



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTA DE INGENIERÍA

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL Y
MÓDULO MECÁNICO PARA UNA SILLA DE RUEDAS”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

P R E S E N T A

FERNÁNDEZ CRUZ NOÉ
GUTIÉRREZ MACHORRO DANIEL
LUNA VEGA JORGE HUMBERTO

DIRECTOR DE TESIS:
DR. ADRIÁN ESPINOSA BAUTISTA



CIUDAD UNIVERSITARIA 03/04/2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Daniel Gutiérrez Machorro

*Este trabajo lo dedico a todas las personas
que creyeron en mí y me dieron su apoyo
en especial a mis padres, hermanos y mis compañeros
sin los cuales no hubiera podido terminar este proyecto.
¡Gracias!*

Noé Fernández Cruz

*Agradezco a mis padres, a mis hermanos, a mi familia,
a mis amigos y profesores por el apoyo incondicional
que recibí en todos los aspectos, no solo a lo largo de
mi carrera, si no a lo largo de toda mi vida, ya que sin
ellos no hubiera llegado hasta este momento.
A la Universidad Nacional Autónoma de México
por haberme dado la oportunidad de estudiar en la
Facultad de Ingeniería y recibir los conocimientos de
grandes profesores.*

Jorge Humberto Luna Vega

*A aquellos que me apoyaron, a toda mi familia, a los
amigos y cómplices que conocí durante este camino,
a los maestros que con paciencia compartieron sus
conocimientos y sobre todo a los que lo han dado todo por mí:
María Eugenia Vega Mendoza y José Pedro Luna Gallegos.*

Diseño e implementación de un sistema de control y módulo mecánico para una silla de ruedas

CONTENIDO

<i>INTRODUCCIÓN</i>	7
<i>OBJETIVO</i>	10
<i>METODOLOGÍA</i>	11
Capítulo 1: Referencias	13
1.1 Antecedentes	13
1.2 Historia	14
1.3 Sillas de ruedas manual y eléctrica (Tipos y características)	19
1.4 Sillas de ruedas especiales	23
1.5 Materiales de construcción de la silla de ruedas	27
Capítulo 2: Propuesta y elementos mecánicos	28
2.1 Problemática de personas con discapacidad motriz	28
2.2 Requerimientos y necesidades de la silla de ruedas a diseñar	33
2.3 Limitaciones y requerimientos para el diseño de la silla	34
2.4 Características generales de la silla de ruedas y componentes	36
2.4.1 Componentes	38
2.4.2 Funcionamiento	39
2.5 Características del diseño mecánico, electrónico y de software	46
2.6 Condiciones físicas contra requerimientos del usuario	47
Capítulo 3: Diseño de controlador	49
3.1 Modelo general de la silla de ruedas	49
3.2 Modelo Matemático	51
3.3 Análisis del Controlador	58
3.4 Simulación y Parametrización	60

Capítulo 4: Implementación electrónica y control	75
4.1 Etapas de diseño e implementación	75
4.2 Implementación electrónica	76
4.3 Funcionamiento	93
Capítulo 5: Costo del proyecto y resultados experimentales	95
Capítulo 6: Conclusiones	99
Bibliografía	102
Anexos	104

INTRODUCCIÓN

Las personas con discapacidades son una minoría muy importante de la población y aunque sus derechos se encuentran en la constitución nacional, estos no siempre se tienen en cuenta, muchos de ellos son ignorados. Hoy en día ellos mismos demuestran que poseen talentos y capacidades que les permiten tener cierta autonomía e independencia.

La discapacidad motriz de muchas personas ha creado la necesidad de implementar diferentes vehículos para facilitarles el traslado y movilidad. Los principales problemas que puede generar la discapacidad motriz son varios, entre ellos podemos mencionar: movimientos incontrolados, dificultades de coordinación, alcance limitado, fuerza reducida, dificultad con la motricidad fina y gruesa, mala accesibilidad al medio físico.

Existen sillas de ruedas totalmente mecánicas y mecánico-eléctricas. Actualmente el tipo de sillas mecánico-eléctricas tiene un costo elevado, lo que dificulta la obtención de una de éstas por la mayoría de las personas que la necesitan.

Otro problema es el gasto en mantenimiento de la silla. Esto resulta ser elevado ya que las piezas a remplazar necesitan ser importadas debido a que no las hay en México con las características que se requieren.

Un problema más es el traslado. Las sillas eléctricas que actualmente encontramos en el mercado son más grandes y pesadas que las convencionales, cabe mencionar que éstas no son plegables. Esto dificulta, y entorpece su traslado y como consecuencia se tiene un gasto elevado por el mismo.

El crecimiento de la ingeniería eléctrica y electrónica nos permite darle una solución práctica a estos problemas, con el desarrollo de un módulo de control eléctrico que permita darle movimiento a una silla de ruedas convencional, esto reduciría el costo de obtención con respecto de las sillas eléctricas que actualmente existe, ya que no sería necesario adquirir una silla de ruedas eléctrica si ya se cuenta con una silla convencional.

La estructura de esta tesis se conforma de 6 capítulos, a saber:

En el primer capítulo, se hace una referencia histórica de la evolución de las sillas de ruedas a través del tiempo, así como los materiales empleados en su elaboración y los usuarios a los que fueron destinadas éstas.

En el segundo capítulo, analizamos la problemática de las personas con algún tipo de discapacidad, y explica el origen de este proyecto de tesis. Se revisaron las limitantes y requerimientos para el diseño e implantación del módulo con base a los componentes que fueron proporcionados.

En el tercer capítulo, se desarrolló la teoría de control necesaria para definir el tipo de control adecuado con base a los requerimientos previamente establecidos.

En el cuarto capítulo, se muestra el desarrollo de cada etapa del diseño electrónico necesario para la aplicación del control seleccionado además de la implementación física de la parte electrónica.

En el quinto capítulo, se realiza la cotización del módulo implementado y se analizaron los resultados experimentales obtenidos.

En el sexto capítulo, en base a los resultados obtenidos analizaremos y obtendremos una conclusión del prototipo implementado y sus alcances.

OBJETIVO

Diseñar un módulo mecánico y un sistema de control que en conjunto sean capaces de adaptarse a una silla de ruedas convencional. Esta silla debe conservar características determinadas que faciliten el traslado, transformándola en eléctrico-mecánica, siendo capaz de satisfacer las necesidades y requerimientos de Carlos (usuario final) para quien está diseñada y a su vez obtener un prototipo eficiente y de bajo costo.

METODOLOGÍA

Se analizaron los modelos y diseños más comunes de sillas de ruedas convencionales y mecánico-eléctricas que se encuentra en el mercado para así obtener algunas referencias básicas para determinar la funcionalidad y viabilidad del diseño propuesto.

Se buscaron las representaciones matemáticas de los elementos físicos con los que se cuentan y se investigaron las teorías de control más comunes que mejor convengan a dicho modelo.

Se hizo el desarrollo matemático pertinente y así con ayuda de equipo de cómputo y software especializado se realizaron simulaciones, las cuales nos ayudaron a definir qué es lo que más se adaptó a las necesidades del proyecto.

Posteriormente se implementó el modelo físico del módulo mecánico (prototipo) y la circuitería necesaria para la aplicación de la teoría de control seleccionada.

El módulo se pondrá en la parte inferior de la silla de ruedas, el cual se sujetará con unos seguros de fácil liberación para hacer más sencillo su colocación y liberación sin modificar de ninguna manera las características de la silla.

El mando que controlará el módulo se colocará en la parte superior de la silla a la altura de los codos. Este constará de una palanca multidireccional y un

sistema de encendido y apagado que controlará la alimentación que se le dé al módulo.

El módulo constará de 10 piezas hechas en aluminio y lámina, estas tendrán movilidad para adaptarse a la silla de Carlos, a su vez estas se ensamblarán con 2 cajas reductoras, acopladas a un motor cada una. Los motores estarán alimentados por una batería de 12 [v].

En la parte de control se utilizará una teoría de control clásico haciendo uso de diversos sensores, dispositivos analógicos y digitales. En conjunto harán las conversiones necesarias para el uso conjunto de estos obteniendo así un bajo costo y un gran rendimiento, la alimentación de este será de manera independiente para evitar errores en su funcionamiento.

Se harán las pruebas pertinentes para obtener un prototipo que nos ofrezca un horizonte más amplio de lo que se pretende realizar.

Optimizar y rediseñar los sistemas mecánicos, electrónicos y de energía para tener un uso eficiente de los recursos y así poder llegar a un prototipo final que sea de bajo costo y del mejor rendimiento.

Capítulo 1

1.1 Antecedentes

La discapacidad es una realidad humana que nos ha acompañado en diferentes periodos históricos. Una discapacidad o incapacidad es aquella condición bajo la cual ciertas personas presentan deficiencias físicas, mentales, intelectuales o sensoriales que pueden impedir su participación plena y efectiva en la sociedad.

Así, traumas y enfermedades han creado una necesidad de buscar un medio para poder trasladar a las personas que la padecen. En el pasado, las sillas de ruedas no eran como las conocemos actualmente, eran adaptaciones de sillas normales con pequeñas ruedas, las cuales se adaptaban para reyes y dependía de un cortesano o un sirviente para empujarla. Al pasar del tiempo los diseños fueron mejorando, comenzando por manivelas que permitían a la silla ser controlada por quien la utilizaba.

Una silla de ruedas es una ayuda técnica que consiste en adaptar a una silla al menos tres ruedas, aunque lo normal es que disponga de cuatro. Estos dispositivos están pensados para permitir el desplazamiento de aquellas personas que no pueden o no deben deambular. Debido a problemas de locomoción o movilidad reducida, como por ejemplo los que tienen paraplejía o un muy fuerte dolor en las extremidades inferiores o hiperobesidad. Muchas de estas personas no cuentan con el apoyo de una persona que los ayude a subirse a la silla, la

necesidad los obliga a recurrir a banquillos o ladrillos u otro objeto para lograr alcanzar la silla [1].

1.2 Historia

No existe un dato preciso de cuando comenzó la historia de las sillas de ruedas. Sin embargo, la evolución de estas sillas no ha sido sencilla y ha tomado bastante tiempo para poder llegar hasta las sillas que conocemos actualmente. En un principio eran adaptaciones de sillas normales con pequeñas ruedas. Materiales ligeros, diseños que permiten mayor movilidad y autonomía para quien la utiliza son los elementos que han jugado un importante papel en esta evolución. Se cree que el primer intento de instalar unas ruedas en una silla fue alrededor del año 4000 AC, ya que tanto la silla como la rueda se descubrieron en esa época. En el año 525, se encontró un grabado chino, Figura 1.1 muestra lo que parece un sillón con tres ruedas destinado a ser impulsado por terceras personas.



Figura 1.1 Grabado chino de una silla de ruedas, año 525

Cualquier otra historia relacionada con la silla de ruedas es difícil de documentar hasta 1595. En el mismo año un artista dibujó al Rey español Felipe

II de España (1527 - 1598) sentado en una silla que tenía pequeñas ruedas y respaldo manualmente ajustable [2], Figura 1.2.



Figura 1.2 Felipe II Rey de España sobre una silla de ruedas

En la silla se incluía una plataforma que levantaba las piernas del Rey. La silla del Rey Felipe no era auto-propulsada, él dependía de un cortesano o un sirviente para empujarla. Era evidente que los diseños tenían que mejorar.

En el año de 1655 Stephen Farfler, un joven relojero alemán de solo 22 años construyó el primer vehículo auto-propulsable para su propio uso, Figura 1.3. Era una silla robusta sobre un chasis de tres ruedas con manivelas que Stephen utilizaba para moverse [2].



Figura 1.3 Silla de ruedas diseñada por Stephen Farfler

Las primeras sillas eran hechas de madera, proveían una movilidad muy limitada; la mayoría de los usuarios incluso no podían empujarse a sí mismos y tenían que depender de otras personas para empujarlos.

En 1783 aparece la Silla “Bath”, Figura 1.4, inventada por el fabricante John Dawson en la ciudad inglesa de Bath, de donde toma su nombre. Este modelo de tres ruedas dominara el mercado hasta el siglo XIX. No obstante, la silla “Bath” no era muy cómoda y durante el siglo siguiente fueron añadiéndose mejoras, pensando sobre todo en el confort del usuario, como respaldo y reposapiés ajustables [2].

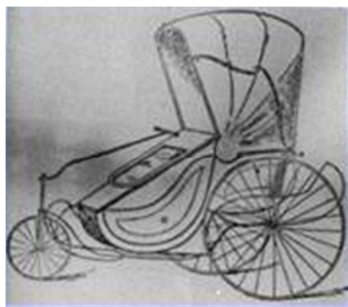


Figura 1.4 Silla Bath

Entre 1867 y 1875 se siguieron añadiendo mejoras, como los aros de propulsión y ruedas de goma. Este avance solucionó el problema de tener siempre las manos sucias debido al contacto con las llantas que a su vez estas estaban en contacto directo con el suelo. Se dieron a conocer como bordes para empujar, Figura 1.5.



Figura 1.5 Silla de ruedas con aros para impulsarse

Cabe destacar, que gran parte de estas mejoras se produjeron gracias a la invención de la bicicleta en el siglo XIX y su posterior evolución. Las sillas de ruedas se volvieron menos voluminosas y más confortables. Los diseños fueron mejorados: ruedas con rayos de alambre, respaldos ajustables, y apoyos móviles para brazos y pies conformaban la primera gran evolución.

En 1932 el ingeniero Harry Jennings, construye en Nueva York la primera silla de estructura tubular plegable, para su amigo parapléjico Herbert Everest, Figura 1.6. Los dos hombres inmediatamente vieron el potencial de este invento y establecieron una compañía (Everest & Jennings) para producir en masa las nuevas sillas portátiles. Estos fueron los precursores de las sillas de ruedas de uso común que hoy en día conocemos [2].



Figura 1.6 Silla de estructura tubular

Los mejores diseños de sillas de ruedas son aquellas que han sido diseñadas por quienes las usan.

En la actualidad existen básicamente dos tipos de sillas de ruedas: convencionales y mecánico-eléctricas. De las segundas existen varios tipos; empujadas por asistente o por ruedas traseras o delanteras. Algunos tipos cuentan con frenos con la tecnología ABS y en ciertos casos especiales con un navegador satelital y una laptop con funciones de red activas también encargada de facilitar la movilidad del afectado, Figura 1.7.



Figura 1.7 Silla de ruedas Mecánico - Eléctrica

Sin embargo, las personas sigue prefiriendo las sillas convencionales, ya que éstas son más baratas, Figura 1.8. Generalmente son plegables (para ahorrar

espacio y poder ser transportadas en maleteros y otros compartimientos similares), suelen estar construidas con elementos ligeros y resistentes como lo es el aluminio o el acero reforzado. En ciertos casos se utiliza titanio al carbono con un revestimiento de Kevlar para brindarle mayor durabilidad, y sobre todo ligereza, ya que su usuario debería ser capaz de levantarla y guardarla, consiguiendo así cierto grado de autonomía y autosuficiencia.



Figura 1.8 Silla de Ruedas Convencional

1.3 Sillas de ruedas convencionales y mecánico - eléctricas (tipos y características)

Hay distintos tipos de sillas convencionales, cada una está pensada para un cubrir una necesidad o propósito para usuarios diferentes.

A. Sillas de ruedas convencionales

Estas son impulsadas por el propio ocupante. Usualmente tienen ruedas traseras de entre 20 y 26 pulgadas de diámetro fijadas a un eje y posicionadas de

forma que los usuarios pueden moverlas empujando hacia abajo o tirando hacia arriba los bordes para empujar. Por eso los usuarios pueden viajar hacia adelante y hacia atrás a velocidades dictadas por la cantidad de fuerza que son capaces de aplicar.

Controlando los bordes para empujar, los usuarios también pueden girar a la izquierda o a la derecha y sortear pequeñas depresiones y subidas que se encuentren por delante. Sin embargo, para operar sillas de ruedas manuales exitosamente, los usuarios deben tener una buena habilidad muscular y coordinación en sus brazos y hombros. Otros métodos alternativos de propulsión incluyen pedales para los pies y palancas accionadas con la mano. Se fabrican en dos modelos principalmente; plegables (para ahorrar espacio y ser transportadas) y rígidas. Para el diseño debe tomarse en cuenta el tipo de aplicación y el tipo de usuario a quien va dirigido. Algunos ejemplos son sillas destinadas a hospitales o centros de salud. Estas sillas poseen un chasis robusto y pesado fabricado en acero, en su mayoría son modelos plegables o desmontables. Son útiles para uso esporádico, destinadas a personas mayores que no se propulsan con demasiada fuerza o en casos en los que el que empuja la silla desde atrás no encuentre el peso como un factor determinante. Según el modelo, pueden encontrarse con reposabrazos desmontables, reposapiés extraíbles o elevables, respaldo reclinable, etc.

Algunas sillas son fabricadas con aluminio, lo cual permite que la fuerza necesaria para transportarse sea menor. Este tipo de sillas permite que sea menos costosa. La mayoría de las sillas de este tipo son de chasis rígido para aprovechar mejor el impulso. La silla no es plegable de manera tradicional pero se

consiguen plegados realmente compactos gracias a ingeniosos sistemas de respaldo abatible, ruedas extraíbles, protectores de ropa en lugar de reposabrazos, la propia forma del chasis, etc. Esto permite que el usuario pueda por ejemplo utilizar de forma autónoma su coche, metiendo por sí mismo la silla por la puerta del conductor una vez se ha sentado en el asiento del automóvil. Por otro lado se han diseñado sillas para personas con movilidad muy reducida o nula y con un control de postura eficiente. Hay otras diseñadas para niños y adolescentes. Cuentan con regulaciones que permiten ajustar el ancho y distintos componentes conforme el niño va creciendo.

Podemos darnos cuenta de que hay modelos para cualquier tipo de usuario, siempre y cuando se tenga el dinero suficiente. Actualmente se prefieren más las sillas manuales que las eléctricas debido al alto precio de estas últimas.

B. Sillas de ruedas mecánico – eléctricas.

Las sillas de ruedas con motor eléctrico son ideales para cualquiera que no posea la fuerza o la habilidad para arreglárselas con una silla manual. Las baterías recargables montadas bajo el asiento suministran la energía para los motores eléctricos que impulsan dos o bien las cuatro ruedas. Como con los autos, los diferentes arreglos de tracción determinan la forma en que la silla de ruedas se mueve y maniobra. Las más comunes cuentan con ruedas de tamaño moderado y un ancho que le permita pasar por las puertas, hay de tracción trasera, delantera y central. Cada una de esas tracciones se conduce de modo diferente y sus posibilidades de maniobra también difieren bastante.

Las sillas de tracción central giran sobre sí mismas por ello necesitan menos espacio para maniobrar, habiendo modelos casi exclusivamente para interiores que usan este tipo de tracción en combinación con unas ruedecillas estabilizadoras. Las de tracción delantera al llevar las ruedas grandes en la parte delantera son buenas evitando obstáculos, aunque la dirección es algo más compleja. La tracción trasera es más cómoda de conducir siendo la elegida por la mayoría de usuarios. Como opción, algunas sillas pueden llevar un accesorio llamado sube bordillos, que mediante un resorte que se apoya en el bordillo nos ayuda a subirlo.

Respecto a las velocidades se pueden encontrar sillas de 2, 3, 6, 10 o incluso 12 [km/h]. Algunas permiten tener control en la aceleración de la silla mientras que en la mayoría aceleración no es controlable teniendo una velocidad fija. La autonomía de este tipo de sillas varía de según el modelo, peso del usuario, pendientes sobre las que circulan, etc. Hay modelos de chasis rígido, chasis plegable y desmontable. Llevan baterías de entre 40 y 60 [Ah] con lo que deberían ser suficiente para un uso cotidiano.

1.4 Sillas de ruedas especiales

Son sillas de ruedas adaptadas al estilo de vida de los usuarios; sillas personalizadas y diseñadas para darle mayor libertad. Están diseñadas especialmente para personas con parálisis, lesiones medulares, con secuelas de accidentes, entre otras. Estas sillas son manuales o eléctricas. Las empresas dedicadas a estos diseños de sillas de ruedas especiales ofrecen múltiples opciones, cada una con un propósito específico. Idealmente ofrecen a sus usuarios:

- Se ajuste a sus necesidades, medidas y gustos.
- Brinde el mejor posicionamiento y comodidad.
- Se adapte a su estilo de vida.
- Prevenga lesiones futuras.
- Fácil manejo y control.

Como ejemplos de sillas especiales a un usuario tenemos las siguientes:

a) Sillas tipo scooter (Wheelbase)

Las sillas tipo scooter (Wheelbase) tienen cuatro pequeñas ruedas que se extienden desde una plataforma baja, Figura 1.9. El tipo de silla montada sobre esta plataforma varía de acuerdo con la discapacidad y las necesidades del usuario, algunas incluso son modeladas a partir de un molde tomado de la postura más apropiada del usuario sentado.



Figura 1.9 Silla tipo Scooter

Una de las ventajas de las máquinas tipo scooter es que la silla puede pivotar y permitir al usuario subirse de cualquiera de los lados. Una desventaja es que el usuario debe mantener una postura rígida cuando maneja. Esto significa que las sillas tipo scooter rara vez son apropiadas para los discapacitados graves.

b) Sillas de ruedas que suben escaleras

Subir escaleras es el máximo desafío para una silla de ruedas, y existe un número de soluciones disponibles:

- Soportes operados a batería en la parte posterior que actúan como estabilizadores a medida que la silla sube.
- Una serie de ruedas flexibles girando dentro de un sendero de goma que se agarra a los escalones.
- Plataformas independientes que suben escaleras a las que se asegura la silla de ruedas.

