

**IDENTIFICACIÓN EN LÍNEA Y OPTIMIZACIÓN DEL PENDULO
INVERTIDO IMPLEMENTADO CON EL LEGO MINDSTORM NXT
2.0 UTILIZANDO LA TECNICA DE CONTROL LQR.**

**Verónica Jiménez Rojas
Daniela Merino Castro**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero electricista**

**Director
Didier Giraldo Buitrago**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERIAS
INGENIERIA ELECTRICA
PEREIRA
2018.**

Nota de aceptación:

Firma del director del programa

Firma del director del proyecto

Pereira, Agosto de 2018

Identificación en línea y optimización del péndulo invertido implementado con el lego mindstorms nxt 2.0 utilizando la técnica de control LQR.

© Verónica Jiménez Rojas

© Daniela Merino Castro

Director: Didier Giraldo Buitrago
Docente de la Universidad Tecnológica de Pereira

Pereira, Agosto de 2017
Programa de Ingeniería Eléctrica.
Universidad Tecnológica de Pereira
La Julita. Pereira (Colombia)
TEL: (+57) (6)3137300
www.utp.edu.co

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestro director el Ingeniero Didier Giraldo Buitrago por su acompañamiento, orientación, apoyo, motivación y por todo el conocimiento aportado para el desarrollo y culminación de este trabajo.

Tal vez la vida en ocasiones nos resulta un poco complicada, con el pasar del tiempo te das cuenta que cada prueba no solo tienes que afrontarla si no también aprender de ella y seguir luchando por las cosas que quieres, porque la vida siempre te dará una nueva oportunidad para todo. Agradezco a Dios y a la vida por darme la oportunidad de tener la mejor familia; mis padres y mi hermana porque siempre he contado con todo su apoyo, amor, paciencia y confianza.

Estaré eternamente agradecida por este logro que no es solo mío si no de ustedes.

Gracias Verónica por acompañarme y hacer parte de este proceso, porque más que una compañera fuiste una buena confidente y amiga.

Daniela Merino Castro

En vísperas de terminar esta etapa de mi vida profesional quiero agradecer infinitamente a mi madre y a mi hermana dos mujeres que dedican su vida enseñarme que debo luchar por lo que deseo. Siempre les agradeceré su apoyo incondicional y sus dosis de realidad.

A Daniela gracias por ser mi compañera en este camino, por compartir conmigo una idea y el esfuerzo de hacerla realidad, ahora podemos decir que este logro es nuestro, gracias por la confianza.

A todas aquellas personas que conocí durante mi carrera compañeros, profesores y amigos, gracias por todas las experiencias vividas que hoy me hacen mirar hacia atrás desde un escalón más alto.

Verónica Jiménez Rojas

CONTENIDO

CONTENIDO	5
Capítulo 1	6
1. Introducción	6
1.1. Objetivos	7
1.1.1. Objetivo general	7
1.1.2. Objetivos específicos	7
1.2. Estado del arte	8
Capítulo 2	10
2. Modelo del sistema	10
2.1. Péndulo invertido sobre ruedas	10
2.2. Modelo matemático del péndulo invertido	11
2.3. Implementación del sistema	12
2.3.1. Modelo de la planta	12
2.3.2. Lego Mindstorms	13
2.4. Componentes del set Lego Mindstorms NXT 2.0 utilizados	14
2.4.1. Lego NXT Brick	15
2.4.2. Servomotores	15
2.4.3. Sensor Giroscópico	15
2.4.4. Piezas de construcción	15
2.5. Entorno de programación	15
2.5.1. LabView	16
Capítulo 3	17
3. Identificación en Línea	17
3.1. Método de mínimos cuadrados recursivos	18
3.2. Implementación del algoritmo del método de mínimos cuadrados recursivos	19
Capítulo 4	21
4. Modelo del sistema de control	21
4.1. Teoría de control digital	22
4.2. Discretización de sistemas continuos	22
4.3. Ecuaciones en el espacio de estado en tiempo discreto	23
4.4. Control Óptimo	24
4.4.1. Técnica de control óptimo LQR	25
Capítulo 5	28
5. Análisis de pruebas y resultados	28
5.1. Pruebas de identificación	28
5.2. Pruebas de control	29
5.3. Resultados	31
Capítulo 6	35
6. Conclusiones	35
Capítulo 7	37
7. Lista de referencias	37
Bibliografía	40

Capítulo 1

1. Introducción

El control, la automatización y la robótica se han convertido durante las últimas décadas en áreas primordiales en la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías. Hoy en día existen varias investigaciones acerca de la optimización de sistemas físicos usando diferentes técnicas, Un problema típico abordado por la teoría de control es el péndulo invertido, este es un sistema clásico que se caracteriza principalmente por su comportamiento inestable. El modelo de este sistema es de gran aplicación en la vida cotidiana principalmente en la industria, y es muy utilizado como ejercicio académico. Seleccionando este sistema físico y aprovechando la posibilidad de implementarlo físicamente con en el equipo LEGO Mindstorm NXT 2.0.se propone aplicar dos técnicas muy importantes como lo son: la identificación en línea de un modelo digital del péndulo invertido y el control optimo LQR (“Linear Quadratic Regulator”) del mismo. [1]

En la actualidad es muy común ver como la mayoría de los sectores productivos que desarrollan procesos industriales, agrícolas y hasta los sistemas de transporte están avanzando hacia la automatización de sus técnicas, la idea de controlar automáticamente las operaciones y garantizar la estabilidad y un mejor comportamiento de los sistemas convence cada vez más a la industria y los sectores productivos de que la automatización es la herramienta principal para mejorar la eficiencia de los procesos, minimizar las fallas de tipo humano y hasta garantizar un mejor nivel de vida para la sociedad. Y aunque se ha avanzado mucho en las tecnologías de control, aún existen retos para lograr que los sistemas sean controlados óptimamente, por lo que se ha optado por aplicar métodos especiales para realizar un modelo de control que actúe eficientemente sobre ellos. [1][2]

El estudio de sistemas naturalmente inestables ha sido de gran interés en el campo de investigación del control y la automatización, un ejemplo clásico de estos sistemas es el péndulo invertido, en las aplicaciones físicas existen varios modelos como lo son el péndulo invertido sobre ruedas y el péndulo invertido con movimiento lineal sobre un carro, actualmente se puede encontrar mucha bibliografía existente como producto de investigaciones acerca de su funcionamiento, además sobre ellos se han diseñado distintos tipos de controladores utilizando diferentes técnicas de control, siempre en la búsqueda de lograr su estabilidad.[1]

Con base en estos estudios, y conociendo que el péndulo invertido es un sistema que se puede encontrar en varias aplicaciones de sectores como la industria biomédica, la industria

aeroespacial, los sistemas de transporte y la industria de construcción entre otros, nace la intención de investigar en el tema, realizando un enfoque en el funcionamiento del péndulo invertido sobre ruedas, esto con el objetivo de diseñar un modelo de control que identifique el funcionamiento del péndulo invertido y que aplique sobre él un control óptimo para mejorar su comportamiento. Además a diferencia de otros estudios se propone que el desarrollo de este modelo de control se realice sobre una implementación física del sistema que permita la apropiación del conocimiento en el ejercicio práctico, por fortuna se cuenta con el equipo LEGO Mindstorm NXT 2.0 para la construcción del sistema físico propuesto y con el software elegido para desarrollar el proceso de control sobre él.[2]

Este proyecto contribuirá al desarrollo de un modelo de control que identifique el funcionamiento del péndulo invertido y que mediante el uso de la estrategia de control óptimo LQR (“Linear Quadratic Regulator”) logre la estabilidad del sistema físico, el cual será implementado usando el equipo LEGO Mindstorm NXT 2.0. Así mismo resolver este problema implicará aportar en la literatura existente el conocimiento adquirido en la investigación para futuros proyectos y/o aplicaciones académicas. [2][3]

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Diseñar un modelo de control que permita la identificación en línea del funcionamiento del péndulo invertido y la optimización de éste mediante la aplicación de la técnica de Control Óptimo Regulador Lineal Cuadrático (LQR)

1.1.2. Objetivos específicos

- Alcanzar el estado del arte.
- Contribuir a futuros desarrollos haciendo referencia bibliográfica.
- Implementar el sistema físico usando el equipo LEGO Mindstorm NXT 2.0.
- Obtener el modelo matemático digital del péndulo invertido usando algoritmos de identificación.
- Desarrollar un modelo de control utilizando la estrategia de control óptimo LQR en el software de programación LabView.
- Lograr la estabilidad y mejorar el comportamiento del sistema físico propuesto.

1.2. Estado del arte

El péndulo invertido es un sistema mecánico comúnmente usado para comprobar doctrinas afines con la teoría de control, dado que su dinamismo es inestable ha sido de mucho estudio e investigación por parte de estudiantes y profesionales de las distintas áreas relacionadas con la ingeniería de control. [1]

Su estudio es de gran importancia para el análisis en sistemas que deben mantenerse cercanos a un punto de equilibrio siendo de gran utilidad para el estudio de las aplicaciones prácticas con la lógica difusa la cual es usada cuando la complejidad de un proceso específico es muy alta y no existen modelos matemáticos precisos o para procesos altamente no lineales, se basa en reglas heurísticas, donde el antecedente y la consecuencia son conjuntos difusos ya sean puros o resultados que operan con ellos. Los métodos de referencia para esta base deben ser simples veloces y eficaces [2].

Desde los años setenta el investigador y profesor Furuta ha realizado diferentes proyectos e investigación con el péndulo invertido realizando notables aportes tanto teóricos como experimentales relacionados con este problema de control [2].

Los investigadores Grasser et al. (2002) del laboratorio de electrónica industrial del Swiss Federal Institute of Technology, construyeron un prototipo de un vehículo de dos ruedas basado en un péndulo invertido llamado Joe, al cual le colocaron pesos en la varilla del péndulo para simular el peso de un ser humano en baja escala (figura 2.2) [2]. Sherman (2003), construyó el péndulo invertido sobre dos ruedas que tienen su centro de gravedad por encima de las ruedas llamado Balibot [2][3].

