



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA
E INDUSTRIAL**

**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL EN PROCESOS
DE AUTOMATIZACIÓN**

TEMA:

“Sistema de Control Automático para el Posicionamiento de una
Silla de Ruedas Eléctrica”

Trabajo de Graduación. Modalidad: TEMI. Trabajo Estructurado de Manera Independiente, presentado previo la obtención del título de Ingeniero Industrial en Procesos de Automatización.

Autor: José Luis Varela Aldás

Tutor: Ing. Víctor H. Andaluz

Sublínea de Investigación: Sistemas de control automatizados e instrumentación virtual para procesos industriales de baja y alta potencia.

Ambato – Ecuador

Abril-2014

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del trabajo de investigación sobre el tema: SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA EL POSICIONAMIENTO DE UNA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA, del Señor José Luis Varela Aldás, estudiante de la Carrera de Ingeniería Industrial y Procesos de Automatización, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, considero que el informe investigativo reúne los requisitos suficientes para que continúe con los trámites y consiguiente aprobación de conformidad con el Art. 16 del Capítulo II, del Reglamento de Graduación para obtener el título terminal de tercer nivel de la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, Abril del 2014

EL TUTOR

Ing. Víctor H. Andaluz

AUTORÍA

El presente trabajo de investigación titulado: SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA EL POSICIONAMIENTO DE UNA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA, es absolutamente original, auténtico y personal, en tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, Abril del 2014

José Luis Varela Aldás

CC: 2200117758

APROBACIÓN DE LA COMISIÓN CALIFICADORA

La Comisión Calificadora del presente trabajo conformada por los señores docentes: Ing. Franklin Mayorga, Mg., Ing. Edwin Morales, Mg. e Ing. Patricio Encalada, Mg. revisó y aprobó el Informe Final del trabajo de graduación titulado **SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA EL POSICIONAMIENTO DE UNA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA**, presentado por el Señor José Luis Varela Aldás de acuerdo al Art. 18 del Reglamento de Graduación para obtener el título Terminal de tercer nivel de la Universidad Técnica de Ambato.

.....
Ing. Franklin Mayorga, Mg.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

.....
Ing. Edwin Morales, Mg.

DOCENTE CALIFICADOR

.....
Ing. Patricio Encalada, Mg.

DOCENTE CALIFICADOR

DEDICATORIA:

A Dios.

A mi Mamita linda.

A mi ñañita y mi
ñañito.

A mi familia.

José Varela.

AGRADECIMIENTO:

Al Todopoderoso.

A mi Madre y mis
hermanos.

A mi familia,
profesores y amigos.

A mi novia hermosa.

José Varela.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CONTENIDO	PÁGINA
CARATULA.....	I
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	II
AUTORÍA.....	III
APROBACIÓN DE LA COMISIÓN CALIFICADORA	IV
DEDICATORIA:	V
AGRADECIMIENTO:	VI
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
RESUMEN EJECUTIVO	XIII
INTRODUCCIÓN	XIV
CAPITULO I.....	1
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1 TEMA DE INVESTIGACIÓN:.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2.1 Contextualización.....	1
1.2.2 Análisis Crítico	2
1.2.3 Prognosis	3
1.2.4 Formulación del Problema	3
1.2.5 Preguntas Directrices	3
1.2.6 Delimitación del Problema.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN	4
1.4 OBJETIVOS	5
1.4.1 Objetivo General	5
1.4.2 Objetivos Específicos.....	5
CAPITULO II	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	6
2.2 FUNDAMENTACIÓN LEGAL.....	7
2.3 CATEGORÍAS FUNDAMENTALES	8
2.3.1 Redes de Inclusiones Conceptuales	8
2.3.2 Constelación de Ideas.....	9

2.3.3 Automatización	11
2.3.4 Sistemas de Control	11
2.3.4.1 Requisitos de un Sistema de Control	12
2.3.4.2 Configuraciones de Sistemas de Control	12
2.3.4.3 Tipos de Sistemas de Control.....	14
2.3.5 Sistema de Control Automático	15
2.3.5.1 Sistema	15
2.3.5.2 Control Automático.....	16
2.3.5.3 Elementos básicos de un Sistema de Control Automático.....	16
2.3.5.4 Características de un Sistema de Control Automático.....	17
2.3.6 Robótica	18
2.3.7 Robótica Móvil	18
2.3.7.1 Tipos De Robots Móviles	20
2.3.7.2 Algoritmos de Control	23
2.3.8 Posicionamiento De Una Silla De Ruedas Eléctricas	24
2.3.8.1 Algoritmos para control de posición	24
2.3.8.2 Métodos de localización.....	25
2.4 HIPÓTESIS.....	26
2.5 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES DE LA HIPÓTESIS	26
CAPITULO III.....	27
METODOLOGÍA	27
3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	27
3.2 MODALIDAD DE LA INVESTIGACIÓN	27
3.2.1 Investigación Bibliográfica – Documental.....	27
3.2.2 Proyecto Factible.....	27
3.3 TIPOS DE INVESTIGACIÓN	27
3.4 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	28
3.5 TABULACIÓN DE RESULTADOS	30
3.6 INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS	30
CAPITULO IV.....	31
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS	31
4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
4.1.1 Análisis de la Recopilación Bibliográfica.....	31
4.1.2 Análisis de la Recopilación de Campo.....	39
CAPITULO V	43
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	43

5.1 CONCLUSIONES	43
5.2 RECOMENDACIONES	44
CAPITULO VI.....	45
PROPUESTA.....	45
6.1. DATOS INFORMATIVOS	45
6.2. ANTECEDENTES DE LA PROPUESTA	45
6.3. JUSTIFICACIÓN	46
6.4 OBJETIVOS.	46
6.4.1 Objetivo General	46
6.4.2 Objetivos Específicos.....	46
6.5 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD	47
6.5.1 Factibilidad Técnica	47
6.5.2. Factibilidad Económica.....	47
6.5.3. Factibilidad Operativa.....	47
6.5.4. Factibilidad Científica.....	47
6.6 FUNDAMENTACIÓN	48
6.6.1 Componentes electrónicos	48
6.6.1.1 Amplificador Operacional.....	48
6.6.1.2 El Disparador Schmitt.....	48
6.6.1.3 Microcontroladores	49
6.6.2 Comunicación Serial	49
6.6.3 Herramientas Informáticas	50
6.6.3.1 Proteus.....	50
6.6.3.2 Microcode Studio Plus	50
6.6.3.3 LabVIEW	51
6.6.3.4 Visual C++	51
6.6.3.5 Biblioteca de enlace dinámico (DLL)	52
6.6.4 Sistemas no Lineales	53
6.6.5 Modelación Matemática.....	54
6.6.5.1 Modelación de Robots Móviles	55
6.6.5.2 Identificación de Parámetros.....	55
6.6.6 Estabilidad de Lyapunov.....	57
6.6.6.1 Punto de equilibrio	57
6.6.6.2 Teoremas de Estabilidad	60
6.7 METODOLOGÍA	61
6.8 MODELO OPERATIVO	63

6.8.1 Circuito de control.....	63
6.8.2 Bibliotecas de Enlace Dinámico (DLL).....	69
6.8.3 Modelación Matemática de la Silla De Ruedas	71
6.8.3.1 Modelo cinemático.....	71
6.8.3.2 Modelo Dinámico.....	73
6.8.3.3 Identificación paramétrica.....	79
6.8.3.4 Identificación de la Silla de Ruedas Eléctrica.....	81
6.8.3.5 Validación de la Silla de Ruedas Eléctrica	81
6.8.4 Diseño del Controlador	82
6.8.4.1 Controlador Cinemático para el Posicionamiento sin Orientación Final	82
6.8.4.2 Compensación dinámica	84
6.8.4.3 Resultados de la Simulación	86
6.8.6.4 Resultados de la Experimentación	87
6.9 ADMINISTRACIÓN.....	88
6.9.1 Talentos Humanos.....	88
6.9.2 Costos de la elaboración del diseño del proyecto	88
6.9.3 Costos de materiales del sistema de control.....	88
6.9.3 Costo Total.....	89
6.10 CONCLUSIONES	90
6.11 RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	92
LINKOGRAFÍA	94
ANEXOS	95
Anexo A: Guía de Observación	96
Anexo B: Especificaciones del equipo P326A Vision Sport	99
Anexo C: Especificaciones del módulo de potencia MODSILLA	101
Anexo D: Especificaciones del PIC16F877A	105
Anexo E: Especificaciones del PIC18F628A	107
Anexo F: Programas en Microcode.....	109
Anexo G: Planos del Sistema Eléctrico	112
Anexo H: Programas DLL en Visual C++.....	115
Anexo I: Interfaz Visual en Labview	120
Anexo J: Fotos	122

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	PÁGINA
Tabla 3.1 Operacionalización de la variable independiente.....	28
Tabla 3.2 Operacionalización de la variable dependiente.....	29
Tabla 6.2 Costos del diseño.	79
Tabla 6.3 Costos de Materiales	80
Tabla 6.4 Costo Total.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
Figura 1.01 Árbol del problema	2
Figura 2.01 Categorías fundamentales	8
Figura 2.02 Constelación de ideas Variable independiente	9
Figura 2.03 Constelación de ideas variable dependiente	10
Figura 2.04 Diagrama de un sistema de control.....	11
Figura 2.05 Diagrama de bloques de un sistema en lazo abierto	12
Figura 2.06. Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado	13
Figura 2.07 Diagrama de bloques de un sistema manual.....	14
Figura 2.08 Diagrama de bloques de un sistema semiautomático	15
Figura 2.09 Diagrama de bloques de un sistema automático.....	15
Figura 2.11 Tipos de robots móviles según la locomoción.....	20
Figura 2.12 Robot móvil unicycle	22
Figura 2.13 Robot móvil triciclo	22
Figura 2.14 Robot móvil cuatriciclo	23
Figura 4.01 Diagrama de un control en cascada	31
Figura 4.02 Codificador incremental	32
Figura 4.03 Fuerza sobre un conductor por el que pasa una corriente.....	33
Figura 4.04 Elementos básicos de un motor cd.....	34
Figura 4.05 Motor cd con dos juegos de polos	34
Figura 4.06 Desplazamiento lineal de la silla de ruedas	36

Figura 4.07 Desplazamiento angular de la silla de ruedas	36
Figura 4.08 Joystick de la silla de rueda eléctrica P326A Vision Sport	36
Figura 4.09 Módulo de control por comunicación paralela de la silla móvil.	37
Figura 4.10 Selector de tres posiciones y botón de emergencia de la silla móvil. 38	
Figura 4.11 Sistema de referencia coordenadas X e Y	38
Figura 6.01 Acción del Disparador Schmitt.....	45
Figura 6.02 Diagrama de bloques de microcontrolador.....	45
Figura 6.03 Estructura general para la identificación de sistema.....	51
Figura 6.04 Equilibrio estable	53
Figura 6.05 Equilibrio inestable	54
Figura 6.06 Asintóticamente Estable	54
Figura 6.07 Diagrama de Bloques del Sistema de Control Propuesto	58
Figura 6.08 Simulación del circuito de control en Proteus 7	60
Figura 6.09 Encoder ubicado en el eje del motor.....	61
Figura 6.10 Función “call library function node” de LabVIEW	62
Figura 6.11 Parámetros del modelo cinemático de la silla de ruedas.	62
Figura 6.12 Parámetros del modelo dinámico de la silla de ruedas.	65
Figura 6.13 Graficas de identificación paramétrica de la silla móvil.	72
Figura 6.14 Graficas de validación de parámetros dinámicos de la silla móvil....	73
Figura 6.15 Posición y orientación de la silla móvil respecto al destino	74
Figura 6.16 Esquema de control en cascada	76
Figura 6.17 Graficas de errores de la simulación del control de la silla móvil....	78
Figura 6.18 Graficas de errores del control de posición de la silla móvil.....	79
Figura a. Módulo de potencia MODSILLA	93
Figura b. Borneras para la alimentación y los actuadores.....	94
Figura c. Diagrama del Interconector.....	94
Figura d. Circuito electrónico del Interconector	95
Figura e. Imágenes de la interfaz visual del sistema de control.....	112
Figura f. Fotos del sistema de control	113

RESUMEN EJECUTIVO

En el presente proyecto se realiza el control automático para el posicionamiento de una silla de ruedas eléctrica.

El contenido de la investigación esta detallada en 6 capítulos descritos a continuación:

En el Capítulo I, se puntualiza todo lo referente a la problemática que presenta el posicionamiento de una silla de ruedas, y se indican los objetivos de la investigación.

En el Capítulo II, se investiga la información necesaria con la cual se pudo adquirir conocimientos fundamentales del control automáticos y del posicionamiento de la silla móvil.

En el capítulo III, se especifica la metodología que se utilizó para la recopilación de información, con el fin de desarrollar el proyecto.

En el Capítulo IV, se interpreta y analiza la información obtenida de la silla de ruedas eléctrica, en base a las observaciones realizadas.

En el Capítulo V, se detallan las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el proceso de observación y análisis.

En el Capítulo VI, se diseña y desarrolla la propuesta del sistema de control automático que permita posicionar la silla móvil; además se implementa el proyecto tomando en cuenta los requerimientos del mismo, además, se presenta las conclusiones y recomendaciones de esta propuesta.

Por último la Bibliografía, Linkografía y los Anexos, los cuales contienen direcciones electrónicas y documentación importante que se utilizó para el desarrollo del proyecto.

INTRODUCCIÓN

La inserción de la robótica en el área de servicios que existe en la actualidad, hace que un sistema de control automático para posicionar una silla de ruedas sea de gran importancia, debido a que se propone una mejora a la movilidad de los usuarios de este tipo de equipo de rehabilitación.

El principal beneficio del presente proyecto se refiere a mejorar la eficiencia con la que se desplaza una silla de ruedas eléctrica en un entorno totalmente estructurado.

El poder controlar el desplazamiento de una silla móvil de manera automática da la oportunidad al usuario de movilizarse con ningún esfuerzo mediante un destino previamente programado.

Es así como este proyecto pretende dar solución a varios problemas de movilidad de quienes usan sillas de ruedas, tales como personas con capacidades diferentes y de la tercera edad, por medio de usar la tecnología actual y al diseño de algoritmos de control, que tienen como objetivo optimizar la movilidad y sobre todo permitir al usuario un mejor desarrollo social.

CAPITULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 TEMA DE INVESTIGACIÓN:

SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA EL POSICIONAMIENTO DE UNA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 Contextualización

Desde la década de 1990 se ha podido constatar un considerable incremento de actividades y resultados en lo que se ha dado en llamar las Tecnologías de la Rehabilitación. Así, las técnicas circunscritas a la automatización han sido por fin aplicadas al incremento de la calidad de vida de colectivos tales como los discapacitados motrices o cognitivos [1], [2], [3], [4] tan importantes como descuidados por los avances tecnológicos hasta hoy en día.

Distintas sociedades, como la RESNA (Rehabilitation Engineering and assistive technology Society of North America), y la AAATE (Association for the Advancement of Assistive Technology in Europe), fomentan las actividades orientadas a las transferencia de experiencias y tecnologías procedentes de campos diversos, a la mejora de la calidad de vida de aquellas personas que sufren carencias de movilidad, bien sean estas permanentes o solo temporales a causa de enfermedades y accidentes diversos [5], [6].

En los últimos años las personas con capacidades diferentes del Ecuador han adquirido sillas de ruedas convencionales, que operan con la total intervención del ser humano, esto con el objetivo de poder desplazarse y realizar ciertas actividades comunes para la sociedad. Pero para muchos de estos usuarios, este

equipo de movilidad no es suficiente para satisfacer sus requerimientos, debido a que su incapacidad limita aún más sus destrezas, por lo que prefieren usar sillas de ruedas eléctricas. Y aun con los servicios que brinda una silla de ruedas eléctrica, no es suficiente para atender a personas con discapacidades motoras severas, quienes han perdido la capacidad de moverse por sí mismos, pero posee intacta sus habilidades cognitivas.

Árbol Del Problema

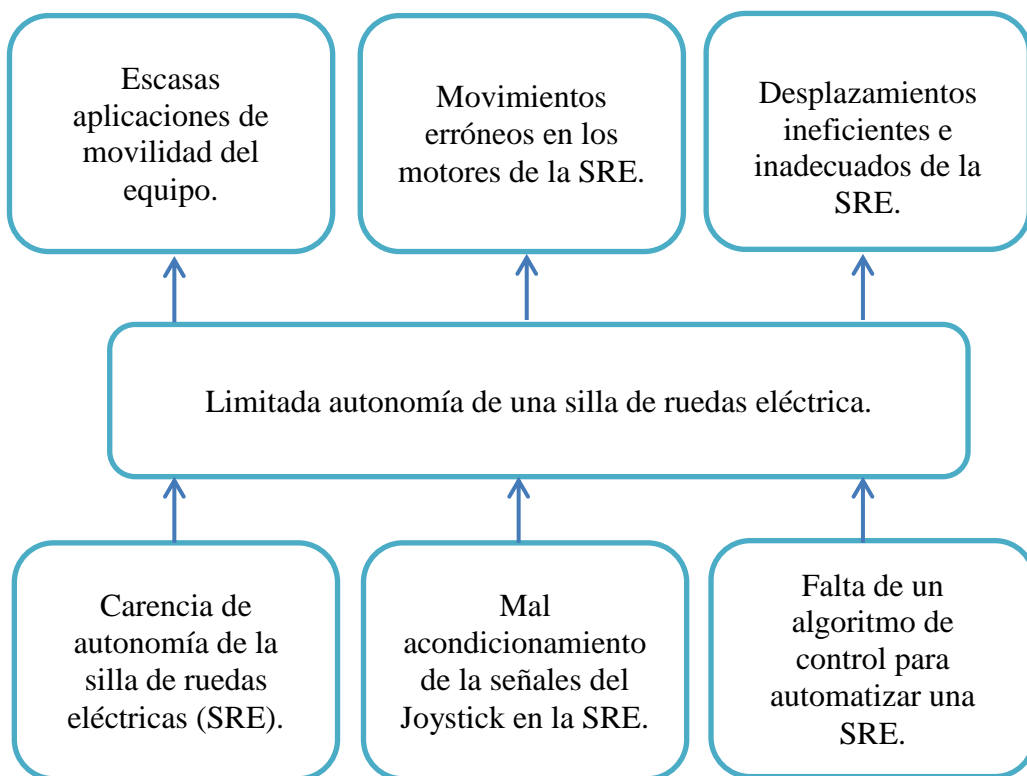


Figura 1.01 Árbol del problema

Fuente: El Investigador

1.2.2 Análisis Crítico

La limitada autonomía de las sillas de ruedas eléctricas afectan directamente en la baja movilidad de las personas con capacidades diferentes debido que para muchos de ellos es su única forma de desplazarse, los usuarios con el tiempo se sienten inconformes y terminan bajando su autoestima, lo que afecta su salud física y mental.

Los sistemas de control instalados en las sillas de ruedas eléctricas carecen de autonomía, las acciones del control de mando son inestables y la falta de un control electrónico adecuado, todo esto produce como consecuencia un equipo con limitados servicios, movimientos de traslación fallidos y resultados de movilidad ineficientes.

1.2.3 Prognosis

Al no desarrollarse proyectos tecnológicos que mejoren la calidad de vida de las personas con capacidades diferentes, se les quitara la oportunidad de introducirse en un ambiente social más saludable, y aun peor, su autoestima disminuirá cada vez más, dando lugar a la creación de discapacitados totalmente improductivos para colectividad, que con el tiempo llegarían a ser una carga para la sociedad.

1.2.4 Formulación del Problema

¿Cómo influye un sistema de control automático en el posicionamiento de una silla de ruedas eléctrica?

1.2.5 Preguntas Directrices

- ¿Qué son los sistemas de control automáticos?
- ¿Cómo se realiza el posicionamiento de una silla de ruedas eléctrica?
- ¿Cómo se realizaría el posicionamiento de una silla de ruedas eléctrica mediante un sistema control automático?

1.2.6 Delimitación del Problema

Límite de Contenido

- Área Académica: Electrónica
- Línea de investigación: Automatización
- Sublínea de Investigación: Sistemas de control automatizados e instrumentación virtual para procesos industriales de baja y alta potencia.

Límite Espacial

Unidad Operativa del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato. UOCENI-FISEI-UTA

Límite Temporal

La presente investigación se realiza en un lapso de 6 meses a partir de la aprobación del Honorable Consejo Académico de la Facultad de ingeniería en Sistema, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Hoy en día es notable el aumento de la calidad de vida de personas que tienen sus miembros inferiores paralizados o incluso amputados [7], cuando disponen de sillas de ruedas para moverse. Las sillas de ruedas eléctricas comandadas a través de joystick son soluciones excelentes en el caso de personas con discapacidad motora más grave. Sin embargo, la discapacidad motora de una persona puede ser todavía más grande, lo que hace inútil dichos aparatos. Afortunadamente, el diseño de controladores de robots móviles ha permitido el desarrollo de sillas de ruedas controladas por el propio usuario o a través de tareas previamente generadas.

Las sillas de ruedas autónomas representan una importante área de la robótica móvil aplicada en tareas de asistencia y de servicios, ya que poseen un diseño muy similar a los robots móviles autónomos. La robótica aplicada a la asistencia ha evolucionado en las últimas décadas en las diferentes áreas de rehabilitación debido a que se generan cambios sociales que exigen dispositivos que satisfagan sus necesidades. En el caso puntual de las personas con discapacidades motoras severas tales como personas cuadripléjicas, requieren dispositivos específicos y complejos que satisfagan sus necesidades. Las sillas de ruedas robóticas satisfacen las necesidades de este sector de la sociedad por sus características de navegación autónoma, brindando que estas personas mejoren su calidad de vida.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Analizar los sistemas de control automático y su influencia en el posicionamiento de una silla de ruedas eléctrica.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Investigar los sistemas de control automático para conocer su diseño a través de la investigación bibliográfica.
- Identificar las características del posicionamiento de una silla de ruedas eléctrica para establecer las limitaciones técnicas del equipo a través de la observación.
- Plantear una propuesta que permita diseñar e implementar un sistema de control automático para el posicionamiento de una silla de ruedas eléctrica.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Del análisis internacional se conoce una tesis doctoral de la Universidad de Alcalá en España con el tema “Sistema de Posicionamiento y Autocalización para Sillas de Ruedas Autónomas” [8], en la que se desarrolla una interfaz hombre-máquina orientada a permitir la conducción directa en caso de discapacidades motrices menos severas. Además, el autor realiza sus principales aportaciones con la propuesta y diseño de un sistema de navegación global, aplicable a entornos ligados a la actividad diaria de las personas con discapacidad motriz, tales como el hogar, el trabajo y otros lugares similares, todo ello con un coste mínimo de infraestructura.

En el Ecuador se puede resaltar la investigación realizada en la Escuela Superior Politécnica Nacional con el tema “Modelación, Identificación, y Control de Robots Móviles” [9], de la que se destaca la facilidad de haber utilizado un diseño en cascada que permitió tener un control independiente tanto en la parte cinemática como en la parte dinámica, debido a que si el diseño del controlador dinámico se cambió por otro, el controlador cinemático no se vería afectado por dicho cambio.

En la biblioteca de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato existe una investigación similar con el tema “Implementación de un Sistema de Control en la Máquina Posicionadora de Cajas Econopack para Optimizar la Línea de Producción en la Empresa Provefrut S.A.” [10], en la que se concluye el haber determinado tipo de sistema más adecuado para ser implementado en la máquina econopack, reduciendo las probabilidades de fallo y obteniendo la reducción de inversión de mano de obra en tareas no especializadas,

resultados buscados como el aumento del número de productos y mejorar la calidad de productos.

2.2 FUNDAMENTACIÓN LEGAL

Para respaldar este proyecto, de los Derechos de las personas con capacidades diferentes que se encuentran estipulados en la “Ley orgánica de discapacidades” [11] publicada el martes 25 de Septiembre de 2012, se puntualizan los siguientes:

Artículo 4.- Principios fundamentales.- La presente normativa se sujeta y fundamenta en los siguientes principios:

Interculturalidad: se reconoce las ciencias, tecnologías, saberes ancestrales, medicinas y prácticas de las comunidades, comunas, pueblos y nacionalidades para el ejercicio de los derechos de las personas con discapacidad de ser el caso;

Accesibilidad: se garantiza el acceso de las personas con discapacidad al entorno físico, al transporte, la información y las comunicaciones, incluidos los sistemas y las tecnologías de información y las comunicaciones, y a otros servicios e instalaciones abiertos al público o de uso público, tanto en zonas urbanas como rurales; así como, la eliminación de obstáculos que dificulten el goce y ejercicio de los derechos de las personas con discapacidad, y se facilitará las condiciones necesarias para procurar el mayor grado de autonomía en sus vidas cotidianas;

Artículo 40.- Difusión en el ámbito de educación superior.- La Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación, asegurará que en todas las instituciones de educación superior se transversalice el conocimiento del tema de la discapacidad dentro de las mallas curriculares de las diversas carreras y programas académicos, dirigidos a la inclusión de las personas con discapacidad y a la formación humana de las y los futuros profesionales.