La mayoría de las sillas de ruedas que suben escaleras aún necesitan un tercero que actúe como auxiliar. Alternativamente, el usuario de silla de ruedas debe ser

capaz de agarrar un pasamano adecuado. Respecto a las sillas de ruedas mecánico-eléctricas, con la finalidad de aumentar su autonomía y asegurar su correcto funcionamiento se les ha adaptado paneles solares que permiten recargar las baterías sin tener que recurrir de manera constante al toma corriente.

c) Sillas de ruedas para la playa

Una silla de ruedas para la playa es inmediatamente reconocida por sus anchas ruedas que le permiten andar suavemente en la arena sin hundirse, Figura 1.10. Algunos balnearios ahora proveen no solamente acceso para silla de ruedas sino también ofrecen a los clientes discapacitados sillas de ruedas para la playa.



Figura 1.10 Silla de rueda para la playa

d) Sillas de ruedas bariátricas

Las sillas de ruedas bariátricas son sillas de ruedas basadas en el diseño de las sillas convencionales, reforzadas y más grandes. Los diseños de estas son más grandes para soportar usuarios que tienen un peso no pueden soportar en forma segura las sillas de ruedas convencionales, siendo capaces de tolerar pesos

mayores a 250 [lb] (114 [kg]), Figura 1.11. La capacidad de peso que tolera una silla bariátrica, y las medidas del asiento, varían. De igual forma los materiales con las que son elaboradas estas son más resistentes y por lo tanto son más pesados.



Figura 1.11 Silla de ruedas Bariátrica

e) Sillas de ruedas pediátricas

Las sillas de ruedas pediátricas están diseñadas para niños discapacitados. Las sillas no sólo son más pequeñas que los equivalentes convencionales, Figura 1.12; pueden ser ajustadas en algunas instancias para dar a los niños la máxima libertad para sentarse, reclinarse, y recostarse.



Figura 1.12 Silla de ruedas pediátrica

1.5 Materiales de construcción de la silla de ruedas

Los fabricantes han sustituido a la madera, el hierro fundido y de mimbre de sillas de ruedas a principios de acero, aluminio, caucho y plástico. Sillas modernas son por lo tanto mucho más ligeras, de hecho, algunas sillas de ruedas de aluminio de peso ligero de tránsito no pesan más de 8.5 [kg] sin embargo, es menos flexible y más frágil que el acero. Por lo tanto debe utilizar tubo relativamente grande para asegurar una resistencia a la silla.

Por otra parte, el acero es fuerte, ampliamente disponible y a precios razonables. El estándar en sillas de ruedas convencionales de acero pesa entre 20 y 40 libras (9.7- 18.5 [kg]). Las sillas de ruedas deportivas están diseñadas para ser ligero, robusto y flexible. Las mejores están hechas de materiales compuestos, como fibra de carbono, aleación de cromo y materiales ligeros como el titanio. En particular, el titanio es un metal muy duro, pero mucho más caro que el acero.

En este capítulo se describió brevemente la historia de las sillas de ruedas y os distintos tipos de sillas que existen. No se encontró una silla de ruedas que pueda resolver el caso que más adelante se describirá de Carlos.

Capítulo 2

Propuesta y elementos mecánicos

Una vez identificado que no hay sillas de ruedas que ayuden al problema de traslado del caso de esta tesis, en este capítulo, daremos a conocer algunos de los problemas que presentan diariamente las personas con algún tipo de discapacidad motriz. Se dará a conocer al usuario para el cual fue diseñado este módulo. Abordaremos las características generales de una silla de ruedas convencional, se conocerá el diseño mecánico y eléctrico además de los componentes que conformaran el módulo (prototipo).

2.1 Problemática de personas con discapacidad motriz

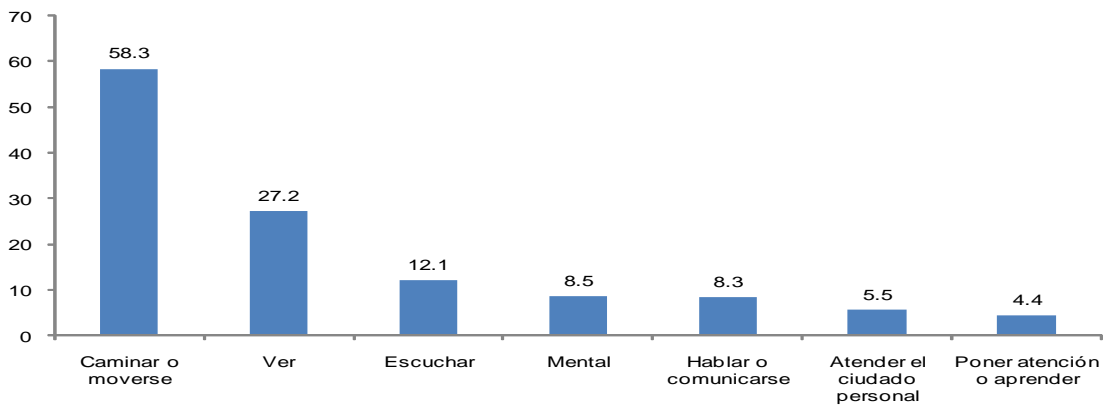
La discriminación es un problema que afecta nuestra sociedad en diversos ámbitos. De acuerdo al Consejo Nacional para Prevenir la discriminación “La discriminación es un práctica cotidiana que consiste en dar un trato desfavorable o de desprecio inmerecido a determinada persona o grupo, que a veces no percibimos, pero que en algún momento la hemos causado o recibido” [3]. La discriminación ocurre en el momento en que se produce la desigualdad laboral en cualquiera de sus modalidades: de trato, de oportunidades o en la remuneración por el trabajo realizado.

En México, los departamentos de Recursos Humanos tienen una actitud favorable hacia la contratación de personas con discapacidad motriz leve, sin embargo más de la mitad de ellos carecen de información al respecto. El hecho de que en nuestra entidad sea difícil la contratación de personas con alguna discapacidad, provoca la pérdida de capital humano que, independientemente de sus limitaciones, puede ser muy productivo para la economía del país y beneficio para ellos.

Según el Censo General de Población y Vivienda 2010 una persona con discapacidad “Es aquella que presenta una limitación física o mental de manera permanente o por más de seis meses que le impiden desarrollar sus actividades en forma que se considere normal para un ser humano [3]”.

Datos del INEGI del censo de Población y Vivienda 2010 muestran que en México hay 5 millones 739 mil 270 personas con alguna discapacidad, lo que representa el 5.1% del total de la población. Cabe destacar que de cada 100 discapacitados 44 son mayores de edad [4].

Porcentaje de población con discapacidad, según tipo de discapacidad 2010



Nota: La suma del porcentaje es superior a 100, debido a la población que tiene más de una discapacidad.
 Fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010. Base de datos de la muestra.

De acuerdo al Instituto Mexicano del Seguro Social existen cuatro tipos de discapacidad que son: motriz, sensorial, intelectual y mental.

- a) Discapacidad Motriz: es aquella que tiene limitaciones del movimiento, ausencia o parálisis de una, dos tres, o las cuatro extremidades.
- b) Discapacidad Sensorial: Dentro de la discapacidad sensorial encontramos la discapacidad visual y auditiva.
 - Las personas con discapacidad visual son aquellas que presentan ceguera que es la ausencia total de percepción visual.
 - La discapacidad auditiva es la carencia, o disminución de la capacidad auditiva. Hay personas que logran percibir sonidos en grado variable y en ocasiones pueden utilizar aparatos auditivos. Son denominadas personas hipoacústicas. Las que no pueden percibir ningún tipo de sonido se les llama sordos totales.
- c) Discapacidad Intelectual: se presenta en personas que tienen limitaciones en el funcionamiento intelectual y el desarrollo de habilidades adaptivas. Se presenta como la dificultad en el habla, lectura, escritura, matemáticas y comprensión de conceptos abstractos.
- d) Discapacidad mental: está presente en las personas que tienen una alteración bioquímica que afecta su forma de pensar, sus sentimientos, humor, y habilidad para relacionarse con otros. Personas con discapacidad mental son aquellas que presentan depresión mayor, trastorno bipolar, trastorno obsesivo/compulsivo, trastorno dual, entre otras [5].

El desarrollo de este trabajo se encuentra dentro de la discapacidad motriz. Es importante tomar en cuenta los recursos humanos que se desperdician al no permitir un trabajo productivo a los más de 15 millones de personas con alguna discapacidad que habitan en nuestro país. Cabe destacar que las condiciones de contratación que imperan en México no siempre corresponden a lo que estipula la Ley Federal del Trabajo y las Organizaciones de los Derechos Humanos.

Para comprender mejor este tema y sus repercusiones en este proyecto veremos lo siguiente.

Cuando nos referimos a Discapacidad Motriz hablamos de trastornos o déficits motrices en personas que presentan problemas en la ejecución de sus movimientos, en su motricidad en general, independientemente de la causa desencadenante.

Una forma de clasificar la discapacidad motriz puede ser por la localización o número de extremidades afectadas [6].

- 1) Hemiplejia: es la afectación de una mitad lateral del cuerpo. La causa más común es la hemorragia cerebral, la cual interrumpe el flujo sanguíneo en una región del cerebro, produciendo necrosis cerebral en la zona afectada.
- 2) Monoplejia: es la parálisis o debilidad un miembro. Es poco frecuente.
- 3) Paraplejia: en este caso la parte inferior del cuerpo queda paralizada y carece de funcionalidad. Una causa que origina este problema es una lesión o compresión de la médula espinal.
- 4) Diplejia: es la parálisis bilateral de forma simétrica diferentes zonas del cuerpo. Por lo general hay menor afectación en los miembros superiores.

5) Triplejia: está caracterizada por la parálisis parcial o total de tres miembros.

Es rara la presencia de este problema se debe comúnmente a enfermedades como la poliomielitis.

6) Cuadruplejia o Tetraplejia: es la parálisis de las cuatro extremidades. Se presenta por lesión en la médula espinal por encima de la primera vertebra torácica.

En México, las personas con discapacidad representan un 2.3 por ciento (10 millones) del total de la población, y residen en el 10 por ciento de los hogares. Gran parte de ellos componen los grupos de discapacitados que no cuentan con trabajo y viven a expensas de sus familiares, amigos, rentas, negocios, limosnas o pensiones (en el caso de personas de edad avanzada o jubilados por accidente).

En el sector laboral son escasas las acciones desarrolladas para capacitar e integrar en empleos remunerados a las personas con discapacidad y no existe equidad en las oportunidades de acceso al trabajo incluso para aquellos que se han destacado por sus habilidades, eficiencia y profesionalismo. Algunas de las limitaciones principales para la integración de personas con discapacidad, las constituyen los obstáculos del entorno físico y la casi nula señalización adaptada, lo cual les impide el acceso y desplazamiento en edificios, viviendas, servicios de transporte público, calles, edificios públicos, espacios recreativos, deportivos y turísticos, parques y jardines. Tomando esto en consideración junto con algunos otros factores nos motivaron a realizar el siguiente proyecto y con esto poder ayudar a mejorar su calidad de vida.

2.2 Requerimientos y necesidades de la silla de ruedas a diseñar.

Usuario

La silla que se usó tiene un usuario específico, Carlos, quien es un niño de 11 años que sufre de discapacidad. Carlos nació sin ambas piernas, solo los músculos de los muslos, pero no tiene fémur, esto imposibilita la colocación de una prótesis de pierna, ya que no existe parte alguna donde se pueden sujetar. Carlos nació sin brazos, él sólo tiene hasta el codo, no hay codo ni radio, pero si tiene húmero, gracias a esto Carlos puede desempeñar algunas actividades bastante simples y además recibe terapia en la cual se le enseña a usar una prótesis para lograr desempeñar actividades de mayor complejidad.

Debido a las características de Carlos, no puede trasladarse de un lado a otro, a no ser que se arrastre por el suelo, sin contar ayuda de otra persona, para esto se diseñará la silla de ruedas que él pueda manipular sin ningún problema y logre adaptarse a todas sus requerimientos .

Requisitos del usuario

Respecto a la silla

- 1) Estabilidad de la silla: Debe poder mantener a Carlos en la silla sin problemas de movimiento, vibraciones o algún otro efecto físico que le impida desempeñar alguna actividad.
- 2) Seguridad: La silla debe ser una ayuda para Carlos y no debe presentar algún riesgo para él.

- 3) Bajo costo: No debe presentar grandes costos para su mantenimiento, así podrá adaptarse a las condiciones económicas del usuario.
- 4) La silla de ser ligera: La silla debe de ser de un material el cual permita su transporte cuando no se esté usando.
- 5) Que sea plegable: Debe contar con la capacidad de plegarse para poder ser almacenada y transportada fácilmente
- 6) Mejorar el tamaño de la silla según el usuario: La silla debe poder adaptarse a las necesidades del usuario, ya que Carlos se encuentra en una etapa de constante crecimiento y si la silla no se adapta a él podría llegar a ser insuficiente para sus necesidades
- 7) Fácil de operar: El usuario pese a sus limitaciones debe poder operar la silla sin ninguna complicación.

2.3 Limitaciones y requerimientos para el diseño del módulo mecánico

Para el desarrollo de este proyecto fue necesario tener físicamente una silla de ruedas además de componentes básicos para el desarrollo del proyecto. Inicialmente se contó con una silla de ruedas pediátrica la cual fue donada a la familia de Carlos. Esto nos permitió conocer y tener contacto con una silla de ruedas similar a la convencional ya que las características de ésta cumplen con el estándar de la gran mayoría de las que existen actualmente. Entre otros

componentes que se nos fueron proporcionados están dos cajas reductoras de engranes, dos motores, una batería y su respectivo cargador.

Para el diseño y acoplamiento del módulo tomamos en consideración las siguientes limitantes:

- 1) Se debe usar la silla donada a la familia del niño.
- 2) Se deben usar los motores y las cajas de engranes suministradas por el CDMIT al inicio del proyecto.
- 3) Se debe usar la batería y cargador suministrada por el CDMIT al inicio del proyecto.
- 4) El movimiento de la silla debe ser seguro, estable (sin movimientos bruscos).
- 5) El mando de control se debe adaptar a las capacidades del usuario final, siendo fácil de operar y con posibilidad de prevenir situaciones no deseadas (como accionamiento accidental).

El entorno en que será utilizada la silla es en su mayoría, casa y escuela, pero debe ser capaz de moverse ágilmente en pendientes y superficies irregulares. Se debe tener la posibilidad de desacoplar los motores para que en caso de que la batería se agote, la silla pueda ser empujada sin dificultad.

Principales problemas encontrados.

- a) Debido al tamaño de las cajas de engranes, al ser montados los motores en la silla, ésta no se puede cerrar.

- b) Las llantas que tiene la silla generan un rodamiento muy irregular, debido a que su dibujo está prácticamente liso, además de que uno de los rines tiene forma ovalada.
- c) La batería se aprecia muy pesada, por lo que es una carga a considerar.
- d) El cargador original de la pila es grande y pesado.

Soluciones

Las llantas serán sustituidas por unas de dibujo adecuado para superficies irregulares.

Analizar el comportamiento de los motores (caracterización), para encontrar el funcionamiento óptimo y obtener el par y velocidad adecuados.

Considerar los aspectos físicos de Carlos (usuario final para encontrar la mejor ubicación y forma del control de mando.

Diseñar un controlador para que los motores funcionen mejor de acuerdo a cada situación de movimiento.

2.4 Características generales de la silla de ruedas y componentes

Para el desarrollo del proyecto se cuenta con una silla de ruedas pediátrica que fue donada al CDMIT, se muestra en la Figura 2.1.



Figura 2.1 Silla de ruedas

Descripción:

- La silla de ruedas es de Acero Cromado sin posibilidad de regular la altura.
- Ruedas traseras con cámara de aire de 0.58 [m] de diámetro.
- No cuenta con reposabrazos.
- Reposapiés abatibles.
- Color cromado.
- Ruedas delanteras de polietileno.

Características técnicas:

- Diámetro de las ruedas traseras 0.58 [m].
- Diámetro de las ruedas delanteras 0.2 [m].
- Ancho mínimo plegada 0.26 [m].
- Ancho del respaldo 0.39 [m].
- Peso máximo del usuario 50 – 60 [Kg].

2.4.1 Componentes

Contamos con una batería de 12 [V] a 18 [Ah] que se muestra en la Figura 2.2.



Figura 2.2 Batería de 12 [v]

También se contó con dos llantas de caucho duro de alrededor de 15 cm con ring mostrado en la Figura 2.3, y un par amortiguadores de uso general que se muestran en la Figura 2.4.



Figura 2.3 Llantas de caucho



Figura 2.4 Amortiguador

También se contó con dos cajas reductoras para aumentar el torque y disminuir la velocidad, Figura 2.5, y dos motores de 1/8 de [hp](93.25 [W]) que suministra la potencia necesaria para mover la silla, Figura 2.6.



Figura 2.5 Caja reductora



Figura 2.6 Motor de DC

Cada uno de estos componentes se detalla a continuación.

2.4.2 Funcionamiento

Motores de DC usados en electrónica

El motor de corriente continua es una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica, principalmente mediante el movimiento rotatorio. En la actualidad existen nuevas aplicaciones con motores eléctricos que no producen movimiento rotatorio, sino que con algunas modificaciones, ejercen tracción sobre un riel. Estos motores se conocen como motores lineales. Esta

máquina de corriente continua es una de las más versátiles en la industria. Su fácil control de posición, par y velocidad la han convertido en una de las mejores opciones en aplicaciones de control y automatización de procesos. Pero con la llegada de la electrónica su uso ha disminuido en gran medida, pues los motores de corriente alterna, del tipo asíncrono, pueden ser controlados de igual forma a precios más accesibles para el consumidor medio de la industria. A pesar de esto los motores de corriente continua se siguen utilizando en muchas aplicaciones de potencia (trenes y tranvías) o de precisión (máquinas, micro motor, etc.). La principal característica del motor de corriente continua es la posibilidad de regular la velocidad desde vacío hasta plena carga además de alcanzar velocidades que los motores de CA no pueden. Una máquina de corriente continua (generador o motor) se compone principalmente de dos partes, un estator que da soporte mecánico al aparato y tiene un hueco en el centro generalmente de forma cilíndrica. En el estator además se encuentran los polos, que pueden ser de imanes permanentes o devanados con hilo de cobre sobre núcleo de hierro. El rotor es generalmente de forma cilíndrica, también devanado y con núcleo, al que llega la corriente mediante dos escobillas [7].

Caracterización de motores

Los motores que se nos proporcionaron se tuvieron que caracterizar debido a que no teníamos ningún dato y no tenía datos de placa Figura 2.7. Se llevaron a cabo pruebas para determinar las constantes K_a (constante de voltaje), K_b (constante de torsión) y T (par). Estas constantes permitirán encontrar el mejor rango de operación de los motores así como implementar el controlador.



Figura 2.7 Motor de DC

Para producir un par motor, necesitamos disponer de un campo magnético y colocar dentro de él conductores eléctricos. Al hacer pasar corriente por el conductor eléctrico, este reacciona con el campo magnético produciendo una fuerza de la forma, $F = B i L$

Dónde:

B será el flujo magnético,

i será la corriente que circula por el conductor

L la longitud del mismo.

Esta fuerza será la responsable de producir el movimiento del motor.

Nuestro modelo sería:

$$\text{Parte eléctrica: } L_f \frac{di_f(t)}{dt} + R_f i_f(t) = e(t)$$

$$\text{Parte mecánica: } J \ddot{\theta}(t) + \beta \dot{\theta}(t) = T(t)$$

$$\text{Relación entre las dos: } T(t) = k i_f(t)$$

Dónde:

$i_f(t)$ = Corriente de campo del motor.

I_a = corriente de armadura con valor constante en este caso

R_f = Resistencia del devanado de campo (polos)

L_f = Inductancia del devanado de campo

R_a = Resistencia del devanado de armadura (conductores)

L_a = Inductancia del devanado de armadura

$T(t)$ = Torque o par mecánico.

β = Coeficiente de fricción

J = Momento de inercia del motor y su carga

k_t = Constante de conversión de la corriente de campo al par

Cajas reductoras (engranes)

Engranaje es una rueda o cilindro dentado empleado para transmitir un movimiento giratorio o alternativo desde una parte de una máquina a otra. Un conjunto de dos o más engranajes que transmite el movimiento de un eje a otro se denomina tren de engranajes. Los engranajes se utilizan sobre todo para transmitir movimiento giratorio, pero usando engranajes apropiados y piezas dentadas planas pueden transformar movimiento alternativo en giratorio y viceversa. Los engranajes cilíndricos rectos son el tipo de engranaje más simple y corriente que existe. Se utilizan generalmente para velocidades pequeñas y medias; a grandes velocidades, si no son rectificadas, o han sido corregido su tallado, producen ruido

cuyo nivel depende de la velocidad de giro que tengan. Para obtener la relación del torque en los engranes se define el siguiente concepto. Módulo de un engranaje es una característica de magnitud que se define como la relación entre la medida del diámetro primitivo expresado en milímetros y el número de dientes, Figura 2.8. El valor del módulo se fija mediante cálculo de resistencia de materiales en virtud de la potencia a transmitir y en función de la relación de transmisión que se establezca. El tamaño de los dientes está normalizado. El módulo está indicado por números [8].

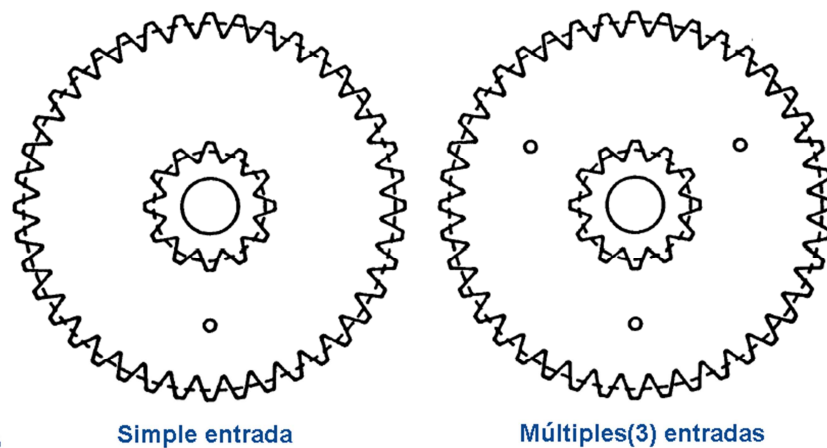


Figura 2.8 Diagrama de engranes

La Figura 2.9, muestra un esquemático de una parte de cómo están conectados los engranes de las cajas que nos proporcionaron, la relación de engranaje se muestra del engrane del motor al engrane que se conecta con la llanta.