Gracias a que el Lego Mindstorm puede ser utilizado para la construcción de modelos de sistemas integrados con partes electromecánicas controladas por computador comúnmente, muchos sistemas pueden ser representados con las piezas de este lego tal como se encontrarían en los espacios reales. El bloque NXT es una versión mejorada a partir del lego Mindstorms RCX (primera generación) que generalmente se considera la predecesora y precursora del bloque programable. Gracias al lenguaje de programación de esta plataforma en los últimos años también ha sido posible la construcción del péndulo invertido utilizando la plataforma lego. Hassenplug (2002), construyó un robot péndulo invertido sobre dos ruedas que constantemente intenta ajustar su punto de equilibrio, utilizando un acelerómetro para detectar la inclinación, llamado Legway [3][4]. Hurbain's (2007), construyó el NXTWAT. Watanabe (2007), de la universidad de Waseda en Japón, construyó el NXRWAY-g. Yamamoto (2008), construyó el NXTWAY-gs, el cual balancea y además desplaza el robot con la utilización de un control remoto [3] [4].

El péndulo situado sobre el carro se mueve por una de sus extremidades cuando el carro se desplaza bajo la acción de una fuerza; la cual es la acción de control con la que se pretende actuar sobre las diferentes posiciones del péndulo. [4]

El sistema del péndulo invertido se caracteriza por su habilidad para mantener el equilibrio en tan solo dos ruedas y por poder girar en torno a su propio centro de masa, permitiéndole obtener grandes características de maniobrabilidad como moverse fácilmente por varios tipos de terreno, dar vueltas muy cerradas, sortear pequeños escalones y bordes, ocupando menor espacio. [5] [6]

Uno de los principios a tener en cuenta al momento de diseñar un mecanismo de control para un problema determinado es la realimentación. En los problemas de control el objetivo es lograr la estabilidad en torno a un punto de equilibrio, es decir que la salida del sistema se mantenga dentro del rango de unos valores específicos. Debido a la complejidad de este problema es necesario que los controladores usados en este sistema sean capaces de identificar la diferencia que existe entre la referencia que se quiere alcanzar y la posición actual en la que se encuentra. Cuando se hace uso del controlador LQR se hace una realimentación del sistema de la forma más óptima posible. [6][7]

La técnica de control LQR ha sido fundamental en la teoría de control ya que gracias a ella puede obtenerse un control más eficiente en la variedad de sistemas que se pueden encontrar, esta técnica básicamente permite que una planta se encuentre en estado cero o en reposo; para lograr buenos resultados con el LQR es necesario seguir ciertos criterios como por ejemplo la ubicación de polos, grado de estabilidad, referencia del sistema, buena selección de las matrices Q y R. [7]

Muchos trabajos se han desarrollado con el fin de verificar la eficiencia del controlador LQR y se ha encontrado que esta técnica es mucho más eficiente que otro tipo de controles tales como el PID, mas sin embargo se debe tener en cuenta que la aplicación de las técnicas de control se realizan en sistemas que pueden ser o no lineales, variantes e invariantes con el tiempo y que todas estas características afectan en el comportamiento de la planta y por ende los resultados de la estabilización de esta al aplicarle cualquier tipo de control.[7]

Capítulo 2

2. Modelo del sistema

2.1. Péndulo invertido sobre ruedas

En esta unidad se estudian las características del péndulo invertido sobre ruedas mostrado en la figura 2.1 construido a partir de las piezas de LEGO® MINDSTORMS® NXT 2.0. Esta plataforma ha sido usada en los últimos años para la construcción de diferentes modelos para el análisis de control, pues cuenta con una variedad de entornos para trabajar además de permitir la programación a través de herramientas de simulación como LABVIEW.



Figura 2.1. Robot péndulo invertido sobre ruedas

Este sistema consta de dos ruedas alineadas a un mismo eje el cual sostiene el bloque programable del NXT que conforma la parte del cuerpo del robot; para conseguir el equilibrio del sistema se utiliza motores de corriente DC que permiten el movimiento de las ruedas.

En la construcción del péndulo invertido fue necesario el uso del giroscopio (Gyro Hitechnic), dado que este elemento proporciona los valores de velocidad angular fue fundamental conocer y analizar las características y comportamiento de este elemento para lograr un buen control sobre el sistema.

2.2. Modelo matemático del péndulo invertido

Para el adecuado control del péndulo invertido sobre dos ruedas mostrado en la figura 2.2 se intenta encontrar un modelo matemático que relacione las entradas y salidas que conforman el sistema; usando la herramienta de simulación LABVIEW se podrá simular dicho modelo para analizar el comportamiento cuya importancia se verá reflejada al momento de plantear el controlador.[8]

El análisis que se pretende realizar en este trabajo es experimental ya que la computadora es la herramienta principal para lograr los objetivos; por lo tanto no se hará énfasis en las demostraciones de las ecuaciones físicas que describen el péndulo invertido; La Figura 2.2 muestra un esquema simplificado del péndulo invertido y las variables que afectan el comportamiento del sistema; puesto que la computadora es la herramienta fundamental para el desarrollo de este trabajo, en el capítulo 5 se profundiza sobre el uso y beneficios del control digital en sistemas de este tipo.

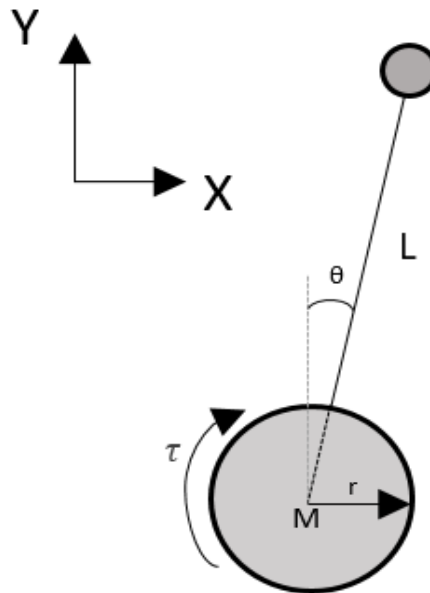


Figura 2.2. Esquema grafico del péndulo invertido sobre ruedas

El diseño de un buen control depende en gran medida del modelo que se obtenga a partir de las propiedades del sistema, en este trabajo se pretende encontrar un modelo a través de algoritmos de identificación e implementar el control con la herramienta de simulación LABVIEW con el cual se busca en tiempo real lograr la estabilidad del sistema. Puesto que se está analizando un sistema no lineal es muy complejo encontrar un modelo exacto más sin embargo el uso de la identificación en línea apacigua la dificultades que se pueda presentar a la hora de encontrar el modelo adecuado de la planta.

2.3. Implementación del sistema

2.3.1. Modelo de la planta.

El diseño de la planta se inspira en un modelo clásico conocido como péndulo invertido, este sistema cuenta con innumerables investigaciones acerca de su modelamiento, funcionamiento y controlabilidad, además su análisis es de gran interés en diferentes campos como la industria espacial donde se presentan aplicaciones como el mantenimiento de la trayectoria durante el vuelo de un cohete; también en la industria robótica donde se analiza la biomecánica de la marcha, balance, postura humana y el caminar bípedo de robots; y en el campo de la construcción, donde este análisis es de gran utilidad para mejorar la estabilidad en grúas, control sísmico de estructuras de edificación, entre otras aplicaciones.

En la industria del transporte se ha venido desarrollando un medio de transporte personal cuyo comportamiento es similar al péndulo invertido, este es conocido como el Segway PT, este funciona con un sistema de auto-balance, el cual se mantiene constantemente estabilizado gracias a una tecnología llamada estabilización dinámica. Esta estabilización funciona de una forma totalmente intuitiva, muy parecida al propio sentido del equilibrio humano. Es un vehículo de dos ruedas que logra mantener en posición vertical por sí mismo, es ligero, giroscópico, completamente eléctrico y controlado por un micro-procesador integrado [9].

El diseño físico de los vehículos Segway PT puede compararse con un péndulo invertido sobre dos ruedas, las cuales son accionadas por dos motores. Con el objetivo de replicar este diseño se propone la construcción de un robot movable del tipo Segway ensamblado a partir de las piezas del set de construcción de robots programables Lego Mindstorms NXT 2.0., y para lograr la función de autobalance se implementará un modelo de control óptimo mediante la técnica de control LQR. El péndulo invertido de dos ruedas utilizado para este propósito ha sido inspirado por el HTWay un robot auto equilibrado de tipo Segway [10] [11].

En la siguiente figura se muestra la vista lateral del robot construido.

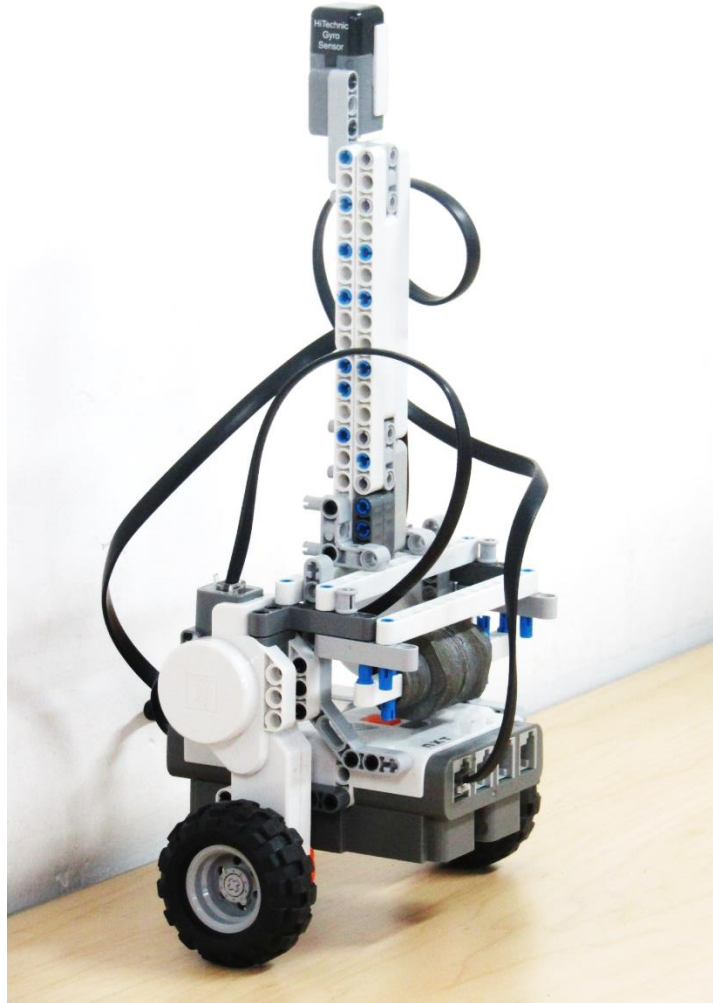


Figura 2.3. Robot tipo Segway planta construida

2.3.2. Lego Mindstorms.

LEGO Mindstorms es un conjunto de sets de construcción de robots programables con los cuales es posible construir, programar y controlar diferentes tipos de robots LEGO. Los sistemas robóticos LEGO® Mindstorms han sido desarrollados por la compañía LEGO® con la colaboración del Laboratorio de Medios del MIT (Massachusetts Institute of Technology, MIT Media Lab), desde su creación se han desarrollado tres generaciones, el RCX, el NXT y el EV3, cada uno de estos modelos cuenta con características específicas [12].

