC para motor 2.....	66
Figura 4.27: Modelo Real Motor 1 y Motor 2.	69
Figura 4.28: Subsistema modelo real Motor 1 y Motor 2.....	70
Figura 4.29: Casos para modelo motor 1 y motor 2.....	70
Figura 4.30 Multiplexación de 16 bits.	71
Figura 4.31 Modelo Simulado.....	71
Figura 4.32 Comparación modelo real & simulado del motor 1.....	72
Figura 4.33 Comparación modelo real & simulado del motor 2.....	72
Figura 4.34 Comunicación Serial a USB..	73
Figura 4.35: Configuración de Panel Táctico.	74
Figura 4.36 Configuración del Panel Táctico Resistivo (Touch Screen).....	75
Figura 4.37 Verificación de edición del Panel Táctico en Programa UPD.....	75
Figura 4.38 Programación Panel táctil.....	76
Figura 4.39 Programación Panel táctil.....	77
Figura 4.40 Programación Panel táctil.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tipos de señales que se obtienen a partir de un generador de señales	12
Tabla 3.1 Dimensiones de la estructura mecánica.....	21
Tabla 3.2 Distribución de colores de conector del encoder del motor DC Pololu. ...	29
Tabla 3.3 Elementos que contiene la tarjeta de circuito impreso (PCB).	38
Tabla 4.1 Listado de conexiones del acelerómetro AXDL-335	45
Tabla 4.2 Voltajes X y Y obtenidos con relación a los ángulos de referencia del servo/acelerómetro.....	46
Tabla 4.3 Ángulos obtenidos con referencia a los voltajes X y Y.....	49
Tabla 4.4 Valor PWM & Valor Duty cycle.....	50
Tabla 4.5 Medición Voltaje Entrada vs Voltaje Salida del Puente H.....	53
Tabla 4.6 Corriente de armadura para motor 1	55
Tabla 4.7 Frecuencias medidas de 0VDC a 12VDC	56
Tabla 4.8 Velocidad Angular medida para entrada de voltaje desde 0VDC a 12VDC para motor 1	57
Tabla 4.9 Constante de la fuerza contra electromotriz medidas de 0VDC a 12VDC para motor 1	58
Tabla 4.10 Constante de la fricción viscosa para voltajes entre 0 VDC a 12 VDC para motor 1	59
Tabla 4.11 Constante de tiempo Tao (τ) medido de 0VDC a 12VDC para motor 1 .	60
Tabla 4.12 Inercia (J) medido para entrada de voltaje 0 VDC a 12 VDC para motor 1	60
Tabla 4.13 Parámetros encontrados del motor 1	61
Tabla 4.14 Corriente de Armadura para motor 2	62
Tabla 4.15 Frecuencias medidas de 0VDC a 12VDC para motor 2	63

Tabla 4.16 Velocidad Angular medidas de 0VDC a 12VDC para motor 2.....	64
Tabla 4.17 Constante de la fuerza contra electromotriz medidas de 0VDC a 12VDC para motor 2.....	65
Tabla 4.18 Constante de la fricción viscosa medidas de 0VDC a 12VDC para motor	66
Tabla 4.19 Constante de tiempo τ medido desde 0VDC a 12VDC para motor 2.....	67
Tabla 4.20 Momento de Inercia (J) medido de 0VDC a 12VDC para motor 2.....	67
Tabla 4.21 Parámetros encontrados del motor 2.....	68
Tabla 4.22 Descripción de los pines del protocolo RS232	73

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Diseño de conexión de la tarjeta PCB para el panel táctico resistivo, encoders y puente h de los motores DC.	90
Anexo 2 Programación Encoder. Resolución de 16Bits para cada motor independientemente.	90
Anexo 3 Programación Encoder. Resolución de 16Bits para cada motor independientemente.	91
Anexo 4 Hoja técnica de tarjeta de adquisición daq-1711	92
Anexo 5 Pines asignados a las entradas y salidas de la tarjeta de adquisición de datos PCI-1711.....	93
Anexo 6 Listado de canales asignados para cada pin de la tarjeta daq PCI-1711	95
Anexo 7 PIC 16F886.....	95
Anexo 8 PIC 18F6722.....	96
Anexo 9 Hoja técnica del panel táctil resistivo	96
Tabla 4.2 Voltajes X y Y con relación a grados de referencia servo/acelerómetro. ..	97
Tabla 4.3 Voltajes X y Y con relación voltaje - ángulo.....	99
Tabla 4.5 Medición Voltaje Entrada & Voltaje Salida del Puente H	101

RESUMEN

AÑO	ALUMNO/S	DIRECTOR DE TESIS	TEMA TESIS
2015	<ul style="list-style-type: none"> • ALCÍVAR CEVALLOS VANESSA INDAURA • PARRALES DUARTE IRENE TAMARA 	ING. RICARDO CAJO	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA INERCIAL DE DOS GRADOS DE LIBERTAD Y EVALUACIÓN DEL MODELADO MATEMÁTICO A TRAVÉS DE MATLAB/SIMULINK

En el presente trabajo se realiza el diseño e implementación de una plataforma inercial de dos grados de libertad y modelado matemático el cual emulará el comportamiento del sistema diseñado.

Bajo este contexto se realiza el diseño mecánico y electrónico de las etapas que conformaran la plataforma inercial, para aquello se emplean motores, controladores de potencia (puente h), microcontrolador, panel táctil (touch screen) y acelerómetro analógico AXDL-335 con los cuales se obtendrán los ángulos de inclinación y posición del objeto que se ubique sobre la plataforma. La tarjeta principal en donde consta los microcontroladores 18F6722 y 16F886 , diseñada por los autores, se encarga de la compatibilidad y transferencia de datos bidireccional entre la plataforma y la tarjeta de adquisición de datos (PCI-1711) , la cual permite comunicarnos con Matlab/Simulink, el resto de componentes son tipos comerciales.

Luego de la selección y diseño de cada etapa electrónica del sistema, el siguiente paso fue encontrar el modelo matemático de cada etapa a través de leyes físicas y aproximaciones polinómicas tanto para el puente h y acelerómetro.

Para evaluar el desempeño de cada modelo se hace el uso de la herramienta Matlab/Simulink, que permite analizar mediante simulación y verificación de las características de la respuesta temporal y permanente.

Finalmente se presenta la comparativa entre el modelo matemático total obtenido vs la plataforma inercial real.

Palabras Claves: Plataforma inercial, Grados de Libertad, AXDL-335, Lazo Abierto, Motor DC, Panel Táctil, PCI-1711, PIC 18F6722, PIC 16F886 , Matlab/Simulink.

ABSTRACT

YEAR	STUDENT/S	THESIS DIRECTOR	THESIS TOPIC
2015	<ul style="list-style-type: none"> • ALCÍVAR CEVALLOS VANESSA INDAURA • PARRALES DUARTE IRENE TAMARA 	ING. RICARDO CAJO	DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN INERTIAL PLATFORM OF TWO DEGREES OF FREEDOM AND EVALUATION OF MATHEMATICAL MODELING THROUGH MATLAB / SIMULINK

In this paper the design and implementation of an inertial platform with two degrees of freedom and mathematical modeling which will emulate the behavior of the designed system is performed.

In this context the mechanical and electronic design of the stages that conform the inertial platform for that engine, power controllers (h bridge), microcontroller, touch panel (touch screen) and analog accelerometer AXDL-335 is used which is made with the angles of inclination and position of the object to be located on the platform will be obtained. Wherein the main board comprises 18F6722 and 16F886 microcontrollers, designed by the authors, it is responsible for compatibility and bidirectional data transfer between the platform and the data acquisition board (PCI-1711), which allows us to communicate with Matlab / Simulink, the other components are commercial rates.

After the selection and design of each stage of the system electronics, the next step was to find the mathematical model of each stage through physical laws and polynomial approximations for both the h bridge accelerometer.

To evaluate the performance of each model using Matlab / Simulink tool to analyze by simulation and verification of the characteristics of temporary and permanent answer becomes.

Finally, the comparison between the mathematical model is presented total obtained vs. the actual inertial platform

Keywords: inertial platform, Degrees of Freedom, AXDL-335, Open Loop, DC Motor, Touch Panel, PCI-1711, PIC 18F6722, PIC16F886, Matlab / Simulink.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas inerciales están presentes en muchas aplicaciones industriales, principalmente en las que el movimiento es una condición imperativa del entorno, como sistemas y dispositivos montados sobre aviones, automóviles, proyectiles, embarcaciones navales, robots, etc.

Existen muchos principios de medición inercial como mecánicos, electromecánicos, ópticos, entre otros.

En este documento se presenta el diseño e implementación de una plataforma inercial de dos grados de libertad y evaluación del modelo matemático a través de Matlab/Simulink.

Este sistema cuenta con un acelerómetro AXDL-335 de tres grados de libertad de los cuales se utilizan solo dos, haciendo referencia a los ángulos de inclinación en cada eje de coordenadas en X y en Y. Los motores DC realizan la función de balancear el plato con respecto a los ejes X y Y. El resto de las etapas son de potencia para manipulación de voltajes y corrientes.

El diseño de la plataforma se la desarrolla en la herramienta CAD (Inventor 3D) para facilitar la estructura de la misma, y se la implementa en la Universidad Politécnica Salesiana – Laboratorio de Control Automático, donde será de mucha ayuda para el estudio y aprendizaje de las materias de teoría de control I, II y III de la Facultad de Ingenierías.

El modelo matemático se lo obtiene gracias a los parámetros encontrados del motor 1 y motor 2 y a su debida comparación entre ambos para poder visualizar la diferencia de grados entre el modelo real y el simulado a través del Programa Matlab – Simulink.

CAPÍTULO I. EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

En la actualidad los sistemas inerciales son utilizados ampliamente en muchas áreas de la ingeniería como robótica, navegación, guiado de aeronaves, etc. Sin embargo en aplicaciones sobre plataformas móviles se convierten en soluciones bastante costosas por su alto grado de complejidad y precisión.

Conforme a lo descrito anteriormente y a la necesidad de dotar al laboratorio de control automático de la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Guayaquil con este tipo de sistema (plataforma experimental de dos grados de libertad 2-GDL), la cual permitirá realizar modelamientos matemáticos e implementar técnicas de control que se estudian en el transcurso de la carrera de ingeniería electrónica en las materias de teoría de control.

1.2 Delimitación

El trabajo se enfoca en el diseño, implementación y modelado matemático de una plataforma inercial de 2 GDL, este trabajo se lo desarrollará en el laboratorio de Control Automático ubicado en el Bloque B de la Facultad de Ingenierías en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil. La evaluación del modelo matemático de la plataforma se la realiza por partes utilizando el software Matlab / Simulink.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Dotar a la Universidad Politécnica Salesiana de un sistema base que emule el movimiento de una plataforma móvil de dos grados de libertad 2-GDL con la finalidad de estabilizar dispositivos móviles sobre la misma.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un sistema base 2-GDL para emular el movimiento de una plataforma móvil.
- Seleccionar los dispositivos y componentes necesarios para el diseño mecánico de la plataforma.

- Diseñar y plantear una tarjeta de circuito impreso PCB (Printed Circuit Board) que permita la comunicación entre la tarjeta PCI 1711, encoder de motores, panel táctico y puente h.
- Utilizar dos grados de libertad del acelerómetro ADXL335, con la finalidad de realizar mediciones angulares en X y Y.
- Encontrar el modelo matemático para el movimiento horizontal y vertical de la plataforma inercial.

1.4 Justificación

Existen muchos principios de medición inercial como mecánicos, electromecánicos, ópticos, etc.

Sin embargo dado a los avances de los dispositivos electrónicos y sus precios relativamente accesibles han permitido que esta tecnología sea muy utilizada en la actualidad en aplicaciones de baja y media escala.

Debido a esto y a la necesidad de un sistema inercial para realizar prácticas de las materias de teoría de control se planteó crear la plataforma inercial y encontrar su modelo matemático.

1.5 Variables e Indicadores

Las variables a controlar e identificar son:

- Ángulos de Cabeceo (Eje X)
- Ángulos de Balanceo (Eje Y)

1.6 Metodología

Según (Moguel, 2005) indica que la metodología se basa en la investigación científica que se requiere para fines de información muy general, logrando una mayor comprensión donde se aplican y se inter-relacionan varios métodos al mismo tiempo en la investigación.

Para la realización del proyecto de titulación se llevaron a cabo los siguientes métodos: método deductivo, inductivo, analítico y técnica experimental.

1.6.1 Métodos

1.6.1.1 Método Deductivo

Para el diseño e Implementación de la plataforma inercial 2-GDL se aplicará la metodología de investigación deductiva, debido a la aplicación e integración de diferentes áreas de conocimiento como: diseño asistido CAD, dinámica, máquinas eléctricas, y teoría de control.

1.6.1.2 Método Inductivo

Para la ejecución de pruebas y depuración de funcionalidades se utilizará la metodología inductiva con la finalidad de contrastar los resultados en relación a las premisas de diseño.

1.6.1.3 Método Analítico

Para el cálculo y modelamiento matemático se utilizará la metodología de investigación analítica basados en herramientas de ingeniería numérica como MATLAB/SIMULINK.

1.6.2 Técnicas

1.6.2.1 Técnica Experimental

La metodología experimental será la base para el diseño mecánico de componentes necesarios para implantar la solución.

1.7 Población y Muestra

1.7.1 Población

Alumnos matriculados en la Facultad de Ingenierías de la Universidad Politécnica Salesiana.

1.7.2 Muestra

Los estudiantes de la carrera de ingeniería electrónica que están cursando la materia de control automático.

1.8 Descripción de la propuesta

La plataforma inercial de dos grados de libertad está constituida de material de aluminio y acero inoxidable, bajo este contexto se realiza el diseño mecánico en la herramienta CAD Inventor y el diseño electrónico de las etapas que conformaran la plataforma inercial, para aquello se emplean motores reductores de 12VDC, controladores de potencia (puente h), microcontroladores, panel táctil (touch screen) y acelerómetro analógico AXDL-335 con los cuales se obtendrán los ángulos de inclinación y verificar las trayectorias del objeto que se ubique sobre la plataforma.

Se diseña una tarjeta de circuito impreso (PCB) en donde consta los microcontroladores 18F6722 y 16F886 que se encargue de la compatibilidad y transferencia de datos bidireccionales entre la plataforma y la tarjeta de adquisición de datos (PCI-1711), y permita la comunicación con Matlab/Simulink.

Para evaluar el desempeño de cada modelo se presenta la comparativa entre el modelo matemático total obtenido vs la plataforma inercial real.

1.8.1 Beneficiarios

Este proyecto beneficiará en primera instancia a los estudiantes y docentes de las carreras técnicas de la Universidad Politécnica Salesiana.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Sistema de Navegación Inercial (INS)

La navegación inercial es un sistema para determinar la posición y velocidad de una aeronave midiendo su aceleración con respecto a una serie de ejes conocidos. Es un sistema de ayuda a la navegación que usa un computador, sensores de movimiento como acelerómetros o giróscopos para continuamente calcular la posición, orientación y velocidad de un objeto móvil sin la necesidad de referencias externas.

Estos sistemas son usados sobre vehículos tales como buques, aviones, submarinos, proyectiles y vehículos espaciales. Es una técnica auto contenida en la cual las mediciones provistas por acelerómetros y giróscopos son usadas para traquear la posición y orientación de un objeto en relación a punto de inicio conocido. Las unidades de medida inercial (IMU's) típicamente contienen tres giróscopos ortogonales y tres acelerómetros ortogonales con la finalidad de medir la velocidad angular y la aceleración lineal respectivamente, el procesamiento de estas señales desde estos dispositivos permiten traquear la posición y orientación de un dispositivo bajo interés (Gato Gutiérrez, 2003).

2.2 Motor de Corriente Continua

Los motores de corriente continua o corriente directa se usan comúnmente cuando los motores de corriente alterna (C.A) no pueden desarrollar un trabajo en forma satisfactoria, cuando no hay disponible una alimentación en corriente alterna, o bien, el espacio físico es un problema. Los motores de corriente directa en tamaños pequeños proporcionan un mejor control de velocidad que los motores de corriente alterna; sin embargo, requieren de mayor mantenimiento que los motores típicos de Corriente Alterna, los motores de corriente directa pueden también invertir su sentido de rotación, invirtiendo el flujo de corriente a través del campo o de la armadura (Harper, 2003).

2.2.1 Ventajas que aportan los motores de corriente continua

(Viloria, 2014) indica que los motores de corriente continua aportan con diversas aplicaciones como las siguientes:

- Operaciones más suaves (arranques, marcha y frenado).

- Control de la aceleración y deceleración.
- Proporcionan velocidad variable.
- Cambios de marcha en función del proceso.
- Ajustarse con relativa facilidad a las necesidades del proceso.
- Permite posicionamientos de alta precisión y controla el par motor.
- Poderse aplicar a procesos automatizados y con muchas exigencias (estabilidad de funcionamiento, amplia gama de velocidad, control de arranque y frenado, etcétera).

2.2.2 Encoder de un motor

Su función es la de convertir el movimiento mecánico (giros del eje) en pulsos digitales o analógicos que pueden ser interpretados por un controlador de movimiento. Un encoder se compone básicamente de un disco conectado a un eje giratorio. El disco está hecho de vidrio o plástico y se encuentra “codificado” con unas partes transparentes y otras opacas que bloquean el paso de la luz emitida por la fuente de luz (típicamente emisores infrarrojos). En la mayoría de los casos, estas áreas bloqueadas (codificadas) están arregladas en forma radial. A medida que el eje rota, el emisor infrarrojo emite luz que es recibida por el sensor óptico (o foto-transistor) generando los pulsos digitales a medida que la luz cruza a través del disco o es bloqueada en diferentes secciones de este. Esto produce una secuencia que puede ser usada para controlar el radio de giro, la dirección del movimiento e incluso la velocidad. (LBA Industrial, 2012)

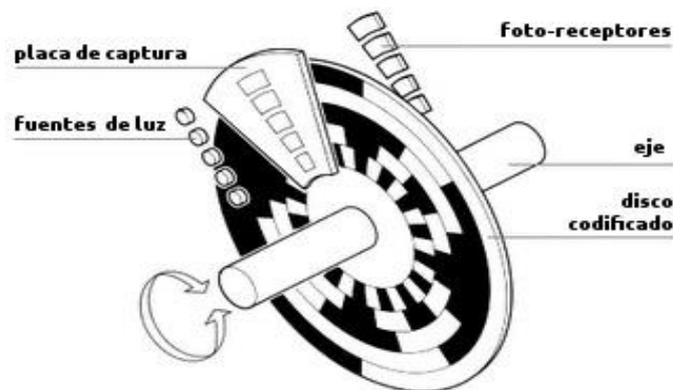


Figura 2.1 Estructura de un encoder de un motor DC. Partes de un encoder de motor DC. Recuperado de: (LBA Industrial, 2012)

2.2.2.1 Tipos de encoder de motores DC

Los tipos de encoders según su diseño básico y funcionalidad son encoder incremental y encoder absoluto, adicional existen otros tipos de encoder como son los ópticos, lineales y de cuadratura (LBA Industrial, 2012).

2.2.2.1.1 Encoder incremental

Un encoder incremental, como su nombre lo indica, es un encoder que determina el ángulo de posición por medio de cuentas incrementales.

Esto quiere decir que el encoder incremental provee una posición estratégica desde donde siempre comenzará la cuenta. La posición actual del encoder es incremental cuando es comparada con la última posición registrada por el sensor.

Los encoders incrementales son un tipo de encoder óptico y este en este tipo de encoder cada posición es completamente única (LBA Industrial, 2012).



Figura 2.2 Encoder incremental. Determina el ángulo de posición por medio de cuentas incrementales. Recuperado de: (LBA Industrial , 2012)

➤ **Encoder de cuadratura:** Es del tipo rotativo incremental el cual tiene la capacidad de indicar tanto la posición como la dirección y la velocidad del movimiento.

Los encoders de cuadratura se encuentran con mucha más frecuencia en muchos productos eléctricos de consumo y en una infinidad de aplicaciones comerciales. La flexibilidad del encoder de cuadratura es su principal ventaja ya que ofrecen una alta resolución, medición con precisión quirúrgica y pueden trabajar en un gran espectro de velocidades que van desde unas cuantas revoluciones por minuto hasta velocidades que van más allá de las 5.000 RPM.

Este tipo de encoder generalmente utiliza sensores ópticos o magnéticos, lo cual los convierte en dispositivos sencillos de usar y extremadamente duraderos (LBA Industrial, 2012).

2.2.2.1.2 Encoder absoluto:

Un encoder absoluto se basa en la información proveída para determinar la posición absoluta en secuencia. Un encoder absoluto produce un código digital único para cada ángulo distinto del eje y se dividen en dos grupos: los encoder de un solo giro y los encoder absolutos de giro múltiple y su tamaño es pequeño para permitir una integración simple.

Los encoder absolutos son comúnmente usados en motores eléctricos de corriente directa sin cepillos, en la medicina, la industria del transporte en especial en trenes, en la minería y otras industrias (LBA Industrial , 2012)



Figura. 2.3. Encoder absoluto. Se utilizan por lo general en motores DC sin cepillado. Recuperado de: (LBA Industrial , 2012)

➤ **Encoder óptico:** El encoder óptico comúnmente usado, consta básicamente de tres partes: una fuente emisora de luz, un disco giratorio y un detector de luz conocido como “foto detector”. El disco está montado sobre un eje giratorio y cuenta con secciones opacas y transparentes sobre la cara del disco. La luz que emite la fuente es recibida por el foto-detector o interrumpida por el patrón de secciones opacas produciendo como resultado señales de pulso.

El código que se produce con dichas señales de pulso es leído por un dispositivo controlador el cual incluyen un micro-procesador para determinar el ángulo exacto del eje (LBA Industrial, 2012).

➤ **Encoder lineal:** Un encoder lineal es un dispositivo o sensor que cuenta con una escala graduada para determinar su posición. Los sensores en el encoder leen la escala para después convertir su posición codificada en una señal digital que puede ser interpretada por un controlador de movimiento electrónico.

Los encoder lineales pueden ser absolutos o incrementales y existen diferentes tipos de encoder según la tecnología usada en su mecanismo, por ejemplo, tecnología óptica, magnética, inductiva o capacitiva.

Este tipo de encoder es más utilizado en aplicaciones de metrología, sistemas de movimiento y para controlar instrumentos de alta precisión utilizados en la fabricación de herramientas (LBA Industrial, 2012).

2.3 Matlab

Matlab es el lenguaje del cálculo técnico, es un entorno de programación para el desarrollo de algoritmos, análisis de datos, visualización y cálculo numérico (MathWorks, Matlab, 1984).

Matlab cuenta con características muy importantes como son las siguientes:

- Lenguaje de alto nivel para el cálculo numérico, visualización y desarrollo de aplicaciones.
- Entorno interactivo para la exploración iterativa, el diseño y la resolución de problemas.
- Funciones matemáticas para álgebra lineal, estadística, análisis de Fourier, filtrado, optimización, integración numérica, y la resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias.
- Construido en los gráficos para la visualización de datos y herramientas para la creación de parcelas personalizados.
- Herramientas de desarrollo para mejorar la calidad del código y facilidad de mantenimiento y maximizar el rendimiento.
- Herramientas para la creación de aplicaciones con interfaces gráficas personalizadas.
- Funciones para integrar los algoritmos basados en MATLAB con aplicaciones externas y lenguajes como C, Java, .NET, y Microsoft® Excel®.

2.4 Simulink

Simulink es un entorno gráfico para la simulación y el diseño basado en modelos para sistemas dinámicos multidominio y sistemas embebidos. Es un programa capaz de construir modelos jerárquicos con bloques de librerías predefinidas, con el fin de simular el comportamiento dinámico del sistema analizando los resultados de simulación conectando el modelo de hardware para las pruebas en tiempo real y el despliegue de sistemas embebidos (MathWorks, Simulink, 1984).

2.4.1 Bloque To Workspace

Es un bloque de trabajo de la herramienta Simulink. ‘To Workspace’ envía su entrada al espacio de trabajo ‘workspace’ de Matlab. Este bloque envía los valores de la entrada a una variable con el nombre especificado en la opción ‘Variable name’. La opción ‘Save format’ determina el formato de la variable de salida (Rubio, 2009).

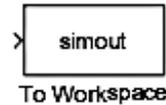


Figura 2.4 Bloque “To Workspace”. Bloque que envía su entrada al espacio de trabajo. Recuperado de: (Rubio, 2009).

2.4.2 Bloque Ramp

El bloque ‘Ramp’ genera una señal que empieza en un instante de tiempo especificado con un valor también previamente configurado y que evoluciona con una pendiente determinada en el bloque. Las características de la señal generada son configuradas mediante las siguientes opciones: pendiente (‘Slope’), tiempo de inicio (‘Start Time’) y la condición inicial de la salida (‘Initial Output’) (Rubio, 2009).

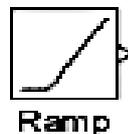


Figura 2.5 Bloque Ramp. Genera una señal que empieza en un tiempo específico. Recuperado de: (Rubio, 2009).

2.4.3 Bloque Step

El bloque ‘Step’ genera un escalón entre dos niveles definidos en un espacio de tiempo especificado. Si el tiempo de simulación es menor que el valor del parámetro ‘Step time’, la salida del bloque será el valor del parámetro ‘Initial value’. Para tiempos de simulación mayores o iguales que el valor de ‘Step time’, la salida es el valor del parámetro ‘Final value’.

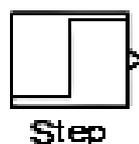


Figura 2.6 Bloque Step. Genera un escalón entre dos niveles de espacio de tiempo especificado. Recuperado de: (Rubio, 2009) (Rubio, 2009).

2.4.4 Signal Generator (Generador de Señal)

El bloque generador de señal puede producir una de las cuatro formas diferentes de onda: onda sinusoidal, onda cuadrada, onda diente de sierra, y onda aleatoria. Se puede expresar parámetros de la señal en Hertz (por defecto) o rad/seg (MathWorks, Matlab, 1984).