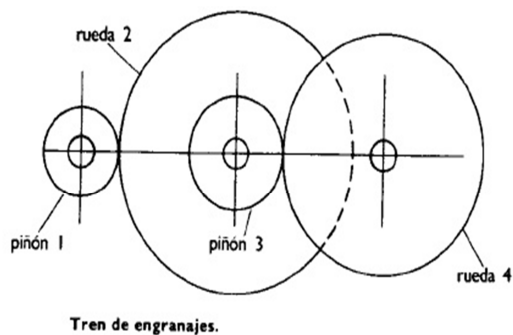


Figura 2.9 Esquemático y caja de engranes

Amortiguadores

El amortiguador es un dispositivo que absorbe energía, utilizado normalmente para disminuir las oscilaciones no deseadas de un movimiento periódico o para absorber energía proveniente de golpes o impactos, Figura 2.10.



Figura 2.10 Amortiguador

Los amortiguadores son un componente común de la suspensión de los automóviles y otros vehículos, para ayudar a que las ruedas se mantengan pegadas al suelo. Los elementos elásticos metálicos utilizados en la suspensión

tienen la tendencia de rebotar. Se han dado casos en pisos bacheados, y debidos a que los movimientos de cada bache se sumaban en los que coches han llegado a despegar. Para evitar este efecto, el que las ruedas se despeguen del suelo, los amortiguadores frenan las oscilaciones siguientes al movimiento inicial del bache.

El joystick sistema de mando

Los joystick para PC actuales se conectan a la computadora a través del puerto USB 2.0, mandando señales digitales mediante este puerto, que han de ser interpretadas por su correspondiente controlador, por lo tanto se ha eliminado la limitación de palancas y botones, pudiendo ser el dispositivo diseñado con tantos botones o palancas como el fabricante determine, Figura 2.11.

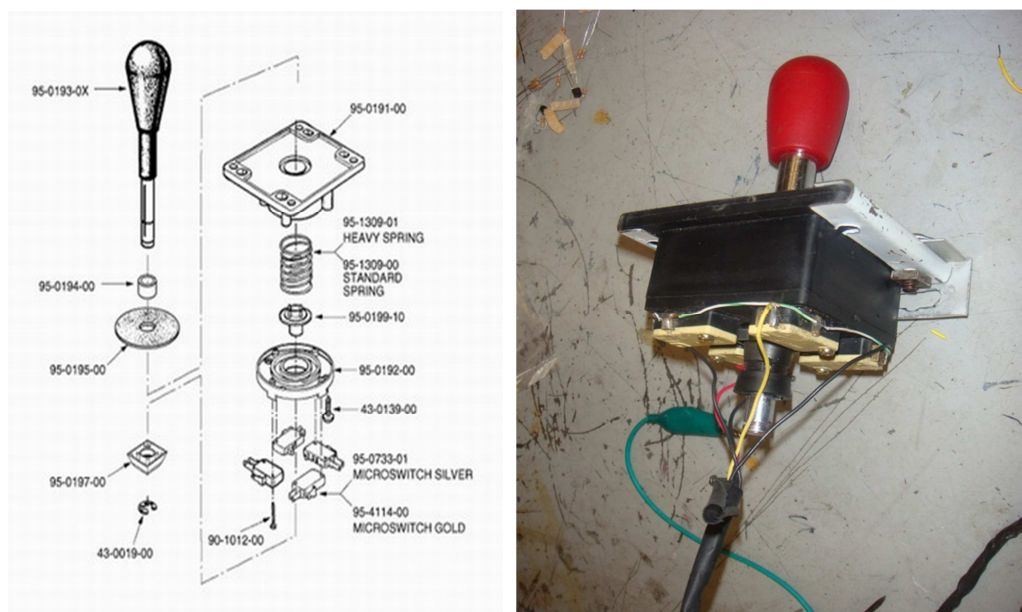


Figura 2.11 joystick control de mando

2.5 Características del diseño mecánico, electrónico y de software.

Existen diferencias importantes entre el diseño mecánico, electrónico y de software. La naturaleza de los problemas de diseño difiere en términos de las funciones a ser realizadas, tipos de solución disponibles, y realización de las funciones propuestas. Las comparaciones de algunas características metodológicas de la mecánica, eléctrica y el software se presentan a continuación.

El Diseño de Máquinas fue establecido como ciencia en los 60's con dos principales aproximaciones: una funcional en la Alemania del Oeste y otra basada en procedimientos en Inglaterra y Estados Unidos. La principal motivación fue que la sistematización podría ayudar a obtener una mejor solución de muchas alternativas, y que una aproximación metodológica podría incrementar la eficiencia y control en el diseño de procesos. Estos métodos no han sido del todo aceptados en la industria, sin embargo la reciente búsqueda de incrementar la velocidad del desarrollo y la calidad de los productos ha hecho que se unan a este interés.

El *Diseño Electrónico* está dominado por las teorías del análisis de circuitos y diseño lógico, pero la metodología de diseño en el sentido conceptual es muy razonable. La utilización de la ingeniería de sistemas al descomponer tareas complejas en subsistemas con especificaciones separadas y consideraciones de interfaces es bien aceptada en la industria electrónica.

El *Diseño de Software* ha sido forzado a aplicar una aproximación estructurada desde los inicios de 70's, donde la complejidad de los sistemas llegan a ser muy

grandes por los métodos intuitivos de programación. La ingeniería de software ha llegado a ser una disciplina científica que se concentra en la investigación sobre los procedimientos y herramientas de especificación. La necesidad de los métodos de diseño estructurados son bien aceptados en la industria.

2.6 Condiciones físicas contra requerimientos del usuario

El mayor problema que se presentó es que la silla se tenía que conservar la propiedad ser plegable para poder transportarse sin mucha dificultad lo cual implicaba que no se podía modificar los requisitos de fábrica y para no comprometer aumento de peso de manera excesiva. Cualquier estructura que se colocará tendría que ser retirada al momento de ser transportada y esto no debería de afectar la movilidad autónoma que pueda alcanzar la silla

Algunas restricciones físicas que tiene la silla nos hizo optar por desarrollar un módulo mecánico que se colocará debajo sujetándose con seguros de fácil liberación con lo cual transmitiría la potencia de los motores a la silla por medio de la caja reductora aumentando la potencia de los motores y acoplándose a una suspensión mostrada en la Figura 2.12, la cual le brindaría estabilidad al momento de encontrar irregularidades en el camino y para disminuir el riesgo de volteo o giro por una fuerza o peso mayor mal distribuido se coloca una base de soporte en la parte trasera del módulo, al ensamblar todos los mecanismos del módulo se presenta la siguiente imagen en la cual muestra únicamente la parte mecánica del prototipo realizado mostrado en la Figura 2.13.

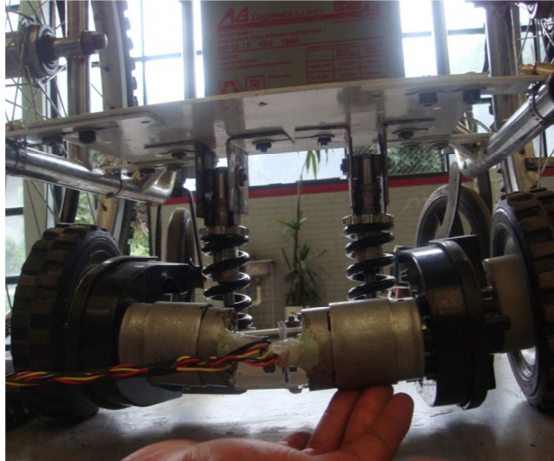


Figura 2.12 Vista trasera de la silla con el módulo acoplado Módulo



Figura 2.13 Módulo ensamblado

Capítulo 3

Diseño del controlador

Después de conocer la problemática y los elementos que se tienen para resolver el problema, se procederá a realizar el análisis de la dinámica de la silla, para después elaborar su modelo matemático. Una vez obtenido se presenta su análisis mediante un software de computadora (Matlab).

3.1 Modelo general de la silla de ruedas

En general, la silla de ruedas está compuesta de motores, sensores, circuitos eléctricos unidades de procesamiento e interfaces de comunicación con el usuario. La Figura 3.1 muestra la estructura y los componentes generales de la silla de ruedas. Los motores de DC son los encargados de la propulsión de la silla, estos son alimentados por baterías y controlados por un módulo que se encarga de suministrar las señales de control. Estas señales son proporcionadas por el joystick y los sensores de encoder.

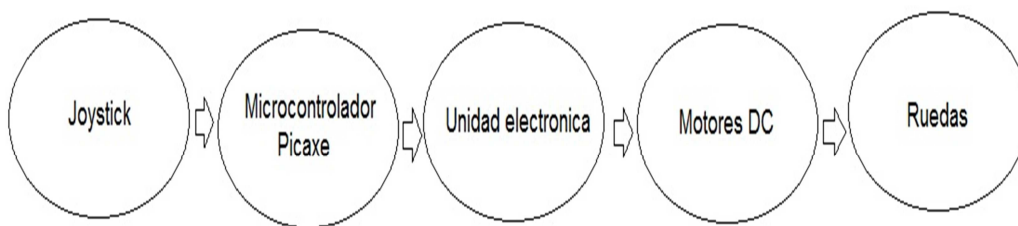


Figura 3.1 Modelo general de la silla de ruedas.

Para poder abordar el problema de control del movimiento de la silla es necesario conocer la dinámica de esta.

La figura 3.2 se muestra el diagrama general de la silla que nos ayudará a describir la dinámica y analizar las fuerzas que intervienen al moverse. Los subíndices T_m indican los motores DC.

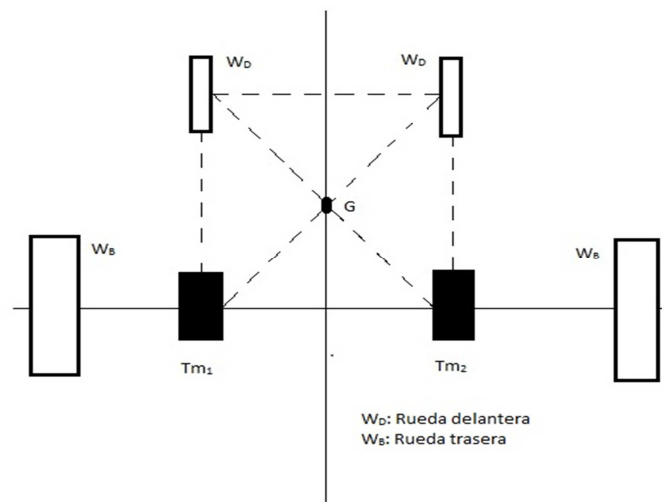


Figura 3.2 Diagrama de la silla de ruedas

Se trata de un sistema mecánico. Se considera que si existe un deslizamiento, rodamiento o roce, entonces hay una fuerza de fricción que es paralela a las superficies y es opuesta a la dirección de su movimiento.

Cuando las ruedas del motor T_m hacen contacto con el suelo se provoca una deformación en la llanta con respecto a la superficie en la que se encuentra. De esta deformación se produce una fuerza llamada fricción por rodamiento. Debido a las características de la rueda T_m y de la superficie de contacto no se provoca una

deformación considerable, por lo que el par de fricción por rodamiento no será incluido. Se determina el sistema de la Figura 3.3 del cual se realizará el modelo matemático y el control.

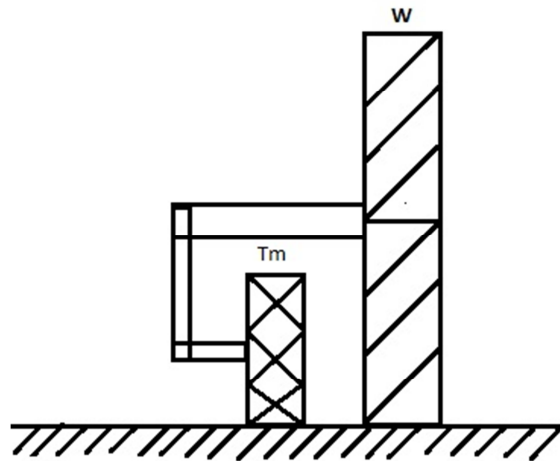


Figura 3.3 Representación del sistema a modelar conformado por el motor T_m y la rueda w .

3.2 Modelo matemático

Después de haber realizado el análisis de la dinámica de la silla de ruedas y determinar las variables de interés se propone el sistema compuesto, mostrado en la Figura 3.4 formado de una parte eléctrica y una mecánica. La parte eléctrica está formada por una fuente de alimentación, una resistencia y una inductancia. La parte mecánica está formada por una caja de engranes y una inercia J . Ambas partes están interconectadas a través de un motor eléctrico de corriente directa.

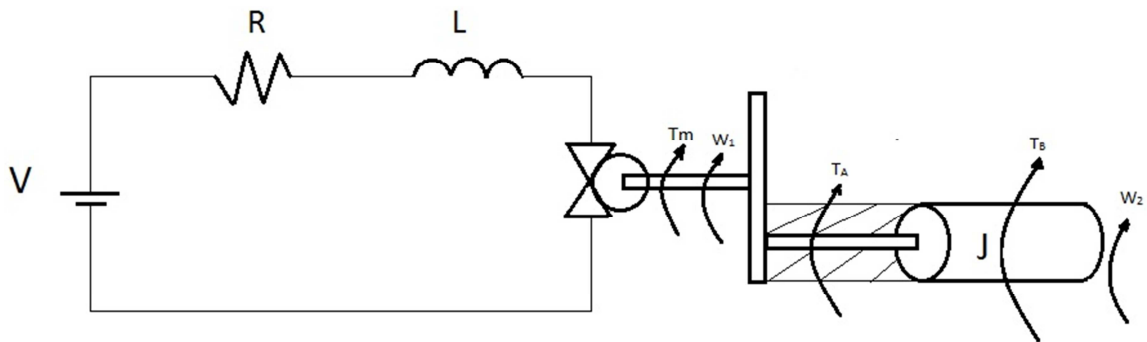


Figura 3.4 Sistema electromecánico de la silla de ruedas

Dónde:

T_m es el par total del motor.

ω_1, ω_2 es la velocidad angular.

J inercia

T_A, T_B par de fuerzas

Ahora, para obtener el modelo matemático que represente el comportamiento del sistema es necesario delimitar e identificar cada una de las partes que lo conforman, para poder plantear las ecuaciones de elemento y las ecuaciones de equilibrio a cada una de las partes.

Parte eléctrica

La Figura 3.5 muestra la parte eléctrica del sistema a modelar

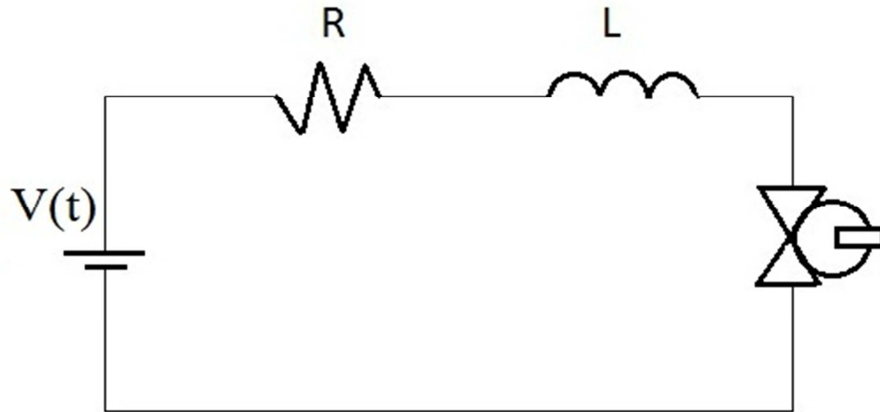


Figura 3.5 Parte eléctrica del sistema

Leyes de elementos

$$V_L = L \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

$$V_R = Ri \quad (2)$$

$$V_m = K_a \omega \quad (3)$$

Donde

V_m Voltaje en el motor

K_a Constante de voltaje

K_b Constante de torsión

ω_1 Velocidad angular

Leyes de conjunto

$$V(t) = V_L + V_R + V_m \quad (4)$$

Aplicando las ecuaciones

$$V(t) = L \frac{di}{dt} + Ri + k_a \omega_1 \quad (5)$$

Despejando de (5) la variable de interés $\left(\frac{di}{dt}\right)$ normalizando y definiendo la ecuación auxiliar (I)

$$\omega_1 = \omega_2 C_e \quad (I)$$

Dónde:

C_e es la constante relación de engranaje (ver anexo B)

ω_2 velocidad angular final

$$\frac{di}{dt} = \frac{V(t)}{L} - \frac{R}{L} - \frac{k_a C_e}{L} \omega_2 \quad (6)$$

De las ecuaciones de elementos del motor

$$V_m = k_a \omega_1 \quad (7)$$

$$T_m = k_b i(t) \quad (8)$$

Utilizando la relaciones auxiliar de transmisión de los engranes. Véase anexo B.

$$\frac{T_a}{T_b} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (II)$$

Aplicando las ecuaciones de elementos del comportamiento del motor y ayudándonos de las relaciones auxiliares mostradas arriba obtenemos

$$V_m = k_a \omega_1 \quad (9)$$

$$V_m = k_a C_e \omega_2 \quad (10)$$

Derivando (10)

$$\dot{V}_m = k_a C_e \dot{\omega}_2 \quad (11)$$

Utilizando la ecuación (9) y aplicándola a (5)

$$V(t) = L \frac{di}{dt} + Ri + k_a C_e \omega_2 \quad (12)$$

Parte mecánica

La Figura 3.6 muestra la parte mecánica del sistema

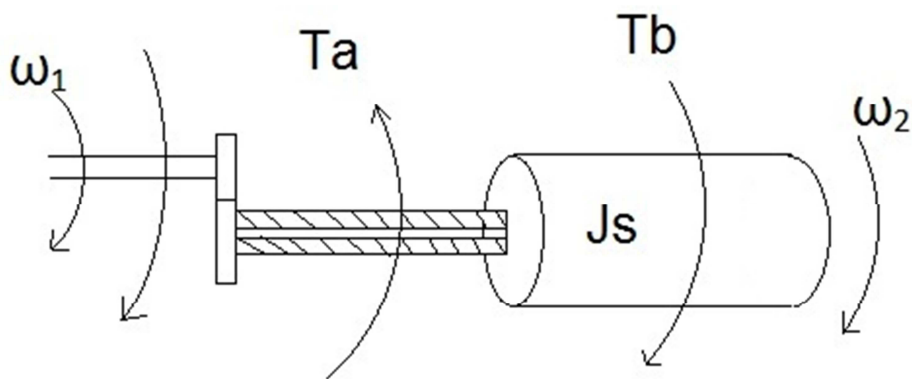


Figura 3.6 Parte mecánica del sistema

Dónde:

T_a par del motor
 T_b par de la caja de engranes
 J_s momento de inercia.

Leyes de elemento

$$T_T = T_a + T_b \quad (13)$$

Dónde:

$$T_T = T_m \quad (14)$$

T_T : par total

Por lo tanto

$$T_m = T_a + T_b \quad (15)$$

Aplicándolas leyes de elemento para la parte mecánica tenemos que

$$T_m = kC_q\omega_2 + Js\dot{\omega}_2 \quad (16)$$

k constante de torsión

Despejando de (16) la variable de interés

$$\dot{\omega}_2 = \frac{T_m}{Js} - \frac{kC_q\omega_2}{Js} \quad (17)$$

Ayudándonos de la función auxiliar

$$T_m = kb i(t) \quad (18)$$

Aplicando (18) a la ecuación (17)

$$\dot{\omega}_2 = \frac{kb}{Js} i(t) - \frac{kC_q}{Js} \omega_2 \quad (19)$$

A (16) se aplica (18)

$$kb i(t) = kC_q\omega_2 + J\dot{\omega}_2 \quad (20)$$

Despejando a $i(t)$

$$i(t) = \frac{kC_q\omega_2}{kb} + \frac{J}{kb} \dot{\omega}_2 \quad (21)$$

Derivando $i(t)$ de (21)

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{kC_q\dot{\omega}_2}{kb} + \frac{J}{kb} \ddot{\omega}_2 \quad (22)$$

Aplicando (21) y (22) a (5)

$$V(t) = L \left(\frac{kC_q}{kb} \dot{\omega}_2 + \frac{J}{kb} \ddot{\omega}_2 \right) + \left(\frac{kC_q\omega_2}{kb} + \frac{J}{kb} \dot{\omega}_2 \right) R + k_a C_e \omega_2 \quad (23)$$

Agrupando la ecuación (24)

$$V(t) = \frac{LJ}{kb} \ddot{\omega}_2 + \frac{LkC_q}{kb} \dot{\omega}_2 + \frac{kRC_q\omega_2}{kb} + \frac{JR}{kb} \dot{\omega}_2 + k_a C_e \omega_2 \quad (24)$$

$$\frac{LJ}{k_b} \ddot{\omega}_2 + \left[\frac{LkC_q}{k_b} + \frac{JR}{k_b} \right] \dot{\omega}_2 + \left[\frac{kRC_q}{k_b} + \frac{k_a C_e}{k_b} \right] \omega_2 = V(t) \quad (25)$$

$$\frac{LJ}{k_b} \ddot{\omega}_2 + \left[\frac{LkC_q + JR}{k_b} \right] \dot{\omega}_2 + \left[\frac{kRC_q + k_a k_b C_e}{k_b} \right] \omega_2 = V(t) \quad (26)$$

Factorizando y despejando la variable de interés

$$\ddot{\omega}_2 + \left[\frac{LkC_q + JR}{JL} \right] \dot{\omega}_2 + \left[\frac{kRC_q + k_a k_b C_e}{JL} \right] \omega_2 = \frac{k_b}{JR} V(t) \quad (27)$$

Aplicando la transformada de Laplace se obtiene el modelo final

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{\frac{k_b}{JR}}{s^2 + \left[\frac{LkC_q + JR}{JL} \right] s + \left[\frac{kRC_q + k_a k_b C_e}{JL} \right]} \quad (28)$$

Para simplificar los cálculos se realiza el siguiente cambio de variable

$$a = \frac{LkC_q + JR}{JL} \quad (29)$$

$$b = \frac{kRC_q + k_a k_b C_e}{JL} \quad (30)$$

$$c = \frac{RC_q k + k_a k_b C_e}{JL} C_e \quad (31)$$

Aplicando (29), (30) y (31) a (28) se obtiene el modelo final el cual será utilizado para realizar los cálculos.

$$G_v(s) = \frac{c}{s^2 + as + b} \quad (32)$$

El modelo es un sistema de segundo orden y de acuerdo a sus características se procederá a realizar un controlador que adopte las condiciones requeridas.

