

*BRAZO ROBÓTICO DE UN GRADO DE LIBERTAD
MODELADO COMO PÉNDULO INVERTIDO Y
OPERADO POR COMPUTADORA*

WILLIAM ARDILA GONZÁLEZ Y ALVARO ANDRÉS PRIETO JÍMENEZ



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA
BOGOTÁ, D.C.
AGOSTO DE 2014

*BRAZO ROBÓTICO DE UN GRADO DE LIBERTAD
MODELADO COMO PÉNDULO INVERTIDO Y
OPERADO POR COMPUTADORA*

WILLIAM ARDILA GONZÁLEZ Y ALVARO ANDRÉS PRIETO JÍMENEZ

DIRECTOR
PROF. DIEGO ACERO



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA
BOGOTÁ, D.C.
AGOSTO DE 2014

Título en español

Brazo Robótico de un Grado de Libertad Modelado como Péndulo Invertido y Operado por Computadora

Title in English

Robotic arm with one degree of freedom modeled as inverted pendulum and Computer operated

Palabras clave: Control, adquisición, modelamiento, PID.

Keywords: Control, acquisition,modeling, PID.

Nota de aceptación

Jurado
Primer Jurado

Jurado
Segundo Jurado

Director
Diego Acero

Bogotá D.C., Agosto de 2014

1. Información General	
Tipo de documento	Tesis de Grado
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
Título del documento	BRAZO ROBÓTICO DE UN GRADO DE LIBERTAD MODELADO COMO PÉNDULO INVERTIDO Y OPERADO POR COMPUTADORA.
Autor(es)	PRIETO JIMÉNEZ, Alvaro Andrés; ARDILA GONZÁLEZ, William
Director	ACERO, Diego
Publicación	Bogotá, Universidad Pedagógica Nacional, 2014. 55 p.
Unidad Patrocinante	Universidad Pedagógica Nacional
Palabras Claves	Licenciatura en Electrónica, Sistemas de control, Adquisición de datos, control, PID, Brazo Robótico.

2. Descripción
El trabajo de grado realizado está enfocado al área de control, en este se desarrolló una herramienta para la explicación en el laboratorio para el área de control. Este prototipo se hizo con un control PID (proporcional, integrar, derivativo) en el cual ajustamos sus constantes mediante una interfaz gráfica realizada en Matlab®. El planteamiento inicial del proyecto se basa en la planta anteriormente mencionada y una tarjeta de adquisición de datos en la cual podremos incluir señales y obtener su visualización en una interfaz gráfica de LabView®.

3. Fuentes
Las referencias de esta tesis fueron en su gran mayoría otras tesis realizadas tanto en la universidad como en otras universidades, estas fueron "Desarrollo de un prototipo de control y monitoreo de bajo costo desde un punto remoto vía celular (2007), Diseño y construcción de un sistema embebido para el funcionamiento de un autómata mediante una estrategia de control PID digital programable con comunicación inalámbrica (2010), Diseño y construcción de una tarjeta programable de adquisición, procesamiento de datos y control(2006), Diseño y construcción de una interfaz gráfica utilizando Matlab para el control de una planta de temperatura, que promueva y facilite el entendimiento de los conceptos teóricos de la asignatura control (2009), Diseño de un controlador de estructura variable para el péndulo invertido (2003), Diseño, construcción y control de un péndulo invertido rotacional utilizando técnicas lineales y no lineales (2009), Diseño de un controlador pid digital para un prototipo airship (2011). Además de estos documentos también fueron consultados libros como Ingeniería de control moderna (2003), Metodología rup (2010)

4. Contenidos
Brazo robótico es una plata de un grado de libertad diseñada para el área de control, el cual permitirá a los estudiantes un mejor entendimiento de como sirve el control en la práctica viendo en tiempo real diferentes respuestas, para su funcionamiento es necesario conectarla a una tarjeta de adquisición de datos, diseñada también por los autores y tener la interfaz en Matlab que permite el envió de datos de una manera simple, el usuario puede enviar los datos de los grados en los que desea el brazo y a su vez puede fácilmente reprogramar las variables del controlador en el microprocesador para que este tenga diferentes respuestas, como un sobre pico, tiempo de respuesta o tiempo de estabilización deseado.

La tarjeta de adquisición además de servir para la comunicación Brazo-PC, también por medio de su conexión USB y el uso de los puertos análogos-digital es capaz también de recibir diversas señales de un máximo 5 v pico a pico y hasta 1200Hz las cuales pueden ser visualizadas en un interfaz muy sencilla en LabView, donde se puede ver la señal con un filtro butterworth digital y se cuenta a su vez con un control de disparo o trigger para una visualización de señales a baja frecuencia de manera excelente. La tarjeta de adquisición cuenta con un potenciómetro el cual permite subir el nivel offset de la señal, un pulsador para poder navegar entre el menú y una LCD que facilita su entendimiento.

5. Metodología

Para alcanzar los objetivos propuestos de este trabajo de grado, se desarrolla una metodología que permita tener un orden lógico de investigación, simulación y desarrollo; la metodología RUP permite desarrollar el trabajo con una secuencia coherente de pasos para lograr la construcción final.

Esta metodología se desarrolla en tres fases, que son las siguientes: Inicio, Elaboración y Construcción. En la fase de inicio se desarrolla el trabajo investigativo mientras que en la de elaboración se realizan las simulaciones y pruebas del trabajo, en la fase de construcción se realiza el producto final a presentar.

6. Conclusiones

Se realizó un prototipo de brazo robótico modelado como péndulo invertido y operado desde la computadora con conexión a la tarjeta de adquisición de datos como prototipo de estudio en el área de control de la Universidad Pedagógica Nacional, este prototipo presentó diversas fallas en su funcionamiento debido a problemas relacionados a la lógicas del trabajo, estructuración del proyecto inicial y complicaciones en momentos de solución de problemas. El prototipo funcionó de forma correcta en la identificación de los grados y el envío de los mismos desde el computador al motor y como tarjeta de adquisición de datos, la toma de señales presentó un muestreo adecuado hasta señales de entre 1KHz y 1,2 KHz y funcionó perfecto como puente entre el prototipo y el computador.

Elaborado por:	PRIETO JIMÉNEZ, Alvaro Andrés; ARDILA GONZÁLEZ, William
-----------------------	---

Revisado por:	Diego Acero
----------------------	-------------

Fecha de elaboración del Resumen:	03	09	2014
--	----	----	------

Índice general

Índice general	II
Índice de tablas	V
Índice de figuras	VI
Introducción	VIII
1. Planteamiento del problema	1
1.1. Identificación del problema	1
1.2. Justificación	1
1.3. Delimitación	2
1.4. Objetivos del proyecto	2
1.4.1. Objetivo general	2
1.4.2. Objetivos específicos	2
1.5. Antecedentes	3
1.5.1. Diseño de un controlador de estructura variable para el péndulo in- vertidos	3
1.5.2. Diseño y construcción de una tarjeta programable de adquisición, procesamiento de datos y control	3
1.5.3. Desarrollo de un prototipo de control y monitoreo de bajo costo desde un punto remoto via celular	3
1.5.4. Diseño, construcción y control de un péndulo invertido rotacional utilizando técnicas lineales y no lineales	4
1.5.5. Control lógico difuso del péndulo invertido	4
1.5.6. Diseño y construcción de una interfaz gráfica utilizando Matlab para el control de una planta de temperatura, que promueva y facilite el entendimiento de los conceptos teóricos de la asignatura control	4

1.5.7. Diseño y construcción de un sistema embebido para el funcionamiento de un autómata mediante una estrategia de control pid digital programable con comunicación inalámbrica	4
1.5.8. Diseño de un controlador PID digital para un prototipo airship	4
2. Marco de referencia	5
2.1. Brazo Robótico	5
2.2. Péndulo Invertido	6
2.3. Adquisición de Datos	6
2.3.1. Señal análoga	7
2.3.2. Señal digital	7
2.3.3. Teorema de Muestreo	8
2.4. Grados de libertad	9
2.5. Microcontrolador	10
2.6. Control	11
2.6.1. Control Proporcional	12
2.6.2. Control Proporcional Integrativo	12
2.6.3. Control Proporcional, Integral, Derivativo	12
2.7. Sistemas Lineales	13
2.8. Sistemas No Lineales	14
2.8.1. Series de Taylor	14
2.9. Motor EMG-30	15
2.10. Módulo USB	15
3. Aspectos metodológicos	18
3.1. Estrategia de análisis	18
4. Desarrollo Brazo Robótico	20
4.1. Modelamiento matemático	20
4.1.1. Ecuaciones espacio estado	22
4.1.2. Comunicación brazo y tarjeta de adquisición	23
4.1.3. Sistema de control del brazo	25
4.1.4. Etapa de potencia y puente H	27
4.1.5. Fuente 12 - 5 V DC p	28

5. Tarjeta de Adquisición	29
5.1. Adquisicion Pic 18f4550	29
5.2. USO DE PROTOCOLO USB	29
5.2.1. Puerto Análogo digital	33
5.2.2. Interfaz Gráfica LabView	35
Conclusiones	38
Bibliografía	40

Índice de tablas

2.1. Tabla EMG30	15
2.2. Conectores USB	16
5.1. Tabla de parámetros del Pic 18f4550	30

Índice de figuras

2.1. Brazo Robótico.	5
2.2. Péndulo Invertido Tradicional.	6
2.3. Muestras de una Señal Digital.	7
2.4. Señal Análoga.	7
2.5. Señal Digital.	8
2.6. Onda seno, tomada de [3].	9
2.7. Onda seno muestreada, tomada de [3].	9
2.8. Tomada de wikipedia	10
2.9. Microcontroladores.	11
2.10. Esquema de Controlador con Ganancia K_p (Proporcional).	12
2.11. Esquema de Controlador Proporcional-Integrativo(PID).	12
2.12. Esquema de Controlador Proporcional-Integrativo-Derivativo(PID).	13
2.13. Imagen tomada de la Universidad De Oviedo.	14
2.14. Medidas del Motor EMG-30.	15
2.15. Resistencias Pull-Up de 4,7 K para garantizar el funcionamiento de los sensores.	16
2.16. Velocidad de Puertos Periféricos (Tomada de la Página oficial de MICRO-CHIP)	16
2.17. Conectores USB (Tomada de Microchip)	17
4.1. Modelamiento matemático	20
4.2. Motor EMG30	21
4.3. Conversor Frecuencia-Voltaje	21
4.4. Comunicación sensores y pic a tarjeta de adquisición	23
4.5. Encoder EMG30	24

4.6. Interfaz Gráfica en Matlab	25
4.7. Respuesta del sistema	26
4.8. Diagrama de polos y ceros	27
4.9. Diagrama de polos y ceros con requerimientos necesarios	27
4.10. Sistema estable	27
4.11. Lm298n Puente H	28
4.12. Fuente 12 - 5V DC	28
5.1. Pic 18f4550	29
5.2. Señal Análogo digital	34
5.3. Señal Análogo con voltaje offset	34
5.4. Modulo VISA LabView	35
5.5. Parametrización LabView	35
5.6. Filtro Butterworth	36
5.7. Señal filtrada	36
5.8. Interfaz Usuario Labview	37
5.9. Interfaz gráfica	37

Introducción

El área de control es una de las mas importantes y de mayor acople de conocimientos de la licenciatura, es por esto que esta área se debe de fortalecer no solo en su componente teórica sino en sus prácticas, para convertirlas en un fuerte de la carrera. La idea de desarrollar un prototipo de tipo educativo, que fortalezca el conocimiento de los autores durante su construcción y que apoye a la universidad es bien vista para una construcción integral de los saberes de los miembros de la comunidad educativa.