Los set LEGO Mindstorms se caracterizan por ser comúnmente utilizados en el campo de la educación e investigación como un sistema de apoyo a la enseñanza con el objetivo de realizar un acercamiento a la robótica y al diseño de sistemas de control autónomos, y con el fin de adquirir nuevos conocimientos sobre tecnología, ingeniería y ciencia. Trabajar con este tipo de equipos permite la construcción de diferentes tipos de robots con sensores y actuadores que pueden ser controlados y programados.

Para la implementación del proyecto se cuenta con el LEGO Mindstorms NXT 2.0., el cual cuenta con las siguientes características:

El Lego Mindstorm NXT 2.0 combina la ilimitada versatilidad del sistema de construcción de LEGO con un ladrillo inteligente. Cuenta con las características generales de los NXT la unidad central está constituida por un microprocesador principal de 32 bits que incluye 256 kb de memoria Flash y 64 kb de RAM externa, y un microprocesador secundario de 8 bits con 4 kb de memoria Flash y 512 bytes de RAM externa. Posee cuatro puertos de entradas analógicas o digitales y tres puertos de salida para obtener la señal de entrada de los encoders de los motores [13].

Este kit incluye los siguientes elementos: Ladrillo inteligente NXT, tres servomotores, un sensor de luz, un sensor de sonido, un sensor ultrasónico, dos sensores de contacto, tres sensores de rotación integrados en los motores, tres cables convertidores, siete cables de conexión (1 de 0.2m, 2 de 0.5m, 4 de 0.35m), tres lámparas, Cable USB y cientos de elementos de construcción. Además al bloque pueden conectarse también otros sensores adicionales como sensor giroscópico, sensor de temperatura, de Aceleración, Infrarrojo, Magnético, Barométrico, Angulo de rotación, brújula entre otros .Estos elementos adicionales son fabricados por Hitechnic.

La comunicación entre la unidad central y los sensores/actuadores se realiza mediante conexión de un cable 6-wire, con el protocolo I2C. La comunicación con otros elementos como el PC u otra unidad central se realiza mediante los interfaces de comunicación USB 2.0 y/o Bluetooth. Gracias a la posibilidad de comunicación por medio bluetoooh es posible obtener mando directo sobre los robots desde la PC u otro dispositivo (dispositivos móviles), por lo cual existe la oportunidad de crear una aplicación de control remoto.

2.4. Componentes del set Lego Mindstorms NXT 2.0 utilizados.

Como se expresó en numeral 3.1 el modelo de la planta es un robot tipo Segway, en este numeral se describirán los elementos utilizados en el montaje con las características principales de cada uno.

2.4.1. Lego NXT Brick.

Elemento conocido como ladrillo inteligente, es el componente principal del sistema robótico podría decirse que es el cerebro de los robots. Dispone de una pantalla LCD frontal de 100x64 pixeles y tiene botones lo cual permite la interacción con el usuario. Permite la conexión de los sensores y actuadores y cumple la función de almacenar y ejecutar las órdenes programadas. La comunicación se puede hacer vía USB o Bluetooth [14].

2.4.2. Servomotores.

El Servomotor esta optimizado para ser la base motriz de los robots. Aparte de ser unos motores eléctricos convencionales disponen de sensores de posición, los cuales indican la posición angular, concretamente se trata de encoders incrementales de 360 pasos por vuelta; esto supone una resolución de 1°/paso. El motor también dispone de un tren de engranajes para aumentar o disminuir su par. El Servomotor funciona entre 160 - 170 rpm, con un torque de rotación de 20 Ncm y un torque de rotor bloqueado de 40 Ncm. [15].

2.4.3. Sensor Giroscópico.

Este sensor es bastante útil cuando se requiere la construcción de robots que puedan equilibrar, balancear o realizar otras funciones donde la medición de la rotación sea esencial Es un elemento adicional que puede conectarse a los robots construidos con la función de medir la rotación. El NXT Gyro Sensor devuelve el número de grados por segundo de rotación e indica la dirección de rotación +/- 360 ° por segundo. La velocidad de rotación se puede leer hasta aproximadamente 300 veces por segundo [16].

2.4.4. Piezas de construcción.

Estas piezas son las que hacen de lego un equipo de construcción versátil y con opciones de construcción casi que ilimitados, el set de construcción LEGO Mindstorm NXT 2.0 cuenta con cientos de piezas de formas diferentes que permiten la posibilidad de armar objetos como autos, edificios, robots, animales y hasta figuras propias, casi que podría decirse que el único límite es la imaginación. Además al igual que todos los sistemas de construcción LEGO, todas las líneas y sets lanzados al mercado son completamente compatibles con el resto de modelos, las piezas encajan con todas las demás de alguna manera, lo cual brinda aún más versatilidad a los modelos construidos.

2.5. Entorno de programación.

La implementación de los sistemas robóticos NXT se basa principalmente en la programación del bloque inteligente “Brick NXT”, programar hace referencia a expresar en comandos comprensibles para una máquina las acciones necesarias para la ejecución de una

tarea determinada. Actualmente existen diversos lenguajes y entornos de programación para este fin. [17]

El set LEGO Mindstorm NXT 2.0 incluye el software de NXT-G v2.0. La programación en este entorno se basa en la programación gráfica que permite la visualización de todos los instrumentos de LEGO como sensores, actuadores y componentes externos. Este lenguaje de programación está basado en iconos (bloques de programación) los cuales poseen terminales para interconectarse. [17] [18].

Este entorno permite la programación básica de la mayoría sistemas robóticos construidos a partir del set LEGO NXT, sin embargo sus funciones son un poco básicas para aplicaciones más complejas como sistemas de control avanzados y aplicaciones de ingeniería. También es posible programar y conectar con el robot construido desde otros Lenguajes y software de programación como Lab View, MatLab y Simulink. Para trabajar desde cualquiera de ellos es necesario descargar algunos componentes adicionales para usar los bloques y funciones necesarias para la comunicación entre el sistema construido con el LEGO y el lenguaje de programación.

2.5.1. LabView.

LabVIEW es un software de ingeniería diseñado para aplicaciones que requieren pruebas, medidas y control con acceso rápido a información de datos y hardware. Es un software de programación desarrollado por National Instrument (NI) disponible para instalar en plataformas Windows, UNIX, MAC y GNU/Linux. [19]

Este software está desarrollado específicamente para ingenieros y científicos. Al igual que el NXT-G este es un entorno de programación gráfica (G) que utiliza íconos, terminales y cables, se basa en un modelo de flujo de datos en lugar de líneas secuenciales de código de texto, esto permite escribir un código más funcional con un diseño visual que se asemeja al proceso de pensamiento, lo cual hace que programar en este entorno sea más sencillo [20] [21].

LabVIEW está diseñado para incorporarse con otro software, ya sea métodos alternativos de desarrollo o plataformas de fuente abierta, lo cual garantiza la posibilidad de utilizar todas las herramientas a disposición. Se ha tomado la decisión de utilizar Labview como el Software donde se va a desarrollar la programación. Se descarga gratuitamente de National Instruments los bloques y funciones LabVIEW Toolkit for LEGO® MINDSTORMS® NXT [22] para hacer posible la comunicación con el Brick NX

Capítulo 3

3. Identificación en Línea

El objetivo principal de la identificación en línea es obtener un modelo de un sistema en particular, no solo para fines analíticos sino también para fines de control. Este procedimiento se ha usado por años para encontrar modelos matemáticos mediante la medición de señales tanto de entrada como de salida que se encuentran en un sistema, con el fin de implementar un control eficiente.

En el amplio mundo del control existen diversidad de sistemas los cuales contemplan diferentes tipos de variables que proporcionan señales que puede ser observables, tales como las salidas y perturbaciones presentes en el sistema; esta situación ha permitido crear un campo de estudio para sistemas cuyos valores de salida no solo dependen de los valores de entrada, sino también de valores pasados que pueden causar variaciones en la identificación final. La obtención de un buen modelo de la planta es de suma importancia; pues gracias a este es posible relacionar matemáticamente todas las variables que permiten confrontar los aspectos físicos del sistema; para la obtención del modelo es necesario realizar una buena identificación que en gran medida depende de aspectos muy importantes tales como experimentos por ensayo y error, configuración del modelo y estimación de parámetros [23][24]

Por tratarse de una identificación de parámetros en tiempo real, se han creado esquemas como mínimos cuadrados recursivos (MCR) y MCR con estimación de perturbación, proyección y proyección ortogonal; pues estos métodos permiten la actualización en intervalos de tiempo de las muestras continuas que se toman del sistema.[24]

En este proyecto se pretende obtener un modelo mediante un enfoque experimental, donde el sistema cuenta con un número determinado de entradas y de salidas; básicamente el algoritmo de identificación procesa las señales de entrada y salida para determinar el modelo final del sistema; es de tener en cuenta que resulta muy complicado considerar todas las leyes físicas que puede presentar la planta y por consecuencia el modelo que se puede obtener podría llegar a ser muy complejo, por ende poco flexible a los diseños que se pueden conseguir con las técnicas de control, El sensor giroscopio es un elemento que introduce ruido en el sistema y así como este, muchos de los elementos por los que está compuesta la planta interfieren en que su comportamiento real no sea exactamente como el que se espera. [25][26]

Del diagrama de la figura 4.1 se observa que este método es iterativo puesto que la identificación se hace con los datos que se obtienen en cada instante de tiempo real. [26][27]

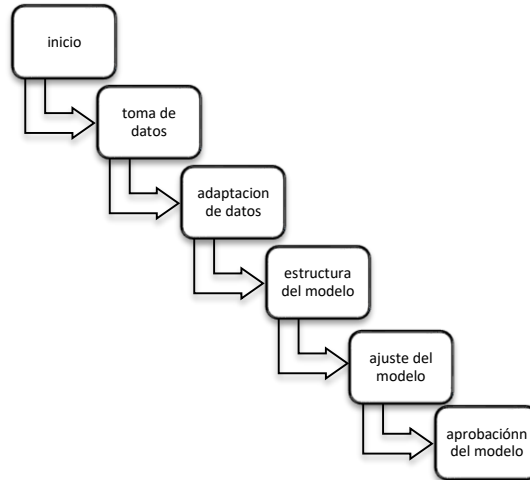


Figura 2.1. Proceso para la identificación en línea

En la teoría de control existen algunas propiedades tales como convergencia identificabilidad y persistencia que influyen en la identificación correcta de un sistema. [27]

3.1. Método de mínimos cuadrados recursivos.

El método de mínimos cuadrados recursivos (MCR) hace parte de las técnicas de identificación recursivas aplicadas al control adaptativo; este es un método que parte del modelo básico de mínimos cuadrados, conocido como un procedimiento de análisis numérico que permite obtener un modelo de comportamiento que se ajuste a una serie de datos.

Para realizar la identificación de la planta se utilizó el método de mínimos cuadrados recursivos (MCR); su algoritmo utilizado en la identificación de sistemas permite realizar cálculos convenientes y simples en la identificación en tiempo real, evitando considerablemente los cálculos y análisis dinámicos que se hacen comúnmente en sistemas físicos. [28]

Para desarrollar este método, se parte del modelo general de un sistema, como se muestra en la ecuación 3.1.

$$y(k) + a_1y(k - 1) + \dots + a_ny(k - n) = b_1u(k - 1) + \dots + b_nu(k - n) \quad (3.1)$$

Donde $y(k-n)$ representa las salidas del sistema, $u(k-n)$ son las entradas, a_n y b_n son los parámetros característicos del modelo.

El algoritmo de identificación obtiene un vector de parámetros a partir de n medidas de la salida tomadas en tiempo real para una serie de entradas conocidas formando un sistema de n ecuaciones para encontrar el valor de este vector; el cual representado en la ecuación 3.2.[29]

$$\theta = ([a_1 \dots a_n \ b_1 \dots b_n])^T \quad (3.2)$$

Este método permite obtener un sistema de ecuaciones que se ajusta al modelo que se está analizando, donde se espera que el error en todas las medidas que se obtienen en tiempo real sea mínimo; sin embargo como se había mencionado anteriormente, en la práctica es difícil encontrar un modelo exacto y por ende un error de cero, no obstante través de este método es posible encontrar un modelo con un error mínimo y que los errores de estimación sean despreciables. [29]

3.2. Implementación del algoritmo del método de mínimos cuadrados recursivos.

Como se mencionó en el numeral anterior, mínimos cuadrados recursivos es un método que utiliza las medidas anteriores del sistema para obtener las medidas siguientes; es decir parámetros en los instantes N y $N+1$; para el desarrollo del algoritmo se tuvieron en cuenta referencias teóricas en las cuales desarrollan por completo el método de MCR.

Para obtener la expresión general se deben tener en cuenta las siguientes ecuaciones.

Tabla3.1. expresiones para obtener las ecuaciones de MCR

Valores iniciales	$P(k)$ $\theta(k)$
Valores nuevos	$y(k + 1)$ $u(k + 1)$
Error	$e(k + 1) = y(k + 1) - \varphi^T(k + 1)\theta(k)$

Cuando se obtienen las variables y ecuaciones mostradas en la tabla 3.1 puede calcularse la ganancia $L(k+1)$, como se muestra a continuación [30]:

$$L(k+1) = \frac{P(k)\varphi(k+1)}{1 + \varphi^T(k+1)P(k)\varphi(k+1)} \quad (3.3)$$

Los nuevos parámetros están dados por:

$$\theta(k+1) = \theta(k) + L(k+1)e(k+1) \quad (3.4)$$

Finalmente la matriz de covarianza queda expresada

$$P(k+1) = (I - L(k+1)\varphi^T(k+1))P(k) \quad (3.5)$$

Los parámetros de θ después de aplicar las ecuaciones anteriores, estarán dados por los valores de la estimación anterior corregida y por el error existente entre la salida y los posibles valores de salida futuros; en este método la matriz de covarianza $P(k)$ modifica la dirección del gradiente y determina los cambios de la identificación. [30]

Capítulo 4

4. Modelo del sistema de control

En general un sistema se puede definir como un conjunto de elementos relacionados entre sí que funcionan como un todo para cumplir determinado objetivo. Aunque este término no está limitado a componentes físicos, comúnmente en el campo del control un sistema hace referencia a un modelo de un dispositivo o de un conjunto de ellos existentes en el mundo real, lo que relaciona el control directamente con sistemas físicos. Un sistema de control es un conjunto de componentes interconectados entre sí de modo que puedan ser comandados, dirigidos o regulados para lograr una condición deseada, su objetivo principal es obtener unas respuestas deseadas a partir de ciertas entradas, debe permitir el control de las salidas en alguna forma prescrita mediante las entradas a través de los elementos del sistema de control. [31][32]

El estudio de sistemas físicos requiere de un gran análisis, modelar un sistema y lograr un control sobre su comportamiento necesita de un profundo conocimiento sobre el mismo y sobre los componentes del sistema de control que podría llegar a ser adecuado sobre él.

Actualmente existen dos tipos de control: el control análogo y el control digital, este primero es el control clásico que se relaciona directamente con el comportamiento del sistema físico con las entradas y salidas continuas, para este tipo de control se hace un análisis completo de los rangos de operación del sistema y se hace una descripción matemática utilizando leyes físicas, básicamente se realiza un análisis cuantitativo que consiste en hallar las respuestas que son producto de la aplicación de ciertas señales de entrada; y luego se realiza un análisis cualitativo que consiste en analizar ciertas propiedades tales como estabilidad, controlabilidad y observabilidad con el fin de realizar el diseño del controlador [31].

Para el caso del control digital se toma como herramienta principal el computador, ahora el análisis del comportamiento del sistema se realiza por medio de la toma de muestras en el tiempo, tomando las salidas continuas del sistema y convirtiéndolas en forma digital en cada instante de muestreo, con cada señal convertida se va formando una sucesión de números los cuales son procesados en tiempo real mediante un algoritmo dando como resultado una nueva sucesión de números que ahora son convertidos a señales continuas y que posteriormente se transmiten al sistema como entradas [33].

Para este proyecto se propone utilizar las bases del sistema de control digital y construir un modelo de control sobre el sistema propuesto en el numeral 3.1, Es por esto que en el siguiente numeral se hace énfasis en el procedimiento para desarrollar un sistema de control digital o discreto.

4.1. Teoría de control digital

Actualmente la mayoría de los sistemas de control se proyectan como sistemas de control digital, esto gracias a que ofrece muchos beneficios como que evita los análisis rigurosos y los errores con la precisión de los componentes físicos del sistema, además se pueden almacenar los datos e incluir cálculos matemáticos aunque sean complejos y hasta algunas funciones lógicas, aunque también tiene varias desventajas como que incluye diferentes tipos de señales lo que hace indispensable el uso de conversores que en algunos casos pueden ocasionar pérdida o distorsión de la información, además el modelo que se obtiene del sistema depende considerablemente del valor de tiempo de muestreo elegido, por lo cual no se puede considerar invariante con el tiempo. [33]

La propiedad esencial necesaria para definir un sistema es encontrar la relación única entre la entrada y la salida algo así como la relación causa-efecto. La mayoría de los sistemas físicos son sistemas de tipo continuo, cuando se analizan con el fin de crear un sistema de control sobre ellos se debe tener en cuenta que sus entradas y salidas son de tipo continuo y su modelo se representa mediante ecuaciones diferenciales. Sin embargo con el objetivo de minimizar el tiempo del proceso de análisis se ha optado por muestrear o discretizar su comportamiento, esto con el fin de poder definir su modelo o diseñar un sistema de control sobre él usando una computadora. Ahora el análisis se realiza sobre los sistemas de tiempo discreto o muestreados y su representación comúnmente se hace por medio de ecuaciones de diferencia.

4.2. Discretización de sistemas continuos

El funcionamiento esquemático de un sistema de control digital se puede observar en la Figura 4.1.

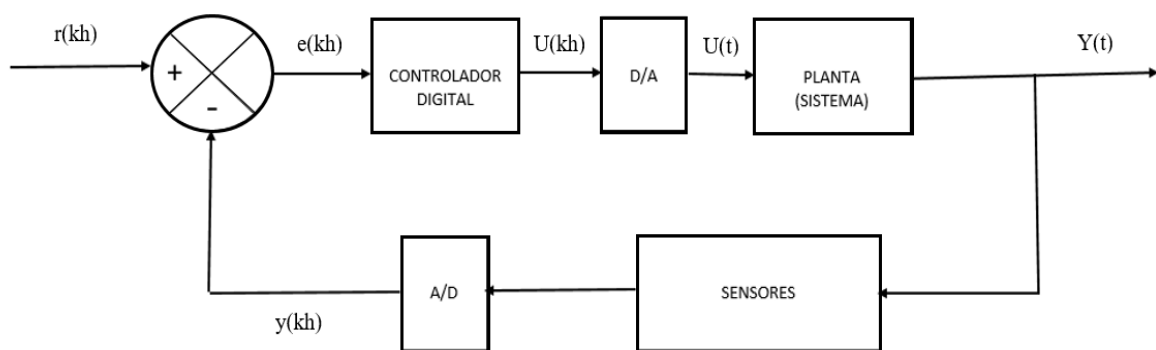


Figura 4.1. Diagrama esquemático de un sistema de control digital.

La salida de la planta ($Y(t)$) es una señal de tipo continua tras su paso por los sensores y en el convertidor análogo digital (A/D) es muestreada y convertida en forma digital, esta

conversión se realiza en instantes de tiempo que dependen del tiempo de muestreo, en el tiempo continuo se asume $-\infty \leq t \leq \infty$, en el tiempo discreto se asume $t = kh$, siendo “h” el tiempo de muestreo de las señales, “k” es un entero tal que $0 \leq k \leq \infty$. La señal muestreada ($Y(kh)$) es comparada con la señal de referencia ($R(kh)$), el resultado de esta comparación ($e(kh)$) es procesado por el algoritmo de control digital, el cual mediante un método recursivo genera una señal de mando discreta ($U(kh)$), la cual es convertida a una señal análoga por medio de un conversor digital análogo (D/A). Este proceso es repetitivo y se lleva a cabo cada h segundos, donde h es el periodo de muestreo. [33]

La selección de la frecuencia de muestreo es un factor muy importante ya que si se toma un periodo de muestreo grande será muy difícil reconstruir la señal continua, y si por el contrario se elige un periodo de muestreo pequeño el computador puede sobrecargarse. La elección del periodo de muestreo dependerá básicamente del comportamiento del sistema y del procesador del computador utilizado.

4.3. Ecuaciones en el espacio de estado en tiempo discreto

Todo sistema cuenta con una función de transferencia propia siendo esta un modelo que representa el comportamiento característico y cuenta con un orden determinado. La siguiente ecuación muestra el modelo generalizado de una función de transferencia de orden n

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 S^{n-1} + \dots + b_n}{S^n + a_1 S^{n-1} + \dots + a_n} \quad (4.1)$$

Esta función no depende de la excitación aplicada, únicamente se construye a partir del análisis del comportamiento dinámico del sistema y depende de las características propias.

En sistemas muestreados para hallar la respuesta en frecuencia del sistema se debe considerar la respuesta como una secuencia descompuesta en impulsos de Kronecker aislados, la salida se obtiene con la contribución de cada uno de ellos y aplicando superposición. Siempre que se conozca la respuesta al impulso muestreada, es posible calcular la respuesta a cualquier excitación a partir de ésta. [34][35]

Para el caso de sistemas muestreados es importante trabajar con variables que tomen valores discretos y las herramientas matemáticas más adecuadas para analizarlos son las ecuaciones en diferencias. La ecuación 4.2 muestra el modelo generalizado de una ecuación de diferencias.

$$y(k) = -a_1y(k-1) - a_2y(k-2) \dots - a_ny(k-n) + b_1U(k-1) + b_2U(k-2) \dots + b_nU(k-n) \quad (4.2)$$

Donde k es el instante de tiempo discreto y es un entero tal que $0 \leq k \leq \infty$

Es importante definir estas funciones por medio de las cuales se modela el sistema digital, para lograr la comprensión del sistema de control propuesto. Existen muchas formas de presentar el espacio de estados de un sistema y cada una de ellas presenta ciertas ventajas y particularidades, en este caso se planteará la forma canónica CONTROLLER para representar el modelo de espacio de estados del sistema propuesto. [33]

Forma canónica CONTROLLER

$$\begin{bmatrix} x_1[k+1] \\ x_2[k+1] \\ \vdots \\ x_n[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-1} & -a_n \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1[k] \\ x_2[k] \\ \vdots \\ x_n[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} u[k] \quad (4.3)$$

$$y[k] = [b_1 \quad \dots \quad b_n]x[k]$$

4.4. Control Óptimo

Estudios y aplicaciones actuales han demostrado que los métodos de control basados en realimentación de estados son más versátiles y potentes que los métodos de la teoría del control clásico. El desarrollo de nuevas técnicas se da debido a la necesidad o conveniencia de introducir nuevos modelos de características más complejas, para el diseño de controladores. [37]

En las últimas décadas se han implementado las técnicas de optimización al desarrollo de muchos campos. Se ha creado el interés de la industria por optimizar sus procesos productivos, y en particular por aplicar modelos óptimos de control, esta idea va muy ligada al fuerte desarrollo tecnológico actual. La importancia de la instrumentación y control óptimo en las industrias radica principalmente en la necesidad de garantizar la confiabilidad de los procesos productivos.

Haciendo referencia al término de “Óptimo”, podría decirse que independientemente de si es un plan de acción, una solución o cualquier otra situación a la que se pueda hacer referencia,

se puede caracterizar como óptimo si al compararse con otras alternativas es ‘insuperable’. Cuando se construye un modelo de control sobre un sistema, siempre se busca aplicar el modelo más óptimo que permita mejorar la confiabilidad del sistema, esto podría definirse como que se quiere optimizar el modelo. En el diccionario de la Real Academia Española el término “Optimizar” tiene el siguiente significado

Optimizar: Buscar la mejor manera de realizar una actividad.

Cuando se habla en términos de control, un control es óptimo si minimiza una función de costo. Esta función puede contar con distintas especificaciones y restricciones, y se considerara óptima la estrategia de control que procure la operación del sistema dinámico al menor costo, es decir que los ajustes del controlador minimicen la función de costo y las desviaciones no deseadas.

4.4.1. Técnica de control óptimo LQR

Esta técnica de control óptimo es conocida por las siglas del inglés de su nombre “Linear Quadratic Regulador”, es una acción de control moderno multivariable que se caracteriza por su robustez tanto en tiempo discreto como en tiempo continuo [36] [38]

Como se presentó en el numeral anterior una estrategia de control es óptima si minimiza una función de costo determinada, para el caso del Regulador Lineal Cuadrático la función de costo es la siguiente:

$$J = x^T(tf)P_0x(tf) + \int_{t_0}^{tf} (x^T Qx + u^T Ru)dt \quad (4.4)$$

Donde “x” son los estados del sistema elegidos como errores con respecto a los valores de estado estacionario. Q (Matriz de pesos para los estados), R (Matriz de pesos para las entradas) y P0 son matrices reales, simétricas, constantes y definidas positivas.

En la mayoría de análisis tf se considera infinito (∞), la función de costo es:

$$J = \int_{t_0}^{\infty} (x^T Qx + u^T Ru)dt \quad (4.5)$$

Para sistemas digitales la función de costo es como se presenta en la siguiente ecuación:

$$J = x^T(N)P_0x(N) + \sum_{k=0}^{N-1} (x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)) \quad (4.6)$$

Y considerando que N tiende a infinito, es:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)) \quad (4.7)$$

Para aplicar esta técnica de control es necesario tener definido el modelo de espacio de estados del sistema. El modelo del regulador lineal cuadrático posee una ley de control de realimentación de las variables de estado; tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$u = -[k(t)][x(t)] \quad (4.8)$$

Los cálculos de la matriz que representa las constantes del control se calculan por medio de la siguiente función:

$$[k(t)] = [R^{-1}][B]^T[P(t)] \quad (4.9)$$

El término $[P(t)]$ corresponde a la matriz de la ecuación de Ricatti que se calcula según la siguiente ecuación:

$$[\dot{P}] = [A]^T[P] + [P][A] + [Q] - [P][B][R]^{-1}[B]^T[P] \quad (4.10)$$

Esta función anterior solo puede ser resuelta si se comprueba que el proceso a controlar es observable y controlable, así se garantiza también la existencia de la matriz de control óptimo.

En la mayoría de los casos para obtener las matrices Q y R se asignan en la diagonal valores grandes a las variables de estado que se quieren reducir y viceversa, teniendo en cuenta que dichas matrices no pueden tomar valores negativos. [38]

Para obtener un valor aproximado de R se debe tener en cuenta, que debe ser mayor a cero y que el valor es directamente proporcional al comportamiento de la planta, es decir que si el valor de R es muy grande las acciones control aumentarán sobre la planta y viceversa. [38]
 La selección de Q dependerá de la exigencia de control, entre más grandes sean los valores de esta matriz se obtendrá un mayor control de la planta. [38]

Además de tener en cuenta los aspectos anteriormente mencionados, es necesario conocer y tener claridad en el comportamiento dinámico de la planta, pues al no existir una regla general que establezca los valores de estas matrices, será de gran ayuda al decidir qué tan grandes o pequeños sean los valores de Q y R de tal manera que se obtenga el control esperado sobre la planta. [38]

La ubicación de los polos en esta técnica de control definirá la rapidez de la convergencia y la magnitud de los estados de entrada en el sistema. Se tienen en cuenta las siguientes características:

Cerca del eje imaginario se obtendrá una respuesta lenta donde el sistema tiende a ser oscilatorio pero no inestable, si por el contrario se ubican lejos al eje imaginario la respuesta será rápida y se necesitará esfuerzos significativos para lograr el control. [36][38]

Capítulo 5

5. Análisis de pruebas y resultados

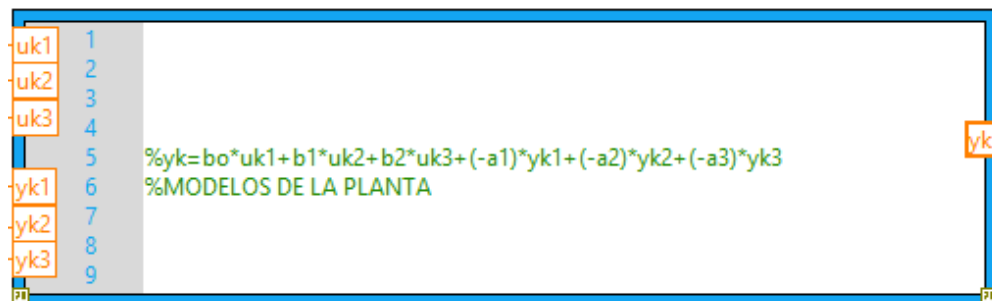
En este capítulo se hará énfasis en el proceso de diseño de la planta y del sistema de control propuesto, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos.

En los numerales anteriores se enunciaron las bases teóricas y las técnicas de control utilizadas, a continuación se mencionan algunos aspectos importantes a tener en cuenta para el desarrollo del diseño:

- El sensor de giro utilizado (Giroscopio) es un sensor bastante sensible al ruido así que las condiciones de prueba sobre la planta deben ser en espacios en lo posible libres de ruido ya que su señal se puede ver afectada fácilmente ante perturbaciones externas.
- La planta propuesta cuenta con dos servomotores, sin embargo las órdenes serán las mismas para ambos, su control no será independiente.

5.1. Pruebas de identificación.

El método usado para la identificación en línea del sistema es el de Mínimos Cuadrados recursivos, sus fundamentos teóricos se expresan en el numeral 3.1. Utilizando la herramienta de programación que ofrece el Software LabView “MathScript Node”, se incluye el código para la implementación del algoritmo de identificación.



```

1
2
3
4
5 %yk=bo*uk1+b1*uk2+b2*uk3+(-a1)*yk1+(-a2)*yk2+(-a3)*yk3
6 %MODELOS DE LA PLANTA
7
8
9

```

Figura 5.1. Modelo generalizado de la planta en ecuación de diferencias

```

1  % Identificación por mínimos cuadrados
2  phi=[-yk1;-yk2;-yk3;;uk1;uk2;uk3;]
3  teta1=x1(:)
4  yest=phi*teta1
5  ye=yest(1,1);
6  c1=phi*pk1*phi
7
8  teta=teta1+(pk1*phi*(yk-ye))/(1+c1(1,1))
9  pk=pk1-(pk1*phi*phi*pk1)/(1+c1(1,1))
10
11  teta=teta(:,1);
12
13  a1=teta(1)
14  a2=teta(2)
15  a3=teta(3)
16  b0=teta(4)
17  b1=teta(5)
18  b2=teta(6)

```

Figura 5.2. Algoritmo de identificación por mínimos cuadrados.

Se realizaron varias pruebas para obtener los parámetros característicos de la planta, todas se hicieron bajo las mismas condiciones de ambiente y por periodos de tiempo prolongados. Debido a que los parámetros son desconocidos se deben inicializar en cero y se procede a hacer la identificación hasta que estos empiecen a estabilizarse, una vez se obtiene valores estables se toman como base para inicializar los parámetros.

Una vez se observó un patrón en el modelo (valores similares) se tomó la decisión de elegir uno de los modelos obtenidos con el objetivo de simular la planta y probar la efectividad del algoritmo de identificación aplicado.

5.2. Pruebas de control.

La técnica de control utilizada es la de optimización LQR. Los aspectos básicos de esta técnica se muestran en el numeral 4.4.1. Utilizando la herramienta de programación que ofrece el Software LabView “MathScript Node”, se utiliza la función “dlqr” para la implementación del algoritmo de control.

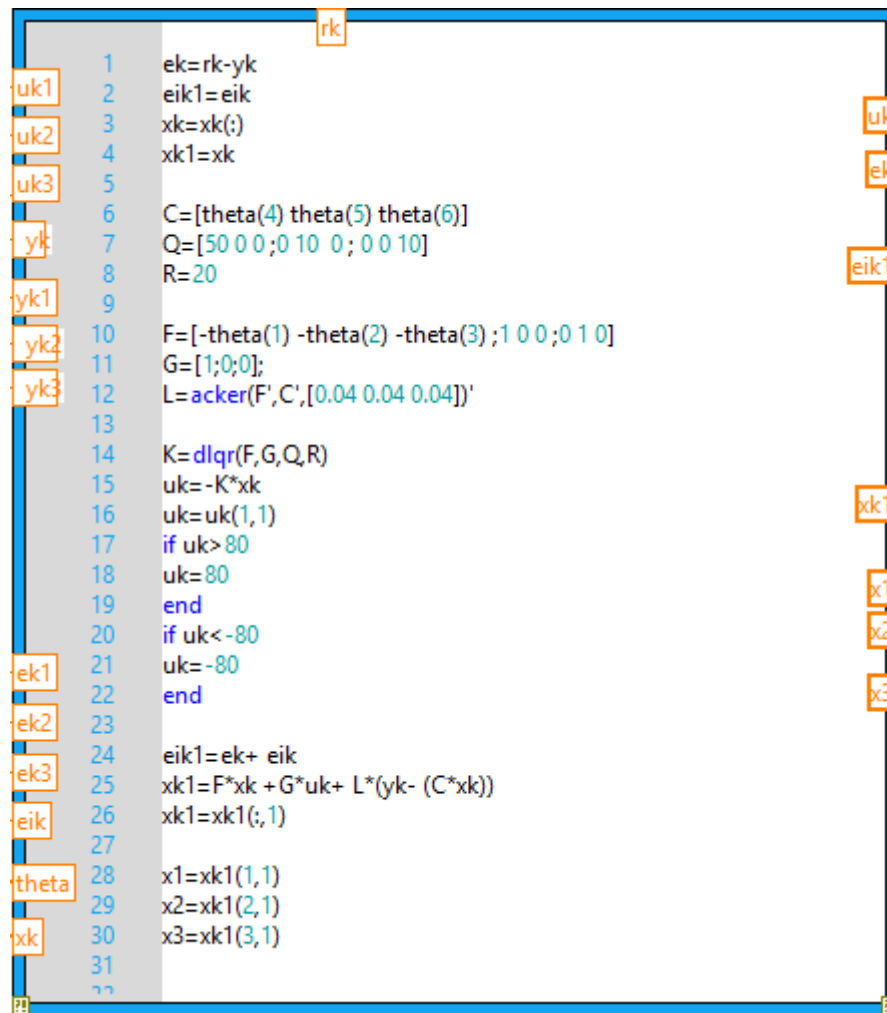


Figura5.1. Algoritmo de control LQR.

La señal de entrada al algoritmo es tomada de la señal que arroja el sensor del Giroscopio, y la señal de salida es enviada como orden a los servomotores. El modelo de control sobre el sistema requiere de una señal de referencia, para el modelo de sistema proyectado el valor de esta señal es cero.

Revisando la bibliografía existente se encontró que la técnica de control óptimo LQR está diseñada para que el sistema en lazo cerrado alcance el estado de equilibrio. Con la herramienta de simulación LabView y utilizando el mismo algoritmo de control se asignaron estados iniciales diferentes a los del equilibrio del sistema, por lo cual al inicio del programa todos los estados parten de los valores asignados, que en este caso fueron arbitrarios.

Con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento del regulador en la técnica de control se realizan pruebas simuladas aplicando el algoritmo sobre el modelo de la planta identificado, los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.2.

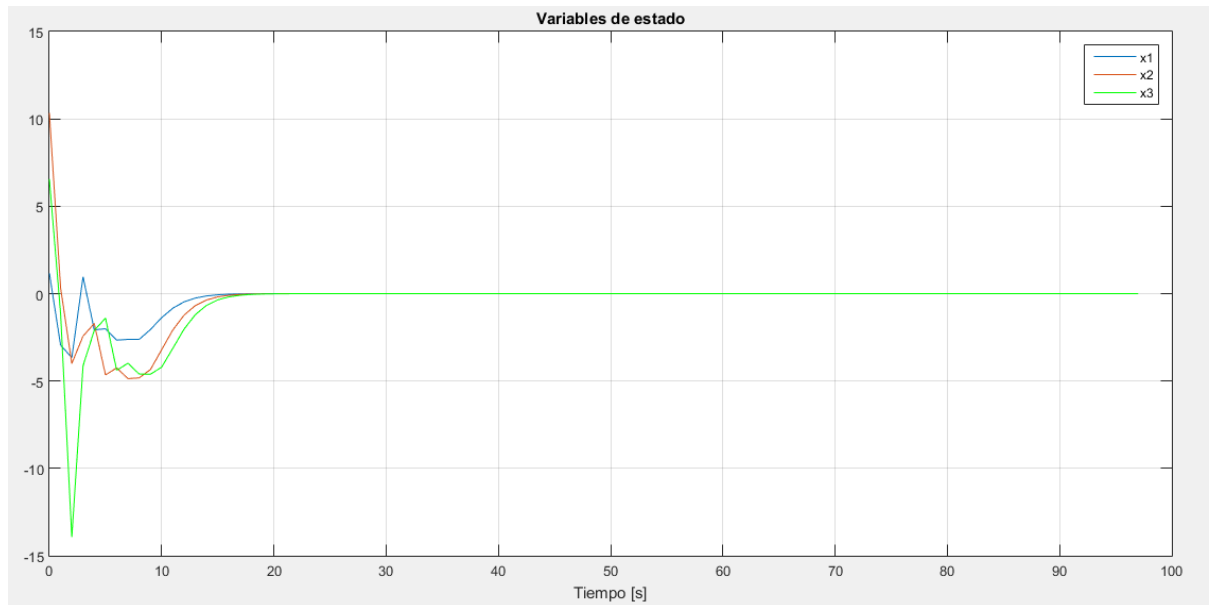


Figura 5.2. Respuesta del regulador en los estados del sistema

En la figura 5.2 se puede notar como el regulador cumple su función ya que logra llevar todos los estados de sistema al punto de equilibrio; como se mencionó anteriormente los valores iniciales fueron arbitrarios y se definió una matriz de tres filas por una columna los cuales están asociados a la variable x_k , por medio de la cual se obtiene las variables de estado x_1 , x_2 , x_3 .

5.3. Resultados.

Se realizan una serie de pruebas de las cuales se observó que a medida que transcurría el tiempo, tanto la identificación como el control mejoraban esto debido a que los parámetros del sistema se hacen más estables y el control trabaja sobre un modelo más preciso.

Es importante tener en cuenta que en el caso del péndulo invertido el estado de equilibrio deseado es aquel donde el péndulo se encuentra en una posición vertical y el valor medido por el sensor es cero.

Los resultados más apropiados se muestran a continuación:

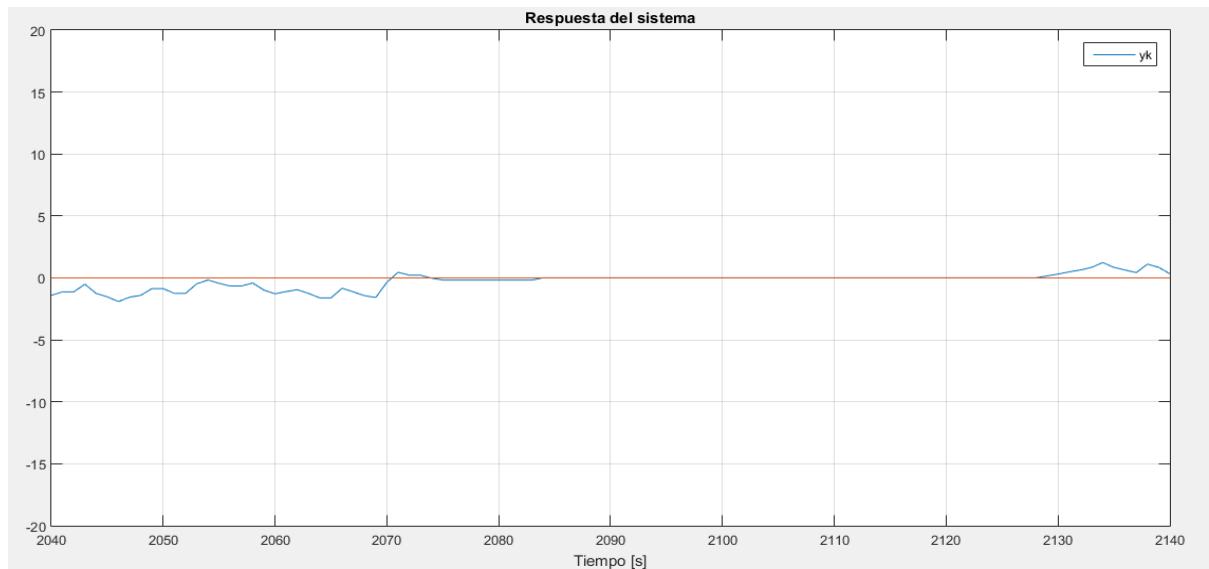


Figura 5.3 Respuesta del sistema con el controlador LQR.

La figura 5.3 muestra la posición angular y el comportamiento del sistema con la técnica de control LQR, se observa que al inicio la respuesta difiere del valor de referencia y se presentan oscilaciones como producto de los intentos del control por corregir el comportamiento del sistema, una vez que se logran obtener valores cercanos al equilibrio efectivamente se consigue estabilizar la planta y hacer que la respuesta alcance la señal de referencia.

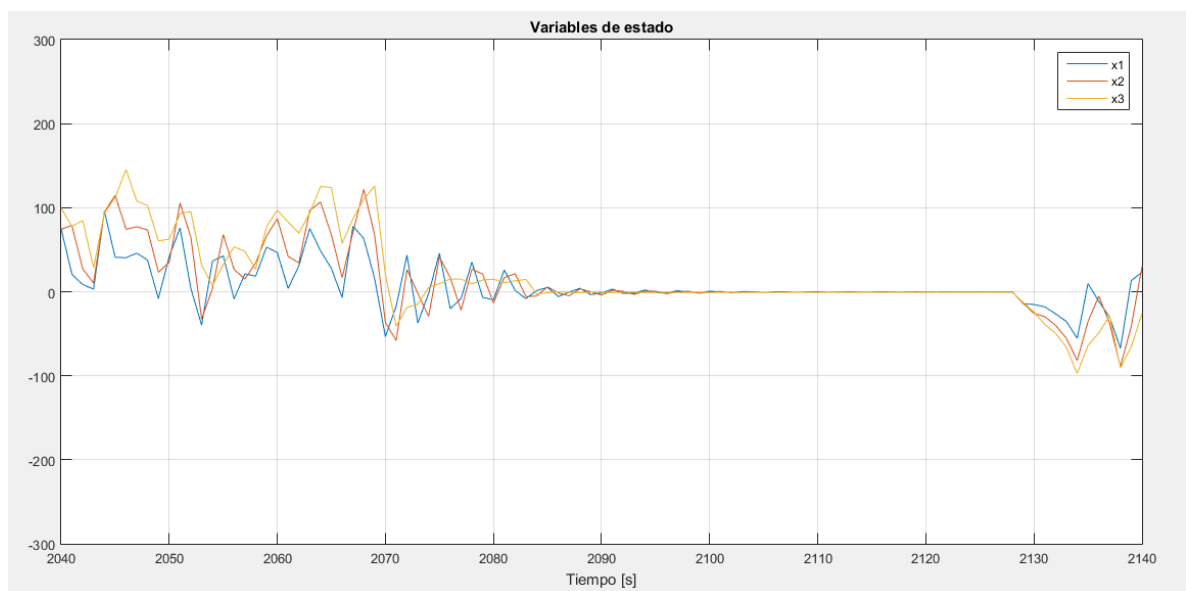


Figura 5.4. Comportamiento de los estados del sistema

La figura 5.4 muestra el comportamiento de las variables de estado del modelo identificado, se visualiza que al inicio la planta presenta perturbaciones y altas variaciones, sin embargo el regulador lineal cumple el objetivo de llevar los estados del sistema a un punto de equilibrio.

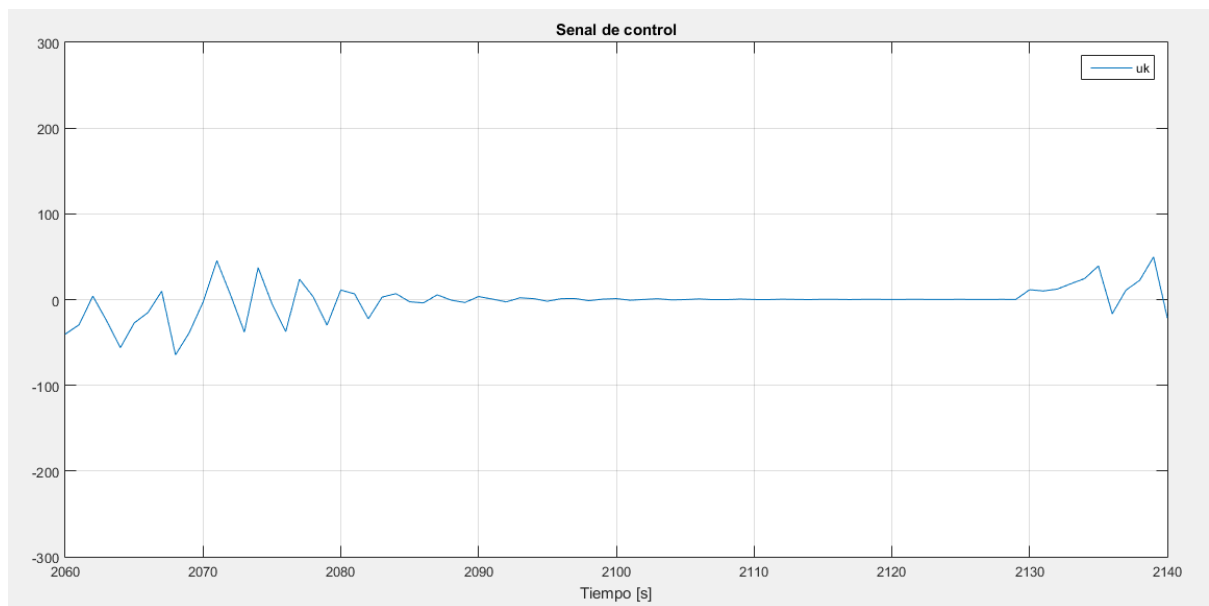


Figura 5.5. Señal de entrada a los motores

La figura 5.5 representa la señal de control que es enviada a los motores para corregir el comportamiento del sistema, se puede notar claramente que esta señal no alcanza los valores de saturación, se mantiene entre los límites programados en el algoritmo -80 y 80 .

Para el principio del funcionamiento del modelo de control esta señal de mando se envía al sistema cuando el ángulo que se obtiene del sensor difiere significativamente del valor de referencia establecido, desde la observación de la señal de control también es posible concluir sobre la correcta acción del controlador.

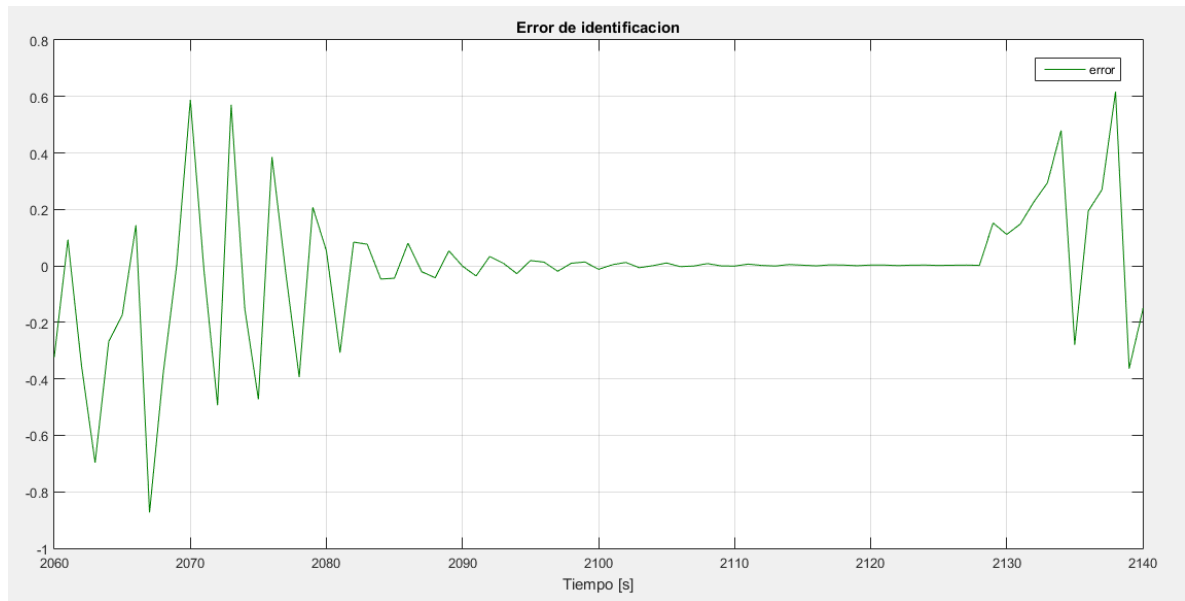


Figura5.6. Error de la señal real del sistema con la señal estimada

En la figura 5.6 se puede observar que el programa necesita de un periodo de tiempo para ajustar los valores de la planta real y lograr una correcta identificación, el algoritmo de identificación se inicializa en valores tomados de pruebas anteriores que se van reajustando, durante este proceso, la diferencia de la señal estimada y señal obtenida es considerablemente grande solo hasta que se obtiene parámetros estables cercanos a la planta real se observa que el error es mínimo y se mantiene; ya que la identificación es en línea el error se ve afectado ante perturbaciones.

Capítulo 6

6. Conclusiones.

LabVIEW es una gran herramienta para el desarrollo de sistemas de control en tiempo real, ya que cuenta con el toolkit de LEGOMINDSTORMS NXT 2.0, gracias al cual fue posible realizar las pruebas de funcionamiento y análisis del comportamiento a cada uno de los elementos usados para la construcción de la planta, permite el tratamiento de las señales provenientes de los sensores y actuadores en tiempo real, siendo esta una característica principal para realizar la identificación en línea.

La selección de la frecuencia de muestreo es primordial en el diseño de cualquier sistema de control, su importancia radica en que si se desea que el modelo de control diseñado logre la respuesta deseada, es necesario que cada uno de los pasos del programa se lleve a cabo correctamente. Para la elección del tiempo de muestreo se tuvo en cuenta la velocidad con la cual se reciben y envían las señales a la planta y cuánto tarda el programa entre el instante en el que toma la señal de entrada y el instante en el que da una señal de salida.

Se logró a partir del método de mínimos cuadrados recursivos realizar la identificación en línea del funcionamiento del péndulo invertido, parte que es primordial para el desarrollo e implementación del modelo de control aplicado. El error de identificación observado durante el funcionamiento se mantuvo en valores mínimos, de lo cual se concluye que el modelo de identificación aplicado efectivamente logró obtener los parámetros más cercanos a los característicos de la planta.

En la bibliografía existente revisada se hace evidente que la técnica LQR es ampliamente utilizada en el mundo del control, esto se atribuye a que puede ser implementada en toda clase de sistemas ya sean lineales o no lineales. En el presente proyecto se realizó la aplicación de esta técnica, partiendo de la fundamentación teórica y fue posible evaluar la acción del controlador LQR sobre la planta identificada en tiempo real.

La aplicación de la técnica de control LQR sobre la planta permitió obtener una respuesta acorde a lo esperado, observando el comportamiento de las variables de estado se pudo notar que efectivamente el regulador logra llevarlos al estado de equilibrio, mejorando la estabilidad del sistema físico y acercando considerablemente la señal de interés a la referencia.

Los valores de las matrices Q y R se ajustaron manualmente por ensayo y error, mediante la observación continua del comportamiento de la planta y dependiendo de las variaciones que se desean permitir para la respuesta del controlador y la regulación de las variables de estado.

SUGERENCIAS

Cuando se propone el diseño de un sistema de identificación y control en tiempo real se debe hacer lo posible por garantizar que las señales tratadas no se vean contaminadas por el ruido del ambiente o por agentes externos. El desempeño del modelo de control puede mejorar significativamente sobre el sistema si se hace uso de sensores más precisos y con menos sensibilidad al ruido, ya que algunos agentes externos pueden generar perturbaciones en el sistema contaminando las medidas y por ende afectando las respuestas que se quieren obtener. Particularmente así fue el caso del sensor giroscopio, este sensor es bastante sensible y arroja medidas que cambian constantemente con cualquier movimiento.

Es recomendable que para la construcción del péndulo invertido la barra sea lo más sólida posible, ya que de este elemento depende la rigidez y estabilidad del sensor giroscopio y como se había mencionado anteriormente las mediciones tomadas pueden verse afectadas por vibraciones.

Para posibles trabajos futuros se propone desarrollar un modelo que facilite la obtención de la variable de entrada para evitar variaciones significativas producto del proceso de muestreo y aplicación de métodos para el tratamiento de las señales tales como filtros, límites de saturación y métodos de integración; esto con el fin de obtener un modelo del sistema lo más cercano posible a la planta real.

Capítulo 7

7. Referencias

- [1]. F. Castaños “levantamiento y estabilización del péndulo invertido” ,2003 [en línea].Disponible en: <http://www.ctrl.cinvestav.mx/~fcastanos/mios/bachelorCastaños.pdf>, [Accedido: 4-Abri-2018]
- [2]. K. Furuta, H. Nishihara and S. Mori. “Control of Unstable Mechanical Systems: Control of Pendulum”. International Journal of Control, Vol. 23, pp. 673-692, Furuta, 1976
- [3]. F. Grasser, A. Darico, S. Colombi and A. Rufer. “Joe: A Mobile, Inverted Pendulum”. Swiss Federal Institute of Technology. http://leiwwww.epfl.ch/publications/grasser_darrigo_colombi_rufer_mic_01.pdf. 2002
- [4]. Y. Yamamoto, “NXTway-GS Model-Base Design - Control of self-balancing two-wheeled robot built with LEGO Mindstorms NXT -,” 2009.
- [5]. A. Hernández, " control inteligente del péndulo invertido " tesis para optar título de ingeniero mecánico, universidad complutense de Madrid, Madrid, 2012.
- [6]. F. Flórez, "Análisis de control de un péndulo invertido mediante técnicas de control inteligente," tesis para optar título de ingeniero mecánico, instituto Politécnico Nacional, México, 2013.
- [7]. P. k. Tripathy, “Self-Balancing Bot Using Concept of Inverted Pendulum,” National Institute of Technology Rourkela, Rourkela, India, 2013.
- [8].L. Araujo. “pendulo invertido simple con LQR, PID sinmechanics”, [en línea].Disponible en: https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25139-simple-inverted-pendulum-with-lqr-pid-simmechanics?s_tid=srchtitle
- [9].Ensegway, “Que es un segway”, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.ensegway.es/segway/que-es-un-segway/> [Accedido: 24-jun-
- [10].HTWay – A Segway type robot, hitechnic, [En línea]. Disponible en: <http://www.hitechnic.com/blog/gyro-sensor/htway/> [Accedido: 24-jun-2018]
- [11]. HiTechnic MINDSTORMS NXT Models, Hitechnic, [En línea]. Disponible en: <http://www.hitechnic.com/models> [Accedido: 24-jun-2018]
- [12]. MINDSTORMS NXT, [en línea]. Disponible en: <https://www.lego.com/es-ar/mindstorms>[Accedido: 26-jun-2018]

- [13]. L. España, SET 8547 NXT 2.0, EsMindstorms, 2014, [En línea]. Disponible en: <http://www.esmindstorms.com/2014/12/set-8547-nxt-20.html> [Accedido: 24-jun-2018]
- [14]. L. España, Ladrillo Inteligente Mindstorms NXT, EsMindstorms, 2015, [En línea]. Disponible en: <http://www.esmindstorms.com/2015/01/ladrillo-inteligente-mindstorms-nxt.html> [Accedido: 24-jun-2018]
- [15]. L. España, Servomotor Grande, EsMindstorms, 2015, [En línea]. Disponible en: <http://www.esmindstorms.com/2015/11/servomotor-grande.html> [Accedido: 24-jun-2018]
- [16]. NXT Gyro Sensor (NGY1044), Hitechnic, [En línea]. Disponible en: <http://www.hitechnic.com/cgi-bin/commerce.cgi?preadd=action&key=NGY1044> [Accedido: 24-jun-2018]
- [17]. P. P. Cruz, V. M de la Cueva and H. P. Espinosa, Robótica aplicada con LabVIEW y LEGO, Alfaomega Colombiana S.A., Colombia, 2015.
- [18]. L. España, Software NXT-G 2.0, 2015, [En línea]. Disponible en: <http://www.esmindstorms.com/2015/05/nxt-g-20.html> [Accedido: 24-jun-2018]
- [19]. NATIONAL INSTRUMENTS, ¿Qué es LabVIEW?, [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/es-co/shop/labview.html> [Accedido: 24-jun-2018]
- [20]. NATIONAL INSTRUMENTS, Entorno NI LabVIEW, [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/academic/students/learnlabview/esa/environment.htm> [Accedido: 24-jun-2018]
- [21]. NATIONAL INSTRUMENTS, Software de Desarrollo de Sistemas NI LabVIEW, [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/labview/products/esa/> [Accedido: 24-jun-2018]
- [22]. Página de donde descargamos lego para labview
- [23]L.Jung, System identification: teory forthe user. Prentice-Hall, 1987
- [24]E. Vallejo, “identificación paramétrica de sistemas dinámicos”, pp 10-14, Mar 2016
- [25] P. Arafet “metodos de identificación dinamica”,pp5-10,,jun 2018
https://www.researchgate.net/profile/Pedro_Arafet_Padilla/publication/242121057_Metodos_de_Identificacion_dinamica/links/55549f8408ae980ca609f977/Metodos-de-Identificacion-dinamica.pdf

- [26]D. Rodríguez “identificación de sistemas”, [en línea] Disponible en: <http://www.esi2.us.es/~danirr/apuntesIC4.pdf>[Accedido: 2-marz-2018]
- [27]Identificación paramétrica de sistemas [Pdf descarga]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/268344385_Identificacion_parametrica_de_sistemas_dinamicos [accessed May-19 -2018].
- [28] P. Zarate, "Identificación paramétrica discreta," tesis para optar título de ingeniero en electronica, Escuela Politecnica Nacional, Ecuador, 1996
- [29]D. Rodriguez “análisis y control de sistemas en espacio de estado identificación de sistemas”,[en línea].Disponible en: <http://www.esi2.us.es/~danirr/apuntesIC4.pdf> [Accedido 17-jun-2018]
- [30]Franklin G. F. & Povell I.D.; "digital control of dynamic systems"; Addison-Vesley, U.S.A. 1980.
- [31]. D. G. Buitrago and E. G. Suárez, \Teoría de control análogo, Colombia, Marzo 2009, universidad Tecnológica de Pereira.
- [32]. J. L. Rodríguez Pérez, Conceptos básicos y terminología de control, [En línea]. Disponible en: <http://www.unet.edu.ve/~jlrodriguezp/ctrlterm.pdf> [Accedido: 24-jun-2018]
- [33]. D. G. Buitrago and E. G. Suárez, \Teoría de control digital," Produmedios, Colombia, Marzo 2012, universidad Tecnológica de Pereira.
- [34]. Ogata, K; Sistemas de Control en Tiempo Discreto, University of Minnesota, Pretience Hall, 1996.
- [35]. Función de transferencia y comportamiento transitorio de sistemas muestreados, [En línea]. Disponible en: <https://catedra.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/controlm/electricista/archivos/apuntes/cap3.pdf> [Accedido: 24-jun-2018]
- [36]. D. S. Naidu, Optimal Control Systems, S. Richard C. Dorf, Ed. CRC Press, 2003
- [37]. R. J. Mantz, Introducción al control óptimo, Universidad Nacional de La Plata, 2003
- [38] L. T. Poveda Galvis, J D Martínez Velasco, Diseño e implementación de un control óptimo LQR con la tarjeta Raspberry Pi, Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero en Control, Univ. Distr. Francisco Jose de Caldas.

[39] P. A. Lora Thola, “Estudio e implementación de un controlador para un robot tipo Segway y de los algoritmos que lo capacitan para el seguimiento de trayectorias desconocidas”, trabajo final de máster, Univ. Pol. Catalunya (UPC), 2015.

[40] [A]. E. H. Gallego, Control de Velocidad Vectorial Lineal y no Lineal para un Motor de Inducción sin Sensor de Velocidad, Trabajo de grado para optar por el título de Maestría en Instrumentación Física, Univ. Tecnológica de Pereira.

Bibliografía

Andrews, S. Fastqc, (2010). A quality control tool for high throughput sequence data.

Augen, J. (2004). Bioinformatics in the post-genomic era: Genome, transcriptome, proteome, and information-based medicine. Addison-Wesley Professional.

Blankenberg, D., Kuster, G. V., Coraor, N., Ananda, G., Lazarus, R., Mangan, M., ... & Taylor, J. (2010). Galaxy: a web-based genome analysis tool for experimentalists. Current protocols in molecular biology, 19-10.

Bolger, A., & Giorgi, F. Trimmomatic: A Flexible Read Trimming Tool for Illumina NGS Data. URL <http://www.usadellab.org/cms/index.php>.

Giardine, B., Riemer, C., Hardison, R. C., Burhans, R., Elnitski, L., Shah, P., ... & Nekrutenko, A. (2005). Galaxy: a platform for interactive large-scale genome analysis. Genome research, 15(10), 1451-1455.

Kwakernaak, H., Sivan, R., Lineal optimal control systems, Wiley int, (1967). McGraw Hill, New York, 1968.