3.3 Análisis del controlador

Basándonos en las características y limitantes del proyecto mencionadas anteriormente en el capítulo 2, se decide utilizar un controlador tipo PI por su sencillez y fácil implementación.

Si relacionamos la entrada $R(s)$ con la salida $Y(s)$ para obtener un modelo total el cual se utilizara para la implementación

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_e G_p}{1 + H G_p G_e} \quad (33)$$

Donde G_e y G_p se definen de la siguiente manera

$$G_e = k_p + \frac{1}{T_i s} \quad (34)$$

$$G_p = \frac{c}{s^2 + as + b} \quad (35)$$

Utilizando la ecuación (33) se realiza el análisis y la simulación del sistema.

Controlador PI

G_c : Función del controlador

G_p : Función de la planta

H: Función de retroalimentación (en este caso será unitaria $H=1$)

Si sustituimos la ecuación (34) y (35) en (33) para obtener la función total del sistema

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\left(K_p + \frac{K_p}{T_i s}\right) \left(\frac{c}{s^2 + as + b}\right)}{1 + \left(K_p + \frac{K_p}{T_i s}\right) \left(\frac{c}{s^2 + as + b}\right)} \quad (36)$$

Si se realiza el álgebra correspondiente de la ecuación (36) se obtiene:

$$\frac{k_p c \left(s + \frac{1}{T_i}\right)}{s^3 + as^2 + (b + k_p c)s + \frac{k_p c}{T_i}} = \frac{Y(s)}{R(s)} \quad (37)$$

Por lo tanto nuestro modelo quedaría de la siguiente manera

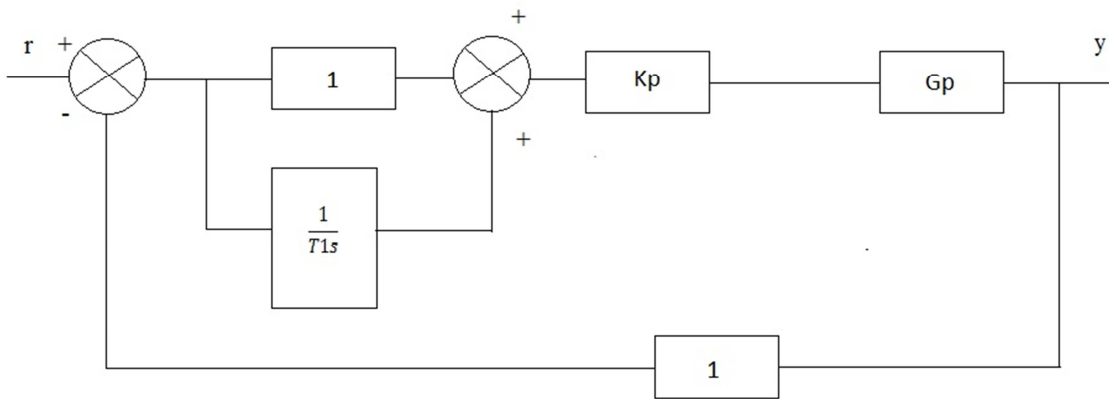


Figura 3.7 estructura general del controlador (PI)

Tomando en cuenta el criterio de Routh para la estabilidad de sistemas la ecuación mostrada arriba es estable para mayor detalle ver el anexo C. Se procede a su análisis al análisis y simulación del controlador para obtener los parámetros numéricos que requiere la implementación del controlador.

3.4 Simulación y parametrización

En principio simulamos el sistema sin controlador para conocer su respuesta a una entrada escalón. Si se sabe que la silla está conformada por dos sistemas iguales pero independientes la simulación se llevara de manera simultánea en cada paso.

Los sistemas los nombraremos “MOTOR 1” y “MOTOR 2” respectivamente, esto solo para poder diferenciar entre cada uno .Si se sabe que la ecuación del sistema sin controlador es la siguiente

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{k_b/JR}{s^2 + \left[\frac{LkC_q + JR}{JL} \right] s + \left[\frac{kRC_q + k_a k_b C_e}{JL} \right]}$$

Para “MOTOR 1”

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{k_{b1}/J_s R}{s^2 + \left[\frac{Lk_1 C_{q1} + J_s R}{J_s L} \right] s + \left[\frac{k_1 R C_{q1} + k_{a1} k_{b1} C_{e1}}{J_s L} \right]} \tag{38}$$

Para “MOTOR 2”

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{k_{b2}/J_s R}{s^2 + \left[\frac{Lk_2 C_{q2} + J_s R}{J_s L} \right] s + \left[\frac{k_2 R C_{q1} + k_{a2} k_{b2} C_{e2}}{J_s L} \right]} \tag{39}$$

Y que los valores para cada una de las constantes son:

Resistencia interna del motor para MOTOR 1 Y MOTOR 2	R=0.17 [Ω]
Inductancia del motor para MOTOR 1 Y MOTOR 2	L=0.06 [H]
Constante de torsión de MOTOR 1	K1=0.0047 [N.m]
Constante de torsión de MOTOR 2	K2=0.004 [N.m]
Constante que relaciona el par y la corriente MOTOR 1	k _{a1} =0.00778 [$\frac{N.m}{A}$]

Constante que relaciona el par y la corriente MOTOR 2	$k_{a2}=0.00778 \left[\frac{N.m}{A} \right]$
Constante entre fuerza electromotriz y la velocidad angular MOTOR 1	$k_{b1}=0.00748 \left[\frac{V}{rpm} \right]$
Constante entre fuerza electromotriz y la velocidad angular MOTOR 2	$k_{b2}=0.00797 \left[\frac{V}{rpm} \right]$
Constante de engranaje para MOTOR 1 Y MOTOR 2	$C_e=43.11 [1]$
Constante inversa de engranaje para MOTOR 1 Y MOTOR 2	$C_q=0.023 [1]$
Momento inercial calculado para cada sistema	$J_s=.5*(m)*(r*r) [kg.m^2]$
Radio de la llanta en metros	$r=0.1 [m]$
Masa del sistema dada en kilos	$m=40 [kg]$

Si ingresamos los valores a cada ecuación y con esto realizamos la simulación nos quedaría de la siguiente manera

Motor 1

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{\frac{k_{b1}}{J_s R}}{s^2 + \left[\frac{L k_1 C_{q1} + J_s R}{J_s L} \right] s + \left[\frac{k_1 R C_{q1} + k_{a1} k_{b1} C_{e1}}{J_s L} \right]} = \frac{0.6233}{s^2 + 2.834s + 0.2106} \quad (40)$$

Motor 2

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{\frac{k_{b2}}{J_s R}}{s^2 + \left[\frac{L k_2 C_{q2} + J_s R}{J_s L} \right] s + \left[\frac{k_2 R C_{q1} + k_{a2} k_{b2} C_{e2}}{J_s L} \right]} = \frac{0.6642}{s^2 + 2.834s + 0.2241} \quad (41)$$

Las siguientes graficas corresponden a la simulación de los sistemas sin controlador y corresponde a una entrada escalón

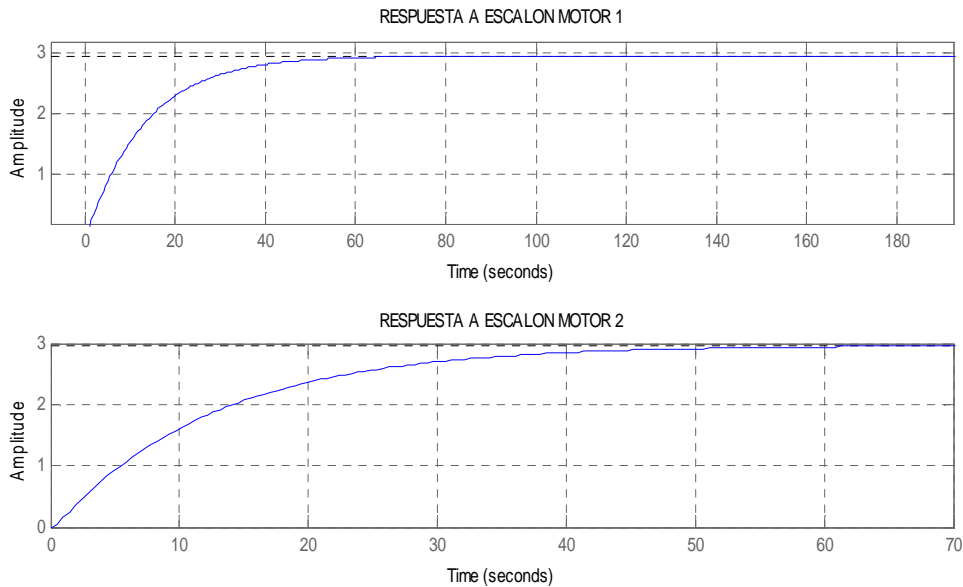


Figura 3.8 Respuesta del sistema a una entrada escalón

En la siguiente ecuación se incorpora el controlador y se parametriza con lo cual obtenemos valores para poder simular, como se mencionó al comienzo del capítulo se realiza un cambio de variable para simplificar los cálculos, si tomamos las ec. (29), (30), (31) y asignamos los valores correspondientes para cada modelo obtenemos lo siguiente

MOTOR 1

$$a_1 = \frac{Lk_1C_{q1} + JR}{JL} = 2.8339$$

$$b_1 = \frac{k_1RC_{q1} + k_{a1}k_{b1}C_{e1}}{JL} = 0.2106$$

$$c_1 = \frac{RC_{q1}k_1 + k_{a1}k_{b1}}{JL} C_{e1} = 0.6233$$

MOTOR 2

$$a_2 = \frac{Lk_2C_{q2} + JR}{JL} = 2.8338 \quad (42)$$

$$b_2 = \frac{k_2RC_{q2} + k_{a2}k_{b2}C_{e2}}{JL} = 0.2241 \quad (43)$$

$$c_2 = \frac{RC_{q2}k_2 + k_{a2}k_{b2}}{JL} C_{e2} = 0.6642 \quad (44)$$

Tenemos la ec. (31) que corresponde a nuestro sistema con el controlador integrado

Ecuaciones correspondientes a cada sistema de la silla

<p>MOTOR 1</p> $\frac{k_{p1}c_1 \left(s + \frac{1}{Ti_1} \right)}{s^3 + a_1s^2 + (b_1 + k_{p1}c_1)s + \frac{k_{p1}c_1}{Ti_1}}$	<p>MOTOR 2</p> $\frac{k_{p2}c_2 \left(s + \frac{1}{Ti_2} \right)}{s^3 + a_2s^2 + (b_2 + k_{p2}c_2)s + \frac{k_{p2}c_2}{Ti_2}}$	(45)
---	---	------

Los valores faltantes de nuestro controlador son K_p y T_i de cada uno de nuestros modelos, una de las maneras más sencillas de obtener dichos valores es el método de sincronización de **Ziegler y Nichols en Lazo Abierto o de la Curva de respuesta** (Figura 3.9), este método se basa en el lazo abierto, primero se realiza un ensayo en lazo abierto, introduciendo un escalón en la señal de control (salida del controlador que actúa sobre el elemento final de control) y se registra el transitorio de la variable medida o controlada (Curva de Respuesta).

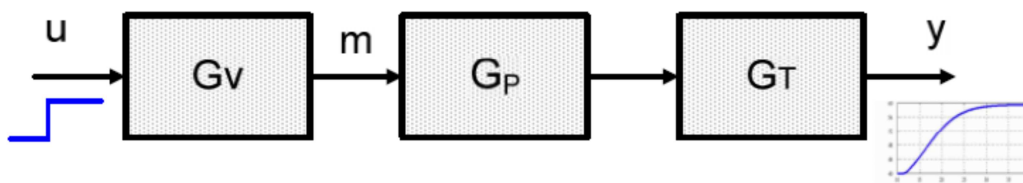


Figura 3.9 proceso **Ziegler y Nichols**

Aplicando el Método del Punto de inflexión, se obtiene una caracterización simplificada de la planta a controlar como una capacidad de primer orden más un tiempo muerto:

$$G(s) = G_v(s)G_p(s)G_t(s) = \frac{ke^{-Ls}}{\tau s + 1} \tag{46}$$

Y el ajuste del controlador se realiza con el siguiente cuadro

PI	$\frac{0.9}{K} \left(\frac{\tau}{L} \right)$	$\frac{L}{0.3}$	0
----	---	-----------------	---

(I.1)

Donde K y L se obtienen de la siguiente manera

Basándonos en la respuesta de la planta que simulamos en la parte de arriba la cual no tiene controlador podemos asumir lo siguiente

Si Ecuación de la recta

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \tag{47}$$

La máxima pendiente se da en el punto de inflexión m_{\max} = punto de inflexión, al obtener el índice del punto de inflexión se obtiene la pendiente y los parámetros del punto de inflexión.

Para obtener L

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \tag{48}$$

$$x_2 - x_1 = \left(\frac{y_2 - y_1}{m} \right) \tag{49}$$

$$\boxed{x_2 - \left(\frac{y_2 - y_1}{m} \right) = x_1} \tag{50}$$

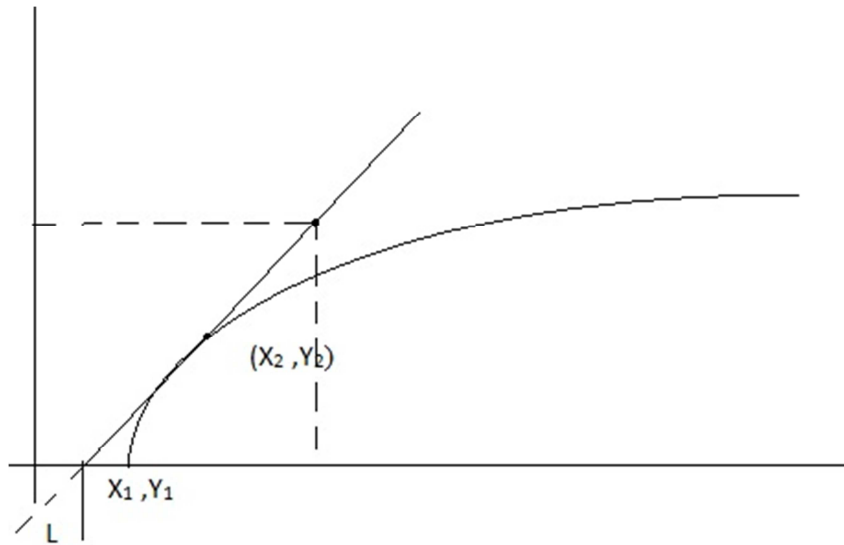


Figura 3.10 Gráfica que muestra cómo obtener L con la gráfica de respuesta de la planta sin controlador

Si $y_1 = 0$

$$x_2 - \left(\frac{y_2}{m} \right) = x_1 = L \quad (51)$$

Ahora para obtener T

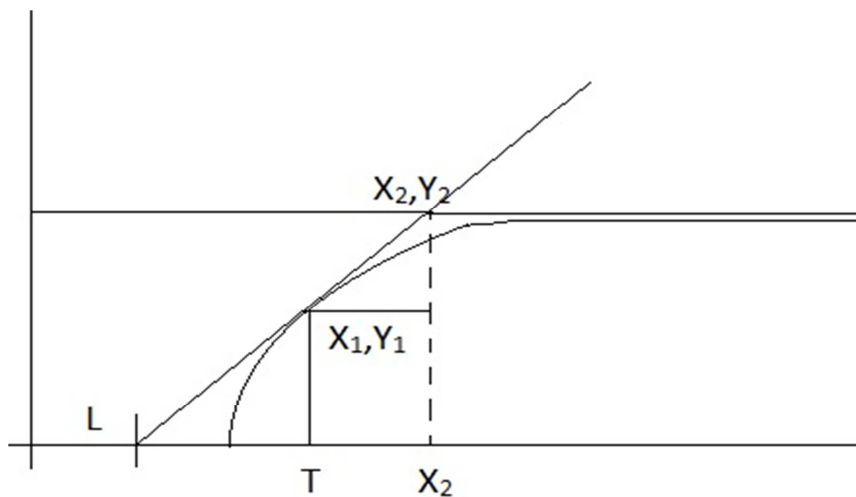


Figura 3.11 Gráfica que muestra cómo obtener T con la respuesta de la planta sin controlador

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (52)$$

$$x_2 - x_1 = \left(\frac{y_2 - y_1}{m} \right) \quad (53)$$

$$x_2 = \left(\frac{y_2 - y_1}{m} \right) + x_1 \quad (54)$$

Por ser el tiempo de estabilización $y_2 = y_{ultima}$

Se realiza un programa que numérico en matlab para obtener estos valores para mayor referencia se puede revisar el **anexo D** en el cual se explica cómo se realiza el programa y las variables involucradas.

Para nuestra facilidad se muestran únicamente los valores obtenidos con dicho programa, para cada uno de los modelos antes mencionados

MOTOR 1	MOTOR 2
L1= 0.2919	L2 = 0.2900
T = 7.5527	T1 = 7.4299

Con la obtención de estos parámetros y basándonos en la tabla (I.I) mostrada arriba se procede a hacer el cálculo de Kp y Ti para cada sistema.

MOTOR 1	MOTOR 2
Kp1= 23.2846	Kp2 =23.0587
Ti1 = 0.9731	Ti2 = 0.9667

Al obtener estos valores podemos simular de manera satisfactoria el comportamiento de nuestra planta junto con el controlador el cual tiene la siguiente estructura

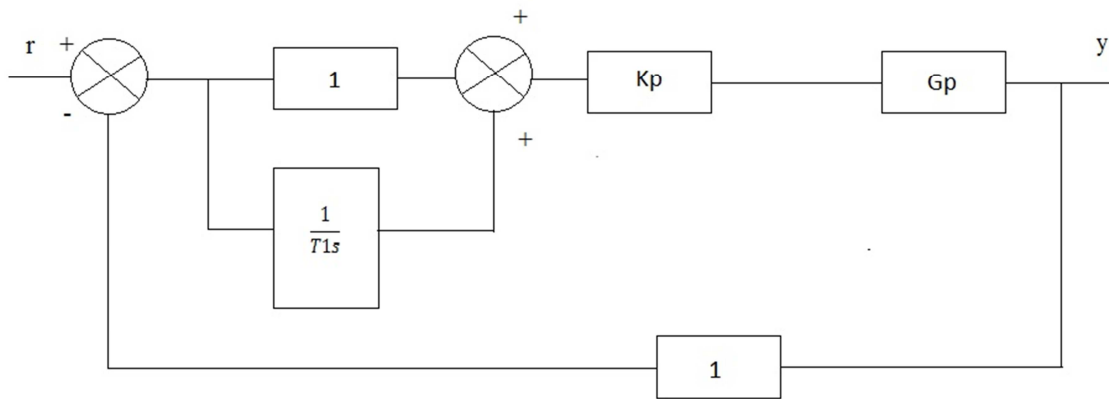


Figura 3.12 Estructura general del controlador diseñado (PI)

Para realizar una simulación de manera correcta necesitamos la referencia a la cual el controlador va a estabilizar el sistema, una manera que encontramos para esto sin modificar alguna de las restricciones mencionadas en capítulos anteriores, lo que se quiere controlar es velocidad lineal y lo que otorga el sistema es velocidad angular, existe una relación entre ambas la cual es

$$v = \omega R \quad (55)$$

Donde R es el radio de la rueda

A partir de esta relación necesitamos una forma de medir dicho desplazamiento en función de la velocidad angular y la forma en que lo hicimos fue basándonos en el concepto del encoder y conteo de pulso se detalla a continuación la manera en que se logró esto.