Las herramientas de adquisición de datos y control son muy usadas actualmente para el desarrollo de prácticas y proyectos de electrónica, es por esto que se refleja la importancia de mantener un laboratorio con herramientas para un espacio de laboratorio intelectualmente productivo y beneficioso a los estudiantes.

Normalmente, cuando se recurre a alguna tarjeta de adquisición de datos u otro elemento de la universidad, no es fácil de obtenerlo, ya que la capacidad de estudiantes y al ser un material tan escaso (es el caso de las tarjetas de adquisición de datos) son muy pocos los miembros de la comunidad beneficiados con estos elementos. Otro punto de análisis es el de las herramientas que tiene un maestro para desarrollar un ejemplo práctico en el área de control, ya que por las herramientas que el profesor cuenta para dar explicaciones es muy básico y en muchos casos solo cuenta con un tablero, mas no con una herramienta de control práctica con la que el docente muestre a sus estudiantes los cambios ejercidos en una planta controlable (en este caso el brazo robótico).

Estas ideas y esta planta que se implementó para la Universidad Pedagógica Nacional no es nueva, ha sido trabajada por muchos docentes, investigadores y estudiantes que las han desarrollado en otras universidades y centros de estudio obviamente con otras condiciones y con otros parámetros totalmente diferentes a los que se tienen en este trabajo, pero lo que se busca es hacer una integración de saberes, en beneficio de los estudiantes, docentes y miembros de la universidad, en este caso del área de control de la Universidad Pedagógica Nacional.

Es debido aclarar que este trabajo de grado no solo integró el control en su desarrollo, también lleva consigo estrategias de programación que han sido desarrolladas con ayuda de saberes adquiridos previamente en las áreas de informática y digitales de la Universidad.

CAPÍTULO 1

Planteamiento del problema

1.1. Identificación del problema

En la actualidad, la Universidad Pedagógica Nacional cuenta con herramientas insuficientes para el desarrollo de prácticas de laboratorio y explicaciones más allá de la teoría en el área de control. La implementación de plantas que permitan la puesta en marcha y prueba de diferentes modelos de controladores, con posibilidad de análisis de su comportamiento y respuesta en tiempo real, permite profundizar los conocimientos claramente expresados a partir de la teoría.

Así mismo, las tarjetas de adquisición de datos para la medición y captura de información de estos sistemas con las cuales se cuentan han sido implementadas exclusivamente en trabajos de grado, con algunas excepciones, y resultan escasas para el ejercicio de prácticas en la asignatura debido al número de estudiantes y posibilidad de proyectos del área.

Es importante además apropiar los conocimientos adquiridos durante la carrera en una aplicación, en la cual se enriquezcan y refuercen éstos con una finalidad importante, la cual es el apoyo a la universidad con un material, que ayude al área de control, pero así mismo pueda evidenciar y fortalecer los saberes adquiridos en todas las asignaturas vistas.

El problema propuesto consiste en el diseño e implementación de un sistema de control para un brazo robótico de una sola articulación, modelado como péndulo invertido, mediante la comunicación entre el computador y el sistema físico a través de una tarjeta de adquisición de datos desde una interfaz en Matlab®, como herramienta de apoyo para la enseñanza en el área de control del programa de Licenciatura en Electrónica de la Universidad Pedagógica Nacional.

1.2. Justificación

Teniendo en cuenta que las asignaturas de Control juegan un papel fundamental en la formación de los estudiantes de la Licenciatura en Electrónica, en las que se tiene como

objetivo principal el estudio de diferentes técnicas para mantener estables y controladas múltiples variables en una o diferentes plantas o procesos, lo que permite a su vez mejoras sustanciales en la calidad y la productividad de diversos procesos industriales, teniendo en cuenta la creación de un brazo robótico ayudará a fortalecer los conocimientos adquiridos en el área de control y a su vez de diferentes áreas como en diseño de circuitos, modelado de sistemas, etapas de instrumentación, potencia, entre otros. A su vez el diseño de un brazo robótico para la Universidad Pedagógica Nacional, con su respectiva tarjeta de adquisición de datos colabora también como una herramienta de soporte para el desarrollo de prácticas donde se ponga a prueba lo teórico y experimental y con la falta de herramientas para laboratorio.

Con el diseño y construcción de este brazo robótico, como prototipo para la aplicación de los conocimientos adquiridos en las diferentes áreas de la Licenciatura en Electrónica y profundización en diferentes temas principalmente en el área de control, y de una tarjeta de adquisición de datos diseñada especialmente para la aplicación de prácticas en la Universidad Pedagógica Nacional se espera controlar y visualizar algunas plantas, como el brazo robótico, y se pretende aportar de forma significativa al aprendizaje de los conceptos teóricos de la materia vistos de forma más tangible, a su vez la creación en especial de un brazo robótico como planta tiene como objetivo ser un primer paso al desarrollo e investigación de una continuación de un brazo con mas de un eslabón.

1.3. Delimitación

Este trabajo se realizó mediante técnicas de control tradicional y herramientas de programación usadas en diversas áreas de la Universidad Pedagógica Nacional en la Licenciatura en Electrónica, integrando conocimientos de esta y viendo la limitación principal del prototipo a la capacidad funcional de sus componentes. Las herramientas desarrolladas en este trabajo de grado serán de uso exclusivo de la universidad y de los desarrolladores de la misma.

1.4. Objetivos del proyecto

1.4.1. Objetivo general

Diseñar y construir un sistema de control para un brazo robot con un grado de libertad modelado como péndulo invertido para ser implementado como una herramienta de apoyo en el área de Control del programa de Licenciatura en Electrónica de la Universidad Pedagógica Nacional.

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar y construir una tarjeta de adquisición de datos que se acople al sistema de control del brazo robot y a diversos sistemas empleados en el área de control para

permitir la recopilación de datos y el envío de señales.

- Construir el sistema mecánico del brazo robot, que facilite la detección de sus movimientos para tener precisión de su posición y de su lectura.
- Diseñar una interface en MATLAB® con el fin de capturar los datos de posición de la planta, permitiendo al usuario ingresar en grados la posición para el desplazamiento del brazo.
- Diseñar una interface en LABVIEW® con el fin de capturar y visualizar los datos recibidos de señales que ingresen a través de la tarjeta de adquisición de datos.
- Construir el controlador PID de tipo digital, modificable desde el computador, capaz de conectarse con la interfaz gráfica para controlar el movimiento del brazo robot.
- Elaborar un manual que muestre a los estudiantes de la Licenciatura en Electrónica el funcionamiento de cada uno de los componentes del proyecto (Tarjeta de adquisición de datos, interfaz gráfica y brazo mecánico).

1.5. Antecedentes

1.5.1. Diseño de un controlador de estructura variable para el péndulo invertidos

Esta tesis [6] consiste en el diseño de un controlador de estructura variable para un péndulo invertido. En este trabajo se usó el procedimiento de Euler-Lagrange para obtener el modelo no lineal del péndulo. El procedimiento que se usó en la obtención del modelo lineal del sistema consiste en tomar un punto de equilibrio y sobre este aplicar el respectivo control.

1.5.2. Diseño y construcción de una tarjeta programable de adquisición, procesamiento de datos y control

Este trabajo [5] fue realizado en México y planteó el diseño, construcción y prueba de una tarjeta programable capaz de realizar tres funciones de automatización de un proceso con la capacidad de trabajar de forma autónoma. Se realizó para las pruebas de módulos de: entradas/salidas digitales, entradas análogas, potencia para motores, comunicación con la computadora y memorias EEPROM.

1.5.3. Desarrollo de un prototipo de control y monitoreo de bajo costo desde un punto remoto via celular

En este documento [1] se puede evidenciar la comunicación inalámbrica entre un sistema que maneja alguna variable física y un elemento que controla a esa variable desde un punto distante. Se puede notar que para mantener la variable física en un valor estándar es necesario que el sistema envíe una señal, el otro la reciba y de forma inmediata envíe una señal que controle esa variable cuando se sale de control.

1.5.4. Diseño, construcción y control de un péndulo invertido rotacional utilizando técnicas lineales y no lineales

Este trabajo de grado [7] consistió en control de un péndulo invertido rotacional. Este sistema de péndulo invertido rotacional se implementa en la construcción de aeronaves, submarinos, barcos, satélites y robots.

1.5.5. Control lógico difuso del péndulo invertido

Este proyecto de grado [9] plantea la construcción de un péndulo invertido diseñado con el principio del control difuso. Este tipo de control es muy usado en sistemas no lineales para los cuales es complejo obtener el modelo de la planta. En esta tesis se usó el principio del control difuso, ya que permite simular el comportamiento que tendría un operador humano sobre una máquina.

1.5.6. Diseño y construcción de una interfaz gráfica utilizando Matlab para el control de una planta de temperatura, que promueva y facilite el entendimiento de los conceptos teóricos de la asignatura control

En la Universidad Pedagógica Nacional podemos ver que se han desarrollado trabajos que aplican control y son construidos para la Licenciatura en Electrónica, como el diseño de una interfaz gráfica para mantener el control de temperatura de una planta, el cual, según el documento [4], muestra que, se tiene la temperatura de un sistema de control estable gracias a los cambios aplicados por el usuario en la interfaz de tipo gráfico.

1.5.7. Diseño y construcción de un sistema embebido para el funcionamiento de un autómata mediante una estrategia de control pid digital programable con comunicación inalámbrica

Este sistema de control funciona de forma autómata gracias al sistema embebido que fue desarrollado para controlar la velocidad de un motor DC con ayuda de un PID digital. Este proyecto [2] permite al operario visualizar los cambios de las constantes K_i , K_d y K_p del sistema de acuerdo a las velocidades aplicadas al motor que también son asignadas por los usuarios. Tiene un componente de gran ayuda para el proyecto del brazo robot, el cual es básicamente la composición del controlador digital.

1.5.8. Diseño de un controlador PID digital para un prototipo airship

El diseño de un prototipo Airship con un controlador PID es el principio de esta tesis de grado [10]. Con el controlador PID se debe garantizar que el prototipo se mantenga en vuelo vertical de forma estable. Una tesis que aporta cosas importantes, como por ejemplo, la construcción del PID, y como mantener el sistema estable a pesar de las perturbaciones que se puedan llegar a generar en este.

Marco de referencia

2.1. Brazo Robótico

Es un artefacto mecánico, físico-controlable que imita las funciones del brazo humano en cuanto a su funcionamiento. Este brazo puede tener desde un solo movimiento angular hasta llegar a cumplir con todos los movimientos de un brazo real, llegando a ser muy usado en diversas funciones en la industria, como en la repetición de tareas. Uno de los ejemplos más vistos de los brazos robóticos es en la industria automovilística, en esta vemos que los brazos robóticos los usan para soldar de forma precisa puntos del chasis y también los usan para pintar adecuadamente los autos fabricados, realizando movimientos en varios grados de libertad cumpliendo con su labor y siendo muy exactos en su control.

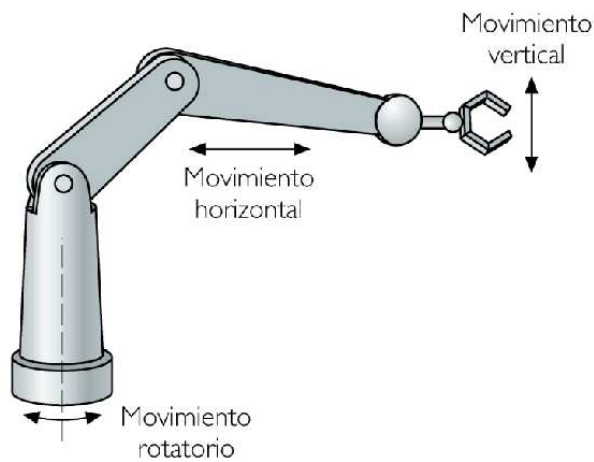


Figura 2.1: Brazo Robótico.