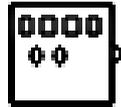
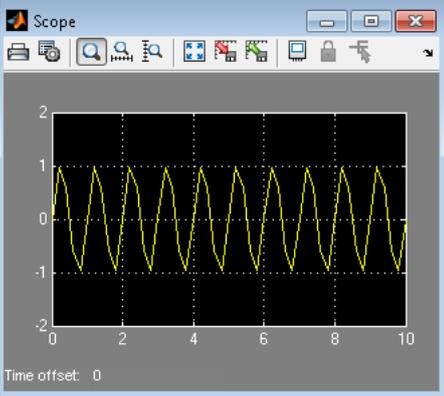
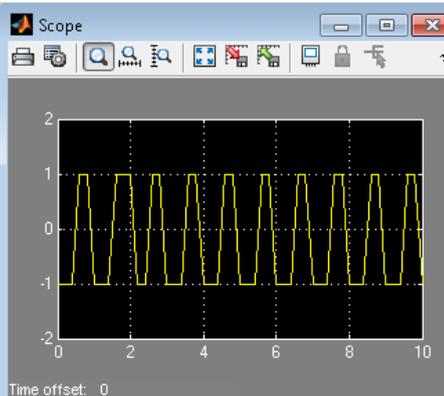


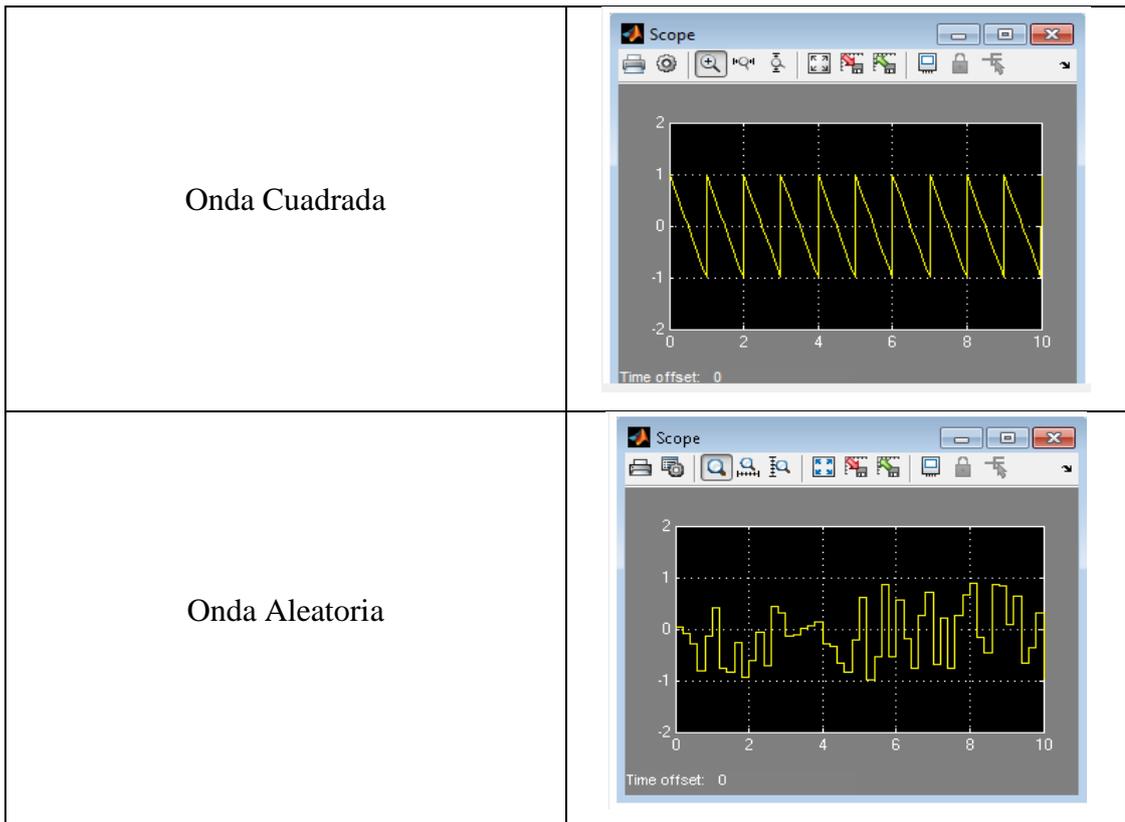
Figura 2.7 Generador de señal. Bloque generador de señal que produce cuatro formas de onda. Recuperado de: (MathWorks, Matlab, 1984)

El uso de valores de los parámetros por defecto, se obtiene una de las siguientes formas de onda:

Tabla 2.1

Tipos de señales que se obtienen a partir de un generador de señales

Tipos de onda	Generados de señales
Onda Sinusoidal	
Onda Diente de Sierra	



Nota: Las diferentes tipos de señales (sinusoidal, cuadrada, diente de sierra, y aleatoria) que se obtienen a través del generador de señales en Matlab/Simulink. Recuperado de: (MathWorks, Matlab, 1984).

2.4.5 Pulso Generator (Generador de Pulso)

El bloque generador de impulsos genera impulsos de onda cuadrada a intervalos regulares. Parámetros de forma de onda del bloque, amplitud , anchura de pulso, período , y el retraso de fase , determinar la forma de la onda de salida. (MathWorks, Matlab, 1984).

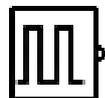


Figura 2.8 Generador de Pulso. Bloque Generador de Pulso de onda cuadrada a intervalos. Recuperado de: (MathWorks, Matlab, 1984).

2.4.6 Bloque Subsistemas

Un bloque subsistema representa un subsistema del sistema que lo contiene. El bloque subsistema puede representar un subsistema virtual o un subsistema no virtual.

La principal diferencia es que los subsistemas no virtuales proporcionan la capacidad de controlar cuando se evalúan los contenidos del subsistema. Un subsistema es virtual a menos que el bloque se ejecuta de forma condicional y / o que haya seleccionado la casilla de verificación. (MathWorks, Matlab, 1984)

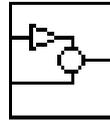


Figura 2.9 Bloque Subsistema. Contiene un subconjunto de bloques. Recuperado de: (MathWorks, Matlab, 1984)

2.5 Programa CAD Inventor

Inventor es un paquete de modelado paramétrico de sólidos producido por la empresa de software Autodesk que ofrece un conjunto de herramientas fáciles de usar para diseño mecánico, documentación y simulación de productos en 2D y 3D (Autodesk, Inventor, 1992).

2.6 Protocolo RS-232

El estándar RS232 fue redactado por el CCITT (Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico) en Europa y la EIA (Alianza de Industrias Electrónicas) en los Estados Unidos para asegurar que hubiera un formato común mundial para comunicaciones en serie entre ordenadores y periféricos. Esta normalización comprendía las características de los conectores a utilizar (tamaño, número de patillas, forma, etc), los niveles de tensión a soportar, y las funciones de control asignadas a cada patilla. También identifica el protocolo simple de establecimiento de comunicaciones que determina cuando está preparado el equipo terminal para enviar y recibir datos.

Los niveles de tensión para la interfaz RS232 están definidos para extenderse entre -3V y -15V para el 1 lógico, y entre +3V y +15V para el 0 lógico. Típicamente se establecen en -12V y +12V. Obsérvese que la interfaz RS232 utiliza la denominada “lógica negativa”.

La interfaz está limitada normalmente a velocidades de 20kps para distancias del orden de 15 metros (Bateman, 1999).

2.7 Tarjeta controladora Puente H

El puente H es un circuito electrónico que permite a un motor eléctrico DC girar en ambos sentidos, avanzar y retroceder.

Los puentes H ya vienen hechos en algunos circuitos integrados, pero también se pueden construir a partir de componentes discretos.

Un puente H se construye con 4 interruptores (mecánicos o mediante transistores). Cuando los interruptores S1 y S4 están cerrados (S2 y S3 abiertos) se aplica una tensión positiva en el motor, haciéndolo girar en un sentido. Abriendo los interruptores S1 y S4 (cerrando S2 y S3), el voltaje se invierte, permitiendo el giro en sentido inverso del motor como se muestra en la figura 2.10.

Un puente H se usa para invertir el giro de un motor, pero también se puede usar para frenarlo de manera brusca, al hacer un corto entre las bornes del motor, o incluso puede usarse para permitir que el motor frene bajo su propia inercia, cuando desconectamos el motor de la fuente que lo alimenta. (Medina, 2012)

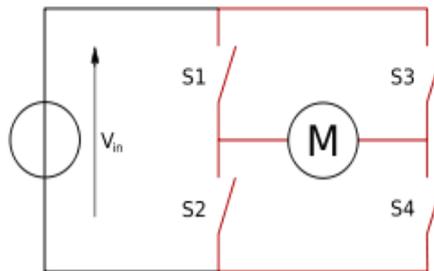


Figura 2.10 Circuito de un puente H. Circuito electrónico que permite el cambio de giro a un motor DC. Recuperado de: (Medina, 2012)

2.8 Microcontroladores

Un microcontrolador tiene recursos para recibir y procesar las solicitudes de interrupciones. Generalmente, cada dispositivo que es fuente de una posible interrupción tiene asociados dos bits, que pueden estar en un mismo registro o en registros diferentes. El primer bit tiene una función informativa: es un indicador que es activado. Este bit se puede consultar por programa si para atender al dispositivo se usa la técnica de consulta o espera. El otro bit tiene una función de control y se usa para permitir o impedir el paso de la solicitud de interrupción hacia la CPU, lo que

equivale a habilitar o inhabilitar la generación de interrupciones por la fuente en cuestión (Valdés & Ramon, 2007).



Figura 2.11 Tipos de Microcontroladores. Variedad de microcontroladores muy óptimos para diferentes tipos de programas que el operario desee. Recuperado de: (Microchip, 2014).

2.9 Touch Screen Resistive (Panel Táctico Resistivo)

Esta Tecnología consiste en una membrana de vidrio con transductores emisores y receptores ubicados en los bordes frontales de la pantalla.

La controladora envía una señal eléctrica de 5 MHz al transductor transmisor que convierte la señal en ondas ultrasónicas y las envía sobre la superficie del vidrio a través de una serie de deflectores. Cuando esta señal le llega a los deflectores del lado opuesto, este la envía al transductor receptor que reconvierte las ondas acústicas en una señal digital. Este proceso se repite en cada eje de coordenada.

Cuando uno toca la pantalla absorbe las ondas acústicas que viajan sobre la misma. Las señales recibidas por X e Y son comparadas con el mapa original, el cambio es reconocido y se calcula así la coordenada.

Las Pantallas Secure Touch son ideales para ambientes donde el vandalismo está presente, por eso ELO desarrolla esta Tecnología con pantallas de Vidrio de 6mm & 12 mm de espesor. (Elo Touch Solutions, 1971).

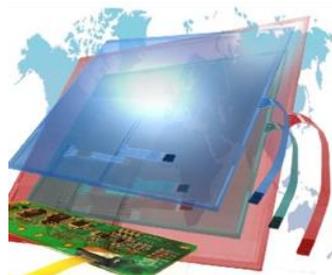


Figura 2.12 Touch panel o pantalla táctil. Se visualiza como la pantalla táctil está compuesta de varias capas. (Elo Touch Solutions, 1971)

2.10 Acelerómetro

Los acelerómetros o sensores de aceleración, están pensados para realizar una medida de aceleración o vibración, proporcionando una señal eléctrica según la variación física, en este caso la variación física es la aceleración o la vibración. Existen acelerómetros piezoresistivos, acelerómetros piezoeléctricos y acelerómetros capacitivos.

Los rangos de medida son diversos, desde 1 g, hasta los miles de g's. Respecto al rango de frecuencia disponible, hay acelerómetros que parten de 0 Hz, para medida de bajas frecuencias, acelerómetros que llegan hasta los miles de Hz para altas frecuencias de vibración, otros modelos de muy alta sensibilidad con bajo rango de frecuencia, etc. Lo mismo ocurre con los formatos, existen variados formatos según la aplicación de los acelerómetros, en aluminio, titanio, acero inoxidable, etc. con montaje de tornillos, magnética, pegada, etc. (Sensing S.L)

2.11 Tarjeta de circuito impreso PCB (Printed Circuit Board)

Un circuito en tarjeta impresa o PCB en inglés (Printed Circuit Board), es una tarjeta o placa utilizada para realizar el emplazamiento de los distintos elementos que conforman el circuito y las interconexiones eléctricas entre ellos.

Los circuitos impresos más sencillos corresponden a los que contienen caminos de cobre (tracks) solamente por una de las superficies de la placa. A estas placas se les conoce como circuitos impresos de una capa, o en inglés, 1 Layer PCB.

Los circuitos impresos más comunes de hoy en día son los de 2 capas o 2 Layer PCB. Sin embargo, dependiendo de la complejidad del diseño físico del circuito (o PCB layout), pueden llegar a fabricarse hasta de 8 o más layers. (M. Patricio, 2010)

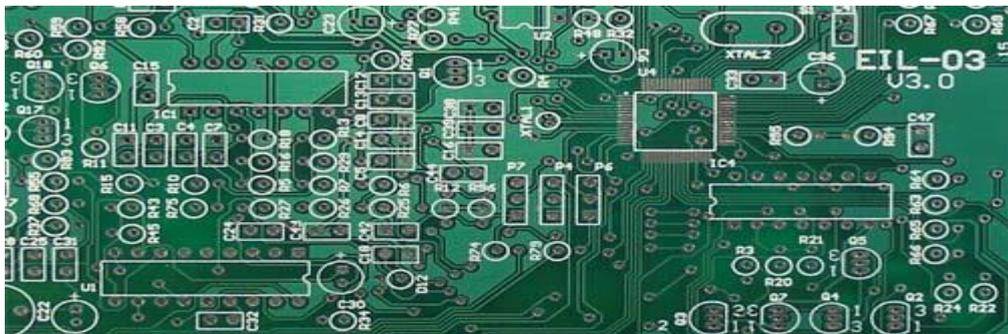


Figura 2.13 Tarjeta de circuito impreso. Se visualizan las pistas y caminos electrónicos.

2.12 Amplificadores Operacionales OPAM

Básicamente el amplificador operacional es un dispositivo amplificador de la diferencia de sus dos entradas, con una alta ganancia, una impedancia de entrada muy alta, (mayor a 1 Megaohm) y una baja impedancia de salida (de 8 a 20 ohmios).

Hay varios tipos de presentación de los amplificadores operacionales, como el paquete dual en línea (DIP) de 8 pines o patitas. (Electronica Unicrom, 2002)

2.13 Modulación por ancho de pulso PWM (Pulse Width Modulation)

PWM (Pulse Width Modulation o modulación por ancho de pulso) es un método de conmutación bastante sencillo y consiste en aplicar todo el voltaje de alimentación a la carga y después retirarlo. Variando los tiempos en los que se aplica la tensión podremos controlar la velocidad del motor (Rubio, 2006).

2.14 Tarjeta de Adquisición de Datos

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable. (National Instrumens, 2015) .



Figura 2.14 Como funciona una DAQ. Procesos que contiene una tarjeta de adquisición de datos. (National Instrumens, 2015)

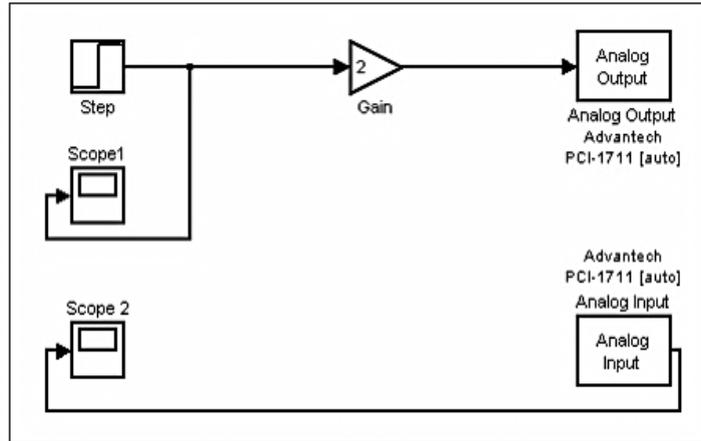


Figura 2.15 Ejemplo con Bloque de entradas/salidas analógicas. Comunicación con tarjeta de adquisición de datos PCI-1711 a través de un diagrama de bloques en Simulink asignando canales a la salida y entrada analógica (Barbosa, 2011).

CAPÍTULO III. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PLATAFORMA INERCIAL DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

3.1 Diseño de la Plataforma Inercial

El diseño se lo realiza en la herramienta CAD Autodesk Inventor. A continuación se muestra la plataforma en diferentes vistas: Frontal, ISO, Lateral y Frontal (Render, Wire y JPG).

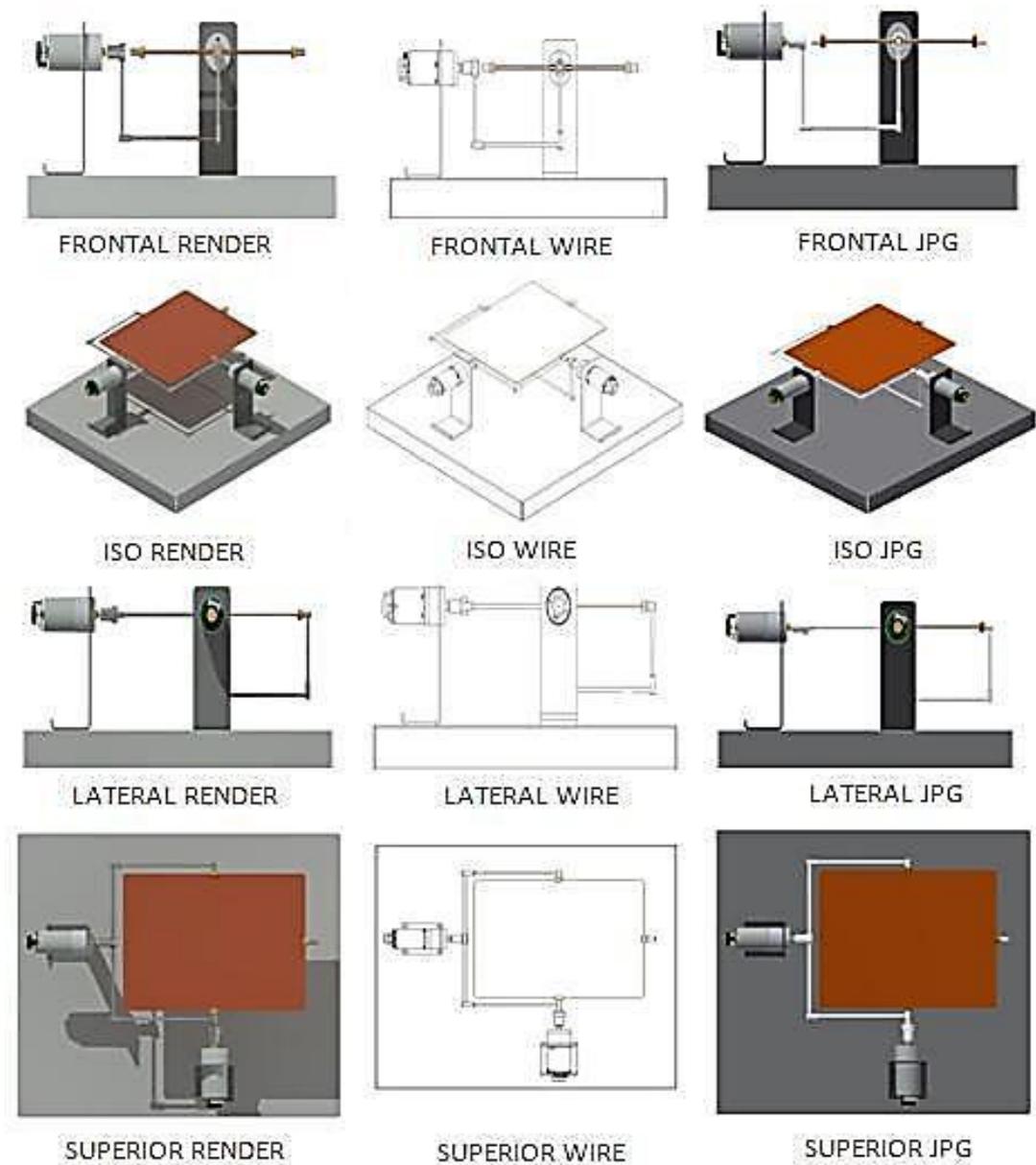


Figura 3.1: Diseño de la plataforma inercial de 2 grados de libertad. Esquema 3D de la Plataforma de 2-GDL en vista Frontal, ISO, Lateral, Superior en modo (Render, Wire, JPG).

3.1.1 Estructura Mecánica

La estructura mecánica de la plataforma inercial se la construyó en el CENTRO DE MECANIZADO INDUSTRIAL “CEMECIND” ubicado en Guayaquil – Lizardo García 2322 entre General Gómez y Argentina con el Gerente Propietario Aníbal Pérez Gilse.

La estructura de la plataforma inercial es construida con material de aluminio cromado y acero inoxidable.

Se elaboran las piezas con máquinas industriales como torno y fresadora.

3.1.1.1 Dimensiones de la Estructura Mecánica

Las dimensiones de la estructura en la tabla 3.1 son establecidas de acuerdo a los dispositivos y tarjetas a implementarse.

Tabla 3.1

Dimensiones de la estructura mecánica

Dimensiones	Medida (mm)
Base de Panel Táctico Resistivo	350mmx265mm
Base de Motores	300mmx80mmx45mm
Base de la Plataforma de 2-GDL	560mmx350mmx60mm

Nota: Las medidas establecidas para la plataforma son establecidas de acuerdo a los dispositivos y tarjetas a implementarse.

3.1.1.2 Partes de la Estructura Mecánica

A continuación se detalla la secuencia de pasos que se lleva a cabo para la realización de cada parte que conforma la estructura mecánica de la plataforma inercial.

En la Figura 3.2 se observan 3 piezas fundamentales para la plataforma fabricadas con máquinas industriales como el torno y fresadora.



Figura 3.2 Ajustador, Sujetador, Ruliman. Tres Piezas Fundamentales para sostener la plancha de aluminio.

Luego se acoplan las tres piezas formando una sola como se observa en la Figura 3.3. y ésta pueda sostener la plancha de aluminio.



Figura 3.3 Ajustador, Sujetador, Ruliman (en conjunto). Unión de las 3 Piezas formando un solo cuerpo.

La pieza que sirve para sostener a los soportes laterales a través de las varillas de acero inoxidable se observan en la Figura 3.4.



Figura 3.4 Soporte Lateral. Pieza para ajustar y sostener las varillas laterales del sistema.

La Figura 3.5 muestra la pieza que sostiene al eje del motor y se acopla con el soportes laterales para que pueda establecer el movimiento del sistema.



Figura 3.5 Acople para motores. Sostiene las varillas laterales para acoplarse con el movimiento que proporcione los motores.

La varilla de acero inoxidable se visualiza en la figura 3.6, la misma que va a servir para para sostener los soportes laterales con respecto a cada eje de la plataforma.



Figura 3.6 Varilla de acero inoxidable. Las varillas laterales que se acoplan a piezas laterales para sujetar a la plataforma.

En la figura 3.7 se observa la base de los motores DC con sus respectivas perforaciones de 3 mm para poder sostener sin ningún problema al mismo.



Figura 3.7 Bases de Motores DC. Se encuentra ubicado en un extremo horizontal y vertical de la base de la plataforma.

En la Figura 3.8 se observa la plancha de aluminio y encima el panel táctico, misma que va a sensor una carga útil para proyectos futuros con el diseño de un controlador.

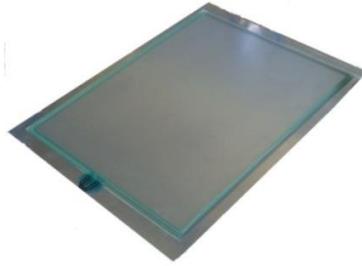


Figura 3.8 Plancha de aluminio. Se coloca encima de la plancha de aluminio un panel táctico resistivo para sensor una carga útil.

En la figura 3.9 se visualiza como está quedando cada pieza acoplada entre ellas.



Figura 3.9 Visualización de soporte lateral. Unión de varillas de acero inoxidable y acoples para motores.

En la figura 3.10 se observa cómo debe de estar acoplada las piezas con la plancha de aluminio para formar la plataforma inercial de 2-GDL.

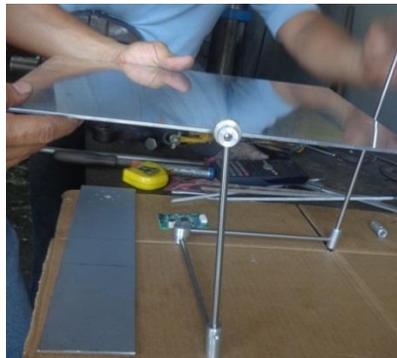


Figura 3.10 Unión de soportes laterales y plancha de aluminio. Colocación de soportes laterales con la plataforma.

3.1.1.3 Implementación

Cabe recalcar que la estructura metálica está construida de aluminio cromado y acero inoxidable, para presentar una mejor estética y un acabado perfecto.

Luego se procede a instalar los componentes y tarjetas de tal manera facilite el manejo y revisión del sistema.

En la Figura 3.11 se observa la ubicación exacta de las bases de los motores centradas respectivamente y acopladas en la base de la plataforma.



Figura 3.11 Bases de la plataforma y bases de motores. Bases de los motores sujeta y ajustada a la base de la plataforma donde internamente se encuentran también conectadas las tarjetas y componentes de la plataforma de 2-GDL.

En la Figura 3.12 se obtiene una vista de los soportes laterales acoplados al eje de un motor.



Figura 3.12 Colocación de motores DC. Ajustando plataforma de 2-GDL con eje de motor DC.

En la figura 3.13 se visualiza las piezas y bases acopladas entre ellas formando así la plataforma inercial que emulará el movimiento de dos ejes.



Figura 3.13: Plataforma Inercial. Vista lateral de la estructura mecánica.

En la Figura 3.14 se visualiza la tarjeta controladora del panel resistivo táctico y acelerómetro sujetados a la plataforma de 2-GDL.



Perforaciones para tarjeta controladora de panel táctico resistivo y acelerómetro AXDL-335

Figura 3.14: Perforaciones bajo la plancha de aluminio. Se ubica la tarjeta controladora del Panel Táctico Resistivo y Acelerómetro AXDL-335

La Figura 3.15 muestra la perforación establecida para el switch on/off de la plataforma de 2-GDL.



Figura 3.15 Perforación para Switch-Indicador on/off. Se visualizará con el indicador del switch si la plataforma está encendida y apagada.

En la Figura 3.16 se visualiza las perforaciones que se realizan para ajustar a la tarjeta de adquisición de datos y la conexión de 110VAC para energizar la plataforma y poder observar su función.



Figura 3.16 Perforaciones laterales de la base de la plataforma. Perforaciones para la tarjeta de adquisición de datos PCI-1711 y entrada de poder 110VAC.

En la Figura 3.17 muestra las perforaciones que tiene la base de la plataforma para ajustar las tarjetas y componentes que ésta necesite para que funcione correctamente.



Figura 3.17 Perforaciones en base de la plataforma. Vista superior de la base de la planta.

En la figura 3.18 se observa la ubicación de los ángulos alrededor de la plataforma inercial para sujetar a la pantalla táctica resistiva o touch panel.



Figura 3.18 Vista superior de la plataforma. Se observa la ubicación los ángulos al contorno de la plataforma para sostener al panel táctico.

3.1.2 Elementos y componentes de la plataforma inercial de 2-GDL

Para el respectivo funcionamiento de la plataforma inercial de dos grados de libertad es importante conocer de todos los componentes y tarjetas que la planta contiene.

3.1.2.1 Motor reductor de 12VDC

El motor reductor utilizado es un potente motor de corriente continua de 12VDC de 80 RPM, con 1 caja de engranajes de 131.25 e integrado con un encoder en cuadratura que proporciona una resolución de 64 pulsos por revolución del eje del motor, que corresponde a 8.400 recuentos por revolución del eje de salida de la caja de cambios.

Estos motores están diseñados para su uso en 12 V, aunque en general, estos motores pueden funcionar a tensiones por encima y por debajo de la tensión nominal (que puede comenzar en tensiones tan bajas como 1V). Tensiones más bajas pueden no ser prácticas, y los voltajes más altos podrían comenzar a afectar negativamente a la vida útil del motor (*Robotis & Electronics Pololu, 2015*).