2.3 CATEGORÍAS FUNDAMENTALES

2.3.1 Redes de Inclusiones Conceptuales

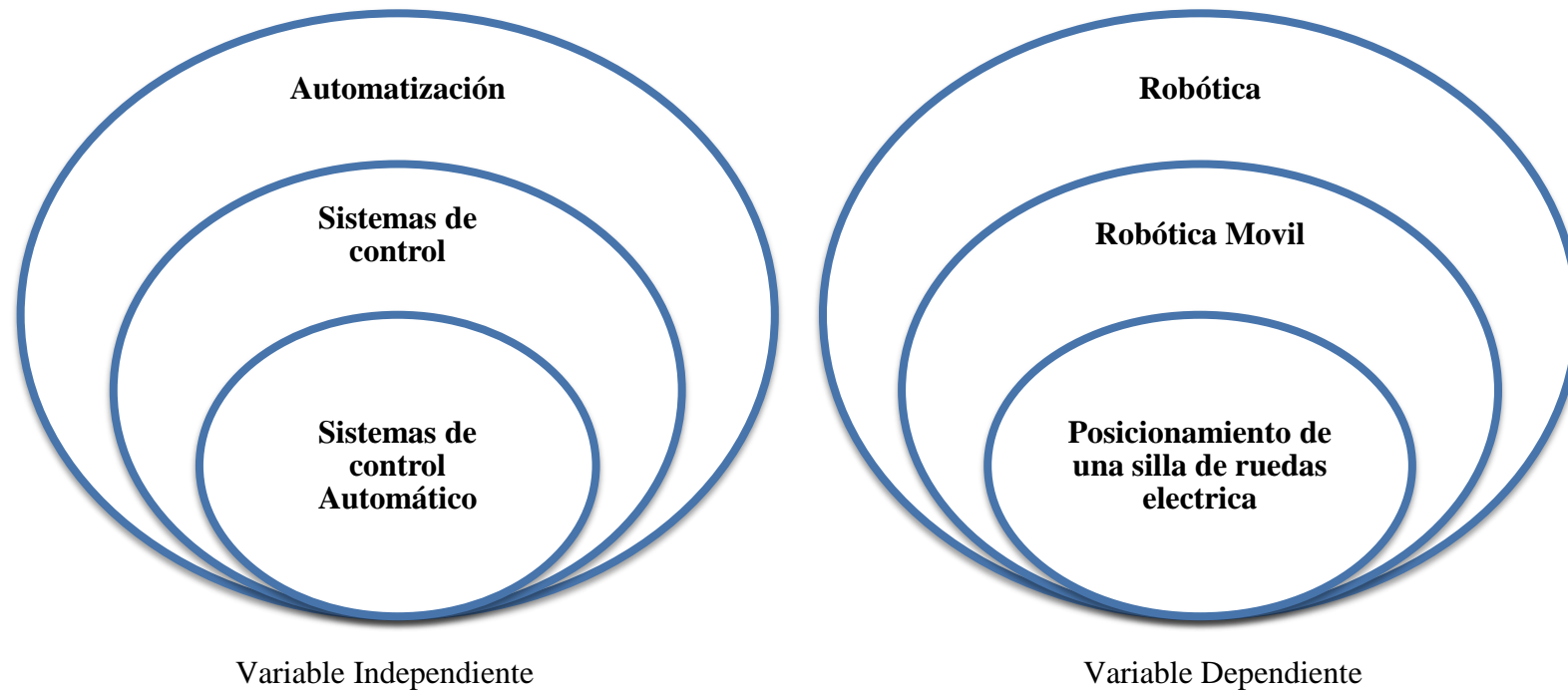


Figura 2.01 Categorías fundamentales

Fuente: El Investigador

2.3.2 Constelación de Ideas

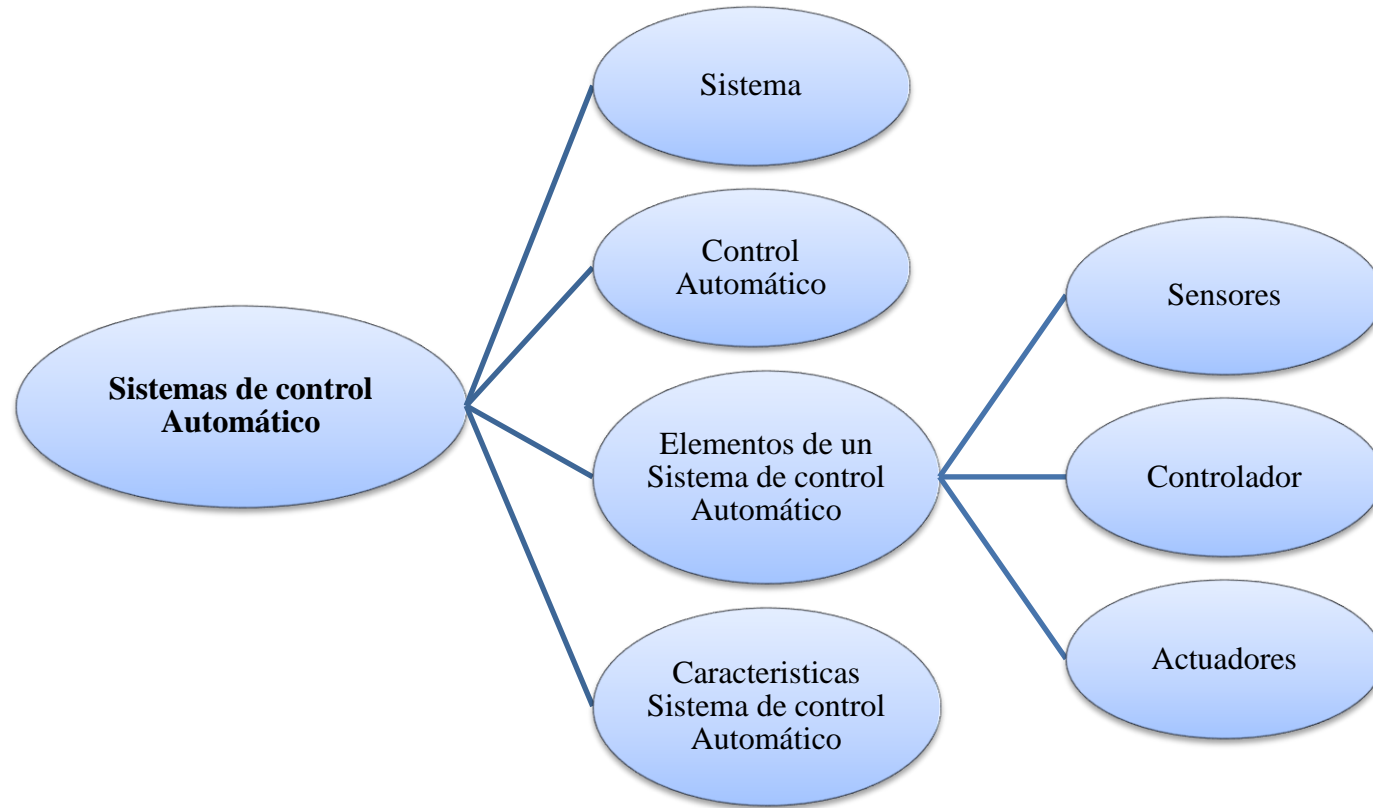


Figura 2.02: Constelación de ideas Variable independiente

Fuente: El Investigador

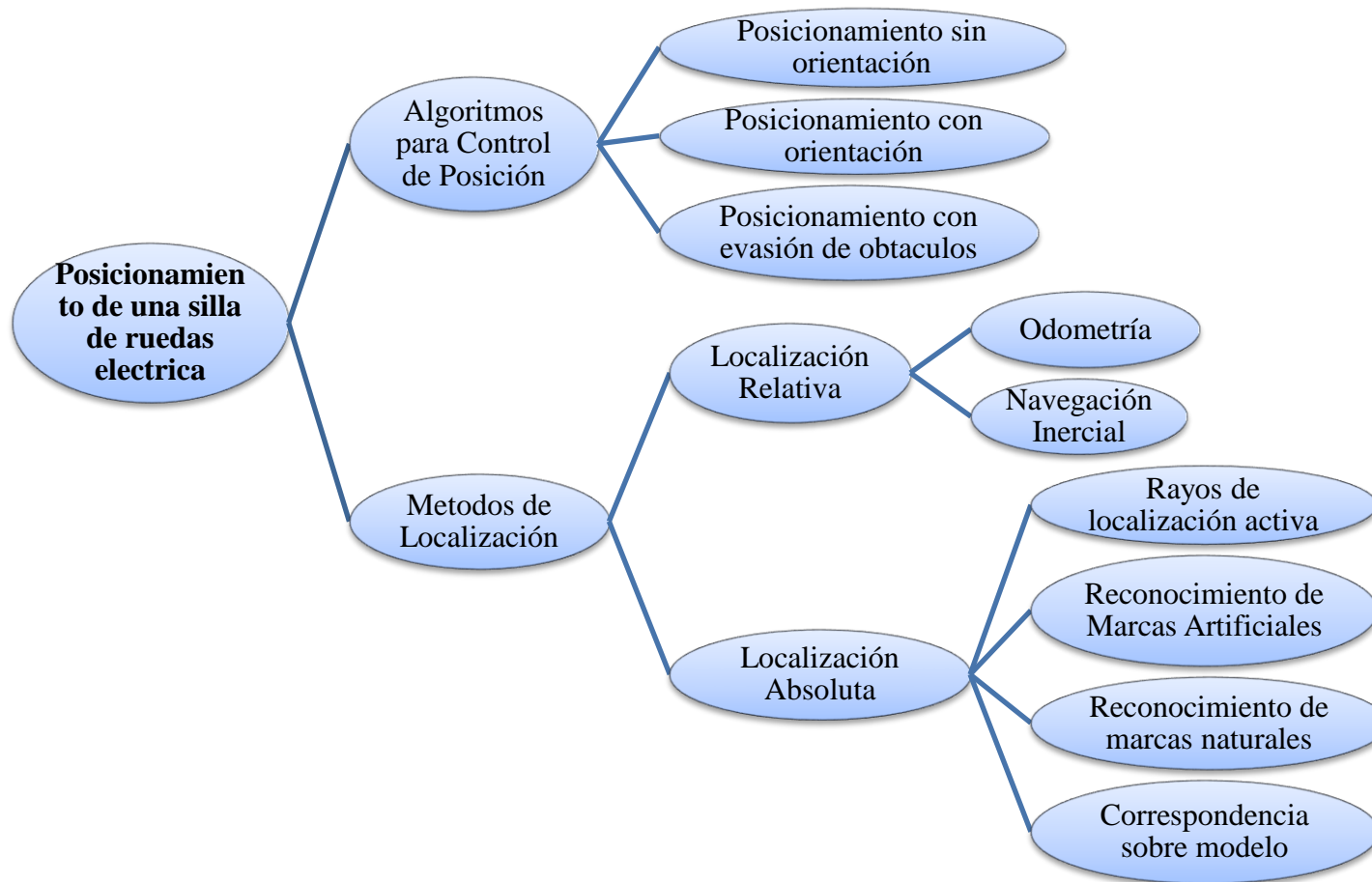


Figura 2.03: Constelación de ideas variable dependiente

Fuente: El Investigador

2.3.3 Automatización

El término automatización también se ha utilizado para describir sistemas no destinados a la fabricación en los que dispositivos programados o automáticos pueden funcionar de forma independiente o semiindependiente del control humano.

En comunicaciones y aviación dispositivos como los equipos automáticos de conmutación telefónica, los pilotos automáticos y los sistemas automatizados de guía y control se utilizan para efectuar diversas tareas con más rapidez o mejor delo que podría hacerlo un ser humano en el mismo tiempo.

2.3.4 Sistemas de Control

Desde el punto de vista de la teoría de control, un sistema o proceso está formado por un conjunto de elementos relacionados entre sí que ofrecen señales de salida en función de señales o datos de entrada. Es importante resaltar el hecho de que no es necesario conocer el funcionamiento interno, o cómo actúan entre sí los diversos elementos, para caracterizar el sistema. Para ello, sólo se precisa conocer la relación que existe entre la entrada y la salida del proceso que realiza el mismo [12]. El aspecto más importante de un sistema es el conocimiento de su dinámica, es decir, cómo se comporta la señal de salida frente a una variación de la señal de entrada (Figura 2.04).

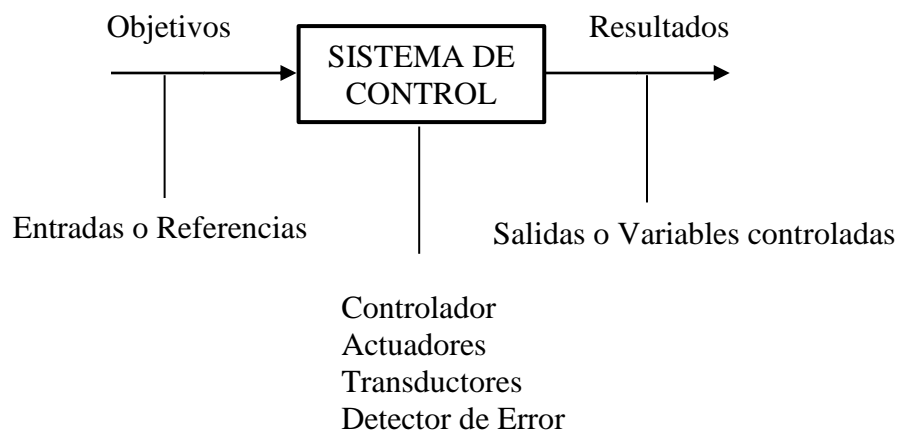


Figura 2.04 Diagrama de un sistema de control

Fuente: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3330/5/34059-5.pdf>

Un conocimiento preciso de la relación entrada/salida permite predecir la respuesta del sistema y seleccionar la acción de control adecuada para mejorarla. En vista de todo lo expuesto, se puede definir un sistema de control como el conjunto de elementos que interactúan para conseguir que la salida de un proceso se comporte tal y como se desea, mediante una acción de control [13].

2.3.4.1 Requisitos de un Sistema de Control

Un sistema de control ideal debe ser capaz de conseguir su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos:

- Garantizar la estabilidad y, particularmente, ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos.
- Ser tan eficiente como sea posible, según un criterio establecido.
- Ser fácil de implementar y cómodo de operar en tiempo real

2.3.4.2 Configuraciones de Sistemas de Control

Lazo Abierto

En este tipo de sistemas, la salida no tiene ningún efecto sobre la acción de control, en la figura 2.05 se puede observar el diagrama de bloques que conforma un sistema de control de lazo abierto.



Figura 2.05. Diagrama de bloques de un sistema en lazo abierto

Fuente: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3330/5/34059-5.pdf>

En un sistema en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia, por ello cada entrada corresponderá a una operación prefijada sobre la señal de salida. Se puede asegurar entonces que la exactitud del sistema depende en gran manera de la calibración del mismo y, por tanto, la presencia de perturbaciones en la cadena (señales indeseadas) provocará que éste no cumpla la

función asignada. Para poder considerar una topología en lazo abierto, es necesario conocer la relación entrada/salida y garantizar la inexistencia de perturbaciones externas o de variaciones de los parámetros internos del sistema. Esto es, en general difícil de cumplir en la práctica, y su realización implica sistemas excesivamente costosos.

Lazo Cerrado

En los sistemas de control en lazo cerrado, la señal de salida tiene efecto sobre la acción de control. A este efecto se le denomina realimentación, en la figura 2.06 se puede observar los componentes que conforman un sistema de control de lazo cerrado.

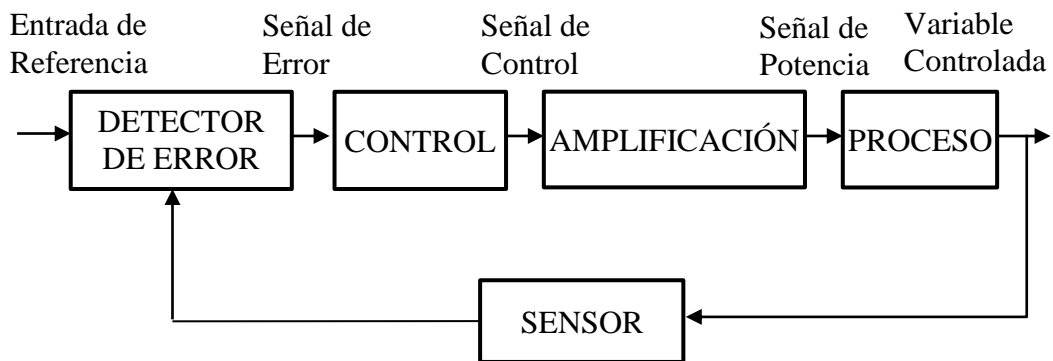


Figura 2.06. Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado

Fuente: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3330/5/34059-5.pdf>

La señal controlada debe realimentarse y compararse con la entrada de referencia, tras lo cual se envía a través del sistema una señal de control, que será proporcional a la diferencia encontrada entre la señal de entrada y la señal medida a la salida, con el objetivo de corregir el error o desviación que pudiera existir. La principal ventaja de los sistemas de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación hace al conjunto menos sensible a las perturbaciones externas y a las variaciones de los parámetros internos que los sistemas en lazo abierto.

Desde el punto de vista de la estabilidad, el sistema de control en lazo abierto es más fácil de desarrollar, porque la estabilidad del sistema no es un problema importante. Por otra parte, la estabilidad es una función principal en el sistema de

control en lazo cerrado, lo cual puede conducir a corregir en exceso errores que producen oscilaciones de amplitud constante o cambiante.

2.3.4.3 Tipos de Sistemas de Control

Sistema Manual

En el sistema manual (Figura 2.07) el hombre actúa como fuente de energía o motor, observando y controlando su tarea [14]. Esto se observa por ejemplo en el artesano, carpintero o herrero.

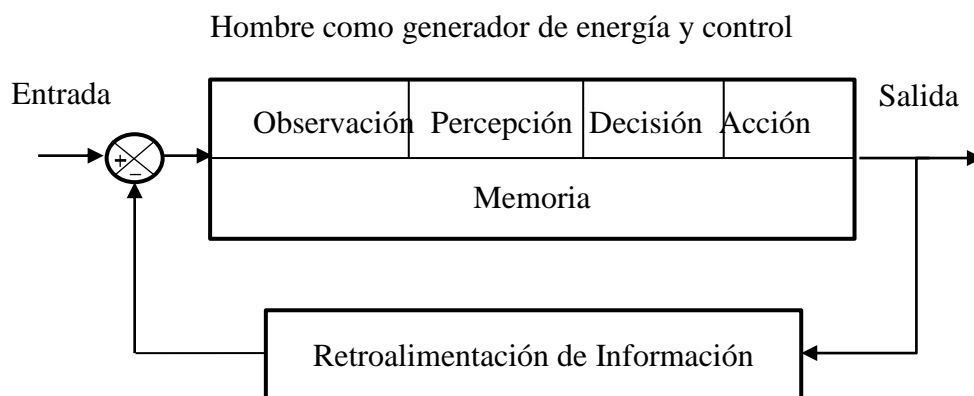


Figura 2.07 Diagrama de bloques de un sistema manual

Fuente: http://www.profesorblanco.com.ar/apuntesteco/tipos_de_sistemas_manual_semi_y_automatgico.doc

Sistema Semiautomático

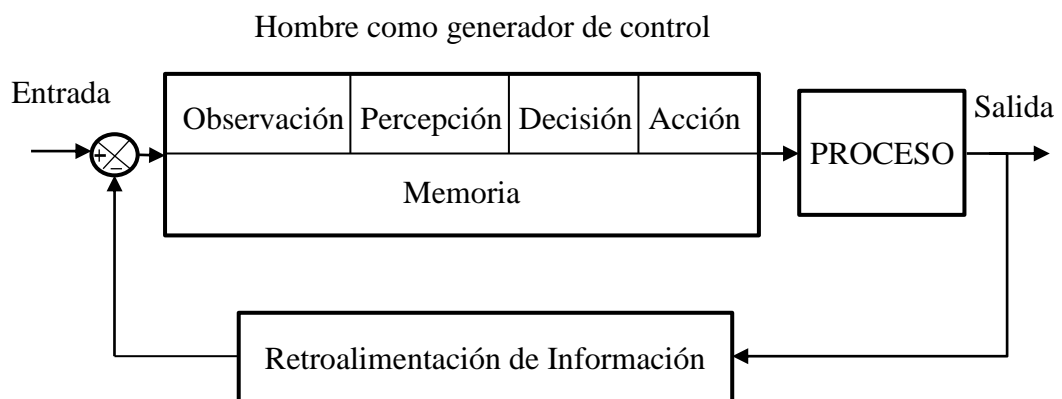


Figura 2.08 Diagrama de bloques de un sistema semiautomático

Fuente: http://www.profesorblanco.com.ar/apuntesteco/tipos_de_sistemas_manual_semi_y_automatgico.doc

En el sistema semiautomático (Figura 2.08), también llamado mecánico, la acción motora es llevada a cabo por componentes mecánicos mientras que el hombre observa y controla su tarea, como por ejemplo al conducir un automóvil. En relación al trabajo se aplica allí donde se exige mucha energía o donde las condiciones de entorno son severas.

Sistema Automático

En el sistema automático solamente la observación de instrumentos y monitores es efectuada por el hombre, en tanto que la forma de controlar es llevada a cabo por el sistema como se indica en la Figura 2.09. Esto se puede ver por ejemplo en las actividades de las salas de control de energía.

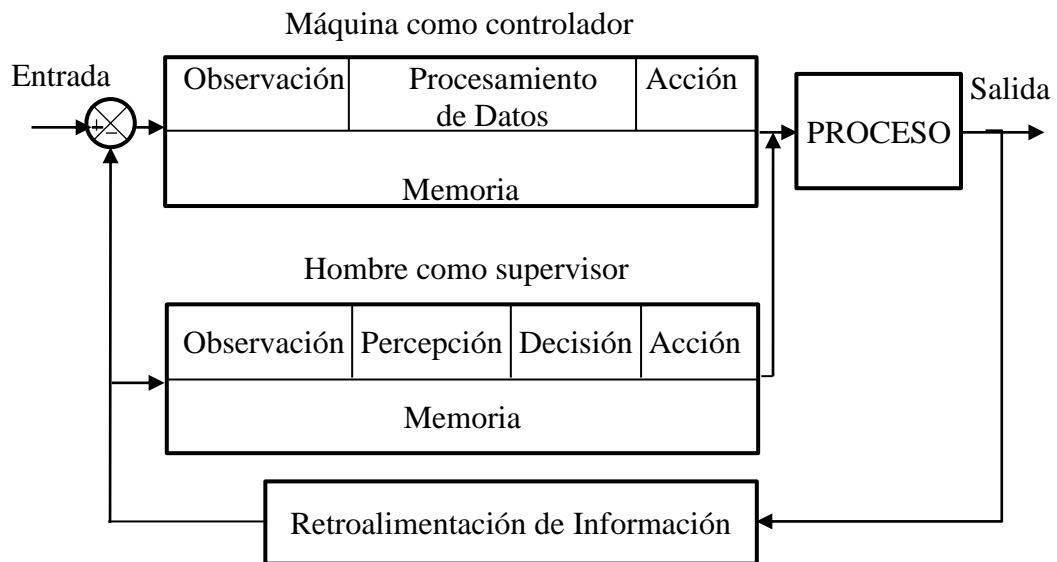


Figura 2.09 Diagrama de bloques de un sistema automático

Fuente: http://www.profesorblanco.com.ar/apuntesteco/tipos_de_sistemas_manual_semi_y_automatgico.doc

2.3.5 Sistema de Control Automático

2.3.5.1 Sistema

Se entiende como una unidad formada por una serie de elementos que tienen algún tipo de interrelación entre sí, y que pueden ser considerados como un conjunto respecto a algunas propiedades o características.

- Un “sistema” es un ordenamiento, conjunto o colección de cosas conectadas o relacionadas de manera que constituyan un todo.
- Un “sistema” es un ordenamiento de componentes físicos conectados o relacionados de manera que formen una unidad completa que puedan actuar como tal.

2.3.5.2 Control Automático

El control automático es el mantenimiento de un valor deseado dentro de una cantidad o condición, midiendo el valor existente, comparándolo con el valor deseado, y utilizando la diferencia para proceder a reducirla. En consecuencia, el control automático con o sin lazo cerrado de acción y reacción funciona sin intervención humana. El elemento más importante de cualquier sistema de control automático es lazo de control realimentado básico.

El concepto de la realimentación no es nuevo, el primer lazo de realimentación fue usado en 1774 por James Watt para el control de la velocidad de cualquier máquina de vapor.

En la actualidad los lazos de control son un elemento esencial para la manufactura económica y próspera de virtualmente cualquier producto, desde el acero hasta los productos alimenticios. A pesar de todo, este lazo de control que es tan importante para la industria está basado en algunos principios fácilmente entendibles y fáciles. Este artículo trata éste lazo de control, sus elementos básicos, y los principios básicos de su aplicación.

2.3.5.3 Elementos Básicos de un Sistema de Control Automático

Los elementos básicos que forman parte de un Sistema de Control y permiten su manipulación son: sensores, controlador y actuador.

Sensores

Permiten conocer los valores de las variables medidas del sistema. Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables

de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas. Una magnitud eléctrica puede ser una resistencia eléctrica, una capacitancia de voltaje, un valor de voltaje, una corriente eléctrica, etc.

Controlador

Utilizando los valores predeterminados por los sensores y resultados impuestos, calcula la acción que debe aplicarse para modificar las variables de control en base a cierta estrategia. El controlador se encarga de cumplir los objetivos propuestos para el sistema, que generalmente implica disminuir los errores de control a cero. El diseño de un controlador esta relacionado con los requerimientos y el tipo de sistema a controlar.

Actuador

Es el dispositivo que ejecuta la acción calculada por el controlador y que modifica las variables de control.

Un actuador es un dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado. Este recibe la orden de un regulador o controlador y en función a ella genera la orden para activar un elemento final de control.

2.3.5.4 Características de un Sistema de Control Automático

1. Señal de Entrada: Considerada como estímulo aplicado a un sistema desde una fuente de energía externa con el propósito de que el sistema produzca una respuesta específica.
2. Señal de Salida: Respuesta obtenida por el sistema que puede o no relacionarse con la respuesta que implicaba la entrada.
3. Variable Manipulada: Es el elemento al cual se le modifica su magnitud, para lograr la respuesta deseada.

4. Variable Controlada: Es el elemento que se desea controlar. Se puede decir que es la salida del controlador.

5. Conversión de señales: Mediante receptores se generan las variaciones o cambios que se producen en la variable.

6. Variaciones Externas: Son los factores que influyen en la acción de producir un cambio de orden correctivo.

7. Fuente de Energía: Es la que entrega la energía necesaria para generar cualquier tipo de actividad dentro del sistema.

8. Retroalimentación: La retroalimentación es una característica importante de los sistemas de control de lazo cerrado. Es una relación secuencial de causas y efectos entre las variables del sistema. Dependiendo de la acción correctiva que tome el sistema, este puede apoyar o no una decisión, cuando en el sistema se produce un retorno se dice que hay una retroalimentación negativa; si el sistema apoya la decisión inicial se dice que hay una retroalimentación positiva.

2.3.6 Robótica

La robótica puede definirse como: el conjunto de conocimientos teóricos y prácticos que permiten concebir, realizar y automatizar sistemas basados en estructuras metálicas poliarticuladas, dotados de un determinado grado de "inteligencia" y destinados a la producción industrial o a la sustitución del hombre en diversas tareas [15]. Un sistema robótico puede describirse, como "aquel que es capaz de recibir información, de comprender su entorno a través del empleo de modelos, de formular y de ejecutar planes, y de controlar o supervisar su operación".

2.3.7 Robótica Móvil

Los robots móviles (ver Figura 2.10) y los vehículos auto-guiados son dispositivos de desplazamiento autónomo, es decir, una plataforma mecánica dotada de un sistema de locomoción capaz de navegar a través de un determinado ambiente de trabajo, dotado de cierto nivel de autonomía para su desplazamiento portando

cargas o cumpliendo con una misión [16]. Al inicio varias investigaciones sobre el control de movimiento han sido basadas en modelos cinemáticos de robots móviles. Se ha demostrado que los controles basados en modelo cinemáticos de los robots móviles son sólo válidos para bajas velocidades y baja carga en los robots. Luego, tomando en cuenta aplicaciones de alta velocidad y de alta carga en los robots, se han desarrollado investigaciones sobre control de movimiento basado en el modelo dinámico de los robots móviles.



Figura 2.10 Pioneer 3AT

Fuente: “Modelación, Identificación y Control de Robots Móviles”, Andaluz G., pagina 75.

Los robots móviles operando en ambientes no estructurados deben enfrentarse con significativas incertidumbres en la posición e identificación de objetos y del mismo robot en el ambiente. En efecto, la incertidumbre es tal que, trasladarse desde un punto A hasta un punto B es una actividad arriesgada para un robot móvil, en cambio es una actividad relativamente trivial para un manipulador industrial. En compensación por tener que enfrentarse con más incertidumbres del entorno, no se espera que un robot móvil siga trayectorias o alcance su destino final con el mismo nivel de precisión que se espera de un manipulador industrial (que es del orden de las centésimas de milímetro).

Los robots móviles se caracterizan por su capacidad para moverse por el entorno que les rodea. El medio por el que se realiza dicho desplazamiento establece el modelo de clasificación más sencillo. Podemos hablar entonces de robots aéreos,

acuáticos, terrestres, etc. Por supuesto, un robot móvil puede estar diseñado para moverse por varios medios.

2.3.7.1 Tipos de Robots Móviles

Los robots móviles se pueden clasificar por tipo de locomoción de acuerdo al entorno al que se desarrollan el más utilizado es el terrestre [17], en general, los tres medios de movimiento son:



a) Por ruedas

b) Por patas

c) Por orugas

Figura 2.11 Tipos de robots móviles según la locomoción

Fuente: “Modelación, Identificación y Control de Robots Móviles”, Andaluz G., pagina 12.

Cabe señalar que aunque la locomoción por patas y orugas han sido ampliamente estudiadas, el mayor desarrollo se presenta en los robots móviles con ruedas (RMR). Dentro de los atributos más relevantes de los RMR, destacan su eficiencia en cuanto a energía en superficies lisas y firmes, a la vez que no causan desgaste en la superficie donde se mueven, son más robustos, son fáciles de controlar, admiten mayores cargas y son más rápidos que los robots de patas y de orugas, lo que permite que su construcción sea más sencilla.

Robots Móviles con Ruedas

La mayoría de los robots móviles distribuyen sus sistemas de tracción y dirección sobre los ejes de sus ruedas de acuerdo a las exigencias de velocidad, maniobrabilidad y características del terreno [18]. La precisión y rapidez con que el robot móvil debe alcanzar su destino, implica tener un sistema de tracción

confiable y un sistema de dirección que dé maniobrabilidad al robot. Esta confiabilidad y maniobrabilidad que debe tener el robot móvil, determinan las características del sistema de tracción y dirección, no sólo en lo que respecta a la técnica, sino también al número de ruedas necesarias y al tipo y disposición de éstas para, de esta manera, lograr una estructura estable.

Según la disposición de las ruedas sobre la estructura metálica se tiene la siguiente clasificación:

-Uniciclo

En general, es el elegido por los investigadores a la hora de probar nuevas estrategias de control por tener una cinemática sencilla. Es una estructura que consta de dos ruedas fijas convencionales sobre el mismo eje, controladas de manera independiente y una rueda loca que le confiere estabilidad, ver Figura 2.12.

El sistema de tracción-dirección asociado al robot le permite independizar las consignas de velocidad lineal y angular respectivamente. Las ventajas que se derivan de la estructura mecánica y de la electrónica de control hacen de esta configuración la preferida para robots de laboratorio.

Dentro de este tipo de robot móvil figuran las sillas de ruedas automatizadas que por lo general se refieren a vehículos de tipo uniciclo.

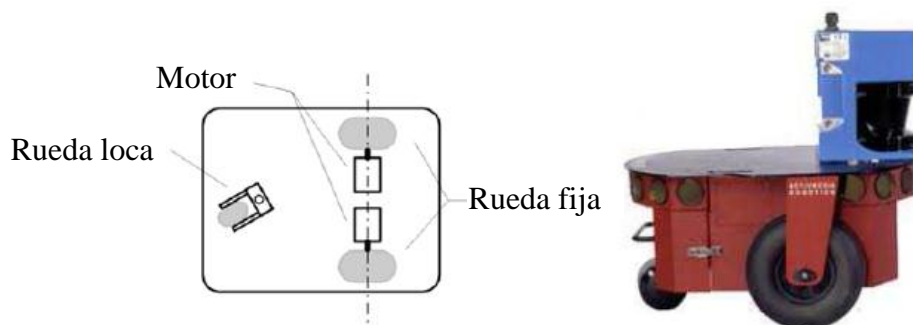


Figura 2.12 Robot móvil uniciclo

Fuente: “Modelación, Identificación y Control de Robots Móviles”, Andaluz G., pagina 17.

-Triciclo

El robot tipo triciclo está conformado por dos ruedas convencionales fijas sobre un mismo eje y una rueda convencional centrada orientable que concentra las funciones de tracción-dirección, ver Figura 2.13.

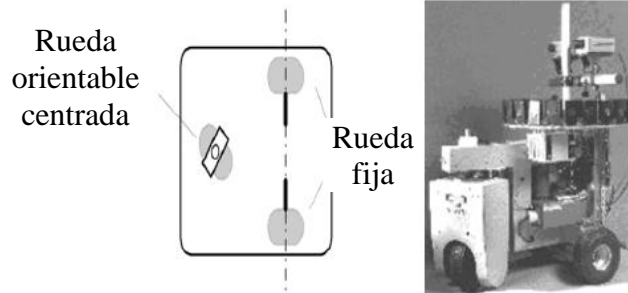


Figura 2.13 Robot móvil triciclo

Fuente: “Modelación, Identificación y Control de Robots Móviles”, Andaluz G., pagina 18.

Al igual que el caso anterior, la estructura mecánica y la electrónica de control son sencillas, su tratamiento cinemática resulta de interés en áreas específicas de control de robots móviles. En cuanto a aplicaciones industriales esta configuración es apta para el transporte de cargas pesadas a baja velocidad.

-Cuatriciclo

Un problema asociado con la configuración tipo triciclo es que el centro de gravedad del vehículo se posiciona, en algunas ocasiones, en los límites de la superficie de equilibrio, definida por las tres ruedas, cuando el vehículo está en movimiento. Esto produce una pérdida de tracción en el vehículo y es fuente de error a la hora de estimar la posición del robot. Una solución a este problema lo presenta el sistema de dirección Ackerman. Como se observa en la Figura 2.14 los ejes de las dos ruedas frontales se interpretan en un punto C que pertenece al eje común de las ruedas traseras. El lugar de los puntos en el plano trazados por cada rueda, alrededor de este punto C, es un conjunto de arcos concéntricos donde todos los vectores velocidad instantánea son tangentes a estos arcos. Esta estructura, además de brindar mayor estabilidad, evita el deslizamiento en las ruedas y por lo tanto reduce los errores de odometría.

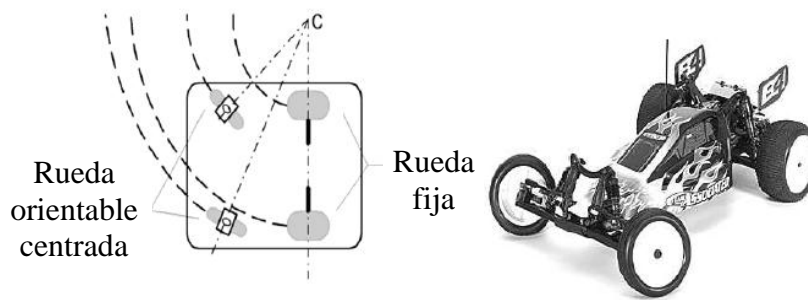


Figura 2.14 Robot móvil cuatriciclo

Fuente: “Modelación, Identificación y Control de Robots Móviles”, Andaluz G., pagina 19.