2.2. Péndulo Invertido

Es un sistema inestable muy usado actualmente para realizar prácticas de investigación. Por lo general este sistema está compuesto de un carro que se mueve en dirección paralela al eje X y una barra que está ubicada sobre este y se mueve libremente. Su función principal es equilibrarse en un punto y mantenerse estable a pesar de los bruscos movimientos que pueda presentar el carro.

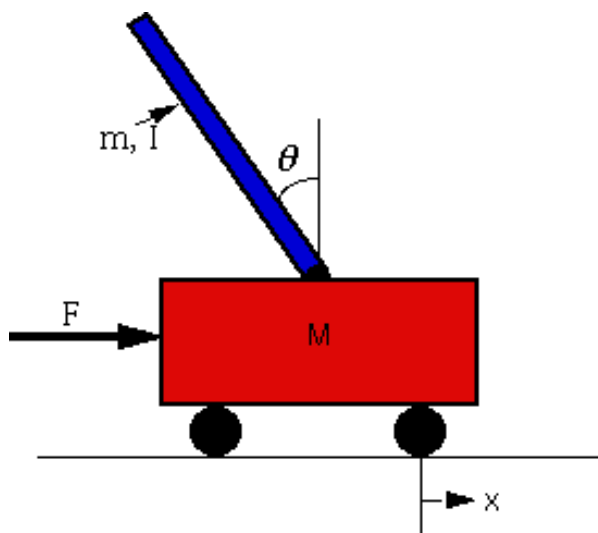


Figura 2.2: Péndulo Invertido Tradicional.

2.3. Adquisición de Datos

Es el proceso, mediante el cual un componente digital (computador, microcontrolador, integrado) realiza una toma de muestras de un sistema analógico en forma de voltaje y los convierte a datos digitales, de los cuales su tamaño en bits depende de la capacidad del componente.

Los convertidores analógico-Digital tienen en su configuración o por defecto unos bits de resolución, los cuales son, como su nombre lo indica, bits que el convertidor usa para representar un punto de voltaje de una señal o medida análoga tomada.

Es importante mencionar que en la adquisición de datos se debe de aplicar el teorema de Nyquist. En este teorema se evidencia que una señal análoga puede ser reconstruida si la tasa de muestreo es dos veces mayor a la frecuencia fundamental de la señal a discretizar.

Las características más importantes a tener en cuenta cuando se desea realizar una adquisición de datos son:

Frecuencia de muestreo.

Número de Bits (Cuantización)

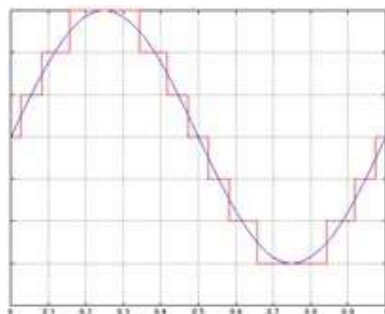


Figura 2.3: Muestras de una Señal Digital.

2.3.1. Señal análoga

Se caracterizan por presentar variaciones y mantenerse a través del tiempo. Dicho esto, éstas tienen amplitud y periodo. Éstas señales están presentes en el ambiente, como lo es la temperatura, que es una magnitud variable a través del tiempo, también podemos notar que las señales eléctricas que hacen funcionar los diversos dispositivos electrónicos presentes en los hogares son señales análogas.

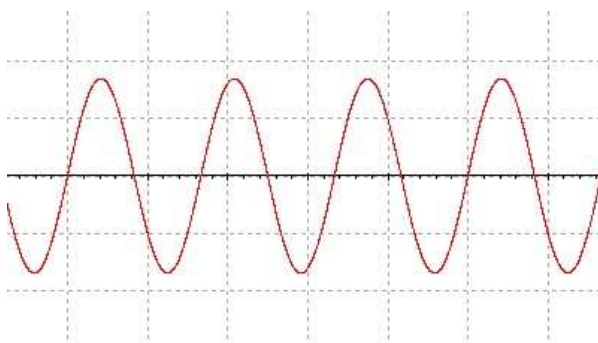


Figura 2.4: Señal Análoga.

2.3.2. Señal digital

Son señales discontinuas que toman solo toman valores entre 1 y 0. Los convertidores analógico-Digital toman las señales continuas en el tiempo y realizan su conversión de acuerdo a niveles de voltaje que representan una cadena de bits, por ejemplo, si tenemos 5 voltios y los pasamos por el convertidor analógico digital de un microcontrolador, éste la va a representar como un valor de 8 o 10 bits (de acuerdo a la configuración) que va a ser en este caso 11111111.

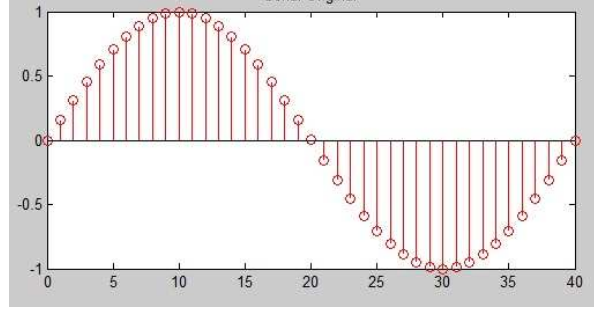


Figura 2.5: Señal Digital.

2.3.3. Teorema de Muestreo

Es la medición de la amplitud de la señal en intervalos regulares de tiempo (frecuencia constante)

Tenemos la siguiente ecuación:

$$g\delta(t) = \sum_{n=-1}^{\infty} g(nT_s)\delta(t - nT_s) \quad (2.1)$$

Ahora vamos a muestrear dicha señal a un periodo T_s y de igual forma a una frecuencia de $1/T_s$. Como vemos en la ecuación 2.1 , se encuentra presente un delta, el cual está ahí porque esta ecuación se está multiplicando por un tren de deltas con un espacio de T_s entre uno y otro. La señal de la ecuación 2.1 se puede expresar como el producto de la $g(t)$ por la función delta (muestreo ideal) con un periodo ideal T_s como lo vemos en esta ecuación 2.2 :

$$g\delta(t) = g(t)\delta_{T_s}(t) = g(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \quad (2.2)$$

Ahora tenemos que la transformada de Fourier de la función delta es:

$$\delta_{T_s}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \iff \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - \frac{n}{T_s}) \quad (2.3)$$

Ahora, si suponemos que la transformada de Fourier de $g(t)$ es $G(f)$, se obtendrá la convolución de las transformadas anteriormente mencionadas así:

$$G_{\delta}(f) = G(f) * \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - \frac{n}{T_s}) \quad (2.4)$$

Si se intercambia la sumatoria y la convolución se obtiene:

$$G_{\delta}(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} G(f) * \delta(f - \frac{n}{T_s}) \quad (2.5)$$

En la siguiente ecuación, podemos notar que la convolución de una señal delta desplazada con otra hace que esta se desplace :

$$G(f) * \delta(f - \frac{n}{T_s}) = G(f - \frac{n}{T_s}) \quad (2.6)$$

Y en definitiva, de todo este proceso obtenemos la ecuación siguiente:

$$G_{\delta}(f) = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} G(f - \frac{n}{T_s}) \quad (2.7)$$

De todo lo anteriormente mencionado podemos concluir que sin importar las características de la señal en el dominio del tiempo se debe de analizar el dominio en términos de frecuencia.

Gráficamente, vemos una señal analógica y su respectiva conversión digital:

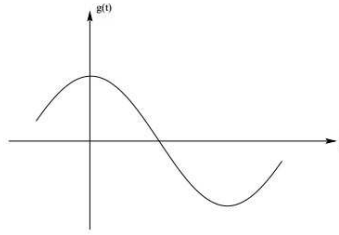


Figura 2.6: Onda seno, tomada de [3].

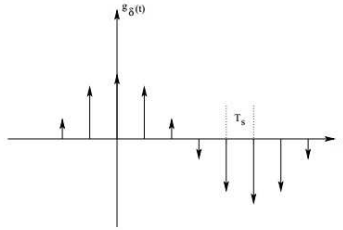


Figura 2.7: Onda seno muestreada, tomada de [3].

2.4. Grados de libertad

Es el movimiento que realiza un cuerpo en un espacio tridimensional hacia diversos puntos, como por ejemplo puede ser un movimiento de izquierda a derecha, arriba y abajo

o adelante o atrás. Estos movimientos son muy usados en la robótica cuando se decide a hacer un prototipo como un brazo, ya que estos dispositivos pueden llegar a ser realizados para suplir las necesidades de los humanos en relación a sus movimientos y funciones relacionadas a la industria. La categorización dada a los grados de libertad (Puede ser de 1 a 6) está dada por el número de rotaciones que pueda tener el prototipo en un solo eje.

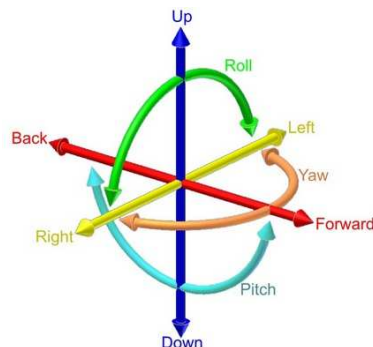


Figura 2.8: Tomada de wikipedia

2.5. Microcontrolador

Es un circuito integrado programable capaz de cumplir con las funciones que el usuario decide guardar en su memoria. Este dispositivo está compuesto por varias etapas que cumplen diversas funciones al interior del dispositivo. Es de programación básica y por esto se usa en una gran cantidad de dispositivos en la actualidad. Un microcontrolador cuenta con periféricos de entrada, salida, memoria y procesamiento interno. Un microcontrolador en su interior posee la siguiente estructura: Registros, Unidad de Control, Unidad Aritmético-Lógica, Buses, Memoria, Interrupciones, Periféricos (Entrada, Salida y de propósito general), Temporizador, convertidor analógico-Digital, Puerto de Comunicación Serial, Comunicación USB.

Altair

Es un microcontrolador de propósito general programable desde equipos de cómputo y compatible con lenguajes de programación como Basic, ensamblador y C. Estos microcontroladores poseen 256 bytes de memoria interna, puertos de entrada y salida, 128 registros especiales

Intel

Su primer modelo es el 8051 el cual es un microcontrolador de 8 bits, posee 128 bytes de memoria RAM interna, un puerto serie, dos temporizadores, cuatro puertos de entrada/-salida de propósito general.

Siemens

La referencia SAB80C515 es uno de los microcontroladores mas conocidos de esta marca. Su tecnología es CMOS, la cual reduce los niveles de energía la cual aventaja a su antecesor

que no era CMOS y por esto consumía mas energía. Posee un versátil puerto analógico-digital. Es compatible con el lenguaje de programación assembly.

Motorola

El 68hc11 es la referencia mas conocida y potente de microcontroladores de esta marca, posee un bus de datos de 8 bits de datos, 16 bits de direcciones. Tiene internamente memoria EEPROM, RAM, Entradas y salidas digitales, convertidor analógico/Digital, timers, canales de comunicación RS232 y puerto pwm entre sus datos mas conocidos.

Microchip

Son componentes de bajo costo y alta calidad y buen rendimiento. Estos controladores son muy conocidos en el mercado y sus familias 16fxx, 18fxx son muy usadas por su versatilidad y su costo reducido



Figura 2.9: Microcontroladores.

2.6. Control

Para mantener estable un sistema, es necesario mantener las variables que inciden sobre este en equilibrio de acuerdo a su funcionalidad. Es por esto que se emplea el Control sobre diversos sistemas, para mantenerlos en pleno funcionamiento evitando perturbaciones y cambios que se presenten. Como se ve evidente en el libro de Ogata [8] "el control automático se ha vuelto una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de manufactura". Por ejemplo, si tenemos un sistema en el que la variable más preponderante del proceso es la temperatura, pero este sistema sin una etapa de control podría elevar esta variable física hasta un punto de peligroso para los operarios y obligaría a un usuario a estar vigilando constantemente si la temperatura se está elevando y aplicar una acción correctiva ante esto. Es por esto que aplicamos una etapa de control, para mantener estable un sistema (en este caso el sistema de temperatura) y evitar que los operarios estén vigilando el sistema en tiempos cortos.

2.6.1. Control Proporcional

En este tipo de controlador solo se agrega una ganancia proporcional al mismo. La salida del controlador es proporcional a la magnitud del error, es claro aclarar que en este tipo de control el error no se elimina, solo aumenta el nivel offset de la señal de salida y tiene como un gran defecto que el sistema es más sensible a las perturbaciones y menos estable. Este tipo de controlador no es accesible a todo tipo de plantas.

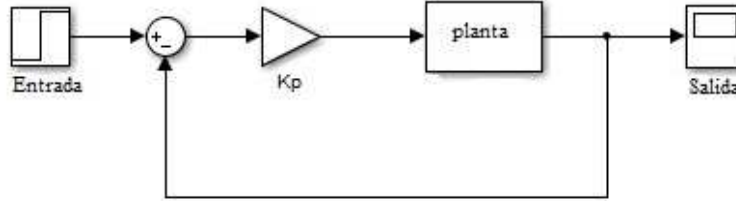


Figura 2.10: Esquema de Controlador con Ganancia K_p (Proporcional).

2.6.2. Control Proporcional Integrativo

Este controlador disminuye el tiempo de subida, elimina el error de estado estable pero a su vez incrementa el sobre impulso y el tiempo de estabilización del sistema. El control Proporcional-Integral se define como:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.8)$$

El controlador se representa gráficamente de la siguiente forma:

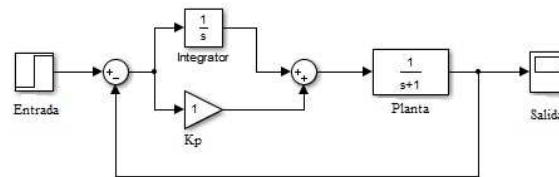


Figura 2.11: Esquema de Controlador Proporcional-Integrativo (PI).

2.6.3. Control Proporcional, Integral, Derivativo

Este control es la unión del control Proporcional, el control integrativo y el derivativo. Este control se describe en la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.9)$$

En esta ecuación vemos que T_i es el tiempo integral, T_d es el tiempo derivativo y K_p es, como ya se había comentado anteriormente, la ganancia proporcional.

La gráfica que describe este controlador es la siguiente:

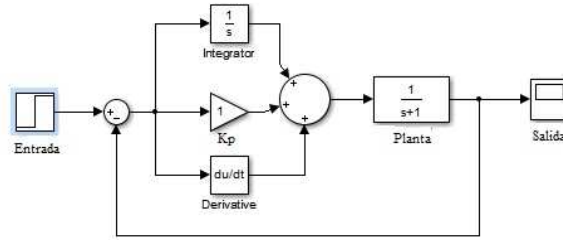


Figura 2.12: Esquema de Controlador Proporcional-Integrativo-Derivativo(PID).

2.7. Sistemas Lineales

La linealización es el proceso mediante el cual un sistema no lineal es aproximado a un sistema lineal. En los sistemas no lineales se tienen muchos problemas cuando se requiere realizar un análisis dinámico, en este caso se pueden usar alternativas como estas:

1. Convertir el sistema no lineal en un sistema lineal haciendo una buena transformación de las variables del sistema.
2. Actualmente, en computadora se puede simular el sistema y calcular su solución numérica.
3. Calcular un sistema lineal que aproxime el comportamiento del sistema dinámico no-lineal alrededor de un punto de equilibrio sobre el cual se desea operar.

Los sistemas lineales presentan la siguiente propiedad:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.10)$$

Con esta propiedad se satisface:

1. El principio de superposición.
2. Estabilidad entre la entrada y la salida en presencia de u , es decir, la salida es limitada de acuerdo a la entrada.
3. A una entrada Senoidal la salida tendrá la misma frecuencia, pero posiblemente diferente amplitud y fase.

2.8. Sistemas No Lineales

Los sistemas no lineales son aquellos en los cuales el principio de superposición no es aplicable, con esto se hace referencia a los sistemas cuya entrada tiene una salida particular y es complejo prever y no se puede anticipar su salida ante otro tipo de entrada.

El análisis de un sistema no lineal es complejo debido a su carencia de linealidad. Los sistemas no lineales responden de diversas formas a señales de excitación en relación a los sistemas lineales. Cabe aclarar que un controlador no lineal puede ser linealizado en un punto de equilibrio al cual va a reaccionar como si fuese un sistema lineal, pero al recibir cambios en sus entradas este reaccionará inmediatamente como un sistema no lineal.

Algo importante que se debe saber de este tipo de sistemas es que su salida producirá frecuencias que no estaban presentes a la entrada del mismo. Algunos sistemas no lineales presentan similitud a los sistemas lineales a excitaciones bajas, pero al aumentar la entrada el sistema se convierte en inestable. La linealización de los sistemas no lineales es muy útil pero es importante aclarar que esta solo puede ser útil en un rango de valores en los cuales el sistema presente comportamiento similar a la linealidad.

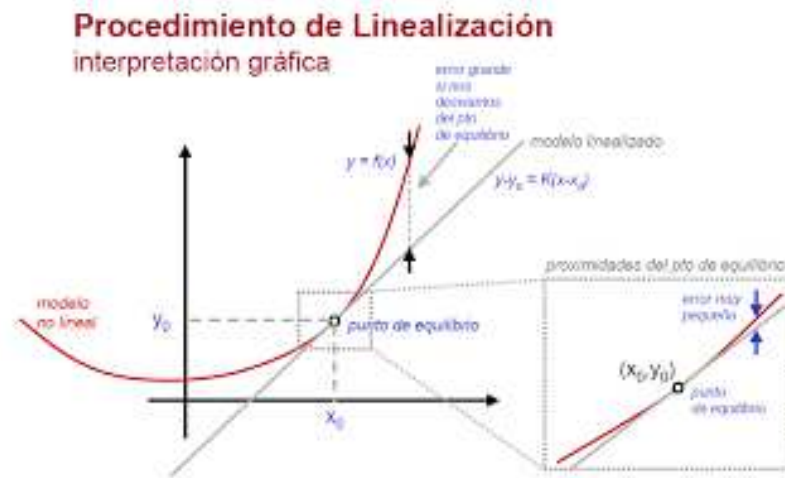


Figura 2.13: Imagen tomada de la Universidad De Oviedo.

2.8.1. Series de Taylor

Es una sumatoria infinita de términos que representan una función determinada. Para encontrar los valores de la serie se deben de calcular sus derivadas para su solución.

La serie de Taylor se representa de la siguiente forma:

$$f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x - a) + \frac{f''(a)}{2!}(x - a)^2 + \frac{f^3(a)}{3!}(x - a)^3 + \dots \quad (2.11)$$

Su representación en forma de sumatoria es la siguiente:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^n(a)}{n!} (x-a)^n \quad (2.12)$$

2.9. Motor EMG-30

Es un motorreductor con encoder con una caja de relación 30:1. Este motor es muy usado en aplicaciones de robótica de baja y media gama. Contiene un condensador de supresión de ruido a través de los devanados del motor.

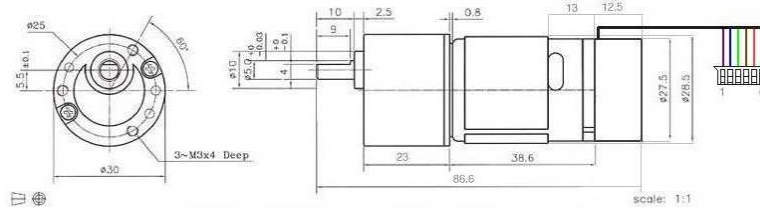


Figura 2.14: Medidas del Motor EMG-30.

ESPECIFICACIONES	
Voltaje nominal	12 v
Torque Nominal	1.5 kg/cm
Velocidad Nominal	170 rpm
Corriente Nominal	530 mA
Velocidad sin Carga	216 rpm
Corriente sin Carga	150 mA
Potencia de Salida	4.22 W
Conteo de encoder por vuelta	360

Tabla 2.1: Tabla EMG30

Los sensores del motor aceptan voltajes entre 3.5v y 20v

Para acoplar los sensores de salida es necesario realizar una conexión pull-up.

Las especificaciones del motor son las siguientes:

2.10. Módulo USB

Universal Serial Bus es un estándar industrial usado en la conexión de periféricos (mouse, teclados, joystick, impresoras, convertidores entre otros) a computadores. Actualmente este estándar también es usado en conexión de dispositivos móviles. En la siguiente imagen podemos notar la diferencia de velocidades entre el puerto serial, el paralelo y el USB.

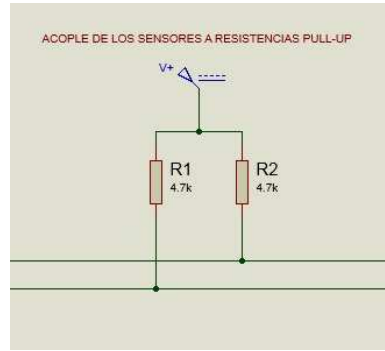


Figura 2.15: Resistencias Pull-Up de 4,7 K para garantizar el funcionamiento de los sensores.

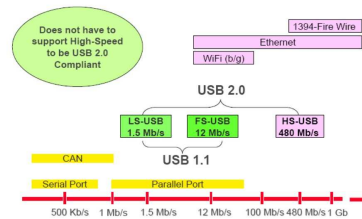


Figura 2.16: Velocidad de Puertos Periféricos (Tomada de la Página oficial de MICRO-CHIP)

En la siguiente imagen podemos notar la diferencia de velocidades entre el puerto serial, el paralelo y el USB. El puerto USB ha evolucionado y esto es debido a sus aplicaciones a través del tiempo, ya que en sus inicios tenía limitaciones dependiendo de los dispositivos a conectar.

EVOLUCIÓN DEL PUERTO USB	DISPOSITIVOS
USB 1.1 y 2.0 de Velocidad Baja	Teclados, Mouse y joysticks
USB 1.1 y 2.0 de Máxima Velocidad	Cámaras, Impresoras y Controladores de Audio
USB 2.0 de Alta Velocidad	Cámaras de Video, Dispositivos de Almacenamiento
USB 2.0 On-The-Go	Dispositivos Periféricos de Comunicación Directa.
USB 2.0 Wireles	Dispositivos USB que se conectan a Internet (Modem)

Tabla 2.2: Conectores USB

Los tipos de conectores USB los mostraremos en la siguiente imagen:



Figura 2.17: Conectores USB (Tomada de Microchip)

CAPÍTULO 3

Aspectos metodológicos

3.1. Estrategia de análisis

El proyecto se implementó mediante la metodología RUP (Rational Unified Process). Esta metodología de desarrollo de software es “muy utilizada en el análisis, implementación y documentación orientada a objetos” [11].

Se decide desarrollar el proyecto con esta metodología por su estructura, ya que plantea una organización adecuada para el proyecto. Dicha organización involucra cuatro fases, las cuales son: inicio, elaboración, construcción y transición. De estas fases solo usaremos las tres primeras, ya que la cuarta se relaciona específicamente con proyectos de tipo comercial, y no es apropiada para este caso.

Las tres fases que se usaron en el proyecto son las siguientes:

FASE DE INICIO: En esta fase se estudiarán los fundamentos teóricos y los criterios que serán apropiados para el desarrollo del proyecto. Es importante recopilar información necesaria para el desarrollo del proyecto, ya que ésta fortalece las bases del mismo. Se deberán de seleccionar los criterios más adecuados para el desarrollo del sistema de control PID digital, de la tarjeta de adquisición de datos y de la estructura del brazo robótico. Un criterio esencial para que el proyecto tenga viabilidad desde su inicio es el aporte que se espera realizar a los estudiantes de la Universidad Pedagógica Nacional con la construcción de este proyecto de grado, ya que va a ser empleado como apoyo a los conceptos vistos en el área de Control.

FASE DE ELABORACIÓN: Esta fase está orientada a organizar la estructura del proyecto y se compone de tres partes, las cuales son: Análisis, diseño e implementación. En la primera desarrollaremos los cálculos teóricos de las diferentes partes que componen nuestro sistema. Un elemento fundamental en esta fase es el controlador PID, ya que aquí desarrollamos de forma teórica el modelo de la planta y podremos ver un acercamiento

al comportamiento real. En la segunda se organizará el esquema conjunto que evidencie la estructuración del proyecto, mostrando la forma en la cual se ubican los elementos que llegan a solucionar los criterios enunciados previamente. En el último se obtendrá la simulación del sistema obtenido de las etapas anteriores.

FASE DE CONSTRUCCIÓN: En esta fase se desarrolla el proyecto de forma tangible, es decir, se ve implementado el desarrollo que se simuló en la fase anterior. En esta fase se desarrollará de forma práctica la instrumentación del brazo, la construcción de la programación adecuada para la tarjeta de adquisición de datos como para la interfaz gráfica y la implementación del diseño del controlador.

CAPÍTULO 4

Desarrollo Brazo Robótico

4.1. Modelamiento matemático

El sistema del brazo robótico está compuesto por un moto reductor en este caso EMG30 el cual posee un encoder de efecto hall con una resolución de 360, una barra con una longitud l a la cual se le acopla una masa m la cual se podrá modificar para efectos de diseño del controlador.

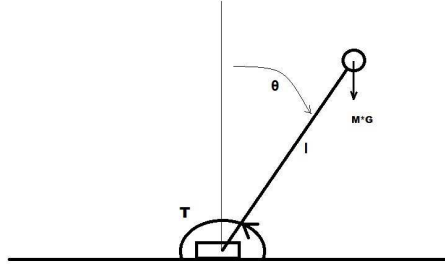


Figura 4.1: Modelamiento matemático

Como se sabe el torque del motor esta dado por la ecuación 4.1

$$T = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (4.1)$$

En donde:

T = Par torque aplicado

J = Momento de inercia respecto a su punto de giro

B = Coeficiente de fricción viscosa

Ahora agregándole a la ecuación 4.1 la parte mecánica del brazo obtenemos la ecuación 4.2



Figura 4.2: Motor EMG30

$$T = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + B \frac{d\theta(t)}{dt} + m \cdot l \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (4.2)$$

Los parámetros de momento de inercia y coeficiente de fricción viscosa no los da el fabricante por lo que toca por medio del system identification obtenerlos, para esto se realiza el montaje de un 555 para alimentar el motor y un conversor frecuencia a voltaje para tener la respuesta del motor como se puede ver en la figura 4.3

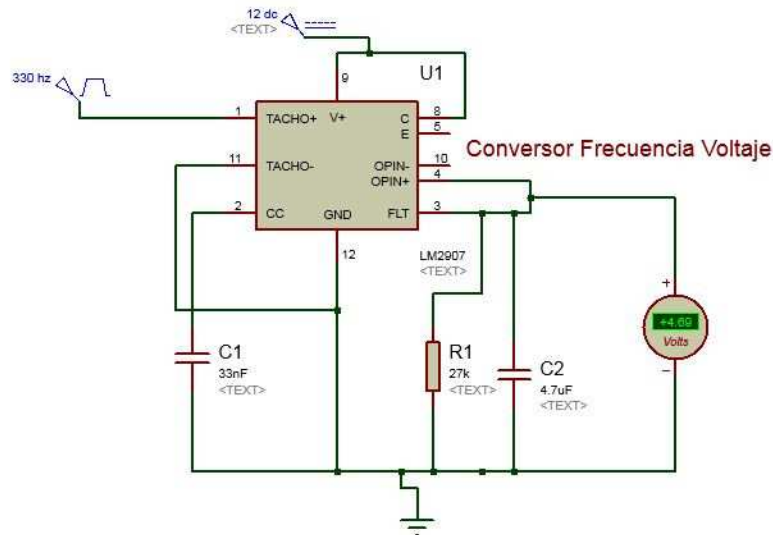


Figura 4.3: Conversor Frecuencia-Voltaje

Haciendo esto pudimos obtener los parámetros siguientes, con los cuales podemos hacer ya la representación en espacio estado.

J 0.0083
b 0.0364
T 1.5

4.1.1. Ecuaciones espacio estado

Con la ecuación 4.2 adquirimos el diagrama de espacio estado, teniendo en cuenta que la salida del sistema será el ángulo de giro, partiendo de ahí se escogen como variables de estado la salida y sus derivadas.

$$x_1 = \theta(t) \quad (4.3)$$

$$x_2 = \frac{d\theta}{dt} \quad (4.4)$$

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 \quad (4.5)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{j}(-Bx_2 - mgl\sin(x_1) + T) \quad (4.6)$$

Como podemos observar el sistema no es lineal, ya que tiene un seno en la ecuación por lo tanto tenemos que linealizar, para este caso ($\sin x$) procederemos a linealizarlo por series de Taylor sabiendo que:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n \quad (4.7)$$

$$f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots \quad (4.8)$$

Teniendo en cuenta el punto de linealización va a ser 0.785 reemplazamos:

$$y(x) = \frac{\sin(0,785)(x-0,785)^0}{0!} + \frac{\cos(0,785)(x-0,785)^1}{1!} \quad (4.9)$$

$$\sin(x) = 0,707x + 0,1517|_{x=0,785} \quad (4.10)$$

Reemplazando ?? en 4.6 obtenemos que:

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{j}(-Bx_2 - mgl(0,707x_1 + 0,1517) + T) \quad (4.11)$$

Despejando tenemos:

$$\dot{x}_2 = -\frac{0,707mgl}{J} \cdot x_1 - \frac{B}{J} \cdot x_2 - \frac{1}{J}(-0,1517mgl + T) \quad (4.12)$$

Con la ecuación 4.12 y la ecuación 4.5 podemos armar el diagrama de espacio estado.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{0,707mgl}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J}(T - 0,1517mgl) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Y la de salida es:

$$[Y] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

4.1.2. Comunicación brazo y tarjeta de adquisición

Para la comunicación entre el brazo robótico y Matlab se hace a través de un pic16f877a, el que también se encargara de controlarlo, por rs232 a la tarjeta de adquisición, el pic se encarga de recibir la información de los sensores de efecto hall del motor.

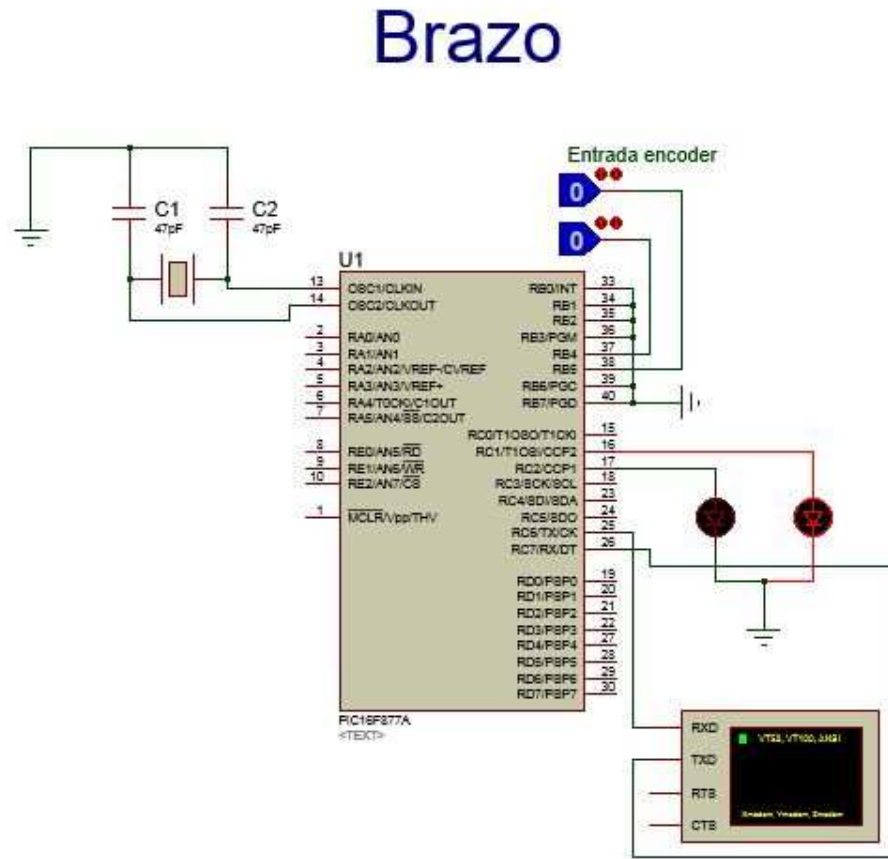


Figura 4.4: Comunicación sensores y pic a tarjeta de adquisición

El pic recibe la información de los sensores haciendo uso de la interrupción por cambio de estado en RB4-RB7 y hace una comparación entre el dato recibido y el anterior para saber si avanzó o disminuyó un grado. Los sensores del encoder están desfasados 90 grados como se puede ver en la figura 5.1.

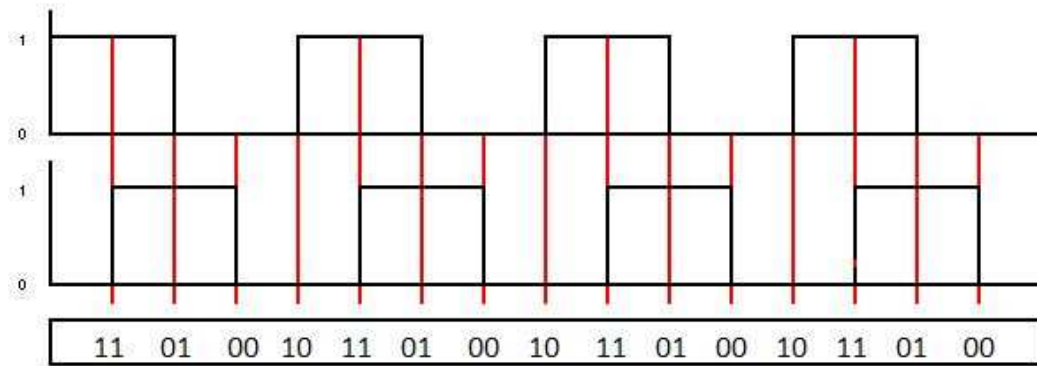


Figura 4.5: Encoder EMG30

A continuación se muestra una parte del código en picc con el que se hizo el conteo de grados en donde se lee el puerto B completo y se guarda en una variable llamada x para luego comparar con el dato anterior y saber si sumar o restar grados.

```
x=puerto_B;

if(x1==0)
    if(x==32)
        n++;
if(x1==32)
    if(x==48)
        n++;
if(x1==48)
    if(x==16)
        n++;
if(x1==16)
    if(x==0)
        n++;
if(x1==0)
    if(x==16)
        n--;
if(x1==16)
    if(x==48)
        n--;
if(x1==48)
    if(x==32)
        n--;
if(x1==32)
    if(x==0)
        n--;
x1=x;
```

La interfaz en Matlab se hizo mediante GUIDE. Figura 4.6



Figura 4.6: Interfaz Gráfica en Matlab

La interfaz gráfica recibe los grados en los que se encuentra actualmente el motor a través de la tarjeta de adquisición de datos y se encarga también de enviar los grados y las ganancias P, I, D que el usuario quiere, al pic que controla el brazo. Esta comunicación se lee en Matlab como serial y se utiliza el protocolo 232 para su funcionamiento.

4.1.3. Sistema de control del brazo

El objetivo principal del control PID digital es poder controlar de forma eficaz la posición del brazo robótico por medio de la variable de actuación del ciclo útil del PWM. Para esto se tiene en cuenta el cálculo del error (posición de referencia - posición del motor actual) ecuación 4.15 y con base en este se genera la señal para controlar el PWM.

$$e(t) = (P_{ref} - P_{act}) \quad (4.15)$$

Con el error de la ecuación 4.15 podemos generar la ecuación diferencial del controlador, que en tiempo continuo está representado por la ecuación 4.16 como se vio en el capítulo anterior.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) \quad (4.16)$$

Para hacer el controlador primero se mira el tiempo de respuesta y el diagrama de polos y ceros ingresando el diagrama de espacio estado en Matlab y luego analizándolo con el sisotool.

```
%Espacio estados
m=0.1; %
g=9.5;
l=50;
B=0.0364;
J=0.0083;
T=1.5;

A=[0 1; (-0.707*m*g*l/J) -B/J]
B=[0 ; (-0.1517/J+T/J)]
C=[1 0]
D= [0]

sys=ss(A,B,C,D)

%pasar a función de transferencia

[NUM,DEN]=ss2tf(A,B,C,D)
sys2=tf(NUM,DEN)
```

Posteriormente se procede a analizar el código con sisotool (sisotool(sys)) y podemos observar que el sistema es demasiado inestable como se evidencia en la figura 4.7

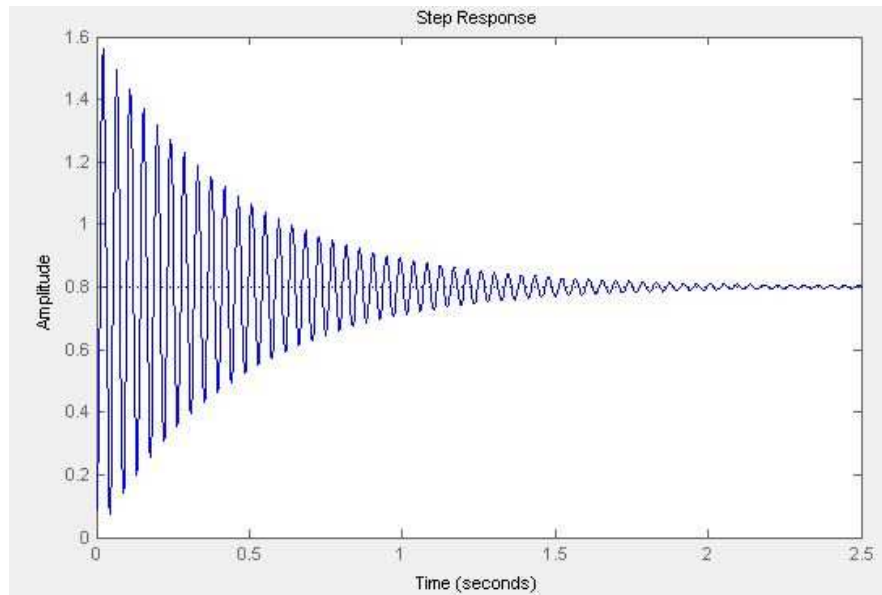


Figura 4.7: Respuesta del sistema

Y su respectivo diagrama de polos y ceros se puede ver en la figura 4.8

Por último para diseñar el controlador agregamos al diagrama de polos y ceros los requerimientos que deseamos, obteniendo la gráfica 4.9 de esta forma logrando estabilizar la planta.

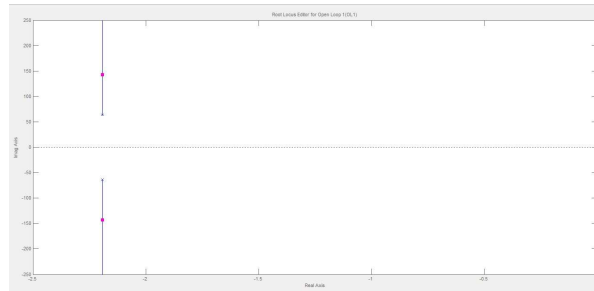


Figura 4.8: Diagrama de polos y ceros

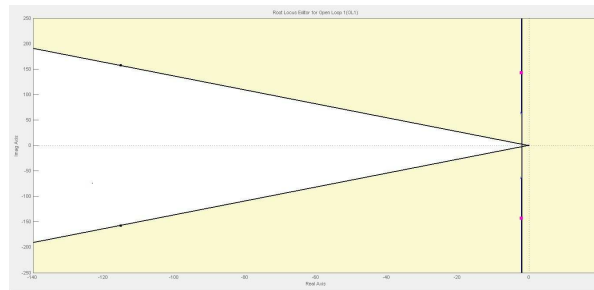


Figura 4.9: Diagrama de polos y ceros con requerimientos necesarios

Obteniendo después de agregarlos la siguiente respuesta. Figura 4.10.

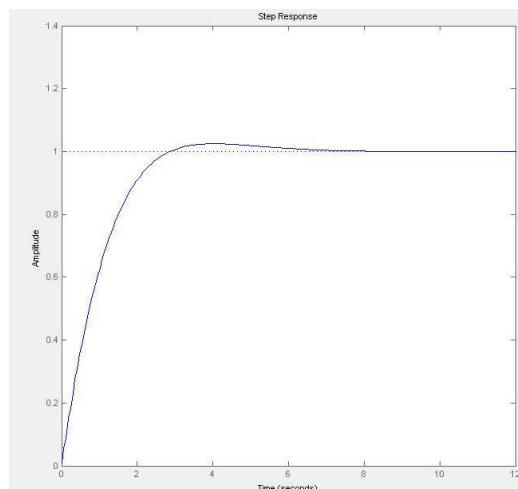


Figura 4.10: Sistema estable

4.1.4. Etapa de potencia y puente H

Para la etapa de potencia del brazo robótico se utilizó un circuito l298n el cual es un controlador puente H de 2A, el encapsulado además proporciona la suficiente corriente para el movimiento del motor, Las conexiones para el LM298 se presentan en la figura 4.11.

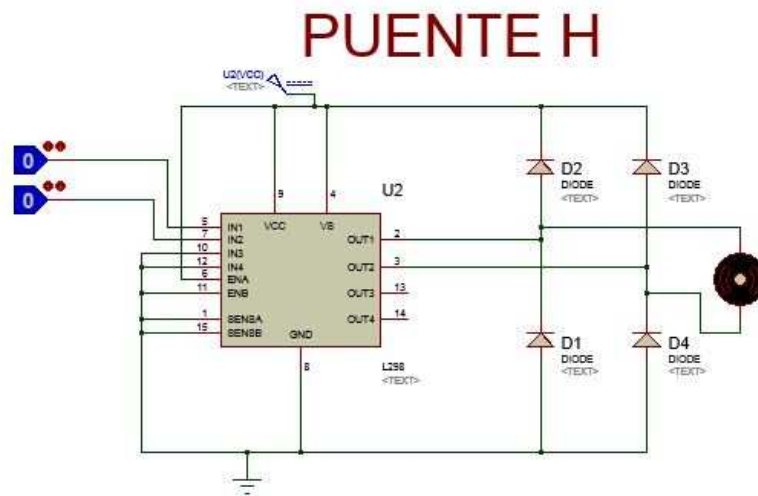


Figura 4.11: Lm298n Puente H

4.1.5. Fuente 12 - 5 V DC p

La alimentación del Brazo se hace mediante una fuente DC diseñada por los autores, para su diseño se utilizó un transformador de 2 Amperios con salida de 14 v, un puente de diodos que rectifica la señal, un lm7805 regulador de tensión de 5v y un lm317 regulador de tensión ajustable, el cual se adecuó para obtener una salida de 12 V DC. Figura 4.12

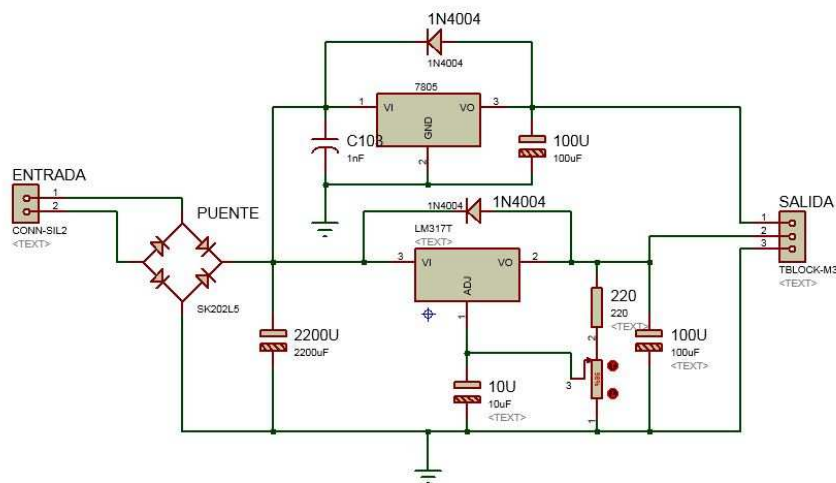


Figura 4.12: Fuente 12 - 5V DC

CAPÍTULO 5

Tarjeta de Adquisición

5.1. Adquisicion Pic 18f4550

La tarjeta de adquisición de datos se diseñó con un pic 18f4550 utilizando de la comunicación usb que el pic hace con el computador, las señales se reciben por medio del análogo digital del pic, el cual las procesa y las envía a una interfaz de usuario en LabView donde el usuario puede ver las señales cambiando la escala en x como se mostrará posteriormente. La tarjeta de adquisición además recibe por el puerto serial los datos de los grados en los que se encuentra el brazo robótico para posteriormente enviarla a la interfaz de Matlab donde el usuario podrá visualizarlos, cambiar las ganancias de control proporcional, integral y derivativo y enviarlas al pic junto con los grados en los que quiere que el brazo robótico se quede.