La figura 3.19 muestra el modelo del motor reductor Pololu que se utiliza para emular el movimiento de la plataforma en cada eje respectivamente.



Figura 3.19 Motor reductor Pololu de 12VDC. Motor con caja de engranajes e integrado a un encoder de cuadratura. Recuperado de: (*Robotis & Electronics Pololu, 2015*)

3.1.2.1.1 Encoder del motor

El encoder de cuadratura con efecto Hall, puede ser alimentado desde 3.5 VDC a 20 VDC y cuenta con dos salidas que proporciona una resolución de 64 pulsos por revolución del eje del motor, cuando se cuentan ambos bordes de ambas salidas.

La figura 3.20 muestra el encoder de cuadratura ubicado en la parte posterior del motor reductor DC.



Figura 3.20 Encoder de cuadratura de 3-20VDC. Vista posterior del encoder implementado desde la caja de engranajes que conecta al motor reductor de 12VDC. Recuperado de: (*Robotis & Electronics Pololu, 2015*)

Tabla 3.2

Distribución de colores del encoder del motor DC Pololu.

Color	Función
Rojo	Potencia del motor (se conecta a un terminal del motor)
Negro	Potencia del motor (se conecta a la otra terminal del motor)
Verde	Encoder GND
Azul	Encoder Vcc (3.5 – 20 V)
Amarillo	Encoder A salida
Blanco	Encoder B salida

Nota: Se puede identificar la función que comprende cada cable de dicho conector a partir de sus colores. Recuperado de: (*Robotis & Electronics Pololu, 2015*)

3.1.2.2 Tarjeta Puente H (Sparkfun Monster)

La tarjeta SparkFun Monster es esencialmente una versión incrementada de una Ardumoto. Compuesta por dos microchip VNH2SP30 que contiene un puente completo con un par de conductores capaz de manejar corrientes de hasta 30A nominal (Spark fun, 2003).

3.1.2.2.1 Características de la Tarjeta Puente H (Sparkfun Monster)

- Voltaje máximo : 16V
- Corriente nominal máxima: 30 A
- Corriente continua : 14 A
- Máxima frecuencia PWM : 20 kHz
- Apagado térmico
- Baja tensión y desconexión por sobretensión

3.1.2.3 Acelerómetro Analógico AXDL-335

El Acelerómetro analógico AXDL-335 transforma la señal mecánica en señal eléctrica, su sensibilidad es proporcional a su tamaño. Su rango dinámico es el tramo

de respuestas en la que se produce respuesta lineal, entre la señal emitida y la señal recibida (Díez, 2009).

3.1.2.3.1 Características del Acelerómetro AXDL-335

- Detección de 3 ejes
- Pequeño, paquete de bajo perfil
- $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 1,45\text{ mm}$ LFCSP
- Energía baja: 350 uA (típico)
- Alimentación: $3.5\text{VDC} - 5\text{VDC}$
- Excelente estabilidad de la temperatura
- Ajuste BW con un único condensador por eje
- RoHS / WEEE sin plomo compatible

La figura 3.21 muestra el modelo del acelerómetro que se utiliza en el proyecto, para obtener los ángulos de inclinación con respecto a cada eje de la plataforma.

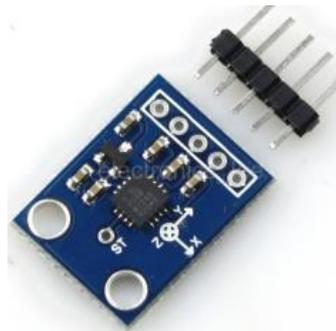


Figura 3.21 Acelerómetro AXDL-335 de 3 ejes. Recuperado de: (Technology, 2009)

3.1.2.4 Panel Táctico Resistivo (Touch Screen Resistive)

Las pantallas táctiles transparentes NKK's están diseñadas para complementar la aplicación de elección al tiempo que ofrece mayor durabilidad y flexibilidad.

Cuenta con una tecnología de 4 hilos y una pantalla de alta resistencia a la electricidad estática y la contaminación acústica. (Mouser Electronics , 2007).

La figura 3.22 muestra la pantalla resistiva que se utiliza en el proyecto para obtener las trayectorias que se originen en la misma a través de una carga útil.

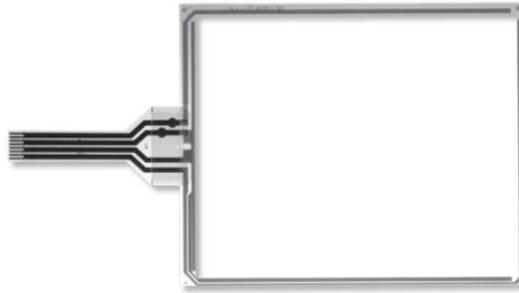


Figura 3.22 Panel Táctico Resistivo. Pantalla modelo FTAS00-57AS4 de alta resistencia a la electricidad estática. (Mouser Electronics , 2007)

3.1.2.5 Microcontroladores

Los microcontroladores que se necesitan para el proyecto son los siguientes: 2 PIC16F866 para programación de puente H y programación Touch Panel, PIC18F6722 para programación de los encoders de los motores reductores 24VDC.

La Figura 3.23 muestra el microchip modelo 18F6722 para programar la resolución de los encoders de cada motor.



Figura 3.23 Estructura física del microcontrolador PIC18F6722. Recuperado de: (Microchip, 2014)

La Figura 3.24 muestra el microchip modelo 16F886 para programar el puente H y el panel táctico resistivo.



Figura 3.24 Estructura física del microcontrolador PIC16F886. Recuperado de: (Microchip, 2014)

3.1.2.6 Tarjeta de Adquisición de Datos PCI-1711

La tarjeta de adquisición PCI1711 es un dispositivo capaz de leer y escribir señales analógicas y digitales a través de un ordenador creando una aplicación que se comunique con el hardware exterior como puede ser el caso de Simulink, únicamente habrá que añadir módulos de entrada/salida usando bloques controladores de entrada/salida. (Barbosa, 2011).

3.1.2.6.1 Características de la Tarjeta PCI 1711

- Entrada analógica de 16 ch terminación única
- Convertidor A / D de 12 bits , con una tasa de muestreo de hasta 100 kHz
- ganancia programable
- Búsqueda de canales automático / ganancia
- A bordo de la memoria FIFO (1.024 muestras)
- Dos canales de salida analógica de 12 bits (PCI- 1711U solamente)
- Entrada digital 16 canales y salida digital 16 –ch

La figura 3.25 muestra una vista de la tarjeta de adquisición de datos PCI-1711 que se conecta dentro del CPU donde se ejecuten las pruebas respectivamente.



Figura 3.25 Tarjeta de Adquisición de Datos PCI-1711. Cuenta con 16 canales para entradas digitales, 16 canales para salidas digitales, 16 canales para entradas analógicas, 2 canales para salida analógica.

3.1.2.7 Amplificador operacional LM358 (OPAMP)

Un circuito integrado LM358 tiene una amplia utilidad en diversos campos de la electrónica y es un circuito de fácil implementación. Consiste en dos circuitos independientes que se encuentran dentro del encapsulado que compensan la frecuencia del amplificador operacional y cada uno opera como suplemento de poder que operan a diferentes rangos de voltaje, el drenaje es posible también bajo las operaciones de fuerza independientemente de la magnitud del suministro de voltaje, su diagrama es de fácil implementación (EcuRed Corporation, 2010).

3.1.2.7.1 Características del OPAM LM358

1. Acoplador de impedancia y Ganancia de frecuencia.
2. Posee una ganancia de 100dB.
3. Gran ancho de banda.
4. Internamente compensado
5. Salidas protegidas contracircuito
6. Alimentación de operación de 3V a 32V

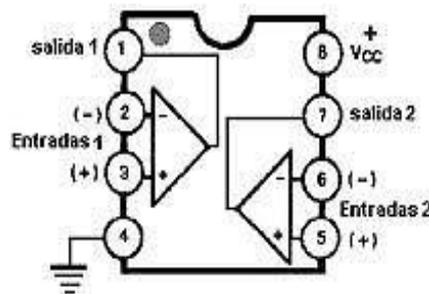


Figura 3.26 Amplificador operacional LM358. Diagrama esquemático del integrado LM358 donde se visualizan sus entradas y salidas del elemento. Recuperado de: (EcuRed, 2013).

3.1.2.8 Diseño de tarjeta de circuito impreso, PCB (Printed Circuit Board).

La tarjeta de circuito impreso está desarrollada para la integración de los encoders de los motores DC Pololu, tarjeta controladora del panel resistivo táctico Nkk, puente H Spark Funk con señales PWM (Modulación por ancho de pulso) y alimentación de

voltaje entre 5VDC y 12VDC, la tarjeta de circuito impreso se va a encargar de enviar sus salidas o entradas analógicas/digitales a la tarjeta de adquisición de datos PCI-1711. El diagrama general de la tarjeta de circuito impreso se encuentra en el anexo 1.

La figura 3.27 muestra el diseño electrónico de un filtro paso bajo mediante el cual se obtiene el nivel DC de la señal de entrada (PWM).

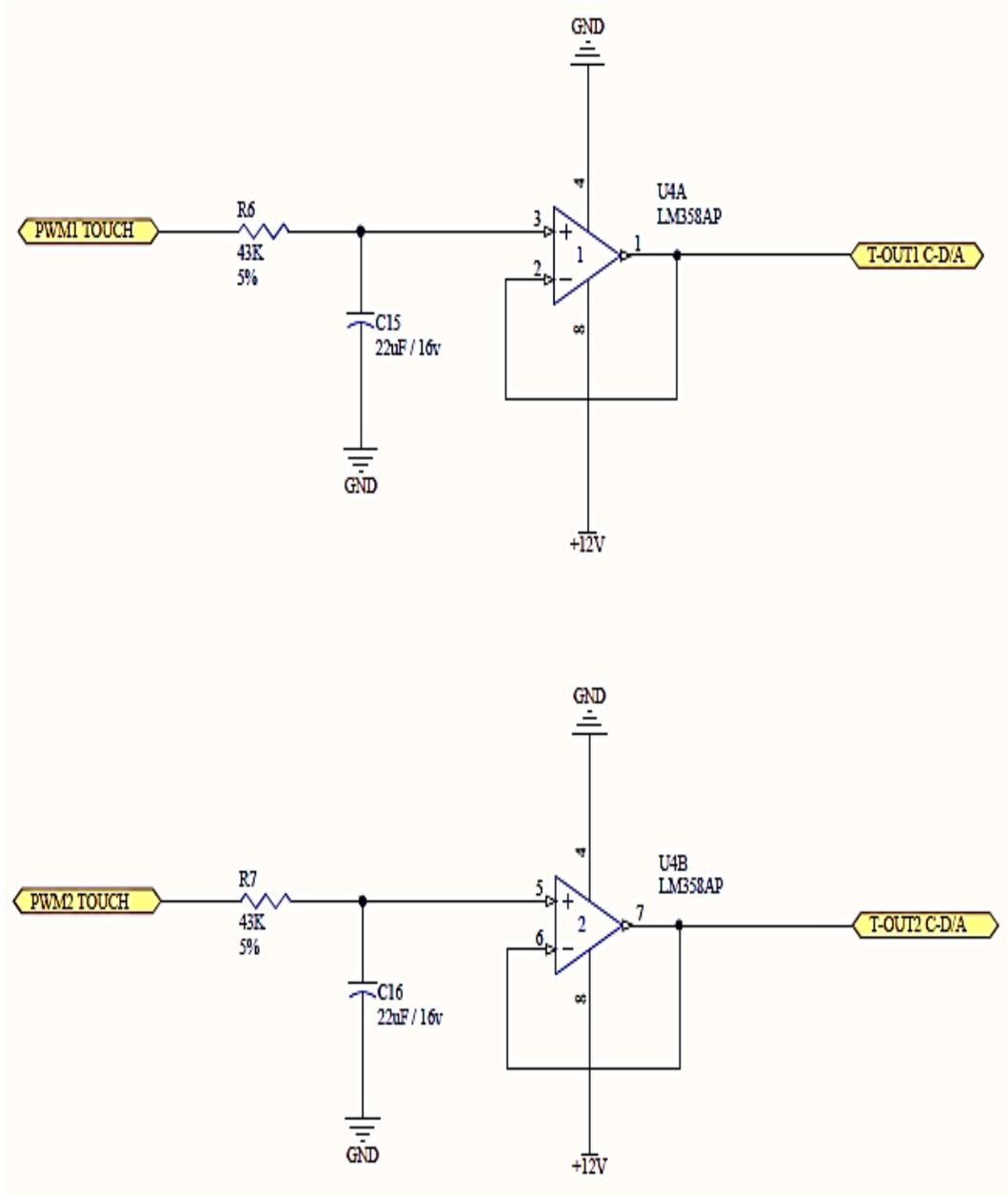


Figura 3.27 Esquema de filtro activo paso bajo RC. Conexión para mejorar la resolución del panel resistivo o Touch panel a través de la modulación por ancho de pulso.

Las figuras 3.28 y 3.29 muestra los pines a utilizar del PIC16F866 para la programación del touch panel y puente H.

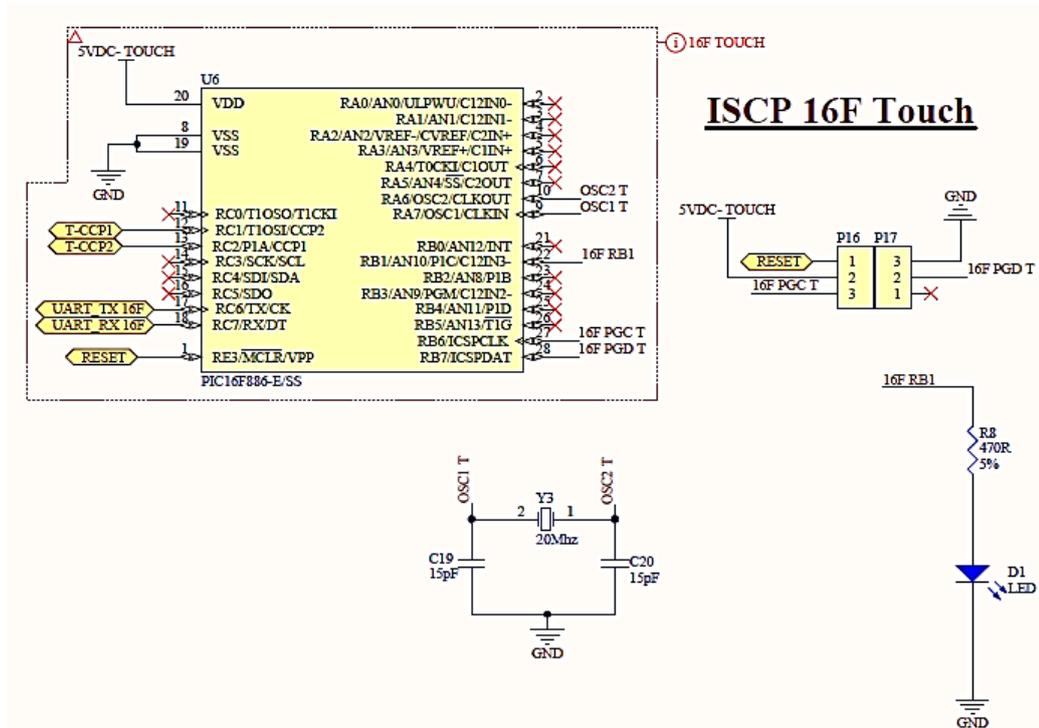


Figura 3.28 Diagrama de conexión Touch. Esquema de conexión para el panel táctico resistivo utilizando el microcontrolador 16F886 y la comunicación RS232 se encuentra en el anexo 1.

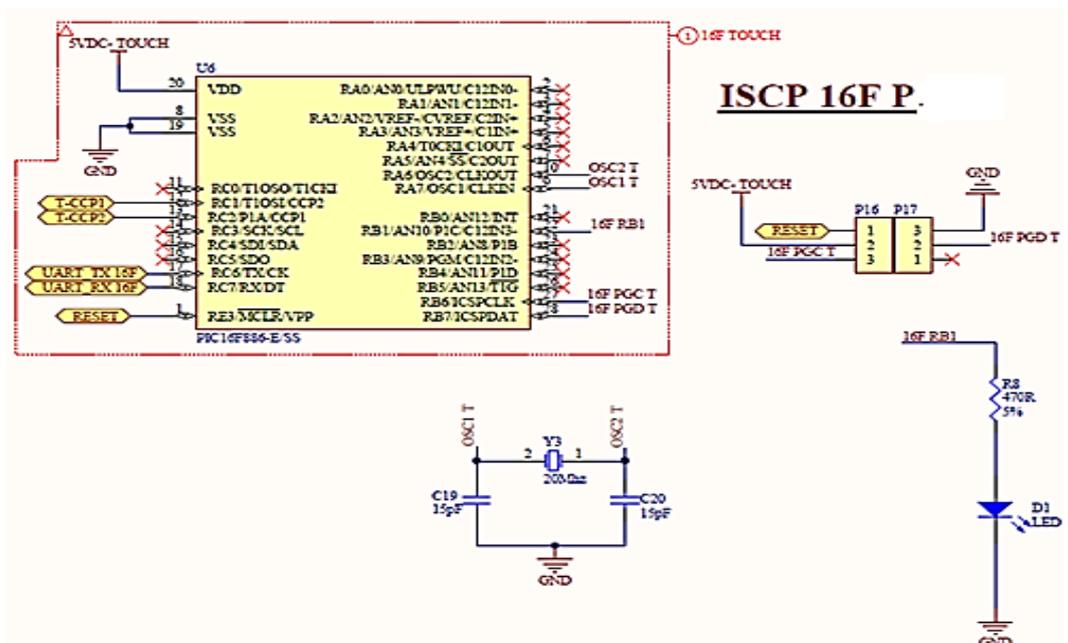


Figura 3.29 Diagrama de conexión puente H. Esquema de Conexión para el puente H utilizando el microcontrolador 16F886.

La Figura 3.30 muestra el diseño electrónico de la alimentación DC para la tarjeta de circuito impreso donde se encuentran los 12VDC para los motores reductores, puente H; y 5VDC para el panel táctico resistivo.

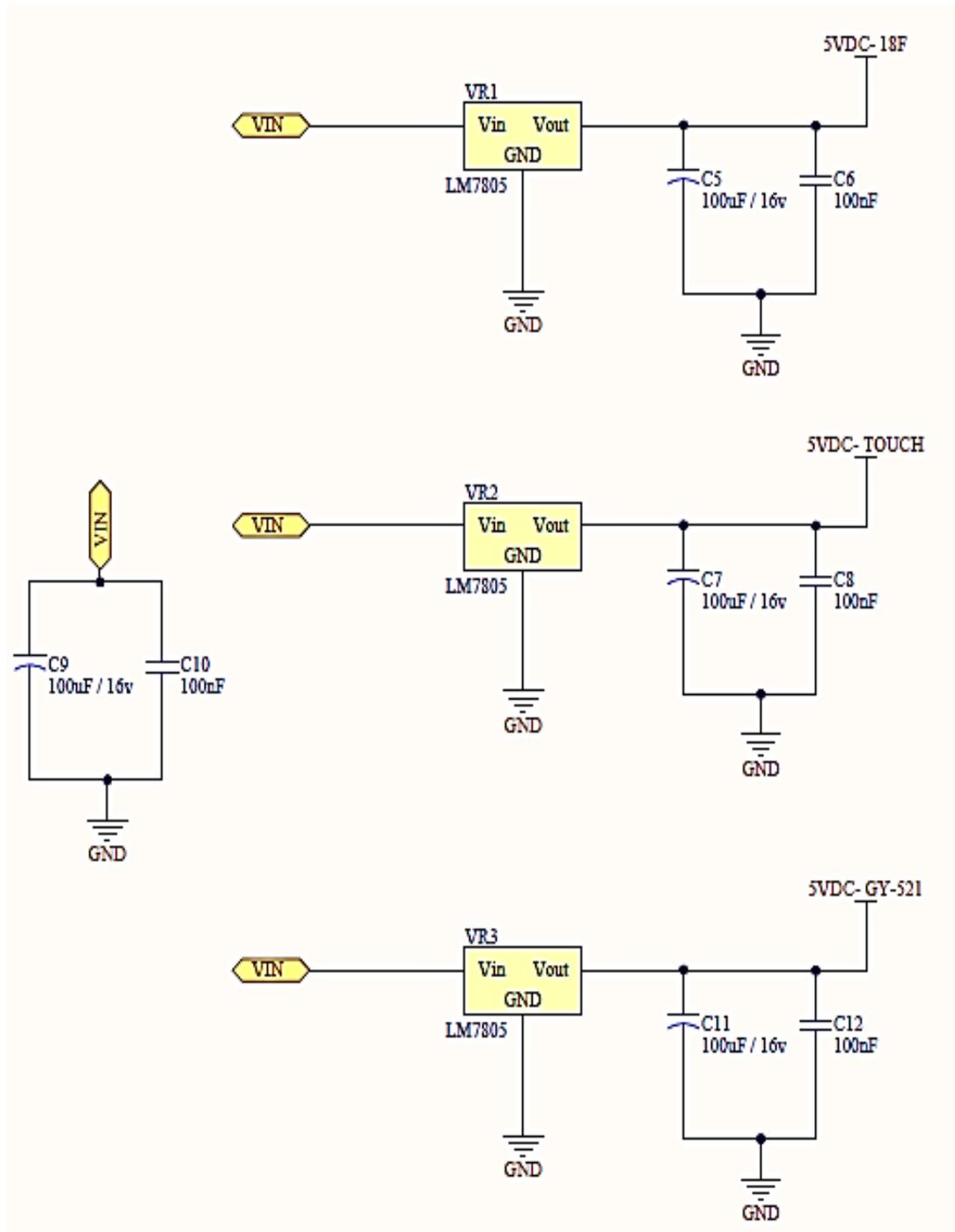


Figura 3.30 Esquema de alimentación de 12VDC y 5VDC. Alimentación para las tarjetas de la plataforma.

La figura 3.31 muestra las pistas y componentes electrónicos en la tarjeta de circuito impreso.

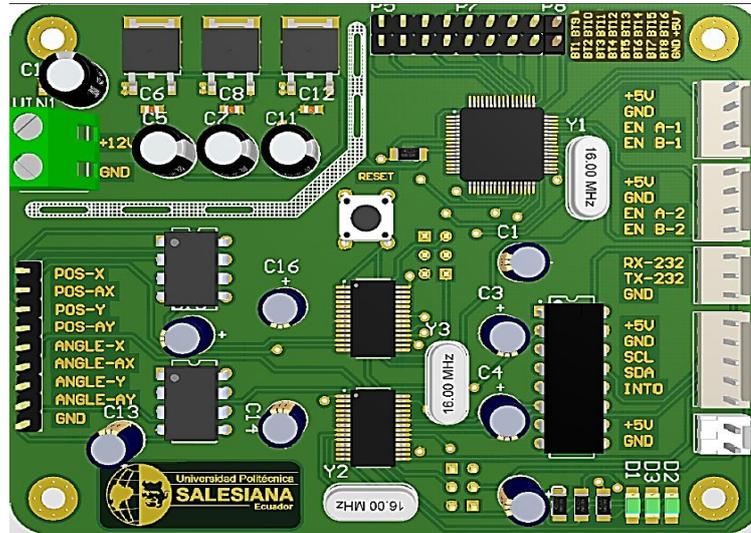


Figura 3.31 Diagrama Esquemático de la tarjeta de circuito impreso. Vista superior de la PCB.

La figura 3.32 muestra la pista electrónica que se va a imprimir en una base no conductora para luego colocar los elementos de la tabla 3.3 en su respectivo lugar.

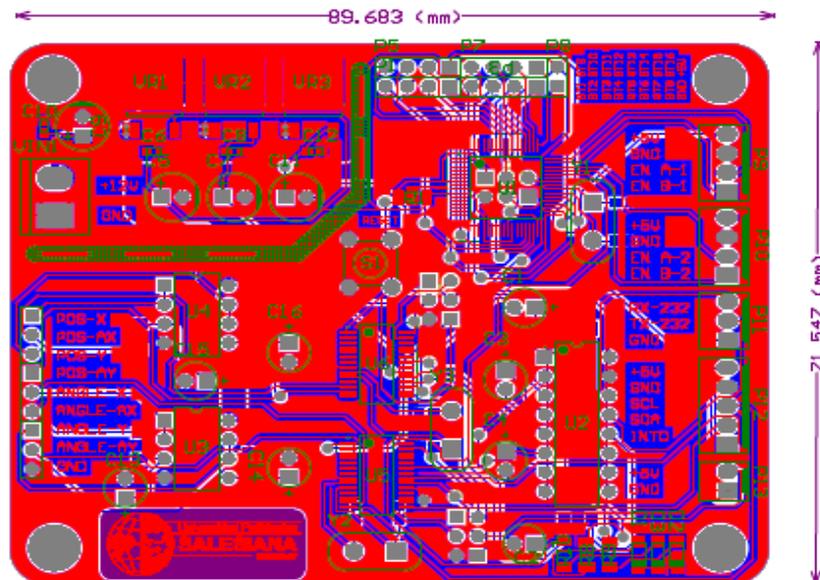


Figura 3.32 Diagrama electrónico de la tarjeta de circuito impreso. Se observa el camino de las pistas electrónicas con respecto a la ubicación de cada componente.

Tabla 3.3

Elementos que contiene la tarjeta de circuito impreso (PCB).

Item	Descripción	Designación	Cantidad
1	Capacitor de 1uF / 16v	C1, C2, C3, C4	4
2	Capacitor de 100uF / 16v	C5, C7, C9, C11	4
3	Capacitor de 100nF	C6, C8, C10, C12	4
4	Capacitor de 22uF / 16v	C13, C14, C15, C16	4
5	Capacitor de 15pF	C17, C18, C19, C20, C21, C22	4
6	LED	D1, D2, D3	3
7	Resistencia de 10k	R1	1
8	Resistencia de 1R	R2, R3	2
9	Resistencia de 43k	R4, R5, R6, R7	4
10	Resistencia de 470R	R8, R9, R10	3
11	PIC 18F6722	U1	1
12	MAX232N	U2	1
13	LM358AP	U3, U4	2
14	PIC 16F886	U5, U6	2
15	Regulador de Voltaje LM7805	VR1, VR2, VR3	3
16	Cristal Quarzer	Y1, Y2, Y3	3

Nota: Se observa la designación que se le ha establecido a cada elemento de la tarjeta de circuito impreso (PCB).

3.1.3 Distribución de tarjetas y fuentes de poder en la base de la plataforma inercial de 2-GDL.

La planta cuenta con una base donde se encuentra internamente la distribución de tarjetas y fuentes de poder.

En la figura 3.33 se visualiza la distribución de tarjetas electrónicas y fuentes de alimentación con sus respectivas perforaciones para la entrada de poder y para

conectar el cable de datos de la tarjeta PCI-1711 además se muestra la ubicación del switch indicando el on/off de la plataforma de 2-GDL.