Si tomamos en consideración que un encoder es un círculo el cual está dividido en fracciones y que toma un tiempo hacer la transición entre divisiones podemos asumir que este tiempo está asociado a la velocidad de giro

$$v = \frac{\Delta x}{T_{\text{muestro}}} \quad (56)$$

Donde Δx es el número de división y T_{muestreo} es el tiempo en que se tarde en llegar a la siguiente división, estos parámetros se pueden modificar sin ningún problema con lo cual ya podríamos obtener una referencia a la velocidad angular y con esta determinar la velocidad lineal y poder controlar nuestro sistema

Con la restricción física y de seguridad que se plantea en capítulos anteriores la silla no puede ir a más de 3.5 (km/h) en línea recta, basándonos en esto limitemos lo siguiente

Vmax en línea recta	3.0 [km/h] o 0.84 [m/s]
Vmax en reversa	2.0 [km/h] o 0.55 [m/s]
Vmax en vuelta a a ambos lados	1.5 [km/h] o 0.41 [m/s]

Si usamos un encoder el cual tiene 50 divisiones y el periodo de muestreo es el .6 [s] tenemos una velocidad máxima de esto por restricciones físicas y de diseño Despejemos de la ec (56) para obtener el número de conteos el cual va a ser nuestra referencia para obtener

Si despejamos a ω de la ec (55) e introducimos valores tenemos la velocidad angular a la cual debe estabilizar el controlador pero aún no se tiene la referencia se procede de la siguiente manera

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{0.84}{.1} = 8.4 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (56)$$

Si una 1 radian sobre segundo equivale a 0.159 revoluciones por segundo

$$8.4 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] = 1.33 [\text{rps}] \quad (57)$$

Para llegar al valor deseado aplicamos lo siguiente

$$\text{Si } I[rps] = \frac{50[\text{conteos}]}{I[s]} \quad (58)$$

$$\frac{1.33[rps](0.6)[s](50)[\text{conteos}]}{I[rps]} = 40[\text{conteos}] \quad (59)$$

Este es el valor el cual debe tener de referencia nuestro controlador para que la silla corra a máximo 3[km/s], procedemos de igual manera con los valores siguiente lo que corresponde queda en la siguiente tabla

3.0 [km/h] o 0.84 [m/s]	40 [conteos] cada .6[s]
2.0 [km/h] o 0.55 [m/s]	26 [conteos] cada .6[s]
1.5 [km/h] o 0.41 [m/s]	19[conteos] cada .6[s]

Ahora simulemos el sistema con ayuda de matlab y Simulink y veamos cómo responde el sistema a una entrada escalón unitario

Ecuaciones correspondientes al sistema con controlador (PI)

MOTOR 1

$$\frac{k_{p1C1} \left(s + \frac{1}{Ti_1} \right)}{s^3 + a_1s^2 + (b_1 + k_{p1C1})s + \frac{k_{p1C1}}{Ti_1}} = \frac{3.117 s + 0.1247}{s^3 + 2.834s^2 + 3.327s + 0.1247} \quad (60)$$

MOTOR (2)

$$\frac{k_{p2C} \left(s + \frac{1}{Ti_2} \right)}{s^3 + a_2s^2 + (b_2 + k_{p2C2})s + \frac{k_{p2C2}}{Ti_2}} = \frac{15.31 s + 1.487}{s^3 + 2.834s^2 + 15.54s + 1.584} \quad (61)$$

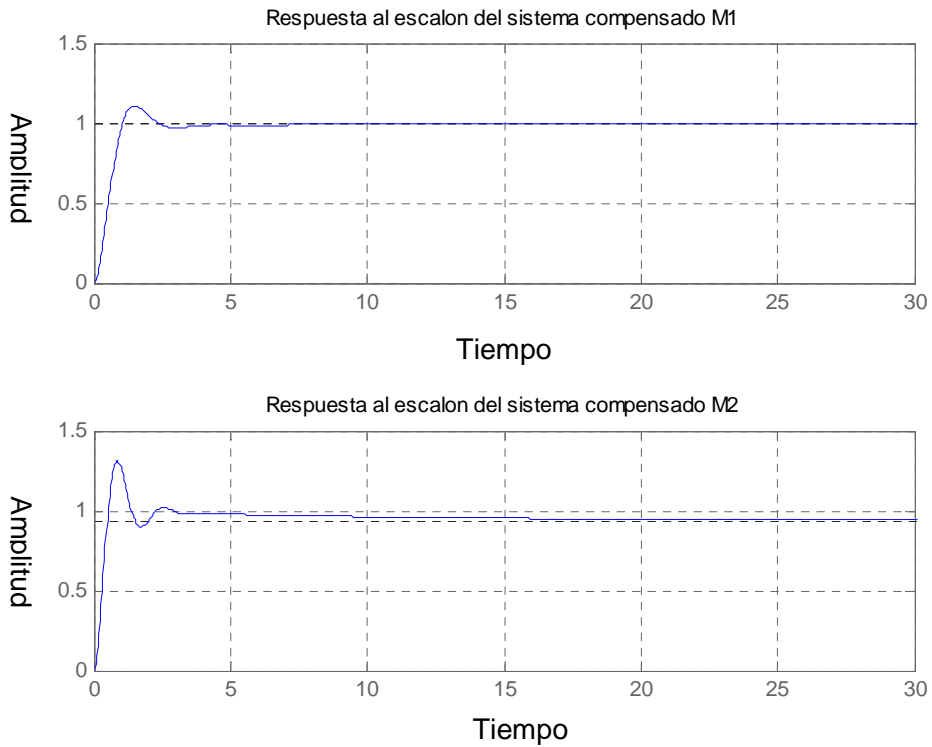


Figura 3.13 Corresponde a la entrada escalón sin realizar ningún ajuste

Debido a que nuestro sistema es de baja velocidad y se quiere un arranque lento se procede con los ajustes necesarios de K_p y T_i de cada uno hasta lograr que esto suceda

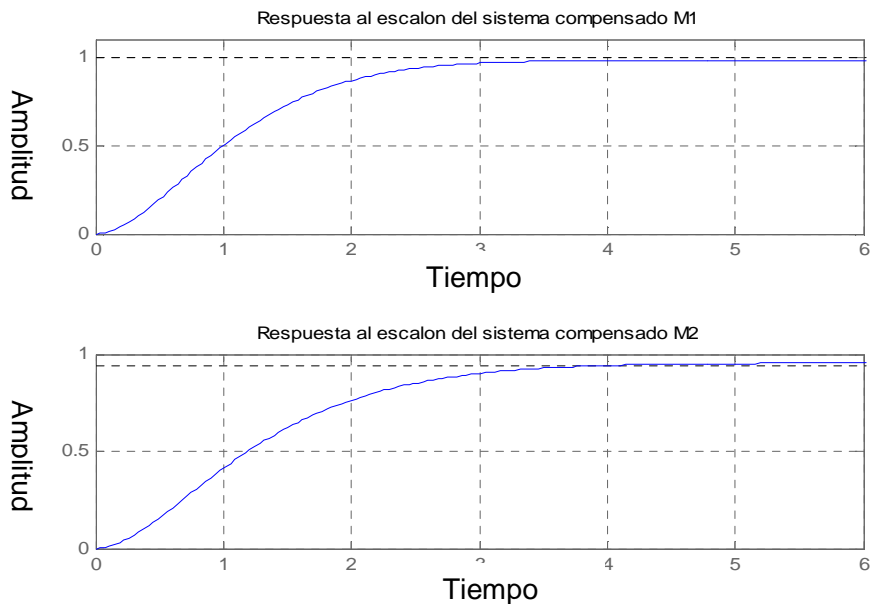


Figura 3.14 Sistema con controlador ajustado

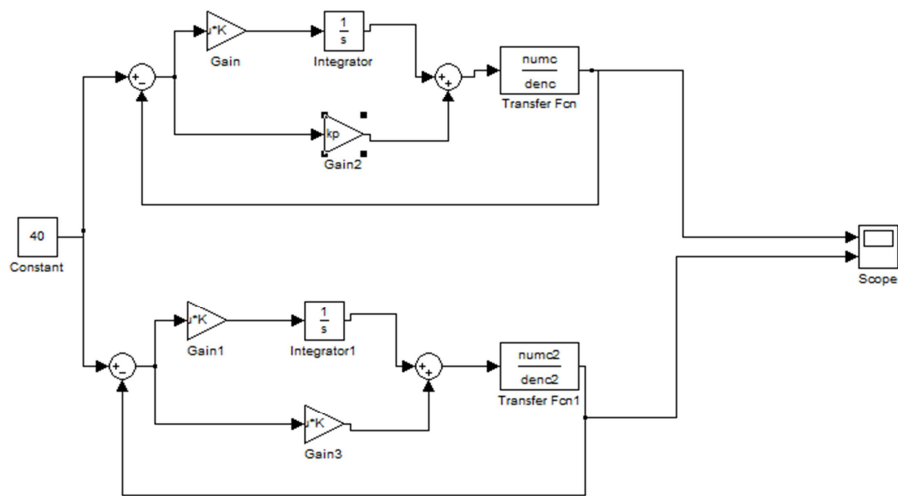


Figura 3.15 Sistema en Simulink para ambos modelos

Estos modelos son continuos y muy difíciles de implementar de manera física por lo cual procederemos discretizar y a su vez los convertiremos en ecuaciones en diferencias para implementarlas en algún microcontrolador

Discretización

Si nuestros modelos con controlador integrado corresponden a los siguientes

MOTOR 1

$$\frac{k_{p1}C_1 \left(s + \frac{1}{T_{i1}} \right)}{s^3 + a_1s^2 + (b_1 + k_{p1}C_1)s + \frac{k_{p1}C_1}{T_{i1}}} = \frac{3.117s + 0.1247}{s^3 + 2.834s^2 + 3.327s + 0.1247}$$

MOTOR (2)

$$\frac{k_{p2C} \left(s + \frac{1}{Ti_2} \right)}{s^3 + a_2s^2 + (b_2 + k_{p2C2})s + \frac{k_{p2C2}}{Ti_2}} = \frac{15.31s + 1.487}{s^3 + 2.834s^2 + 15.54s + 1.584}$$

Podemos usar de manera general lo siguiente y solo integrarlo a cada uno de los modelos, si sabemos que el controlador (PI) se define de la siguiente manera

$$G(s) = Kp + \frac{Kp}{T_{1s}} \quad (62)$$

Si usamos un retenedor de orden cero para hacerlo más estable el cual se define de la siguiente manera

$$Gh_0(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} = \frac{[1 - z^{-1}]}{s} \quad (63)$$

Procedemos de manera matemática como sigue

$$L(z) = L[Gh_0(s)G(s)]R(z) \quad (64)$$

$$L = [Gh_0(s)G(s)] = [1 - z^{-1}] L \left[\frac{G(s)}{s} \right] \quad (65)$$

$$L \frac{G(s)}{s} = \frac{1}{s} \left(Kp + \frac{Kp}{T_{1s}} \right) = \left(\frac{Kp}{s} + \frac{Kp}{T_1(s^2)} \right) \quad (66)$$

$$L\left(\frac{G(s)}{s}\right) = L\left(\frac{Kp}{s} + \frac{Kp}{T_1 s}\right) = \left[\frac{Kpz}{(z-1)} + \frac{KpTz}{T_1(z-1)^2}\right] \quad (67)$$

$$L[Gh_0(s)G(s)] = [1-z^{-1}] \left[\frac{Kpz}{(z-1)} + \frac{KpTz}{T_1(z-1)^2}\right] \quad (68)$$

$$= \frac{Kpz}{(z-1)} + \frac{KpTz}{T_1(z-1)^2} - \frac{Kp}{(3-1)} - \frac{KpT}{T_1(z-1)^2} \quad (69)$$

$$\frac{Kp}{(z-1)}(z-1) + \frac{KpT}{T_1(z-1)^2}(z-1) = Kp + \frac{KpT}{T_1(z-1)} \quad (70)$$

La ec (70) la introducimos en el modelo principal y operamos de manera normal

llegamos a o siguiente

$$G(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{k_p T_1(z-1) + k_p T}{T_1(z-1)} \quad (71)$$

MOTOR 1

MOTOR 2

$$\frac{0.6006z^2 - 0.341z - 0.2149}{z^3 - 1.166z^2 + 0.2695z - 0.05878}$$

$$\frac{0.4125z^2 - 0.2324z - 0.1538}{z^3 - 1.415z^2 + 0.5017z - 0.05879}$$

Si además dividimos entre z^{-1} esto es para poder llegar a una ec en diferencias y poder tener una forma de programarla en un microcontrolador

$$\frac{k_p T_1(1-z^{-1}) + k_p T z^{-1}}{T_1(1-z^{-1})} = \frac{y(z)}{u(z)} \quad (72)$$

$$u(z) = k_p T_1(1-z^{-1}) + k_p T z^{-1} u(z) = T_1(1-z^{-1})y(z) \quad (73)$$

$$u(z)k_p T_1 - k_p T_1 z^{-1} u(z) + k_p T z^{-1} u(z) = T_1 y(z) - T z^{-1} y(z) \quad (74)$$

$$u(z)k_p T_1 - k_p z^{-1} u(z)[-T - T_1] = T_1 y(z) - T_1 z^{-1} y(z) \quad (75)$$

Dividido todo entre T_1

$$k_p u(z) + k_p z^{-1} u(z) \left[\frac{T}{T_1} - 1\right] = y(z) - z^{-1} y(z) \quad (76)$$

Si aplicamos el teorema de cambio de tiempo

$$k_p u(k) + k_p \left[\frac{T}{T_1} - 1 \right] u(k-1) = y(k) - y(k-1) \quad (77)$$

$$y(k) = k_p u(k) + k_p \left[\frac{T}{T_1} - 1 \right] u(k-1) + y(k-1) \quad (78)$$

$$y(k) = k_p u(k) + \frac{k_p T}{T_1} u(k-1) - k_p u(k-1) + y(k-1) \quad (79)$$

$$k_p u(k) + \frac{k_p T u(k-1)}{T_1} - k_p u(k-1) + y(k-1) = y \quad (80)$$

De esta manera la ec. (80) es la que se implementara en el microcontrolador al ser una ec en diferencias es más fácil esta implementación y desarrollo electrónico, esto se detalla de mejor manera en capítulos siguientes

Capítulo 4

Implementación electrónica y control

En este capítulo se hará una breve explicación acerca de la implementación de los distintos circuitos que componen la etapa eléctrica del módulo, así como descripción de cada uno de los componentes electrónicos.

4.1 Etapas de diseño e implementación

El circuito de control de la silla fue implementado y analizado por etapas de la siguiente manera.

- Fuente de alimentación.
- Circuito para control del sentido de giro de los Motores DC.
- Circuito control de velocidad de los motores.
- Circuito de censado.
- Circuito de potencia.

Posteriormente se acopló cada uno de los circuitos para conformar el módulo, Figura 4.1. Es preciso destacar que en el proceso del desarrollo de los circuitos no se puso énfasis en el funcionamiento interno de cada uno de los componentes electrónicos que integrarán el circuito. El punto importante fue conocer la relación

entrada/salida. Esto permitió predecir la respuesta del sistema ante cada variación posible permitiendo diseñar el circuito de control con los componentes más adecuados, que a su vez harán que el comportamiento del sistema sea el deseado.

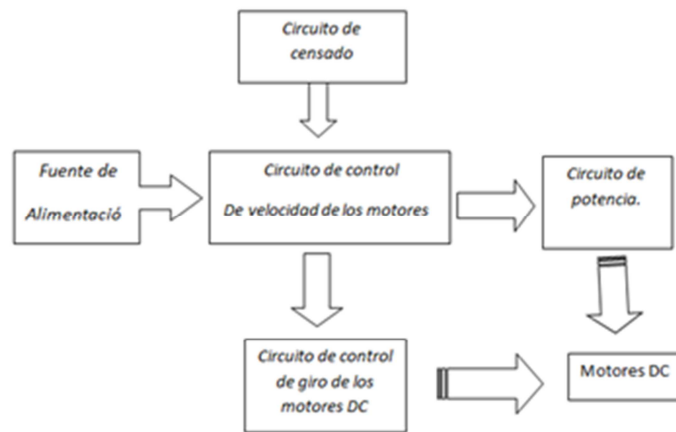
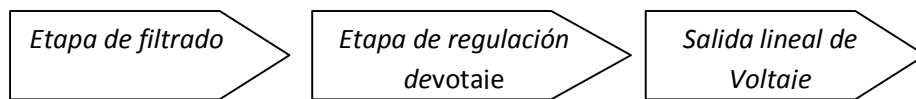


Figura 4.1 Diagrama de los circuitos electrónicos

4.2 Implementación electrónica

Fuente de alimentación de DC

Implementamos una fuente de alimentación 5 [V] con un LM7805 a partir de una batería de 12 [V]. Esta fuente se va a encargar de alimentar al circuito de control de los PICAXES, el circuito de sensado y el circuito de la etapa de potencia. El diseño de la fuente se realizó de la siguiente manera poniendo atención en que cada circuito quedará libre de ruido para evitar un mal funcionamiento del microcontrolador.



Diseño de la fuente de alimentación.

El diodo son dispositivos de dos terminales, que de forma ideal solo deberían conducir o permitir el paso de la corriente en un solo sentido, actuando como un cortocircuito en el sentido en que permite el paso de la corriente y como circuito abierto cuando la corriente circula en sentido contrario al permitido.

Comenzamos con la primera protección. Colocando un diodo D1 1N4007 el cual va a encargarse de proteger a nuestro circuito contra inversiones de polaridad. Los diodos son dispositivos semiconductores sencillos pero esenciales en los circuitos electrónicos. El segundo diodo D2, que colocamos entre la entrada y salida del regulador se encarga de proteger a el regulador contra alguna regresión de voltaje o en caso de haber un corto. El regulador de voltaje es un circuito integrado de tres terminales, el cual es muy usado. Internamente tiene la fuente de referencia, un amplificador comparador, un dispositivo de control y la protección de sobrecarga.

En el diseño usamos el regulador de voltaje LM7805 el cual se encargará de garantizarnos un voltaje de salida 5 [V]. Esta familia de reguladores es capaz de trabajar con voltajes desde 5 a 25 [V]. Éste tiene un voltaje de entrada sin regular a una terminal de entrada, un voltaje de salida regulado y la tercera terminal conectada a tierra. El filtrado: es una parte muy importante. El filtro más común es el uso de capacitor en la entrada [9].

Los capacitores son dispositivos eléctricos que mediante el arreglo de dos placas o superficies enfrentadas mantiene al voltaje almacenado en forma de campo eléctrico. En la Figura 4.2 y 4.3 se muestra el circuito de la fuente de alimentación.

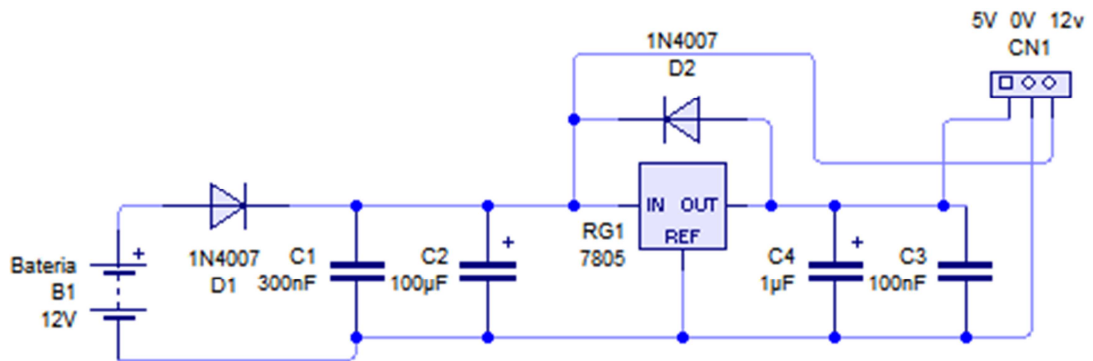


Figura 4.2 Fuente reguladora de Voltaje de 5 [V]

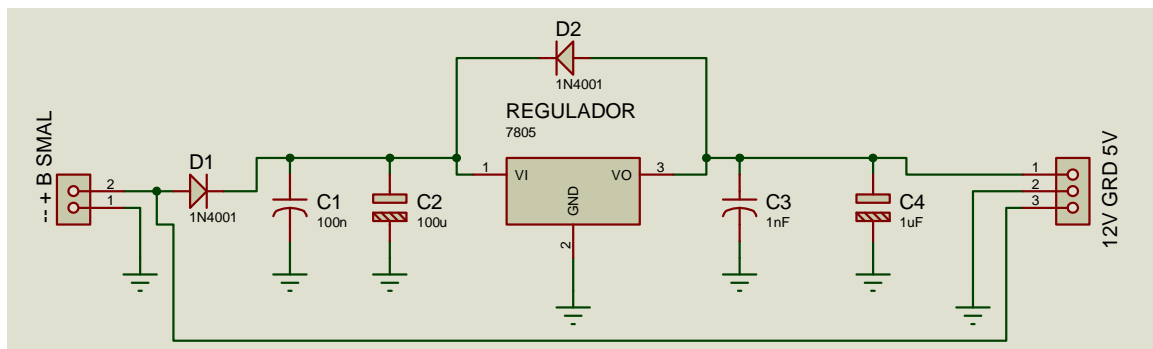


Figura 4.3 Fuente reguladora de Voltaje de 5 [V]

Los componentes que fueron usados en diseño de la fuente fueron los siguientes:

- 1 Regulador LM7805
- 2 Diodo 1N4007
- 1 Capacitor electrolítico 100 [µF]
- 1 Capacitor electrolítico 1 [µF]

- 1 Capacitor cerámico 10 [uf]
- 1 Capacitor cerámico 1 [uf]
- 1 Disipador

Circuito control de velocidad de los motores.

El circuito de control de velocidad podemos decir que es el cerebro que se encarga de hacer coordinar cada una de los circuitos que hemos implementado para el funcionamiento de los motores.

El circuito de control de velocidad de los motores está encargado de controlar la velocidad de giro de cada motor, recibir la señal del Joystick, controlar el circuito de los relevadores, recibir la señal de los sensores de movimiento y mandar la señal PWM a los MOSFET que controlan el flujo de la corriente de cada motor.

Este circuito está diseñado básicamente con dos PICAXE. Estos son microcontroladores estándar de Microchip que han sido pre-programados con el código de bootstrap. Este código habilita al PIC para que pueda ser re-programado directamente con una conexión serie, eliminando el uso del programador.

El circuito de re-programación es el mismo para todos los chips PICAXE, el cual consiste en tres alambres del chip PICAXE conectados al puerto serial de la PC.

En la Figura 4.4, muestra la conexión básica de programación del PICAXE.

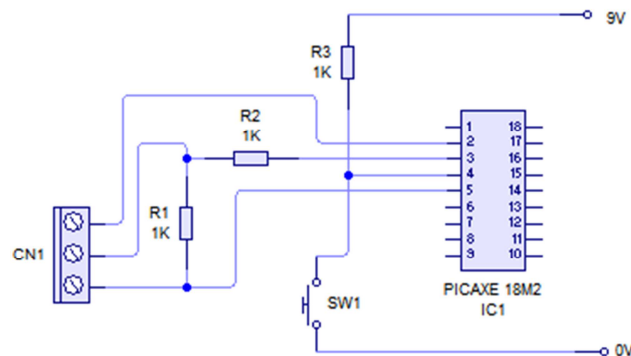


Figura 4.4 Conexión básica para programación de un PICAXE

El circuito se diseñó con dos PICAXES. Cada PICAXE se encarga de controlar uno de los motores.