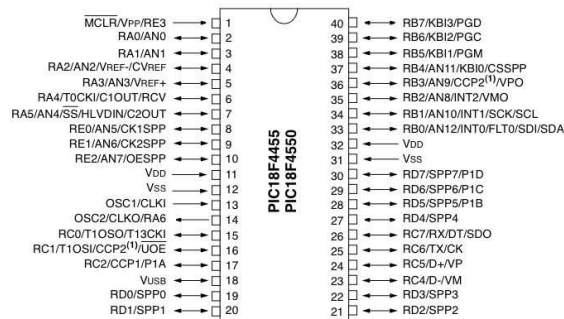


Figura 5.1: Pic 18f4550

5.2. USO DE PROTOCOLO USB

Para la comunicación USB se hizo uso de las funciones que el lenguaje C del programa PIC c compiler contiene preparadas para efectuarla, en este caso se va a usar el protocolo

Parameter Name	Value
Program Memory Type	Flash
Program Memory (KB)	32
CPU Speed (MIPS)	12
RAM Bytes	2.048
Data EEPROM (bytes)	256
Digital Communication Peripherals	1-UART, 1-A/E/USART, 1-SPI, 1-I2C1-MSSP(SPI/I2C)
Capture/Compare/PWM Peripherals	1 CCP, 1 ECCP
Timers	1 x 8-bit, 3 x 16-bit
ADC	13 ch, 10-bit
Comparators	2
USB (ch, speed, compliance)	1, Full Speed, USB 2.0
Temperature Range (C)	-40 to 85
Operating Voltage Range (V)	2 to 5.5
Pin Count	40

Tabla 5.1: Tabla de parámetros del Pic 18f4550

usb cdc, que ya se explicó anteriormente, y para lo cual es necesario utilizar un cristal de 48Mhz.

Configuramos los fusibles necesarios para que el sea reconocida y otras configuraciones.

```
#fuses HSPLL, NOWDT, NOPROTECT, NOLVP, NODEBUG, USBDIV, PLL5, CPUDIV1, VREGEN
```

Usamos un HSPLL indicando el multiplicador PLL5 para el cristal externo, pues se usa uno de 20Mhz. Para la comunicación USB es necesario colocar los Fusibles USBDIV, CPUDIV1, VREGEN

Posteriormente se nombran las librerías que se van a usar para la comunicación

```
#include <usb_cdc.h>
#include <usb_desc_cdc.h>
```

Utilizamos el protocolo usb cdc como ya se hacía comentado y la librería para este, esta librería internamente configura muchos parámetros de la comunicación, como la lectura, escritura, entre otros, la otra usb desc cdc.h configura la comunicación con el computador el PID Y VID necesarios para que el sea reconocida y otras configuraciones. En este caso el programa está configurado para usar los de Microship.

```
#define USB_CONFIG_PID 0x0033
#define USB_CONFIG_VID 0x0461
```

Iniciamos el usb:

```
usb_cdc_init();
usb_init();
```

Y comprobamos si el computador lo reconoció entrando en un while para poder proseguir con el programa y ejecutar una nueva tarea.

```
while(!usb_cdc_connected()) {}
do {
    usb_task();
    if (usb_enumerated()) {
```

Esta última línea comprueba que la comunicación empezó entre el computador y el pic.

De esta forma queda configurada toda la comunicación USB CDC del pic 18f4550 con el computador.

El driver que se utiliza para la instalación en el computador es el siguiente:

```
; Windows USB CDC ACM Setup File
; Copyright (c) 2000 Microsoft Corporation
; Copyright (C) 2007 Microchip Technology Inc.
```

```
[Version]
Signature="$Windows_NT$"
Class=Ports
ClassGuid={4D36E978-E325-11CE-BFC1-08002BE10318}
Provider=%MFGNAME%
LayoutFile=layout.inf
CatalogFile=%MFGFILENAME%.cat
DriverVer=03/11/2010,5.1.2600.2
```

```
[Manufacturer]
%MFGNAME%=DeviceList, NTamd64
```

```
[DestinationDirs]
DefaultDestDir=12
```

```
;
```

```
; Windows 2000/XP/Server2003/Vista/Server2008/7 - 32 bit Sections
```

```
;
```

```
[DriverInstall.nt]
include=mdmcpq.inf
CopyFiles=DriverCopyFiles.nt
AddReg=DriverInstall.nt.AddReg
```

```
[DriverCopyFiles.nt]
usbser.sys,,0x20
```

```
[DriverInstall.nt.AddReg]
HKR,,DevLoader,*ntkern
HKR,,NTMPDriver,%DRIVERFILENAME%.sys
HKR,,EnumPropPages32,"MsPorts.dll,SerialPortPropPageProvider"
```

```
[ DriverInstall.nt.Services ]
AddService=usbser , 0x00000002 , DriverService.nt
```

```
[ DriverService.nt ]
DisplayName= %SERVICE %
ServiceType=1
StartType=3
ErrorControl=1
ServiceBinary= %2 %\ %DRIVERFILENAME%.sys
```

```
; Windows XP/Server2003/Vista/Server2008/7 - 64bit Sections
```

```
[ DriverInstall.NTamd64 ]
include=mdmcpq.inf
CopyFiles=DriverCopyFiles.NTamd64
AddReg=DriverInstall.NTamd64.AddReg
```

```
[ DriverCopyFiles.NTamd64 ]
%DRIVERFILENAME%.sys , , 0x20
```

```
[ DriverInstall.NTamd64.AddReg ]
HKR, , DevLoader , , *ntkern
HKR, , NTMPDriver, , %DRIVERFILENAME%.sys
HKR, , EnumPropPages32 , , "MsPorts.dll , SerialPortPropPageProvider "
```

```
[ DriverInstall.NTamd64.Services ]
AddService=usbser , 0x00000002 , DriverService.NTamd64
```

```
[ DriverService.NTamd64 ]
DisplayName= %SERVICE %
ServiceType=1
StartType=3
ErrorControl=1
ServiceBinary= %2 %\ %DRIVERFILENAME%.sys
```

```
; Vendor and Product ID Definitions
```

```
; When developing your USB device , the VID and PID used in the PC
; side
; application program and the firmware on the microcontroller must
; match.
; Modify the below line to use your VID and PID. Use the format as
; shown below.
; Note: One INF file can be used for multiple devices with different
; VID and PIDs.
; For each supported device , append " ,USB\VID_xxxx&PID_yyyy" to the
; end of the line .
```

```
[ SourceDisksFiles ]
```

```

[SourceDisksNames]
[DeviceList]
%DESCRIPTION%=DriverInstall, USB\VID_0461&PID_0033

[DeviceList.NTamd64]
%DESCRIPTION%=DriverInstall, USB\VID_0461&PID_0033
;

; String Definitions
;

; Modify these strings to customize your device
;

[Strings]
MFGFILENAME="mchpedc"
DRIVERFILENAME ="usbser "
MFGNAME="Microchip_Technology , _Inc ."
INSTDISK="Microchip_Technology , _Inc _ Installation _ Disc "
DESCRIPTION="Data_Adquisition_TOOL"
SERVICE="USB_Data_Adquisition_TOOL"

```

5.2.1. Puerto Análogo digital

La adquisición de las señales las hacemos a través del puerto análogo digital para esto se configura el análogo digital a 8 bits con el fin de obtener un tiempo de respuesta mucho más rápido.

```
ADC=8
```

También se configuran los puertos que se desean usar en este caso el análogo 0

```
setup_adc_ports(AN0|VSS_REF);
```

Para la señal de entrada el puerto se configura de forma que los limites sean VSS y el análogo 3 el cual servirá como punto de referencia positivo con el fin de optimizar las señales de entradas pequeñas.

La conversión de la señal analógica con una entrada de 1 voltio y una comparación de VSS y VDD tendríamos una resolución de:

$$\frac{5V}{255} = 19,607mV \quad (5.1)$$

Pero al tener un voltaje de referencia de 1 voltio para nuestra señal de entrada pequeña tendríamos:

$$\frac{1V}{255} = 3,92mV \quad (5.2)$$

Con lo cual se mejora notablemente la adquisición de señales de voltaje no muy alto, para

que el usuario pueda obtener una resolución mejor sin importar la amplitud de su señal se agregara un potenciómetro.

Por último configuramos el análogo digital para obtener el tiempo de muestreo mayor posible, dividiendo el reloj en 64

```
setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_64);
```

Como se sabe el puerto análogo digital solo recibe señales positivas por lo tanto si se le ingresa una señal como la que se puede ver en la imagen 5.2 (a) el puerto análogo solo verá la parte positiva 5.2(b)

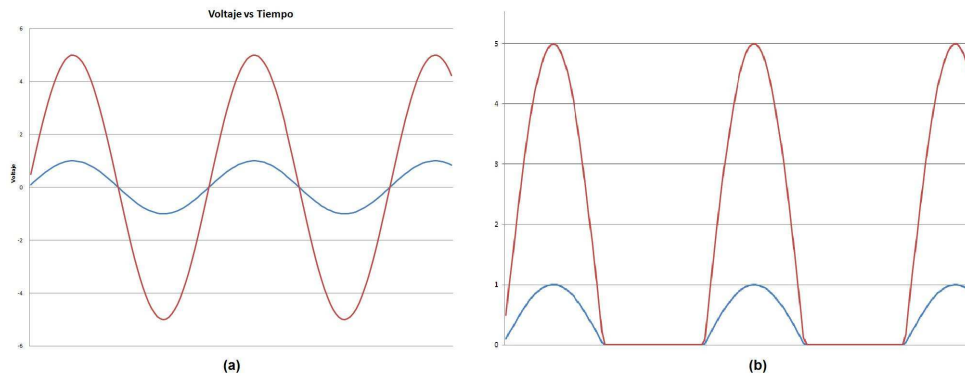


Figura 5.2: Señal Análogo digital

Por lo que en una entrada se le ingresa una señal offset de 2.5 con el fin de obtener una buena señal pico a pico de 5v Figura 5.3

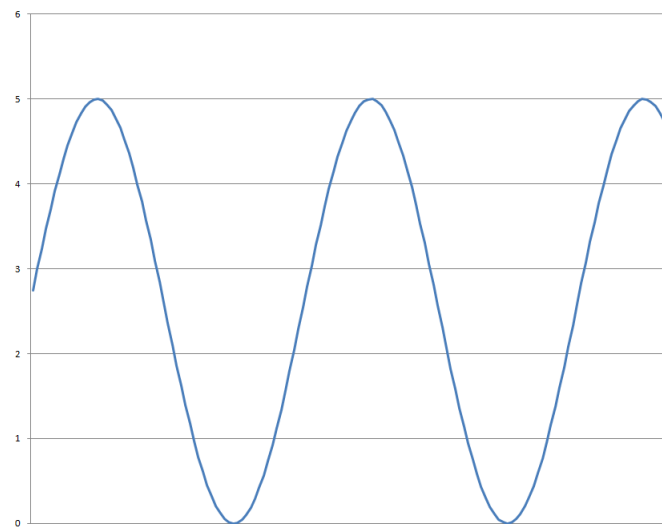


Figura 5.3: Señal Análogo con voltaje offset

5.2.2. Interfaz Gráfica LabView

La comunicación en Labview se realiza por medio del modulo VISA el cual se encarga de leer el puerto serial (COM) del computador seleccionado Figura 5.4

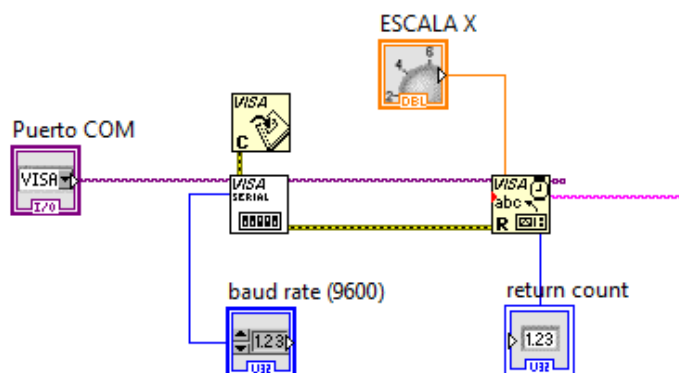


Figura 5.4: Modulo VISA LabView

También hacemos la conversión en Labview para parametrizar la señal a 5V, esto se hace gracias a los módulos matemáticos como se puede ver en la figura 5.5

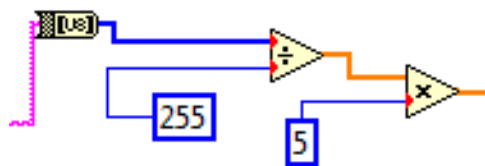


Figura 5.5: Parametrización LabView

Por ultimo para mejorar la calidad de la señal se le agrega un filtro digital pasabajos Butterworth con una frecuencia de corte de 2Khz 5.6.