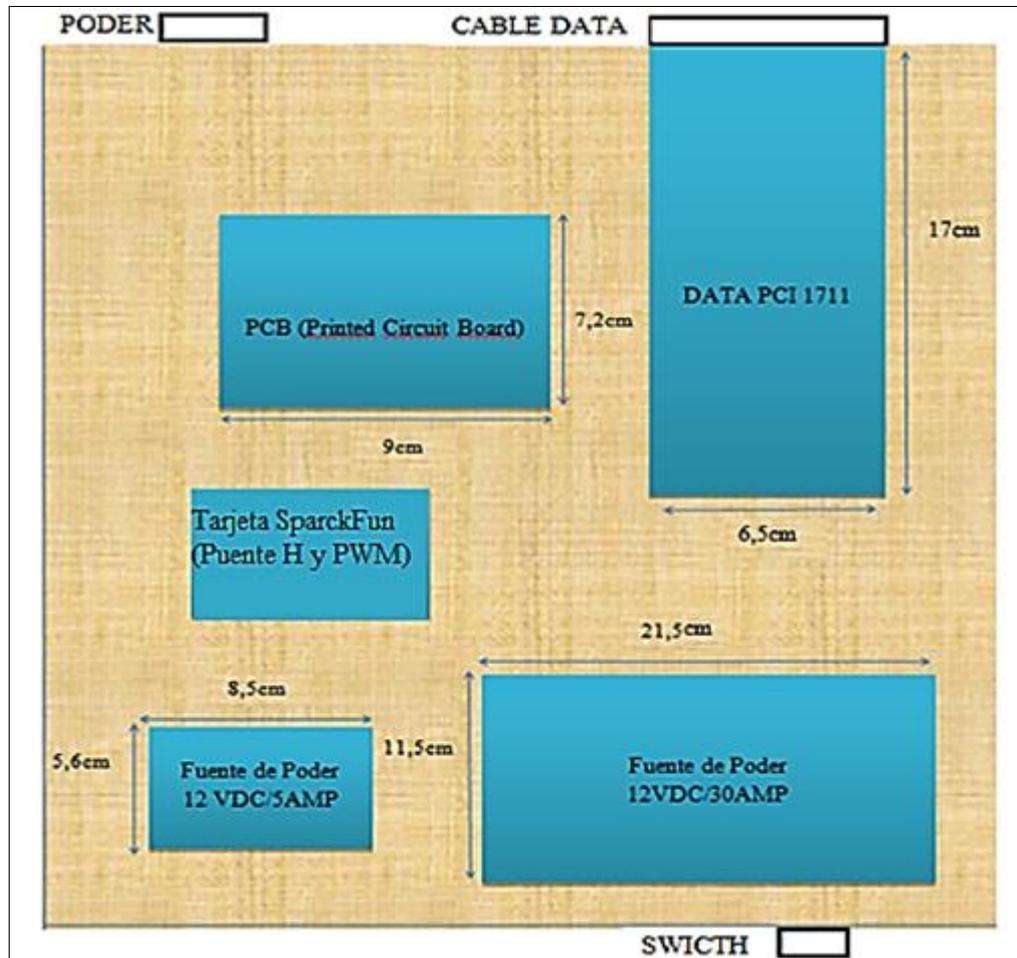


Figura 3.33 Distribución de tarjetas y componentes en base de la plataforma de 2-GDL. Bosquejo interno de las tarjetas electrónicas y fuentes de alimentación.

CAPÍTULO IV. MODELADO DE LA PLATAFORMA INERCIAL DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

El diseño de la planta se basa en un sistema mecánico robusto para el Laboratorio de Control Automático de la Universidad Politécnica Salesiana.

Para el correcto funcionamiento de la plataforma inercial de dos grados de libertad se ha considerado tres partes elementales muy importantes representadas en el siguiente diagrama de bloques:

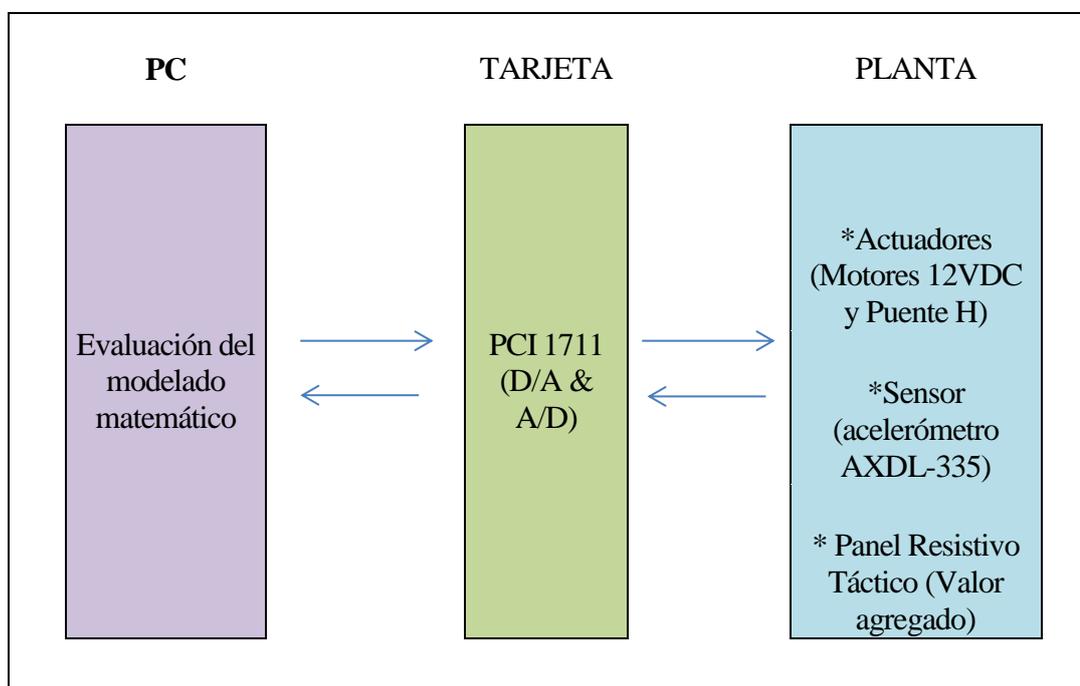


Figura 4.1 Diagrama de Bloques de la Plataforma de 2-GDL. Secuencia del funcionamiento del Sistema.

La figura 4.1 describe lo siguiente: La primera parte llamada PC consta del evaluado matemático realizado y desarrollado en Matlab/ Simulink donde se puede obtener los ángulos de balanceo (eje X) y ángulos de cabeceo (eje Y) y obtener una comparación entre modelos real y simulados, la segunda parte la compone la tarjeta PCI 1711 y consta de entradas y salidas analógicas y digitales para que pueda establecer la comunicación entre la PC y la PLANTA, ya que la PLANTA es la tercera y principal parte de este proyecto, la misma que consta de un panel táctico resistivo

de 5VDC; actuadores (2 Motores reductores de 12VDC) y sensor (acelerómetro AXDL335 perteneciente a la familia GY-61).

4.1 Configuración de la tarjeta de adquisición de datos

Para el desarrollo del modelo matemático de cada componente es necesario configurar las entradas/salidas analógicas o digitales de la tarjeta de adquisición de datos PCI-1711 en Simulink de la siguiente manera.

4.1.1 Bloque de parámetros

Desde simulink en el bloque de la entrada/salida analógica o digital de la tarjeta de adquisición de datos se da doble clic y se abre una ventana llamada bloque de parámetros donde se instala la nueva tarjeta en modo advantech y se selecciona el modelo de la tarjeta PCI-1711 con la que se desea trabajar.

En la Figura 4.2 se puede observar cómo se debe instalar la tarjeta de adquisición de datos PCI-1711 en modo advantech desde un bloque de entrada o salida de la misma.

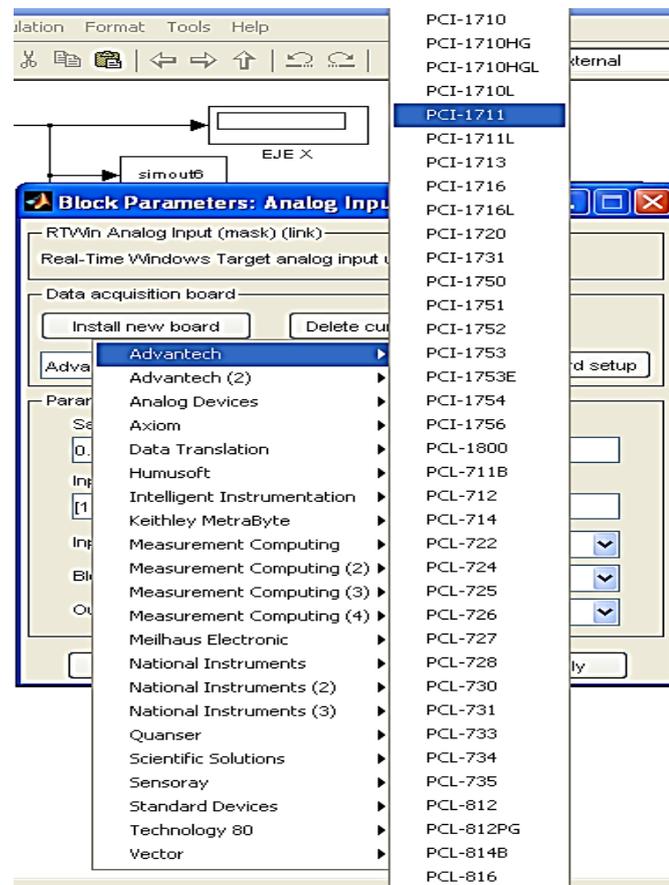


Figura 4.2 Bloque de parámetros. Instalación de tarjeta de adquisición de datos PCI-1711.

En la figura 4.3 se observa la ventana para la selección de tarjeta, el tiempo de muestro, rango de voltaje, tipo de datos y en principal los canales de entrada para que se configure exactamente la PCI-1711.

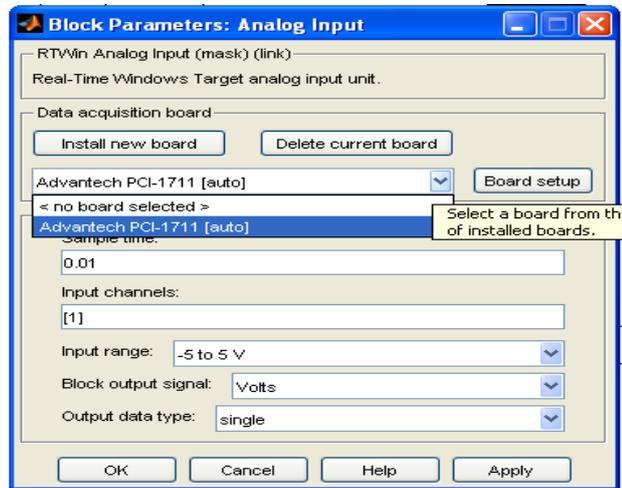


Figura 4.3 Asignación de tarjeta de adquisición de datos. Se selecciona el modelo de la tarjeta PCI-1711.

Desde Simulink se da click en simulation – Configuration Parameters (Configuración de parámetros) y aparece una ventana donde se da click en Real-Time Workshop y se asigna el archivo `rtwin.tlc` y Build para que se cargue la configuración realizada y funcione correctamente la tarjeta de adquisición de datos.

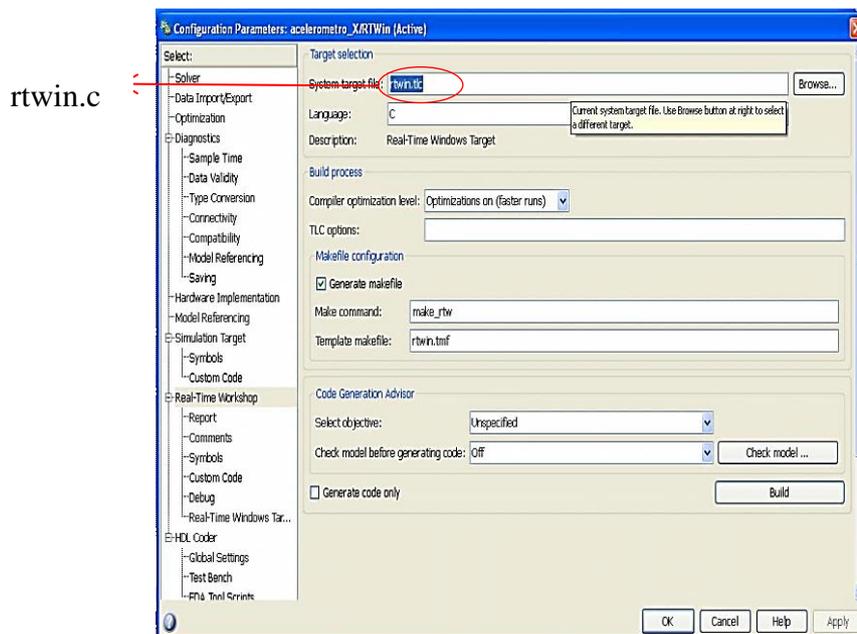


Figura 4.4 Selección de archivo `rtwin.tlc`. Se configura la tarjeta de adquisición de datos con el archivo `rtwin.tlc` para el correcto funcionamiento.

4.2 Obtención del modelo matemático del acelerómetro analógico ADXL-335 en Matlab/Simulink.

Para la obtención de la evaluación matemática del acelerómetro AXDL-335 es necesario saber que variable se debe medir, para ello se obtiene la función de transferencia que se muestra en la figura 4.5.

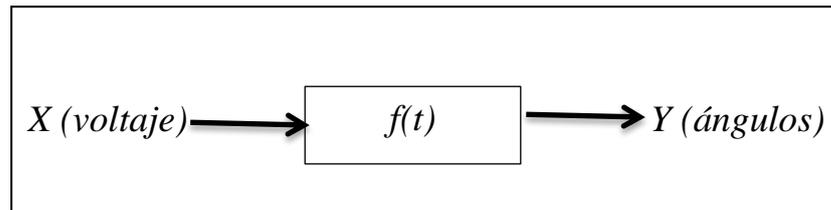


Figura 4.5 Función de transferencia del acelerómetro. Relación ángulo vs voltaje.

Para conocer el funcionamiento del acelerómetro analógico AXDL-335 en la plataforma de 2 grados de libertad se necesita encontrar la relación entre ángulo vs voltaje. Para ello se realiza un programa en Arduino UNO que permita mover el acelerómetro para ángulos entre 30° a -30° , con ayuda de un servomotor.

La figura 4.6 muestra una codificación desarrollada en el software Arduino Uno para encontrar los valores desde 30° a -30° variando el ángulo manualmente desde la variable val y asignando la señal de referencia en el pin 10 de la tarjeta arduino.

```
#include <Servo.h>
Servo myservo;
int val;
void setup()
{ Serial.begin(9600);
  Myservo.attach(10); // es la referencia de la señal del servo }
void loop()
{ val= 30;
  myservo.write(val);
  Serial.println(val);
  delay (100); }
}
```

Figura 4.6 Programación en arduino Uno. El programa muestra el ángulo con respecto al movimiento del servo entre 30° a -30° .

En la Figura 4.7 se observa la conexión del servomotor hacia la tarjeta arduino uno, y la conexión del acelerómetro AXDL-335 conectado a la tarjeta de adquisición de datos PCI-1711.

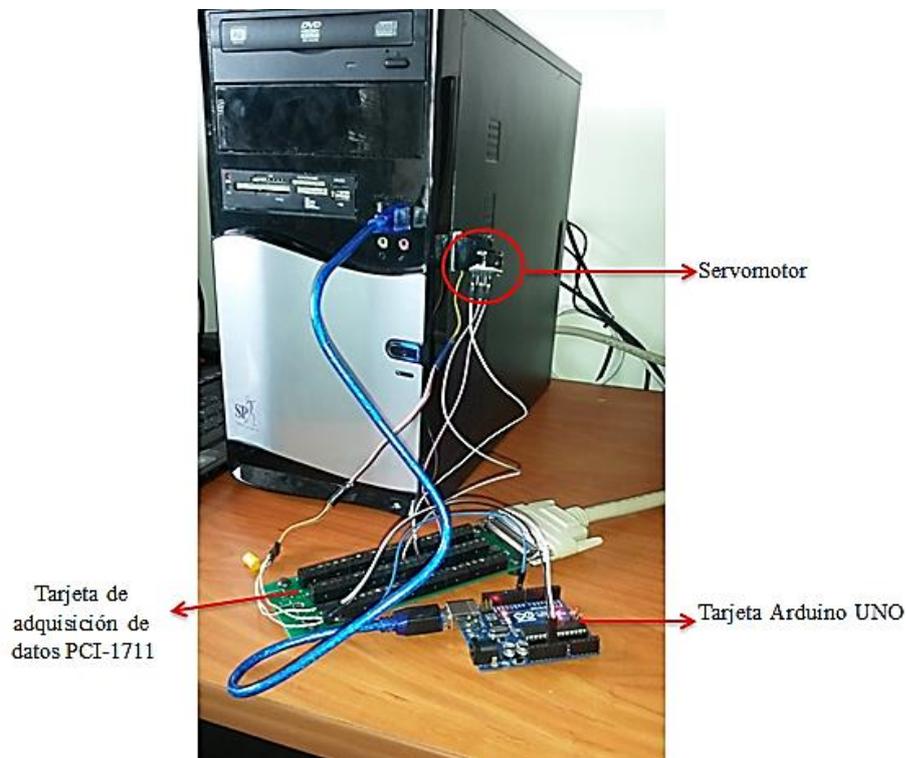


Figura 4.7 Conexión para obtener los ángulos del acelerómetro AXDL-335. Se realizan pruebas con el servomotor y acelerómetro para encontrar los ángulos del eje X y Y.

En la figura 4.8 se visualiza al acelerómetro AXDL ajustado al servomotor donde la señal de control para el servomotor es enviada por la tarjeta arduino Uno y las señales de los ángulos X y Y del acelerómetro AXDL-335 se conectan directamente a los pines de entradas analógicas de la tarjeta de adquisición de datos.



Figura 4.8 Acoplamiento entre servomotor y acelerómetro AXDL-335. Se toma como referencia el movimiento del servomotor para encontrar los ángulos del acelerómetro.

Tabla 4.1

Listado de conexiones del acelerómetro AXDL-335

Referencia Eje Acelerómetro	Pin Tarjeta PCI-1711	Canal Matlab
Referencia Eje X (AI0)	68	1
Referencia Eje Y (AI2)	67	3

Nota: Verificar que los canales perteneciente a cada pin de la tarjeta PCI-1711 esten asignados al respectivo bloque de entradas analógicas y conectados directamente a los ejes X y Y del acelerómetro AXDL-335.

En el programa Simulink se realiza un diagrama de bloques para medir el voltaje de salida de los ejes X y Y del acelerómetro AXDL-335.

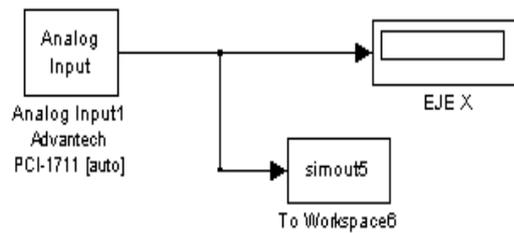


Figura 4.9 Diagrama de Bloques con respecto al eje X. En el bloque simout5 se guardan 1000 datos en referencia al ángulo del eje X durante un tiempo de 100 segundos.

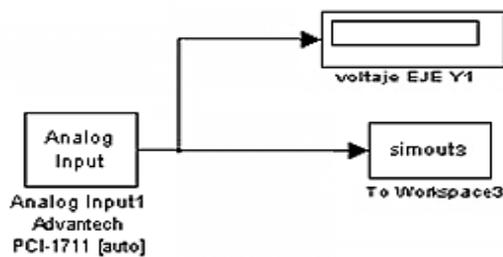


Figura 4.10 Diagrama de Bloques con respecto al eje Y. En el bloque simout3 se guardan 1000 datos en referencia al ángulo del eje Y durante un tiempo de 100 segundos.

En Matlab se analiza a la variable simout, en donde se almacenan los 1000 datos en cada ángulo del eje X y Y del acelerómetro acoplado al servo, y con ayuda del comando MEAN (simoutX) se obtiene el promedio de los 1000 datos tomados.

Tabla 4.2

Voltajes X y Y obtenidos con relación a los ángulos de referencia del servomotor/acelerómetro.

Grados Referencia Servo/acelerómetro	Voltaje Eje X	Voltaje Eje Y
-30	1,7109	1,7218
-20	1,6654	1,6811
-10	1,6251	1,6344
0	1,5829	1,5899
10	1,5375	1,5444
20	1,4925	1,5049
30	1,4509	1,4577

Nota: Los valores de los voltajes capturados en los ejes X y Y del acelerómetro AXDL-335 son obtenidos con respecto a cada ángulo entre -30° - 30° , la tabla completa se la puede visualizar en anexos.

Los voltajes obtenidos de los ejes X y Y de la tabla 4.2 se consideran para encontrar el polinomio de primer y segundo orden en matlab/simulink, el cual permite conocer el voltaje de salida del acelerómetro según su posición angular.

En el editor de Matlab se crea la siguiente codificación para poder encontrar los polinomios del acelerómetro y determinar el eje del mismo.

```
data=xlread('prueba_eje_X_Y'); %se importa el archivo de
excel y se asigna a la variable data
x=data(:,5);%los datos de la columna 5 (ángulo) se asignan a la variable
y=data(:,4);%los datos de la columna 4(voltaje)se asignan a la variable y
figure(1) %nombre de la gráfica
plot(x,y) %muestra la gráfica con las variables asignadas
N=1; %asigna el grado del polinomio en la variable N
P = polyfit(x,y,N); %asigna a la variable P la función del polinomio
pretty(poly2sym(P)) %función polinomio
Y = polyval(P,x); %función polinomio
figure(2) %nombre de la gráfica real y aproximada
plot(x,y,'r',x,Y,'b'),legend('REAL','APROX') %asignar leyenda
xlabel('Ángulo'),legend('Real','APROX') %asignar leyenda eje x
ylabel('Voltaje'),legend('Real','APROX') %asignar leyenda eje y
```

Figura 4.11 Líneas de código para polinomio eje X y Y. Codificación para encontrar los polinomios de N orden del acelerómetro AXDL-335 y obtener gráfica de la relación ángulo vs voltaje.

Con la codificación efectuada en la Figura 4.11 se obtienen las siguientes gráficas de comparaciones y funciones de transferencias:

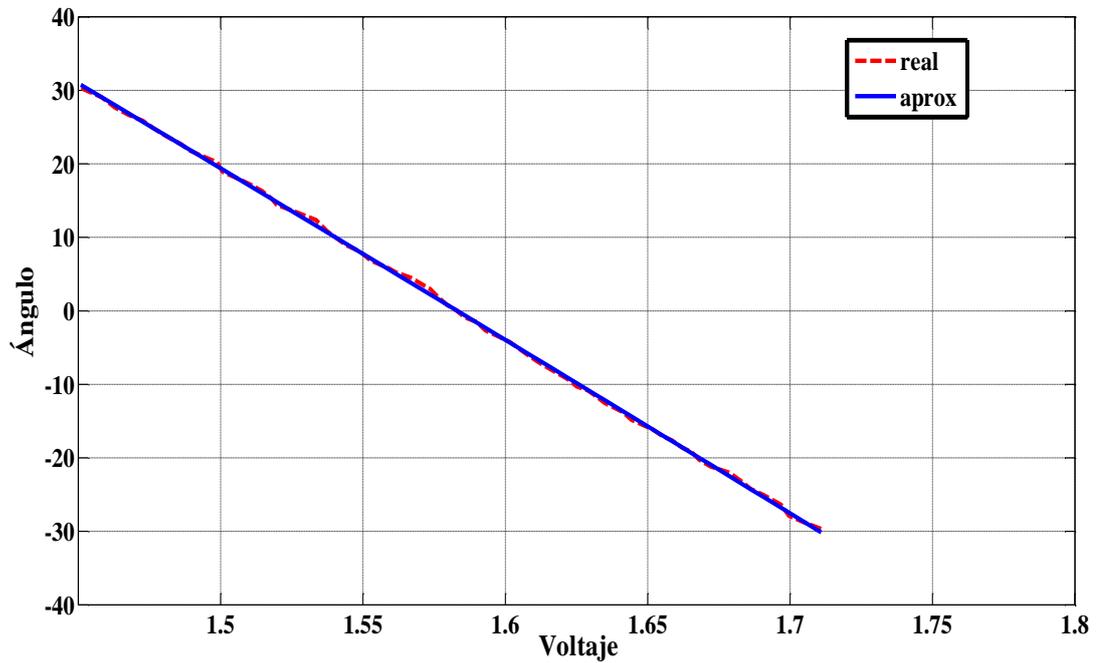


Figura 4.12 Comparación del acelerómetro eje X. Se compara la función lineal del polinomio de primer orden de los datos reales vs aproximados en el eje X.

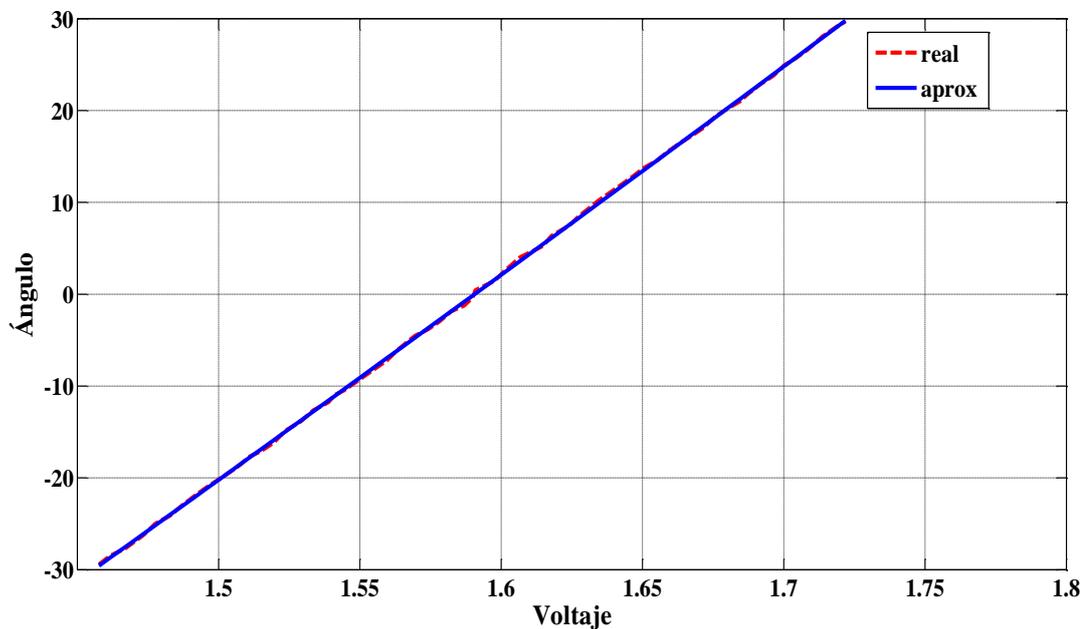


Figura 4.13 Comparación del acelerómetro eje Y. Se compara la función lineal del polinomio de primer orden de los datos reales con los simulados en el eje Y.