Si bien su cinemática, su estructura mecánica y su electrónica de control no son tan sencillas esta configuración presenta un gran interés para los amantes de los robots todo terreno en donde los principales desarrollos se producen en la recolección de información sensorial y su posterior tratamiento para lograr reconstrucción de entornos o para el control en tiempo real.

2.3.7.2 Algoritmos de Control

El control de los robots móviles es un área de la robótica que se ha venido desarrollando para brindar mayor autonomía a estos vehículos, en ambientes estructurados o parcialmente estructurados que interactúan con el hombre, por lo que la seguridad y estabilidad son aspectos importantes en el diseño de los controladores [19]. Los problemas principales en el control de movimiento de robots móviles pueden clasificarse en tres grupos:

-Control de Posición

El objetivo es ubicar al robot móvil en un punto de referencia dado, puede ser con una orientación deseada o sin orientación deseada.

-Seguimiento de Trayectoria

Se refiere a que el robot móvil siga una referencia dada por parámetros en el tiempo, es decir, que recorra una trayectoria con valores temporales para cada punto.

-Seguimiento de Caminos

Se refiere a que el robot móvil converja y siga un camino, sin ninguna especificación temporal, es decir, que recorra un camino sin tomar en cuenta el tiempo.

2.3.8 Posicionamiento de una Silla de Ruedas Eléctricas

2.3.8.1 Algoritmos para Control de Posición

Un control de posicionamiento significa controlar la posición y opcionalmente orientación del robot móvil. Dicho control es complicado de conseguir dada la limitación observada por Brockett en 1983: “el objetivo de posicionar y orientar no puede ser alcanzado asintóticamente por una ley suave o invariante en el tiempo”.

Uno de los controladores de posición que se encuentran en la literatura es la propuesta de Aicardi en 1995, en la cual sostiene que la limitación observada por Brockett es cierta si el robot móvil es localizado en un sistema de coordenadas cartesianas; sin embargo, si una diferente representación de espacio estado es adoptada, un enfoque simple puede ser usado, permitiendo directamente una propiedad de estabilidad suave.

A continuación se indican todas las posibles formas de control para posicionamiento.

-Posicionamiento Sin Orientación Final

Se considera al vehículo posicionado a cualquier distancia del cero de referencial y orientación final no está definida.

-Posicionamiento Con Orientación Final

Se considera al vehículo posicionado a cualquier distancia del cero de referencial y con orientación final definida.

-Posicionamiento Con Evasión de Obstáculos

En la mayoría de las aplicaciones de los robots móviles una de las tareas más importantes que se debe desarrollar es evitar la colisión con obstáculos que se encuentran en su camino. Para la cual existen dos casos:

- 1) Considerar los obstáculos en la misma planificación de trayectorias. Esto implica un completo conocimiento del área de trabajo.
- 2) Considerar que solo existe un conocimiento parcial del área de trabajo. Luego es necesario incluir algún sistema de control que permita al robot móvil modificar su trayectoria en presencia de un obstáculo.

2.3.8.2 Métodos de Localización

El problema de auto localización en un vehículo autónomo, como el de una silla de ruedas, en un entorno parcialmente estructurado como el interior de un edificio, es uno de los más importantes en el campo de la robótica móvil [20]. Una revisión de las técnicas más comunes, tanto en entornos de investigación como comerciales, puede encontrarse en el estudio de Borenstein, que concluye la siguiente clasificación de los métodos de localización:

Métodos de localización relativa, en los que solo se puede estimar la posición actual respecto a una posición inicial dada usando para ello sensores internos al vehículo; las técnicas disponibles se pueden clasificar en algunos de los siguientes grupos:

-Odometría, mediante el uso de medidas acumuladas de rotaciones de ruedas o similares mediante el uso de codificadores o encoders.

-Navegación inercial, integrando las modificaciones y derivadas leídas de acelerómetros, giroscopios y similares.

Métodos de localización absoluta, que permiten conocer la posición del móvil en el entorno del mismo, para lo cual se debe disponer de elementos externos de referencia; las posibilidades existentes son:

-Rayos de localización activa.- Los rayos permiten establecer la posición del móvil mediante el análisis de la dirección del haz procedente de varios elementos de localización externos. En este grupo se engloban tanto los sistemas de posicionamiento global GPS como los de posicionamiento local LPS aplicables en otros entornos, como interiores.

-Reconocimiento de marcas artificiales.- Estas marcas son de elementos introducidos en posiciones determinadas en el entorno móvil con características tales que permiten la identificación y distinción de las mismas de manera fiable. A través de la información extraída de las marcas y, en su caso, de un mapa de su localización en el entorno es posible determinar la posición del móvil.

-Reconocimiento de marcas naturales.- similar al anterior excepto que se trata de reconocer la posición a través de características distintivas en posiciones conocidas del propio entorno, por lo que no se necesitaría de una intervención sobre el mismo para modificarlo con marcas artificiales.

- Correspondencia sobre modelos.- En estas técnicas se trata de comparar la información aportada por los sensores del sistema con la registrada en una base de datos, mapa o modelo del entorno, la máxima concordancia permitirá identificar la posición del móvil dentro del mapa o modelo dado.

2.4 HIPÓTESIS

Un sistema de control automático influye en el posicionamiento de una silla de ruedas eléctrica.

2.5 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES DE LA HIPÓTESIS

Variable Independiente: Sistema de control automático

Variable Dependiente: Posicionamiento de una silla de ruedas eléctrica

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación cuenta con una perspectiva que se ubica en el ámbito del análisis crítico y propositivo, ya que se orientará hacia la obtención del proyecto de tesis. Además será cualitativo porque los resultados obtenidos serán analizados con base en el marco teórico investigado.

3.2 MODALIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1 Investigación Bibliográfica – Documental

Esta investigación permite profundizar diferentes conceptos, teorías, conceptualizaciones y criterios de diversos autores aplicables en el estudio, mediante el uso de bibliografía oportuna al tema.

3.2.2 Proyecto Factible

Es un proyecto factible debido a que el trabajo se desarrollará bajo una propuesta práctica y viable ya que ayudará a solucionar el problema, fundamentándose en una base teórica sostenible y confiable.

3.3 TIPOS DE INVESTIGACIÓN

La investigación tiene un nivel exploratorio porque se realiza un diagnóstico para conocer las particularidades del problema y sus posibles soluciones.

3.4 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variable Independiente: Sistema de Control Automático

Conceptualización	Dimensión	Indicador	Ítems Básicos	Técnica/ Instrumento
Es un conjunto de elementos que realiza un control sin la intervención humana tomando los datos por medio de sensores y a través de la acción de actuadores.	-Control	Forma de diseño del control	¿De qué forma se diseñara el controlador automático?	Técnica: Documental Instrumento: Ficha Bibliográfica
	-Por medio de Sensores	Tipo de sensor	¿Qué sensor se incluye para retroalimentar el sistema de control automático?	
	-Acción de actuadores	Tipo de actuador	¿Qué tipo de actuadores se accionará con el sistema de control automático?	

Tabla 3.01 Operacionalización de la variable independiente

Fuente: El Investigador

Variable Independiente: Posicionamiento de la silla de ruedas eléctrica

Conceptualización	Dimensión	Indicador	Ítems Básicos	Técnica/ Instrumento
Es el desplazamiento de la silla de ruedas eléctrica hacia una posición determinada.	-Desplazamiento	Velocidad	¿Con que velocidades puede movilizarse la silla de ruedas eléctrica (SRE)?	Técnica: Observación Instrumento: Guía de Observación
	-Silla de ruedas eléctrica	Características	¿Qué características física posee la SRE?	
		Grados de libertad	¿Qué grados de libertad posee la SRE?	
	Control de Mando	¿De qué manera se realiza el control de velocidad de la SRE?		
-Posición determinada	Coordenadas	¿Cómo se expresa las coordenadas de posición de la SRE?		

Tabla 3.02 Operacionalización de la variable dependiente

Fuente: El Investigador

3.5 TABULACIÓN DE RESULTADOS

Revisión crítica de la información recogida, es decir, limpieza de información defectuosa, incompleta, no permitente.

Repetición de la recolección en casos de corregir faltas de contestación.

3.6 INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS

Análisis de resultados destacando tendencias relacionadas fundamentalmente de acuerdo a la hipótesis.

Interpretación de los resultados con el apoyo del marco teórico en el aspecto pertinente.

Establecimiento de conclusiones y recomendaciones.

CAPITULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.1 Análisis de la Recopilación Bibliográfica

Del estudio bibliográfico realizado y con respecto a los ítems básicos planteados, se encontraron los siguientes datos:

¿De qué forma se diseñará el controlador automático?

a) Control en Cascada [21]

Al diseñar un controlador existen varios factores a ser analizados, pero uno de los importantes es el tiempo que transcurre entre la medición del efecto de la perturbación y la acción correctiva de control, los controles en cascada acortan significativamente este valor de tiempo.

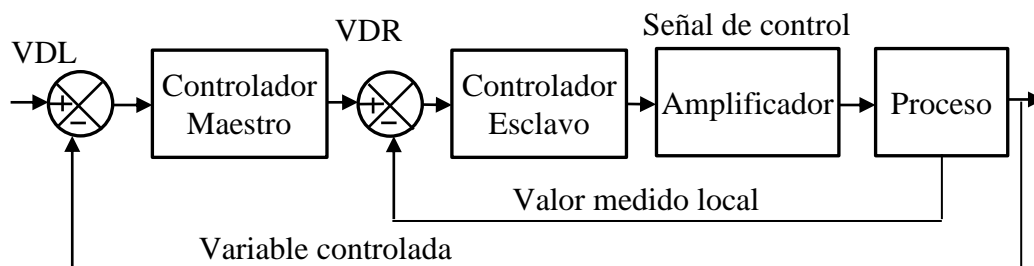


Figura 4.01 Diagrama de un control en cascada

Fuente: Control Automático y Simulación Digital, Gastón Guerra, pagina 194.

La modalidad de control en cascada utiliza un control maestro, y un controlador esclavo. Se basa en el siguiente ciclo repetitivo: El control maestro recibe la medida de la variable controlada, y la compara con un Valor Deseado Local (VDL). Sobre esta base genera un Valor Deseado Remoto (VDR) que transmite al controlador esclavo. El controlador esclavo calcula la diferencia entre VDR y un valor medido local y, sobre ésta base modula la variable manipulada. Esta secuencia modifica el valor de la variable controlada, que se vuelve a transmitir al controlador maestro para repetir el ciclo, ver Figura 4.01.

b) Modos de Control [22]

Una unidad de control puede reaccionar de varias maneras ante una señal de error y proporcionar señales de salida para que actúen los elementos correctores:

1. En el modo de control de dos posiciones, el controlador es en esencia un interruptor activado por la señal de error y proporciona sólo una señal correctora tipo encendido-apagado.
2. El modo de control proporcional (P) produce una acción de control que es proporcional al error. La señal de corrección aumentará en la medida en que lo haga el error. Si el error disminuye, también disminuye la magnitud de la corrección y el proceso de corrección es más lento.
3. El modo de control derivativo (D) produce una acción de control que es proporcional a la rapidez con la que cambia el error. Cuando hay un cambio súbito en la señal de error, el controlador produce una señal de corrección de gran magnitud; cuando el cambio es gradual, sólo se produce una pequeña señal de corrección. Se puede considerar que el control derivativo es una forma de control anticipativo, toda vez que al medir la rapidez con la que cambia el error se anticipa la llegada de un error más grande y se aplica la corrección antes de que llegue. El control derivativo no se usa solo, sino siempre en combinación con el
4. El modo de control integral (I) produce una acción de control que es proporcional a la integral del error en el tiempo. Entonces una señal de error constante producirá una señal de corrección creciente. La señal de corrección seguirá aumentando mientras el error persista. Se puede considerar que el controlador integral "mira hacia atrás", suma todos los errores y responde a los cambios que ocurren.
5. Combinación de modos: proporcional derivativo (PD), proporcional integral (PI) y proporcional integral derivativo (PID). El término se usa para el modo PID.

Control Proporcional Derivativo PD, el control derivativo nunca se utiliza solo ya que no es capaz de producir una salida cuando hay una señal de error

constante, por lo que no es posible una corrección. Por ello, en forma invariable se utiliza junto con el control proporcional.

Cuando de manera conjunta se utilizan el control proporcional y el control derivativo, el cambio en la salida del controlador respecto al valor de referencia está dado por $K_P e + K_D \frac{de}{dt}$, donde e es el error de control, K_P y K_D son las constantes proporcional y derivativa, respectivamente.

Controlador Proporcional Integral PI, el modo de control integral por lo común no se utiliza solo, con frecuencia se usa junto con el modo proporcional. Cuando una acción integral se suma a un sistema de control proporcional, la salida del controlador está dada por $K_P e + K_I \int e dt$, donde e es el error de control, K_P y K_I son las constantes proporcional e integral, respectivamente.

Controlador PID, Al combinar los tres modos de control (proporcional, integral y derivativo) se obtiene un controlador que no tiene desviación en el error y disminuye la tendencia a producir oscilaciones. Este tipo de controlador se conoce como controlador de tres modos o controlador PID. La ecuación que describe su comportamiento es $K_P e + K_I \int e dt + K_D \frac{de}{dt}$.

c) Dispositivos Electrónicos Controladores

Controlador Lógico Programable, (PLC, programmable logic controller) es un dispositivo electrónico digital que usa una memoria programable para guardar instrucciones y llevar a cabo funciones lógicas, de secuencia, de sincronización, de conteo y aritméticas para controlar máquinas y procesos y que se ha diseñado específicamente para programarse con facilidad. Este tipo de procesadores se denomina lógico debido a que la programación tiene que ver principalmente con la ejecución de operaciones lógicas y de conmutación.

Los dispositivos de entrada (como interruptores) y los dispositivos de salida (como motores) que están bajo control se conectan al PLC, después el controlador monitorea las entradas salidas de acuerdo con el programa almacenado por el operador en el PLC con el que controla máquinas o procesos. Son de alto costo.

El Microprocesador, en general se hace referencia al microprocesador como la unidad de procesamiento central (CPU, central processing unit). Esta es la parte del procesador en la que se procesan los datos, se traen instrucciones de la memoria que se decodifican y se ejecutan. La estructura interna, conocida como arquitectura, de un microprocesador depende del microprocesador que se esté considerando. Son de costos variados.

El Microcontrolador, para que un microprocesador pueda funcionar como un sistema aplicado al control, son necesarios chips adicionales, por ejemplo, dispositivos de memoria para almacenar programas y datos, así como puertos de entrada/salida para permitir que se comunique con el mundo exterior y reciba señales desde él. El microcontrolador consiste en la integración en un chip de microprocesador con memoria, interfases de entrada/salida y otros dispositivos periféricos como temporizadores. Son de muy bajo costo.

¿Qué sensor se incluye para retroalimentar el sistema de control automático?

Sensores de velocidad y movimiento [22]

A continuación se presentan sensores que sirven para monitorear velocidades lineales y angulares, y detectar movimiento.

a) Sensor de Potenciómetro

Un potenciómetro es un elemento resistivo que tiene un contacto deslizante que puede desplazarse a lo largo del elemento. Estos elementos se pueden usar en desplazamientos lineales o rotacionales; el desplazamiento se convierte en una diferencia de potencial. El potenciómetro rotacional está formado por una pista o canal circular con devanado de alambre o por una capa de plástico conductor; sobre la pista rota un cursor giratorio y ésta puede ser una sola circunferencia o helicoidal.

b) Transformadores Diferenciales

El transformador diferencial de variación lineal, más conocido por su acrónimo LVDT (linear variable differential transformer) está formado por tres devanados

espaciados de manera simétrica a lo largo de un tubo aislado. El devanado de en medio es el primario y los otros son secundarios idénticos conectados en serie de manera que sus salidas se oponen entre sí. Como resultado del movimiento que se monitorea se desplaza un núcleo magnético a través del tubo central.

c) Sensores Neumáticos

Los sensores neumáticos utilizan aire comprimido, y el desplazamiento o la proximidad de un objeto se transforman en un cambio en la presión del aire. Un puerto en el frente del sensor deja salir aire a baja presión. Este aire, en ausencia de un objeto cercano, escapa y al hacerla reduce la presión en el puerto de salida del sensor más próximo.

Sin embargo, si hay un objeto cerca, el aire no escapa con facilidad y la presión aumenta en el puerto de salida del sensor. La presión de salida del sensor dependerá, por lo tanto, de la cercanía de los objetos.

d) Codificador Óptico

Un codificador es un dispositivo que produce una salida digital como resultado de un desplazamiento lineal o angular. Los codificadores de posición se clasifican en dos categorías: codificadores incrementales que detectan cambios en la rotación a partir de una posición de datos y codificadores absolutos que proporcionan la posición angular real.

Codificador Incremental

La Figura 4.02 muestra la configuración básica de un codificador incremental para medir un desplazamiento angular. Un haz luminoso, al atravesar las ranuras de un disco, es detectado por un sensor de luz adecuado. Cuando el disco gira, el sensor produce una salida en forma de pulsos; la cantidad de pulsos es proporcional al desplazamiento angular del disco. Así, obteniendo la velocidad angular del eje y analizándola en periodos infinitesimales de tiempo se podría calcular su posición (La velocidad analizada en el tiempo es la derivada de la posición).

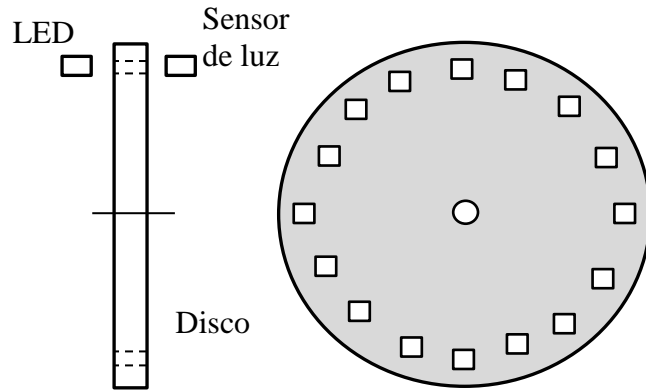


Figura 4.02. Codificador incremental

Fuente: Mecatrónica, William Bolton, 4ta Edición, pagina 35.

Codificador Absoluto

En la Figura 4.03 se muestra la configuración básica de un codificador absoluto para medir desplazamientos angulares. La salida es un número binario de varios dígitos que representa cierta posición angular. El disco giratorio tiene tres círculos concéntricos de ranuras y tres sensores para detectar los pulsos de luz. Las ranuras están dispuestas de manera que la salida secuencial de los sensores es un número en código binario.

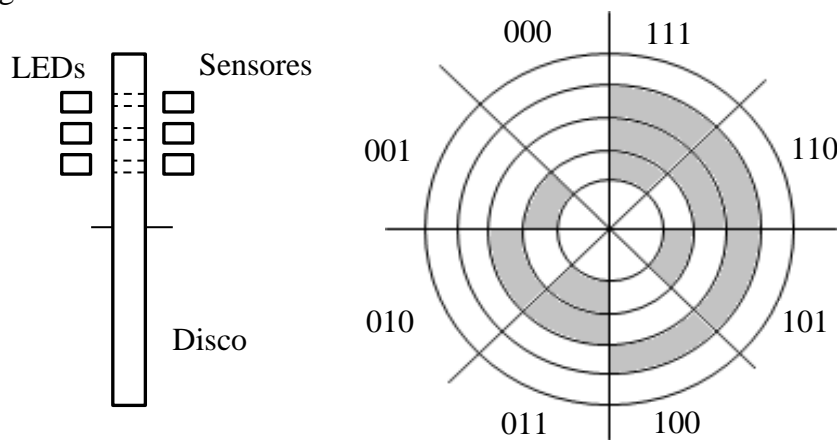


Figura 4.03. Codificador absoluto

Fuente: Mecatrónica, William Bolton, 4ta Edición, pagina 35.

Tecnologías de los Codificadores

TTL, circuitos de lógica de transistor (TTL, transistor-transistor logic), y se basan en el uso de transistores; básicamente funcionan entre los niveles de 0 y 5 V.

HTL, (High Treshold-Logic) es una tecnología desarrollada a partir de la tecnología DTL llamada "Lógica de alto umbral" que incorpora diodos zener para

crear un gran desplazamiento entre los estados de voltaje lógicos 1 y 0. Estos dispositivos operan con una fuente de tensión de 15 Voltios y los encontramos controles industriales en donde la intención es minimizar los efectos del ruido.

En la Tabla 4.01 se enlistan algunas características de las tecnologías TTL y HTL de los codificadores.

Características de las tecnologías TTL y HTL		
	TTL	HTL
Alimentación	4.75 - 5.25 V	14-15 V
Voltaje max en Bajo	0.8 V	6.5 V
Voltaje min en Alto	2.0 V	8.5 V
Frecuencia máxima de operación	33 MHz	6.6 MHz
Consumo máximo de potencia	8mW	55mW

Tabla 4.01 Tecnologías de los codificadores

Fuente: El Investigador

¿Qué tipo de actuadores se accionará con el sistema de control automático?

Cuando se trata de accionar ruedas los actuadores más utilizados son motores eléctricos, y si se desea controlar su giro de manera eficiente los motores de corriente directa son los indicados.

Motor CD [22]

Los motores eléctricos de corriente directa con frecuencia se usan como elemento de control final en los sistemas de control por posición o de velocidad. El principio básico del funcionamiento de un motor es el siguiente: Se ejerce una fuerza sobre un conductor en un campo magnético cuando pasa una corriente por un conductor (Figura 4.04). Para un conductor de longitud L que lleva una corriente I en un campo magnético con densidad de flujo B perpendicular al conductor, la fuerza ejercida es $F=B*I*L$.

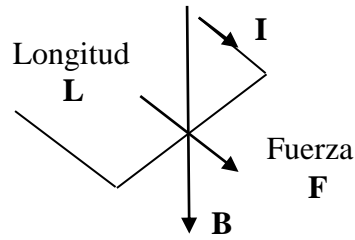


Figura 4.04 Fuerza sobre un conductor por el que pasa una corriente
Fuente: Mecatrónica, William Bolton, 3ra Edición, pagina 169.

La Figura 4.05 muestra el principio básico de un motor de cd: una espira de alambre que gira de manera libre en medio del campo de un imán permanente. Cuando por el devanado pasa una corriente, las fuerzas resultantes ejercidas en sus lados y en ángulo recto al campo provocan fuerzas que actúan a cada lado produciendo una rotación. Sin embargo, para que la rotación continúe, cuando el devanado pasa por la posición vertical se debe invertir la dirección de la corriente.

En un motor de cd convencional, los devanados de alambre se montan en las ranuras de un cilindro de material magnético conocido como armadura. La armadura está montada en cojinetes y puede girar. Se monta en el campo magnético producido por los polos de campo que pueden ser para pequeños motores, imanes permanentes o electroimanes, cuyo magnetismo se obtiene mediante una corriente que circula por los devanados de campo.

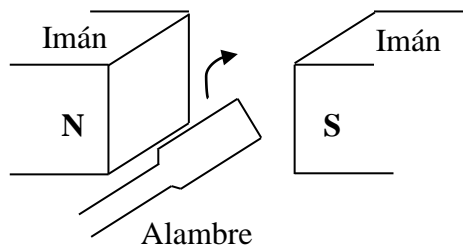


Figura 4.05 Elementos básicos de un motor cd

Fuente: Mecatrónica, William Bolton, 4ta Edición, pagina 201.

La Figura 4.06 muestra el principio básico del funcionamiento de un motor de cd de cuatro polos, cuyo campo magnético se produce por devanados que transportan corriente. Los extremos de los devanados de la armadura se conectan con los segmentos adyacentes de un anillo segmentado conocido como conmutador y el

contacto eléctrico con los segmentos se logra mediante contactos de carbón conocidos como escobillas. Conforme la armadura gira, el conmutador invierte la corriente de cada uno de los devanados al desplazarse por los polos de campo. Esto es necesario para que las fuerzas que actúan en el devanado sigan actuando en la misma dirección y la rotación continúe. La dirección de rotación del motor de cd se invierte al invertir la corriente de armadura o la corriente de campo.

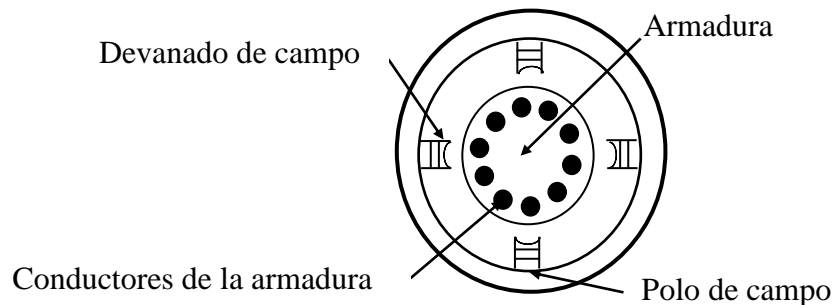


Figura 4.06 Motor cd con dos juegos de polos

Fuente: Mecatrónica, William Bolton, 4ta Edición, pagina 201.

4.1.2 Análisis de la Recopilación de Campo

En base a la observación y medición de variables físicas se obtuvo los datos del Anexo A, del cual se obtiene los siguientes resultados:

¿Qué características física posee la silla de ruedas eléctrica (SRE)?

La silla de ruedas eléctrica a estudiar es la P326A Vision Sport de la marca MERITS especificado en el Anexo B, este equipo ha tenido algunas modificaciones realizadas por los investigadores de Centro de investigaciones de la Universidad Técnica de Ambato. De sus características se puede detallar:

- Capacidad de carga de 300lbs
- Dimensiones: Largo: 86.36cm, Ancho: 60.96cm, Alto: 123.19cm
- 2 Motores de 24V DC – 160W.
- 2 Frenos o Trabas Electromecánicas de 24V DC.
- 2 Baterías de 12 Voltios cada una con una autonomía en conjunto de 8 horas.

¿Con que velocidades puede moverse la SRE?

Mediante pruebas realizadas utilizando cronómetros se determina que la velocidad máxima de equipo es de 1.45m/s y su velocidad mínima diferente de cero es de 0.05m/s. Además se observa que el intervalo mínimo entre velocidades es de 0.05m/s.

¿Qué grados de libertad posee la SRE?

Al revisar la movilidad de la silla de ruedas eléctrica se puede observar que:

- Linealmente puede desplazarse únicamente hacia adelante y hacia atrás, ver la Figura 4.07.
- Angularmente logra girar libremente sobre el centro de la línea que une las dos ruedas motrices, ver la Figura 4.08.

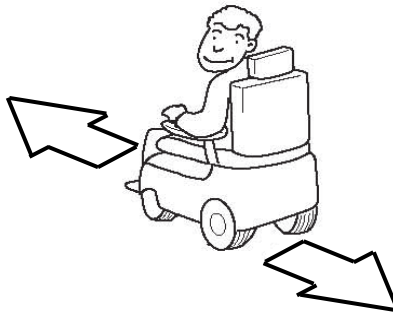


Figura 4.07. Desplazamiento lineal de la silla de ruedas

Fuente: Manual de usuario de la silla de ruedas P326A Vision Sport, pagina 3.



Figura 4.08 Desplazamiento angular de la silla de ruedas

Fuente: Manual de usuario de la silla de ruedas P326A Vision Sport, pagina 3.

Estas características de movilidad indican que la silla de ruedas tiene una restricción de velocidad no holonómica, debido a que el número de grados de libertad controlables es menor a todos los grados de libertad de la silla móvil.

¿De qué manera se realiza el control de velocidad de la SRE?

La silla de ruedas eléctrica posee un joystick que se comunica de forma serial a un módulo de control que comanda las velocidades de la silla, ver la Figura 4.09.



Figura 4.09 Joystick de la silla de rueda eléctrica P326A Vision Sport

Fuente: El Investigador

Este joystick genera señales eléctricas análogas a partir de un imán eléctrico móvil que se mueve libremente dentro de una circunferencia formada por cuatro bobinas, estas señales son interpretadas para luego ser enviadas al módulo de control de la silla.

Adicional a este mando, la silla de ruedas eléctrica cuenta con otra opción, un módulo de potencia llamando MODSILLA (las especificaciones en el Anexo C) realizado por el Ing. Paúl Canseco, quien es investigador del Centro de Investigaciones de la Universidad Técnica de Ambato. Este módulo posee un interconector que permite ordenar el movimiento de cada motor de manera independiente por medio de comunicación paralela de 7 bits, además, activar las trabas electromecánicas, ver la Figura 4.10.

Existe también un selector de tres posiciones que permite escoger la opción de manejo de la silla con el joystick, con la comunicación paralela o inactivar su control, además, posee un botón de apagado de emergencia, ver la Figura 4.11.

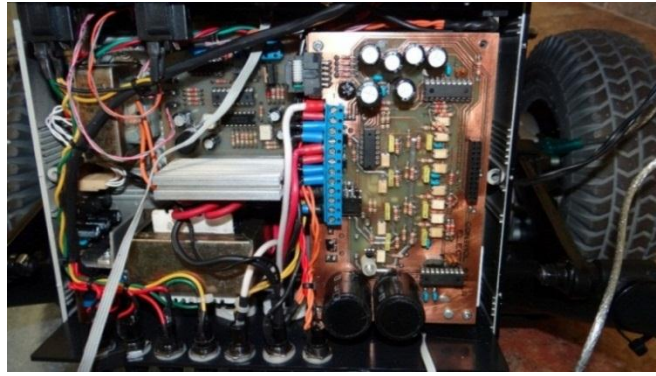


Figura 4.10 Módulo de potencia de la silla MODSILLA.

Fuente: El Investigador



Figura 4.11 Selector de tres posiciones y botón de emergencia de la silla móvil
Fuente: El Investigador

¿Cómo se expresa las coordenadas de posición de la SRE?

Del análisis de la movilidad de la silla se considera oportuno utilizar coordenadas cartesianas X e Y del plano formado por el suelo en el que se desplaza la silla de ruedas, para poder expresar la posición real y la posición deseada de la silla, ver la Figura 4.12.