Teniendo como resultado final una señal como la que se muestra en la figura 5.7 en donde se muestra la señal de 60Hz con y sin el filtro butterworth.

Uniando los modelos a una salida Grafica obtenemos el resultado final para la visualización de los datos 5.8 5.9

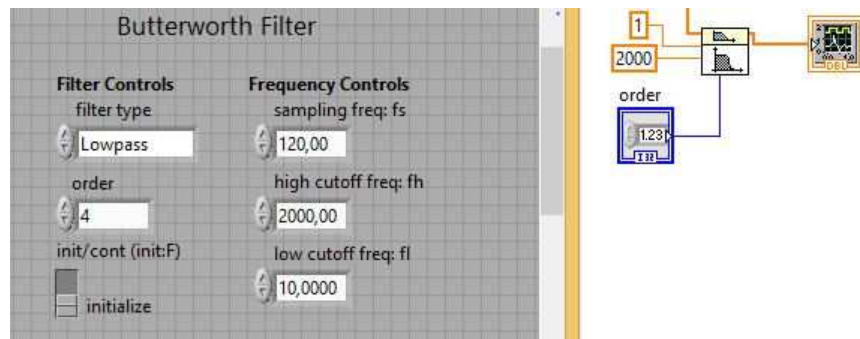


Figura 5.6: Filtro Butterworth

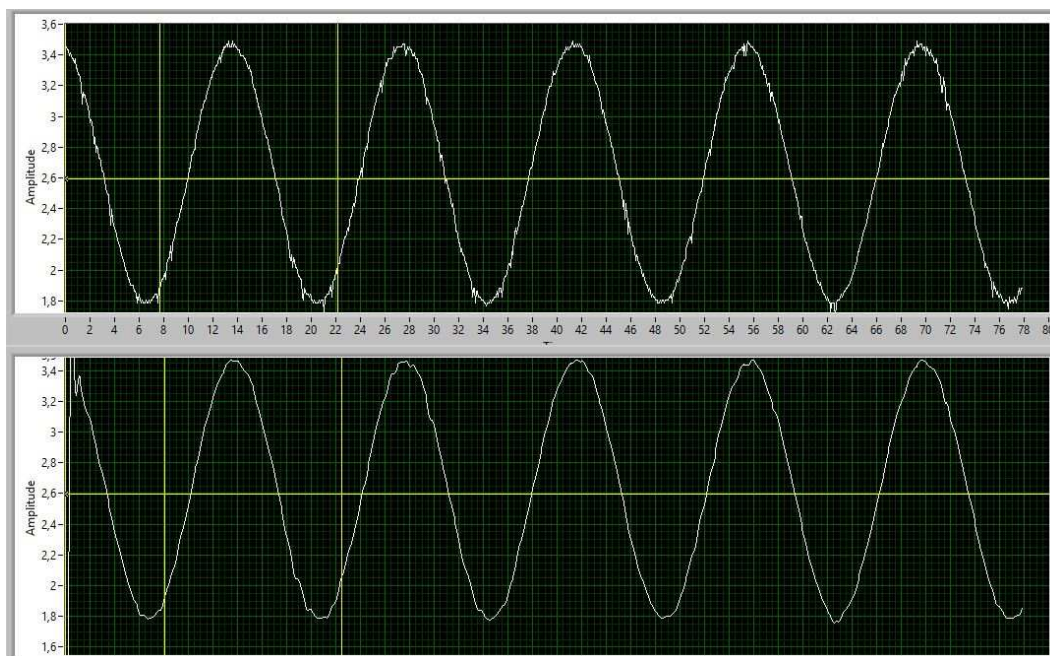


Figura 5.7: Señal filtrada

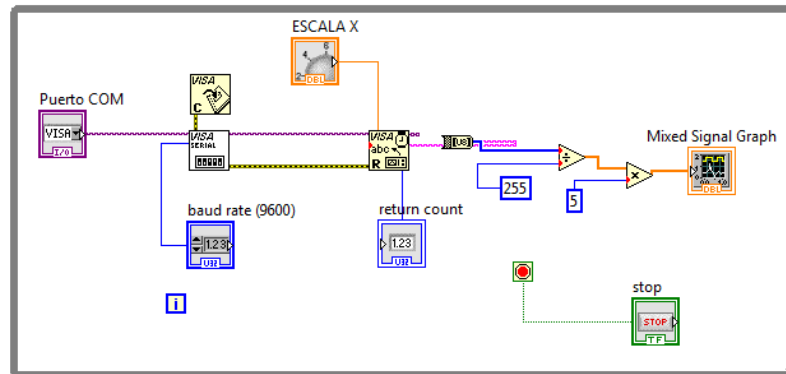


Figura 5.8: Interfaz Usuario Labview

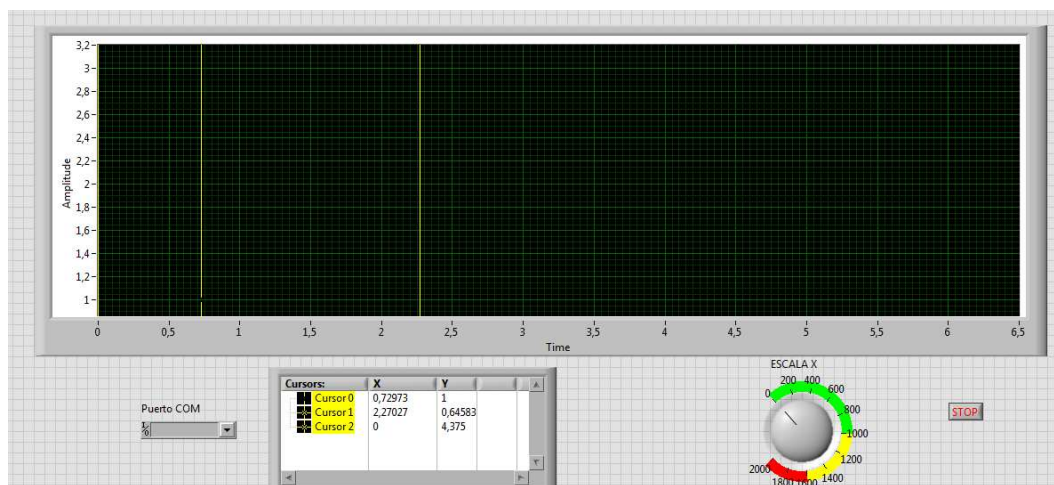


Figura 5.9: Interfaz gráfica

Conclusiones

- La metodología de diseño implementada en el desarrollo de este trabajo de grado (RUP) propició el desarrollo de las actividades en un orden coherente, precisando en su primera etapa la búsqueda de información, la etapa de pruebas a partir de esa información recolectada y por último la construcción final que permitió la generación del proyecto.
- La adquisición de datos y el manejo de microcontroladores de tipo USB son medios eficaces que proporcionan la interacción entre usuario y máquina. Este puerto garantizó a este trabajo de grado una comunicación bidireccional y envió de datos en puntos fundamentales como el manejo de variables (grados, datos) entre el Brazo Robótico y sus respectivas interfaces.
- El uso de Matlab® como software matemático, es muy importante en el control de plantas y la obtención de modelos matemáticos de las mismas, ya que permite simular el comportamiento de diferentes tipos de controladores (P,PI, PID, entre otros) y observar tiempos de estabilización, sobrepicos y tiempo de respuesta para aplicarlos en la práctica y realizar sus respectivas correcciones.
- La herramienta Labview® aplicada a la obtención, el manejo y la elaboración de interfaces facilita al usuario los mecanismos visuales para la operación y medición de las diversas señales o aplicaciones de voltaje de las cuales se va a analizar su comportamiento. Esta herramienta realiza medición de señales de acuerdo a la parametrización y la aplicabilidad que necesite el usuario.
- Las herramientas de control en la universidad aportadas por los estudiantes (Tesis de grado relacionadas a control), que puedan ser usadas en las aulas y espacios de laboratorios para ejercer prácticas, llegan a ser un apoyo al déficit que pueda tener el establecimiento universitario en la actualidad relacionado a equipos de laboratorio, ya que estos prototipos creados deben de interactuar con los miembros de la Licenciatura en Electrónica para aportar más herramientas en la práctica de los futuros docentes.
- Al estructurar un trabajo de grado se debe de tener asesoría por parte de varios

profesores para que estos vean la viabilidad del proyecto, se menciona este punto debido las dificultades presentadas por los desarrolladores de este trabajo de grado para cumplir con los objetivos planteados, ya que estos no se cumplieron en su totalidad y una de las causas para no cumplir con ellos fue el mal planteamiento inicial del proyecto.

- Al desarrollar un trabajo de grado surgen diversos problemas y en una tesis de implementación práctica estos llegan a ser inevitables, por esto es importante el ser recursivo para llegar a solucionarlos y no perder tiempo en ellos. Se hace mención a este tema debido a los numerosos problemas presentes en esta tesis y el tiempo perdido en el intento de encontrar una solución a estos, esto llevó a no cumplir con la totalidad de los objetivos planteados.

Bibliografía

- [1] B. Duarte Amaya, *Desarrollo de un prototipo de control y monitoreo de bajo costo desde un punto remoto vía celular.*, Universidad Pedagógica Nacional (2007).
- [2] A. E. Gil Morales D. A. Contreras Martínez, *Diseño y construcción de un sistema embebido para el funcionamiento de un autómata mediante una estrategia de control pid digital programable con comunicación inalámbrica*, Universidad Pedagógica Nacional (2010).
- [3] Laboratorio de Procesado de Imagen, *Teorema del muestreo*, <http://www.lpi.tel.uva.es/~santi/slweb/muestreo.pdf> [Online; accessed 08-ago-2014], 2004.
- [4] J. R. Cristancho Díaz, *Diseño y construcción de una interfaz gráfica utilizando matlab para el control de una planta de temperatura, que promueva y facilite el entendimiento de los conceptos teóricos de la asignatura control*, Universidad Pedagógica Nacional (2009).
- [5] J. Rivero Juárez F. Jiménez Ríos, *Diseño y construcción de una tarjeta programable de adquisición, procesamiento de datos y control.*, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (2006).
- [6] L. F. Rodríguez Montoya, *Diseño de un controlador de estructura variable para el péndulo invertido*, Instituto Politécnico Nacional (2003).
- [7] C. A. Osorio Zú niga, *Diseño, construcción y control de un pendulo invertido rotacional utilizando técnicas lineales y no lineales.*, Universidad Nacional de Colombia (2009).
- [8] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, Pearson Educación, 2003.
- [9] L. A. Gallegos Ortiz, *Control lógico difuso del péndulo invertido*, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (2009).
- [10] J. Pierre Zawadzky R. A. Onofre Chaves, *Diseño de un controlador pid digital para un prototipo airship*, Universidad Pedagógica Nacional (2011).
- [11] A. Mendoza L. Torrealba G. Ortiz Y. Araujo, H. Lopez, *Metodología rup*, Universidad Politécnica del Oeste Mariscal Sucre (2010).