En las Figuras 4.14 y 4.15 se observan las funciones de transferencia del acelerómetro para los ejes X y Y.

6520074740437979	8238461094285503 x

17592186044416	35184372088832

Figura 4.14 Función de transferencia del acelerómetro en el eje X. Función de transferencia de N=1.

3953105871907819 y	6286046777242375

17592186044416	17592186044416

Figura 4.15 Función de transferencia del acelerómetro en el eje Y. Función de transferencia de N=1.

Las funciones de transferencia obtenidas del acelerómetro en los ejes X y Y se implementan en el programa Simulink de la siguiente manera:

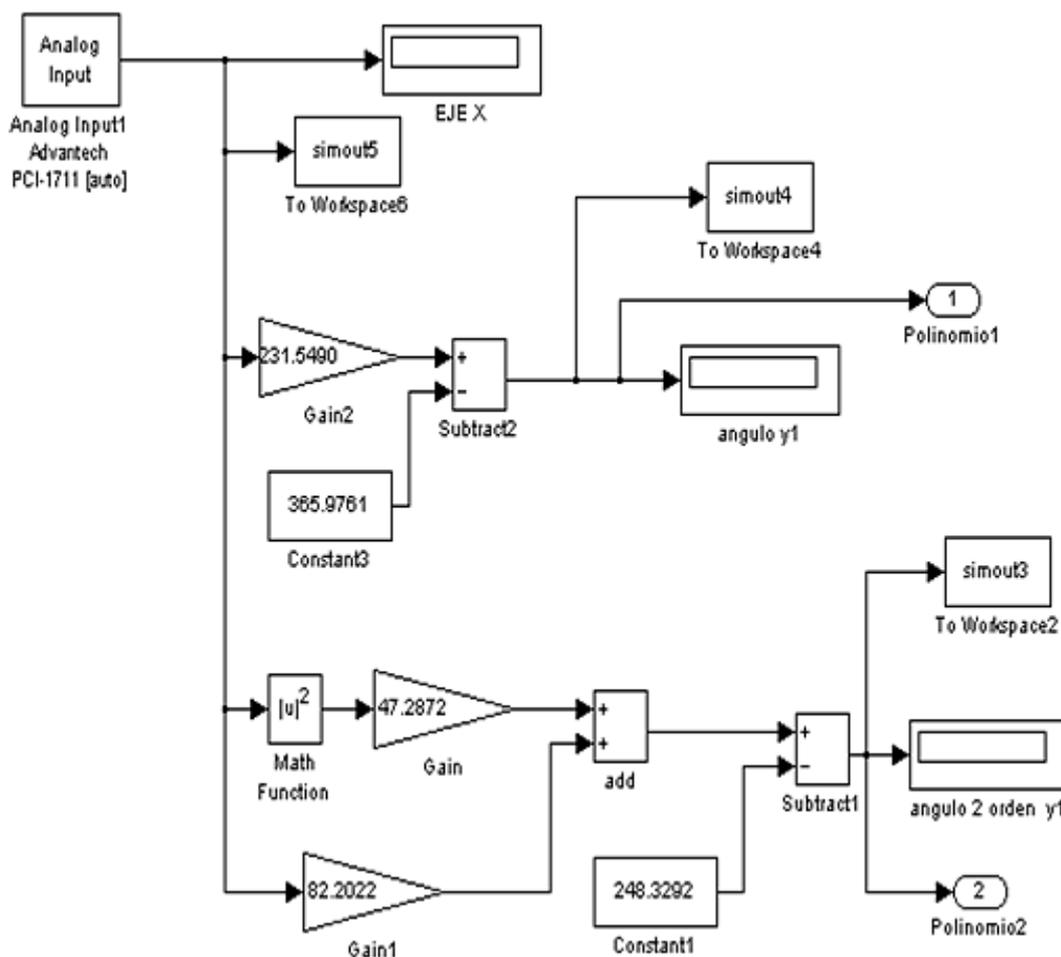


Figura 4.16 Función de transferencia eje X desarrollada en simulink. Función de transferencia de grado N=1.


```

DATOS = xlsread('Dato_acel1');
x=DATOS(:,1);
SIMOUT1=DATOS(:,2);
% (x - SIMOUT1) % Errors
% (x - SIMOUT1).^2 % Squared Error
% mean((x - SIMOUT1).^2) % Mean Squared Error
% RMSE = sqrt(mean((x - SIMOUT1).^2)); % Root Mean Squared Error
error_RMS=sqrt(mean((x-SIMOUT1).^2));
Relative_error=(error_RMS/sqrt(mean x.^2))*100;

```

Figura 4.18 Codificación para calcular porcentaje de error de los ángulos X y Y. Se compara la función lineal del polinomio de primer orden de los datos reales vs simulados.

El porcentaje de error obtenido en referencia al ángulo X y a la función de transferencia con N=1 es de aproximadamente 2.59%, y en referencia al ángulo Y es de 3.058%.

4.3 Obtención del modelo matemático del puente H SparkFun

Para evaluar el modelo matemático del puente H es necesario realizar una programación en MIKROBASIC para obtener el PWM de cada motor y así tratar de mantener una estabilidad entre cada uno con respecto a la plataforma.

Para encontrar la fórmula principal de PWM y duty cycle se realiza lo siguiente:

A través del programa Access Port, se obtienen los valores de PWM cuando su salida varía desde 0.5 VDC a 4.5 VDC en un tiempo de 100 segundos en Simulink.

Tabla 4.4

Valor PWM & Valor Duty cycle

Voltaje Entrada	Valor PWM	Valor Duty Cycle
0.5	25.5268109	127
2.5	128.77244	0
4.5	232.119582	127

Nota: Se observa el valor PWM que se obtiene a partir de un tiempo de 100 segundos en el Access Port.

De lo puntos obtenidos en la tabla 4.4, se desarrollan las ecuaciones a partir de dos puntos cualesquiera de los valores PWM y duty cycle para poder encontrar la gráfica del puente H y saber cómo funciona.

$$Pto1_D = (25.53, 127)$$

$$Pto2_D = (128.77, 0)$$

$$m = \left(\frac{0 - 127}{128.77 - 25.53} \right) = \left(\frac{-127}{103.24} \right)$$

$$Y - Y_1 = m(X - X_1)$$

$$Y - 127 = \frac{-127}{103.24}(X - 25.53)$$

$$Y = \frac{-127}{103.24}(X - 25.53) + 127 \text{ Ecuación 1 (Decrementa)}$$

$$Pto1_I = (232.12, 127)$$

$$Pto2_I = (128.77, 0)$$

$$m = \left(\frac{0 - 127}{128 - 232.12} \right) = \left(\frac{127}{104.12} \right)$$

$$Y - Y_1 = m(X - X_1)$$

$$Y - 127 = \frac{127}{104.12}(X - 232.12)$$

$$Y = \frac{127}{104.12}(X - 232.12) + 127 \text{ Ecuación 2 (Incrementa)}$$

Luego se observa en las figuras 4.19 y 4.20 la programación del pic 16F886 para el puente H y sus respectivas señales de PWM para que cumpla con el respectivo cambio de giro y velocidad de los motores reductores DC.

4.3.1 Programación del puente H SparkFun.

```

program PUENTE
'////////////////////////////////////
  SYMBOL DIR1= PORTB.6 '// MOTOR 2 PINES DE DIRECCIONES - CAMBIO DE GIRO
  SYMBOL NIR1= PORTB.7
'////////////////////////////////////
  SYMBOL DIR2=PORTC.3 '// MOTOR 1 PINES DE DIRECCIONES - CAMBIO DE
  GIRO
  SYMBOL NIR2=PORTC.4
'////////////////////////////////////
  DIM ADC1 AS WORD  '// VARIABLE DE LA LECTURA ANALÓGICA MOTOR 1
  DIM ADC2 AS WORD  '// VARIABLE DE LA LECTURA ANALÓGICA MOTOR 2
'////////////////////////////////////
  DIM VALOR AS WORD '// VARIABLE DE PWM MOTOR 1
  DIM VALOR1 AS WORD '// VARIABLE DE PWM MOTOR 2
main:
' Main program
OSCCON = 0X75
' Oscilador interno de 8mhz
' Registro PUERTO A
TRISA = 0X00 ' PORTA.0 Entrada
PORTA = 0X00
' Registro PUERTO B
TRISB = %00000101 ' PORTB salidas
PORTB = 0X00
' Registro PUERTO C
TRISC = 0X00 ' PORTC salidas
PORTC = 0X00
' Registro PUERTO E
TRISE = 0X00 ' PORTE como salidas digital
PORTE = 0X00' Selección de registro analógico. 1 analógico, 0 digitales
ANSEL = %00000000 ' AN<7:0>
ANSELH =%00010001 ' AN<13:8>
'// SE UTILIZA LOS DOS ADC AN12(MOTOR 2) - AN8(MOTOR1)
PWM1_Init(1750) '// FRECUENCIA DE TRABAJO DEL PWM
PWM1_Start()  '//PWM PARA EL MOTOR 2
PWM2_Init(1750) '// FRECUENCIA DE TRABAJO DEL PWM
PWM2_Start()  '//PWM PARA EL MOTOR
WHILE(1)
ADC1 = Adc_Read(8)>> 2
'MOTOR 1 ENTRADA ANALOGICA DEL PIN 58 EN MATLAB (PCI)
ADC2 = Adc_Read(12)>> 2
'MOTOR 2 ENTRADA ANALOGICA DEL PIN 24 EN MATLAB (PCI)
IF(ADC1>=16) AND(ADC1<136) THEN  '// CONDICIONES PARA EL MOTOR 1
  VALOR=(127-((127/103)*(ADC1-26)))-(1400/100)  '15 1445 1448 (5/10)
  PWM2_Set_Duty(VALOR)'(70)
  DIR2=0
  NIR2=1
END IF

```

Figura 4.19 Programación del PIC 16f886. Programa en MIKRO BASIC declaración de entradas y salidas, lecturas analógicas y salidas PWM.

```

IF(ADC1>136) AND(ADC1<=240) THEN
VALOR=((12732/100)+((127/104)*(ADC1-232)))-(1500/100) ' (5/10) '12732/100
PWM2_Set_Duty(VALOR)'(80)
DIR2=1
NIR2=0
END IF
IF(ADC1 < 16) THEN
PWM2_SET_DUTY(0)
DIR2=0
NIR2=0
END IF
IF (ADC1>240) THEN
PWM2_SET_DUTY(0)
DIR2=0 NIR2=0
END IF
/////////////////////////////////////////////////////////////////
IF(ADC2>=16) AND(ADC2<136) THEN  '// CONDICIONES PARA EL MOTOR 2
VALOR1=(127-((127/103)*(ADC2-26)))-(1450/100) '15 1445 1448 (5/10)
PWM1_Set_Duty(VALOR1) ' 82
DIR1=0
NIR1=1
END IF
IF(ADC2>136) AND(ADC2<=240) THEN
VALOR1=((12732/100)+((127/104)*(ADC2-232)))-(1400/100) ' (5/10) '12732/100 '127/104 '232
PWM1_Set_Duty(VALOR1)'80
DIR1=1
NIR1=0
END IF
IF(ADC2 < 16) THEN
PWM1_SET_DUTY(0)
DIR1=0
NIR1=0
END IF
IF (ADC2>240) THEN
PWM1_SET_DUTY(0)
DIR1=0
NIR1=0
END IF
/////////////////////////////////////////////////////////////////
WEND
END.

```

Figura 4.20 Programación del PIC 16F886. Lazos de comparación.

Tabla 4.5

Medición Voltaje Entrada vs Voltaje Salida del Puente H

Voltaje de Entrada	Voltaje de Salida
0,5	-4,6013
1	-3,5735
1,5	-2,552
2	-1,5694
2,5	-0,5335
3	1,6026
3,5	2,5681
4	3,5958
4,5	4,5974

Nota: Voltaje de salida del puente h conectado a las entradas digitales de la tarjeta de

adquisición de datos obtenidos a través de una salida analógica desde simulink que varía desde 0.5 y 4.5 VDC.

```
data=xlread('voltaje_in_out'); %se importa el archivo de excel y se asigna a la variable data
x=data(:,1);%los datos de la columna 1 (voltaje entrada)
y=data(:,2);%los datos de la columna 2(voltaje salida)
figure(1) %nombre de la gráfica
plot(x,y) %muestra la gráfica con las variables asignadas
xlabel('Voltaje de entrada') %asigna legenda
ylabel('Voltaje de salida') %asigna legenda
```

Figura 4.21 Líneas de códigos para graficar comportamiento puente H. Codificación con relación al voltaje de salida y entrada del puente H.

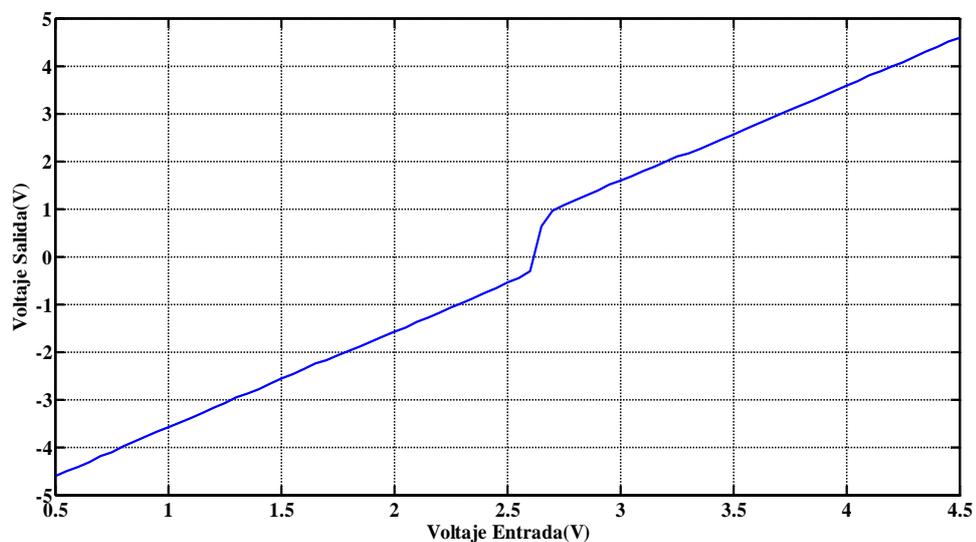


Figura 4.22: Comportamiento puente H. Relación entre voltaje salida vs voltaje entrada del puente H.

Como se pudo observar en la gráfica 4.22 el comportamiento del puente H no es totalmente simétrica, esto se debe a que la fórmula general utilizada para la señal PWM requiere una mayor resolución de PWM, por tal motivo se omite información o decimales.

4.4 Programación de encoder de motores de 12VDC

La programación de los encoders de los motores reductores de 12VDC se desarrolla en el programa CCS y es cargado en el Pic 18f6722 a través del software PickIt 2.

La programación requerida para el funcionamiento de los motores con los encoders, los cuales permitirán el movimiento angular de la plataforma se encuentra en los anexos 2 y 3.

4.5 Obtención del modelo matemático de los motores reductores de 12VDC.

El motor reductor es un motor DC, que tiene acoplado un sistema de engranajes que reducirá la velocidad en el eje de salida. Por lo tanto se realiza un análisis por separado, para poder analizar el motor.

Para encontrar el modelo matemático de los motores reductores se necesita encontrar los parámetros indicados en (Quijano & Hernández, 2009).

Se debe considerar que se van a obtener valores para motor 1 y motor 2 con un voltaje de entrada de 0 a 12VDC.

Primero se debe de calcular la resistencia y la inductancia de armadura; para encontrar la resistencia de armadura es necesario medir la corriente de armadura y para ello se necesita introducir un voltaje mínimo antes de que el motor se mueva, en el caso del motor 1 se trabaja con un voltaje de 0,9 VDC.

Tabla 4.6

Corriente de armadura para motor 1

Amperaje
0,091
0,087
0,085
0,084
0,084
0,083
0,083
0,082
0,083
0,082
0,083
0,07
0,08525

Nota: Se obtiene un promedio de amperaje de la corriente de armadura.

$$Ra = \frac{V}{Ia} = 3,29670329\Omega \text{ Ecuación resistencia de armadura}$$

Donde Ra= Resistencia de armadura

Ia= Corriente de armadura

V= Voltaje

La frecuencia se la mide utilizando el módulo NI Elvis (National Instruments).

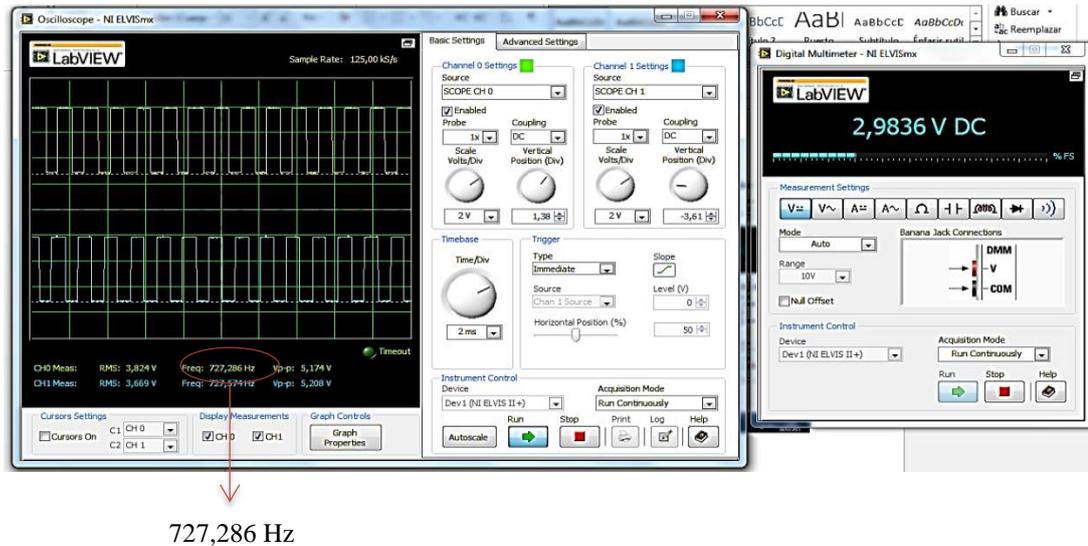


Figura 4.23: Frecuencia a 3VDC. Se obtiene una frecuencia de 727,286 Hz.

Tabla 4.7

Frecuencias medidas de 0VDC a 12VDC

Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)
0	0
1	398,136
2	482,843
3	727,286
4	981,279
5	1248
6	1498
7	1793
8	2043
9	2326
10	2588
11	2802
12	3041

Nota: Se obtiene el valor de la frecuencia medida en Herz con respecto al voltaje de entrada comprendido entre 0VDC a 12VDC.

Luego se procede a encontrar la velocidad angular con relación al sistema de engranajes que tiene el motor reductor dc pololu, para ello es necesario recordar que mediante contando tanto los flancos ascendentes y descendentes tanto de las salidas A y B, es posible obtener 64 conteos por revolución del eje del motor. El uso de un

solo borde de un solo canal da como resultado 16 recuentos por revolución del eje del motor, por lo que la frecuencia de una salida en un osciloscopio es 16 veces la frecuencia de rotación del motor: (*Robotis & Electronics Pololu, 2015*)

Relación de engranajes: 131.25

Recuentos por revolución: 16

Ppr=131.25*16=2100ppr

$$\omega = 2\pi * \frac{frec}{ppr} \text{ Ecuación velocidad angular}$$

Tabla 4.8

Velocidad Angular medida para entrada de voltaje desde 0VDC a 12VDC para motor 1

Voltaje (V)	ω (rad/seg)
0	-
1	1,19
2	1,44
3	2,18
4	2,94
5	3,73
6	4,48
7	5,36
8	6,11
9	6,96
10	7,74
11	8,38
12	9,10

Nota: Se obtiene el valor de la velocidad angular (ω) medida en radianes/segundos con respecto al voltaje de entrada comprendido entre 0VDC a 12VDC.

La constante de la fuerza contra electromotriz “kb” se mide en (V*seg/rad) de la siguiente manera:

$$kb = \frac{(V - (Ra * Ia))}{\omega} \text{ Ecuación de la constante de la fuerza contra electromotriz}$$

Tabla 4.9

Constante de la fuerza contra electromotriz medidas de 0VDC a 12VDC para motor 1

Voltaje (V)	kb (V*seg/rad)
0	-
1	0,58763279
2	1,18587308
3	1,24987911
4	1,26808665
5	1,26488156
6	1,27763645
7	1,25383424
8	1,26453843
9	1,25390178
10	1,25653121
11	1,27945264
12	1,29351385
Promedio	1,2030

Nota: Se obtiene la constante de fuerza contra electromotriz (kb) medida en voltios*segundos/radianes con respecto al voltaje de entrada comprendido entre 0VDC a 12VDC.

La constante del par electromagnético (ki) es igual al promedio de la constante de la fuerza contra electromotriz (kb).

$$kb = ki \text{ Constante de par electromagnético}$$

$$ki = 1,08(N * m / A)$$

Luego se calcula la constante de fricción viscosa (b) que es igual a la constante de la fuerza contra electromotriz (kb) por la corriente de armadura (Ia) dividido para la velocidad angular (ω).

$$b = (kb * Ia) / \omega \text{ Ecuación de la constante de fricción viscosa}$$

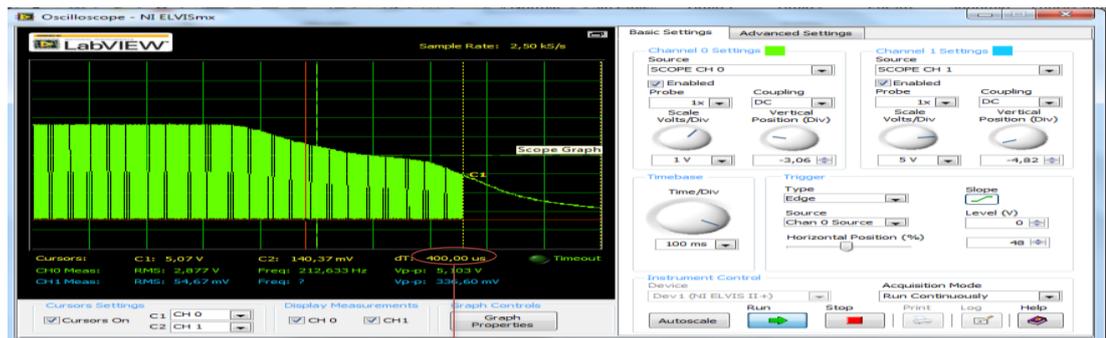
Tabla 4.10

Constante de la fricción viscosa para voltajes entre 0 VDC a 12 VDC para motor 1

Voltaje (v)	b (N*m*seg/rad)
0	-
1	0,0448906
2	0,07141525
3	0,04882263
4	0,03628066
5	0,0284547
6	0,02365991
7	0,01939891
8	0,01696356
9	0,01495448
10	0,01330645
11	0,012667
12	0,00995158
Promedio	0,028397

Nota: En la tabla 4.10 se obtiene la constante de fricción viscosa (b) medida en Newton*metro*segundos/radianes con respecto al voltaje de entrada comprendido entre 0VDC a 12VDC.

Tao (τ) o constante de tiempo de un circuito en segundos es el tiempo en que la corriente del inductor está siendo descargada mientras se haya retirado el voltaje de entrada al motor.



0,056 seg

Figura 4.24: Tao (τ) a 1 VDC para motor 1. Se obtiene una constante de tiempo de 0,056 seg.

Como se observa en la Figura 4.23 la medición del Tao(τ) en 1VDC, se continua realizando las mediciones para los otros voltajes de 0VDC a 12VDC.

Tabla 4.11**Constante de tiempo τ (seg) medido de 0VDC a 12VDC para motor 1**

Voltaje (v)	Tao τ (seg.)
0	-
1	0,056
2	0,058
3	0,06
4	0,064
5	0,064
6	0,063
7	0,065
8	0,070
9	0,067
10	0,069
11	0,068
12	0,066
Promedio	0,064

Nota: La constante de tiempo de un circuito (τ) se obtiene con respecto al voltaje de entrada comprendido entre 0VDC a 12VDC.

Para encontrar el momento de inercia de los motores 1 y 2 es necesario multiplicar la constante de fricción viscosa (b) y la constante de tiempo o tao (τ).

$$J = B(N * m * s / rad) * \tau (seg) \text{ Ecuación de Inercia del motor}$$

Tabla 4.12**Inercia (J) medido para entrada de voltaje 0 VDC a 12 VDC para motor 1**

Voltaje (V)	Inercia J (Kg*m ²)
0	-
1	0,002513873
2	0,004604566
3	0,002929358
4	0,002321962
5	0,001922766
6	0,001643642
7	0,001492206
8	0,001187449
9	0,000998959
10	0,00099416
11	0,000911841
12	0,000812427
Promedio	0,001861101

Nota: Se obtiene la inercia J con respecto al voltaje de entrada comprendido entre 0 VDC a 12 VDC.

Tabla 4.13

Parámetros encontrados del motor 1

VA (Volt)	RA (Ohm)	IA (Amp)	Frec (Hz)	W(rad/s)	kb	b	TAO K (seg)	J
1	3,29670329	0,091	398,136	1,19	0,58763279	0,0448906	0,056	0,002513873
2	3,29670329	0,099	482,843	1,44	1,15848922	0,07938906	0,058	0,004604566
3	3,29670329	0,085	727,286	2,18	1,24987911	0,04882263	0,06	0,002929358
4	3,29670329	0,084	981,279	2,94	1,26808665	0,03628066	0,064	0,002321962
5	3,29670329	0,089	1248	3,73	1,26046713	0,03004321	0,064	0,001922766
6	3,29670329	0,092	1498	4,48	1,27101657	0,02608955	0,063	0,001643642
7	3,29670329	0,099	1793	5,36	1,24400185	0,02295701	0,065	0,001492206
8	3,29670329	0,082	2043	6,11	1,26453843	0,01696356	0,070	0,001187449
9	3,29670329	0,083	2326	6,96	1,25390178	0,01495448	0,067	0,000998959
10	3,29670329	0,089	2588	7,74	1,25355096	0,01440811	0,069	0,00099416
11	3,29670329	0,088	2802	8,38	1,27748647	0,01340943	0,068	0,000911841
12	3,29670329	0,087	3041	9,10	1,28735426	0,0123095	0,066	0,000812427
		PROMEDIO:			1,1980	0,030043	0,064	0,001861101

$$ki = 1,1980$$

Nota: Se observan los valores encontrados para aplicar al modelo matemático con respecto al motor 1 en simulink.

Se procede a calcular los parámetros del segundo motor empezando por calcular la resistencia y la inductancia de armadura; para encontrar la resistencia de armadura es necesario medir la corriente de armadura y para ello se necesita introducir un voltaje mínimo antes de que el motor se mueva, en el caso del motor 2 se trabaja con un voltaje de 0,9 VDC.

Tabla 4.14

Corriente de Armadura para motor 2

Amperaje
0,155
0,15
0,161
0,16
0,163
0,168
0,174
0,162
0,161
0,163
0,161
0,162

Nota: Se obtiene un promedio de amperaje de la corriente de armadura.