El funcionamiento del circuito de control de velocidad es el siguiente.

El Joystick es el encargado de mandar las señales de dirección de la silla hacia las a cuatro de las entradas de los PICAXES, entonces los PICAXES se activan, y mandan señales hacia el circuito de control de dirección de giro para que este sea activado. Durante este proceso, la salida del PWM de cada PICAXE mandara una señal de PWM al circuito de potencia, esta señal activa los MOSFET's que son los encargados de dejar pasar la corriente hacia los motores. Haciendo que los motores sean activados y comiencen a girar en el sentido que fueron programados. Entonces los sensores comienzan a mandar una señal de tipo digital a cada PICAXE para que sea procesada por el programa de control que fue programado en el PICAXE y así mandar una señal de PWM con la frecuencia

y el ciclo de trabajo deseado. Todo esto hace que la silla se mueva a la velocidad y sentido deseado.

El circuito que fue implementado se muestra en la siguiente Figura

4.5.

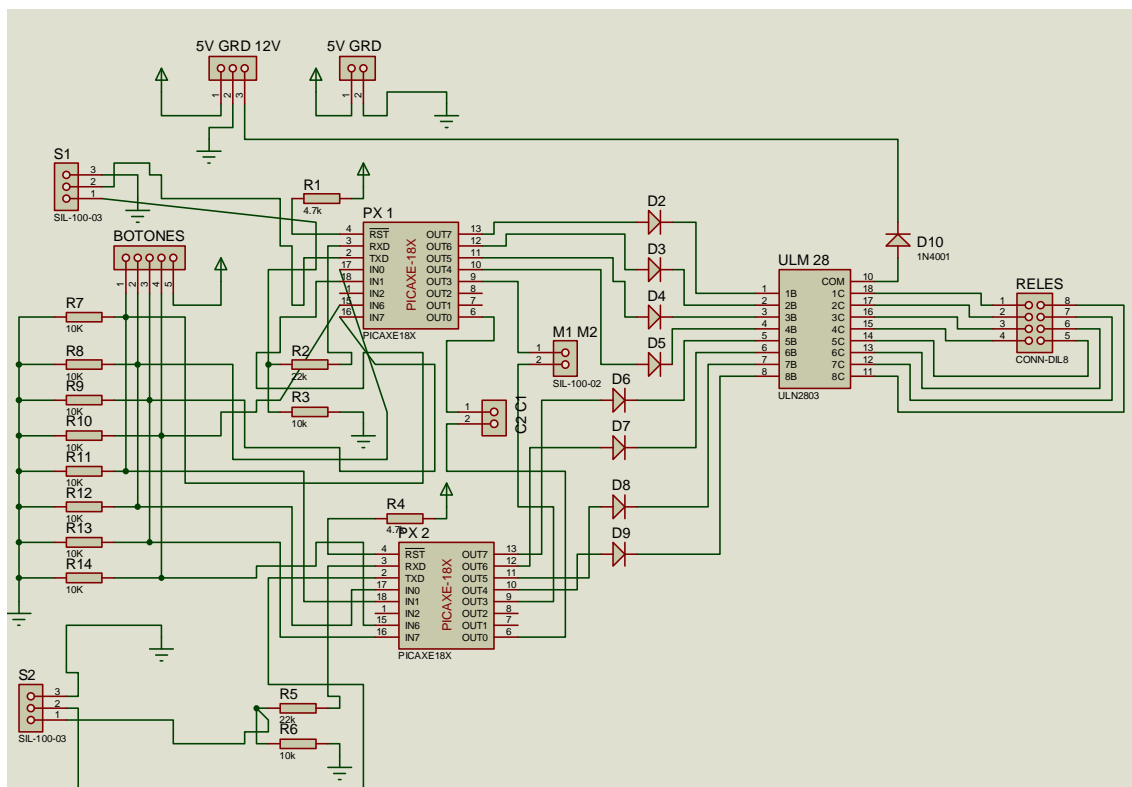


Figura 4.5 Circuito que encargado de controlar la velocidad y sentido de giro de los motores

En el diseño de este circuito se usó el circuito integrado ULM2803. Este IC se colocó para elevar el voltaje que proviene de las salidas de los PICAXE hacia las bobinas de los relevadores y así garantizar que cada uno de los relevadores sea accionado satisfactoriamente.

Así mismo colocamos un diodo en cada una de las salidas que van hacia los relevadores como protección para evitar un regreso de la corriente o prevenir un cortocircuito que pudiese ocasionarse durante el proceso.

Los dispositivos que fueron utilizados para la implementación de este circuito fueron:

- 2 PICAXE 18M2
- 10 resistencias de 10 [K Ω]
- 2 resistencias de 22 [K Ω]
- 2 resistencias de 4.7 [K Ω]
- 9 diodos 1N4007
- 1 ULM2803

Circuito de control de giro de los motores DC

El funcionamiento de los motores de DC es muy simple. Para accionarlos, es suficiente conectar los bornes de una batería directamente a los bornes del motor de DC mediante un par de cables por lo que comenzará a girar en un sentido. Para invertir el sentido de giro basta con cambiar la polaridad de la batería.

Existe una gran diferencia entre los motores de DC y los servomotores o los motores a pasos. Esta gran diferencia radica en que los motores DC no pueden ser posicionados de la misma manera que los servomotores o motores a pasos. Mientras los motores de DC giran a la máxima velocidad y sentido de polarización de la batería de alimentación.

Control de Giro de los motores

Para realizar el control de la dirección de giro de los motores se usarán dos puentes H. Es decir, un puente H se encargará de controlar el sentido de giro del motor izquierdo y el segundo puente H controlará el sentido de giro del motor derecho.

El puente H deberá ser capaz de entregar la máxima potencia posible para una mayor eficiencia operativa, con la menor cantidad de pérdidas de energía por temperatura y un diseño poco apropiado. En figura 4.6 podemos observar la configuración del puente H encargado de controlar el sentido de giro de un motor de corriente directa.

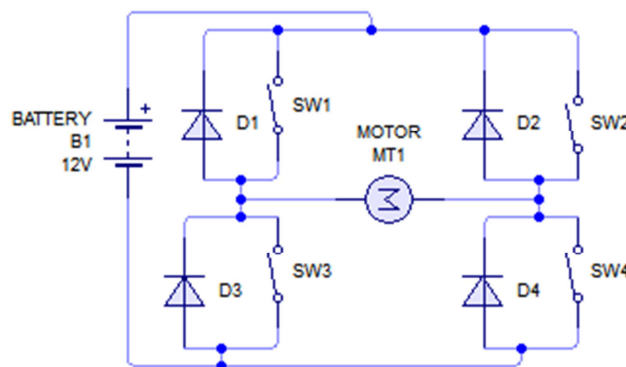


Figura 4.6 Puente H, control del sentido de giro de un motor de DC

Para comprender mejor como se va a controlar el sentido de giro de los motores se dara un breve descripción de la configuración de un puente H.

En la Figura 4.7 se muestra el momento en que los interruptores SW2 Y SW3 estan activados, lo que produce que la corriente pase atraves del motor y este gire en un sentido.

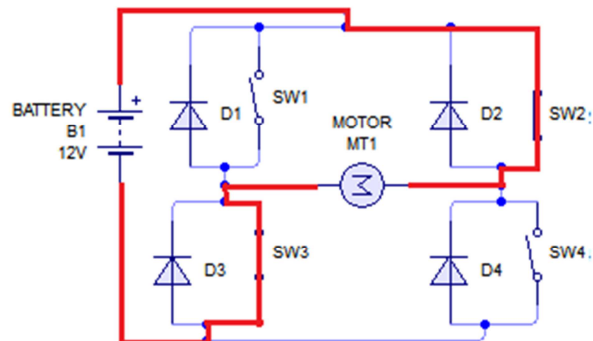


Figura 4.7 Puente H, interruptores SW2 y SW3 activados

En la Figura 4.8 se muestra el momento en que los interruptores SW1 y SW2 están activados, lo que produce que la corriente pase a través de los interruptores activados y el motor gire en sentido contrario.

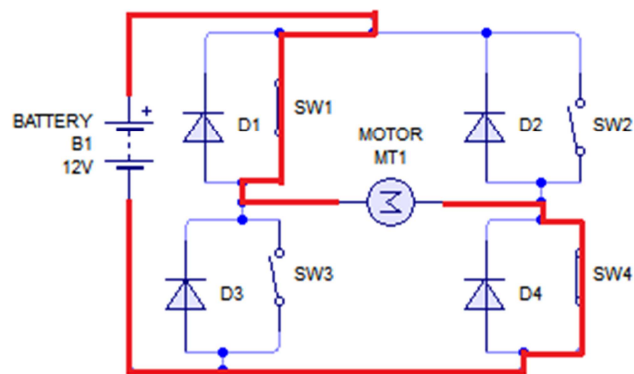


Figura 4.8 Puente H, interruptores SW1 y SW4

El tipo de interruptores que fueron usados para el diseño de los 2 puentes H fueron relevadores.

Se decidió usar relevadores ya que estos no requieren un disipador y son capaces de soportar la corriente que pasará a través de ellos. Es importante mencionar que el tiempo de respuesta de los relevadores no es tan rápido como el de los MOSFET, y este hecho no afecta el funcionamiento ya que se programaron para ser activados con un retardo inferior al tiempo de respuesta del relevador.

A este circuito se le agregó diodos semiconductores paralelos a las bobinas de los relevadores del puente H de inversión de polaridad de la armadura del motor para proteger de contracorrientes que pudieran averiar seriamente al PICAXE, ya que no se uso opto acopladores para el diseño debido a que no son capaces de trabajar con la corriente que se requiere para el accionamiento de las bobinas de los relevadores. En la Figura 4.9 se muestra el circuito encargado de controlar la dirección de giro de los motores.

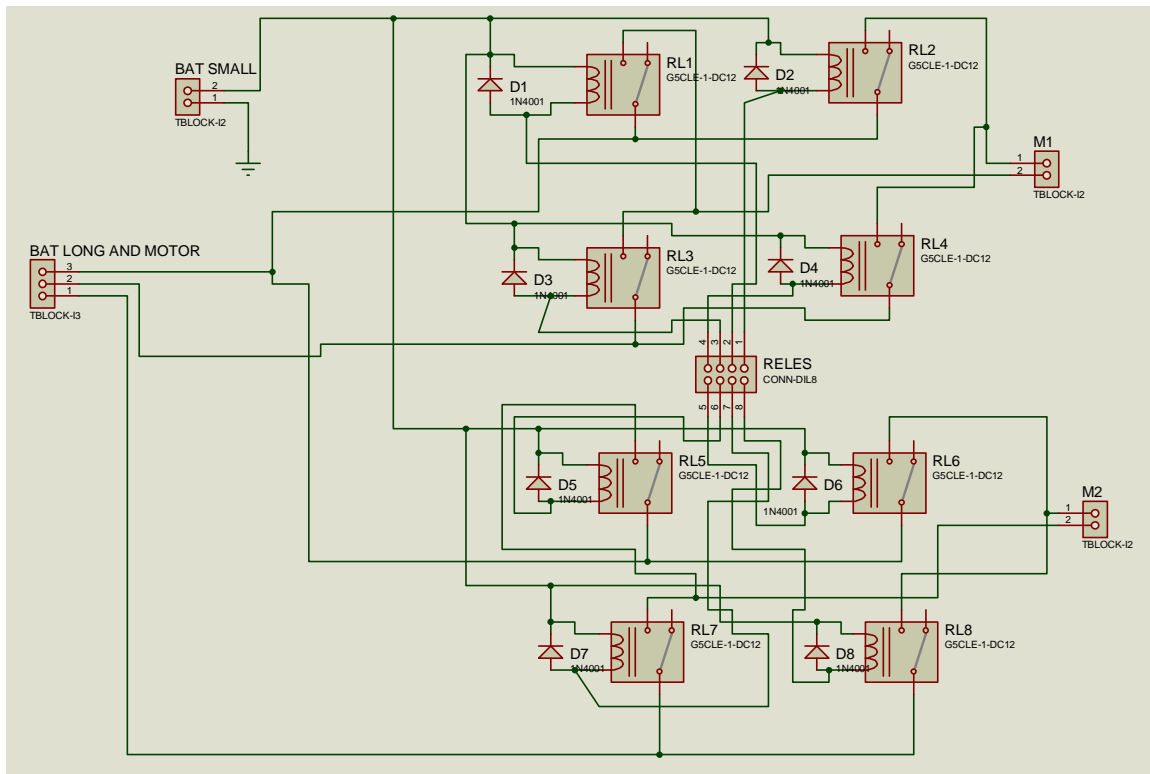


Figura 4.9 Circuito encargado de controlar el sentido de giro de los motores

Los componentes que fueron utilizados para la implementación de este circuito fueron:

- 8 relevadores
- 8 diodos

Circuito de sensado

Para conocer las revoluciones por minuto de cada rueda elaboramos dos encoders que fueron colocados en el eje del rotor y a su vez un sensor de

herradura en cada uno de los encoders. Este circuito se encargará de mandarle la información de la velocidad de los motores a cada uno de los PICAXE, haciendo posible el control de la velocidad.

El tipo de encoder que se uso fue incremental. Este transmite un pulso por cada ángulo girado, de tal forma que si tenemos un encoder de 1000 [rpp], tendremos un pulso por cada $360^\circ/1000 = 0,360^\circ$. El inconveniente es que no disponemos de una referencia absoluta de la posición en la que se encuentra el eje.

El encoder es un transductor rotativo, que mediante una señal eléctrica (normalmente un pulso o una señal senoidal) nos indica el ángulo girado. Este transductor rotatorio al conectarlo mecánicamente con una rueda o un husillo, también nos permitiría medir distancias lineales, figura 4.10.

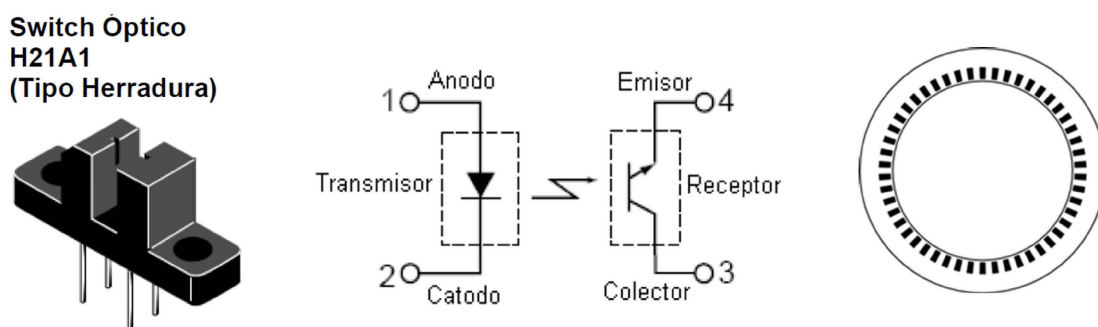


Figura 4.10 Switch Óptico, tipo herradura y encoder

El funcionamiento del sensor en conjunto con el encoder es simple. Por cada revolución completa del encoder el sensor podrá contar N pulsos con un

flanco de subida (transición de 0 a 1) y un flanco de bajada (transición de 1 a 0) cada uno.

Por si solo el sensor de herradura no es muy confiable ya que los pulsos generados durante la práctica tuvieron irregularidades por lo que fue necesario implementar un circuito que trabajará en conjunto con el sensor para asegurar flancos de subida y bajada sin ningún tipo de ruido.

Para garantizar que los pulsos sean registrados sin ruido se implementó un cruce por cero. De este modo se tiene la certeza de que por cada pulso generado se tenga un flanco de subida y uno de bajada. En la figura 4.11, se muestra el arreglo de circuito que se implementó.

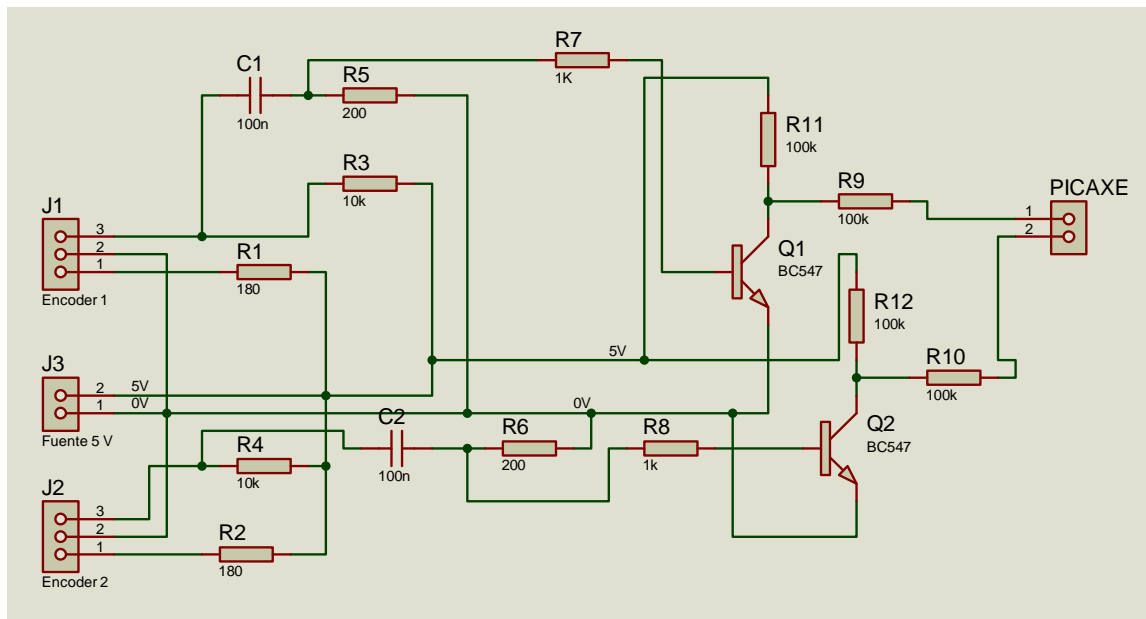


Figura 4.11 Circuito de sensado

En este diseño se usaron dos transistores NPN, los cuales son encargados de trabajar como interruptores. Estos dispositivos permiten controlar y regular el paso de la corriente mediante una señal muy pequeña.

Estos dispositivos tienen tres zonas de trabajo:

- CORTE: No circula corriente por la Base, por lo que, la intensidad de Colector y Emisor también es nula. La tensión entre Colector y Emisor es la de la batería. El transistor, entre Colector y Emisor se comporta como un interruptor abierto.

$$I_B = I_C = I_E = 0; V_{CE} = V_{bat}$$

- SATURACIÓN: Cuando por la Base circula una intensidad, se aprecia un incremento de la corriente de colector considerable. En este caso el transistor entre Colector y Emisor se comporta como un interruptor cerrado.

De esta forma, se puede decir que la tensión de la batería se encuentra en la carga conectada en el Colector.

- ACTIVA.- Actúa como amplificador. Puede dejar pasar más o menos corriente.

Los componentes que fueron utilizados para la implementación de este circuito fueron:

- 2 optointerruptores de herradura.
- 2 transistores NPN de propósito general.
- 2 resistencias de 180 [Ω].
- 2 resistencias de 200 [Ω].
- 2 resistencias de 1 [K Ω].
- 6 resistencias de 10 [K Ω].

Circuito de potencia

Este circuito se encarga de regular el paso de la corriente de la fuente hacia los motores. El cual es controlado por un PWM que proviene de los PICAXE.

Para lograr el control del paso de la corriente se usaron 2 MOSFET's. Este un transistor de tecnología **MOSFET** (**M**etal-**O**xide-**S**emiconductor – **F**ield **E**ffect**T**ransistor) posee destacadas características que lo hacen ideal para este tipo de aplicaciones.

Elegimos el MOSFET IRFZ44 ya que entre las características más destacadas de este transistor encontramos que es capaz de manejar altas

frecuencias, corrientes altas y poca perdida en forma de calor, ofreciendo resistencia tan baja como $0.0175 [\Omega]$.

El funcionamiento de este transistor MOSFET es el siguiente:

Al aplicar una determinada tensión sobre la compuerta (GATE, positiva respecto a GND) se genera dentro del transistor un campo eléctrico que permite la circulación de corriente entre la terminal Drain y la terminal Source. Cuando la tensión en el Gate se interrumpe o se coloca a un bajo potencial, la corriente entre el terminal del Drain y la terminal del Source se interrumpe. De esta forma el MOSFET funciona como una llave electromecánica controlada por tensión, Figura 4.12.

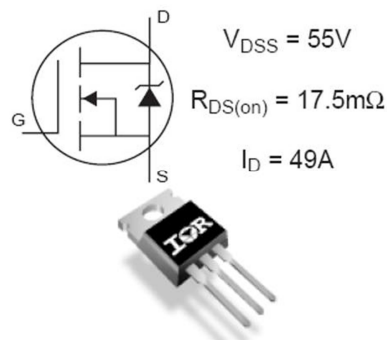


Figura 4.12 MOSFET IRFZ44

Para el diseño se tomó en cuenta que si trabajamos siempre con 5 Volts, estaríamos sobre el límite de activación del transistor. Y si activamos el Gate con mayor tensión lograremos la máxima eficiencia con menor disipación de calor ya que el transistor ofrece menor resistencia a la circulación de corriente entre las terminales Drain y Source. Para lograr esto se diseñó un circuito que permitiera amplificar la señal PWM de 5 Volts que proviene del PICAXE y llevarla a la

terminal Gate del MOSFET. Lo que permitió disminuir resistencia y tener la mínima disipación de calor.

En la Figura 4.13 se muestra el circuito de potencia que se implementó.