Figura 4.12 Sistema de referencia coordenadas X e Y

Fuente: El Investigador

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El diseño del controlador de un sistema automático en forma de cascada permite obtener un tiempo de respuesta más corto.
- Los codificadores ópticos incrementales son una excelente opción para obtener las velocidades de la silla móvil debido a que se desplaza mediante ruedas.
- La silla de ruedas eléctrica P326A Vision Sport soporta una carga de 300 libras, incluye dos motores de corriente directa de 24 voltios, dos frenos electromecánicos de 24 voltios y dos baterías de 12 voltios cada una, y posee una autonomía de hasta 8 horas.
- La silla de ruedas P326A Vision Sport únicamente puede desplazarse perpendicularmente al eje que une las ruedas y gira libremente sobre el plano formado por el suelo, por lo que posee una restricción no holonómica de velocidad.
- El movimiento de la silla de ruedas puede ser controlado de dos formas, toda la silla mediante un joystick o cada motor de forma independiente por el módulo de potencia MODSILLA con comunicación paralela a 7 bits.
- Las características de la silla de ruedas eléctrica analizada no le permite al usuario posicionarse en un punto deseado de manera autónoma, debido a que requiere cierta intervención humana para este proceso.

5.2 RECOMENDACIONES

- Diseñar sistemas de control en modo de cascada que minimiza el tiempo de respuesta.
- Medir la velocidad lineal y velocidad angular de la silla de ruedas eléctrica analizada mediante codificadores incrementales.
- Tomar en cuenta la restricción de velocidad no holonómica en el control de movimiento de la silla móvil.
- Diseñar e implementar un control automático de posición en la silla de ruedas eléctrica P326A Vision Sport.

CAPITULO VI

PROPUESTA

6.1. DATOS INFORMATIVOS

Tema de la propuesta: Diseño e Implementación de un Sistema de Control Automático para el Posicionamiento de una Silla de Ruedas Eléctrica.

Ubicación: La Unidad Operativa del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato campus Huachi edificio Zeta, ubicada en la Avenida Los Chasquis entre Río Payamino y Río Guayllabamba.

Autor: José Luis Varela Aldás.

Tutor: Ingeniero Víctor H. Andaluz, PhD.

6.2. ANTECEDENTES DE LA PROPUESTA

Al analizar las características de la silla de ruedas P326A Vision Sport, se conoce que inicialmente se controlaba desde un joystick, pero debido a las modificaciones realizadas por el Centro de Investigaciones de la Universidad Técnica de Ambato, esta silla de ruedas eléctrica puede ser operada mediante comunicación paralela a 7 bits para cada motor, así como también la activación de las dos trabas electromecánicas utilizando un bit para cada una. Estas particularidades hacen difícil de utilizar esta silla de ruedas para proyectos de investigación que impliquen la autonomía en la movilidad de personas con capacidades diferentes.

Además, los investigadores no han realizado la modelación matemática de la silla de ruedas, por lo que no conocen sus características de movilidad, las que son necesarias para el desarrollo de proyectos de investigación que involucren mejoras en los servicios de la silla móvil.

6.3. JUSTIFICACIÓN

Un sistema de control automático para la silla de ruedas eléctrica del proyecto de investigación de la Unidad Operativa del Centro de Investigaciones de la Universidad Técnica de Ambato permite controlar los actuadores desde un computador y leer las velocidades de los motores en tiempo real. Con esto se podrá implementar varias aplicaciones para comandar el movimiento de la silla desde diferentes dispositivos.

Al realizar el posicionamiento automático de la silla de rueda desde un computador es posible remplazar los valores de posición deseada por variables generadas mediante sensores externos logrando mejorar los servicios de movilidad de la silla de ruedas autónoma.

El diseño e implementación de un sistema de control automático para el posicionamiento de una silla de ruedas eléctrica, aparece a partir de la necesidad de promover el desarrollo de proyectos vinculados a la movilidad de personas con capacidades especiales y de la tercera edad.

6.4 OBJETIVOS.

6.4.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de control automático para el posicionamiento de una silla de ruedas eléctrica.

6.4.2 Objetivos Específicos

- Construir un circuito electrónico que permita medir la velocidad lineal y angular de la silla de ruedas eléctrica y controlar sus movimientos desde un ordenador.
- Desarrollar la modelación e identificación de la silla de ruedas eléctrica, para obtener una expresión matemática que represente sus características cinemáticas y dinámicas.

- Diseñar algoritmos de control para el posicionamiento, que incluya el modelo cinemático y dinámico de la silla de ruedas. Además, garantizar analíticamente la estabilidad de los algoritmos de control propuestos.
- Evaluar experimentalmente el desempeño del sistema de control propuesto.

6.5 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

6.5.1 Factibilidad Técnica

El diseño y la implementación de un control automático para posicionar una silla de ruedas cuenta con factibilidad técnica debido al alcance de información proveniente de libros, revistas científicas y asesoría por parte del coordinador del proyecto de investigación, asegurando el correcto desarrollo de los componentes del sistema.

6.5.2. Factibilidad Económica

Esta propuesta es económicamente factible debido a que ya se cuenta con algunos de los equipos, y los recursos económicos asignados al proyecto por el Centro de Investigaciones (CENI) de la Universidad Técnica de Ambato cubren los costos requeridos.

6.5.3. Factibilidad Operativa

La factibilidad operativa es posible gracias a que el Centro de Investigaciones de la Universidad Técnica de Ambato cuenta con la infraestructura, herramientas y equipos requeridos para el correcto desarrollo del estudio e instalación de este sistema de control.

6.5.4. Factibilidad Científica

Desde el punto de vista científico este proyecto es factible porque existen varios estudios nacionales e internacionales sobre el tema, además de la asesoría de expertos para su correcto desarrollo.

6.6 FUNDAMENTACIÓN

6.6.1 Componentes electrónicos

6.6.1.1 Amplificador Operacional [23]

El elemento básico de muchos módulos para acondicionamiento de señal es el amplificador operacional. Este es un amplificador de alta ganancia de cd, en general de 100 000 o más, y está disponible como circuito integrado en chips de silicio. Tiene dos entradas: entrada inversora (-) y entrada no inversora (+). La salida depende de cómo se hagan las conexiones de estas entradas. El amplificador operacional tiene otras entradas: una alimentación de voltaje negativo, una alimentación de voltaje positivo y dos entradas conocidas como voltaje de compensación nulo, cuyo propósito es permitir las correcciones que se deben hacer por el comportamiento no ideal del amplificado.

6.6.1.2 El Disparador Schmitt [24]

El disparador Schmitt es una aplicación del comparador que conmuta la salida negativa cuando la entrada pasa por encima de una tensión de referencia positiva V_{sup} . Luego, utiliza una realimentación negativa para evitar cambiar de nuevo al otro estado hasta que la entrada pasa a través de una tensión umbral inferior V_{inf} , estabilizando así la conmutación en contra de la activación rápida por el ruido a medida que pasa por el punto de disparo (ver la Figura 6.01).

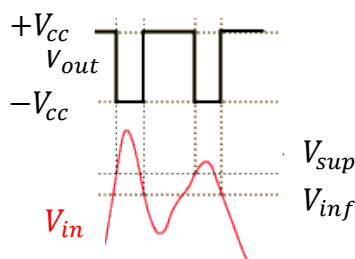


Figura 6.01 Acción del Disparador Schmitt

Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/electronic/schmitt.html>

6.6.1.3 Microcontroladores [23]

La Figura 6.02 muestra un diagrama de bloques general de un microcontrolador.

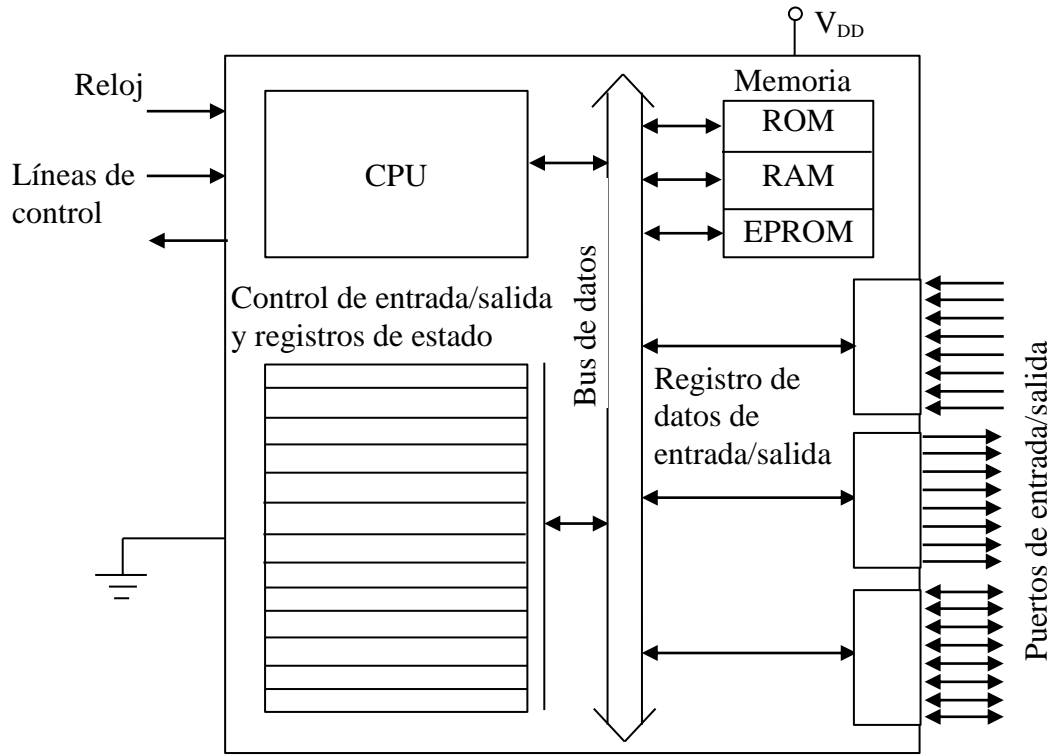


Figura 6.02 Diagrama de bloques de microcontrolador

Fuente: Mecatrónica, William Bolton, 3ra Edición, página 356.

Un microcontrolador común tiene terminales para la conexión externa de entradas y salidas, alimentación eléctrica y señales de reloj y de control, Las conexiones de entrada y salida se agrupan en unidades denominadas puertos de entrada/salida. Por lo general, estos puertos tienen ocho líneas para poder transportar una palabra de datos de 8 bits. Para una palabra de 16 bits se utilizan dos puertos, uno para transmitir los 8 bits inferiores, y otro para los 8 bits superiores. Los puertos pueden ser sólo entrada o sólo salida, o programables para funcionar como entrada o salida.

6.6.2 Comunicación Serial [23]

Se refiere a la transmisión de datos que, junto con las señales de control, se envían de bit en bit en secuencia, en una sola línea. Para transmitir y recibir datos sólo se necesita una línea de dos conductores. Dado que los bits de una palabra se

transmiten de manera secuencial y no simultánea, la tasa de transferencia de datos es mucho menor que en el caso de la transmisión de datos en paralelo. Sin embargo, este tipo de transmisión es más barato, ya que requiere una cantidad mucho menor de conductores. Por ejemplo, la comunicación entre los microcontroladores de un automóvil se establece mediante una transmisión de datos en serie. Si no se utilizara este tipo de transmisión, la cantidad de conductores empleados tendría que ser muy grande. En general, la transmisión de datos en serie se usa en todo tipo de conexiones excepto las periféricas más cortas.

6.6.3 Herramientas Informáticas

6.6.3.1 Proteus

Proteus pertenece a sus desarrolladores Labcenter Electronics. Es un conjunto de programas utilizados para el diseño y simulación electrónica. Se selecciona este tipo de simulador debido a su gran robustez en cuanto a librerías, procesamiento de circuitos y simulación en tiempo real. Cuenta principalmente con 2 programas:

-ISIS (Intelligent Schematic Input System - Sistema de Enrutado de Esquemas Inteligente): Su función principal es la de permitir al usuario el diseño de sistemas electrónicos tanto sencillos como de gran complejidad. Cuenta con varias herramientas para la interconexión de elementos.

-ARES (Advanced Routing and Editing Software - Software de Edición y Ruteo Avanzado): es la herramienta de enrutado, ubicación y edición de componentes, se utiliza para la fabricación de placas de circuito impreso, permitiendo editar generalmente, las capas superficial y de soldadura.

6.6.3.2 Microcode Studio Plus

Microcode Studio es una interface utilizada para la programación de microcontroladores mediante el lenguaje Basic. Cuenta con un entorno de gran alcance visual de desarrollo integrado (IDE) logrando contener un circuito de depuración (ICD), está diseñado para soportar los compiladores: Micro Engineering Labs PICBASIC y PICBASIC PRO. En este software se puede escribir el código del

programa, corregir los errores de sintaxis, además se ordenan automáticamente las subrutinas.

Al compilar el código se genera el archivo .Hex que sirve para cargar el programa al microcontrolador.

6.6.3.3 LabVIEW

Es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico. Recomendado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido, pues acelera la productividad. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Gráfico.

Los programas desarrollados con LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales, o VIs, y su origen provenía del control de instrumentos, aunque hoy en día se ha expandido ampliamente no sólo al control de todo tipo de electrónica, sino también a su programación embebida, comunicaciones, matemáticas, etc.

6.6.3.4 Visual C++

Es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para lenguajes de programación C, C++ y C++/CLI. Incluye además las bibliotecas de Windows (WinApi), las bibliotecas MFC y el entorno de desarrollo para .NET Framework. Visual C++ cuenta con su propio compilador y otras herramientas como IntelliSense, TeamFoundation Server, Debug,.. Además provee de bibliotecas propias de cada versión del sistema operativo y sockets. Como otros compiladores, se le pueden añadir nuevas bibliotecas como DirectX, wxWidgets o SDL.

El lenguaje de programación utilizado por esta herramienta, está basado en C++ y es compatible en la mayor parte de su código con este lenguaje, a la vez que su sintaxis es exactamente igual. En algunas ocasiones esta incompatibilidad impide que otros compiladores, sobre todo en otros sistemas operativos, funcionen bien con código desarrollado en este lenguaje.

6.6.3.5 Biblioteca de enlace dinámico (DLL)

Una biblioteca de enlace dinámico es el término con el que se refiere a los archivos con código ejecutable que se cargan bajo demanda de un programa por parte del sistema operativo. Esta denominación es exclusiva a los sistemas operativos Windows siendo ".dll" la extensión con la que se identifican estos ficheros.

La diferencia entre las librerías de enlace dinámico con extensión DLL y el resto, es que las primeras se cargan porque el programa que las ha de utilizar lo pide a Windows y las demás, en cambio, se cargan porque están referenciadas en archivos de inicialización de Windows.

Ventajas

Las DLL son como la evolución de las bibliotecas estáticas y de forma análoga contienen funcionalidad o recursos que utilizan otras aplicaciones. Sin embargo, su uso proporciona algunas ventajas:

- Reducen el tamaño de los archivos ejecutables: Gran parte del código puede estar almacenado en bibliotecas y no en el propio ejecutable lo que redundaría en una mejor modularización.

- Pueden estar compartidas entre varias aplicaciones: Si el código es suficientemente genérico, puede resultar de utilidad para múltiples aplicaciones.

- Facilitan la gestión y aprovechamiento de la memoria del sistema: La carga dinámica permite al sistema operativo aplicar algoritmos que mejoren el rendimiento del sistema cuando se carguen estas bibliotecas. Además, al estar compartidas, basta con mantener una copia en memoria para todos los programas que la utilicen.

- Brindan mayor flexibilidad frente a cambios: Es posible mejorar el rendimiento o solucionar pequeños errores distribuyendo únicamente una nueva versión de la biblioteca dinámica. Nuevamente, esta corrección o mejora será aprovechada por todas las aplicaciones que compartan la biblioteca.

6.6.4 Sistemas no Lineales

Un sistema no lineal es aquél que no verifica el principio de superposición. [25]

La justificación del estudio de los sistemas no lineales se fundamenta en numerosas razones. Desde la óptica del control automático pueden mencionarse las siguientes:

Virtualmente todos los sistemas físicos son de naturaleza no lineal.

A veces es posible describir la operación de un sistema físico por un modelo lineal, por ejemplo ecuaciones diferenciales ordinarias lineales. Este es el caso cuando la operación del sistema no se desvía demasiado del punto de operación nominal. Por esto el análisis de sistemas lineales es importante en la teoría y práctica del control. Sin embargo, otras veces el modelo linealizado no es adecuado. Esto tiene que ver también con el desempeño deseado del sistema de control.

Mejoramiento de sistemas de control existentes.

Los controladores no lineales pueden manejar no linealidades en un amplio rango de operación del sistema. Esto puede ser ejemplificado con el caso del robot. En altas velocidades las fuerzas no lineales de coriolis y centrífugas (que son funciones cuadráticas de la velocidad) se manifiestan con intensidad. En este caso, un controlador no lineal denominado de par calculado puede mejorar notablemente el desempeño respecto de un controlador de movimiento de tipo lineal.

Análisis de no linealidades fuertes.

Una suposición del control lineal es que el modelo es linealizable. Sin embargo existen no linealidades cuya naturaleza discontinua no permite la aproximación lineal. Ejemplos de éstas son la fricción de Coulomb, la saturación, las zonas muertas, la histéresis, que son frecuentemente encontradas en ingeniería. Estas no linealidades causan efectos no deseables como inestabilidades y ciclos límites, por lo que sus efectos deben ser predecidos y compensados.

Incertidumbres en el modelo.

Cuando se diseñan sistemas lineales se asume que los parámetros del modelo son suficientemente bien conocidos. Sin embargo, a veces esto no ocurre, lo cual puede deberse a variaciones lentas o abruptas de esos parámetros. En estos casos pueden incorporarse intencionalmente no linealidades al sistema de control a fin de que esas incertidumbres sean bien toleradas. Ejemplos son los sistemas de control robusto y los adaptables.

Simplicidad de diseño.

En algunos casos un buen diseño de control no lineal puede ser más simple que la contraparte lineal, porque el diseño no lineal está asociado a la física misma del sistema. También, un diseño no lineal puede permitir el uso de componentes de control menos costosos, al no requerir que los sensores y actuadores sean de comportamiento estrictamente lineal.

6.6.5 Modelación Matemática

El punto de partida en el análisis de un sistema de control es su representación por un modelo matemático, generalmente como un operador entre entradas y salidas del sistema, o como un conjunto de ecuaciones en diferencia y/o diferenciales. La mayoría de los modelos matemáticos usados tradicionalmente por teóricos y prácticos del control son lineales. De hecho, los modelos lineales son mucho más manejables que los no lineales, y pueden representar en forma precisa el comportamiento de sistemas reales en muchos casos útiles. Sin embargo, los avances tecnológicos actuales han generado una enorme variedad de nuevos problemas y aplicaciones que son no lineales en esencia. Se observan comúnmente en aplicaciones modernas importantes en ingeniería, tales como sistemas de comando de vuelo, control de robots, sistemas de autopistas automatizadas, estructuras de ala de avión, y sistemas de inyección de combustible de alto rendimiento. Tales fenómenos no lineales no se pueden describir mediante dinámica de modelos lineales, una razón ineludible para el uso de modelos no lineales y el desarrollo de conceptos y herramientas de sistemas no lineales de control. [25]

6.6.5.1 Modelación de Robots Móviles

Aunque el robot móvil sea el mismo, los modelos matemáticos que existen para representarlo son muy variados. Cada modelo matemático tiene características diversas a tal punto que ellos representan diversas propiedades cinemáticas y dinámicas del mismo robot móvil. Por lo tanto, cada uno de los modelos matemáticos presentados tendrá una utilidad diferente de acuerdo a las propiedades o comportamientos que el usuario necesita observar. Por lo general se procede a la modelación matemática tanto de la cinemática como de la dinámica del robot móvil, con la finalidad de conocer las velocidades lineal y angular a la que se desplaza el robot, así como también su posición y orientación.

6.6.5.2 Identificación de Parámetros

La identificación es un campo de la modelación matemática de sistemas a partir de datos experimentales. Se trata de determinar un modelo matemático, generalmente dinámico, a partir de un grupo de datos experimentales de entrada y de salida, sin necesidad de conocer las leyes internas que gobiernan el comportamiento del sistema (ver la Figura 6.03), que reproduce su conducta con suficiente exactitud para los fines deseados de control. [26]

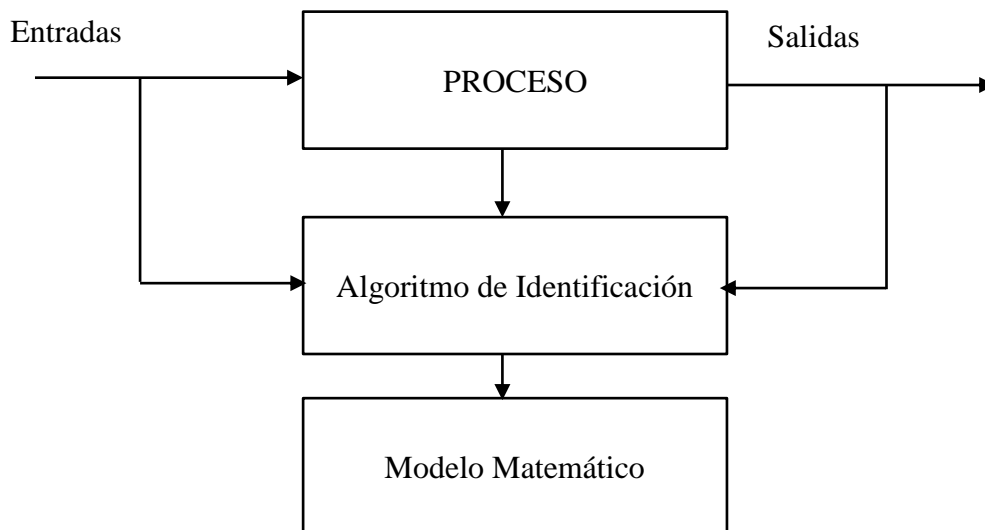


Figura 6.03 Estructura para la identificación de sistema

Fuente: El Investigador

Método de los mínimos cuadrados

Consideramos el modelo de un sistema según la ecuación (6.01), correspondiente a t mediciones:

$$Y^T(t) = P^T Z^T(t) \quad (6.01)$$

donde P^T contiene los parámetros a determinar, utilizando el método de los mínimos cuadrados se intenta hallar el vector P tal que minimice la forma cuadrática de (6.02):

$$J(P(t)) = \frac{1}{t} (Y(t) - Z(t)P(t))^T W (Y(t) - Z(t)P(t)) \quad (6.02)$$

donde W es una matriz definida positiva que puede definir distintas formas especiales, dando lugar a diversas modificaciones de este sistema. En el caso más simple consiste en considerar $W = I$, y significa que atribuimos la misma importancia o peso a todos los errores del modelo. Entonces, el criterio $J(P(t))$ puede también escribirse según la ecuación (6.03):

$$J(P(t)) = \frac{1}{t} E^T(t) E(t) = \frac{1}{t} \sum_{k=1}^t e(k)^2 \quad (6.03)$$

Para minimizar $J(P(t))$ se efectúa el siguiente procedimiento, considerando $W = I$ se encuentra la fórmula (6.04):

$$\begin{aligned} J(P(t)) = & \\ & \frac{1}{t} [Y^T(t)Y(t) - P^T(t)Z^T(t)Y(t) - Y^T(t)Z(t)P(t) + \\ & P^T(t)Z^T(t)Z(t)P(t)] \end{aligned} \quad (6.04)$$

Pero $P^T(t)Z^T(t)Y(t) = Y^T(t)Z(t)P(t)$ debido a que se trata de escalares, entonces se obtiene (6.05):

$$J(P(t)) = \frac{1}{t} [Y^T(t)Y(t) - 2Y^T(t)Z(t)P(t) + P^T(t)Z^T(t)Z(t)P(t)] \quad (6.05)$$

Derivando con respecto a $P(t)$ e igualando a cero se obtiene (6.06):

$$\frac{dJ(P(t))}{dP(t)} = \frac{1}{t} [-2Z^T(t)Y(t) + 2Z^T(t)Z(t)P(t)] = 0 \quad (6.06)$$

Determinando la expresión del estimador mínimo cuadrático con la ecuación (6.07):

$$\hat{P}(t) = (Z^T(t)Z(t))^{-1}Z^T(t)Y(t) \quad (6.07)$$

6.6.6 Estabilidad de Lyapunov

La estabilidad de puntos de equilibrio generalmente se caracteriza en el sentido de Lyapunov, un matemático e ingeniero ruso que estableció las bases de la teoría que hoy lleva su nombre. Un punto de equilibrio se dice estable si todas las soluciones que se inicien en las cercanías del punto de equilibrio permanecen en las cercanías del punto de equilibrio; de otro modo el punto de equilibrio es inestable. [27]

Considérense ecuaciones diferenciales no lineales del tipo de la expresión (6.08),

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t)), x(0) = x_0 \quad (6.08)$$

donde se define (6.09),

$$x \in \mathfrak{R}^n, t \in \mathfrak{R}_+, f: \mathfrak{R}_+ \times \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^n \quad (6.09)$$

6.6.6.1 Punto de equilibrio

Un vector $x^* \in \mathfrak{R}^n$ es un punto de equilibrio de la ecuación (6.08) si se conoce (6.10),

$$f(t, x^*) = 0, \forall t \geq t_0 \quad (6.10)$$

Se supone que el origen es un equilibrio de (6.08), o sea $x^* = 0$. Esto no implica pérdida de generalidad, ya que mediante cambios de coordenadas un equilibrio de la ecuación (6.08) se puede trasladar al origen.

Equilibrio estable

El origen es un equilibrio estable (6.08) si, dado cualquier $\varepsilon > 0$ existe un $\delta(t_0, \varepsilon) > 0$ tal que se define la expresión (6.11),

$$\|x(t_0)\| < \delta(t_0, \varepsilon) \Rightarrow \|x(t)\| < \varepsilon, \forall t \geq t_0 \quad (6.11)$$

El equilibrio es uniformemente estable si, dado cualquier $\varepsilon > 0$ existe un $\delta(\varepsilon) > 0$ tal que la forma (6.12),

$$\|x(t_0)\| < \delta(\varepsilon), t_0 \geq 0 \Rightarrow \|x(t)\| < \varepsilon, \forall t \geq t_0 \quad (6.12)$$

o sea que δ puede elegirse independientemente de t_0 .

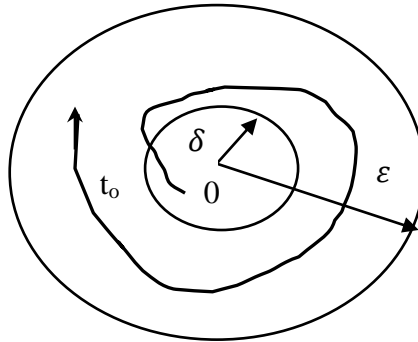


Figura 6.04 Equilibrio estable

Fuente: El Investigador

Equilibrio inestable

El origen es inestable si no es estable.

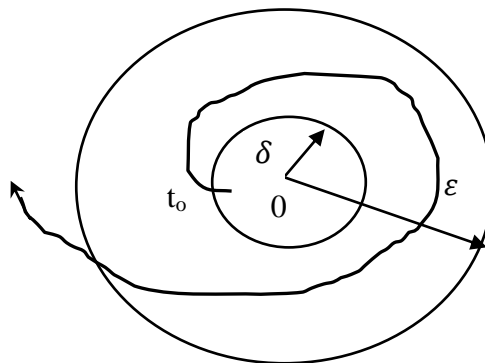


Figura 6.05 Equilibrio inestable

Fuente: El Investigador

Equilibrio asintóticamente estable

El origen es un equilibrio asintóticamente estable si,

- Es estable.
- Es atractivo: Existe un número $\delta_1(t_0) > 0$ tal que la forma (6.13),

$$\|x(t_0)\| < \delta_1(t_0) \Rightarrow \|x(t)\| \rightarrow 0 \text{ con } t \rightarrow \infty \quad (6.13)$$

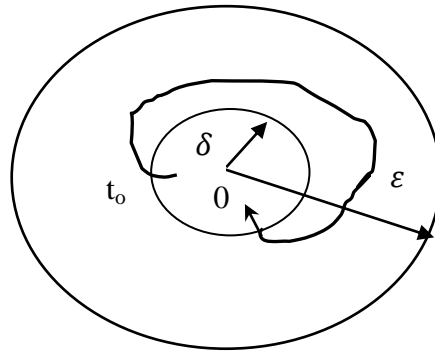


Figura 6.06 Asintóticamente Estable

Fuente: El Investigador

El origen es un equilibrio uniformemente asintóticamente estable si,

- a) Es un equilibrio uniformemente estable.
- b) Es uniformemente atractivo: Existe un número $\delta_1 > 0$ tal que,

$$\|x(t_0)\| < \delta_1, t_0 \geq 0 \Rightarrow \|x(t)\| \rightarrow 0 \text{ con } t \rightarrow \infty \text{ uniforme}$$

o bien la expresión (6.14),

$$\forall \varepsilon > 0 \exists T(\varepsilon) \text{ tal que } \|x_0\| < \delta_1, t_0 \geq 0 \Rightarrow \|x(t)\| < \varepsilon \forall t \geq T(\varepsilon) \quad (6.14)$$

Equilibrio globalmente asintóticamente estable

El origen es un equilibrio globalmente asintóticamente estable de (6.08) si,

- a) Es estable.
- b) $\|x(t)\| \rightarrow 0 \text{ con } t \rightarrow \infty \forall x_0$.

En este caso el único equilibrio es el origen y la propiedad de estabilidad se atribuye al sistema.