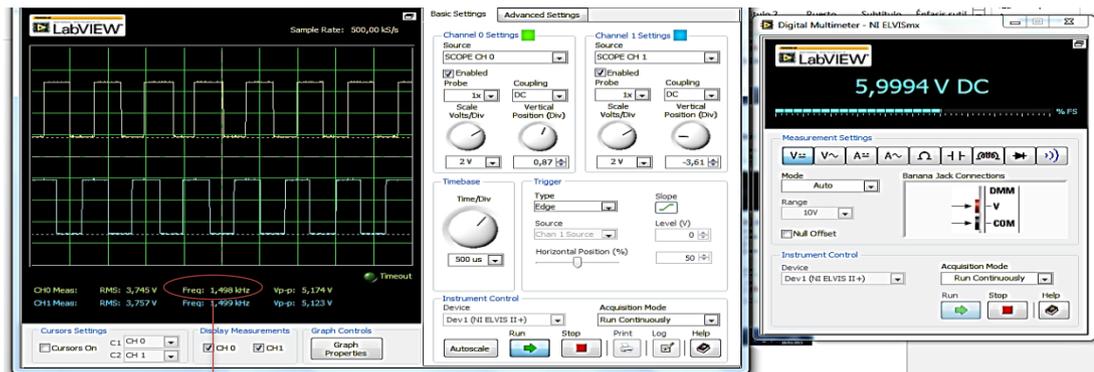
$$Ra = \frac{V}{Ia} = 5,50645161\Omega \text{ Ecuación resistencia de armadura}$$

Donde Ra= Resistencia de armadura

Ia= Corriente de armadura

V= Voltaje

La frecuencia se la mide utilizando el módulo NI Elvis (National Instruments).



1563 Hz

Figura 4.25: Frecuencia a 6VDC para motor 2. Se obtiene una frecuencia de 1563 Hz

De la misma manera se mide la frecuencia con los otros voltajes desde 1 VDC a 12 VDC.

Tabla 4.15

Frecuencias medidas de 0VDC a 12VDC para motor 2

Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)
0	-
1	450,59
2	629,867
3	763,86
4	1015
5	1287
6	1563
7	1823
8	2105
9	2386
10	2651
11	2935
12	3206

Nota: Se obtiene el valor de la frecuencia medida en Herz con respecto al voltaje de entrada comprendido entre 0VDC a 12VDC.

Luego se procede a encontrar la velocidad angular ω con relación al sistema de engranajes que tiene el motor reductor dc pololu, para ello es necesario recordar que mediante contando tanto los flancos ascendentes y descendentes tanto de las salidas

A y B, es posible obtener 64 conteos por revolución del eje del motor. El uso de un solo borde de un solo canal da como resultado 16 recuentos por revolución del eje del motor, por lo que la frecuencia de una salida en un osciloscopio es 16 veces la frecuencia de rotación del motor. (*Robotis & Electronics Pololu, 2015*)

Relación de engranajes: 131.25

Recuentos por revolución: 16

ppr=131.25*16=2100

$$\omega = 2\pi * \frac{frec}{ppr} \text{ Ecuación velocidad angular}$$

Tabla 4.16

Velocidad Angular medidas de 0VDC a 12VDC para motor 2

Voltaje (V)	ω (rad/seg)
0	-
1	0,38
2	1,88
3	2,29
4	3,04
5	3,85
6	4,68
7	5,45
8	6,30
9	7,14
10	7,93
11	8,78
12	9,59

Nota: En la tabla 4.16 se obtiene el valor de la velocidad angular (ω) medida en radianes/segundos con respecto al voltaje de entrada comprendido entre 0VDC a 12VDC.

La constante de la fuerza contra electromotriz “kb” se mide en (V*seg/rad) de la siguiente manera:

$$kb = \frac{(V - (Ra * Ia))}{\omega} \text{ Ecuación de la constante de la fuerza contra electromotriz}$$

Tabla 4.17

Constante de la fuerza contra electromotriz medidas de 0VDC a 12VDC para motor 2

Voltaje (V)	kb (V*seg/rad)
0	-
1	0,83
2	0,72
3	0,99
4	1,05
5	1,07
6	1,08
7	1,10
8	1,11
9	1,11
10	1,12
11	1,12
12	1,13
Promedio	1,06

Nota: Se obtiene la constante de fuerza contra electromotriz (kb) medida en voltios*segundos/radianes con respecto al voltaje de entrada comprendido entre 0VDC a 12VDC.

La constante del par electromagnético (ki) es igual al promedio de la constante de la fuerza contra electromotriz (kb)

La constante del par electromagnético (ki) es igual al promedio de la constante de la fuerza contra electromotriz (kb).

$$kb = ki \text{ Constante de par electromagnético}$$

$$ki = 1,06(N * m / A)$$

Luego se calcula la constante de fricción viscosa (b) que es igual a la constante de la fuerza contra electromotriz (kb) por la corriente de armadura (Ia) dividido para la velocidad angular (ω).

$$b = (kb * Ia) / \omega \text{ Ecuación de la constante de fricción viscosa}$$

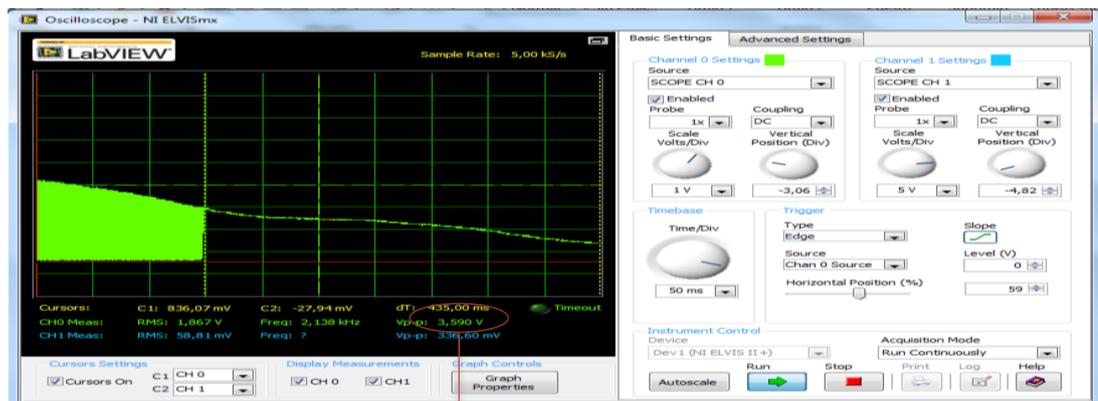
Tabla 4.18

Constante de la fricción viscosa medidas de 0VDC a 12VDC para motor

Voltaje (v)	b (N*m*seg/rad)
0	-
1	0,0720038
2	0,04787992
3	0,06239216
4	0,05415773
5	0,0471313
6	0,04218235
7	0,03900438
8	0,03562534
9	0,03292582
10	0,03127839
11	0,02862299
12	0,02757681
Promedio	0,040798

Nota: Se obtiene la constante de fricción viscosa (b) medida en Newton*metro*segundos/radianes con respecto al voltaje de entrada comprendido entre 0VDC a 12VDC.

Tao (τ) o constante de tiempo de un circuito en segundos es el tiempo en que la corriente del inductor está siendo descargada mientras se haya retirado el voltaje de entrada al motor.



0,068 seg

Figura 4.26: Tao (τ) a 12VDC para motor 2. Se obtiene una constante de tiempo de 0,068 seg.

Tabla 4.19**Constante de tiempo τ (seg) medido desde 0VDC a 12VDC para motor 2.**

Voltaje (v)	Tao τ (seg.)
0	-
1	0,058
2	0,062
3	0,0612
4	0,062
5	0,063
6	0,064
7	0,064
8	0,068
9	0,072
10	0,064
11	0,068
12	0,068
Promedio	0,065

Nota: Se obtiene la constante de tiempo de un circuito Tao (τ) con respecto al voltaje de entrada comprendido entre 0VDC a 12VDC.

Para encontrar la inercia de los motores 1 y 2 es necesario multiplicar la constante de fricción viscosa (b) y la constante de tiempo o tao (τ).

$$J = b(N*m*s / rad) * \tau(seg) \text{ Ecuación de Inercia del motor}$$

Tabla 4.20**Momento de Inercia (J) medido de 0VDC a 12VDC para motor 2**

Voltaje (v)	Inercia J (Kg*m ²)
0	-
1	0,064
2	0,0030
3	0,0038
4	0,0034
5	0,0030
6	0,0027
7	0,0025
8	0,0024
9	0,0024
10	0,0020
11	0,0019
12	0,0019
Promedio	0,0026

Nota: Se obtiene la inercia (J) con respecto al voltaje de entrada comprendido entre 0VDC a 12VDC.

Tabla 4.21

Parámetros encontrados del motor 2

VA (Volt)	RA (Ohm)	IA (Amp)	Frec (Hz)	W(rad/s)	kb	b	TAO K (seg)	J	
1	5,11690909	0,101	450,59	0,38	0,83	0,0720038	0,058	0,064	
2	5,11690909	0,125	629,867	1,88	0,72	0,04787992	0,062	0,0030	
3	5,11690909	0,144	763,86	2,29	0,99	0,06239216	0,0612	0,0038	
4	5,11690909	0,156	1015	3,04	1,05	0,05415773	0,062	0,0034	
5	5,11690909	0,169	1287	3,85	1,07	0,0471313	0,063	0,0030	
6	5,11690909	0,182	1563	4,68	1,08	0,04218235	0,064	0,0027	
7	5,11690909	0,193	1823	5,45	1,10	0,03900438	0,064	0,0025	
8	5,11690909	0,203	2105	6,30	1,11	0,03562534	0,068	0,0024	
9	5,11690909	0,212	2386	7,14	1,11	0,03292582	0,072	0,0024	
10	5,11690909	0,222	2651	7,93	1,12	0,03127839	0,064	0,0020	
11	5,11690909	0,224	2935	8,78	1,12	0,02862299	0,068	0,0019	
12	5,11690909	0,235	3206	9,59	1,13	0,02757681	0,068	0,0019	
PROMEDIO:							1,06	0,040798	0,0026

ki= 1,06

Nota: Se observan los valores encontrados para aplicar al modelo matemático con respecto al motor 2 en simulink.

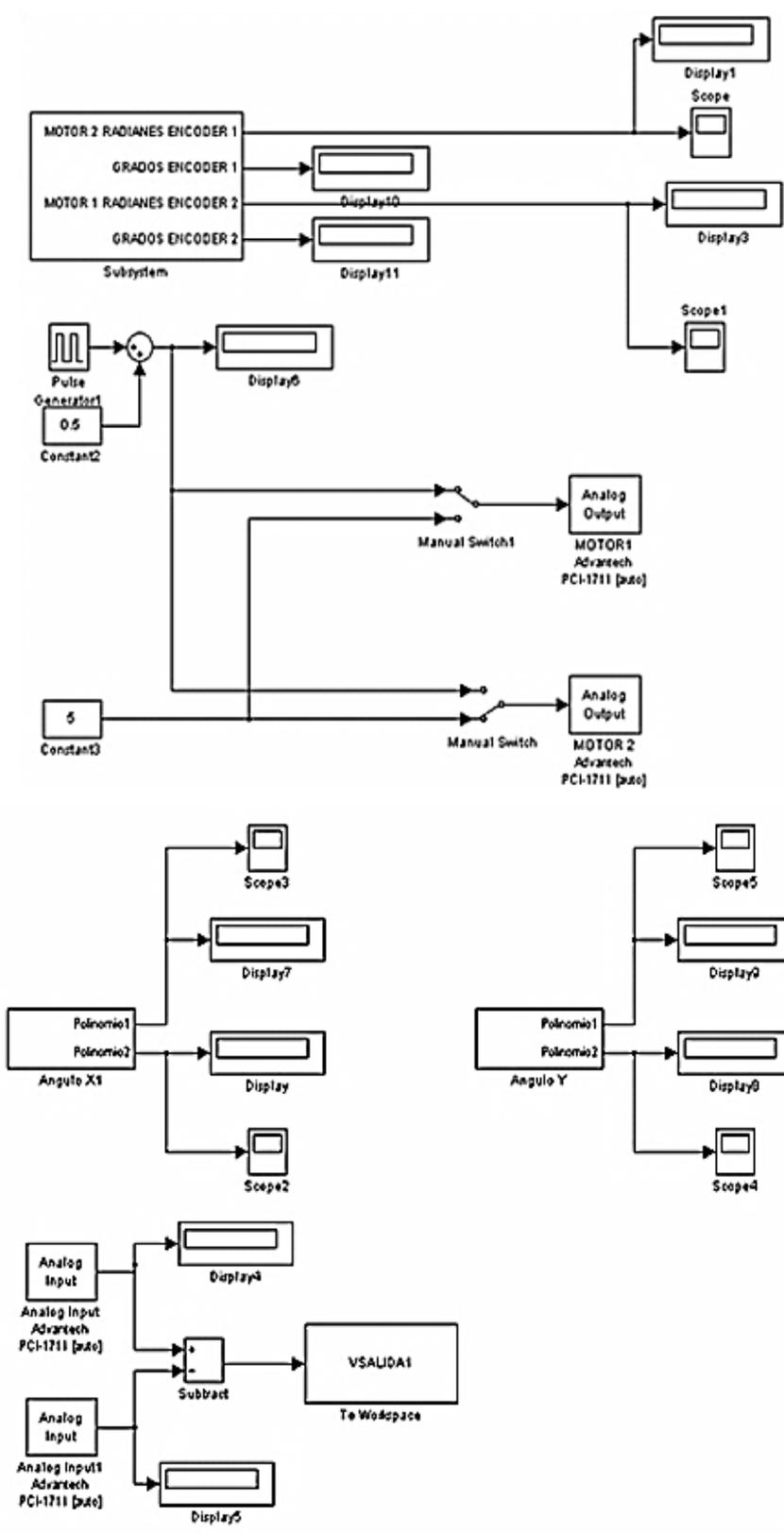


Figura 4.27: Modelo Real Motor 1 y Motor 2. A través de los displays se muestra los radianes de cada motor con sus respectivos grados en la posición que se encuentre la plataforma.

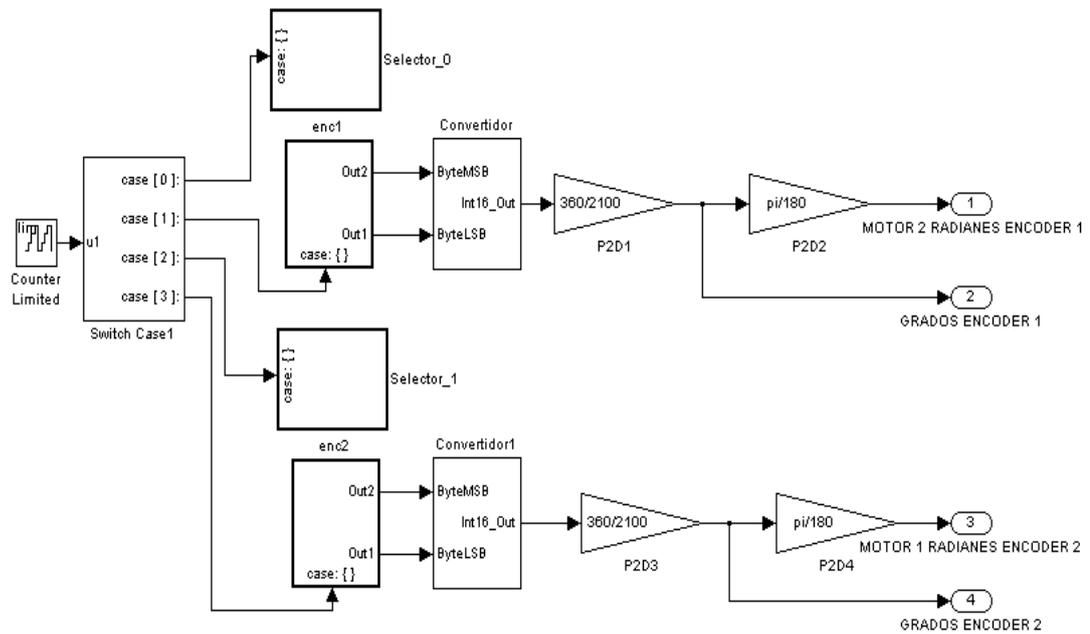


Figura 4.28: Subsistema modelo real Motor 1 y Motor 2. Se visualizan los diferentes casos para poder obtener los resultados en radianes y grados en que se encuentre la plataforma con respecto a los encoder de los motores.

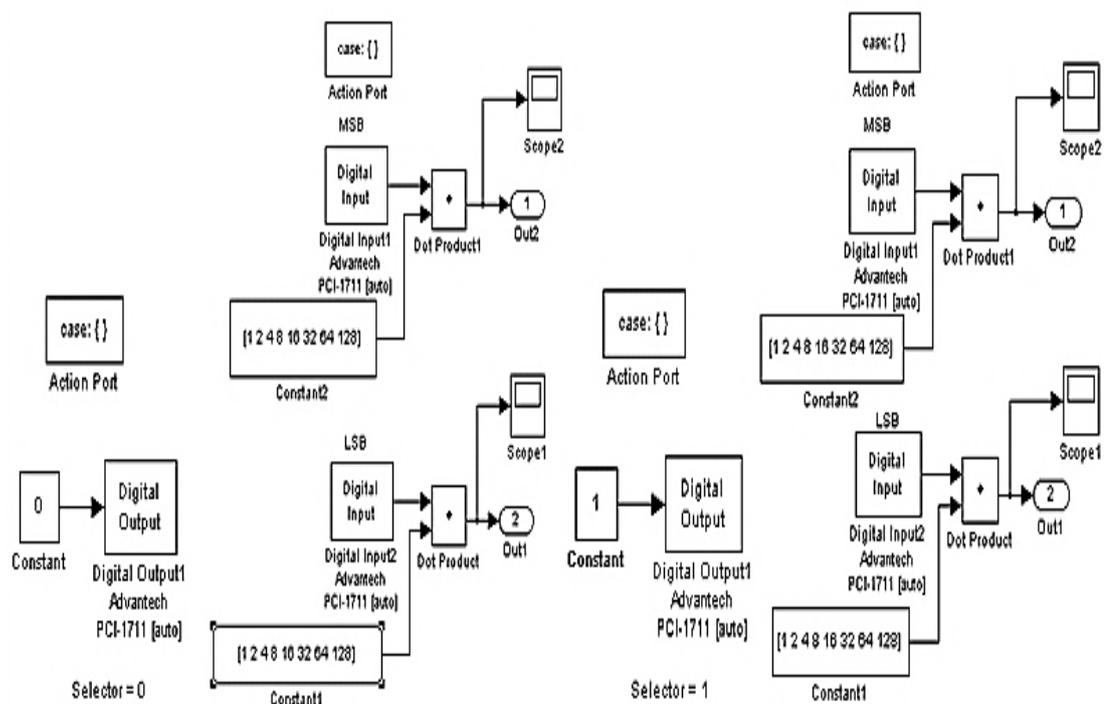


Figura 4.29: Casos para modelo motor 1 y motor 2. Se visualizan las condiciones con la multiplexación de 16 bits que se utiliza para cada encoder independiente.

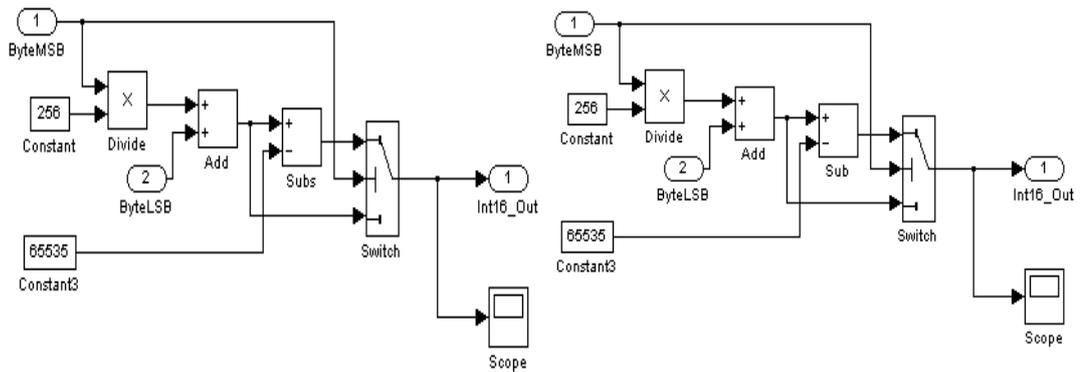


Figura 4.30 Multiplexación de 16 bits. Se observa las condiciones de multiplexación para cada encoder de los motores 1 y 2.

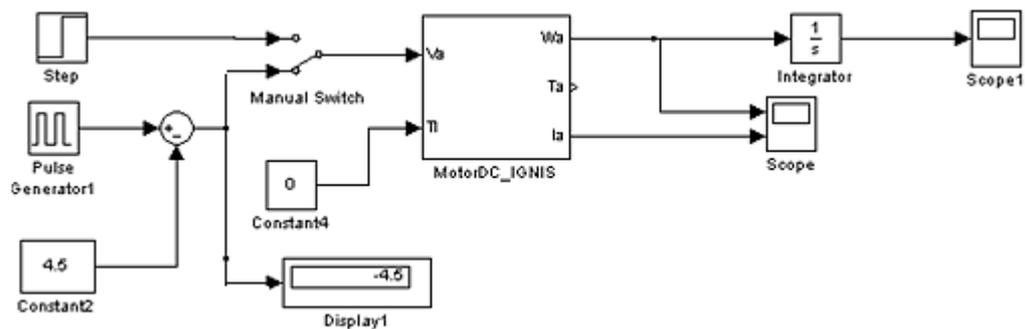


Figura 4.31 Modelo Simulado. Se cargan los datos finales al modelo simulado para realizar la comparación con el modelo real.

Para la comparación de ambos modelos, es necesario de realizar lo siguiente:

1. Se conecta la salida de la tarjeta del Puente h a las entradas analógicas 33 y 34 de la tarjeta PCI-1711.
2. A la salida analógica del modelo real enviar una constante de 0.5 a 4.5 VDC, y a través de la diferencia de voltajes capturar 2000 datos y guardarlos con el comando Simout y seguido se obtiene el promedio con MEAN (vsalida2).
 4.0250 (motor 1) \leftarrow 0.5 VDC \rightarrow -4.1849 (motor2).
 -4.1022 (motor 1) \leftarrow 4.5 VDC \rightarrow 4.1730 (motor2).
3. Los valores obtenidos en 0.5 y 4.5 VDC se los carga al modelo simulado.

4.5.1 Comparación modelo real y modelo simulado del motor 1

En la figura 4.32 se puede observar una diferencia entre el modelo real y modelo simulado de la planta, el modelo simulado presenta 3.785 radianes que equivale a

216,92 grados, y el modelo real muestra 3.92 radianes que da como resultado 224,59 grados, y se obtiene un error de 7,67 grados.

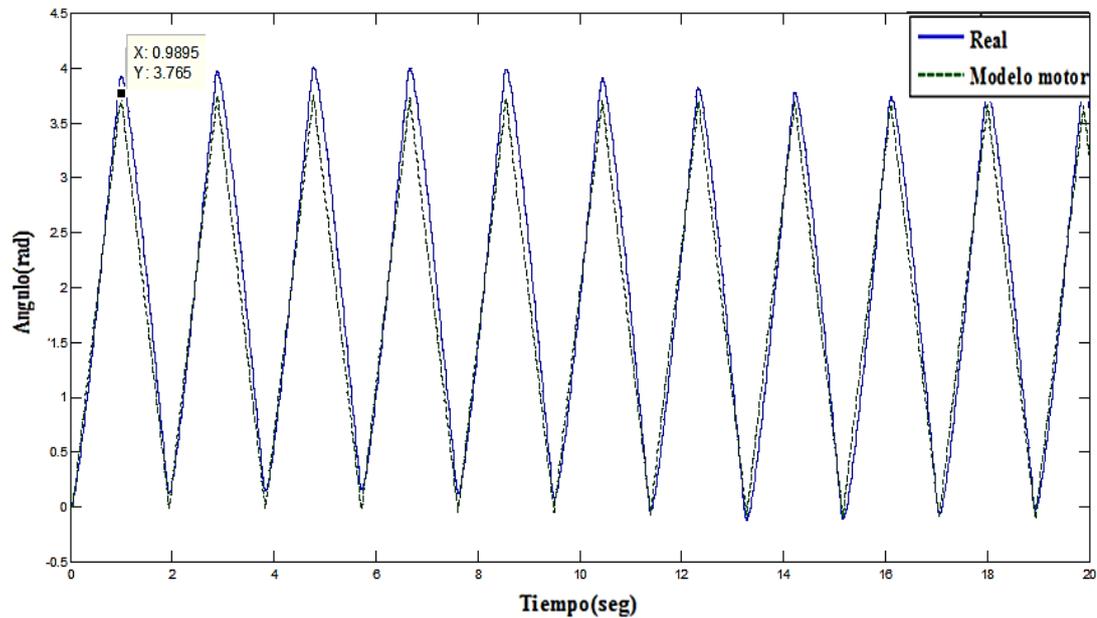


Figura 4.32 Comparación modelo real & simulado del motor 1. Se observa la diferencia de grados entre el modelo real y simulado.

4.5.2 Comparación modelo real y modelo simulado del motor 2

En la figura 4.33 se puede observar una diferencia entre el modelo real y modelo simulado de la planta, el modelo simulado presenta 3.871 radianes que equivale a 221,79 grados, y el modelo real muestra 3.973 radianes que da como resultado 227,63 grados, y se obtiene una diferencia de 5,84 grados.

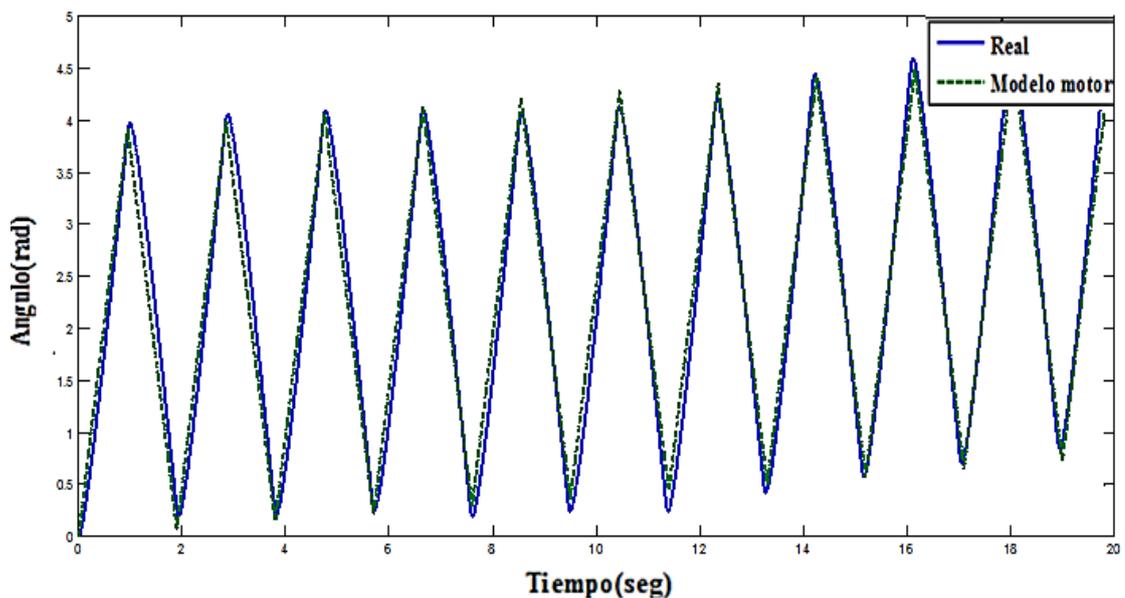


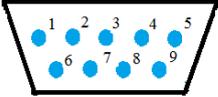
Figura 4.33 Comparación modelo real & simulado del motor 2. Se observa la diferencia de grados entre el modelo real y simulado.

4.6 Obtención de lectura de coordenadas del panel táctico resistivo.

Para la obtención de las coordenadas del panel táctico resistivo se utiliza un convertidor SERIAL/USB para configurar el panel táctico y revisar en el software en que coordenadas se obtienen.

Tabla 4.22

Descripción de los pines del protocolo RS232

			
Tarjeta - Panel Táctico Resistivo		Conector Serial DB-9	
# Pin	Descripción	# Pin	Descripción
1 (Celeste)	Rx	3	Tx
2 (Amarillo)	Tx	2	Rx
3 (Negro)	Gnd	5	Gnd

Nota: Conexión de Pines del puerto del conector del Panel Táctico Resistivo y conector db9.

Se conecta el cable RS232 de la tarjeta controladora del panel de control táctico con el convertidor Serial/Usb para realizar las pruebas correspondientes.



Figura 4.34 Comunicación Serial a USB. Se realiza la conexión RS232 para enlazar el panel resistivo con la PC.

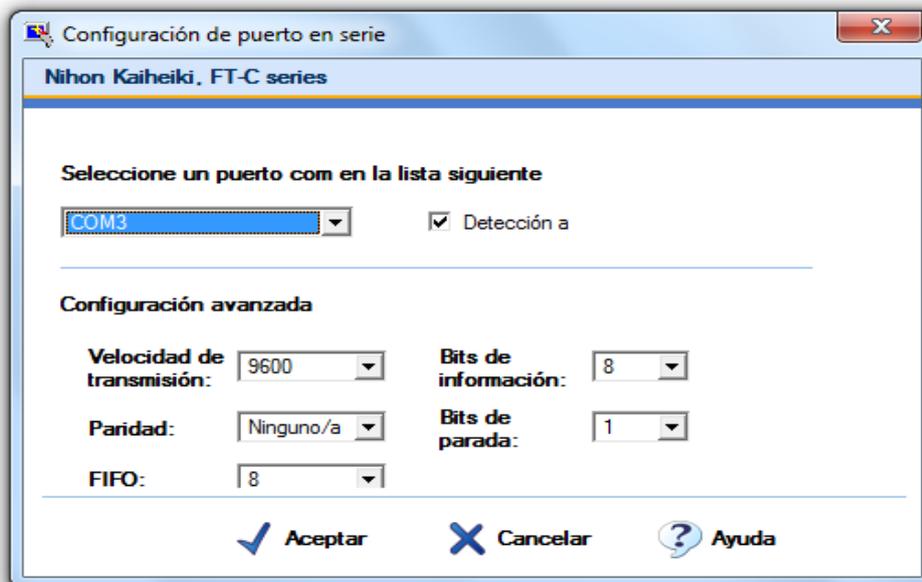
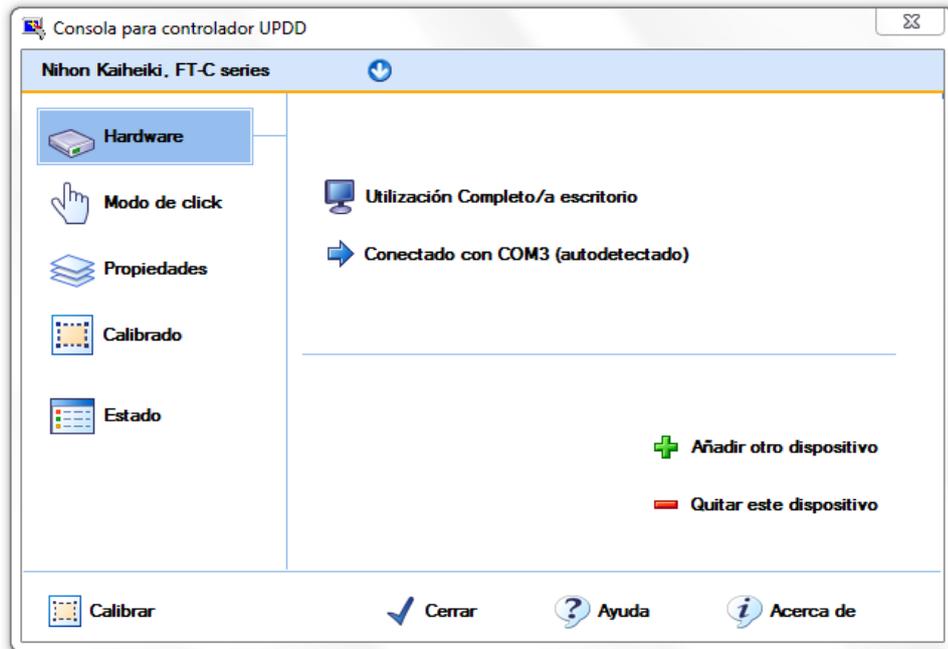


Figura 4.35: Configuración de Panel Táctico. En la Pc se instaló el driver updd_xp_103_A.exe de la tarjeta del panel de control resistivo y se necesita configurar la tarjeta controladora del panel de control táctico (Touch Screen).

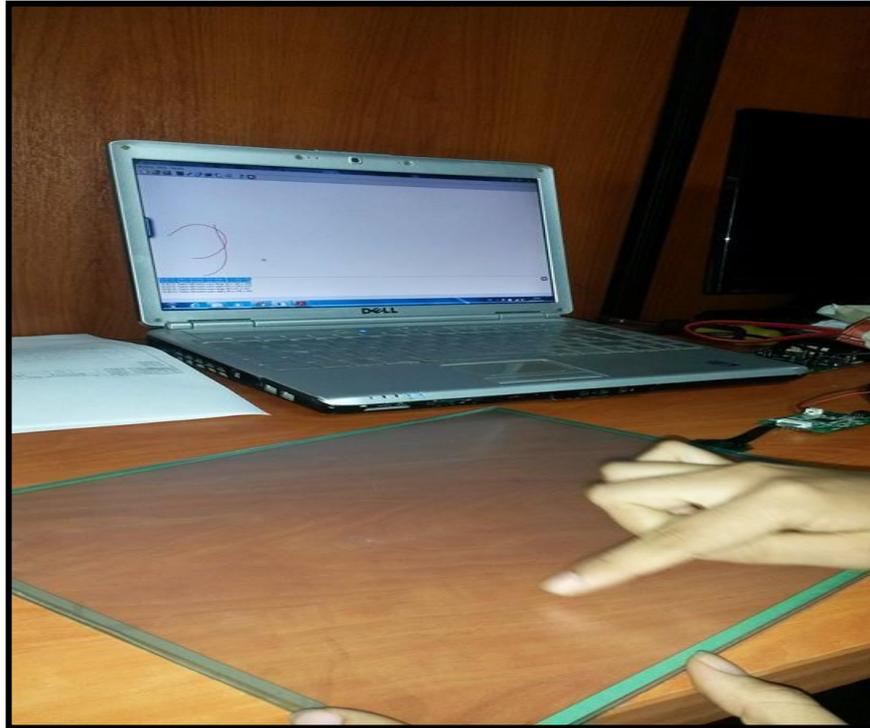


Figura 4.36 Configuración del Panel Táctico Resistivo (Touch Screen).
Seleccionar el puerto con asignado al convertidor USB – SERIAL

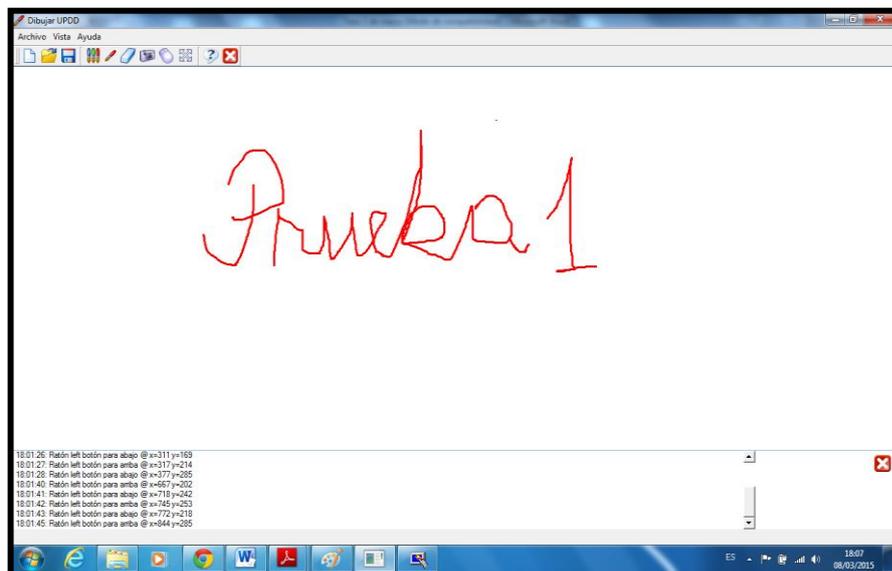


Figura 4.37 Verificación de edición del Panel Táctico en Programa UPD. Se observa las coordenadas en los ejes X y Y.

4.7 Programación Panel Táctico Resistivo

La programación del Panel Táctico Resistivo (Touch Screen) se desarrolló en el programa CCS y se lo carga al Pic 16f866 a través del software PickIt2

```
#include <16f886.h>
#fuses xt,nowdt
#use standard_io(A)
#use standard_io(B)
#use standard_io(C)
#use standard_io(D)
#use delay(internal=8M)
#byte porta=0x05
#byte portb=0x06
#byte portc=0x07
#byte portd=0x08
#byte trisa=0x85
#byte trisb=0x86
#byte trisc=0x87
#byte trisd=0x88
#use rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8)
//#include <stdlib.h>
int dato_recibido[5];
//int flag;
int i=0;
long d1,d2,c1,c2;
long x,y;
#int_rda
void rda()
{
    dato_recibido[i]=getc();
    i++; //flag=1;
}
void main()
{
    trisa=0;
    trisb=0;
    trisc=0b10000000;
    trisd=0;
    portb=0;
    portc=0;
    portd=0;
    dato_recibido[0]=0;
    dato_recibido[1]=0;
    dato_recibido[2]=0;
    dato_recibido[3]=0;
    i=0;
    Port_B_Pullups(FALSE);
    setup_wdt(WDT_OFF);
    setup_adc_ports(NO_ANALOGS|VSS_VDD);
    enable_interrupts(int_rda);
    disable_interrupts(INT_EXT);
```

Figura 4.38 Programación Panel táctil. Se observa las coordenadas en los ejes X y Y.

```

disable_interrupts(INT_RBO);
enable_interrupts(global);

while(true)

{

//if(flag==1)
//{

if(i==5)
{

i=0;
printf("\r");
printf("dato0=%x\r",dato_recibido[0]);
printf("dato1=%x\r",dato_recibido[1]);
printf("dato2=%x\r",dato_recibido[2]);
printf("dato3=%x\r",dato_recibido[3]);
printf("dato4=%x\r",dato_recibido[4]);
printf("\r");

d1=(dato_recibido[0])*(0X000F);
d2=dato_recibido[1];
x=(d2*0XFFF0)+d1;

c1=(dato_recibido[2])*(0X000F);
c2=dato_recibido[3];
y=(c2*0XFFF0)+c1;

printf("datox=%lD\r",(x*(-1)));
printf("datoy=%lD\r",(y*(-1)));

printf("\r");

if (dato_recibido[4]==80)
{

dato_recibido[0]=0x00;
dato_recibido[1]=0x00;
dato_recibido[2]=0x00;
dato_recibido[3]=0x00;

}
}
}
//flag=0;

//}
}

```

Figura 4.39 Programación Panel táctil. Se observa las coordenadas en los ejes X y Y.

4.8 Momentos de Inercia de la plataforma de 2-GDL

4.8.1 Cálculo del momento de Inercia de la carga para el eje X

En el eje x el momento de Inercia Total, será el que ejerce las barras acopladas al eje del motor más el de la plataforma.

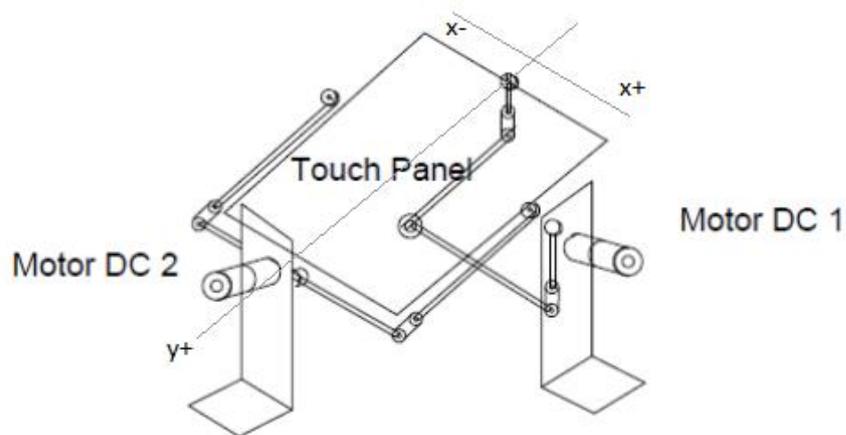
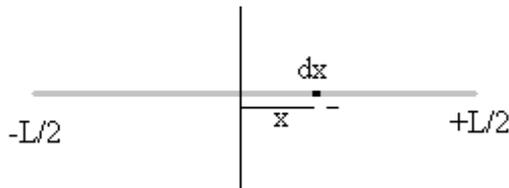


Figura 4.40 Programación Panel táctil. Se observa las coordenadas en los ejes X y Y.

Asumiendo como si el sistema de palancas fuera una sola barra para dificultar la complejidad del mecanismo:

De la barra se tiene



$$I_b = \int r^2 dm$$

$$\rho = \frac{dm}{dx} \rightarrow dm = \rho dx; dx = dr; \rho = \frac{m_b}{L}$$

$$I_b = \rho \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} x^2 dx = \frac{1}{12} m_b L^2$$

Para calcular la inercia de las barras de acero inoxidable, utilizaremos las siguientes ecuaciones. Calculamos la masa de las barras que actúan al eje x, con su respectiva medida. Donde ρ es la densidad del material utilizado, la densidad del aluminio es de 7.93 g/m^3 , tomaremos todas las unidades en kg/m^3 . V es el volumen de la barra o varilla cilíndrica y está dada por la siguiente ecuación $(\pi \times r^2 \times h)$, el diámetro de cada varilla es de 6mm, por ende el radio es de 3mm

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho \times V$$

$$m = \rho \times (\pi \times r^2 \times h)$$

$$m = 7930 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times (\pi \times (0.00300\text{m})^2 \times 0.165\text{m})$$

$$m = 0.00369 \text{ Kg}$$

Luego que obtenemos la masa, sacamos la inercia de las barras que actúan al eje x de acuerdo a su longitud L .

$$I_b = \frac{1}{12} m_b L^2$$

$$I_b = \frac{1}{12} 0.00369 \text{ Kg} \times (0.165\text{m})^2$$

$$I_b = 8.37 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Como son 4 barras de la misma medida tenemos 4 momentos de inercia iguales, valores tomados en cuenta en la inercia total.

Adicional tenemos una barra en la parte posterior que actúa en el eje x de uno de los motores, de medida 16cm, el cual tiene el siguiente momento de inercia

$$I_b = \frac{1}{12} m_b L^2$$

$$I_b = \frac{1}{12} 0.00369 \text{ Kg} \times (0.16\text{m})^2$$

$$I_b = 7.87 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

De igual forma para la plataforma, considerando un movimiento en y nulo se puede demostrar que el sistema queda similar al de la barra, considerando una altura muy pequeña b.

$$I_p = \frac{1}{12} m_p b^2$$

Para calcular la masa de la plataforma con respecto al eje x, tomamos en cuenta la siguiente ecuación, donde σ es la densidad del material utilizado, la densidad del aluminio es 2700 kg/m^3 y V es el volumen de la base del aluminio y está dada por la siguiente ecuación (b x a x c)

$$\sigma = \frac{m}{V}$$

$$m = \sigma \times V$$

$$m = \sigma \times (b \times a \times c)$$

$$m = 2700 \text{ kg/m}^3 \times (0.35 \text{ m} \times 0.28 \text{ m} \times 0.0030 \text{ m})$$

$$m = 0.793 \text{ Kg}$$

Luego que obtenemos la masa, calculamos la inercia de la plataforma

$$I_p = \frac{1}{12} m_p b^2$$

$$I_p = \frac{1}{12} 0.793 \text{ Kg} \times (0.35 \text{ m})^2$$

$$I_p = 8.09 \times 10^{-3} \text{ kg} * \text{ m}^2$$

En resumen tenemos 6 momentos de inercia. 5 de las barras y 1 de la plataforma. Entonces la inercia total de la carga para el eje x será

$$J_{Lx} = I_p + I_b$$

$$J_{Lx} = 8.09 \times 10^{-3} + 7.87 \times 10^{-6} + 8.37 \times 10^{-6} + 8.37 \times 10^{-6} + 8.37 \times 10^{-6} + 8.37 \times 10^{-6}$$

$$J_{Lx} = 8.10 \times 10^{-3} \text{ Kg} * \text{ m}^2$$

4.8.2 Cálculo del momento de Inercia de la carga para el eje Y

En este caso se utilizará el teorema de los ejes paralelos o teorema de Steiner porque la plataforma ni la barra acoplada al motor tienen el mismo punto de apoyo cuando se trabaja en el eje X que cuando se trabaja con el eje Y, su punto de apoyo pasa a ser un solo extremo y sus dimensiones y peso se reducen aproximadamente a la mitad.

$$J_{Ly} = I_0 + Mr^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{m_b}{2} + \frac{m_p}{2} \right) \frac{L^2}{4}$$

Calculamos la masa de las barras con la altura de cada una

$$m = \sigma \times V$$

$$m = \sigma \times (\pi \times r^2 \times h)$$

$$m = 7930 \frac{Kg}{m^3} \times (\pi \times (0.00300m)^2 \times 0.13m)$$

$$m = 0.029 Kg$$

Luego calculamos la inercia de las barras con la masa encontrada

$$I_b = \frac{1}{3} \left(\frac{m_b}{2} \right) \frac{L^2}{4}$$

$$I_b = \frac{1}{3} \left(\frac{0.029 Kg}{2} \right) \frac{(0.13m)^2}{4}$$

$$I_b = 9.06 \times 10^{-3} Kg * m^2$$

Como son 4 barras de la misma medida tenemos 4 momentos de inercia iguales.

Adicional tenemos una barra en la parte posterior que actúa en el eje y, de medida 16cm, el cual tiene el siguiente momento de inercia

$$I_b = \frac{1}{3} \left(\frac{m_b}{2} \right) \frac{L^2}{4}$$

$$I_b = \frac{1}{3} \left(\frac{0.029 Kg}{2} \right) \frac{(0.16m)^2}{4}$$

$$I_b = 0.011 Kg * m^2$$

Para calcular la masa de la plataforma con respecto al eje x, tomamos en cuenta la siguiente ecuación, donde ρ es la densidad del material utilizado, V es el volumen de la barra y está dada por la ecuación $V = b \times a \times c$, donde b es la base, a la altura y c espesor de la plataforma.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho \times V$$

$$m = \rho \times (b \times a \times c)$$

$$m = 2700 \text{ Kg} \times 0.35 \times 0.28 \times 0.0030$$

$$m = 0.79 \text{ Kg}$$

Luego que obtenemos la masa, calculamos la inercia de la plataforma

$$I_P = \frac{1}{3} \left(\frac{m_P}{2} \right) \frac{L^2}{4}$$

$$I_P = \frac{1}{3} \left(\frac{0.79 \text{ Kg}}{2} \right) \frac{(0.28 \text{ m})^2}{4}$$

$$I_P = 2.58 \times 10^{-3} \text{ Kg} * \text{m}^2$$

En resumen tenemos 6 momentos de inercia. 5 de las barras y 1 de la plataforma. Entonces la inercia total de la carga para el eje y será

$$J_{Ly} = \frac{1}{3} \left(\frac{m_b}{2} + \frac{m_p}{2} \right) \frac{L^2}{4}$$

$$J_{Ly} = 2.58 \times 10^{-3} + 0.011 + 9.06 \times 10^{-3} + 9.06 \times 10^{-3} + 9.06 \times 10^{-3} + 9.06 \times 10^{-3}$$

$$J_{Ly} = 0.0135 \text{ Kg} * \text{m}^2$$

Para calcular el momento de inercia de toda la plataforma, tomamos en cuenta un corte de la parte con vista frontal de la misma, con un diseño en AutoCAD, con las medidas exactas de nuestra plataforma, las medidas que tomamos son de acuerdo a los ajustes realizados en la misma. Adicional dibujamos los brazos inferiores para la inercia del segundo motor.

CONCLUSIONES

De la plataforma de dos grados de libertad se obtuvo la comparación del modelo real vs simulado con un error de 5,84 grados, esto se debe a que existe un inconveniente con la compensación del puente h debido a que se trabajó con una resolución de PWM de 8 bits y para evitar éste desfase se requiere aumentar la resolución del PWM a 10bits.

Para obtener un buen balance se requiere una correcta distribución de pesos, a su vez colocar el acelerómetro en el centro de la plataforma para que pueda medir sus ángulos con respecto al movimiento de la misma.

Este sistema es de mucha importancia ya que en proyectos futuros, se puede realizar un controlador PID, lógica difusa o cualquier otro, en el que gracias a un panel resistivo táctico que se encuentra encima de la plataforma tenga la facilidad de sensar trayectorias de una carga útil a través de su controlador para que ésta se auto-estabilice satisfactoriamente.

RECOMENDACIONES

Para la ejecución del sistema, es necesario revisar que las entradas y salidas digitales o analógicas de la plataforma se encuentren asignadas a la tarjeta de adquisición de datos PCI-1711 y verificar sus respectivos canales que se encuentren establecidos en el pin exacto en el caso que ésta no funcione.

Mejorar la tarjeta de circuito impreso PCB con microcontroladores de mayor gama como ATMEL para obtener una mejor resolución en las programaciones.

Se recomienda dar mantenimiento o limpieza al sistema debido a que está construido de aluminio cromado y acero inoxidable para una mejor presentación estética, también a los motores para que la variación de los parámetros de los motores no sufra una degradación muy rápida y no haya efecto en su comparación.

Se debe tener cuidado con la alimentación de poder para cada componente de la plataforma ya que el puente h SparkFun, los dos motores Pololu, la tarjeta de circuito impreso trabajan con 12VDC y el panel táctico resistivo trabaja con 5VDC, cabe mencionar que se tienen dos fuente de poder de 12VDC, la de 12VDC – 30Amp se conecta a la tarjeta del puente H y la de 12VDC-2Amp se conecta a la tarjeta de circuito impreso, esta conexión fue necesaria por precaución al amperaje de cada elemento

CRONOGRAMA

Nombre de Tarea	Sept				Octubre				Noviembre				Diciembre				Enero				Febrero				Marzo				Abril			
	4ta	1era	2da	3era	4ta	1era	2da	3era	4ta	1era	2da	3era	4ta	1era	2da	3era	4ta	1era	2da	3era	4ta	1era	2da	3era	4ta	1era	2da	3era	4ta			
Definición de materiales a utilizar																																
Adquisición de Materiales Exterior																																
Diseño de la Estructura																																
Construcción de la Estructura																																
Cromada de la Estructura																																
Construcción de PCB controladora de touch, acelerometro y motores																																
Adquisición de materiales Varios para las pruebas respectivas																																
Programación y modelado del acelerometro																																
Programación de los encoders del motor																																
Programación del puente H																																
Programación del Touch Panel																																
Documentación																																

PRESUPUESTO

Tabla 1

Presupuesto de la plataforma inercial de 2-GDL

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	VALOR UNITARIO	TOTAL
1	Fabricación de circuito impreso en PCB	1	\$ 110,00	\$ 100,00
2	Elaboración de Plataforma Inercial	1	\$ 450,00	\$ 450,00
3	Cromado de la Plataforma Inercial	1	\$ 150,00	\$ 150,00
4	Tarjeta SparkFun (Puente H y Acelerómetro)	1	\$ 60,00	\$ 60,00
5	Acelerómetro ADXL-335	1	\$ 20,00	\$ 20,00
6	Motores Pololu de 80rpm	2	\$ 90,00	\$ 180,00
7	Panel Resistivo Táctil	1	\$ 152,00	\$ 152,00
8	Tarjeta Controladora del Panel Resistivo Táctil	1	\$ 99,00	\$ 99,00
9	Cable de conexión RS232	1	\$ 22,00	\$ 22,00
10	Cable de Poder de la Tarjeta Controladora	1	\$ 20,00	\$ 20,00
11	Programador Pickit 2	1	\$ 45,00	\$ 45,00
12	Multímetro	1	\$ 15,00	\$ 15,00
13	Estación de Soldar	1	\$ 23,00	\$ 23,00
14	Estaño + Pasta	1	\$ 7,00	\$ 7,00
15	Convertidor USB a RS232	2	\$ 10,00	\$ 20,00
16	Cables para arduino	100	\$ 0,30	\$ 30,00
17	Impresos y material audio visual	1	\$ 150,00	\$ 150,00
18	Varios	1	\$450	\$450
TOTAL DEL PRESUPUESTO				\$ 1.993,00

Nota: Se utilizó la Tarjeta de Adquisición de Datos PCI-1711, la cual es propiedad de la Universidad Politécnica Salesiana y no fue costeadada por las autoras.

BIBLIOGRAFÍA

Analog Devices. (2009). *Datasheet AXDL335*. Recuperado el 15 de febrero de 2015, de <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/adx1335.pdf>

Autodesk, Inventor. (1992). *Inventor: Autodesk Corporation*. Recuperado el 15 de Febrero de 2015, de <http://www.autodesk.com/products/inventor/overview>

Barbosa, L. d. (2011). Leganes.

Bateman, A. (1999). Protocolo RS232. En A. Bateman, *Comunicaciones Digitales* (pág. 20). España: Marcombo.

EcuRed Corporation. (2010). *Circuito Integrado LM358: EcuRed*. Recuperado el 15 de Febrero de 2015, de http://www.ecured.cu/index.php/Circuito_integrado_LM358

e-educativa. (2012). Obtenido de <http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio//4750/4933/html/index.html>

Electronica Unicrom. (Diciembre de 2002). Obtenido de http://unicrom.com/Tut_opamp.asp

Elo Touch Solutions. (1971). Obtenido de <http://www.elotouch.com.ar/Productos/Touchscreens/IntelliTouch/intelwork.asp>

Gato Gutiérrez, F. (2003). *Sistema de Aeronaves de Turbinas*. San Vicente (Alicante): Club Universitario.

Harper, E. (2003). *El ABC del Control Electronico de las maquinas electricas*. Mexico: Limusa S.A.