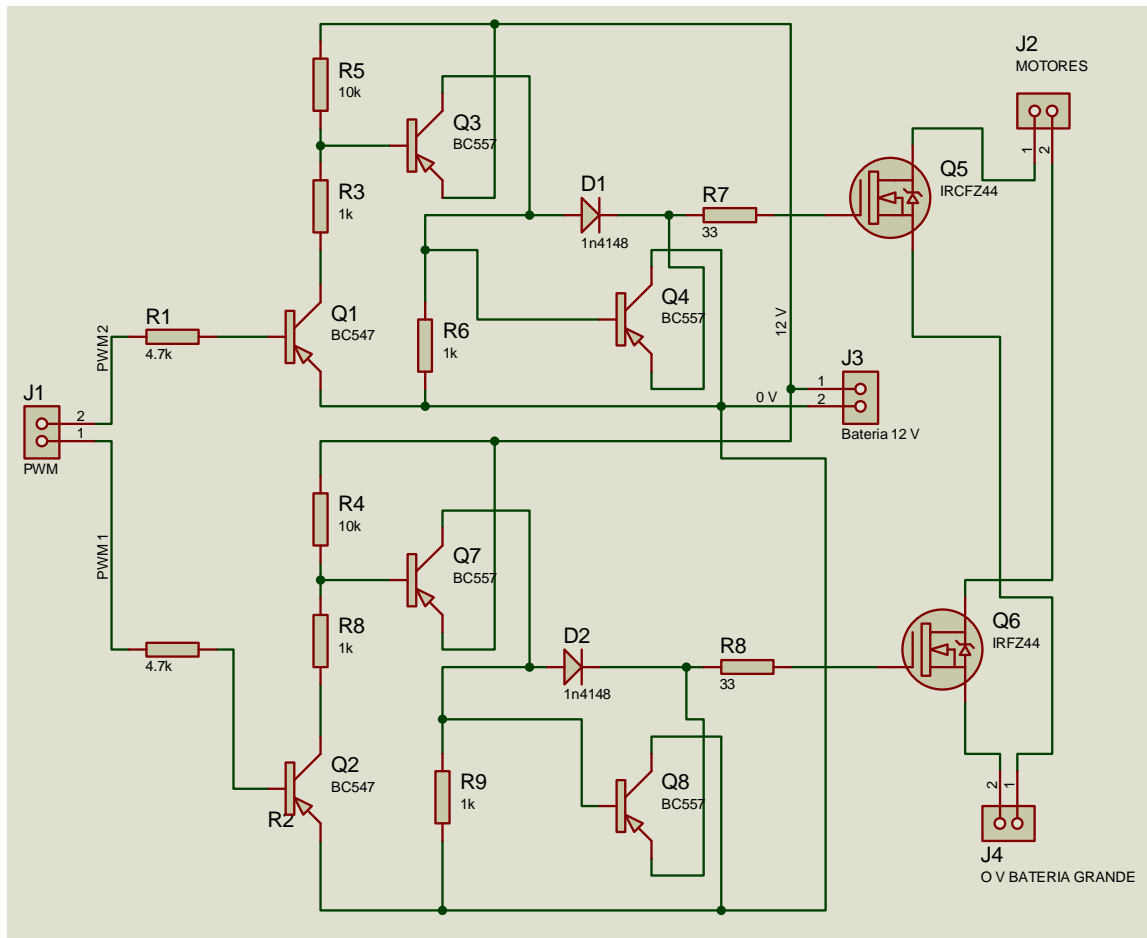


Figura 4.13 Circuito de la etapa de potencia

Los dispositivos que fueron utilizados para la implementación de este circuito fueron:

- 2 MOSFET
- 2 resistencias de 4.7 [K Ω]
- 2 resistencias de 1 [K Ω]
- 2 resistencias de 10 [K Ω]
- 2 transistores BC547
- 2 transistores BC557
- 2 diodos 1N4148

Una vez implementados y probados por separado los circuitos diseñados se procedió a montarlos dentro de un gabinete de acrílico para su protección.

4.3 Funcionamiento

A continuación se hará una descripción general del funcionamiento del módulo ya implementado.

EL módulo es controlado por un Joystick multidireccional al cual se le asignaron 4 funciones, que son las cuatro direcciones básicas: adelante, atrás, izquierda y derecha.

Al momento de inclinar el joystick hacia adelante la palanca mandará una señal digital a los microcontroladores, los cuales activarán los relevadores encargados de controlar el sentido de giro de los motores, Al mismo tiempo los microcontroladores mandaran una señal PWM al Circuito de Potencia que es el cargado de regular la velocidad de los motores. En el momento en que los motores comiencen a girar los sensores ubicados en los encoders mandaran una señal cada uno los microcontroladores respectivamente, esto sincronizará los motores permitiendo comparar la señal deseada con las recibidas por los sensores de los encoders, así se mantendrá durante la etapa de aceleración hasta alcanzar la velocidad deseada. Después simplemente se mantendrá la etapa de control manteniendo la velocidad deseada. Finalmente cuando la palanca es soltada se invierte el sentido de giro del motor lo que hará que los motores se detengan y como consecuencia la silla se detenga. Cuando el Joystick es inclinado hacia atrás

el proceso es idéntico de cuando se inclina hacia adelante, la diferencia radica en el circuito de control de dirección.

Al momento de inclinar la palanca hacia la izquierda la palanca mandará una señal digital a los microcontroladores, los cuales activarán únicamente los relevadores correspondientes al sentido de giro. Esto permitirá que cuando fluya corriente a través del motor la rueda derecha gire hacia adelante y produzca el giro de la silla hacia la izquierda. Al mismo tiempo que son activados los dos relevadores el microcontrolador encargado de controlar el motor derecho mandará una señal PWM al Circuito de Potencia lo que encargado de regular el paso de la corriente hacia el motor. En el momento en que el motor comience a girar el sensor ubicado en el encoder del lado derecho mandará una señal digital al microcontrolador encargado de controlar el motor derecho, esto permitirá comparar la señal deseada con la recibida por el sensor del motor del lado derecho. Finalmente en el momento en que la palanca es soltada se invertirá automáticamente el sentido de giro del motor, produciendo el frenado de la silla. Cuando el Joystick es inclinado hacia la derecha el proceso es idéntico de cuando se inclina hacia la derecha con la diferencia de que el motor que se activará será el izquierdo.

Capítulo 5

Costo del proyecto y resultados experimentales

En este capítulo damos a conocer el costo total del módulo, desglosando y cotizando el precio de cada componente empleado. Analizaremos si es rentable o es recomendable comprar uno módulo ya hecho.

5.1 Presupuesto del módulo

Como ya se había mencionado contamos desde un principio con la silla de ruedas, dos motores de corriente directa de 12 [V], dos cajas reductoras. Posteriormente se nos proporcionó una lámina negra de acero y otra de aluminio.

Para completar la parte mecánica se tuvo que comprar los siguientes componentes:

Material	Cantidad	Costo promedio por unidad Pesos [\$]	Costo promedio total Pesos [\$]
Abrazaderas	6	5	30
Tornillos 1/8 Con tuerca y rondana	20	3	60
Horquilla	2	350	700
Amortiguador	2	50	100
Tornillo sin fin	1	10	10
Grasa para engranaje	1	30	30
	Total =	13	930

Para el desarrollo de la parte eléctrica del módulo fue necesario comprar los siguientes componentes:

Componente	No de unidades	Costo por unidad pesos [\\$]	Costo total pesos [\\$]
Resistencias	32	0.30	9.6
Capacitores Cerámicas	2	1	2
Capacitores electrolíticos	2	3	6
Opto interruptores Herradura	2	8	16
MOSFET	2	15	30
Transistores Propósito general	4	1.5	6
Relevadores	8	15	120
Diodo 1N4148	2	3	6
Diodo Rectificador	18	3	54
Regulador de voltaje LM7805	1	9	9
PICAXE 18M2	2	103	206
UL2803	1	10	10
Disipador	3	20	60
Fenolica	1	60	60
Ácido clorhídrico	2 botes	25	50
Soldadura	5 metros	5	25
Bote Pasta	1	35	35
Cinta de aislar	1	15	15
Cable	10 metros	4	40
Zapatas eléctricas	10	1	10
Headers Hembra/macho	4	10	40
Conectores	15	3	45
Barniz antiestático	1	50	40
Gabinete	150	1	150
Joystick	1	50	50
Ventilador	1	20	20
			1 114.6

Tomando en consideración el costo de las 2 llantas, dos motores, las cajas reductoras y la Batería el costo de cada uno de estos sería el siguiente.

- Dos llantas de Goma 80 pesos.
- Cajas reductoras 700 pesos.

- Batería 700 pesos.
- Motores 30 pesos.

El Costo Total aproximado sería de \$3555 pesos.

Como podemos ver el gasto total es menor al de una silla eléctrica. Es el total de haber comprado cada pieza por unidad.

Actualmente el precio de las sillas eléctricas básicas es de \$ 15,000 a \$ 20,000 pesos.

Pensando en los alcances y en que se podría hacer una producción en masa los costos se reducirían por lo menos un 30% del total.

5.1 Pruebas

Una vez terminada la implementación física de cada etapa que compone la parte eléctrica del módulo se procedió a montar en la silla, programar los microcontroladores y realizar las primeras pruebas como prototipo final.

Cabe aclarar que este prototipo no ha sido probado por el niño que originó la necesidad de realizar este proyecto (Carlos).

Para realizar las pruebas fue necesario pedir la colaboración de un niño de 12 años de edad, con estatura de 1.38 metros y un peso de 35 kilogramos.

Las pruebas las llevamos a cabo en superficies lisas como es la loseta y superficies no lisas como es el pavimento y banquetas de la calle.

Observamos que el módulo de la silla trabajo muy bien en ese tipo de superficies. El niño fácilmente logró familiarizarse con las 4 direcciones básicas con las que fue programado el módulo.

La respuesta del módulo al peso del niño resultó favorable. No mostró arranques repentinos o bruscos ni movimientos incontrolados. El arranque fue suave hasta llegar a la velocidad máxima de 1.76 kilómetros por hora.

Después de haber obtenido resultados favorables en cuanto al control de las direcciones procedimos a poner a prueba la duración de la batería.

La batería mostró un rendimiento de aproximadamente 5 horas en uso constante. Este resultado es verdaderamente favorable ya que si decimos que si la silla se mueve a una velocidad máxima de 2 kilómetros por hora y la batería se mantuvo en funcionamiento 5 horas en uso constante fácilmente podemos asumir que el desplazamiento aproximado de la silla podría ser de 7 kilómetros (esto es el 70% de rendimiento teórico), antes de requerir la recarga de la batería.

Capítulo 6 Conclusiones

Basándonos primordialmente en el objetivo del proyecto en conjunto con las restricciones y limitaciones que se tuvieron al inicio del mismo, se logró la implementación física del módulo mecánico, el cual tiene la capacidad de ser montado y desmontado de manera práctica a la silla de ruedas. No se realizó modificación alguna a la silla de ruedas que se nos otorgó manteniendo intacto lo convenido al comienzo. Este modulo permite transformar una silla convencional a una silla electromecánica. Asi podemos ayudar a la movilidad de Carlos para quien fue pensado este proyecto.

Con la creación del proyecto físico cumplimos con los objetivos planteados al comienzo de este trabajo y con esto pudimos explorar otras áreas de las cuales no teníamos muchos conocimientos

Ya adentrándonos en las características de implementación y construcción del módulo, nos dimos cuenta que se pueden realizarse muchas mejoras y a su vez se pueden destacar algunos beneficios que logramos desarrollar y planteamos a continuación:

La primera de ellas fue que no teníamos mucha experiencia en el área mecánica del módulo. Por lo cual tratamos de basarnos en conceptos básicos que si bien algunas partes son muy complejas (haciendo referencia a las limitantes mencionadas ya en capítulos anteriores), quisimos que fuera muy sencillo para

minimizar costos y tiempo en su fabricación y de esta manera tener un punto de partida para diseñar las demás partes que lo conforman.

La segunda y a nuestro parecer algo que le da eficiencia al proyecto fue elegir el mejor controlador y como implementarlo físicamente ya que aquí es donde podríamos elevar de manera drástica el costo del proyecto y aparte este tenía que adaptarse a las características deseadas planteadas anteriormente, lo más eficiente y económico fue desarrollar un controlador PI el cual es muy estable y robusto además es el más usado en la industria para el control de la velocidad en motores de corriente directa, así que se decidió implementarlo en un microcontrolador de bajo costo y no afectar el objetivo principal

La tercera y su vez la más tardada en su diseño fue la electrónica ya que en esta se tenían que elegir los componentes que mejor se adaptaran a las condiciones de trabajo que se presentarían de manera común, el verificar las características de muchos componentes y que estuvieran disponibles en cualquier lugar, su rango de fallo, su costo, el adaptarlos a las características de movilidad de nuestro usuario fueron algunas de las cosas que más se tuvieron en consideración en el diseño de la electrónica .

Algunas de las mejoras que podrían ser benéficas para este módulo podría incluirse una rueda loca que sería colocada en la parte trasera del módulo en caso de subir una pendiente muy inclinada, esto evitaría que la silla perdiera su centro de gravedad y se volcará. Dando mayor seguridad al usuario, el rediseño de las cajas de engranes ya que generan mucho ruido, baterías más eficientes con una

mayor durabilidad, seguros de fácil liberación al momento de colocar el modulo en otra silla y entre otras mas

Y viendo de manera mas ambiciosa el proyecto este se podría compactar de tal manera que se reduciría más su peso promedio y así minimizar costos, y tal vez crear un producto que podría venderse,

El cual no fue en ningún momento el objetivo de nosotros o del proyecto, sino simplemente ayudar a la movilidad y mejor calidad de vida de nuestro usuario con lo cual damos por cumplido el objetivo fundamental de este proyecto

Bibliografía

- [1] David Warner, **Nothing About Us Without Us: Developing Innovative Technologies For, By and With Disabled Persons**, pp. 173 – 196,
- [2] Historia de Sillas de Ruedas. En Internet <http://www.chairdex.com/shistory.htm>
- [3] Consejo Nacional para Prevenir la Discriminación. <http://www.conapred.org.mx>
- [4] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/discapacidad.aspx>
- [5] Instituto Mexicano del Seguro Social. http://www.imss.gob.mx/programas/discapacidad/Pages/tipos_discapacidad.aspx
- [6] Jean-Pierre Garel, **Educación Física y Discapacidades Motrices**, INDE 2010,
- [7] Bhag S. Guru, Huaeyin R. Hizioglu, **Electric Machinery and Transformers**, OXFORD University Press, Third edition 2002,
- [8] Robert L. Norton. **Design of Machinery**, MacGraw Hill 2005, Third Edition,
- [9] Sergio Franco,
Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits, Third Edition, MacGraw – Hill 2002,
- [10] Katsuhiko Ogata
Ingeniería de Control Moderna, Tercera Edición, Prentice-Hall Hispanoamericana
- [11] B. C. KUO
Automatic control systems, Tercera edición . Prentice Hall. 1995.
Análisis y compensación de sistemas mecánicos retroalimentados
- [12] B. SHAHIAN y M. HASSUL.
Control System Design Using MatLab, Segunda edición . Prentice Hall. USA. 1993. *Introducción y programación con MatLab.*
- [13] R. DORF.
Sistemas modernos de control. Teoría y práctica. Addison-Wesley Iberoamericana. 1989.
Análisis y compensación de sistemas eléctricos y mecánicos retroalimentados.

[14] W. GRANTHAM y T. VINCENT

Sistemas de Control Moderno. Análisis y Diseño , Limusa Noriega Ed.. 1998.
Control clásico básico. Diseño en variables de estado. Sistemas electro-mecánicos.

[15] RODRÍGUEZ RAMÍREZ, F.

Dinámica de sistemas, México, Trillas, 1994
Modelado de sistemas híbridos eléctrico-mecánico

[16] OGATA, K

Dinámica de sistemas. México, Pearson, 1988
Dinámica de sistemas y comportamiento de elementos

Anexo A

Caracterización de un motor de corriente directa

La ecuación 1 muestra la función de transferencia de un motor de corriente directa.

$$T(s) = \frac{\omega(s)}{V_f(s)} = \frac{\frac{K_a}{RJ}}{s + \frac{K_a K_b}{RJ}} \quad (1)$$

Donde:

R es la resistencia de armadura.

K_a es la constante que relaciona el par y la corriente.

K_b es la constante que relaciona la fuerza contra electromotriz y la velocidad angular.

J es la carga o el momento de inercia.

La caracterización de un motor de corriente directa del que desconocemos sus datos de consiste tres pruebas.

- a) *Prueba a rotor bloqueado*
- b) *Prueba a rotor libre*
- c) *Prueba de la respuesta escalón*

1) Prueba a rotor bloqueado

Esta prueba consiste en detener el rotor del motor por medio de un resorte para evitar que tenga movimiento, cuando se le aplique un voltaje. El objetivo del resorte es calcular la fuerza necesaria para mantener el rotor sin movimiento. La Figura 1 muestra la disposición del motor y el resorte colocado perpendicularmente al rotor.

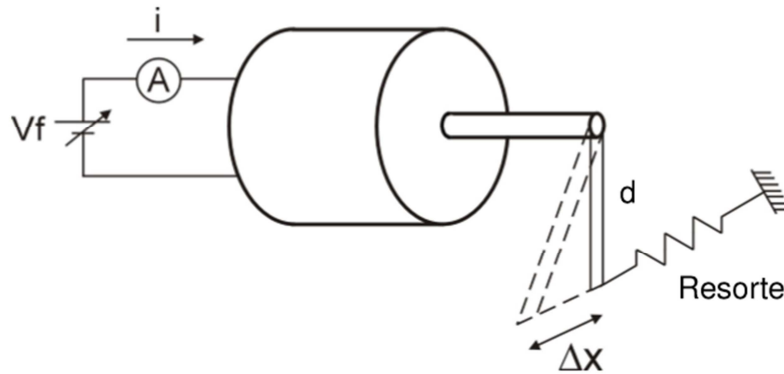


Figura 1. Modelo del eje del rotor de un motor bloqueado por un resorte.

Donde:

V_f [V] es el voltaje de la fuente

d es la distancia del eje del rotor al resorte

Δ_x es la distancia que el resorte se desplaza

Por medio de esta prueba podemos obtener i [A] y Δ_x [mm] directamente a partir de variar el voltaje de alimentación.

Con base a las lecturas obtenidas podemos graficar V_f [V] vs i [A] y así hacer la regresión lineal para obtener la pendiente. La pendiente representa la R de armadura, Figura 2

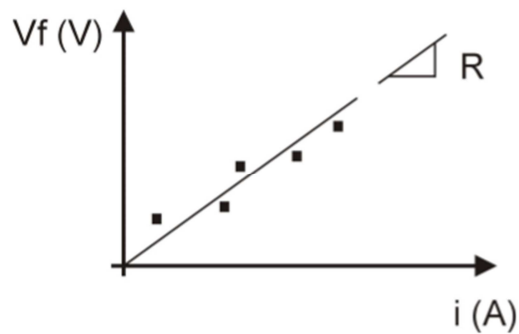


Figura 2. Grafica de V_f [V] vs i [A].

Ahora calculamos la fuerza y el par necesarios para detener el motor con las ecuaciones 2 y 3 respectivamente.

$$F = k \Delta_x \quad (2)$$

$$T_m = F d = k \Delta_x \quad (3)$$

Donde:

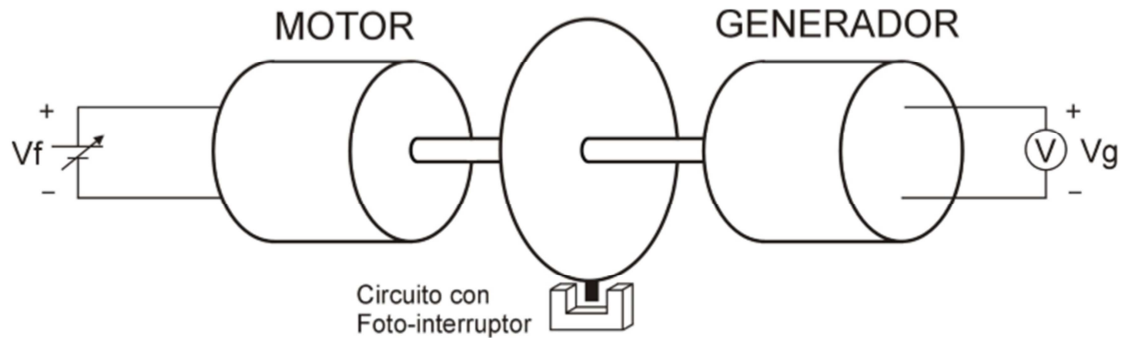
k es la constante del resorte

Ahora podemos graficar los T_m vs i [A] y así podremos hacer la regresión lineal para obtener la pendiente. La pendiente representa la K_a , que es la que relaciona el par del motor y la corriente que circula a través del motor, ecuación 3.

$$K_a = \frac{T_m}{i} \quad (4)$$

2) Prueba a rotor libre

Para poder realizar esta prueba el rotor debe quedar libre para calcular su velocidad angular, variando el voltaje de la fuente, como se muestra en la Figura 2.



La lectura de la velocidad angular puede hacerse de manera indirecta con ayuda de un foto interruptor.

Con ayuda del osciloscopio podemos ver el periodo T . el periodo indica cuantos segundos le toma al rotor dar una vuelta completa.

Una vez obtenido el periodo T podemos usar la formula 5 para obtener la frecuencia.

$$f = \frac{1}{T} \quad (5)$$

Donde:

f es la frecuencia

T es el periodo

Con estos valores podemos obtener la velocidad angular, ecuación 6.

$$\omega = 2 \pi f$$

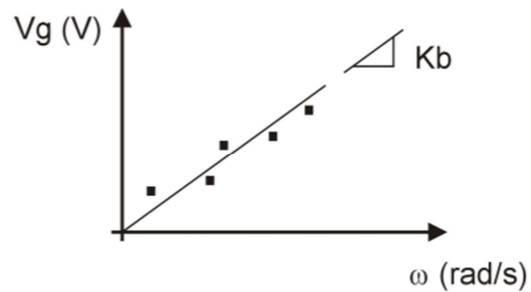
Donde:

ω es la velocidad angular [rad/seg]

Con los valores obtenidos podemos general la siguiente tabla.