El origen es un equilibrio globalmente uniformemente asintóticamente estable si:

- a) Es uniformemente estable
- b) Es uniformemente globalmente atractivo, expresado en (6.15):

$$\forall M, \varepsilon > 0, \exists T = T(M, \varepsilon) \quad (6.15)$$

Tal que la forma (6.16),

$$\|x_0\| < M, t_0 \geq 0 \Rightarrow \|x(t)\| < \varepsilon, \forall t \geq t_0 \quad (6.16)$$

6.6.6.2 Teoremas de Estabilidad

Función localmente definida positiva

Una función continua $W: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ es una función localmente definida positiva si se cumplen las expresiones (6.17) y (6.18),

$$W(0) = 0 \quad (6.17)$$

$$W(x) > 0 \forall x \neq 0, x \in B_r = \{x: \|x\| \leq r\} \quad (6.18)$$

Función globalmente definida positiva

Si las condiciones anteriores se verifican para todo $x \in \mathfrak{R}^n$ y además se considera (6.19),

$$W(x) \rightarrow \infty \text{ con } \|x\| \rightarrow \infty \quad (6.19)$$

entonces $W: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^+$ es globalmente definida positiva

Función candidata de Lyapunov

Una función continua $V: \mathfrak{R}^n \times \mathfrak{R}_+ \rightarrow \mathfrak{R}$ es una función candidata de Lyapunov si,

- a) $V(x, t)$ es una función definida positiva en B_r .
- b) $\frac{\partial V(x, t)}{\partial t}$ y $\frac{\partial V(x, t)}{\partial x}$ existen en B_r y son continuas con respecto a x y t .

Supóngase que está resuelto el problema de existencia y unicidad de soluciones de (6.08) en un entorno del origen $B_r \in \mathfrak{R}^n$ y para $t \geq t_0$, además se supone que el origen $x = 0$ es un equilibrio de (6.08).

Derivada de una función candidata de Lyapunov

Sea $V(x, t)$ una función candidata de Lyapunov. La derivada de $V(x, t)$ a lo largo de las trayectorias de (6.08) está dado por la igualdad (6.20),

$$\dot{V}(x, t) = \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} f(t, x) + \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} = \Delta V f + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (6.20)$$

Teorema: Estabilidad

El equilibrio en el origen es estable si existe una función continuamente diferenciable, localmente definida positiva V y $r > 0$ tal que (6.21):

$$\dot{V}(x, t) \leq 0 \quad \forall t \geq t_0, \forall x \in B_r \quad (6.11)$$

Teorema: Estabilidad uniforme

El equilibrio en el origen es uniformemente estable si existe una función continuamente diferenciable, localmente definida positiva y decreciente V y $r > 0$ tal que (6.22):

$$\dot{V}(x, t) \leq 0 \quad \forall t \geq 0, \forall x \in B_r \quad (6.22)$$

Teorema. Estabilidad asintótica

El equilibrio en el origen es uniformemente asintóticamente estable si existe una función localmente definida positiva y continuamente diferenciable y decreciente V tal que $-\dot{V}(x, t)$ es localmente definida positiva.

Teorema. Estabilidad asintótica global

El equilibrio en el origen es globalmente uniformemente estable si existe una función definida positiva, continuamente diferenciable, decreciente V tal que $-\dot{V}(x, t)$ es definida positiva.

6.7 METODOLOGÍA

La metodología a utilizar para llevar a cabo los objetivos planteados responde a los lineamientos generales del método científico diferenciándose cuatro fases.

Fase Teórica

Esta fase se enmarca en:

- 1) diseño de la construcción del circuito de control para la silla de ruedas;
- 2) diseño de los circuitos de acondicionamiento para las señales de los sensores incorporados en la silla de ruedas;
- 3) la modelación y validación de los modelos cinemático y dinámico de la silla de ruedas, considerando como señales de entrada las velocidades de referencia del sistema;
- 4) el diseño y análisis del control de la silla de ruedas robótica para el posicionamiento.

Fase de Simulación

A fin de evaluar y discutir la evolución de los controladores propuestos, se desarrollará una plataforma de simulación para la silla de ruedas con interfaz en Labview. Se tratará de un simulador en línea, el cual permita al usuario una visión tridimensional del ambiente de navegación de la silla de ruedas robótica.

Fase de Experimentación

La fase de experimentación estará subdividida en dos partes:

- 1) construcción del circuito de control para silla de ruedas eléctrica, y las pruebas y ajustes de los sensores,
- 2) implementación de los algoritmos de control propuestos en la silla de ruedas, y se realizarán pruebas y ajustes de los controladores propuestos.

Fase de Validación

Se verificarán las propuestas teóricas realizadas por medio de los resultados de simulación y experimentación en la silla de ruedas automatizada.

6.8 MODELO OPERATIVO

El sistema de control automático para posicionar la silla de ruedas eléctrica está diseñado, según el siguiente esquema:

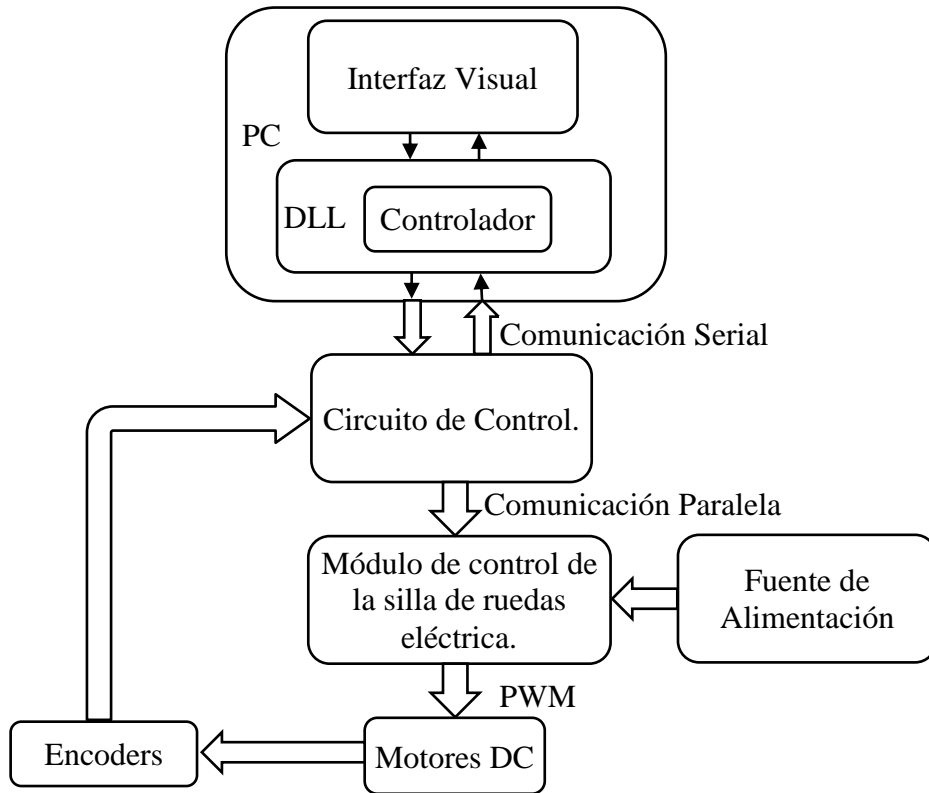


Figura 6.07: Diagrama de Bloques del Sistema de Control Propuesto

Fuente: El Investigador

A continuación se exponen detalladamente el diseño e implementación de los bloques presentados en la Figura 6.07.

6.8.1 Circuito de control

El circuito de control tiene como objetivo leer las corrientes de dos motores y dos electro trabas de la silla de ruedas por entradas analógicas, además, recibir los datos de velocidad de los encoders ubicados en los dos motores de silla de ruedas, enviar en 7 bits las velocidades de referencia al módulo de control de la silla de ruedas eléctrica, activar las electro trabas, por ultimo enviar los datos de velocidades reales y recibir las velocidades de referencia al ordenador a través de comunicación serial asíncrona.

Selección del Microcontrolador Principal

Conociendo los requerimientos para el dispositivo controlador se analizan tres propuestas en la Tabla 6.01:



















	Requerimientos	PIC16f28A	PIC16f876A	PIC16f877A
Entradas y Salidas	> 4 Entradas Analógicas, 17 salidas digitales (14 para los motores, 2 para los frenos y 1 relé de activación) y 1 puerto interrupción externa	Sin Entradas Analógicas, 12 E/S digitales, 1 puerto de Interrupción externa. 	5 Entradas Analógicas, 13 E/S digitales, 1 puerto de Interrupción externa. 	8 Entradas Analógicas, 24 E/S digitales, 1 puerto de Interrupción externa. 
Capacidad Memoria Flash	> 4Kb	2Kb 	8Kb 	8Kb 
Comunicación	Serial Asíncrona	Serial Asíncrona 	Serial Asíncrona 	Serial Asíncrona 
Código de programación	PIC Basic	PIC C, PIC Basic, etc 	PIC C, PIC Basic, etc 	PIC C, PIC Basic, etc 
Velocidad de Operación	> 4MHz	Hasta 20MHz 	Hasta 20MHz 	Hasta 20MHz 
Precio	< 10 \$	4\$ 	6\$ 	7\$ 

Tabla 6.01 Comparación de microcontroladores

Fuente: El Investigador

Como se observa en la Tabla el PIC 16F877A cumple con todos los requerimientos para el circuito de control, por lo cual se utiliza este Microcontrolador.

Funcionamiento

El circuito está constituido por un PIC Master (16F877A, cuyas características se presentan en el Anexo D), el cual realiza la función de recibir de forma serial los datos de control de velocidades de los motores y ON/OFF de las trabas electromecánicas desde la PC y enviarlos al módulo de la silla de ruedas eléctrica MODSILLA, también posee seguridades en caso de velocidades extremas o continuas por tiempos prolongados, además, recibe las velocidades reales de los motores desde dos PICs Esclavos (18F628A, ver el Anexo E) por comunicación serial asíncrona. Cada PIC Esclavo lee la señal acondicionada de un encoder (Esclavo 1 para la rueda derecha y Esclavo 2 para la rueda izquierda), y realiza el conteo de pulsos por segundo y la envía al PIC MASTER por comunicación serial asíncrona. El acondicionamiento de la señal de los encoders se realiza mediante un seguidor y un comparador de voltajes diseñados con el amplificador operacional LM324, también se incluye el disparador Schmitt del integrado 7414 con la finalidad de obtener una señal perfectamente cuadrada.

Cabe destacar que el circuito de control no posee el integrado MAX 232 para la comunicación serial debido a que por la corta distancia de conexión no resulta necesario, así como para evitar posibles errores de este integrado que es muy perceptible a daños.

La Figura 6.08 ilustra el circuito de control realizado en el entorno de Proteus 7 Professional.

Programación

Para la programación de los PICs se utiliza MicroCode Studio, en el que se desarrolla un código para el PIC Master, donde se utiliza el puerto C y D para comandar los motores, el puerto E para controlar las trabas electromecánicas y el puerto B se comunica serialmente con el computador y los microcontroladores esclavos; además, otro programa para cada PIC Esclavo que se encarga de leer las revoluciones de los encoders y enviar estos datos al PIC Master, ver el Anexo F.

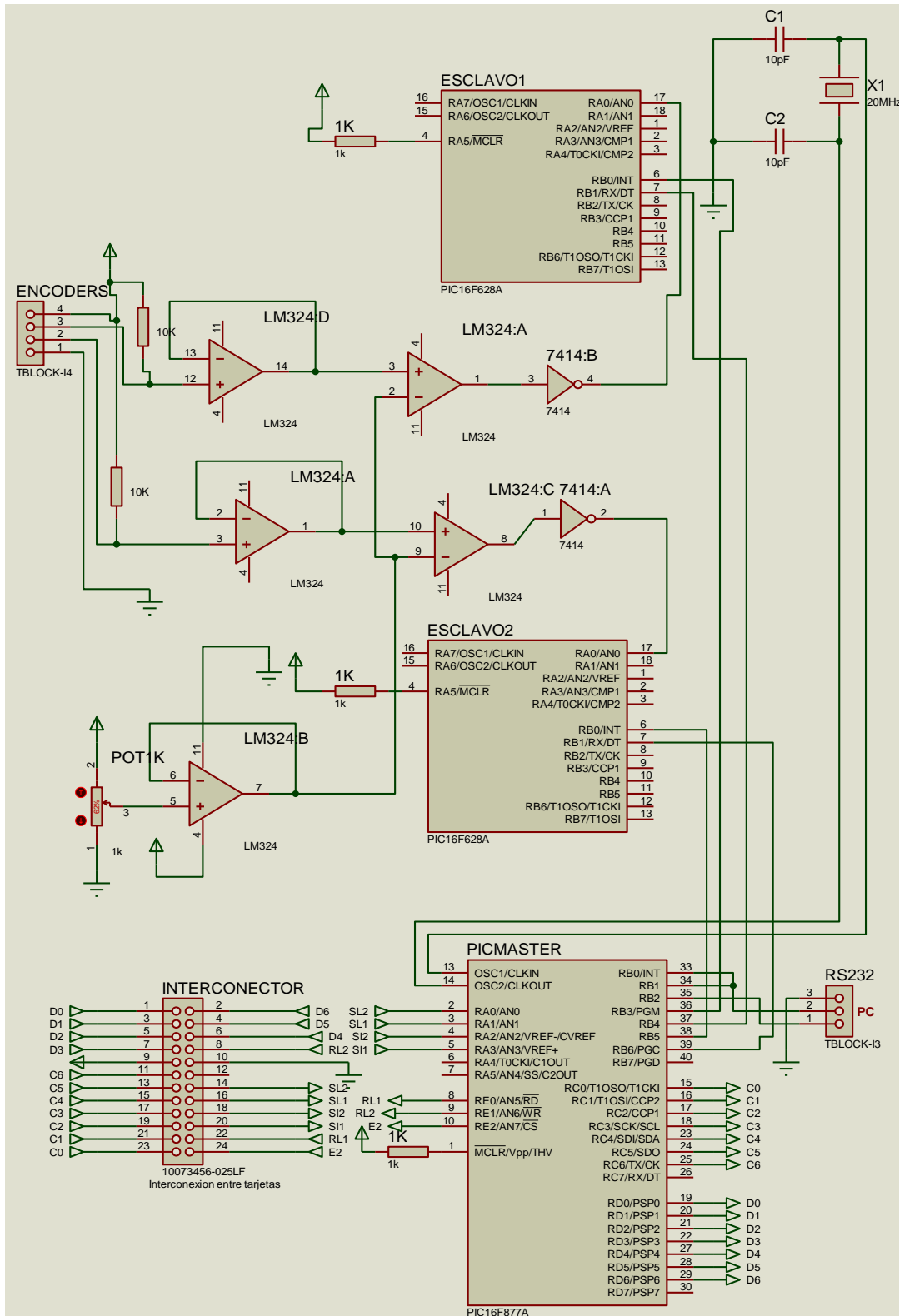


Figura 6.08 Diagrama del circuito de control en Proteus 7

Fuente: El Investigador

Codificador Óptico Incremental

Se analiza los siguientes codificadores incrementales comerciales de la marca Ibest Electrical en la Tabla 6.02:




	ISC3806-401G-200BZ3-5-24C	ISC3004-401G-360BZ1-12L	ISA6610-401G-1024BZ1-12E
Precio	80\$	100\$	280\$
Voltaje de Alimentación (Vcc)	12-24V	5-12V	5-12V
Diámetro Exterior	38mm	30mm	66mm
Imagen			
Resolución	200 PPR	360 PPR	1024 PPR
Máxima Velocidad	5000 RPM	3000 RPM	6000 RPM
Voltaje de salida	$V_h \geq 85\%$ $V_{cc}, V_i \leq 0.3V$	$V_h \geq 85\%$ $V_{cc}, V_i \leq 0.3V$	$V_h \geq 85\%$ $V_{cc}, V_i \leq 0.3V$
Clasificación IP	IP54	IP54	IP54

Tabla 6.02 Codificadores comerciales

Fuente: <http://www.ibestchina.com>

La Tabla muestra los datos de 3 codificadores incrementales del mercado, pero debido al reducido espacio de los actuadores de la silla de ruedas eléctrica es necesario fabricar un codificador que se ajuste a las dimensiones de los motores.

Para medir las velocidades de los motores se utiliza codificadores ópticos lineales cuyo funcionamiento es similar al de un codificador óptico circular. Se ubica una

línea de papel brillante con segmentos blancos y negros continuos alrededor del eje de un motor, se genera un haz de luz por medio de un LED que rebota sobre el papel brillante hacia un fototransistor que genera la señal de pulsos. Ver la Figura 6.09.

El codificador posee una resolución de 35 PPR, lo que significa que se genera un pulso por cada 10.29° que recorre el eje del motor, pero, la silla de ruedas posee una caja reductora de velocidad con una relación de 1 a 4, por lo que se transforma la resolución del codificador a 140 PPR en cada rueda motriz, esto significa un pulso por cada 2.57° .

En el Anexo G se presenta el plano eléctrico de todo el sistema, en el cual se integra: El módulo de potencia MODSILLA, el circuito de control, actuadores de la silla de ruedas y el computador.



Figura 6.09 Encoder ubicado en el eje del motor

Fuente: El Investigador

Seguridad

El Gabinete.- se instala toda la circuitería dentro de una caja de protección hecha de plástico, y se califica su grado de protección según las normas IP y Nema.

➤ **IP – 5 0**

5.- Protección contra polvo. La entrada de polvo no puede evitarse, pero el mismo no debe entrar en una cantidad tal que interfiera con el correcto funcionamiento del equipamiento.

0.- Sin protección. El agua entrará en el equipamiento en poco tiempo.

➤ **N E M A 1**

Protege contra el polvo, luz y salpicaduras indirectas, pero no es hermético al polvo; fundamentalmente previene contacto con partes energizadas; usado en interiores y bajo condiciones atmosféricas normales.

Velocidades.- el PIC maestro genera velocidad en los actuadores únicamente cuando recibe datos desde el computador, es decir, después de 5 segundos de no recibir órdenes automáticamente se detienen los motores y se activan las trabas electromecánicas. Además, existe una limitación de velocidad máxima a 1 m/s, cuando su velocidad máxima real es 1.45 m/s.

Corrientes.- El módulo de potencia MODSILLA posee una protección de corriente basado en compuertas lógicas, que desactiva los puentes H deteniendo los motores y protegiendo la circuitería.

Trabas Electromecánicas.- Estos frenos electromecánicos se activan cuando la velocidad en los motores es cero, deteniendo totalmente el movimiento de la silla de ruedas producido por propia inercia.

Botón de Parada.- Es un pulsador normalmente cerrado que desconecta completamente los motores eléctricos del módulo de potencia MODSILLA, únicamente debe utilizarse en caso de emergencia.

6.8.2 Bibliotecas de Enlace Dinámico (DLL)

La implementación de los algoritmos de control se realiza en Visual C++ en formato DLL, revisar el Anexo H, el objetivo de estos archivos es recibir valores de entrada y generar los valores de salida; estos programas incluyen el modelo matemático de la silla, las ecuaciones de identificación y validación de

parámetros, así como el algoritmo de control diseñado cuyo flujo grama se muestra en la Figura 6.10.

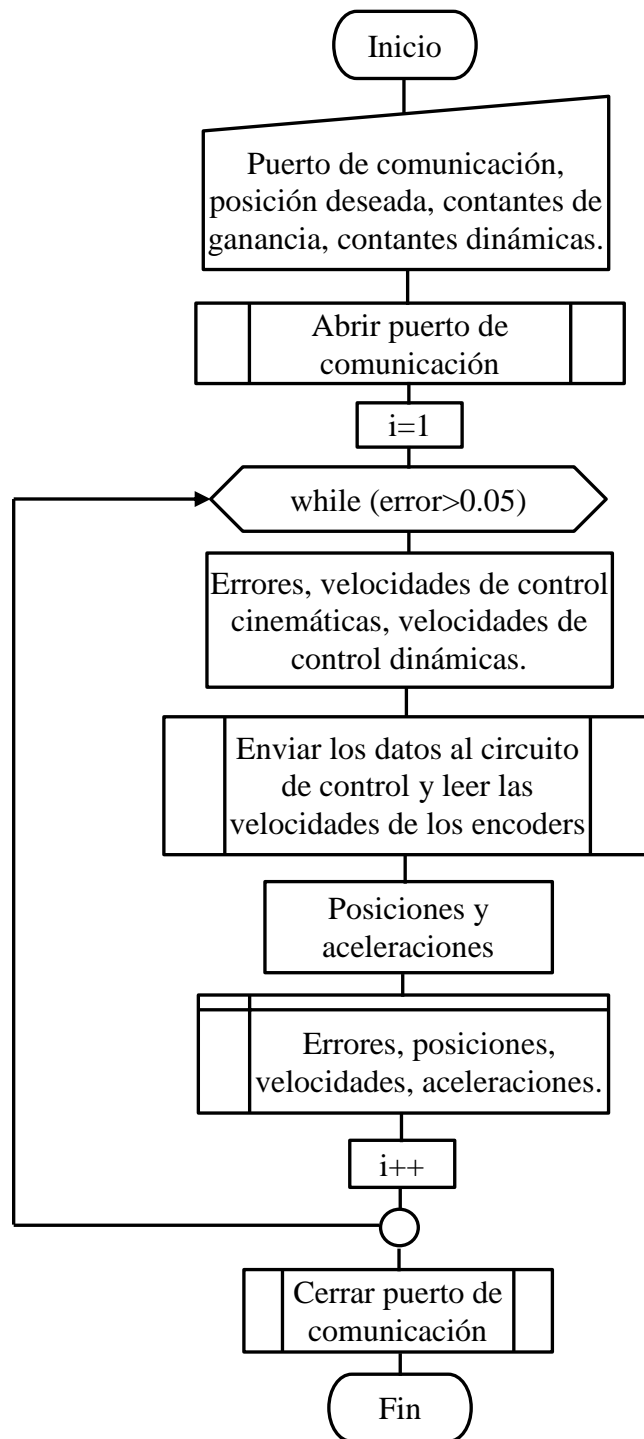


Figura 6.10 Diagrama de flujo del programa de control “control.dll”

Fuente: El Investigador

Para la interfaz visual se utiliza LabVIEW, que permite ejecutar las bibliotecas de enlace dinámico y visualizar los resultados, debido a sus avanzadas opciones de manejo e interpretación de datos permite una presentación atractiva de los resultados en graficas de datos y de simulación, revisar el Anexo I.

Este programa tiene una función que permite utilizar los dll con mucha facilidad, esta función se conoce como “call library function node”, únicamente hay que cargar el archivo DLL y el bloque genera las salidas y las entradas programadas en la biblioteca de enlace dinámico. Ver Figura 6.11.

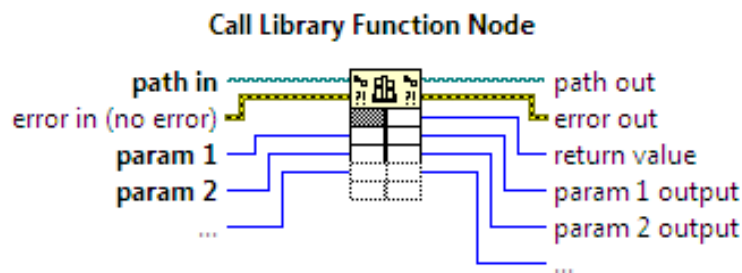


Figura 6.11 Función “call library function node” de LabVIEW

Fuente: El Investigador

6.8.3 Modelación Matemática de la Silla De Ruedas

6.8.3.1 Modelo cinemático

La Figura 6.12 muestra la vista inferior de la silla de ruedas donde la posición está definida por el punto G , donde $\{R\}$ representa el sistema de referencia coordenadas globales, G representa el centro de masa y se encuentra ubicado a una distancia a por delante del centro del eje que une las ruedas, siendo (x, y) la posición y ψ la orientación del punto G respecto a $\{R\}$.

La velocidad lineal de la silla de ruedas se determina promediando la velocidad de la rueda derecha y la velocidad de la rueda izquierda según la ecuación (6.23).

$$u = \frac{u_d + u_i}{2} \quad (6.23)$$

donde, u representa la velocidad lineal, u_d y u_i son las velocidades lineales de desplazamiento de la rueda derecha e izquierda, respectivamente.

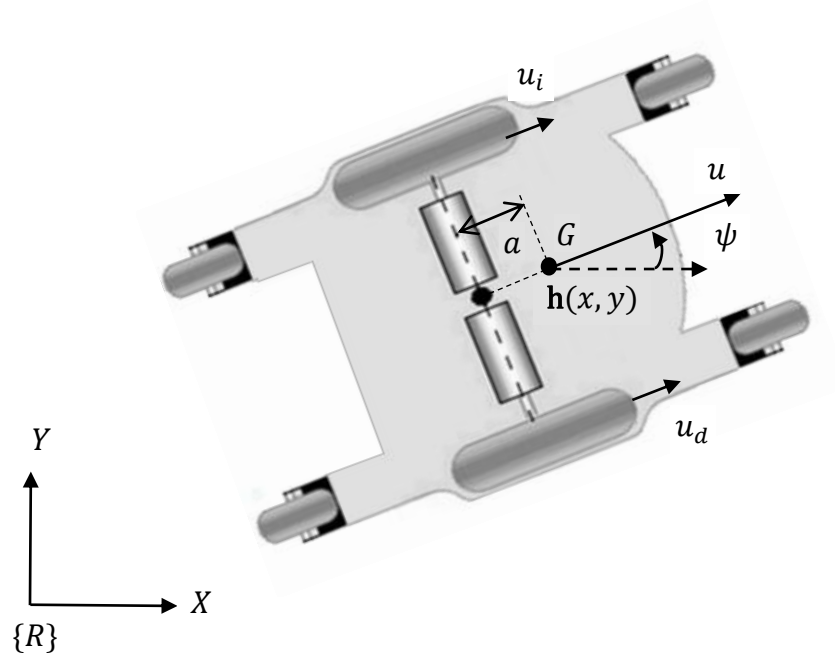


Figura 6.12 Parámetros del modelo cinemático de la silla de ruedas.

Fuente: El Investigador

Por otro lado, si un observador se sitúa sobre la rueda izquierda, vería que la rueda derecha pasa a una velocidad $(u_d - u_i)$. Por lo tanto la velocidad angular del se puede definir con la fórmula (6.24),

$$\omega = \frac{u_d - u_i}{d} \quad (6.24)$$

donde, ω es la velocidad angular del robot móvil y d la distancia entre las ruedas.

La restricción de velocidad no holonómica determina que sólo se puede mover perpendicularmente al eje que une las ruedas, y está dada en la expresión (6.25):

$$\dot{x} \operatorname{sen}(\psi) - \dot{y} \cos(\psi) + a\dot{\psi} = 0 \quad (6.25)$$

Por lo que, el modelo cinemático considerando la restricción no holonómica, puede ser representado por la ecuación (6.26),

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \psi - a \omega \operatorname{sen} \psi \\ \dot{y} &= u \operatorname{sen} \psi + a \omega \cos \psi \\ \dot{\psi} &= \omega \end{aligned} \quad (6.26)$$

El movimiento de la silla de ruedas está representado por los estados $[x, y, \psi]$ y las entradas $[u, \omega]$.

6.8.3.2 Modelo Dinámico.

Basado en los aportes del trabajo de Zhang et al., [28] se obtienen modelos con diferentes entradas a las usadas por Zhang y se anulan ciertos elementos cuando las variables medidas son despreciables. A continuación se presenta el modelado dinámico de la silla de ruedas en la Figura 6.13, dónde:

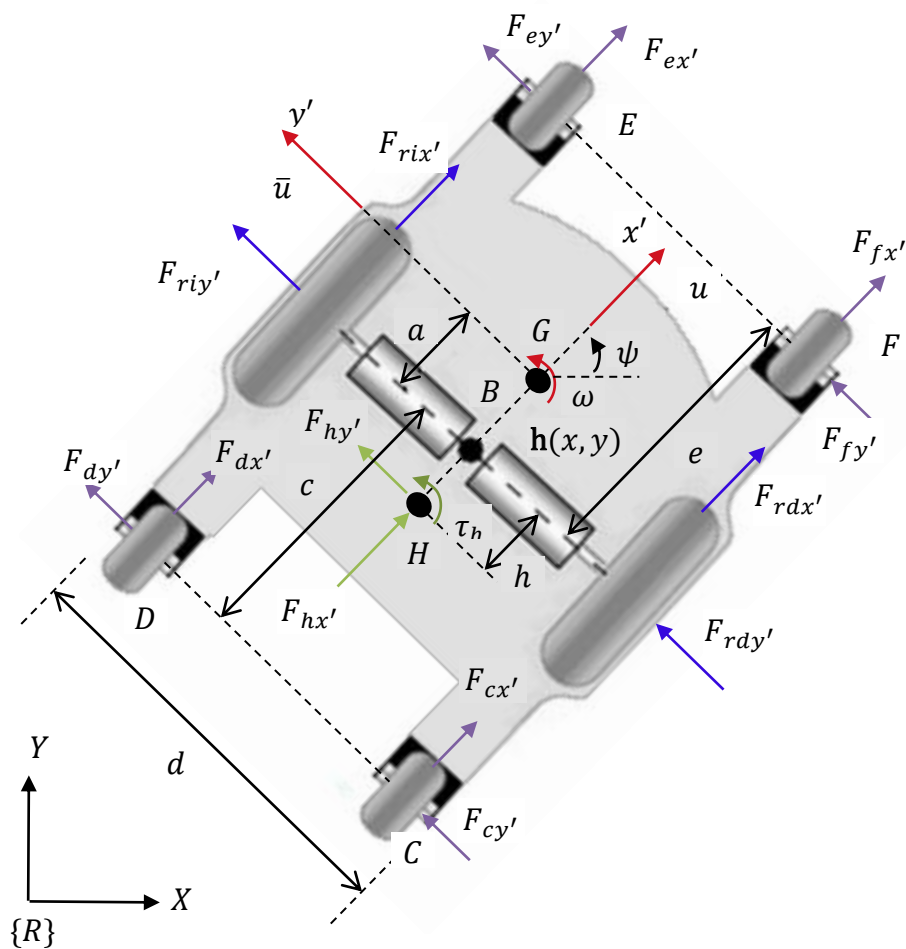


Figura 6.13 Parámetros del modelo dinámico de la silla de ruedas.

Fuente: El Investigador

- G es el centro de masa,
- B es el centro de la línea que une a las dos ruedas,
- $h[x \ y]^T$ es el vector posición del centro de masa,

u y \bar{u}	son las velocidades longitudinal y lateral del centro de masa,
ω y ψ	son la velocidad angular y orientación de la silla móvil,
a, c, e, d y h	son distancias,
$F_{rdx'}$ y $F_{rdy'}$	son fuerzas longitudinal y lateral en el neumático de la rueda derecha,
$F_{rix'}$ y $F_{riy'}$	son fuerzas longitudinal y lateral en el neumático de la rueda izquierda,
$F_{hx'}$ y $F_{hy'}$	son fuerzas longitudinal y lateral ejercidas sobre H por el usuario,
τ_h	es el momento ejercido por el usuario,
$F_{cx'}$ y $F_{cy'}$; $F_{dx'}$ y $F_{dy'}$ sobre $F_{ex'}$ y $F_{ey'}$; $F_{fx'}$ y $F_{fy'}$	son fuerzas longitudinal y lateral ejercidas C, D, E, F por cada rueda libre.

Las ecuaciones de fuerzas y momentos de la silla de ruedas son las expresiones de (6.27):

$$\begin{aligned}
\Sigma F_{x'} &= m(\dot{u} - \bar{u}\omega) = F_{rdx'} + F_{rix'} + F_{hx'} + F_{cx'} + F_{dx'} + F_{ex'} + F_{fx'} \\
\Sigma F_{y'} &= m(\dot{\bar{u}} - u\omega) = F_{rdy'} + F_{riy'} + F_{hy'} + F_{cy'} + F_{dy'} + F_{ey'} + F_{fy'} \quad (6.27) \\
\Sigma M_z &= I_z \dot{\omega} = \frac{d}{2}(F_{rdx'} - F_{rix'}) - a(F_{rdy'} + F_{riy'}) - (h + a)F_{hx'} - \\
&(c + a)(F_{dy'} + F_{cy'}) + (e - a)(F_{fy'} + F_{ey'}) + \frac{d}{2}(F_{cx'} + F_{fx'} - F_{dx'} - \\
&F_{ex'}) + \tau_h
\end{aligned}$$

Las ecuaciones de las velocidades u , ω y \bar{u} se pueden definir por la ecuaciones de (6.28).

$$u = \frac{r}{2}(\omega_d + \omega_i) \quad \omega = \frac{r}{d}(\omega_d - \omega_i) \quad \bar{u} = \frac{ar}{d}(\omega_d - \omega_i) \quad (6.28)$$

donde, r es el radio de la rueda izquierda y derecha; ω_i, ω_d son las velocidades angulares de la rueda izquierda y derecha, respectivamente.

En cuanto el comportamiento de los motores se conoce los modelos de las ecuaciones (6.29).

$$\tau_d = \frac{k_a(v_d - k_b\omega_d)}{R_a} \quad \tau_i = \frac{k_a(v_i - k_b\omega_i)}{R_a} \quad (6.29)$$

donde, v_d y v_i son los voltajes de entrada aplicada a los motores derecho e izquierdo; k_a es la constante de troque multiplicado por la contante de reducci3n, k_b es la constante contra electromotriz por la contante de reducci3n, R_a es la resistencia el3ctrica, τ_d y τ_i son los torques de los motores derecho e izquierdo multiplicados por la constante de reducci3n.

Del an3lisis din3mico de las combinaciones rueda-motor se obtienen las siguientes ecuaciones (6.30).

$$\begin{aligned} I_e\dot{\omega}_d + B_e\omega_d &= \tau_d - F_{rdx'}R_t \\ I_e\dot{\omega}_i + B_e\omega_i &= \tau_i - F_{rix'}R_t \end{aligned} \quad (6.30)$$

donde, I_e y B_e son el momento de inercia y el coeficiente de fricci3n viscosa respectivamente, de la combinaci3n rotor del motor, caja de reducci3n y rueda, y R_t es el radio nominal del neum3tico.

De las ecuaciones en (6.26), si se desprecian las fuerzas y torques ejercidas por el usuario, y las fuerzas ejercidas en las ruedas libre, y resolviendo el sistema de ecuaciones, obtenemos las ecuaciones en (6.31):

$$\begin{aligned} \sum F_{x'} &= m(\dot{u} - \bar{u}\omega) = F_{rdx'} + F_{rix'} \quad * \left(-\frac{d}{2}\right) \\ \sum F_{y'} &= m(\dot{u} + u\omega) = F_{rdy'} + F_{riy'} \quad * (a) \\ \sum M_z &= I_z\dot{\omega} = \frac{d}{2}(F_{rdx'} - F_{rix'}) - a(F_{rdy'} + F_{riy'}) \\ \sum F_{x'} + \sum M_z &= F_{rix'} = \frac{m}{2}(\dot{u} - \bar{u}\omega) - \frac{am}{d}(\dot{u} + u\omega) - \frac{I_z\dot{\omega}}{d} \\ \sum F_{y'} + \sum M_z &= F_{rdx'} = \frac{m}{2}(\dot{u} - \bar{u}\omega) + \frac{am}{d}(\dot{u} + u\omega) + \frac{I_z\dot{\omega}}{d} \end{aligned} \quad (6.31)$$

De las ecuaciones en (6.28), se puede determinar las igualdades de (6.32),

$$\omega_i = \frac{u}{r} - \frac{\omega d}{2r} \quad \omega_d = \frac{u}{r} + \frac{\omega d}{2r} \quad \bar{u} = a\omega$$

$$\dot{\omega}_l = \frac{\dot{u}}{r} - \frac{\dot{\omega}d}{2r} \quad \dot{\omega}_d = \frac{\dot{u}}{r} + \frac{\dot{\omega}d}{2r} \quad \dot{u} = a\dot{\omega} \quad (6.32)$$

Al remplazar (6.29) y (6.31) en (6.30), se encuentran las siguientes ecuaciones de (6.33),

$$I_e \dot{\omega}_d + B_e \omega_d = \frac{k_a(v_d - k_b \omega_d)}{R_a} - \left(\frac{m}{2} (\dot{u} - \bar{u}\omega) + \frac{am}{d} (\dot{u} + u\omega) + \frac{I_z \dot{\omega}}{d} \right) R_t$$

$$I_e \dot{\omega}_i + B_e \omega_i = \frac{k_a(v_i - k_b \omega_i)}{R_a} - \left(\frac{m}{2} (\dot{u} - \bar{u}\omega) - \frac{am}{d} (\dot{u} + u\omega) - \frac{I_z \dot{\omega}}{d} \right) R_t \quad (6.33)$$

De las formulas (6.32) y (6.33) se obtiene las siguientes expresiones de 6.34.

$$I_e \left(\frac{\dot{u}}{r} + \frac{\dot{\omega}d}{2r} \right) + B_e \left(\frac{u}{r} + \frac{\omega d}{2r} \right) = \frac{k_a(v_d - k_b(\frac{u}{r} + \frac{\omega d}{2r}))}{R_a}$$

$$- \left(\frac{m}{2} (\dot{u} - \bar{u}\omega) + \frac{am}{d} (a\dot{\omega} + u\omega) + \frac{I_z \dot{\omega}}{d} \right) R_t$$

$$I_e \left(\frac{\dot{u}}{r} - \frac{\dot{\omega}d}{2r} \right) + B_e \left(\frac{u}{r} - \frac{\omega d}{2r} \right) = \frac{k_a(v_i - k_b(\frac{u}{r} - \frac{\omega d}{2r}))}{R_a}$$

$$- \left(\frac{m}{2} (\dot{u} - a\omega^2) - \frac{am}{d} (a\dot{\omega} + u\omega) - \frac{I_z \dot{\omega}}{d} \right) R_t \quad (6.34)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones en (6.34) y considerando que $v_u = \frac{v_d + v_i}{2}$ y $v_\omega = \frac{v_d - v_i}{2}$, se obtiene (6.35):

$$\left(\frac{2I_e + mrR_t}{r} \right) \dot{u} = amR_t \omega^2 - \frac{2u}{r} \left(\frac{k_a k_b}{R_a} + B_e \right) + \frac{2k_a v_u}{R_a}$$

$$\left(\frac{I_e d^2 + 2rR_t(I_z + a^2 m)}{rd} \right) \dot{\omega} = -\frac{2amR_t u \omega}{d} - \frac{d\omega}{r} \left(\frac{k_a k_b}{R_a} + B_e \right) + \frac{2k_a v_\omega}{R_a} \quad (6.35)$$

Agrupando los parámetros dinámicos en contantes simplificadas se tiene las ecuaciones del modelo dinámico de (6.36).

$$\dot{u} = \frac{\bar{\zeta}_3}{\bar{\zeta}_1} r R_t \omega^2 - 2 \frac{\bar{\zeta}_4}{\bar{\zeta}_1} u + \frac{2r v_u}{\bar{\zeta}_1}$$

$$\dot{\omega} = -2\frac{\bar{\zeta}_3}{\zeta_2}rR_t u\omega - \frac{\bar{\zeta}_4}{\zeta_2}d^2\omega + \frac{2rdv_\omega}{\zeta_2} \quad (6.36)$$

donde, los parámetros dinámicos dinámicas son la igualdades de (6.37):

$$\begin{aligned} \bar{\zeta}_1 &= \frac{R_a}{k_a}(2I_e + mrR_t) \\ \bar{\zeta}_2 &= \frac{R_a}{k_a}(I_e d^2 + 2rR_t(I_z + a^2m)) \end{aligned} \quad (6.37)$$

$$\bar{\zeta}_3 = \frac{R_a}{k_a}(am)$$

$$\bar{\zeta}_4 = \frac{R_a}{k_a}\left(\frac{k_a k_b}{R_a} + B_e\right)$$

En el modelo (6.36), v_u y v_ω son los valores de entrada, pero este modelo solo es útil cuando se pueden manejar directamente los voltajes de los motores; en el caso de la silla de ruedas eléctrica permite controlar las velocidades de referencia y no permiten manejar directamente los voltajes de los motores. Por lo tanto, es muy útil expresar el modelo del robot móvil en una forma más apropiada, considerando como señales de control a las velocidades de referencia lineal y angular. Para este propósito, se necesita considerar los siguientes controladores de velocidad de las expresiones (6.38).

$$\begin{aligned} v_u &= k_{PT}(u_{ref} - u) - \dot{u}k_{DT} \\ v_\omega &= k_{PR}(\omega_{ref} - \omega) - \dot{\omega}k_{DR} \end{aligned} \quad (6.38)$$

Reemplazando las ecuaciones de (6.38) en (6.35) se obtienen (6.39):

$$\begin{aligned} \left(\frac{2I_e + mrR_t + \frac{2k_a}{R_a}rk_{DT}}{r}\right)\dot{u} &= amR_t\omega^2 - 2u\left(\frac{k_a k_b}{rR_a} + \frac{B_e}{r} + \frac{k_a k_{PT}}{R_a}\right) + \frac{2k_a k_{PT}u_{ref}}{R_a} \\ \left(\frac{I_e d^2 + 2rR_t(I_z + a^2m) + \frac{2k_a}{R_a}rdk_{DR}}{rd}\right)\dot{\omega} &= -\frac{2amR_t u\omega}{d} - \omega\left(\frac{dk_a k_b}{rR_a} + \frac{B_e d}{r} + \frac{2k_a k_{PR}}{R_a}\right) + \\ &\frac{2k_a k_{PR}\omega_{ref}}{R_a} \end{aligned} \quad (6.39)$$

Con lo cual el modelo modificado agrupando las constantes en nuevos parámetros dinámicos, se obtendría (6.40):

$$\begin{aligned}\dot{u} &= \frac{\zeta_3}{\zeta_1} \omega^2 - \frac{\zeta_4}{\zeta_1} u + \frac{u_{ref}}{\zeta_1} \\ \dot{\omega} &= -\frac{\zeta_5}{\zeta_2} u \omega - \frac{\zeta_6}{\zeta_2} \omega + \frac{\omega_{ref}}{\zeta_2}\end{aligned}\quad (6.40)$$

donde, las constantes dinámicas son las expresiones (6.41):

$$\begin{aligned}\zeta_1 &= \frac{\frac{R_a}{k_a}(2I_e + mrR_t) + 2rk_{DT}}{2rk_{PT}} \\ \zeta_2 &= \frac{\frac{R_a}{k_a}(I_e d^2 + 2rR_t(I_z + a^2m)) + 2rdk_{DR}}{2rdk_{PR}} \\ \zeta_3 &= \frac{\frac{R_a}{k_a}(amR_t)}{2k_{PT}} \\ \zeta_4 &= \frac{\frac{R_a(k_a k_b + B_e)}{R_a}}{rk_{PT}} + 1 \\ \zeta_5 &= \frac{\frac{R_a}{k_a}(amR_t)}{dk_{PR}} \\ \zeta_6 &= \frac{\frac{R_a}{k_a}\left(\frac{k_a k_b}{R_a} + B_e\right)d}{2rk_{PR}} + 1\end{aligned}\quad (6.41)$$

El modelo dinámico de (6.40) se puede expresar matricialmente de la manera indicada en (6.42):

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\zeta_3}{\zeta_1} \omega^2 - \frac{\zeta_4}{\zeta_1} u \\ -\frac{\zeta_5}{\zeta_2} u \omega - \frac{\zeta_6}{\zeta_2} \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\zeta_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\zeta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix}\quad (6.42)$$

Reagrupando (6.42) puede ser escrita como (6.43)

$$\begin{bmatrix} \zeta_1 & 0 \\ 0 & \zeta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \zeta_4 & \zeta_3 \omega \\ \zeta_5 \omega & \zeta_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix} \quad (6.43)$$

o en una forma compacta según (6.44)

$$\mathbf{H}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \mathbf{v}_{ref} \quad (6.44)$$

donde \mathbf{v}_{ref} es el vector de las velocidades de referencia, \mathbf{v} es el vector de las velocidades reales de la silla móvil.

Agrupando los parámetros dinámicos de (6.43) se obtiene la parametrización lineal de (6.45):

$$\begin{bmatrix} \dot{u} & 0 & -\omega^2 & u & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\omega} & 0 & 0 & u\omega & \omega \end{bmatrix} \boldsymbol{\zeta} = \begin{bmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix} \quad (6.45)$$

donde: $\boldsymbol{\zeta} = [\zeta_1 \ \zeta_2 \ \zeta_3 \ \zeta_4 \ \zeta_5 \ \zeta_6]^T$ contiene los parámetros dinámicos que hacen útil el modelo, para determinar estos valores se realiza la identificación paramétrica.

6.8.3.3 Identificación paramétrica

Para la identificación se utiliza la ecuación (6.45), expresada en (6.46):

$$\mathbf{Z}\boldsymbol{\zeta} = \mathbf{Y} \quad (6.46)$$

donde \mathbf{Z} es la matriz de regresión, la cual está compuesta por funciones conocidas, $\boldsymbol{\zeta}$ es el vector de parámetros desconocidos, y \mathbf{Y} representa un vector de salida del modelo de regresión.

Para utilizar la ecuación (6.46) en la identificación, es necesario medir las aceleraciones, lo que se puede hacer con acelerómetros. Sin embargo, se tiene la opción de usar el modelo de regresión dinámico filtrado. La idea clave es filtrar de ambos lados del modelo de regresión con un filtro estable estrictamente propio. Para este fin se utiliza el filtro expresado en (6.47):

$$f(s) = \frac{\lambda}{s+\lambda} \quad , \quad \text{donde } \lambda > 0 \quad (6.47)$$

Obteniendo la igualdad (6.48),

$$\begin{bmatrix} \frac{s\lambda}{s+\lambda}u & 0 & \frac{\lambda}{s+\lambda}\omega^2 & \frac{\lambda}{s+\lambda}u & 0 & 0 \\ 0 & \frac{s\lambda}{s+\lambda}\omega & 0 & 0 & \frac{\lambda}{s+\lambda}u\omega & \frac{\lambda}{s+\lambda}\omega \end{bmatrix} \boldsymbol{\varsigma} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{s+\lambda}u_{ref} \\ \frac{\lambda}{s+\lambda}\omega_{ref} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}_F \boldsymbol{\varsigma} = \mathbf{Y}_F \quad (6.48)$$

Con el fin de realizar la identificación, se apilarán las mediciones fundamentales, obtenidas en diferentes instantes de tiempo, de la forma (6.49):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{F1}(0) \\ \vdots \\ \mathbf{Z}_{F1}(q) \\ \mathbf{Z}_{F2}(0) \\ \vdots \\ \mathbf{Z}_{F2}(q) \end{bmatrix} \boldsymbol{\varsigma} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{F1}(0) \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_{F1}(q) \\ \mathbf{Y}_{F2}(0) \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_{F2}(q) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}_{FP} \boldsymbol{\varsigma} = \mathbf{Y}_{FP} \quad (6.49)$$

donde, q es el último período de muestreo del experimento, $\mathbf{Z}_{Fi}(0)$ es un vector fila formado por la fila i de la matriz $\mathbf{Z}_F(k)$, $\mathbf{Y}_{Fi}(0)$ es un valor de la fila i del vector $\mathbf{Y}_F(k)$.

Para estimar los parámetros del modelo se utiliza el método de mínimos cuadrados (6.01) y (6.07), del cual se obtiene la ecuación (6.50).

$$\mathbf{Z}_{FP}^T \mathbf{Z}_{FP} \boldsymbol{\varsigma} = \mathbf{Z}_{FP}^T \mathbf{Y}_{FP}$$

$$\boldsymbol{\varsigma} = (\mathbf{Z}_{FP}^T \mathbf{Z}_{FP})^{-1} \mathbf{Z}_{FP}^T \mathbf{Y}_{FP} \quad (6.50)$$

Las señales de excitación elegidas son las de (6.51):

$$u_{ref} = A_1 \text{sen}(\beta_1 t) + A_1 \text{sen}(\beta_2 t) + \dots + A_1 \text{sen}(\beta_6 t)$$

$$\omega_{ref} = A_2 \text{sen}(\beta_1 t) + A_2 \text{sen}(\beta_2 t) + \dots + A_2 \text{sen}(\beta_6 t) \quad (6.51)$$

donde A_i y β_j son constantes. Las señales u_{ref} y ω_{ref} son iguales salvo por las ganancias. Esto es valioso en la experimentación debido a que la silla se moverá

en una trayectoria circular de radio A_1/A_2 durante toda la identificación, con lo cual se conocerá a priori el área física necesaria para la identificación.

6.8.3.4 Identificación de la Silla de Ruedas Eléctrica

Para la identificación se utiliza las siguientes constantes de la ecuación de velocidades de control:

$$A_1 = 0.3, A_2 = 0.3, \beta_1 = 1, \beta_2 = 0.9, \beta_3 = 0.8, \beta_4 = 0.7, \beta_5 = 0.6, \beta_6 = 0.5.$$

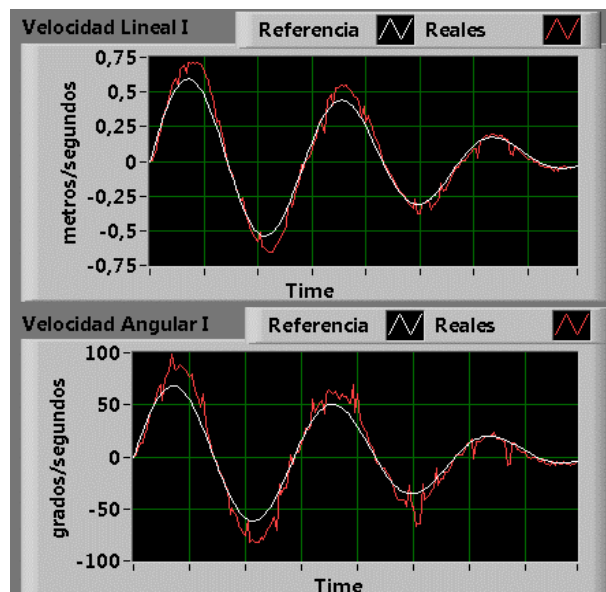


Figura 6.14 Identificación paramétrica de la silla móvil.

Fuente: El Investigador

En la Figura 6.14 se puede observar un error de velocidad excesivo, para lo cual es necesario aplicar la compensación dinámica propuesta. Para lo cual se encontraron los siguientes parámetros dinámicos (ζ).

$$\bar{\zeta}_1 = 0.3696, \bar{\zeta}_2 = 0.2096, \bar{\zeta}_3 = -0.0002, \bar{\zeta}_4 = 1.041, \bar{\zeta}_5 = -0.187, \bar{\zeta}_6 = 1.023.$$

6.8.3.5 Validación de la Silla de Ruedas Eléctrica

Para la validación se utiliza los parámetros dinámicos (ζ) encontrados y se aplica las ecuaciones (6.52):

$$u_{ref} = \sqrt{0.1^2 + (0.1\pi \cos(0.2\pi t))^2}$$

$$\omega_{ref} = \frac{-0.15\pi^2 \text{sen}(0.2\pi t)}{1 + \pi^2 \cos^2(0.2\pi t)} \quad (6.52)$$

La Figura 6.15 indica una disminución notable del error de velocidad, demostrando la importancia de un compensador dinámico.

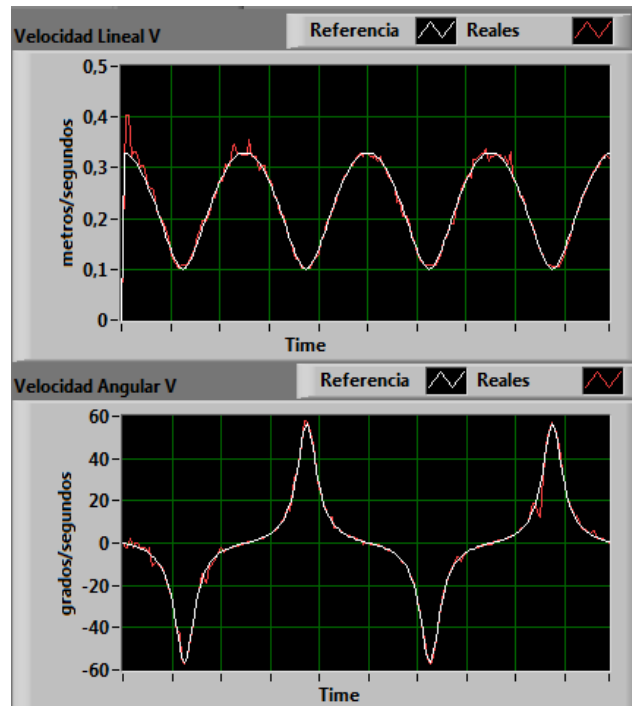


Figura 6.15 Validación de parámetros dinámicos de la silla móvil.

Fuente: El Investigador

6.8.4 Diseño del Controlador

6.8.4.1 Controlador Cinemático para el Posicionamiento sin Orientación Final

Se considera a la silla móvil posicionada a cualquier distinta de cero del referencial destino $\{R_p\}$ (ver la Figura 6.16) y se asume, como vector de variables de estado a $[\rho \ \alpha]^T$, el cual existe para cualquier $\rho > 0$. Luego el sistema de ecuaciones (6.53) que describe el movimiento del vehículo.

$$\begin{aligned}\dot{\rho} &= -u\cos(\alpha) \\ \dot{\alpha} &= -\omega + \frac{u\sin(\alpha)}{\rho}\end{aligned}\quad (6.53)$$

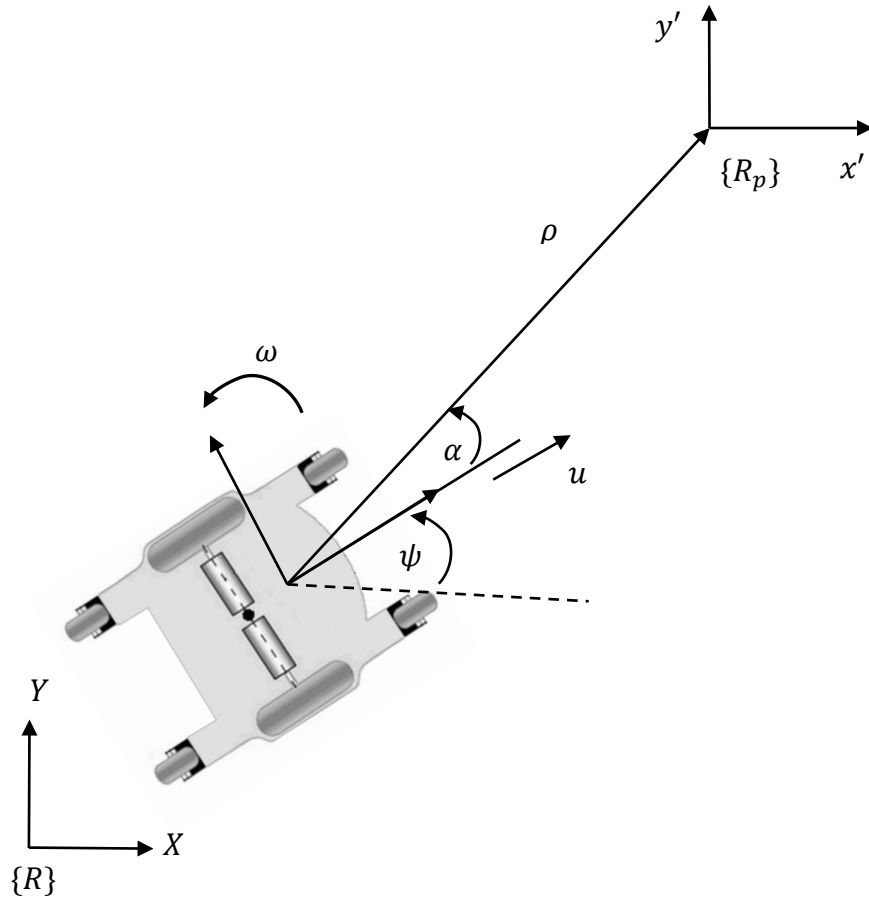


Figura 6.16 Posición de la silla móvil respecto al destino

Fuente: El Investigador

Considerando la siguiente función cuadrática candidata de Lyapunov de (6.54),

$$V(\rho, \alpha) = V_1 + V_2 = \frac{1}{2}\rho^2 + \frac{1}{2}\alpha^2 \quad (6.54)$$

La derivada temporal de la función candidata de Lyapunov (6.55),

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \rho\dot{\rho} + \alpha\dot{\alpha} \\ \dot{V} &= \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = \rho(-u\cos(\alpha)) + \alpha\left[-\omega + \frac{u\sin(\alpha)}{\rho}\right]\end{aligned}\quad (6.55)$$

En busca de la estabilidad del algoritmo de control se realizan cambios en la ecuación (6.55), para que \dot{V}_1 sea no positivo se puede utilizar (6.56):

$$u = k_u \tanh(\rho) \cos(\alpha) \quad \text{con } k_u > 0 \quad (6.56)$$

donde el coeficiente $k_u = |u_{max}|$

Y para conseguir un \dot{V}_2 negativo se puede usar (6.57):

$$\omega = k_\omega \alpha + k_u / \rho \tanh(\rho) \sin(\alpha) \cos(\alpha); \quad \text{con } k_\omega > 0 \quad (6.57)$$

Reemplazando (6.56) y (6.57) en (6.55), tenemos (6.58).

$$\dot{V} = -\rho k_u \tanh(\rho) \cos^2(\alpha) + -k_\omega \alpha^2 \quad (6.58).$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \rho(t) \\ \alpha(t) \end{cases} \rightarrow 0 \quad \text{con } t \rightarrow \infty$$

La cual resulta ser una definida negativa, esto implica que $\rho(t), \alpha(t)$ converger globalmente y asintóticamente a cero.

6.8.4.2 Compensación dinámica

En el controlador propuesto se consideró que $\mathbf{v} \equiv \mathbf{v}_c$, donde $\mathbf{v} = [u \ \omega]^T$ son las velocidades reales de la silla de ruedas y $\mathbf{v}_c = [u_c \ \omega_c]^T$ son las velocidades calculadas por el controlador cinemático. Sin embargo, esto no siempre es posible en contextos reales, el error de velocidad se define en la ecuación (6.59):

$$\tilde{\mathbf{v}} = \mathbf{v}_c - \mathbf{v} \quad (6.59)$$

Esto motiva a realizar un controlador de compensación dinámica basado en la dinámica inversa de la silla móvil, para lo cual se considera que se conoce el modelo exacto del robot móvil. La Figura 6.17 muestra el esquema de control en forma de cascada propuesto.

Donde, x_d y y_d son las coordenadas de la posición deseada, x y y son las coordenadas de la posición real para la silla de ruedas, $\dot{\mathbf{v}}_c = [\dot{u}_c \ \dot{\omega}_c]^T$ son las

derivadas temporales de las velocidades generadas por el control cinemático, $\tilde{\mathbf{v}} = [\tilde{u} \quad \tilde{\omega}]^T$ son los error de velocidad, y $\mathbf{v}_{ref} = [u_{ref} \quad \omega_{ref}]^T$ son las velocidades de referencia calculadas por el controlador dinámico.

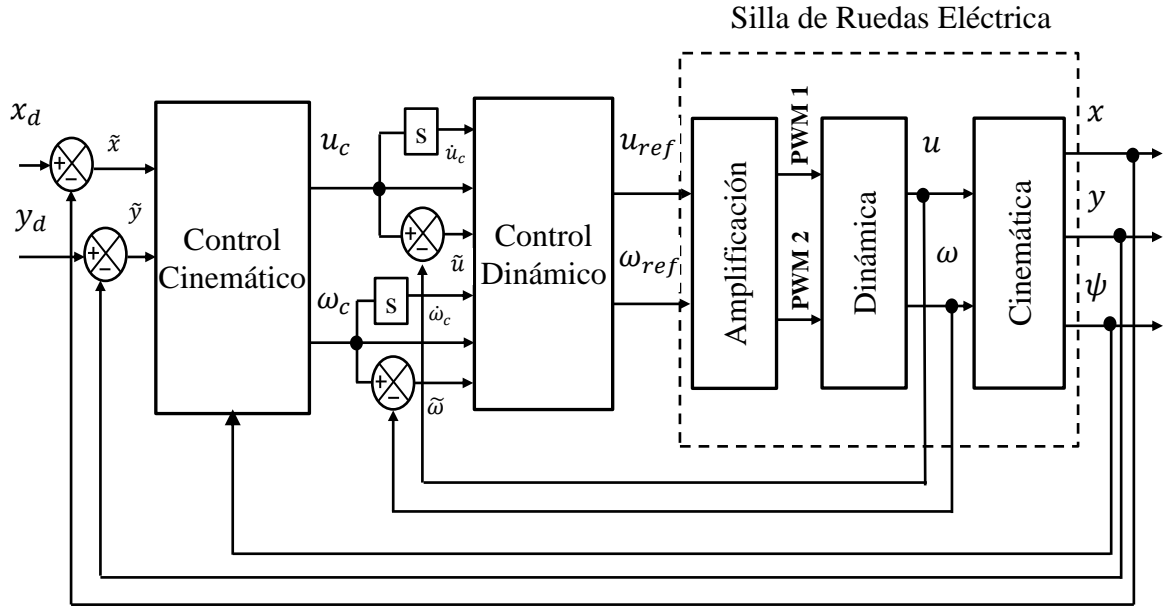


Figura 6.17 Esquema de control en cascada: control cinemático con compensación dinámica.

Fuente: El Investigador

Para diseñar la compensación dinámica se considera el modelo dinámico representado en la ecuación (6.44).

Para la ley de control se propone (6.60),

$$\mathbf{v}_{ref} = \mathbf{H}\boldsymbol{\sigma} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} \quad (6.60)$$

donde, $\boldsymbol{\sigma} = \dot{\mathbf{v}}_c + \boldsymbol{\Gamma}(\tilde{\mathbf{v}})$, la matriz $\boldsymbol{\Gamma}(\tilde{\mathbf{v}})$ está definida en (6.61) como,

$$\boldsymbol{\Gamma}(\tilde{\mathbf{v}}) = \begin{bmatrix} l_u & 0 \\ 0 & l_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tanh\left(\frac{k_u}{l_u} \tilde{u}\right) \\ \tanh\left(\frac{k_\omega}{l_\omega} \tilde{\omega}\right) \end{bmatrix} \quad (6.61).$$

Con $k_u > 0$ y $k_\omega > 0$ son constantes de ganancia, $l_u > 0$ y $l_\omega > 0$ son constantes de saturación, por lo tanto $\boldsymbol{\Gamma}(\tilde{\mathbf{v}})$ evita que la silla móvil reciba comando que estén fuera de los límites permitidos.

Si reemplazamos (6.60) en (6.44) se obtiene la igualdad (6.62):

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} &= \mathbf{H}\boldsymbol{\sigma} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} \\
 \dot{\mathbf{v}} &= \boldsymbol{\sigma} \\
 \dot{\mathbf{v}} &= \dot{\mathbf{v}}_c + \boldsymbol{\Gamma}(\tilde{\mathbf{v}}) \\
 \dot{\tilde{\mathbf{v}}} + \boldsymbol{\Gamma}(\tilde{\mathbf{v}}) &= \mathbf{0} \\
 \dot{\tilde{\mathbf{v}}} &= -\boldsymbol{\Gamma}(\tilde{\mathbf{v}})
 \end{aligned} \tag{6.62}$$

Para el análisis de estabilidad se considera la candidata de Lyapunov (6.63):

$$V(\tilde{\mathbf{v}}) = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{v}}^T \tilde{\mathbf{v}} \tag{6.63}$$

Su primera derivada temporal (6.64):

$$\dot{V}(\tilde{\mathbf{v}}) = \tilde{\mathbf{v}}^T \dot{\tilde{\mathbf{v}}} \tag{6.64}$$

Utilizando la ecuación (6.62) en (6.64), se determina (6.65),

$$\begin{aligned}
 \dot{V}(\tilde{\mathbf{v}}) &= -\tilde{\mathbf{v}}^T \boldsymbol{\Gamma}(\tilde{\mathbf{v}}) < 0 \\
 \dot{V}(\tilde{\mathbf{v}}) &= -[\tilde{u} \quad \tilde{\omega}] \begin{bmatrix} l_u & 0 \\ 0 & l_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tanh\left(\frac{k_u}{l_u} \tilde{u}\right) \\ \tanh\left(\frac{k_\omega}{l_\omega} \tilde{\omega}\right) \end{bmatrix} < 0
 \end{aligned} \tag{6.65}$$

Se puede concluir que $\tilde{\mathbf{v}} \rightarrow 0$ con $t \rightarrow \infty$, con lo que se cumple el objetivo de control.

6.8.4.3 Resultados de la Simulación

Para simular el control de posicionamiento de la silla móvil se utilizan los parámetros dinámicos ($\bar{\boldsymbol{\zeta}}$) hallados en la identificación y se proponen las siguientes constantes de ganancia $k_u = 0.6, k_\omega = 0.5, k_\psi = 3$ y el objetivo es posicionarse en $x_d = 2, y_d = 0$.

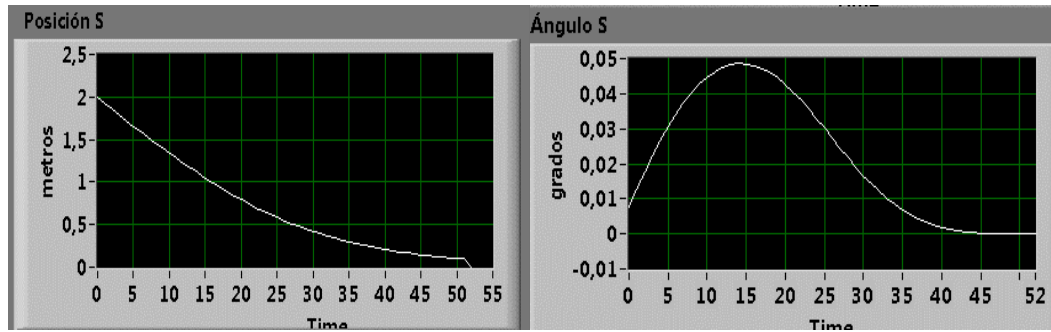


Figura 6.18 Errores de la simulación del control de posición de la silla móvil

Fuente: El Investigador

En la Figura 6.18 se puede observar un correcto funcionamiento de la simulación del control de posición.

6.8.6.4 Resultados de la Experimentación

Para aprobar el control de posicionamiento de la silla móvil se utilizan los parámetros dinámicos ($\bar{\zeta}$) hallados en la identificación y se proponen las siguientes constantes de ganancia $k_u = 1.5, k_\omega = 0.15, k_\psi = 0.5$ y el objetivo es posicionarse en $x_d = 2, y_d = 0$.

En la Figuras 6.19 se puede observar el correcto funcionamiento del control para el posicionamiento de la silla de ruedas, revisar el Anexo J:

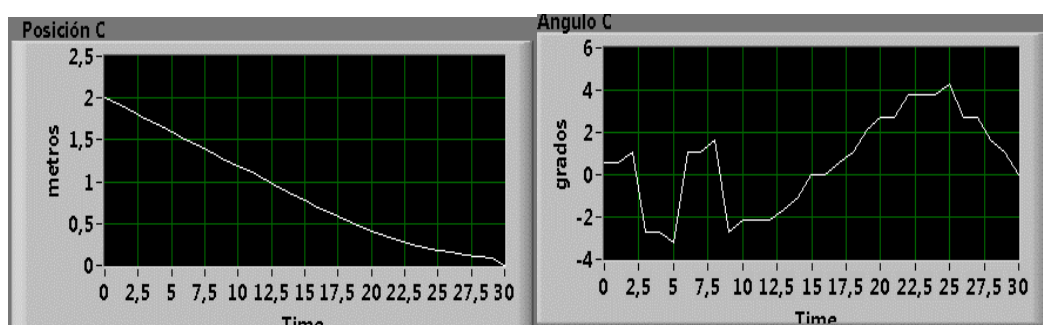


Figura 6.19 Errores del control de posición de la silla móvil.

Fuente: El Investigador

6.9 ADMINISTRACIÓN

6.9.1 Talento Humano

En la Tabla 6.03 se detalla las personas que se han involucrado y aportado directa e indirectamente en el desarrollo del proyecto.

Personal	Cargo
Ing. Víctor Andaluz	Coordinador
Ing. Paul Canseco	Asesor
Sr. José Varela	Investigador

Tabla 6.03 Recursos Humanos

Fuente: El Investigador

6.9.2 Costos de la elaboración del diseño del proyecto

La Tabla 6.04 muestra el costo resultante del diseño del sistema de control automático para el posicionamiento de la silla de ruedas.

Ítem	Detalle	Unidad	Cantidad	Precio U (\$)	Precio T (\$)
1	Internet	horas	50	0.7	35
2	Servicios	horas	220	5	1100
				Total	1135

Tabla 6.04 Costos del diseño.

Fuente: El Investigador

6.9.3 Costos de materiales del sistema de control

En la siguiente Tabla 6.05 muestra los costos de los materiales utilizados en la implementación de este proyecto.

Ítem	Detalle	Unidad	Cantidad	Precio U (\$)	Precio T (\$)
1	PIC 16F877A	c/u	1	7	7
2	PIC 18F628A	c/u	2	4	8
3	CI LM324	c/u	2	0.5	1
4	CI 7414	c/u	1	0.5	0.5
5	Resistencias	c/u	5	0.5	0.25
6	Capacitores	c/u	3	0.5	0.15
7	Potenciómetro	c/u	1	1	1
8	Conector DB9	c/u	1	0.75	0.75
9	Encoder lineal	c/u	2	2	4
10	Adaptador USB-Serial	c/u	1	12	12
11	Computador portátil	c/u	1	700	700
				Total	734.65

Tabla 6.05 Costos de Materiales

Fuente: El Investigador

6.9.3 Costo Total

En la Tabla 6.06 se detalla el costo total del sistema, se incluye los precios del diseño y de los materiales que se necesita para su respectiva implementación.

Descripción	Costo (\$)
Costo de diseño	1135
Costo de Materiales	734.65
Total	1869.65

Tabla 6.06 Costo Total

Fuente: El Investigador

6.10 CONCLUSIONES

Las conclusiones más importantes de este trabajo son:

- La implementación del circuito de control en la silla de ruedas permite monitorear y controlar las entradas de dicha silla desde un ordenador, teniendo como entradas de control la velocidad lineal y velocidad angular de forma similar a los robots móviles comerciales.
- El modelo cinemático describe el movimiento de la silla de ruedas, en el que se considera al sistema silla-hombre como una masa puntual. Por lo que el modelo cinemático puede ser utilizado para cualquier silla de ruedas tipo unicycle, que tienen como principal característica dos motores controlados independientemente.
- El modelo dinámico interpreta el comportamiento de la silla de ruedas considerando las fuerzas internas y externas que intervienen en el sistema silla-hombre. Este modelo relaciona las velocidades de referencia y las velocidades a las que se mueve la silla, es decir, $u_{ref} \neq u$ y $\omega_{ref} \neq \omega$.
- El objetivo del control de posición consiste en trasladar a la silla de ruedas desde una posición inicial a una posición final con orientación. Para lo que se proponen algoritmos de control basados en el modelo cinemático y dinámico del sistema silla-hombre utilizando el método de Lyapunov que asegura la estabilidad asintótica del sistema, es decir, la distancia entre la silla de ruedas y la posición final deseada sea igual a cero cuando el tiempo tiende al infinito $\lim_{t \rightarrow \infty} \rho(t) = 0$.
- La facilidad de utilizar un diseño en cascada permite tener un control independiente tanto en la parte cinemática como en la parte dinámica, debido a que si el diseño del controlador dinámico se cambia por otro, el controlador cinemático no se vería afectado por dicho cambio, de la misma forma si se cambia el diseño del controlador cinemático el controlador dinámico no se afectaría.

6.11 RECOMENDACIONES

Las recomendaciones obtenidas de este trabajo son las siguientes:

- Se debe tomar en cuenta que los parámetros dinámicos identificados para el sistema silla-hombre varían con la contextura física del usuario y las características de la silla de ruedas.
- Se puede utilizar este trabajo para varias aplicaciones que incluyan dispositivos externos (Kinect, GPS y otros) que generen los valores deseados para el posicionamiento de la silla, en lugar de ingresarlos por teclado.
- En trabajos futuros de investigación se podría implementar sensores para la evasión de obstáculos que permita al sistema silla-hombre desplazarse en ambientes no estructurados con seguridad y evitando posibles colisiones.
- Además se podría investigar otros algoritmos de control para posicionar la silla de ruedas, tomando en cuenta que el centro de masa del sistema silla-hombre varía cuando la postura del usuario cambia sobre el asiento de la silla, se debería diseñar un controlador adaptable que compense la dinámica del sistema con el objetivo de que los errores converjan asintóticamente a cero.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] WANG J, WANG R, LI F, JIANG M, JIN D. EMG. Signal Classification for Myoelectric Teleoperating a Dexterous Robot Hand. 27th Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE-EMBS). Shanghai. China. pp. 5931-5933. 2005
- [2] NETO, A.F.; CELESTE, W.C.; MARTINS, V.R.; FILHO, T.F.B. and FILHO, M.S. Human-Machine Interface Based on Electro-Biological Signals for Mobile Vehicles. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp 2954 – 2959. 2006.
- [3] LÓPEZ N., SORIA C., OROSCO E., SCIASCIO F. and VALENTINUZZI M. Two-dimensional myoelectric control of a robotic arm for upper limb amputees. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 90. 2007.
- [4] CHEEIN F., FERREIRA A., WANDERLEY C., TEODIANO B., RICARDO C. and SARCINELLI-FILHO M. Human-machine interfaces based on EMG and EEG applied to robotic systems. Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation, pp.1-15. 2008.
- [8] GARCIA J. *Sistema de Posicionamiento y Autolocalización para Sillas de Ruedas Autónomas*. Tesis Doctoral. Madrid: Universidad de Alcalá. 2001
- [9] ANDALUZ G. *Modelación, Identificación y Control de Robots Móviles*. Tesis de Grado. Quito: Escuela Politécnica Nacional. 2011
- [10] CAMALLI C. *Implementación de un Sistema de Control en la Máquina Posicionadora de Cajas Econopack para optimizar la línea de producción en la empresa Provefrut*. Tesis de Grado. Ambato: Universidad Técnica de Ambato. 2010.
- [12] GOMÁRIZ S. *Teoría de Control y Diseño Electrónico*. Segunda Edición. Editorial: AlfaOmega. España. 2001
- [16] NOURBAKHSI I. and SIEGWART R. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. Cambridge, MA: The MIT Press. 2004.
- [17] SECCHI H. *Una Introducción a los Robots Móviles*. Argentina: Universidad Nacional de San Juan. 2008.

- [18] BARRIENTOS V., SILVA R., ET AL. *Una Panorámica De Los Robots Móviles*. Venezuela: Universidad Rafael Bellosó Chasín. 2007.
- [19] AICARDI M., CASALINO G., ET AL. *Closed Loop Steering of Unicycle-like Vehicles via Lyapunov Techniques*. IEEE Robotics & Automation Magazine. 1995.
- [20] CHUN C. and HALIT E. *Position Estimation of Mobile Robots Based on Coded Infrared Signal Transmission*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 46, no. 6. 1997.
- [21] GUERRA, G. *Control Automático y Simulación Digital*. Editorial: imprefepp. Quito. 2007.
- [22] BOLTON, W. Mecatrónica. *Sistemas de Control Electrónico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica*. Cuarta Edición. Editorial: AlfaOmega. Mexico. 2010.
- [23] BOLTON, W. Mecatrónica. *Sistemas de Control Electrónico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica*. Tercera Edición. Editorial: AlfaOmega. Mexico. 2006.
- [25] KHALIL H., *Nonlinear Systems*, Second Edition, Prentice-Hall, 1996.
- [26] AGUADO A. y MARTÍNEZ M. *Identificación y Control Adaptivo*. Editorial: Faresa S.A. España. 2003.
- [27] CARRELLI RICARDO, *Análisis y Control de Sistemas no Lineales*, Universidad Nacional de San Juan, 2004.
- [28] ZHANG Y., KIM J., et al. *Dynamic Model Based Robust Tracking Control of a Differentially Steered Wheeled Mobile Robot*. Proceedings of the American Control Conference. Philadelphia. Pennsylvania. pp. 850-855, 1998.

LINKOGRAFÍA

- [5] RESNA. Extraído el 24 de Diciembre del 2012 desde <http://www.resna.org/>
- [6] AAATE. Extraído el 24 de Diciembre del 2012 desde <http://www.aaate.net/>
- [7] Estadísticas de Discapacitados. Extraído el 22 de Diciembre del 2012 desde <http://www.discapidadonline.com>
- [11] Consejo Nacional de Discapacidades. Ley Orgánica de Discapacidades. Extraído el 22 de Diciembre del 2012 desde www.conadis.gob.ec
- [13] Sistemas de Control. Extraído el 06 de Enero del 2013 desde <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3330/5/34059-5.pdf>
- [14] Tipos de Sistemas de Control. Extraído el 06 de enero del 2013 desde http://www.profesorblanco.com.ar/apuntesteco/tipos_de_sistemas_manual,semi_y_automatico.doc
- [15] Robótica. Extraído el 20 de Enero del 2013 desde <http://www.monografias.com/trabajos31/robotica/robotica.shtml>
- [24] El Disparador Schmitt. Extraído el 10 de Julio del 2013 <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/electronic/schmitt.html>

ANEXOS

Anexo A:

Guía de

Observación

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial
Carrera de Industrial y Procesos de Automatización

GUÍA DE OBSERVACIÓN

Responsable: José Luis Varela Aldás **Fecha:** 08/07/2013

OBJETIVOS: Determinar las características de la silla de ruedas eléctrica que permitirán desarrollar el sistema de control automático para su posicionamiento.

Ítems	Resultados
Características Técnicas	P326A Vision Sport
Capacidad de carga	300lbs
Dimensiones	Largo: 86.36cm Ancho: 60.96cm Alto: 123.19cm
Datos de los actuadores	2 Motores de 24V DC – 160W. 2 Frenos o Trabas Electromecánicas de 24V DC.
Datos de las Baterías	2 Baterías de 12 Voltios cada una con una autonomía de 8 horas.
Velocidades	
Velocidad máxima	1.45 m/s
Velocidad Mínima	0.05 m/s
Intervalo	0.05 m/s
Grados de libertad	
Desplazamientos Lineales Permitidos	Se puede movilizar hacia adelante y hacia atrás.
Desplazamientos Angular Permitidos	Puede girar sobre el plano suelo libremente (sobre el eje Z)

Control	
Forma de comunicación	<p>El joystick ubicado en la silla se comunica de forma serial al módulo de control de velocidades de la silla.</p> <p>Adicional la silla cuenta con otro módulo de potencia MODSILLA que permite ordenar el movimiento de cada motor por comunicación paralela de 7 bits.</p>
Tipo de señales que utiliza	<p>El joystick genera señales eléctricas análogas a partir de un imán eléctrico móvil que se mueve libremente dentro de una circunferencia formada por cuatro bobinas, estas señales son interpretadas para luego ser enviadas al módulo de control de la silla</p>
Coordenadas	
¿Cómo se debería expresar las coordenadas de posición?	<p>Se podría utilizar el plano del suelo como la referencia X-Y.</p>

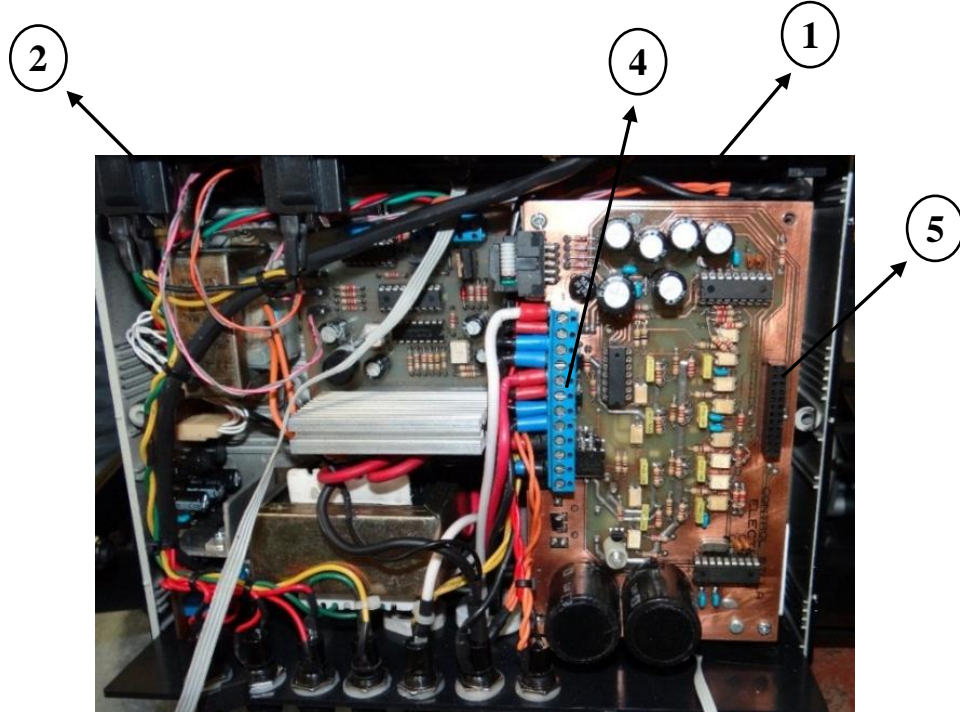
Anexo B:
Especificaciones
del equipo
P326A Vision
Sport

P326A-ARMU/P326A-SBMU


①	Seat ass'y	⑤	Motor and gearbox complete, LH and RH
	32200222 (SEAT ASS'Y)		62012010(MOTOR.&GEARBOX ASS'Y,M9M01CA-3, LH)
	32222098 (SEAT ASS'Y FISH-ONDX,SB980)		62022010(MOTOR.&GEARBOX ASS'Y,M9M01CA-3, RH)
	43701072 (PAD, ARMREST(LONG),BLACK)		62409004 (GEARBOX ASS'Y., M9M01.LH)
	43701073(PAD,ARMREST(SHORT),BLACK)		62409004 (GEARBOX ASS'Y., M9M01.RH)
⑥	Shroud ass'y	⑥	Controller
	30500086(MAIN SHROUD ASS'Y)		33503064 (JOYSTICK BRAKET ASS'Y.,VSI, ED)
	30510893(SHROUD,FENDER,CANDYAPPLE RED,LH)		64810013 (JOYSTICK ONLY, DY SHARK,DK-REMD01)
	30510894(SHROUD,FENDER,CANDYAPPLE RED,RH)		64210010 (CONTROLLER ONLY, SHARK,DK-PMB40)
	30515984(SHROUD, FENDER, BLUE, LH)	⑦	Anti-tipper arm ass'y, Front
	30515985(SHROUD, FENDER, BLUE, RH)		34100133(ANTI-TIPPER ARM ASS'Y, FRONT.)
③	Anti-tipper arm ass'y, Rear,LH	⑧	Footplate ass'y.
	34100170 (ANTI-TIPPER ARM ASS'Y, REAR,LH.)		33300348 (FOOTREST PLATE KIT)
	34100172 (ANTI-TIPPER ARM ASS'Y, REAR,RH)	⑨	Charger unit
④	Drive wheel ass'y		65100003 (CHARGER, HP1211B-4A-OFFBOARD)
	32600432(DRIVER WHEEL ASS'Y.,260*85 PU)		

Anexo C:
Especificaciones
del módulo de
potencia
MODSILLA

MÓDULO DE POTENCIA DE LAS SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA DEL CENI-UTA.



3 Figura a. Módulo de potencia MODSILLA

Fuente: El Investigador

1.- FUENTES DE 5VDC Y 12VDC

Fuentes de corriente directa de 5V y 12V para alimentar sensores y dispositivos externos, diseñadas con tierra independiente al circuito electrónico, mediante un transformador y los componentes electrónicos 7805 y 7812.

2.- FUENTES DE 120VAC

Fuentes de corriente alterna de 120V para alimentar sensores y dispositivos externos, diseñado mediante un transformador y un circuito inversor.

3.- ÁREA DE FUSIBLES

En esta área se encuentran las protecciones para todos los elementos del módulo, como son: Fuentes DC, Fuentes AC, Puentes H, Motores y Trabas Electromecánicas.

4.- BORNERAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LOS ACTUADORES

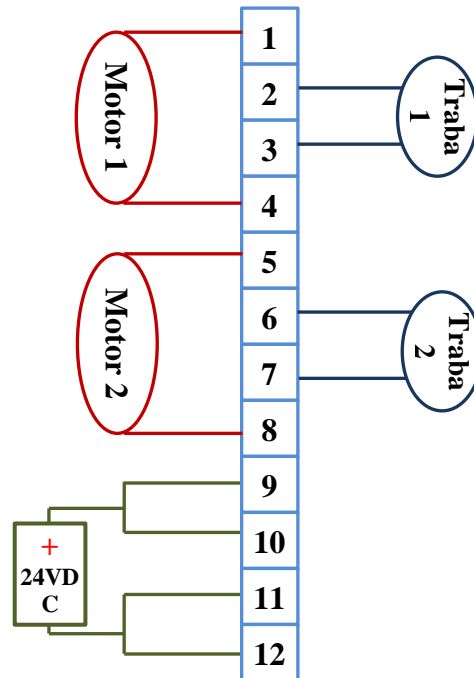


Figura b. Borneras para la alimentación y los actuadores

Fuente: El Investigador

5.- INTERCONECTOR

Corresponde al conector de los 7 bits para comandar cada motor y el control ON/OFF de las trabas electromecánicas, además, permite leer los valores de corrientes de las trabas y los motores mediante señales analógicas de voltaje.

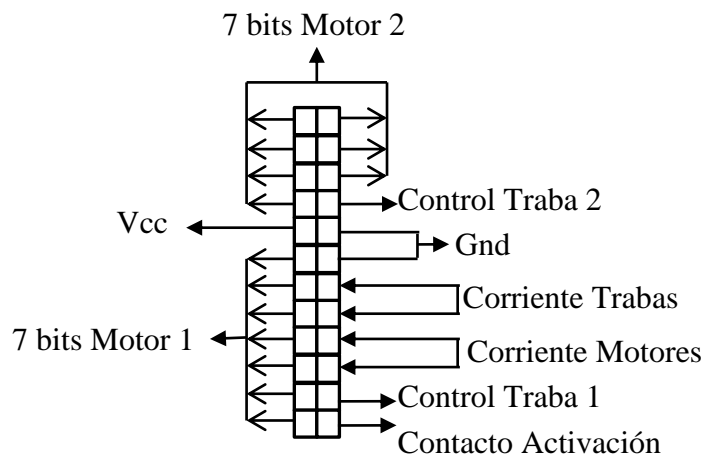


Figura c. Diagrama del Interconector

Fuente: El Investigador

CIRCUITO ELECTRÓNICO

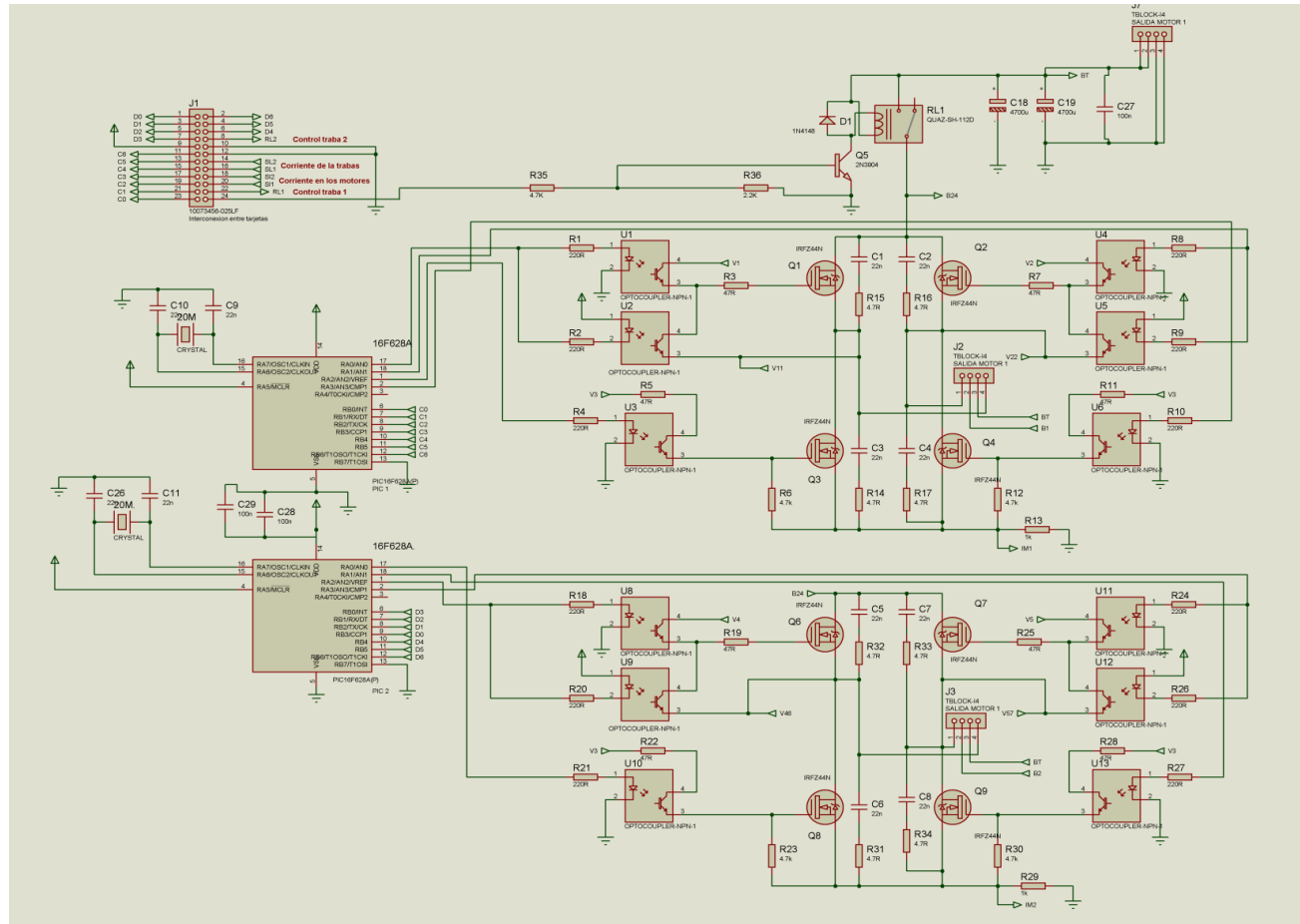


Figura d. Circuito electrónico del Interconector

Fuente: El Investigador

Anexo D:

Especificaciones

del PIC16F877A



PIC16F87XA

28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers

Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873A
- PIC16F876A
- PIC16F874A
- PIC16F877A

High-Performance RISC CPU:

- Only 35 single-word instructions to learn
- All single-cycle instructions except for program branches, which are two-cycle
- Operating speed: DC – 20 MHz clock input
DC – 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of Flash Program Memory,
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM),
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to other 28-pin or 40/44-pin
PIC16CXXX and PIC16FXXX microcontrollers

Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler,
can be incremented during Sleep via external
crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period
register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
 - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
 - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
 - PWM max. resolution is 10-bit
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™
(Master mode) and I²C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver
Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address
detection
- Parallel Slave Port (PSP) – 8 bits wide with
external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for
Brown-out Reset (BOR)

Analog Features:

- 10-bit, up to 8-channel Analog-to-Digital
Converter (A/D)
- Brown-out Reset (BOR)
- Analog Comparator module with:
 - Two analog comparators
 - Programmable on-chip voltage reference
(V_{REF}) module
 - Programmable input multiplexing from device
inputs and internal voltage reference
 - Comparator outputs are externally accessible

Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash
program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM
memory typical
- Data EEPROM Retention > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)
via two pins
- Single-supply 5V In-Circuit Serial Programming
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC
oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving Sleep mode
- Selectable oscillator options
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

CMOS Technology:

- Low-power, high-speed Flash/EEPROM
technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low-power consumption

Device	Program Memory		Data SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	I/O	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit	Comparators
	Bytes	# Single Word Instructions						SPI	Master I ² C			
PIC16F873A	7.2K	4096	192	128	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F874A	7.2K	4096	192	128	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F876A	14.3K	8192	368	256	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F877A	14.3K	8192	368	256	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2

Anexo E:
Especificaciones
del
PIC18F628A



PIC16F627A/628A/648A

18-pin Flash-Based, 8-Bit CMOS Microcontrollers with nanoWatt Technology

High-Performance RISC CPU:

- Operating speeds from DC – 20 MHz
- Interrupt capability
- 8-level deep hardware stack
- Direct, Indirect and Relative Addressing modes
- 35 single-word instructions:
 - All instructions single cycle except branches

Special Microcontroller Features:

- Internal and external oscillator options:
 - Precision internal 4 MHz oscillator factory calibrated to $\pm 1\%$
 - Low-power internal 48 kHz oscillator
 - External Oscillator support for crystals and resonators
- Power-saving Sleep mode
- Programmable weak pull-ups on PORTB
- Multiplexed Master Clear/Input-pin
- Watchdog Timer with independent oscillator for reliable operation
- Low-voltage programming
- In-Circuit Serial Programming™ (via two pins)
- Programmable code protection
- Brown-out Reset
- Power-on Reset
- Power-up Timer and Oscillator Start-up Timer
- Wide operating voltage range (2.0-5.5V)
- Industrial and extended temperature range
- High-Endurance Flash/EEPROM cell:
 - 100,000 write Flash endurance
 - 1,000,000 write EEPROM endurance
 - 40 year data retention

Low-Power Features:

- Standby Current:
 - 100 nA @ 2.0V, typical
- Operating Current:
 - 12 μ A @ 32 kHz, 2.0V, typical
 - 120 μ A @ 1 MHz, 2.0V, typical
- Watchdog Timer Current:
 - 1 μ A @ 2.0V, typical
- Timer1 Oscillator Current:
 - 1.2 μ A @ 32 kHz, 2.0V, typical
- Dual-speed Internal Oscillator:
 - Run-time selectable between 4 MHz and 48 kHz
 - 4 μ s wake-up from Sleep, 3.0V, typical

Peripheral Features:

- 16 I/O pins with individual direction control
- High current sink/source for direct LED drive
- Analog comparator module with:
 - Two analog comparators
 - Programmable on-chip voltage reference (VREF) module
 - Selectable internal or external reference
 - Comparator outputs are externally accessible
- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit programmable prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with external crystal/clock capability
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period register, prescaler and postscaler
- Capture, Compare, PWM module:
 - 16-bit Capture/Compare
 - 10-bit PWM
- Addressable Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter USART/SCI

Device	Program Memory	Data Memory		I/O	CCP (PWM)	USART	Comparators	Timers 8/16-bit
	Flash (words)	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					
PIC16F627A	1024	224	128	16	1	Y	2	2/1
PIC16F628A	2048	224	128	16	1	Y	2	2/1
PIC16F648A	4096	256	256	16	1	Y	2	2/1

Anexo F:

Programas

en

Microcode

```

*****PROGRAMA PIC 16F877A*****
INCLUDE "modedefs.bas"
ON INTERRUPT GOTO COM
INTCON=%10010000
TRISA=%111111
TRISC=0:TRISD=0:TRISE=0
LOW portb.3:LOW portb.5
PORTE=0
    PORTC=50 ;APAGO LOS MOTORES
    PORTD=50 ;APAGO LOS MOTORES
PAUSE 1000
Motor1 VAR PORTC:Motor2 VAR PORTD
A VAR BYTE:B VAR BYTE:C VAR BYTE:D VAR BYTE:para VAR BYTE
C1a VAR BYTE:C1b VAR BYTE:C1c VAR BYTE
C2a VAR BYTE:C2b VAR BYTE:C2c VAR BYTE
M1 VAR BYTE:M2 VAR BYTE
INT1 VAR portb.3:INT2 VAR portb.5
Motor1=50:Motor2=50:C1a=0:C1b=0:C1c=0:C2a=0:C2b=0:C2c=0
para=0:M1=50:M2=50

INICIO:
PAUSE 5
WHILE (Motor1<>M1 or Motor2<>M2)
IF Motor1<m1 THEN Motor1=Motor1+1
IF Motor2<m2 THEN Motor2=Motor2+1
IF Motor1>m1 THEN Motor1=Motor1-1
IF Motor2>m2 THEN Motor2=Motor2-1
PAUSE 3
WEND
GOTO INICIO

DISABLE
COM:
PAUSE 3
SERIN PORTB.1,N9600,A,B,C,D
PAUSE 3
A=A-48:B=B-48:C=C-48:D=D-48
M1=A*10+B:M2=C*10+D
PORTE=7
WHILE (Motor1<>M1 or Motor2<>M2)
IF Motor1<m1 THEN Motor1=Motor1+1
IF Motor2<m2 THEN Motor2=Motor2+1
IF Motor1>m1 THEN Motor1=Motor1-1
IF Motor2>m2 THEN Motor2=Motor2-1
PAUSE 3
WEND
IF (Motor1=50 and motor2=50) THEN PORTE=0
PAUSE 25
HIGH INT2:para=0:PAUSE 2
WHILE (para<>"A")
SERIN PORTB.6,N2400,para,C2a,C2b,C2c

```

```

PAUSEUS 10
WEND
LOW INT2
HIGH INT1:para=0:PAUSE 2
WHILE (para<>"A")
SERIN PORTB.4,N2400,para,C1a,C1b,C1c
PAUSEUS 10
WEND
LOW INT1
C1a=C1a-48:C1b=C1b-48:C1c=C1c-48
C2a=C2a-48:C2b=C2b-48:C2c=C2c-48
SEROUT PORTB.2,N9600,[#C1a,#C1b,#C1c,#C2a,#C2b,#C2c]
para=0
INTCON=%10010000
RESUME
ENABLE
END

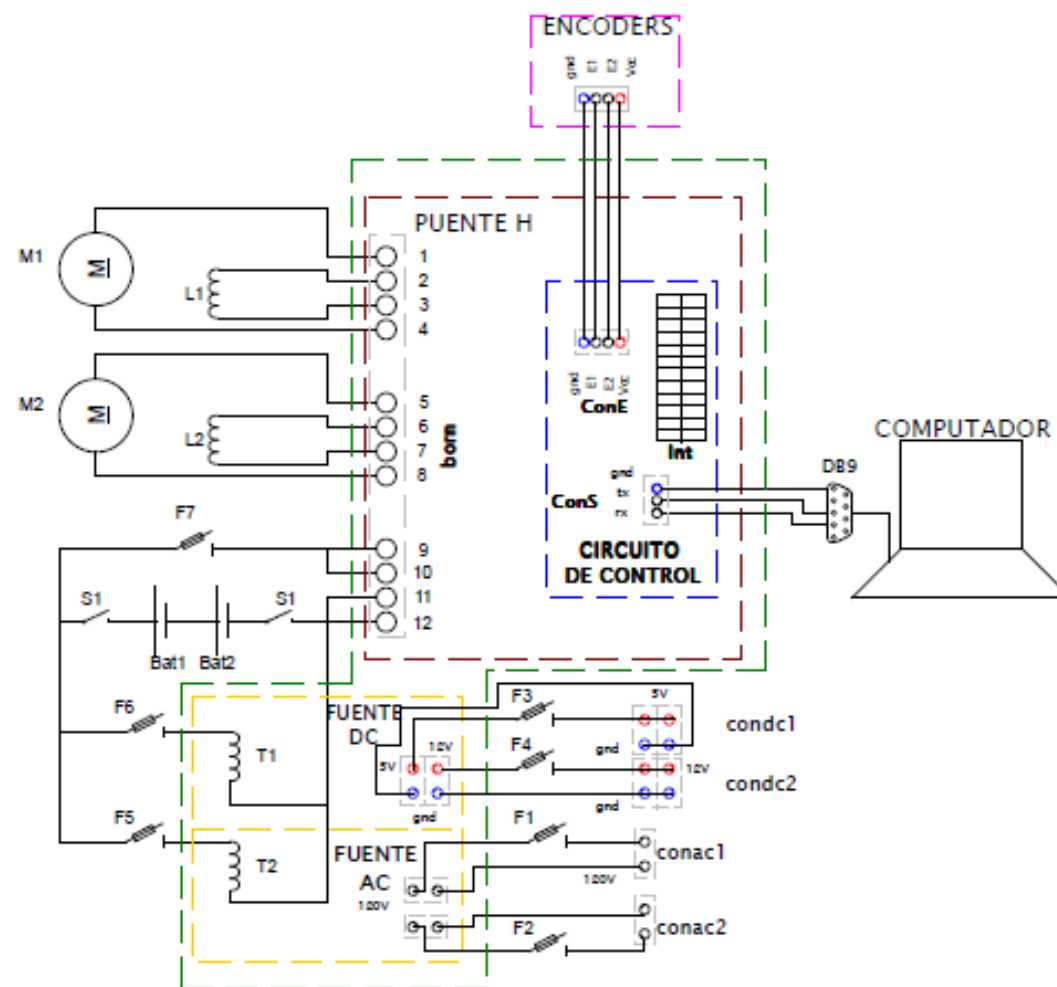
```

```


*****PROGRAMA PIC 16F628A*****
INCLUDE "modedefs.bas"
CMCON=7
coder VAR BYTE:A VAR BYTE:B VAR BYTE:C VAR BYTE
A=0:B=0:C=0:coder=0
PAUSE 20
INICIO:
coder=0:A=0:B=0:C=0
COUNT portA.0,150,coder
WHILE (coder>100):coder=coder-100:A=A+1:WEND
WHILE (coder>10):coder=coder-10:B=B+1:WEND
C=coder
WHILE PORTB.0=1
SEROUT PORTB.1,N2400,["A",#A,#B,#C]
PAUSEUS 10
WEND
GOTO INICIO

```

Anexo G: Planos del Sistema Eléctrico



- Conexión Física
- - - Limites de las fuentes DC y AC
- - - Limites del circuito de encoders
- - - Limites del circuito para el Puento H
- - - Limites del circuito de control
- - - Limites del Módulo de control MODSILLA
- - - Limites de conectores y borneras

Dep. responsable	Referencia técnica ANEXO G	Creado por José Luis Varela Aldas	Aprobado por José Luis Varela Aldas	
		Tipo de documento Plano Eléctrico	Estado del documento Terminado	Rev. OK
		Título, título suplementario Sistema de Control de la Silla de Ruedas Eléctrica		Fecha de edición 01/01/2014
			Hoja 1/2	

Simbología:

M1: Motor DC 1

M2: Motor DC 2

Bat1: Bateria 1 de 12 Vdc

Bat2: Bateria 2 de 12 Vdc

F1: Fusible del conector 1 de salida de 120Vac

F2: Fusible del conector 2 de salida de 120Vac

F3: Fusible del conector de salida de 5Vdc

F4: Fusible del conector de salida de 12Vdc

F5: Fusible del transformador de la Fuente DC

F6: Fusible del transformador de la Fuente AC

F7: Fusible de las Baterías de Alimentación

born: Bornera para la alimentación y actuadores

Int: Interconector entre la MODSILLA y el circuito de control

ConE: COnector para los encoders ópticos

L1: Traba electromecánica del Motor DC 1

L2: Traba electromecánica del Motor DC 2

T1: Bobina principal del tranfomador de la Fuente DC

T2: Bobina principal del tranfomador de la Fuente AC

Vcc: Alimentación de 5Vdc

gnd: Tierra

E2: Señal del encoder 2

E1: Señal del encoder 1

S1: Interruptor de Encendido


condc1: Conector de salida de 5Vdc

condc2: Conector de salida de 12Vdc

conac1: Conector 1 de salida de 120Vac

conac2: Conector 2 de salida de 120Vac

ConS: Conector para la comunicación serial

Dep. responsable	Referencia técnica ANEXO G	Creado por José Luis Varela Aldas	Aprobado por José Luis Varela Aldas			
		Tipo de documento Plano Eléctrico	Estado del documento Terminado	Rev. OK		
		Título, título suplementario Sistema de Control de la Silla de Ruedas Eléctrica		Fecha de edición 01/01/2014	Idioma Esp.	Hoja 2/2

Anexo H:

Programas

DLL en

Visual C++

*****PROGRAMA DE IDENTIFICACIÓN*****

```
extern "C" {_declspec(dllexport) void identificacion(double A1, double A2, double w1,
double w2, double w3,
double w4, double w5, double w6, int32_t com)
{
double x[200], y[200], psi[200], rho[200], alfa[200], theta[200], w[200], u[200],
uc[200], wc[200], au[200], aw[200];
int i; i=0; u[i]=w[i]=0;
abrircom(com);
for (i=0; i<199; i++)
{
rho[i]=0; theta[i]=0; alfa[i]=x[i]=y[i]=psi[i]=au[i]=aw[i]=0;
uc[i] = A1*sin(w1*i/10)+A1*sin(w2*i/10)+A1*sin(w3*i/10)+
A1*sin(w4*i/10)+A1*sin(w5*i/10)+A1*sin(w6*i/10);
wc[i] = A2*sin(w1*i/10)+A2*sin(w2*i/10)+A2*sin(w3*i/10)+
A2*sin(w4*i/10)+A2*sin(w5*i/10)+A2*sin(w6*i/10);
sillarob( uc[i], wc[i], &u[i], &w[i]);
}
sillarob( 0, 0, &u[i], &w[i]);
cerrarcom();
ofstream fs("ide.txt");
fs << " x " << " y " << " psi " << " rho " << " alfa "
<< " theta " << " uc " << " wc " << " u " << " w "
<< " au " << " aw " << endl;
for (i=0; i<199; i++)
{
fs << x[i] << " " << y[i] << " " << psi[i]*180/PI << " " << rho[i]
<< " " << alfa[i]*180/PI << " " << theta[i]*180/PI << " " << uc[i]
<< " " << wc[i]*180/PI << " " << u[i] << " " << w[i]*180/PI
<< " " << au[i] << " " << aw[i]*180/PI << endl;
}
fs.close();
}
}
```

*****PROGRAMA DE SIMULACIÓN*****

```
extern "C" {_declspec(dllexport) void simulacion(double xd, double yd, double Ad,
double ku, double kw, double ky, double c1, double c2, double c3, double c4, double
c5, double c6)
{
double x[200], y[200], psi[200], rho[200], alfa[200], theta[200], w[200], u[200],
dx, dy, uc[200], wc[200], au[200], aw[200];
int i; i=0; x[i]=y[i]=psi[i]=au[i]=aw[i]=u[i]=w[i]=0; rho[i]=theta[i]=10;
Ad=Ad*PI/180; xd=xd+0.001; yd=yd+0.001;
while ((abs(rho[i])>0.1 || abs((Ad-psi[i])>0.1)) && i<199)
{
dx=xd-x[i]; dy=yd-y[i];
rho[i]=sqrt((dx*dx)+(dy*dy));
theta[i]=atan2(dy,dx)-Ad;
theta[i]=errorang(theta[i]);
alfa[i]=theta[i]-(psi[i]-Ad);
alfa[i]=errorang(alfa[i]);
}
```

```

        uc[i]=ku*tanh(rho[i])*cos(alfa[i]);
        wc[i]=kw*alfa[i]+(ku*tanh(rho[i])*cos(alfa[i])*sin(alfa[i])*
        (alfa[i]+ky*theta[i]))/(rho[i]*alfa[i]);
        au[i+1]=1/c1*(uc[i]-(c4*u[i]+c3*w[i]*w[i]));
        aw[i+1]=1/c2*(wc[i]-(c5*u[i]*w[i]+c6*w[i]));
        u[i+1]=u[i]+au[i+1]*0.1;
        w[i+1]=w[i]+aw[i+1]*0.1;
        psi[i+1]=psi[i]+w[i+1]*0.1;
        psi[i+1]=errorang(psi[i+1]);
        x[i+1]=x[i]+(u[i+1]*cos(psi[i+1])-0.19*w[i+1]*sin(psi[i+1]))*0.1;
        y[i+1]=y[i]+(u[i+1]*sin(psi[i+1])+0.19*w[i+1]*cos(psi[i+1]))*0.1;
        i=i+1;
    }
    ofstream fs("simu.txt");
    fs << "  x      " << " y      " << " psi      " << " rho      " << " alfa      "
    << " theta      " << " uc      " << " wc      " << " u      " << " w      "
    << " au      " << " aw      " <<< endl;
    for (i=0;i<199;i++)
    {
        fs << x[i] << " " << y[i] << " " << psi[i]*180/PI << " " << rho[i]
        << " " << alfa[i]*180/PI << " " << theta[i]*180/PI << " " << uc[i]
        << " " << wc[i]*180/PI << " " << u[i] << " " << w[i]*180/PI
        << " " << au[i] << " " << aw[i]*180/PI << endl;
    }
    fs.close();
}
}

```

*****PROGRAMA DE CONTROL*****

```

extern "C"{_declspec(dllexport) void control(double xd, double yd, double Ad, double
ku, double kw, double ky,double c1,double c2,double c3,double c4,double c5,double
c6,int32_t com,double lu, double lw, double lku, double lkw)
{
    double x[200],y[200],psi[200],rho[200],alfa[200],theta[200],w[200],u[200],
    dx,dy,uc[200],wc[200],au[200],aw[200],uref[200],wref[200];
    int i; clu=lu;clw=lw;cku=lku;ckw=lkw; i=0;
    x[i]=y[i]=psi[i]=au[i]=aw[i]=u[i]=w[i]=uc[i]=wc[i]=uref[i]=wref[i]=0;
    alfa[i]=rho[i]=theta[i]=10;
    Ad=Ad*PI/180; xd=xd+0.001; yd=yd+0.001;
    abrircom(com);i=1;
    while (i<199)
    {
        dx=xd-x[i-1];dy=yd-y[i-1];
        rho[i]=sqrt((dx*dx)+(dy*dy));
        theta[i]=atan2(dy,dx)-Ad;
        theta[i]=errorang(theta[i]);
        alfa[i]=theta[i]-(psi[i-1]-Ad);
        alfa[i]=errorang(alfa[i]);
        uc[i]=ku*tanh(rho[i])*cos(alfa[i]);
        wc[i]=kw*alfa[i]+(ku*tanh(rho[i])*cos(alfa[i])*sin(alfa[i])*
        (alfa[i]+ky*theta[i]))/(rho[i]*alfa[i]);
        compdinamica(uc[i],wc[i],u[i-1],w[i-1],uc[i-1],wc[i-1],c1,c2,c3,
        c4,c5,c6,&uref[i],&wref[i]);
    }
}

```

```

sillarob( uref[i],wref[i], &u[i],&w[i]);
au[i]=(u[i]-u[i-1])/0.3;
aw[i]=(w[i]-w[i-1])/0.3;
psi[i]=psi[i-1]+w[i]*0.3;
psi[i]=errorang(psi[i]);
x[i]=x[i-1]+(u[i]*cos(psi[i])-0.19*w[i]*sin(psi[i]))*0.3;
y[i]=y[i-1]+(u[i]*sin(psi[i])+0.19*w[i]*cos(psi[i]))*0.3;
i=i+1;
}
sillarob( 0,0, &u[199],&w[199]);
cerrarcom();
ofstream fs("control.txt");
fs << " x " << " y " << " psi " << " rho " << " alfa "
<< " theta " << " uc " << " wc " << " u " << " w "
<< " au " << " aw " << endl;
for (i=0;i<199;i++)
{
fs << x[i] << " " << y[i] << " " << psi[i]*180/PI << " " << rho[i]
<< " " << alfa[i]*180/PI << " " << theta[i]*180/PI << " " << uc[i]
<< " " << wc[i]*180/PI << " " << u[i] << " " << w[i]*180/PI
<< " " << au[i] << " " << aw[i]*180/PI << endl;
}
fs.close();
}
}

```

*******FUNCIONES INTERNAS*******

```

HANDLE hComPort;
void abrircom(int com)
{
WCHAR Puerto[10];
wsprintf(Puerto, L"COM%d", com);
hComPort=CreateFile(Puerto,GENERIC_READ|GENERIC_WRITE,
0,NULL,OPEN_EXISTING,FILE_ATTRIBUTE_NORMAL,NULL);
}

```

```

void sillarob(double uc, double wc, double *u, double *w)
{
DWORD bytescritos,bytesleidos,dwBufferSize; int x,coder;
double mdt,mit,md,mi,mdc,mic,p; char temp[10]={'0'},v[4]={'0'};
coder=327;p=0.82; mdt=uc+0.25*wc; mit=uc-0.25*wc;
if (mdt>0) { md=42*mdt/2.2+57; }
else { md=43-42*abs(mdt)/2.2; }
if (mit>0) { mi=42*mit/2.2+57; }
else { mi=43-42*abs(mit)/2.2; }
if (mdt==0) { md=50; }
if (mit==0) { mi=50; }
if (mdt>2.2) { md=99; }
if (mit>2.2) { mi=99; }
if (mdt<-2.2) { md=1; }
if (mit<-2.2) { mi=1; }
v[0]=int((md+16)/10); v[1]=(int(md+16))%10;
v[2]=int((mi+16)/10); v[3]=(int(mi+16))%10;
}

```

```

dwBufferSize=1;
WriteFile(hComPort, &temp[0], dwBufferSize, &bytescritos, NULL);
Sleep(20);
for (x=0;x<4;x++)
{
WriteFile(hComPort, &v[x], dwBufferSize, &bytescritos, NULL);
}
Sleep(3);
for (x=0;x<4;x++)
{
WriteFile(hComPort, &v[x], dwBufferSize, &bytescritos, NULL);
}
Sleep(3);
for (x=0;x<4;x++)
{
WriteFile(hComPort, &v[x], dwBufferSize, &bytescritos, NULL);
}
Sleep(20);
for (x=1;x<7;x++)
{
ReadFile(hComPort, &temp[x], dwBufferSize, &bytesleidos, NULL);
}
mdc=((temp[1]-48)*100+(temp[2]-48)*10+(temp[3]-48))*7.5*p/coder;
mic=((temp[4]-48)*100+(temp[5]-48)*10+(temp[6]-48))*7.5*p/coder;
if (md<50) { mdc=mdc*(-1); }
if (mi<50) { mic=mic*(-1); }
*u=(mdc+mic)/2; *w=(mdc-mic)/0.5;
}

void cerrarcom()
{
CloseHandle(hComPort);
}

double clu,clw,cku,ckw;
void compdinamica(double uc,double wc,double u,double w,double ucant,double wcant,
double c1,double c2,double c3,double c4,double c5,double c6,double *uref,double *wref)
{
double eru,erw,ucp,wcp,s1,s2;
eru=uc-u;erw=wc-w;
ucp=(uc-ucant)/0.3; wcp=(wc-wcant)/0.3;
s1=ucp+clu*tanh(ku*eru/clu);
s2=wcp+clw*tanh(kw*erw/clw);
*uref=c1*s1+(c4*u-c3*w*w);
*wref=c2*s2+(c6*w+c5*u*w);
}

double errorang(double ang)
{
while(ang>=PI) {ang=ang-2*PI; }
while(ang<=-PI) {ang=ang+2*PI; }
return ang;
}

```

Anexo I: Interfaz Visual en Labview

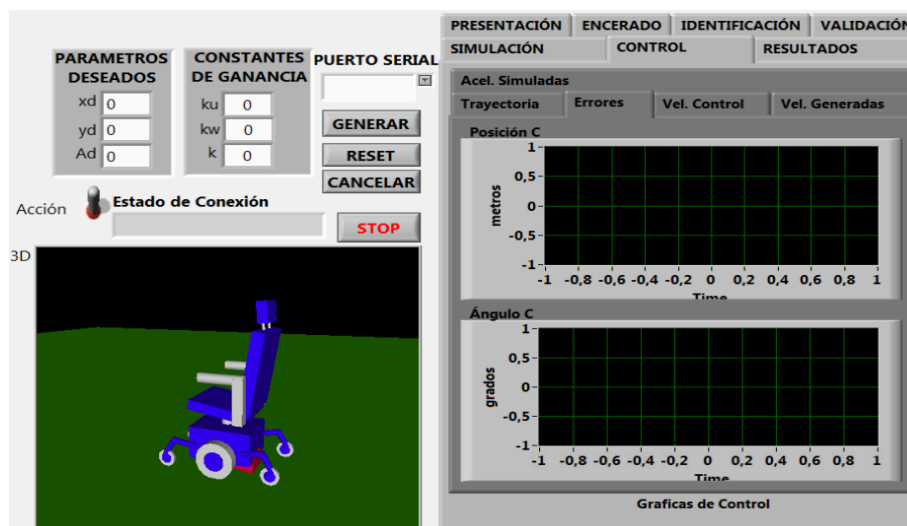
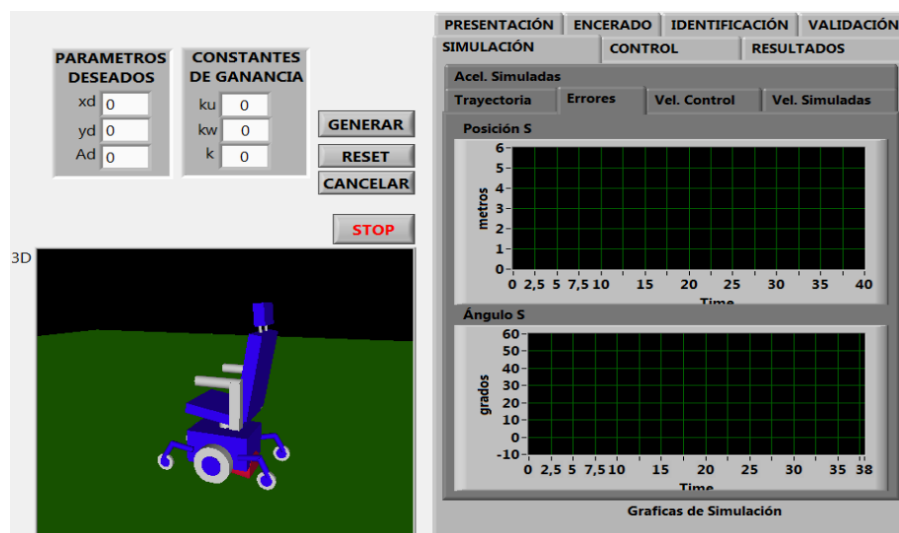
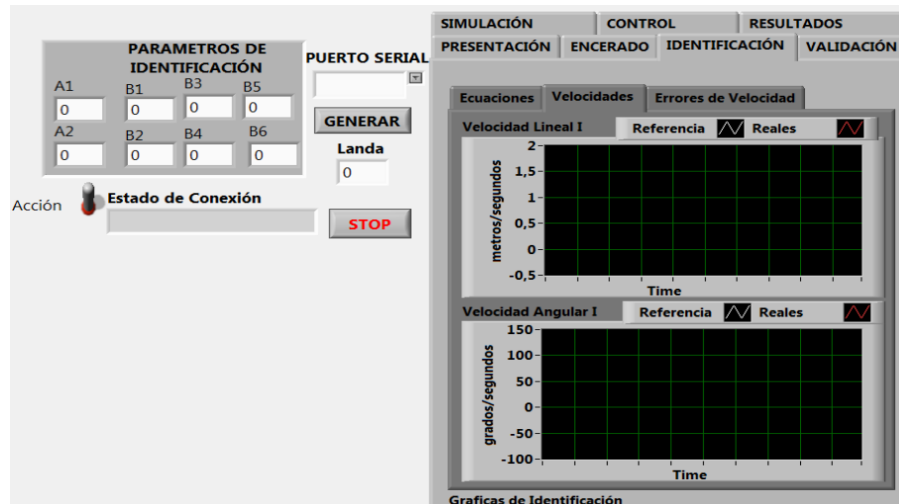


Figura e. Imágenes de la interfaz visual del sistema de control

Fuente: El Investigador

Anexo J:

Fotos

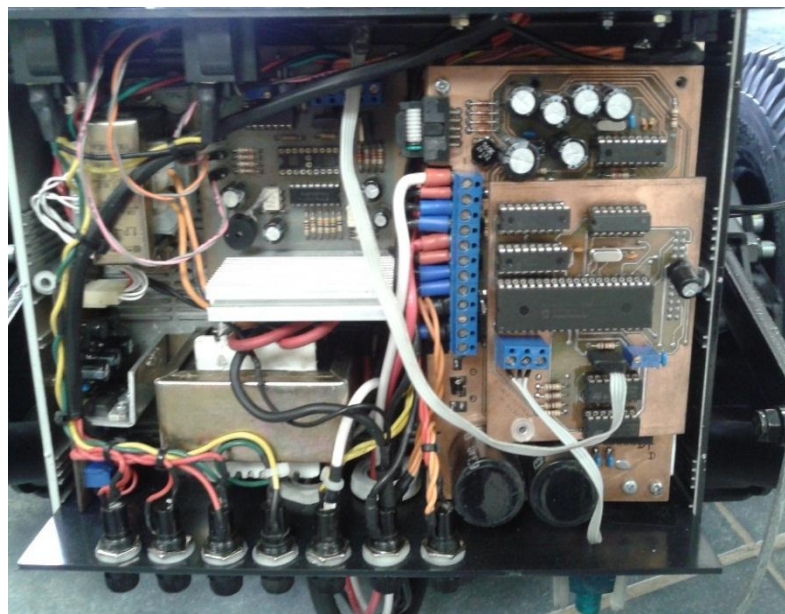


Figura f. Fotos del sistema de control

Fuente: El Investigador