LBA Industrial . (2012). Obtenido de <http://www.lbaindustrial.com.mx/que-es-un-encoder/>

M. Patricio, C. (2010). *PCB (Printed Circuit Board): Electrosoft Ingeniería*. Recuperado el 15 de Febrero de 2015, de <http://www.pcb.electrosoft.cl/04-articulos-circuitos-impresos-desarrollo-sistemas/01-conceptos-circuitos-impresos/conceptos-circuitos-impresos-pcb.html>

MathWorks, Matlab. (1984). *Matlab: MathWorks Corporation*. Recuperado el 14 de Febrero de 2015, de <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

MathWorks, Simulink. (1984). *Simulink: MathWorks Corporation*. Recuperado el 19 de Febrero de 2015, de <http://www.mathworks.com/products/simulink/>

Medina, E. (22 de Mayo de 2012). *E(ver/mbedded)*. Obtenido de <http://blutintegrado.blogspot.com/2012/05/puente-h.html>

Microchip. (2014). Obtenido de <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?product=PIC18F6722>

Mouser Electronics. (2007). Obtenido de <http://www.mouser.ec/ProductDetail/NKK-Switches/FTAS00-57AS4>

National Instrumens. (2015). Obtenido de <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>.

Pololu Corporation. (2002). RoboClaw 2x15A Motor Controller with USB. Las Vegas, NV, USA.

Rubio, A. A. (2009). *Manual de Simulink para la asignatura teoria de sistemas*. Sevilla.

Sensing S.L. (s.f.). Obtenido de http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/SENSORES-Y-TRANSDUCTORES_35/Aceler%C3%B3metros---Sensores-de-aceleraci%C3%B3n_49/

Spark fun. (2003). Obtenido de <https://www.sparkfun.com/products/10182>

Valdés, F. E., & Ramon, A. (2007). *Microcontroladores. Fundamentos y Aplicaciones con PIC*. España: Marcombo S.A.


```

#include <18f6722.h>
#Fuses HS, NOWDT, NOPROTECT, NOLVP, BROWNOUT
#use delay(CLOCK=40M)
##ZERO_RAM
////////////////////////////////////
#Byte PortA = 0xF80      // Dirección del puerto A para la familia 18Fxx5x.
#Byte PortB = 0xF81      // Dirección del puerto B para la familia 18Fxx5x.
#Byte PortC = 0xF82      // Dirección del puerto C para la familia 18Fxx5x.
#Byte PortD = 0xF83      // Dirección del puerto D para la familia 18Fxx5x.
#Byte PortE = 0xF84      // Dirección del puerto E para la familia 18Fxx5x.
#Byte PortF = 0xF85
#Byte PortG = 0xF86
////////////////////////////////////
#use fast_io(a)
#use fast_io(b)
#use fast_io(c)
#use fast_io(d)
#use fast_io(e)
#use fast_io(f)
#use fast_io(g)
////////////////////////////////////
volatile unsigned int16 encoder0pos=0; //Variable Contador Para El Encoder1 Motor 2
volatile unsigned int16 encoder1pos=0; //Variable Contador Para El Encoder2 Motor 1
////////////////////////////////////
long encoder1=0;           //Variable Temporal Encoder 1 Para Desplazar Los Datos Del
Contador 8 Bit
long encoder=0;           //Variable Temporal Encoder 2 Para Desplazar Los Datos Del Contador 8 Bit
/////////ENCODER 1/////////
#INT_EXT
//////////////////////////////////// Subrutina De Interrupcion Encoder 1 Aqui No Se Aumenta La
Resolucion Porque El Encoder Esta //Aclopado En El Eje Sin Engranaje Del Motor
void RB0()
{ // revisa el canal b del pirmer encoder
  if (input(pin_b1) == 0)
  {
    encoder0pos=encoder0pos+1; // Variable Incremental Sentido Positivo O Viceversa
  }
  else
  {
    encoder0pos=encoder0pos-1; // Variable Decremental Sentido Positivo O Viceversa
  }
}
#INT_EXT2
//////////////////////////////////// Subrutina De Interrupcion Encoder 1 Aqui No Se Aumenta La
Resolucion Porque El Encoder Esta //Aclopado En El Eje Sin Engranaje Del Motor
void RB2()
{ // revisa el canal b del pirmer encoder
  if (input(pn_b3) == 0)
  { encoder1pos=encoder1pos+1; // Variable Incremental Sentido Positivo O Viceversa
  }
  else
  {
    encoder1pos=encoder1pos-1; // Variable Decremental Sentido Positivo O Viceversa
  }
}
}

```

Anexo 2: Programación Encoder. Resolución de 16Bits para cada motor independientemente.

```

////////// PROGRAMA PRINCIPAL //////////
void main()
{
  set_tris_a(0x00); // CONFIGURA EL PUERTO COMO SALIDA
  set_tris_b(0xFF); // CONFIGURA EL PUERTO PARA LAS INTERRUPTACIONES DEL B0-B4
  set_tris_c(0x00); // CONFIGURA EL PUERTO COMO SALIDA (PUERTO QUE VA A MATLAB)
  PUERTO LSB
  set_tris_d(0x00); // CONFIGURA EL PUERTO COMO SALIDA (PUERTO QUE VA A MATLAB)
  PUERTO MSB
  PORTC=0; // CONFIGURA EL PUERTO CON UN VALOR DE 0 EN LAS SALIDAS AL
  INICIO DEL PROGRAMA
  PORTD=0; // CONFIGURA EL PUERTO CON UN VALOR DE 0 EN LAS
  SALIDAS AL INICIO DEL PROGRAMA
  encoder0pos=0; // VARIABLE INICIA EN CERO
  encoder1pos=0; // VARIABLE INICIO EN CERO
  //////////////////////////////////////
  Port_B_Pullups(FALSE); // PINES DE PULLUPS PARA LAS INTERRUPTACIONES
  setup_psp(PSP_DISABLED); // DESHABILITA EL PSP DEL MICRO
  setup_spi(SPI_SS_DISABLED); // DESHABILITA EL SPI DEL MICRO
  setup_spi2(SPI_SS_DISABLED);
  setup_wdt(WDT_OFF); // MODO GUARDIAN DESAHABILITADO
  setup_timer_0(RTCC_INTERNAL); // TIMER DESHABILITADOS
  setup_timer_1(T1_DISABLED);
  setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);
  setup_timer_3(T3_DISABLED|T3_DIV_BY_1);
  setup_timer_4(T4_DISABLED,0,1);
  setup_adc_ports(NO_ANALOGS|VSS_VDD); // PUERTOS ANALOGICOS DESHABILITADOS
  setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_2|ADC_TAD_MUL_0);
  setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
  setup_vref(FALSE);
  //////////// se habilita las interrupciones ////////////
  enable_interrupts(INT_EXT); // motor 1 lado derecha
  disable_interrupts(INT_EXT1); // motor 1 lado izquierda
  enable_interrupts(INT_EXT2); // motor 2 lado derecha
  disable_interrupts(INT_EXT3); // motor 2 lado izquierda
  ext_int_edge( 0, L_TO_H); // Set up PIC18 EXT0
  ext_int_edge( 2, L_TO_H); // Set up PIC18 EXT2
  enable_interrupts(GLOBAL);
  //////////////////////////////////////
  encoder0pos=0;
  while(true)
  {
    if(input(pin_b7)==0) // Se Realiza La Multiplexacion De Los Dos Encoder Por Los Puertos D
    Y C Para Tener Lecturas De Ambos
    {
      encoder=encoder0pos<<8; // Desplamiento A La Izquierda Del Contador Despalza 8bit
      PORTC=encoder>>8; // Puerto C Toma El Desplamiento A La Derecha De La Variable Temporal
      De 8 Bit
      PORTD=encoder0pos>>8; // Puerto D Toma El Desplamiento A La Derecha Del Contador Desplaza 8Bit
    }
    else {
      encoder1=encoder1pos<<8;
      PORTC=encoder1>>8;
      PORTD=encoder1pos>>8;
    }
  }
}

```

Anexo 3: Programación Encoder. Resolución de 16Bits para cada motor independientemente.

PCI-1711/1711L

100 KS/s, 12-bit, 16-ch
S.E. Inputs Low-cost
Multifunction Card



Features

- 16 single-ended analog inputs
- 12-bit A/D converter, with up to 100 kHz sampling rate
- Programmable gain for each input channel
- Automatic channel/gain scanning
- On-board 1K samples FIFO buffer
- Two 12-bit analog output channels (Only for PCI-1711)
- 16 digital inputs and 16 digital outputs
- Programmable pacer/counter

Introduction

The PCI-1711/1711L is a powerful but low-cost multifunction card for the PCI bus. The PCI-1711 comes with 2 analog output channels, while the PCI-1711L doesn't. Thus, you can choose between PCI-1711 and PCI-1711L according to what you really need for your application, with no extra costs.

Specifications

Analog Input

- Channels 16 Single-Ended
- Resolution 12-bit
- FIFO Size 1K samples
- Sampling Rate* 100 KS/s max.
- Conversion Time 10 μ s

Input range and Gain List	Gain	1	2	4	8	16
		Input	± 10 V	± 5 V	± 2.5 V	± 1.25 V
Drift (ppm/°C)	Gain	1	2	4	8	16
	Zero	15	15	15	15	15
Small Signal Bandwidth for PGA	Gain	25	25	25	30	40
	Bandwidth	4.0 MHz	2.0 MHz	1.5 MHz	0.65 MHz	0.35 MHz

- Max. Input Overvoltage 10 μ s
- Input Protect 30 Vp-p
- Input Impedance 2 M Ω /5 pF
- Trigger Mode Software, On-board Programmable Pacer or external

Accuracy	DC	INLE: ± 0.5 LSB
		Monotonicity: 12 bits
AC	Offset error: Adjustable to zero	
	Gain error: 0.005% FSR (Gain=1)	
AC	SNR: 68 dB	
	ENOB: 11 bits	

Programmable Counter / Timer

- Channels 1
- Resolution 16-bit
- Compatibility TTL level
- Base Clock 10 MHz
- Max. Input Frequency 10 MHz

Note:

The sampling rate and throughput depends on the computer hardware architecture and software environment. The rates may vary due to programming language, code efficiency, CPU utilization and so on.

Analog Output (only for PCI-1711)

- Channels 2
- Resolution 12-bit

Output Range (Internal & External Reference)	Internal Reference	0 - +5 V, 0 - +10 V
	External Reference	0 - +x V @ -x V (-10 \leq x \leq 10)
Accuracy	Relative	$\pm 1/2$ LSB
	Differential Non-linearity	$\pm 1/2$ LSB

- Gain Error Adjustable to zero
- Slew Rate 11 V/ μ s
- Drift 40 ppm/°C
- Driving Capability 3 mA
- Throughput 38 KS/s (min.)
- Output Impedance 0.81 Ω
- Settling Time 26 μ s (to $\pm 1/2$ LSB of FSR)
- Reference Voltage Internal -5 or -10 V
External -10 or +10 V

Digital Input / Output

Input Channels	16	
Input Voltage	Low	0.8 V max.
	High	2.0 V max.
Output Channels	16	
Output Voltage	Low	0.8 V max @ 0.8 mA (sink)
	High	2.0 V min @ -0.4 mA (source)

General

VO Connector Type	68-pin SCSI-II female	
Dimensions	175 mm x 100 mm (6.9" x 3.9")	
Power Consumption	typical	PCI-1711 +5 V @ 850 mA PCI-1711L +5 V @ 700 mA
	Max.	+5 V @ 1.0 A
Temperature	Operation	0 - +60° C (32 - 140° F) (refer to IEC 68-2-1, 2)
	Storage	-20 - +70° C (-4 - 158° F)
Relative Humidity	5% - 95% RH non-condensing (refer to IEC 68-2-3)	

Anexo 4: Hoja técnica de tarjeta de adquisición daq-1711

La tarjeta PCI-1711 cuenta con entradas/salidas digitales y analógicas mismas que van a ser muy útil para plantear el funcionamiento de la misma.

A10	68	34	A11
A12	67	33	A13
A14	66	32	A15
A16	65	31	A17
A18	64	30	A19
A110	63	29	A111
A112	62	28	A113
A114	61	27	A115
AIGND	60	26	AIGND
DA0_REF	59	25	DA1_REF
DA0_OUT	58	24	DA1_OUT
AOGND	57	23	AOGND
D10	56	22	D11
D12	55	21	D13
D14	54	20	D15
D16	53	19	D17
D18	52	18	D19
D110	51	17	D111
D112	50	16	D113
D114	49	15	D115
DGND	48	14	DGND
DO0	47	13	DO1
DO2	46	12	DO3
DO4	45	11	DO5
DO6	44	10	DO7
DO8	43	9	DO9
DO10	42	8	DO11
DO12	41	7	DO13
DO14	40	6	DO15
DGND	39	5	DGND
CNT0_CLK	38	4	PACER_OUT
CNT0_OUT	37	3	TRG_GATE
CNT0_GATE	36	2	EXT_TRG
+12V	35	1	+5V

Anexo 5: Pines asignados a las entradas y salidas de la tarjeta de adquisición de datos PCI-1711.

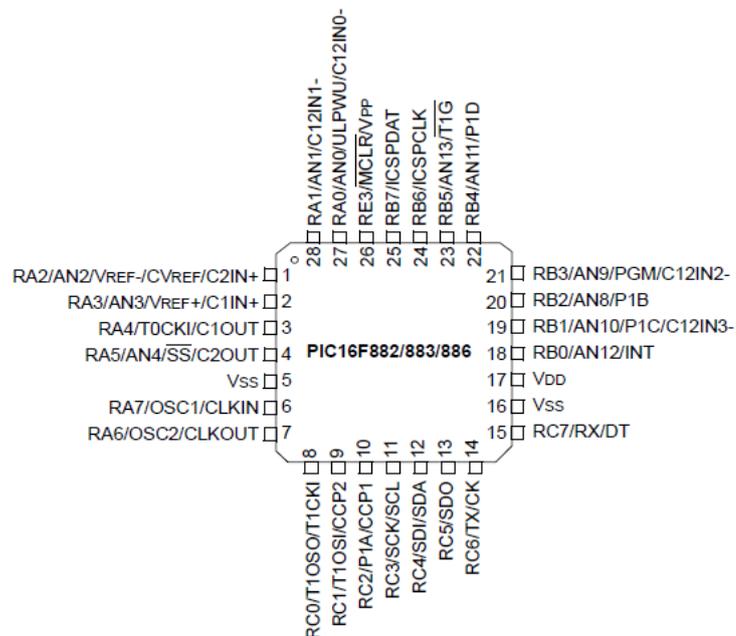
	Entradas Analógicas	
Puerto Tarjeta PIC-1711	Descripción	Canal Matlab
68	AIO	1
34	AI1	2
67	AI2	3
33	AI3	4
66	AI4	5
32	AI5	6
65	AI6	7
31	AI7	8
64	AI8	9
30	AI9	10
63	AI10	11
29	AI11	12
62	AI12	13
28	AI13	14
61	AI14	15
27	AI15	16
60	AIGND	-----
26	AIGND	-----
	Salidas Analógicas	
59	*DA0-REF	-----
25	DA1-REF*	-----
58	*DAO_OUT	1
24	DA1_AUT*	2
57	*A0GND	-----
23	A0GND*	-----
	Entradas Digitales	
56	DIO	1
22	DI1	2
55	DI2	3
21	DI3	4
54	DI4	5
20	DI5	6
53	DI6	7
19	DI7	8
52	DI8	9
18	DI9	10
51	DI10	11
17	DI11	12
50	DI12	13
16	DI13	14
49	DI14	15
15	DI15	16
48	DIGND	-----
14	DIGND	-----

Salidas Digitales		
47	DO0	1
13	DO1	2
46	DO2	3
12	DO3	4
45	DO4	5
11	DO5	6
44	DO6	7
10	DO7	8
43	DO8	9
9	DO9	10
42	DO10	11
8	DO11	12
41	DO12	13
7	DO13	14
40	DO14	15
6	DO15	16
39	DOGND	-----
5	DOGND	-----

Anexo 6: Listado de canales asignados para cada pin de la tarjeta daq PCI-1711

Pin Diagrams – PIC16F882/883/886, 28-Pin QFN

28-Pin QFN



Anexo 7: PIC 16F886

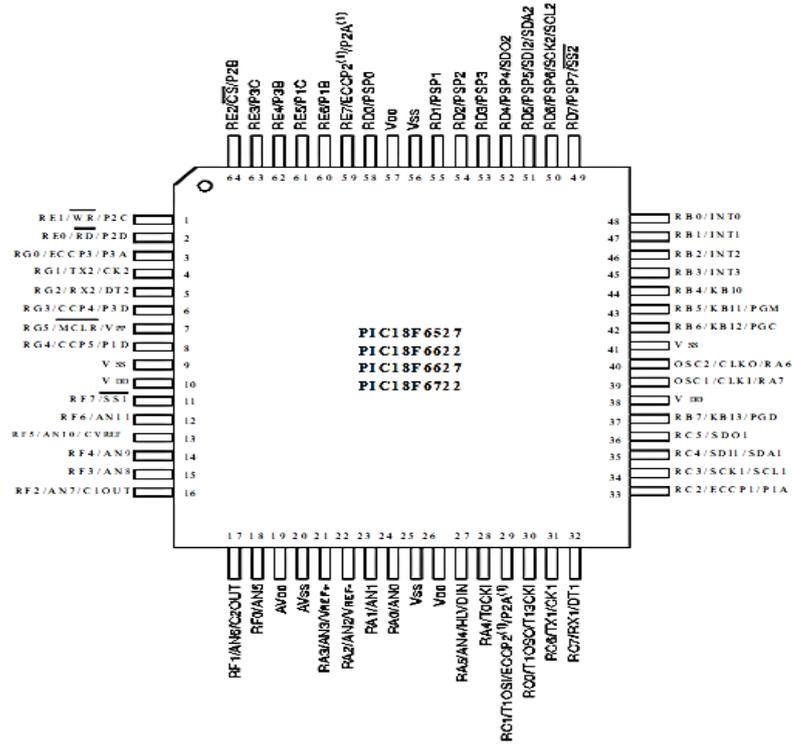


Tabla 4.2**Voltajes X y Y con relación a grados de referencia servo/acelerómetro.**

Grados Referencia Servo/acelerómetro	Voltaje Eje X	Voltaje Eje Y
-30	1,7109	1,7218
-29	1,7045	1,7186
-28	1,6995	1,7137
-27	1,6969	1,7086
-26	1,6911	1,7042
-25	1,6862	1,7001
-24	1,6828	1,6965
-23	1,6787	1,6917
-22	1,6720	1,6871
-21	1,6680	1,6846
-20	1,6654	1,6811
-19	1,6621	1,6759
-18	1,6586	1,6716
-17	1,6552	1,6673
-16	1,6516	1,6627
-15	1,6443	1,6591
-14	1,6411	1,655
-13	1,6348	1,6503
-12	1,6318	1,6469
-11	1,6290	1,6416
-10	1,6251	1,6344
-9	1,6216	1,6272
-8	1,6164	1,6241
-7	1,6117	1,6177
-6	1,6071	1,615
-5	1,6016	1,6116
-4	1,5977	1,6067
-3	1,5929	1,601
-2	1,5899	1,5976
-1	1,5856	1,5908
0	1,5829	1,5899

1	1,5795	1,5869
2	1,5764	1,5823
3	1,5737	1,578
4	1,5668	1,5741
5	1,5614	1,5694
6	1,5589	1,5634
7	1,5526	1,5595
8	1,5490	1,5544
9	1,5439	1,5493
10	1,5375	1,5444
11	1,5335	1,541
12	1,5258	1,5389
13	1,5197	1,5335
14	1,5179	1,5292
15	1,5146	1,5234
16	1,5110	1,5196
17	1,5059	1,515
18	1,5006	1,5112
19	1,4988	1,5075
20	1,4925	1,5049
21	1,4888	1,4999
22	1,4863	1,4954
23	1,4809	1,4916
24	1,4767	1,4869
25	1,4727	1,4829
26	1,4677	1,4776
27	1,4629	1,4734
28	1,4582	1,4671
29	1,4518	1,4616
30	1,4509	1,4577

Nota: La tabla 4.2 muestra los valores de los voltajes capturados en los ejes X y Y del acelerómetro AXDL-335 con respecto a cada grado entre -30° - 30° .

Tabla 4.3

Voltajes X y Y con relación voltaje - ángulo

Grados Referencia Servo	Voltaje Eje X	Grados Referencia Eje X (simout 1)	Grados Referencia Eje X (simout 2)	Voltaje Eje Y	Grados Referencia Eje Y (simout 1)
-30	1,7109	-29,6704	-29,8542	1,4577	-29,4206
-29	1,7045	-28,7166	-28,8826	1,4616	-28,4874
-28	1,6995	-27,8681	-28,0187	1,4671	-27,6573
-27	1,6969	-26,4096	-26,5349	1,4734	-26,2305
-26	1,6911	-25,1452	-25,2497	1,4776	-24,9935
-25	1,6862	-24,2357	-24,3259	1,4829	-24,1037
-24	1,6828	-23,1543	-23,2281	1,4869	-23,0458
-23	1,6787	-22,0174	-22,0748	1,4916	-21,9336
-22	1,6720	-21,1634	-21,2090	1,4954	-21,0981
-21	1,6680	-20,2428	-20,2762	1,4999	-20,1975
-20	1,6654	-19,2002	-19,2205	1,5049	-19,1775
-19	1,6621	-18,6179	-18,6311	1,5075	-18,6079
-18	1,6586	-17,6363	-17,6381	1,5112	-17,6476
-17	1,6552	-17,0596	-17,0550	1,5150	-17,0833
-16	1,6516	-16,0946	-16,0798	1,5196	-16,1393
-15	1,6443	-14,8358	-14,8085	1,5234	-14,9078
-14	1,6411	-13,7322	-13,6948	1,5292	-13,8281
-13	1,6348	-12,5177	-12,4700	1,5335	-12,6400
-12	1,6318	-11,6082	-11,5535	1,5389	-11,7502
-11	1,6290	-10,8318	-10,7715	1,5410	-10,9907
-10	1,6251	-10,2994	-10,2355	1,5444	-10,4698
-9	1,6216	-9,2180	-9,1473	1,5493	-9,41190
-8	1,6164	-8,0867	-8,0097	1,5544	-8,30510
-7	1,6117	-6,9998	-6,9174	1,5595	-7,24180
-6	1,6071	-5,7908	-5,7035	1,5634	-6,05900
-5	1,6016	-4,2491	-4,1568	1,5694	-4,55080
-4	1,5977	-3,5116	-3,4173	1,5741	-3,82920
-3	1,5929	-2,6631	-2,5671	1,5780	-2,99910
-2	1,5899	-1,5040	-1,4064	1,5823	-1,86520

-1	1,5856	-0,8607	-0,7626	1,5869	-1,23590
0	1,5829	0,0044	0,1028	1,5899	-0,38950
1	1,5795	0,8307	0,9290	1,5908	0,4188
2	1,5764	1,8733	1,9707	1,5976	1,4388
3	1,5737	2,9373	3,0331	1,6010	2,4797
4	1,5668	4,5185	4,6108	1,6067	4,0267
5	1,5614	5,2672	5,3572	1,6116	4,7591
6	1,5589	5,8109	5,8990	1,6150	5,2910
7	1,5526	6,8644	6,9483	1,6177	6,3216
8	1,5490	8,0456	8,1240	1,6241	7,4772
9	1,5439	8,9883	9,0617	1,6272	8,3995
10	1,5375	10,8184	10,8804	1,6344	10,1899
11	1,5335	12,3712	12,4218	1,6416	11,7090
12	1,5258	13,5580	13,5989	1,6469	12,8700
13	1,5197	14,4231	14,4564	1,6503	13,7164
14	1,5179	15,2549	15,2804	1,6550	14,5302
15	1,5146	16,2975	16,3126	1,6591	15,5501
16	1,5110	17,0850	17,0918	1,6627	16,3205
17	1,5059	18,0167	18,0131	1,6673	17,2320
18	1,5006	18,9262	18,9120	1,6716	18,1217
19	1,4988	20,2072	20,1772	1,6759	19,3750
20	1,4925	21,2387	21,1952	1,6811	20,3841
21	1,4888	21,8764	21,8242	1,6846	21,0080
22	1,4863	22,6307	22,5678	1,6871	21,7459
23	1,4809	23,7675	23,6880	1,6917	22,8581
24	1,4767	24,7713	24,6763	1,6965	23,8401
25	1,4727	25,8638	25,7513	1,7001	24,9089
26	1,4677	26,6568	26,5311	1,7042	25,6847
27	1,4629	27,6661	27,5230	1,7086	26,6721
28	1,4582	29,0692	28,9009	1,7137	28,0447
29	1,4518	30,1506	29,9620	1,7186	29,1026
30	1,4509	30,7495	30,5494	1,7218	29,6886

Nota: La tabla 4.2 muestra los valores de los ángulos capturados en los ejes X y Y del acelerómetro AXDL-335 con respecto a los voltajes obtenidos de la tabla 4.1.

Tabla 4.5**Medición Voltaje Entrada & Voltaje Salida del Puente H**

Voltaje de Entrada	Voltaje de Salida
0,5	-4,6013
0,55	-4,497
0,6	-4,4089
0,65	-4,3087
0,7	-4,1814
0,75	-4,1002
0,8	-3,9755
0,85	-3,8729
0,9	-3,7708
0,95	-3,6667
1	-3,5735
1,05	-3,4798
1,1	-3,3812
1,15	-3,2773
1,2	-3,166
1,25	-3,0668
1,3	-2,9462
1,35	-2,8676
1,4	-2,7762
1,45	-2,6603
1,5	-2,552
1,55	-2,4624
1,6	-2,3525
1,65	-2,2358
1,7	-2,1673
1,75	-2,063
1,8	-1,9674
1,85	-1,8762
1,9	-1,7715
1,95	-1,6682
2	-1,5694
2,05	-1,4826
2,1	-1,3608
2,15	-1,271

2,2	-1,1702
2,25	-1,0609
2,3	-0,9639
2,35	-0,8647
2,4	-0,7531
2,45	-0,6552
2,5	-0,5335
2,55	-0,4446
2,6	-0,2984
2,65	0,6434
2,7	0,9714
2,75	1,086
2,8	1,1901
2,85	1,2935
2,9	1,3921
2,95	1,517
3	1,6026
3,05	1,6926
3,1	1,8005
3,15	1,8945
3,2	2,0012
3,25	2,107
3,3	2,1696
3,35	2,2608
3,4	2,3664
3,45	2,4702
3,5	2,5681
3,55	2,6752
3,6	2,779
3,65	2,8818
3,7	2,9838
3,75	3,0847
3,8	3,1853
3,85	3,2782
3,9	3,3822
3,95	3,4897
4	3,5958
4,05	3,6907

4,1	3,8115
4,15	3,8951
4,2	3,9972
4,25	4,0846
4,3	4,1983
4,35	4,3072
4,4	4,4048
4,45	4,5188
4,5	4,5974

Nota: Voltaje de salida del puente h conectado a las entradas digitales de la tarjeta de adquisición de datos obtenidos a través de una rampa entre 0,5 y 4,5VDC.