Y V_g [V] es el voltaje del generador.

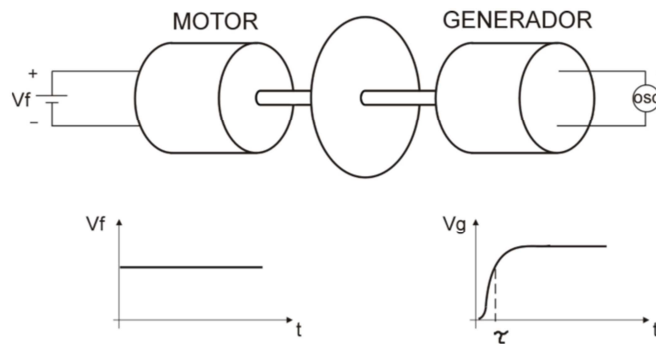
Graficamos V_g [V] vs ω [rad/s], Figura 3, y su regresión lineal para obtener la constante K_b . Ecuación 6.



$$K_b = \frac{V_g}{\omega} \quad (6)$$

3) Respuesta al escalón

Para esta prueba es necesario colocar el motor y el generador como en la figura 4.



Con esta prueba obtenemos gráficamente dos valores.

- 1) El valor de estado permanente del voltaje generado V_g .
- 2) La constante de tiempo τ , que es el valor de tiempo cuando V_g alcanza el 63.3 % de su valor de estado permanente.

Con la ecuación (7) tenemos:

$$T(s) = \frac{\omega(s)}{V_f(s)} = \frac{a}{s + b} \quad (7)$$

Donde:

$$a = \frac{K_a}{R J} \quad \text{y} \quad b = \frac{K_a K_b}{R J}$$

Con esta prueba obtendremos a y b, los cuales nos permitirán conocer el valor de J.

Nota: debemos tener en cuenta que si el voltaje V_f no fue unitario, es decir $V_f = 1$ [V] y el valor de estado permanente obtenido de la grafica es $V_{g\infty}$, se debe dividir el valor $V_{g\infty}$ entre K_b para convertirlo a una velocidad angular rad/s . Ecuación 8.

$$\omega_{\infty} = \frac{V_{g\infty}}{K_b}$$

Por lo que tenemos dos incógnitas, a y b. y las ecuaciones 8 y 9.

$$T(0) = \frac{V_{f\infty}}{\omega_{\infty}} = \frac{a}{b} \quad (8)$$

$$b = \frac{1}{\tau} \quad (9)$$

Al obtener los valores de a y b por medio de la solución de las ecuaciones anteriores obtendremos dos valores distintos de J. La J a utilizar será el valor promedio de las dos obtenidas.

Al final de las pruebas obtendremos los siguientes resultados.

MOTOR 1

Parámetro	Valor
R [Ω]	0.17 [Ω]
K_a [Nm/A]	0.00778 [$\frac{N.m}{A}$]
K_b [Vs/rad]	0.00748 [$\frac{V}{rpm}$]
J [$K_g m^2$]	Aproximadamente cero

MOTOR 2

Parámetro	Valor
R [Ω]	0.17 [Ω]
K_a [Nm/A]	0.00778 [$\frac{N.m}{A}$]
K_b [Vs/rad]	0.00797 [$\frac{V}{rpm}$]
J [$K_g m^2$]	Aproximadamente cero

Anexo B

Trenes de engranajes

El tren de engranajes es toda aquella transmisión en la que hay dos o más engranajes interactuando entre si.

Son normalmente usados:

- Cuando los ejes de entrada y salida de la transmisión están alejados
- Se quiere que la relación de transmisión sea modificable
- Se quiere invertir el sentido de giro
- La velocidad no es la deseada

Los trenes de engranajes pueden clasificarse en

- Trenes simples: si existe solo una rueda por eje
- Trenes compuestos: si en algún eje hay mas de un engranaje
- Reductores: si la salida es menor a la entrada
- Multiplicadores: si la salida es mayor a la entrada
- Positivo: si el sentido de giro de entrada es igual al de salida
- Negativo: si el sentido de giro en la entrada es diferente en la salida

La ecuación 1 muestra la relación de transmisión de la figura 1:

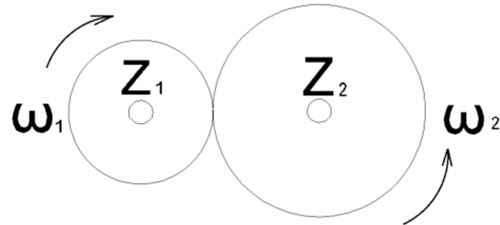


Figura 1. Tren de engranaje

$$C_e = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} \quad (1)$$

Donde:

C_e es la relación de transmisión

ω es la velocidad angular [rad/seg]

n es la velocidad angular [r.p.m]

d es el diametro primitivo

Z es el número de dientes

Si queremos encontrar la relación de transmisión de la figura 2 en función de la velocidad angular y el número de dientes debemos usar la ecuación 2.

$$C_e = \frac{\omega_1}{\omega_6} \quad (2)$$

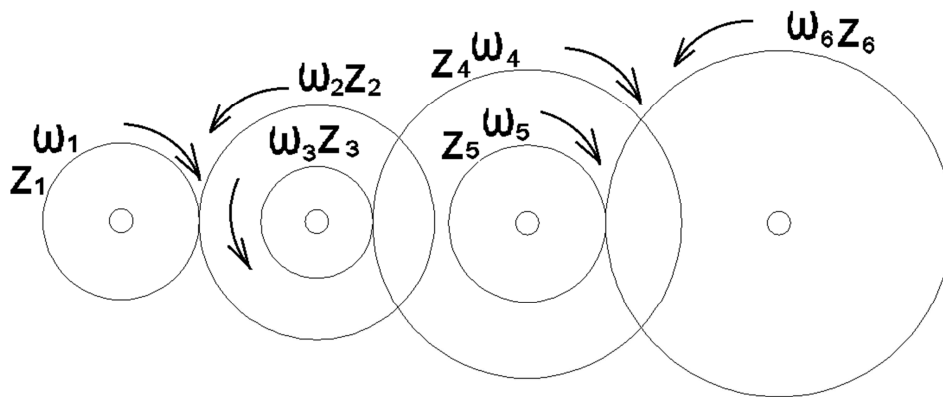


Figura 2. Tren de engranajes compuesto

Sabemos de la figura 2 que:

$$\omega_2 = \omega_3 \quad (3)$$

$$\omega_4 = \omega_5 \quad (4)$$

Además podemos deducir de la figura 1.

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (5)$$

$$\frac{\omega_3}{\omega_4} = \frac{Z_4}{Z_3} \quad (6)$$

$$\frac{\omega_5}{\omega_6} = \frac{Z_6}{Z_5} \quad (7)$$

De las ecuaciones 5, 6 y 7 despejamos ω_1 , ω_3 y ω_5 respectivamente.

$$\omega_1 = \omega_2 \frac{Z_2}{Z_1} \quad (8)$$

$$\omega_3 = \omega_4 \frac{Z_4}{Z_3} \quad (9)$$

$$\omega_5 = \omega_6 \frac{Z_6}{Z_5} \quad (10)$$

Sustituyendo la ecuación 3 en la ecuación 8.

$$\omega_1 = \omega_3 \frac{Z_2}{Z_1} \quad (11)$$

Sustituyendo la ecuación 4 en la ecuación 9.

$$\omega_3 = \omega_5 \frac{Z_4}{Z_3} \quad (12)$$

Sustituyendo la ecuación 12 en la ecuación 11.

$$\omega_1 = \omega_5 \frac{Z_4 Z_2}{Z_3 Z_1} \quad (13)$$

Sustituyendo la ecuación 10 en la ecuación 13.

$$\omega_1 = \omega_6 \frac{Z_6 Z_4 Z_2}{Z_5 Z_3 Z_1} \quad (13)$$

Despejamos $\frac{\omega_1}{\omega_6}$ de la ecuación 13.

$$Ce = \frac{\omega_1}{\omega_6} = -\frac{Z_2 Z_4 Z_6}{Z_1 Z_3 Z_5} \quad (14)$$

Y finalmente nos queda la relación de transmisión del tren de engranajes en la ecuación 14.

$$C_e = \frac{1}{C_q} = -\frac{Z_2 Z_4 Z_6}{Z_1 Z_3 Z_5} \quad (15)$$

Donde C_q es la inversa de la relación de transmisión.

Anexo C

Criterio de estabilidad de Routh

Un sistema se control es estable si y solo si todos los polos en lazo cerrado se encuentran en el semiplano izquierdo del plano s . El criterio de estabilidad de Routh permite determinar la cantidad de polos que se encuentran en el semiplano derecho del plano eliminando parámetros que con los que puede ser complicado trabajar en la ecuación

Con este criterio se puede determinar si existen o no raíces inestable en una ecuación polinomial sin la necesidad de obtenerlas realmente.

El procedimiento para conocer si el existe estabilidad en el sistema utilizando el criterio de Routh es el siguiente:

- Se escribe el polinomio en s de la siguiente manera

$$a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n = 0 \quad (1)$$

Donde los coeficientes son cantidades reales y $a_n \neq 0$ es decir se elimina cualquier raíz cero.

- Se verifica que todos los coeficientes sean positivos ya que esta es una condición necesaria. Debido a que un polinomio en s con coeficientes reales puede factorizarse en factores lineales y cuadráticos, los factores lineales producen raíces reales y los factores cuadráticos producen las raíces complejas del polinomio. El producto de cualquier cantidad de factores lineales y cuadráticos que contengan solo coeficientes positivos siempre produce un polinomio con coeficientes positivos.

La condición necesaria, pero no suficiente para la estabilidad es que todos los coeficientes de la ecuación (1) estén presentes y tengan un signo positivo.

- Si todos los coeficientes son positivos se ordenan los coeficientes del polinomio en filas y columnas de la siguiente forma:

$$\begin{array}{cccccc}
 s^n & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots \\
 s^{n-1} & a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & \dots \\
 s^{n-2} & b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & \dots \\
 s^{n-3} & c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & \dots \\
 s^{n-4} & d_1 & d_2 & d_3 & d_4 & \dots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & & & \\
 s^2 & e_1 & e_2 & & & \\
 s^1 & f_1 & & & & \\
 s^0 & g_1 & & & &
 \end{array}$$

El proceso de formar filas continúa hasta que no quedan más elementos. El número total de filas es $n+1$. Los coeficientes b_1, b_2, b_3 , etc, se evalúan de la siguiente manera

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1} \\
 b_2 &= \frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{a_1} \\
 b_3 &= \frac{a_1 a_6 - a_0 a_7}{a_1} \\
 &\vdots
 \end{aligned}$$

La evaluación de las b continúa hasta que todas las restantes son cero. Para encontrar los valores de c, d y e se sigue el mismo procedimiento

$$c_1 = \frac{b_1 a_3 - a_1 b_2}{b_1}$$

$$c_2 = \frac{b_1 a_5 - a_1 b_3}{b_1}$$

$$c_3 = \frac{b_1 a_7 - a_1 b_4}{b_1}$$

⋮

$$d_1 = \frac{c_1 b_2 - b_1 c_2}{c_1}$$

$$d_2 = \frac{c_1 b_3 - b_1 c_3}{c_1}$$

⋮

Este proceso continúa hasta que se completa la n -ésimo fila.

El criterio de estabilidad de Routh plantea que el número de raíces de la ecuación (1) con partes reales positivas es igual al número de cambios de signo de los coeficientes de la primera columna del arreglo. No es necesario conocer los valores exactos de los términos de la primera columna, solo se necesitan los signos. La condición necesaria y suficiente para que todas las raíces de la ecuación (1) se encuentren en el semiplano izquierdo del plano s es que todos los coeficientes de la ecuación (1) sean positivos y que todos los términos de la primera columna del arreglo tengan signo positivo.

Aplicación del criterio de estabilidad de Routh

Se procede a hacer el análisis del sistema para obtener los parámetros de estabilidad de Routh para obtener los valores de K_p .

Sea el polinomio

$$s^3 + as^2 + (b + k_p c)s + \frac{k_p c}{T_1} = 0 \quad (2)$$

El cual tiene la forma de la ecuación (1) y todos sus coeficientes tienen signo positivo por lo que se realiza el siguiente arreglo

$$\begin{array}{rcl} s^3 & 1 & (b + k_p c) \\ s^2 & a & \frac{k_p c}{T_1} \\ s^1 & 0 & (b + k_p c)(a) - (1) \left(\frac{k_p c}{T_1} \right) \\ s^0 & \frac{k_p c}{T_1} & 0 \end{array} \quad (3)$$

De lo cual concluimos que al incrementar k_p la respuesta es más rápida pero más oscilatoria.

- Si k_p es muy grande puede desestabilizar el sistema.
- Si T_1 es muy pequeño la respuesta es más rápida pero más oscilatoria.

Anexo D

Programa general en matlab

```
%Definicion de las variables y de la matriz de estado a controlar
%Valores obtenidos
close all
clear all
clc
%Definicion de terminos
r=.1; %radio de la llanta en metros
m=40; %masa del sistema dada en kilos
R=0.17;
Lm=0.06;
k1=0.0047;
k2=0.004;
ka1=0.00778;
ka2=0.00778;
kb1=0.00748;
kb2=0.00797;
Ce=43.11;
Cq=0.023;
Js=.5*(m)*(r*r);

% motor 1
a=((k1*Cq*Lm)+(Js*R))/(Js*Lm)
b=((R*k1*Cq)+(kb1*ka1*Ce))/(Js*Lm)
c=kb1/(Js*Lm)

% motor 2
a1=((k2*Cq*Lm)+(Js*R))/(Js*Lm)
b1=((R*k2*Cq)+(kb2*ka2*Ce))/(Js*Lm)
c1=kb2/(Js*Lm)

%Variables de estado motor 1
A=[-R/Lm (-ka1*Ce)/Lm; kb1/Js (-k1*Cq)/Js];
B=[1/Lm;0];
C=[0 1];
D=[0];

%Variables de estado motor 2
A1=[-R/Lm (-ka2*Ce)/Lm; kb2/Js (-k2*Cq)/Js];
B1=[1/Lm;0];
C1=[0 1];
D1=[0];

%respuesta del primer motor a escalon e impulso de M1
```

```

subplot(2,1,1),step(A,B,C,D)
title('RESPUESTA A ESCALON MOTOR 1')
grid
%respuesta del primer motor a escalon e impulso de M1
subplot(2,1,2),step(A1,B1,C1,D1)
title('RESPUESTA A ESCALON MOTOR 2')
grid

%%%%%%%%funcion de transferencia del motor 1%%%%%%%%
FUN=ss(A,B,C,D); %crea un espacio de estados
FUN1=tf(FUN); %crea una funcion de transferencia a partir de un esp.estados
figure %una figura
hold on
subplot(2,1,1),rlocus(FUN1)
title('ESTABILIDAD DE MOTOR 1')
xlabel('eje real')
ylabel ('eje imaginario')
grid
sys1=FUN1
dem=[1 a b];
dem1=[1 a1 b1];
%%%%%%%%funcion de transferencia del motor 2%%%%%%%%
FUN2=ss(A1,B1,C1,D1); %crea un espacio de estados
FUN22=tf(FUN2); %crea una funcion de transferencia a partir de un esp.estados
sys2=FUN22

%obtencion de los parametros del L y T

% metodo de ziegler nichols para el motor 1
tii=.01; %intervalo de tiempo para la derivacion de la funcion
t=0:tii:10;
y=step(sys1,t); %funcion a derivar
dy=diff(y)/tii; %derivacion
[m,q]=max(dy); %indices para obtener el punto de inflexion
yi=y(q); %punto de inflexion
ti=t(q);
L=ti-(yi/m) %parametro del metodo de ziegler nichols
x2=((y(end)-yi)/m)+ti;
T=x2-L %parametro del metodo de ziegler nichols

%metodo de ziegler nichols para el motor 2
clear yi ti dy m q
y=step(sys2,t); %funcion a derivar
dy=diff(y)/tii; %derivacion
[m,q]=max(dy); %indices para obtener el punto de inflexion
yi=y(q); %punto de inflexion
ti=t(q);

```

```
L1=ti-(yi/m) %parametro del metodo de ziegler nichols
x2=((y(end)-yi)/m)+ti;
T1=x2-L %parametro del metodo de ziegler nicho
```

```
%obtencion de k y Ti
```

```
kp=0.9*(T/L)
Ti=L/0.3
```

```
kp1=0.9*(T1/L1)
Ti1=L1/0.3
```

```
numc=[(c*kp) (kp*c)/Ti] %funcion de transferencia con controlador pi M1
denc=[1 a (b+(kp*c)) (kp*c)/Ti ]
sys3=tf(numc,denc)
```

```
numc2=[(c1*kp1) (kp1*c)/Ti1]
denc2=[1 a1 (b1+(kp1*c1)) (kp1*c1)/Ti1 ]
sys4=tf(numc2,denc2) %funcion de transferencia con controlador pi M2
```

```
figure
subplot(2,1,1),step(sys3)
grid
title('Respuesta al escalon del sistema compensado M1')
subplot(2,1,2),step(sys4)
grid
title('Respuesta al escalon del sistema compensado M2')
```

```
sysd=c2d(sys3,1)
sysd1=c2d(sys4,1)
%nuu=[(kp*Ti) kp];
%dee=[Ti 0 ];
%sys5=tf(nuu,dee);
%syst=conv(sys1,sys5)
```

Programa del picaxe

'PROGRAMA COMPLETO DE CONTROL DE LOS MOTORES DE LA SILLA

```
let dirsc = %00000000 'puerto c como entrada
let dirsb = %11111110 'puerto b como salida y entrada
```

```
w1= 2 'valores del controlador
symbol kp = w1 'contante de proporcionalida
w2= 10
symbol Ti = w2 'contante de timpo de integracion
w3=1
symbol T = w3 'tiempo de muestreo
w8=kp*T/Ti
symbol mul=w8
let w13=20 'valor del incremento del pwm
symbol x0=w13
```

```
comienzo: 'inicio del programa
w4=0
symbol x=w4
w5=0
symbol x1=w5
w6=0
symbol y1=w6
w7=0
symbol y=w7
w12=0
pwmout pwmdiv4, B.3,249,w12
```

```
let pinsb = %00000000 'todo el puerto B en cero
let pinsC = %00000000 'todo el pueto C en ceros
let b1 = 0
```

```
let b1 = pinsc and %00000010
if b1 = %00000010 then adelante 'rutina hacia adelante
```

```
let b1 = pinsc and %00000001
if b1 = %00000001 then atras 'rutina hacia atras
```

```
let b1 = pinsc and %10000000
if b1 = %10000000 then izq 'rutina hacia la izquierda
```

```
let b1 = pinsc and %01000000 'rutina hacia la derecha
if b1 = %01000000 then der
```

```
let b1 = pinsc & %10000010 'rutina adelante izquierda
if b1 = %10000010 then adeizq
```

```
let b1 = pinsc & %01000001
if b1 = %01000001 then adeder 'rutina adelante derecha
```

```
goto comienzo
```

```
adelante:
```

```
let pinsb =%10100000 'activamos los reles de direccion
```

```
ciclo:
```

```
COUNT B.0,100,b0 'obtenemos valor del sensor
```

```
let x=50-b0
```

```
let w11 = kp*x'
let w9 = mul*x1 '(((kp*T)/Ti)*x1
let w10 = kp*x1 '(kp*x1)
let y=w11+w9-w10+y1
```

```
gosub qwe
```

```
pwmout pwmdiv4, B.3, 249,w12
```

```
let y1=y
let x1=x
```

```
let b1 = pinsc and %00000010
if b1 = %00000010 then ciclo
```

```
goto comienzo
```

```
atras:
```

```
let pinsb =%01010000 'activamos los reles de direccion
```

```
ciclo1:
```

```
COUNT B.0,100,b0 'obtenemos valor del sensor
```

```
let x=40-b0
let w11 = kp*x'
let w9 = mul*x1 '(((kp*T)/Ti)*x1
let w10 = kp*x1 '(kp*x1)
let y=w11+w9-w10+y1
```

```
gosub qwe
pwmout pwmdiv4, B.3, 249,w12
```

```
let y1=y
let x1=x
```

```
let b1 = pinsc and %00000001
if b1 = %00000001 then ciclo1
```

```
goto comienzo
```

```
der:
let pinsb =%01010000 'activamos los reles de direccion
```

```
ciclo2:
```

```
COUNT B.0,100,b0 'obtenemos valor del sensor
```

```
let x=20-b0
```

```
let w11 = kp*x'
let w9 = mul*x1 '(((kp*T)/Ti)*x1
let w10 = kp*x1 '(kp*x1)
let y=w11+w9-w10+y1
```

```
gosub qwe
pwmout pwmdiv4, B.3, 249, w12
```

```
let y1=y
let x1=x
```

```
let b1 = pinsc and %01000000
if b1 = %01000000 then ciclo2
```

```
goto comienzo
```

```
izq:
```

```
let pinsb =%10100000 'activamos los reles de direccion
```

ciclo3:

COUNT B.0,100,b0 'obtenemos valor del sensor

let x=20-b0

let w11 = kp*x'

let w9 = mul*x1 '(((kp*T)/Ti)*x1

let w10 = kp*x1 '(kp*x1)

let y=w11+w9-w10+y1

gosub qwe

pwmout pwmdiv4, B.3, 249, w12

let y1=y

let x1=x

let b1 = pinsc and %10000000

if b1 = %10000000 then ciclo3

goto comienzo

qwe:

if y = 0 then val

if y>0 then incre

if y<0 then decre

incre:

let w12=w12+x0

return

decre:

let w12=w12-x0

return

val:

w12=w12

return

adeizq:

adeder: