

**ESTUDIO, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE
UNA PLATAFORMA ROBÓTICA
DIDÁCTICA TIPO STEWART APLICADA AL
ESTUDIO DE CONTROLADORES DIFUSOS**

**ESTUDIO, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA
PLATAFORMA ROBÓTICA DIDÁCTICA TIPO
STEWART APLICADA AL ESTUDIO DE
CONTROLADORES DIFUSOS**

NATALIA XIMENA GONZÁLEZ ALVAREZ

Egresada de la carrera de ingeniería electrónica
Facultad de Ingenierías
Universidad Politécnica Salesiana

EFREN PATRICIO REINOSO MENDOZA

Egresado de la carrera de ingeniería electrónica
Facultad de Ingenierías
Universidad Politécnica Salesiana

Dirigido por:

ING. EDUARDO CALLE ORTIZ

Ingeniero Electrónico
Docente de la Universidad Politécnica Salesiana
Facultad de Ingenierías
Carrera de Ingeniería Electrónica.



Datos de catalogación bibliográfica

GONZÁLEZ ALVAREZ NATALIA X. y REINOSO MENDOZA E. PATRICIO

Estudio, diseño y construcción de una plataforma robótica didáctica tipo Stewart aplicada al estudio de controladores difusos

Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador, 2011

INGENIERIA ELECTRONICA

Formato 170 x 240 mm

Páginas:125

Breve reseña de los autores e información de contacto:



Natalia Ximena González Álvarez

Egresada de la carrera de ingeniería electrónica
Facultad de Ingenierías
Universidad Politécnica Salesiana
ailanat_go@hotmail.com



Efrén Patricio Reinoso Mendoza

Egresado de la carrera de ingeniería electrónica
Facultad de Ingenierías
Universidad Politécnica Salesiana
diejgc@hotmail.com

Dirigido por:



Ing. Eduardo Calle Ortiz

Ingeniero Electrónico (2001) por la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador.
Master en Tecnologías de la Información en Fabricación (2004) y Especialista en Robótica (2004) por la Universidad Politécnica de Madrid.
Especialista Universitario en Estudios Sociales de la Ciencia e Innovación Tecnológica por la Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura (OEI) y de la Universidad de Oviedo.
Profesor de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador.
Unidad de Investigación en Automática de la Universidad Politécnica Salesiana.
ecalleo@cue.ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2011 Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMERICA

GONZALEZ ALVAREZ NATALIA X,y REINOSO MENDOZAPATRICIO.

Estudio, diseño y construcción de una plataforma robótica didáctica tipo Stewart aplicada al estudio de controladores difusos.

IMPRESO EN ECUADOR – PRINTED IN ECUADOR

CERTIFICACIÓN

En calidad de DIRECTOR DE LA TESIS “*Estudio, diseño y construcción de una plataforma robótica didáctica tipo Stewart aplicada al estudio de controladores difusos.*”, elaborada por Natalia González y Patricio Reinoso, declaro y certifico la aprobación del presente trabajo de tesis basándose en la supervisión y revisión de su contenido.

Cuenca, Marzo del 2011

Ing. Eduardo Calle
DIRECTOR DE TESIS

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Los autores son los únicos responsables por los contenidos, conceptos, ideas, análisis, resultados investigativos y manifestados en la presente tesis *“Estudio, diseño y construcción de una plataforma robótica didáctica tipo Stewart aplicada al estudio de controladores difusos.”*,

Cuenca, Marzo del 2011

Natalia X. González A.
AUTORA

E. Patricio Reinoso M.
AUTOR

ÍNDICE

1. Plataformas robóticas	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Robots Paralelos	1
1.2.1. Contexto histórico de los robots paralelos	6
1.2.2. Clasificación de los robots paralelos.....	9
1.2.3. Cinemática de los robots paralelos	11
1.2.4. Espacio de trabajo.....	12
1.2.5. Configuraciones singulares.....	13
1.2.6. Ventajas y desventajas de los robots paralelos frente a los de tipo serie	14
1.3. Plataforma Stewart.....	15
1.3.1. Características de la plataforma Stewart	15
1.3.2. Tipos de configuraciones de la plataforma Stewart	17
1.4. Aplicaciones	18
2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART	23
2.1. Introducción.....	23
2.2. Diseño funcional.....	23
2.2.1. Descripción y diseño funcional de la plataforma Stewart.....	23
2.2.2. Características funcionales	25
2.2.3. Características mecánicas	25
2.2.4. Sensores incluidos	27
2.2.5. Elementos para el procesamiento	28
2.3. Definición de actuadores	29
2.4. Diseño del sistema mecánico.....	29
2.4.1. Diseño de la base fija.....	30
2.4.2. Diseño de las escuadras de fijación para los servomotores.....	30
2.4.3. Eslabones	31
2.4.4. Plataforma móvil	31
2.4.5. Acoplamiento de los motores a la base fija	32
2.4.6. Ensamble final de la plataforma Stewart	32
2.5. Diseño electrónico	33

2.5.1.	Diseño del circuito electrónico.....	34
2.5.2.	Diseño PCB de la tarjeta electrónica.....	34
2.6.	Análisis matemático.....	35
3.	IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART.....	40
3.1.	Introducción.....	40
3.2.	Construcción de la estructura mecánica.....	40
3.2.1.	Base fija.....	40
3.2.2.	Escuadra de fijación.....	41
3.2.3.	Eslabones.....	41
3.2.4.	Plataforma móvil.....	42
3.2.5.	Tarjeta electrónica.....	42
3.3.	Ensamblaje de las partes del robot.....	43
3.3.1.	Acoplamiento de los motores a las escuadras de fijación.....	43
3.3.2.	Acoplamiento de los motores a la base fija.....	44
3.3.3.	Acoplamiento de los eslabones.....	44
3.3.4.	Acoplamiento de la plataforma móvil.....	45
3.3.5.	Ensamble final de la plataforma Stewart.....	46
3.4.	Interfaz de usuario.....	47
4.	CONTROLADORES DIFUSOS.....	51
4.1.	Introducción.....	51
4.2.	Teoría de lógica difusa.....	51
4.2.1.	Conjuntos difusos.....	52
4.2.2.	Función de pertenencia.....	53
4.2.3.	Operaciones con conjuntos difusos.....	54
4.2.4.	Variables lingüísticas.....	57
4.2.5.	Reglas difusas.....	58
4.2.6.	Implicación difusa.....	59
4.2.7.	Sistema de inferencia difusa.....	60
4.3.	Controladores difusos.....	64
4.3.1.	Elementos del controlador difuso.....	65
4.3.2.	Sistema de control difuso.....	67
4.4.	Criterios de estabilidad para sistemas de control difuso.....	68
4.4.1.	Indicadores de estabilidad y rendimiento.....	69

4.4.2.	Evaluación de la estabilidad a través de la observación de la trayectoria del disparo de reglas.....	70
4.5.	Aplicación de un sistema de control difuso a una plataforma Stewart	72
4.5.1.	Controlador difuso proporcional.....	73
4.5.2.	Controlador proporcional derivativo difuso.....	83
4.5.3.	Controlador proporcional integral derivativo difuso PID	86
5.	RESULTADOS EXPERIMENTALES	91
5.1.	Introducción.....	91
5.2.	Consideraciones generales del sistema	91
5.3.	Análisis técnico del funcionamiento.....	92
5.3.1.	Prueba de la tarjeta de control de los servomotores.....	92
5.3.2.	Prueba de la librería de interfaz entre el computador y la tarjeta de control de los servomotores.....	93
5.3.3.	Prueba de la librería de la cinemática del robot.....	93
5.3.4.	Pruebas de movimiento del robot en sus seis grados de libertad	94
5.4.	Análisis del sistema de control	98
5.4.1.	Controlador proporcional #1.....	98
5.4.2.	Controlador proporcional #2.....	100
5.4.3.	Controlador proporcional #3.....	102
5.4.4.	Controlador difuso tipo P.....	104
5.4.5.	Controlador difuso tipo PD.....	106
5.4.6.	Controlador difusos tipo PID.....	108
5.4.7.	Análisis de resultados experimentales	110
6.	RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	112

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por el apoyo y la confianza entregados durante toda mi vida, a mi director de tesis Eduardo Calle por su paciencia y consejos brindados en el transcurso del proyecto.

Gracias Nasa por estar incondicionalmente siempre a mi lado.

Natalia González A.

Quiero agradecer de manera muy especial a todas las personas que estuvieron involucradas en este proyecto, ya que sin su apoyo, no hubiera sido posible culminarlo de manera exitosa.

Patricio Reinoso.

DEDICATORIA

A mi familia y de manera especial a mi hermano Mario, que aunque ya no esta con nosotros le hubiese encantado ver esta meta cumplida.

Natalia González A.

A mis padres y a mi novia, ya que sin el incentivo y el apoyo de ellos no hubiera sido posible su culminación.

Patricio Reinoso M.

CAPÍTULO 1

1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

1.1. Introducción

En el presente capítulo se revisa las principales definiciones y características de las plataformas robóticas, de manera especial el estudio se centra en las plataformas tipo Stewart.

Se presenta la evolución que han experimentado en el tiempo los robots paralelos; desde la antigüedad hasta el siglo XXI. Se expone la clasificación de los mismos de acuerdo a la movilidad que presentan, y se realiza una introducción al análisis cinemático de estos mecanismos, su espacio de trabajo y las singularidades que pueden alcanzar.

De igual forma se analizan las ventajas y desventajas que brindan los manipuladores paralelos frente a otra configuración de robots industriales (tipo serie). Por último se exponen las aplicaciones más importantes de los robots paralelos, entre las cuales se revisan: en el sector industrial los simuladores de vuelo y manejo de automóviles; en el campo de la medicina su aplicación en cirugías, rehabilitaciones ortopédicas, entre otras; su uso como manipuladores para colocar objetos en posiciones y orientaciones que dependen de condiciones externas como por ejemplo: hora del día, estado del clima, etc.

1.2. Robots Paralelos

Un robot es una entidad, generalmente electromecánica, multifuncional. La primera referencia conocida de la palabra Robot fue la palabra “robotik” la misma que viene de la obra R.U.R. (Rossum’s Universal Robots) del dramaturgo checo KarelCapek, en el año de 1921(WIKIPEDIA, 2011).

La palabra Robotik es una derivación del pronombre “robota” que en checo significa “trabajo”. Los robots descritos por Capek en su obra, eran humanos artificiales orgánicos (Varbuchta, 2004), es por eso que ahora la palabra robot se utiliza para referirse a humanos mecánicos, o a máquinas que ejecutan las tareas que podría realizar un ser humano.

En la actualidad la Federación Internacional de Robótica (IFR-ISO 8373) da una definición normalizada para robot industrial, la misma que se indica a continuación:

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

“Por robot industrial de manipulación se entiende una máquina de manipulación automática, reprogramable y multifuncional, con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de trabajos diversos en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento(IFR, 2011).”

La robótica en general ha tenido una evolución en la historia muy importante, pues gracias a los experimentos y proyectos realizados por algunos inventores y empresas dedicadas al desarrollo de ésta tecnología, han brindado la facilidad de resolver problemas, realizar tareas peligrosas o muy complicadas que un ser humano no podría hacerlas en condiciones normales.

Se puede dividir la historia de la robótica en 3 etapas, claramente distinguidas. La primera, que hace referencia a hechos o inventos, que para su época podían verse como inútiles, pero que serían precursores de la robótica actual. La segunda, una etapa donde todo el esfuerzo se concentró en la industria y que puede ser asociada como la revolución industrial de la robótica, donde se definieron las bases sólidas para la robótica existente. La tercera etapa es la actual, donde la robótica ha entrado fuertemente al mercado de consumo, mostrando muchos de los avances que serán comunes en un futuro cercano. A continuación se presenta una breve línea de tiempo de la robótica, desde sus inicios, en la época de los griegos, hasta la actualidad (véase Tabla 1).

AÑO	INVENTO	CARACTERÍSTICAS	AUTOR
270A.C.	Relojes de agua	Hecho con figuras móviles	Físico griego Ctesibius
1495	Antrobot	Hombre mecánico	Leonardo Da Vinci
1772	L'Ecrivain (El escribano)	Escribía mensajes de hasta 40 caracteres. Cerebro mecánico.	Pierre y Henry Jaquet-Droz (suizos)
1801	Telar programable	Operada mediante tarjetas perforadas.	Joseph Jacquard
1890	Vehículo de control remoto	Usa por primera vez la teleoperación inalámbrica.	Nikola Tesla
1892	Grúa motorizada con una garra	Para remover lingotes de un horno	Seward Babbitt
1940	Elsie la Tortuga	Pre-robot	Grey Walters
1946	Computador electrónico (ENIAC)	Construida con tubos de vacío	J. Presper Eckert y John Mauchly
1951	Brazo articulado teleoperado	Construido para la comisión de energía atómica de Estados Unidos	Raymond Goertz

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

1954	Primer robot programable	Define el termino Automatización Universal	George Devol
1960	“La bestia”	Robot controlado por transistores, busca tomas de energí.	Johns Hopkins
1961	UNIMATE	Soldadura y extracción de piezas de fundición.	General Motors
1963	Rancho Arm	Brazo robot controlado por computadora	John McCarthy
1965	Sistema DENDRAL	Sistema experto.Ejecuta el conocimiento acumulado de su información ingresada	Edward Feigenbaum, Universidad de Stanford.
1968	Brazo –tentáculo	Tipo pulpo	Marvin Minsk
1969	Brazo Stanford	Brazo robot completamente eléctrico, controlado por computadora	Universidad de Stanford
1970	Robot móvil	Controlado por inteligencia artificial	Shakey
1976	Brazos robot para las sondas espaciales Viking 1 y 2	Incorporan microcomputadoras	Vircom Inc.
1978	PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly)	Posee un controlador manual y un brazo robótico	Vircom, Unimation, General Motors
1979	Stanford Cart	Cruza exitosamente un salón lleno de sillas.	James Adams y Hans Moravec de Stanford
1986	NavLab I	Pionero en la navegación en exteriores	NavLab
1990	Ambler	Plataforma de pruebas para investigación sobre los robots caminantes	Carnegie MellonUniversity
1992	NavLab II	Pionero en visión trinocular, computación WARP y fusión de sensores	NavLab
1994	Dante II	Toma muestras de gases volcánicos	CMU Robotics
1997	Pathfinder	Aterrizo en Marte	NASA
1997	P3	Robot humanoide	HONDA
1999	Aibo	Perro-robot	SONY

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

2000	Robodex 2000	Pequeño humanoide	SONY
2003	Qrio	Primer humanoide comercial autónomo capaz de correr	SONY
2004	Humanoide de Robosapiens	Con el fin de reducir las bajas militares de USA en Irak	Dr. Mark W. Tilden
2005	MurataBoy	Robot capaz de montar en bicicleta	MurataManufacturing
2005	Big Dog	Robot que puede cargar hasta 340 libras en cualquier terreno	Boston Dynamics
2007	iRobotCreate	Robot diseñado para estudiantes, desarrolladores y entusiastas de la robótica	iRobot
2007	Wakamaru	Robot con personalidad independiente	Dr. HiroshiIshiguro
2008	Traje robot denominado HAL (HybridAssistedLimb)	Permite caminar grandes distancias y cargar mucho más peso del que se podría normalmente	Empresa japonesa Cyberdyne
2009	Roomba	Aspiradora robótica	iRobot

Tabla 1. Evolución de la Robótica

Como se puede apreciar en esta breve reseña, desde sus inicios, la robótica ha estado presentando avances significativos, y en la actualidad despegó a raíz de la miniaturización de los componentes electrónicos, y especialmente en el aumento de la potencia de cálculo de los computadores. Tareas que hasta hace algunos años eran impensables tales como el reconocimiento visual de objetos, ahora resultan de uso cotidiano en los sistemas industriales.

De acuerdo a la estructura cinemática que tienen los robots se pueden clasificar en robots seriales, paralelos o híbridos. Un robot se considera serial si su estructura cinemática es una cadena en lazo abierto; es paralelo si contiene una o varias cadenas en lazo cerrado y por último es híbrido cuando posee cadenas en lazo cerrado y lazo abierto (ISIDRO ZABALZA, 2007). En la *Fig. 1* se puede distinguir un robot serial y uno paralelo.

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

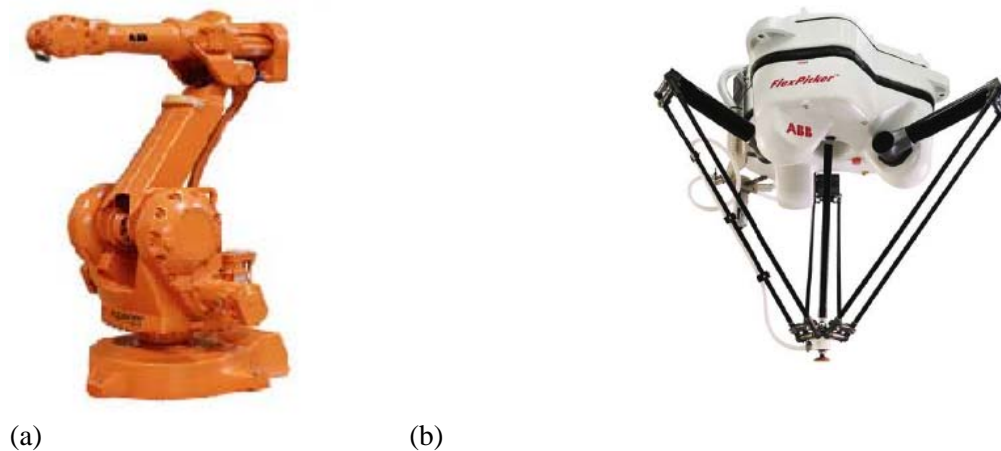


Fig. 1. Estructura cinemática de un robot. (a) Serial, (b) Paralelo
Fuente:(ISIDRO ZABALZA, 2007)

Dentro de la estructura del robot cada cadena cinemática o brazo se compone de uno o varios eslabones unidos mediante articulaciones, en la *Fig. 2* se muestra las articulaciones más comunes clasificadas según los grados de libertad que pueden desarrollar.

En los manipuladores paralelos, existen dos eslabones llamados plataformas: uno fijo que forma la base, y uno móvil llamado plataforma móvil o efector final, estas dos plataformas están unidas por cadenas cinemáticas o brazos. Las articulaciones que conforman los brazos de estas estructuras pueden o no ser actuadas. En la mayoría de los casos, se busca que los actuadores estén fijos a la base, para mejorar la dinámica del robot, pero todo depende de la aplicación que se le vaya a dar.

En los robots paralelos se busca tener un mayor número de grados de libertad (GDL), pues con ello se logra un mayor espacio de trabajo, por lo que normalmente son mecanismos de 5 o 6 GDL pero, los robots paralelos de 3 GDL pueden ser considerablemente más ligeros.

Además para aplicaciones de manipulación de objetos se requiere de mucha precisión y una alta velocidad de posicionamiento, por lo que los robots paralelos cumplen esta tarea exitosamente; a pesar de las grandes ventajas que presentan este tipo de mecanismos ante los de tipo serie, existen ciertas características que limitan su aplicación, por ejemplo: el reducido espacio de trabajo que alcanzan y el alto costo de fabricación.

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

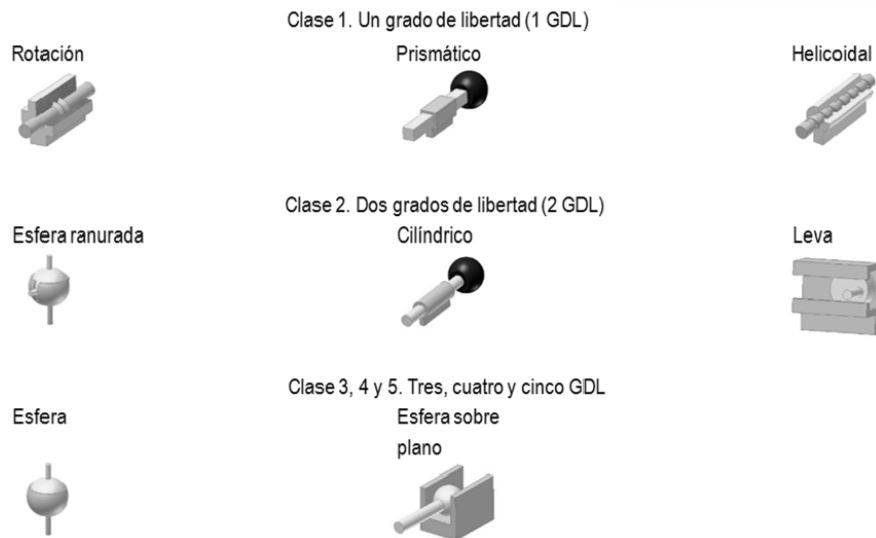


Fig. 2. Clasificación de articulaciones según sus grados de pertenencia
Fuente: (LEÓN, 2009)

1.2.1. Contexto histórico de los robots paralelos

Los primeros trabajos teóricos relacionados con las estructuras mecánicas paralelas aparecieron ya hace siglos, antes de que se empezara a hablar de robots, cuando los primeros geómetras franceses e ingleses realizaron sus estudios sobre los poliedros y sus aplicaciones (RAFAEL ARACIL, 2006).

Ya en la época más actual, el primer mecanismo paralelo fue patentado en el año de 1931. Se trataba de una plataforma de movimiento destinada a la industria del entretenimiento diseñada por James E. Gwinnett. Desgraciadamente este mecanismo no fue nunca construido, en la Fig. 3 se muestra el diseño de Gwinnett.

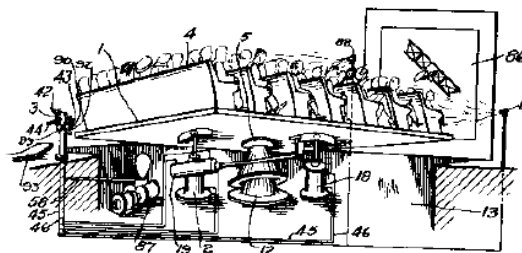


fig. 3. Primer mecanismo espacial paralelo
Fuente: (RAFAEL ARACIL, 2006)

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

No se tuvo que esperar tanto tiempo para que el primer diseño de un robot industrial paralelo apareciera. En 1940 Willard Pollard presentó un ingenioso robot de 5 GDL destinado a operaciones de pintura con spray. En la Fig. 4. Se puede ver que el robot consistía en tres brazos de dos eslabones cada uno. Los eslabones estaban unidos mediante juntas universales. Los tres actuadores de la base comandaban la posición de la herramienta, mientras que la orientación era proporcionada por otros dos actuadores situados en la base y que transmitían el movimiento a la herramienta mediante la rotación proporcionada a unos cables flexibles.

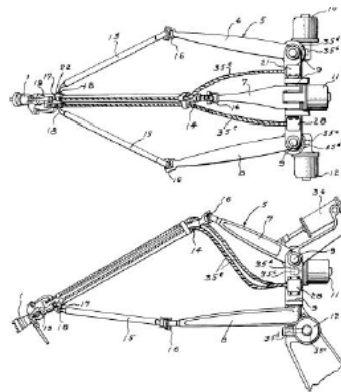


fig. 4. Primer robot industrial paralelo
Fuente: (RAFAEL ARACIL, 2006)

El Dr. Eric Gough en 1947 diseñó un octaedro hexápodo con lados de longitud variable, como plataforma para la comprobación del comportamiento de los neumáticos de la casa Dunlop, bajo cargas aplicadas en diferentes ejes. De esta forma intentaba simular el proceso de aterrizaje de un avión, véase la Fig. 5.

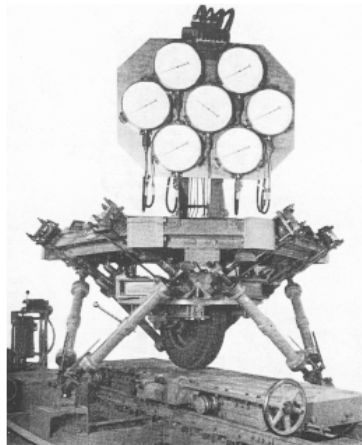
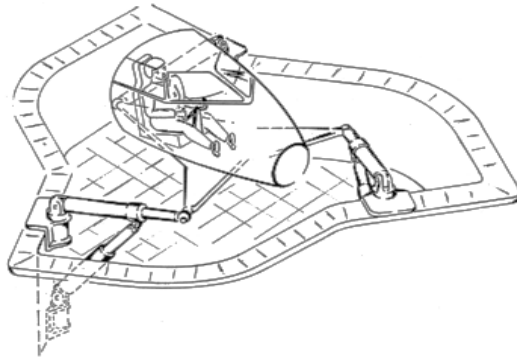


fig. 5. Plataforma de gough
Fuente: (RAFAEL ARACIL, 2006)

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

En 1965 Mr. Stewart presentó un artículo en el que describía una plataforma de 6 GDL destinada a trabajar como simulador de vuelo, el diseño de ésta se presenta en la *Fig. 6*. Donde la conjunción de las diversas cadenas cinemáticas del mecanismo podía proveer los varios y complejos movimientos de la cabina de un piloto en entrenamiento.



*fig. 6.*Plataforma de stewart
Fuente: (RAFAEL ARACIL, 2006)

El ingeniero Klaus Cappel patentó en 1967 un simulador de movimiento basado en un hexápodo y construyó varias de sus invenciones, refiérase a la *Fig. 7*.

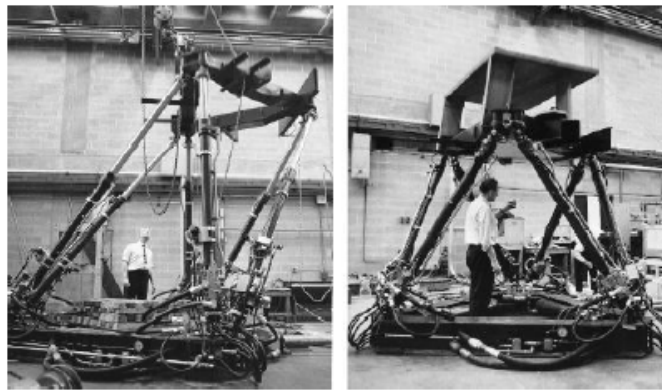


fig. 7. Simulador de movimiento de klauscappel
Fuente:(RAFAEL ARACIL, 2006)

Los robots paralelos tienen su propia historia y en la actualidad se están desarrollando rápidamente gracias a la gran capacidad de cómputo de los nuevos procesadores, debido a que ahora se logra hacer que se interconecten y comuniquen las plataformas robóticas con otros dispositivos externos, por ejemplo cámaras, ordenadores, sensores táctiles, etc.

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

1.2.2. Clasificación de los robots paralelos

Los robots paralelos pueden ser clasificados de acuerdo a diferentes criterios. Uno de los criterios para clasificar a los manipuladores paralelos es por su movilidad, de acuerdo a esto pueden ser planares o espaciales. Dentro de los espaciales se tiene a los mecanismos paralelos esféricos y traslacionales.

Robots Paralelos Planares

El robot paralelo más simple es el mecanismo de cinco barras, tiene cuatro eslabones que forman un solo brazo en lazo cerrado, se interconectan entre sí y a la plataforma fija o base mediante cinco articulaciones rotacionales; posee dos grados de libertad. El diseño de esta estructura es presentado en la *Fig. 8*.

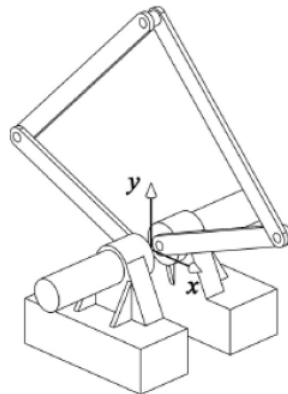


fig. 8. Diseño del mecanismo de 5 barras
Fuente:(León, 2009)

Otro tipo de robot paralelo planar es el 3RRR, vea la *Fig. 9*, éste está formado por tres brazos con tres articulaciones rotacionales, la articulación que está fija en la base debe ser actuada. Este robot cuenta con 3GDL, dos son traslaciones y una rotacional.



fig. 9. Robot paralelo planar 3RRR
Fuente: <http://www.cs.cmu.edu/~adegani/graphical/>

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

Robots Paralelos Espaciales

Dentro de los robots paralelos espaciales tenemos la “Plataforma Stewart”, vea la *Fig. 10*, la misma que cuenta con 6 GDL. En principio fue creada con el fin de realizar simulaciones de vuelo, pero en la actualidad son diversas las aplicaciones que se le dan, en este proyecto por ejemplo la aplicación esta enfocada al estudio de controladores difusos. Existen diversos tipos de configuraciones para esta plataforma, las cuales se analizan en la sección 1.3. El espacio de trabajo que puede alcanzar depende del tipo de configuración, de los actuadores que utilice y por supuesto del sistema de control.

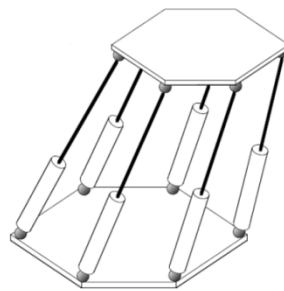


fig. 10. Plataforma Stewart
Fuente: (León, 2009)

El robot DELTA es otro tipo de robot paralelo traslacional, contiene articulaciones esféricas en los paralelogramos que lo conforman, es un mecanismo muy similar a la plataforma Stewart. A continuación (véase *Fig. 11*) se muestra un robot tipo DELTA.

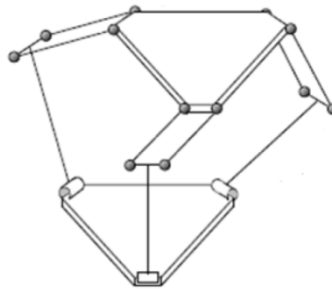


fig. 11. Manipulador DELTA de 3 GDL traslacional
Fuente: (León, 2009)

El Orthoglide es una variante del robot traslacional DELTA, éste ha optimizado el espacio de trabajo mediante una disposición diferente de los brazos y actuadores. En la *Fig. 12*. se puede observar las semejanzas y diferencias con el robot DELTA

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

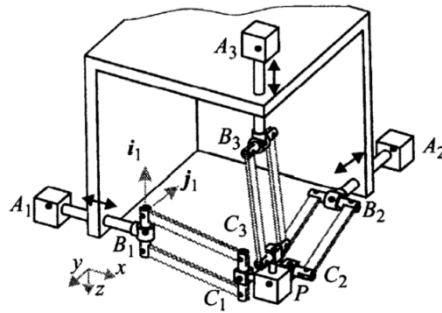


fig. 12. Robot paralelo Orthoglide
Fuente: (León, 2009)

En la Fig. 13. Se muestra el prototipo H4, éste es un robot paralelo actual, su versión industrial es Quattro. Este tipo de robot posee cuatro motores en la base y provee tres traslaciones y una rotación a la plataforma móvil, lo cual le proporciona mayor eficiencia que el robot Delta.



fig. 13. Robot Quattro
Fuente: (Robotmania, 2010)

En la Fig. 14 se muestra un robot paralelo construido a partir de dos mecanismos de 5 barras unidos a una plataforma por medio de dos articulaciones esféricas.

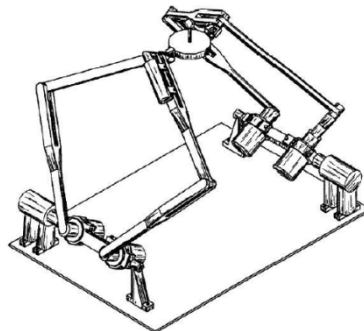


fig. 14. Robot paralelo 6GDL, basado en mecanismo de 5 barras
Fuente: (León, 2009)

1.2.3. Cinemática de los robots paralelos

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

La cinemática estudia el movimiento de los robots respecto a un sistema de referencia, sin considerar las fuerzas que actúan sobre el sistema, sino únicamente la geometría del mismo.

La cinemática de un mecanismo se divide en dos tipos: cinemática inversa y directa. El cálculo de la cinemática directa de un robot paralelo es complejo debido a los lazos cerrados que contiene; por el contrario, el cálculo de la cinemática inversa es relativamente simple, a continuación se describe brevemente que determina cada una.

Cinemática Inversa

La cinemática inversa determina las coordenadas articulares de cada actuador para una posición y orientación conocidas de la plataforma móvil.

Existen varios métodos para el cálculo de la cinemática inversa; Merlet propone dos métodos para este cálculo: uno analítico y otro geométrico. En el caso de los robots paralelos el método geométrico facilita el análisis de la cinemática inversa, ésta permite determinar una solución para el ángulo que debe rotar el actuador dependiendo de la posición y rotación de la plataforma móvil, con respecto a la plataforma fija.

Cinemática Directa

Sirve para determinar cuál es la posición y orientación final de la plataforma móvil, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conociendo las coordenadas articulares del robot. Se conocen varios métodos para el cálculo de la cinemática directa como por ejemplo los iterativos y polinomiales, que son métodos numéricos que requieren cierto tiempo de cálculo para ser realizados. También existen métodos más sofisticados como es la programación de redes neuronales para el cálculo de la cinemática directa de un mecanismo paralelo (León, 2009).

1.2.4. Espacio de trabajo

El espacio de trabajo o campo de acción es el volumen espacial al que puede llegar el extremo del robot, es decir, la plataforma móvil del mecanismo paralelo. Este volumen está determinado por el tamaño, forma y tipo de eslabones que conforman el robot, así como las limitaciones de movimiento impuestas por el sistema de control. Entonces el robot debe elegirse de modo que su espacio de trabajo le permita llegar a todos los puntos necesarios para llevar a cabo su tarea.

El que el robot pueda acceder a todo el espacio de trabajo no significa que lo pueda hacer con cualquier orientación. Existirá un conjunto de puntos, los más alejados y los más cercanos, que únicamente se podrán acceder con unas orientaciones determinadas, mientras que otros puntos admitirán cualquier orientación.

A continuación se presenta algunos ejemplos de áreas de trabajo de ciertos robots paralelos. Véase la *Fig. 15* y *Fig. 16*.

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

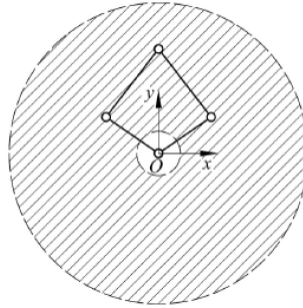


fig. 15. Área de trabajo del mecanismo de 5 barras
Fuente: (LEÓN, 2009)

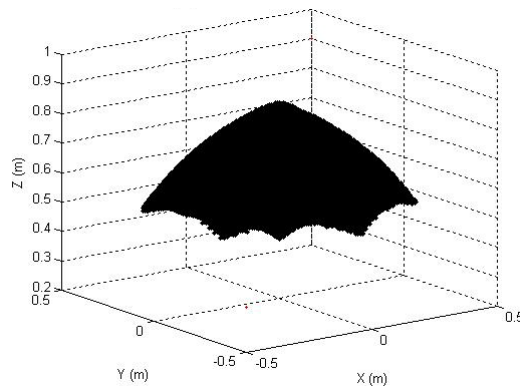


fig. 16 Área de trabajo de la plataforma Stewart.

Fuente: (HERNÁN GONZÁLEZ, 2006)

1.2.5. Configuraciones singulares

Las configuraciones singulares son las posiciones en el espacio a las cuales no puede llegar el robot

Por la existencia de las configuraciones singulares se reduce el espacio de trabajo efectivo del robot, un análisis que permita determinar donde ocurren las configuraciones singulares hace posible establecer estrategias que eviten alcanzar estas configuraciones, que ocasionan que el robot pierda grados de libertad, siendo imposible que su extremo se mueva en una determinada dirección cartesiana. Las diferentes configuraciones singulares del robot pueden ser clasificadas como:

- Singularidades en los límites del espacio de trabajo del robot. Se presenta cuando el extremo del robot está en algún punto del límite de trabajo interior o

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

exterior. En esta situación resulta obvio que el robot no podrá desplazarse en las direcciones que lo alejan de este espacio de trabajo.

- Singularidades en el interior del espacio de trabajo del robot. Ocurren dentro de la zona de trabajo y se producen generalmente por el alineamiento de dos o más ejes de las articulaciones del robot.

1.2.6. Ventajas y desventajas de los robots paralelos frente a los de tipo serie

En la *Tabla 2.* se exponen las ventajas y desventajas de los robots paralelos frente a los robots serie.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• La relación carga/potencia es alta ya que los accionamientos de potencia conectan directamente la base del robot al efector final, sirviendo de elementos estructurales que actúan de manera simultánea, permitiéndoles manipular cargas superiores a su propio peso.	<ul style="list-style-type: none">• La cinemática, la definición de las posiciones singulares y la construcción del modelo dinámico son más complicados que para el caso serie. La mayoría de las veces esto se resuelve de manera particular para cada configuración de robot, ya que no existen ecuaciones generales aplicables a todos ellos.
<ul style="list-style-type: none">• Presentan una alta rigidez, lo cual se traduce en mayores precisiones respecto a un robot tipo serie.	<ul style="list-style-type: none">• El espacio de trabajo suele ser pequeño comparativamente hablando. Además no es sencillo su cálculo, pues la posición y orientación están muy fuertemente acopladas.
<ul style="list-style-type: none">• Su arquitectura les permite alcanzar altas velocidades y aceleraciones, lo cual les permite realizar tareas industriales de manera más eficiente.	<ul style="list-style-type: none">• No existe, como ocurre en los robots serie, un modelo dinámico general para los mismos. Esto dificulta el desarrollo de algoritmos de control de carácter general y hace que los robots existentes en la actualidad se controlen de forma semiacoplada.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los robots paralelos frente a los de tipo serie

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

1.3. Plataforma Stewart

En 1965, Stewart propuso el uso de una estructura paralela de seis grados de libertad para generar movimiento en el espacio, como la solución más práctica en la construcción de simuladores de vuelo. La elección de este tipo de mecanismo se justifica por la buena relación carga admisible/peso propio. De hecho, la carga se distribuye, de modo que cada uno de sus 6 actuadores soporta aproximadamente 1/6 de los esfuerzos totales, siendo además, estos esfuerzos de tracción y compresión, lo que proporciona gran rigidez al mecanismo. Esto queda ilustrado con el ejemplo de un prototipo de robot paralelo que con 35 kg de peso tiene una carga nominal de 600 kg.

El mecanismo de Stewart, consistía en una plataforma triangular unida mediante articulaciones esféricas a tres actuadores lineales ajustables en longitud, que se conectaban a su vez, a una base fija mediante articulaciones universales.

La plataforma Stewart es un diseño de control de posición y movimiento. A partir de este diseño, se han realizado aplicaciones en varias ramas de la industria, tales como la aeronáutica, automotriz, marina y de maquinaria industrial. Esta plataforma es tan versátil, que se ha aplicado en tareas como simuladores de vuelo, construcciones de puentes, mecanismos de brazos de grúas, posicionamiento de platos de satélite, etc.

1.3.1. Características de la plataforma Stewart

La plataforma Stewart tiene un amplio rango de movilidad, y puede ser posicionada con una elevada precisión. La arquitectura de la plataforma Stewart tal como se la conoce en la actualidad consiste en una base fija, y una base superior móvil, conectada en al menos 3 puntos con los actuadores lineales. Esta base móvil se conecta con la base fija por medio de 6 actuadores, que a su vez están enlazados mediante articulaciones esféricas en ambos lados, o con articulaciones esféricas a un lado y universales al otro. Véase la *Fig. 17*.

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

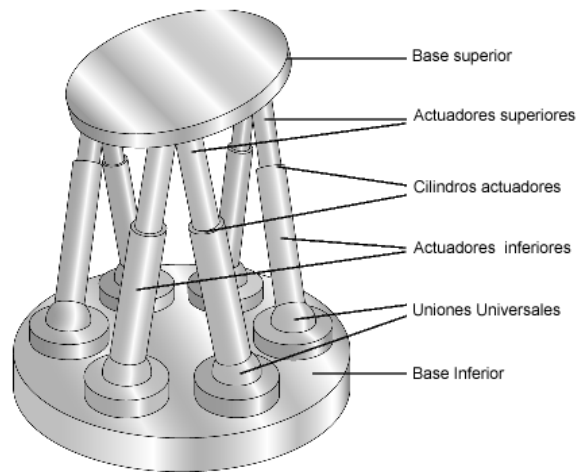


Fig. 17. Componentes físicos de un robot tipo Stewart
Fuente: (Madrid, 2007)

Por su geometría, el diseño de la plataforma Stewart, permite que su plataforma móvil tenga 6 grados de libertad (rotación sobre los ejes x , y y z , además de traslación en los ejes x , y y z), es decir, la placa superior tiene la misma movilidad, que si ésta no tuviera ninguna restricción en el espacio (considerando esto dentro de su espacio de trabajo). A esto debemos añadirle la estabilidad y precisión que, por su estructura mecánica, nos brinda este tipo de plataforma.

En la *Fig. 18* podemos observar un modelo simplificado de un robot Stewart, donde se marca las coordenadas de la base fija y de la plataforma móvil. Este diseño tiene 6 actuadores lineales, cada uno de los cuales, tiene una unión con un punto específico en la base ($b_1, b_2 \dots b_6$) y con otro en la plataforma móvil ($p_1, p_2 \dots p_6$).

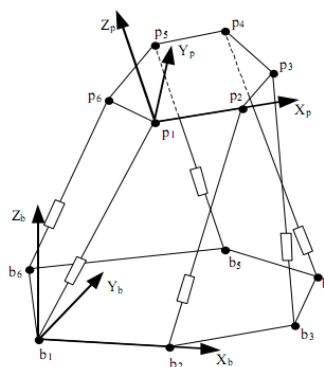


Fig. 18. Sistema de coordenadas de la plataforma móvil.

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

Generalmente, como actuadores lineales, se suelen usar pistones hidráulicos, que permiten un control preciso en su posición, a más de la elevada fuerza que pueden ejercer. Este tipo de actuadores podemos verlos en el clásico ejemplo del simulador de vuelo, ya que, por la elevada carga que debe soportar la base superior, es necesario que los actuadores puedan ejercer la fuerza suficiente para soportar dicha carga. Véase la *Fig. 19*.

Para aplicaciones más pequeñas, donde la carga útil del robot no sea excesiva en relación a su tamaño, se pueden utilizar actuadores electromecánicos, ya sean servomotores, motores lineales o motores paso a paso. Este tipo de actuadores, a más de abaratar costos, permiten alivianar el peso total de la plataforma, permitiendo montarla, por ejemplo, en la punta de un brazo robot serial.

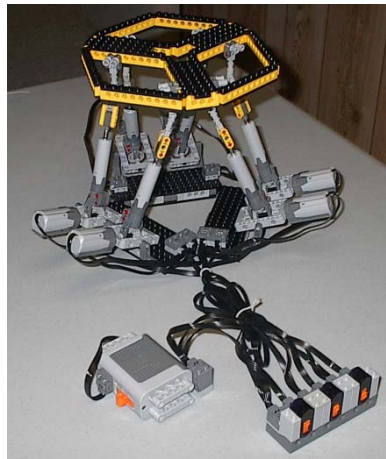


Fig. 19. Plataforma Stewart didáctica, creada con un kit de robotica le lego, el robot usa como actuadores pistones lineales activados por motores eléctricos.

Fuente: http://wn.com/lego_stewart_platform

1.3.2. Tipos de configuraciones de la plataforma Stewart

Hasta mediados de la década de los 80, la mayoría de los diseños se centraron en dos configuraciones. Una con la base y el efector final con forma triangular y los actuadores de dos en dos coincidiendo en los vértices de cada triángulo; y otra, con la plataforma móvil de forma triangular y los actuadores coincidiendo de dos en dos en los vértices del triángulo y con seis puntos distintos contenidos en el plano de la base con forma hexagonal. Estas configuraciones se denotan como 3-3 plataforma de Stewart y 6-3 plataforma de Stewart, respectivamente. Muy pronto se observó que la coincidencia de las articulaciones esféricas restringía de forma severa la movilidad del manipulador, sin embargo la configuración 6-3 todavía se mantuvo popular por algún tiempo. Otra configuración que empezó a ser muy popular es la que tenía hexágonos semirregulares como puntos de conexión tanto en la base como en el efector final, la misma que se conoce como 6-6 plataforma de Stewart.

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

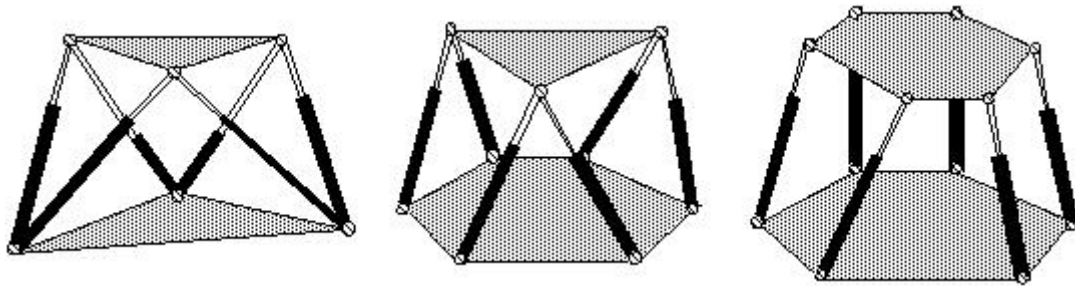


fig. 20. Plataforma Stewart. (a) tipo 3-3, (b) tipo 6-3, (c) tipo 6-6
Fuente: (SILVA, 2005)

Existe una gran variedad de configuraciones mecánicas para este tipo de robots, según sea la estructura de las cadenas cinemáticas que unen la base con el efector final. La estructura cinemática con articulaciones esféricas a ambos lados de cada actuador (Fig. 20a), se denota como plataforma de Stewart 6-sps, donde 6 se refiere al número de grados de libertad del robot y sps viene del inglés (spherical – prismatic – spherical). De igual forma, la estructura con articulaciones universales en la base y esféricas en el efector final se denota como plataforma de Stewart 6-ups (universal – prismatic – spherical). Estas dos estructuras son idénticas salvo que la plataforma 6-sps presenta seis grados de libertad pasivos que permite la rotación de cada cadena cinemática sobre su eje.

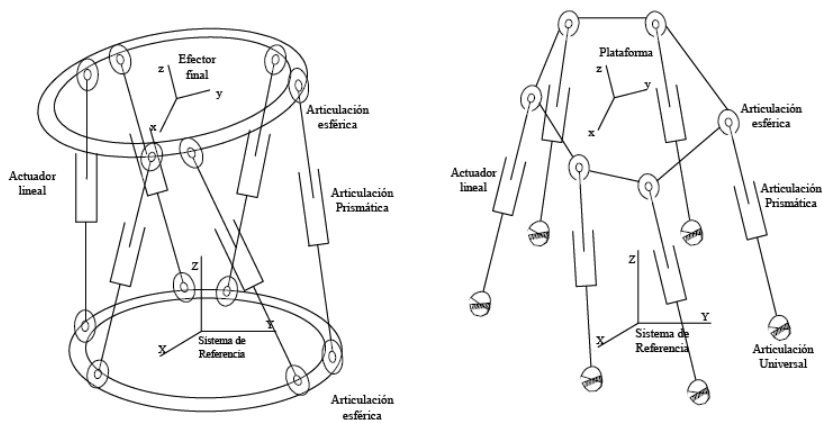


fig. 21. Plataforma Stewart. (a) 6-sps, (b) 6-ups
Fuente: (SILVA, 2005)

1.4. Aplicaciones

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

La realización práctica de prototipos para robots paralelos, ha surgido en función de los desarrollos de su cinemática y dinámica. La gran precisión en el posicionamiento y orientación de la plataforma, ha propiciado su aplicación en muñecas para brazos manipuladores (arai, 1993) (innocenti, 1993). Los seis grados de libertad hacen que su aplicación sea atractiva en simuladores de vuelo para los que fueron originalmente usados, simuladores de movimiento secuestres, aplicaciones de realidad virtual.

También, este tipo de plataformas, se las ha utilizado desde mediados de los sesentas, en simuladores de vuelo inmersivos. En este tipo de simuladores de vuelo, se coloca una cabina real de un avión, en la base superior del robot, permitiendo este, que la cabina esté sometida a los mismos movimientos que tendría un avión real (conocidos como yaw, roll, pitch). Esto permite al piloto en entrenamiento, tener una sensación mucho más real e inmersiva del comportamiento del avión, a los mandos y controles aplicados.



Fig. 22. Fotografía de un simulador de vuelo utilizado en la década de los 90 (evans&sutherlandcomputer corp., 1996)

Además de la simulación de vuelo, esta configuración de robot, al tener 6 grados de libertad, puede simular el movimiento de prácticamente cualquier transporte, por lo que en algunos casos, es aplicado también a la simulación de manejo de automóviles, o incluso de los trasbordadores espaciales.

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS



Fig. 23. Plataforma Stewart utilizada en un simulador de manejo, por la firma BMW

Un ejemplo bastante innovador del uso de la plataforma Stewart, es el robot “trepá”, desarrollado por el grupo de robots y máquinas inteligentes de la universidad politécnica de Madrid. Este robot aprovecha la amplia movilidad de la plataforma debido a sus uniones universales, e implementa un intercambio entre la plataforma fija y la móvil, para poder trepar por estructuras, cuyo acceso es bastante limitado para el ser humano. Véase la *Fig. 24*.

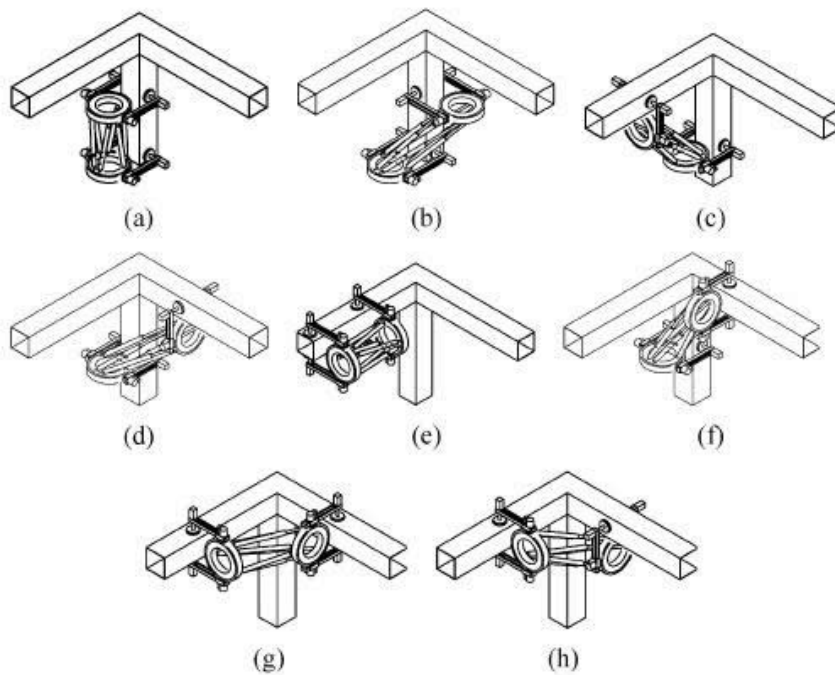


Fig. 24. Configuraciones que tomaría el robot trepá, para moverse por distintos medios físicos.
Fuente:(MADRID, 2007)

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

Este robot, en cada una de sus bases (superior e inferior, indistintamente), tiene un actuador que asegura a cada base a una parte de la estructura por la que se está moviendo, generando un movimiento tipo oruga, que le permite acceder sin problema a virtualmente cualquier posición que sea requerida. Véase la *Fig. 25*.



Fig. 25. Fotografía del robot trepa en su fase de desarrollo.
Fuente: (Madrid, 2007)

Entre las aplicaciones de uso general, podemos observar, por ejemplo, un diseño de una celda solar, que se autoposiciona para obtener la mayor cantidad de luz posible. Al poseer la plataforma Stewart la capacidad de moverse y rotar sobre sus 3 ejes, se puede obtener siempre una posición perpendicular precisa con respecto a la ubicación del sol, en cualquier instante del día. Véase la *Fig. 26*.



Fig. 26. Fotocelda posicionada por medio de una plataforma Stewart

En el campo de la robótica industrial, dada la libertad de movimiento de la plataforma Stewart, se está utilizando como muñeca en algunos brazos robot, donde la base móvil

CAPÍTULO 1. PLATAFORMAS ROBÓTICAS

de la plataforma se convierte en el portaherramientas del robot. Con esto se añade más movilidad al campo de acción de dicho brazo mecánico.

Además, entre otras aplicaciones, encontramos que se están utilizando plataformas Stewart en campos que van desde la ubicación de telescopios y antenas parabólicas, hasta cirugía y rehabilitación ortopédica. Las posibilidades de uso de este tipo de robot son ilimitadas debido a su versatilidad y resistencia mecánica.

CAPÍTULO 2

2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

2.1. Introducción

En este capítulo se describe la funcionalidad de cada una de las partes y del robot en su totalidad, además se establece todos los parámetros que servirán de guía durante el diseño del mismo.

Se especifica las características del sistema mecánico y se diseña individualmente las piezas que conforman la plataforma Stewart. El capítulo expone el diseño de la parte electrónica que comanda a los servomotores, integrados para proporcionar el movimiento al robot.

Además se incluye el análisis matemático de la plataforma robótica para posteriormente emplearlo en el software de control, necesario para realizar los cálculos de la cinemática inversa del mismo.

2.2. Diseño funcional

Por medio del diseño funcional se intenta explicar las tareas que realizan cada parte del robot y la interacción que existe entre ellas.

2.2.1. Descripción y diseño funcional de la plataforma Stewart

La plataforma Stewart esta compuesta por una base fija en la cual van empotrados seis servomotores, en los ejes de éstos (articulaciones de rotación) se insertan brazos de material plástico (eslabones de entrada), los cuales a su vez se unen por medio de juntas esféricas a los extremos inferiores de los eslabones de acoplamiento; la parte superior de éstos están unidas así mismo con articulaciones esféricas a la plataforma móvil. En la *Fig. 27.* se presenta la estructura de la plataforma Stewart realizada en SimMechanics (Toolbox de MatLab 2010).

La plataforma Stewart ha sido diseñada con el propósito de estudiar los controladores difusos, los cuales deben ubicar una esfera en el centro de la base móvil; el funcionamiento del robot está sujeto a un software de control; el cual pretende ubicar y rotar el efector final de acuerdo a las necesidades que se tengan, en este caso depende de la posición de la esfera; para lograr la tarea antes descrita es necesario dirigir las señales de control a los servomotores a través de una tarjeta electrónica, esta última obtiene las señales y alimentación del Bus Serial Universal (USB); la acción de los

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

motores desplazan angularmente los brazos de los servomecanismos y ubican y orientan la plataforma móvil del robot en la posición deseada.

Una vez detallado el robot, se muestra en la *Fig. 28* el diseño funcional y la interacción que existe entre las partes del mismo.

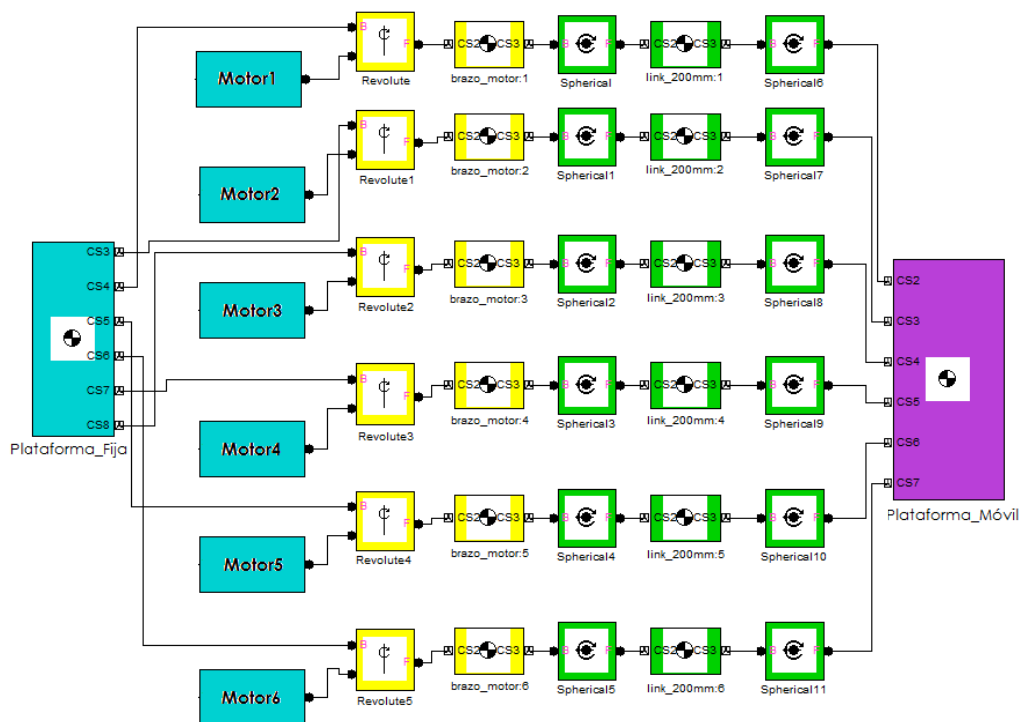


Fig. 27. Diagrama de la plataforma Stewart realizado en Simulink (SimMechanics)

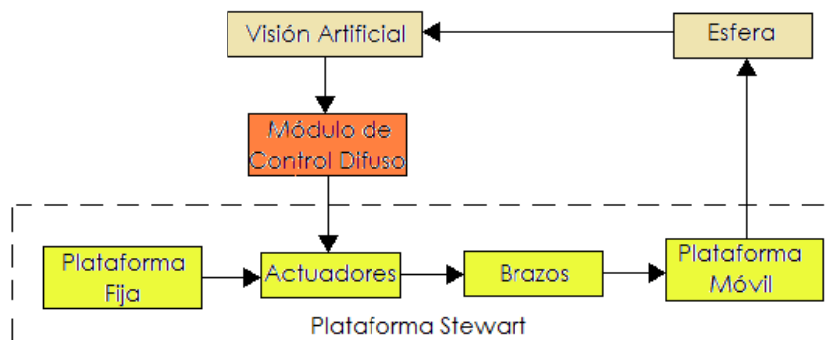


Fig. 28. Diseño funcional de la plataforma Stewart orientada a la aplicación de controladores difusos

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

2.2.2. Características funcionales

Como se mencionó anteriormente el robot ha sido diseñado con el fin de estudiar los controladores difusos, para cumplir con este objetivo se decidió controlar la posición de una esfera dentro de los márgenes del plataforma móvil, es decir, debe moverse de tal forma que ubique a la esfera en su centro.

A continuación se detalla las características funcionales que tendrá la plataforma robótica Stewart:

- Incluye un software de control difuso para regular la posición de una esfera.
- Posibilidad de controlar directamente 6 servomotores, con al menos 128 pasos para regular la posición de cada uno.
- Capacidad para detectar la posición de la bola en tiempo real (60 cuadros por segundo usando una imagen de 480x480px).
- Conexión USB.
- Alta capacidad de corriente para entregar a los servomotores.
- Varios puertos de E/S disponibles en la tarjeta electrónica, para experimentos futuros.

2.2.3. Características mecánicas

A continuación se describe de manera breve las características mecánicas de la plataforma Stewart.

- **Estructura 6-RSS.** Esto significa que el robot posee seis cadenas cinemática del tipo rotacional, esférica, esférica. Cada brazo esta conformada por dos eslabones, el uno de entrada y el otro de acoplamiento, la conexión entre los eslabones y el efector final se realiza mediante articulaciones esféricas (S), mientras que las articulaciones que interconectan la base fija con los eslabones de entrada son rotacionales (R). Véase la *Fig. 29*.
Se emplea esta configuración debido a que alcanza un mayor espacio de trabajo por sus seis grados de libertad (GDL).

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

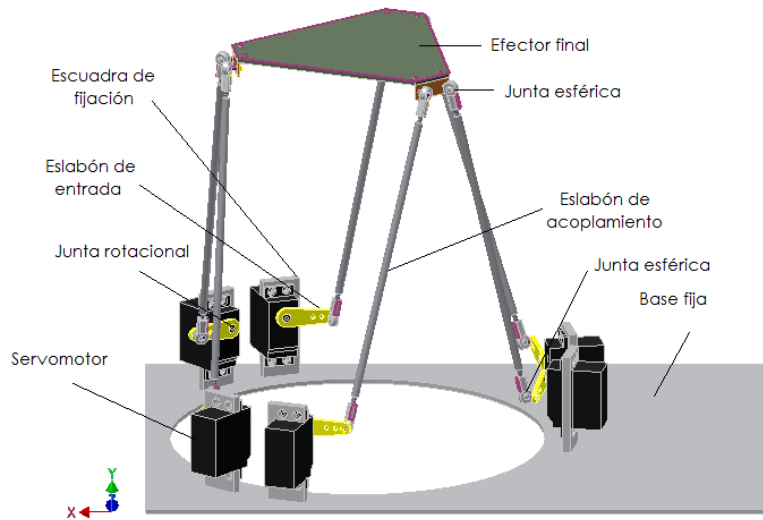


Fig. 29. Plataforma Stewart de seis grados de libertad y estructura RSS.

- **Ángulos de rotación.** 20° de rotación máxima de la plataforma móvil alrededor de los ejes x y z , la rotación puede realizarse en sentido horario como antihorario. Véase las Fig. 30 y Fig.31

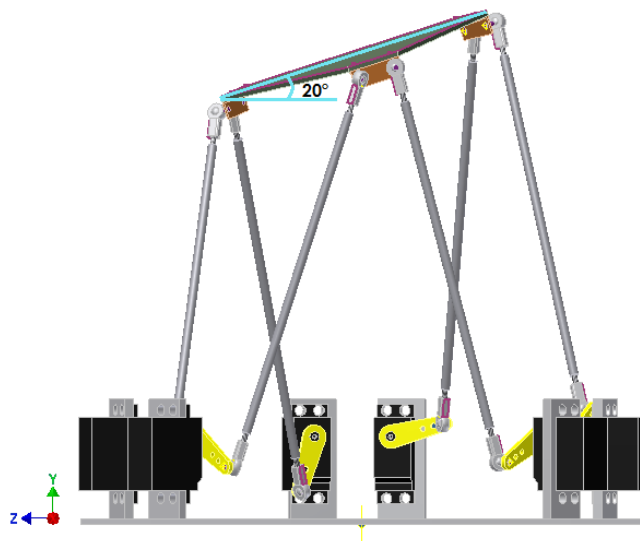


Fig. 30 Máxima rotación de la plataforma móvil alrededor del eje x

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

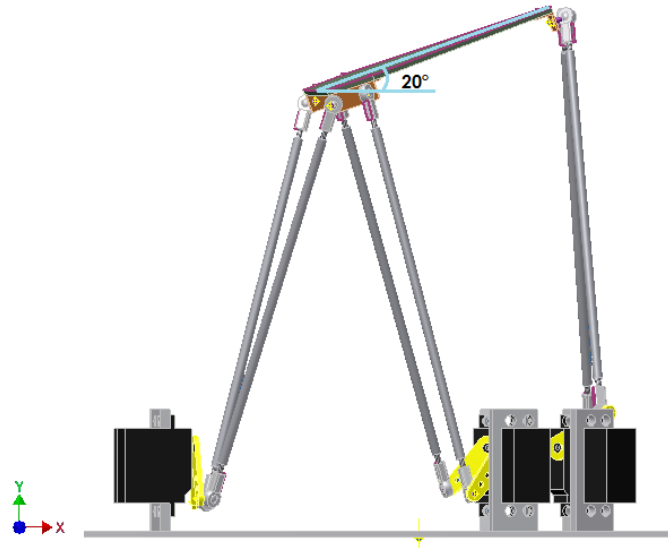


Fig. 31. Máxima rotación de la plataforma móvil alrededor del eje z

2.2.4. Sensores incluidos

El único sensor que dispone la plataforma paralela es una cámara de video usada en el sistema de visión artificial.

La cámara que se empleará es una ps3 eyecam véase la *Fig. 32*, por su excelente rendimiento en aplicaciones de visión artificial; tiene las siguientes características:

- Resoluciones de captura: 320x240, 640x480, 1024x768 en 16 bits por pixel de profundidad de color.
- Velocidades de captura máxima: 120fps para 320x240, 60fps para 640x480 y 30fps para 1024x768.
- Formato de la imagen capturada: JPEG sin compresión
- Interfaz: USB 2.0

Para el software de procesamiento de imágenes, se empleará las librerías de visión artificial OpenCV desarrolladas por Intel, éstas han sido compiladas para su uso con Visual Studio.NET 2008 (plataforma sobre la que se elaborará el software de control).

El software para el procesamiento de imágenes realiza las siguientes funciones:

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

- Inicializa la cámara en el modo seleccionado (640x480 a 60fps).
- Realiza la captura de la imagen y la almacena en un buffer.
- Recorta la imagen a 480x480px para dejar únicamente el área útil.
- Convierte la captura a escala de grises (8 bits por pixel).
- Suaviza la imagen utilizando un filtro blur de 10x10 px, para eliminar el ruido ambiental de la misma.
- Se binariza la imagen, tomando como umbral de binarización un valor aproximado de 0x0A (160 en decimal).
- Ejecuta el algoritmo Hough de detección de círculos, y se marca el perfil del círculo encontrado, correspondiente a la esfera.
- Obtiene las coordenadas del centro del círculo, y su diámetro, para transferirlas al software de control.

El proceso anterior se realiza en tiempo real.



Fig. 32. Cámara sp3eye cam
Fuente: (Amazon, 2011)

2.2.5. Elementos para el procesamiento

La inteligencia del robot básicamente está localizada en una PC, donde se encuentra el software de control; se ha optado por incorporar un ordenador core2duo de 2.2Ghz con Windows 7 de 32 bits debido a las ventajas que presenta su procesador, mismo que tiene una elevada capacidad de procesamiento, necesaria para aplicaciones de captura de video de alta velocidad (30 cuadros por segundo). Además se requiere que el procesador sea capaz de recibir en tiempo real la información de la video-cámara, por lo que es indispensable un puerto USB 2.0.

Existen sistemas de captura de video que no requieren un computador como la CMUCam, o los nuevos sensores de retina digital, pero su elevado costo y baja disponibilidad los hacen inasequibles para este proyecto.

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

Por último se dispone de un microcontrolador PIC18F4550 para enviar las señales de control (datos de 8 bits) desde el computador hasta los servomotores, siendo 0 el mínimo y 255 el máximo valor correspondiente al máximo ángulo de rotación del eje del motor, estos valores son recibidos por el microcontrolador para generar la señal PWM necesaria para colocar el servo en la posición deseada. Refiérase a la Fig. 33.

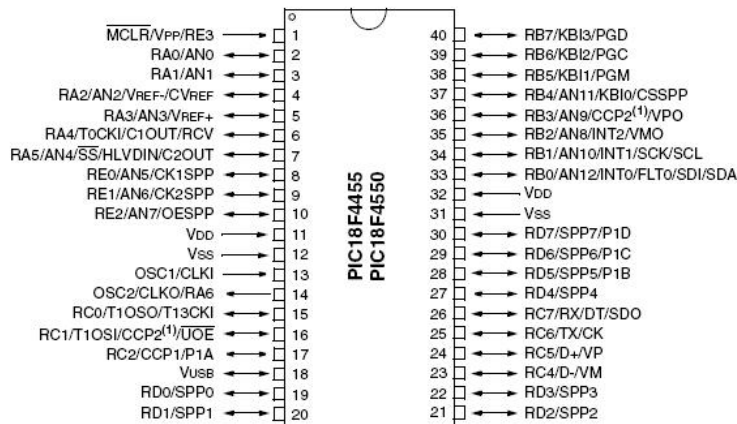


Fig. 33. Microcontrolador PIC18F4550
Fuente: (Palitroquez, 2008)

2.3. Definición de actuadores

Los actuadores son dispositivos electromecánicos que proporcionan fuerza para mover o actuar a otros sistemas mecánicos, en este caso a la plataforma paralela tipo Stewart. Los actuadores que se utilizaron fueron servos Hextronik HX5010, los mismos que poseen engranajes de plástico, además un peso de 39g, velocidad de 16sec/60Deg, torque máximo de 6,5Kg/cm y dimensiones de 40x20x38mm. Funcionan en un rango de voltaje de 4,8~6V. Véase la Fig. 34



Fig. 34. Servomotor Hextronik HX5010

2.4. Diseño del sistema mecánico

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

El robot esta constituido por diferentes piezas mecánicas, las mimas que deben formar un solo mecanismo de estructura 6RSS.

Para el diseño de las piezas se ha utilizado el software Autodesk Inventor Professional 2010, el mismo que proporciona las herramientas necesarias para construir las partes y el modelo completo de la plataforma paralela en 3D, esto permite validar la forma y la función del diseño antes de construirlo físicamente.

2.4.1. Diseño de la base fija

La base se ha diseñado de forma que pueda contener a los seis servomotores que proporcionarán el movimiento al robot. La forma que tiene es rectangular de dimensiones 300x400mm, el espesor es de 3mm y el material en el que se va a construir es aluminio.*Fig. 35.*

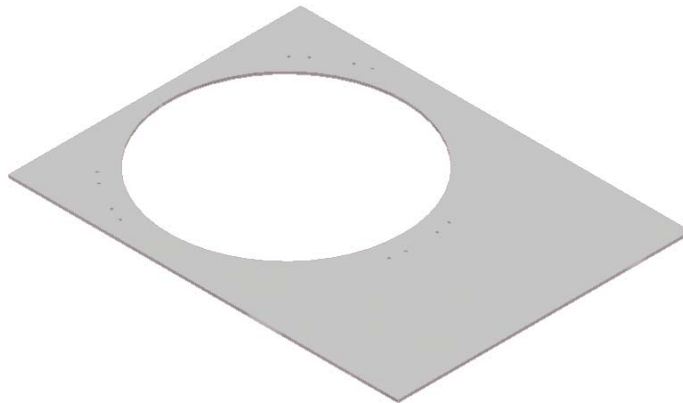


Fig. 35. Base Fija

2.4.2. Diseño de las escuadras de fijación para los servomotores

Para mantener sujetos los servomotores a la base fija, se diseñaron escuadras de fijación tal como se presenta en la *Fig. 36.*

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

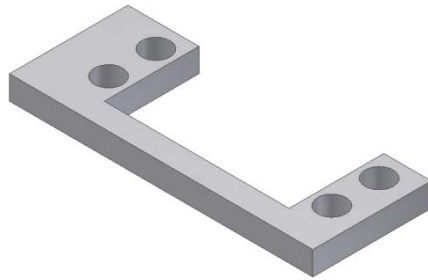


Fig. 36. Escuadra de fijación.

2.4.3. Eslabones

El sistema esta constituido por dos tipos de eslabones: los de entrada y los de acoplamiento. En la *Fig. 37* se muestran los dos tipos de eslabones.

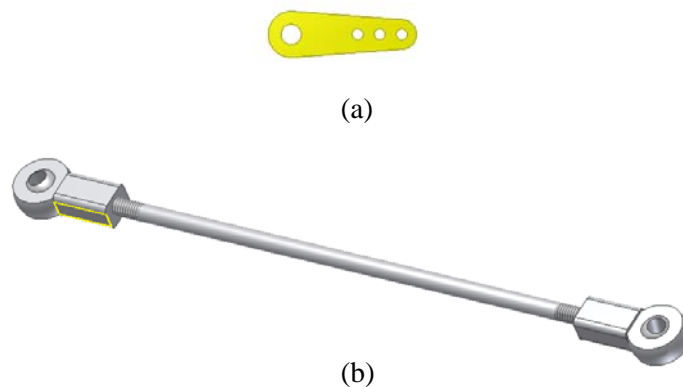


fig. 37. Eslabones: (a) de entrada, (b) de acoplamiento

2.4.4. Plataforma móvil

Es la plataforma que varía su posición y orientación respecto del sistema de coordenadas fijo. Los actuadores son los encargados de proporcionar el movimiento de rotación y traslación correspondientes. Véase la *Fig. 38*.

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

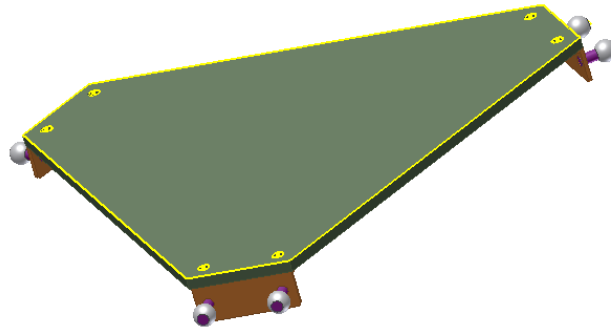


fig. 38. Plataforma móvil

2.4.5. Acoplamiento de los motores a la base fija

El ensamble de los seis servomotores a la base fija se logró por medio de las escuadras de fijación. A continuación en la *Fig. 39* se muestra el acople de estas piezas en Inventor 2010.

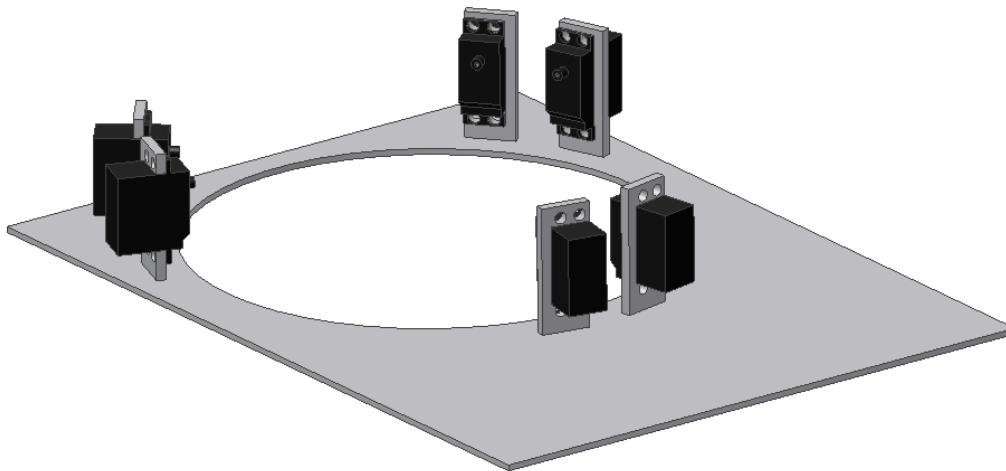


fig. 39. Base fija con servomotores

2.4.6. Ensamble final de la plataforma Stewart

Después de realizar el subensamble de la plataforma fija, se conecta todas las piezas que tienen movimiento en el robot, de esta manera el ensamble total queda como se muestra en *Fig. 40*.

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

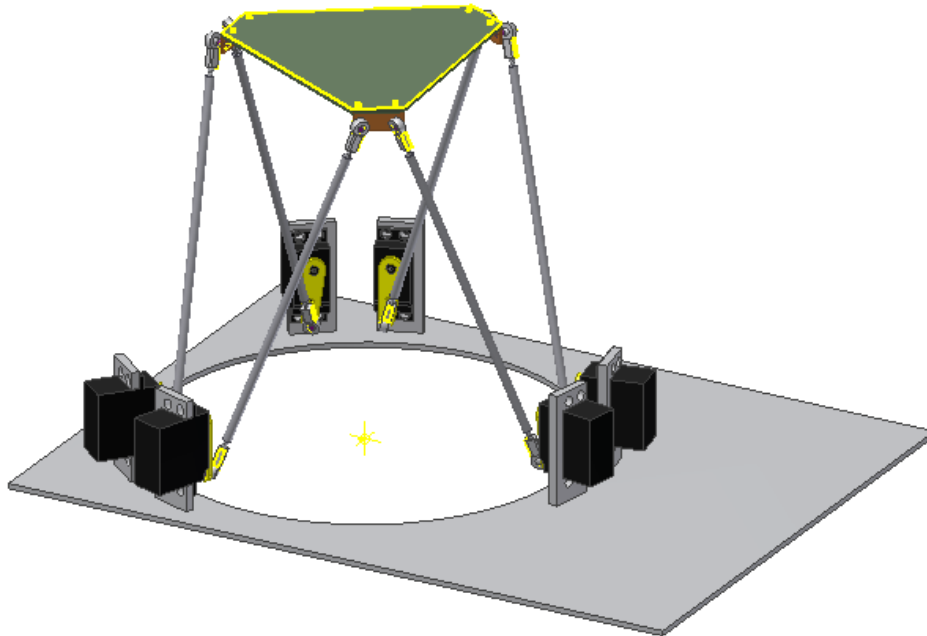


fig. 40. Ensamble final de la plataforma Stewart

2.5. Diseño electrónico

El diagrama funcional del sistema electrónico que conforma el robot se muestra en Fig. 41. El procesador principal se encarga de recibir las señales de control a través del bus USB, y las codifica para generar la señal PWM correspondiente que active cada motor.

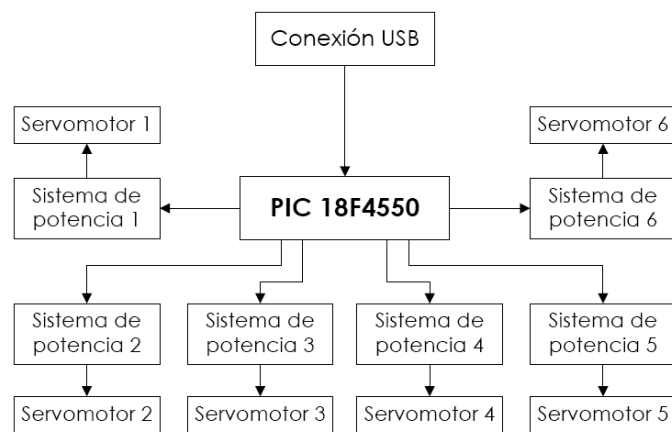


fig. 41. Diagrama funcional de la tarjeta electrónica

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

2.5.1. Diseño del circuito electrónico

El procesador principal es un microcontrolador PIC18F4550 que funciona a una frecuencia 20MHz. La tarjeta electrónica tiene un sistema de alimentación dual. El microcontrolador se alimenta directamente de la energía proporcionada del bus USB. Para la alimentación del sistema de potencia se utiliza una fuente externa de 6V, 1200mA. Véase la Fig. 42.

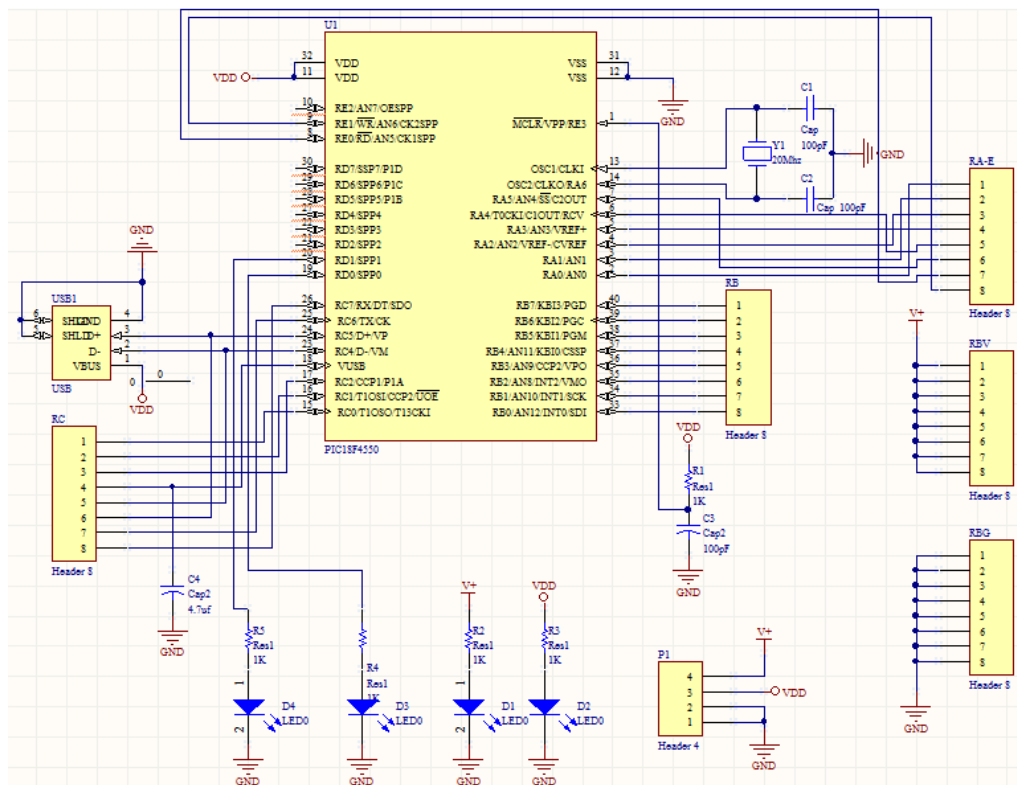


fig. 42. Diseño del circuito electrónico

2.5.2. Diseño PCB de la tarjeta electrónica

Una vez que se ha realizado el diseño y la disposición de los componentes electrónicos en la tarjeta, el diseño final se puede observar en la Fig. 43.

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

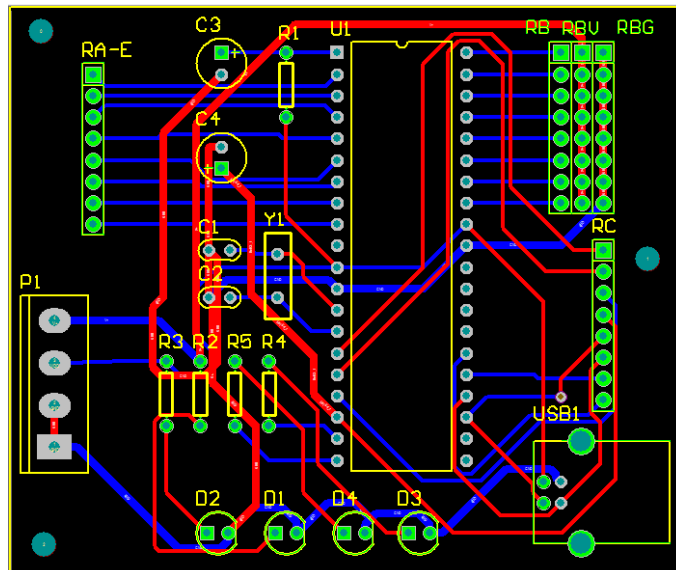


fig. 43. PCB de la tarjeta electrónica

2.6. Análisis matemático

El análisis matemático se centra en el estudio de la cinemática inversa del robot. Ésta última permite relacionar la orientación y posición de la plataforma móvil respecto de los ángulos de cada uno de los servomotores.

Para realizar el análisis matemático de la Plataforma Stewart, se debe partir de la premisa de que este tipo especial de robot paralelo, tiene que ser analizado usando la cinemática inversa, ya que por su configuración espacial, el cálculo de la cinemática directa, puede presentar varias respuestas diferentes para determinados valores de longitud de los actuadores, y dicho cálculo está fuera de este estudio.

El cálculo de la cinemática inversa toma en cuenta que la plataforma analizada, tiene una base fija con ejes coordenados X_f , Y_f y Z_f , y una plataforma móvil con ejes coordenados X_m , Y_m y Z_m , tal como lo indica la Fig. 44.

La plataforma móvil, como observamos en la Fig 43, tiene 6 puntos de apoyo uno en cada eje de los actuadores, que se enlaza con una junta esférica. Para el análisis matemático, vamos a tomar cada junta esférica como un punto en el espacio, de coordenadas $C_i[x,y,z]$, siendo i un valor de 1 hasta 6 correspondiente a cada una de las juntas.

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

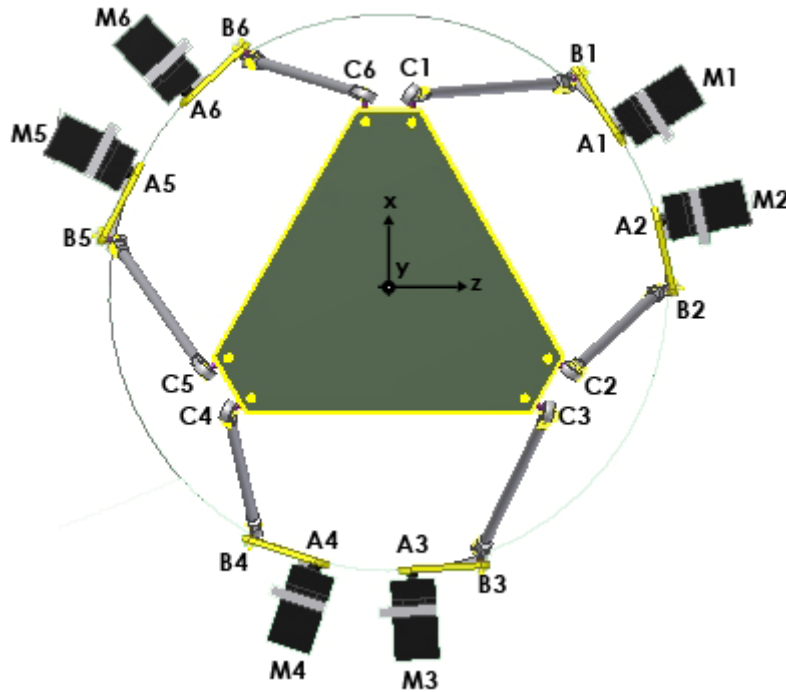


fig. 44. Ubicación de las juntas esféricas en el espacio

Cada una de estas juntas esféricas, está unida a una barra y a un brazo del servomotor, que en conjunto forman un triángulo con 2 lados de dimensiones fijas, siendo el lado restante, el que nos definirá la longitud del actuador, pudiendo con esto, resolver el cálculo de la cinemática inversa, de manera geométrica.

Para ilustrar esto, se toma una sola junta esférica, con su respectivo eslabón de acoplamiento, eslabón de entrada, y servomotor, como se puede observar en la *Fig. 45*:

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

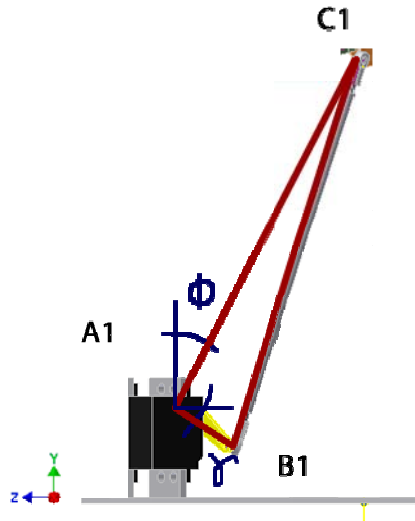


fig. 45. Triángulo formado en uno de los actuadores del robot.

Del triángulo formado con los puntos A1, B1 y C1 y dado que conocemos las coordenadas en el espacio del punto A1 y C1 (estas se obtienen de las dimensiones físicas del robot), se puede obtener la longitud del lado AC utilizando cálculo matricial. Restando los dos vectores de posición de los puntos A y C, se obtiene lo siguiente:

$$[AC_i] = [C_i] - [A_i]$$

Donde A_i y C_i son las coordenadas en el espacio de los puntos A y C, para el respectivo actuador i .

Para obtener la longitud del lado AC_i , basta con encontrar el módulo del vector resultante, utilizando la siguiente ecuación:

Además de la longitud del actuador, se necesita encontrar el ángulo con el que se encuentra inclinado con respecto al servomotor. Este ángulo ϕ se halla con la siguiente ecuación:

Una vez calculado este ángulo, que representa la inclinación del lado AC_i con respecto a la vertical, y dado que se tiene los valores de los tres lados del triángulo, procedemos

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

a calcular el ángulo γ que representa el valor de desplazamiento del servo. Para calcular este ángulo, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{lb^2 - ACi^2 - ls^2}{2 * Aci * ls} \right)$$

Debido a que el ángulo γ es calculado con respecto a la horizontal, para calcular el ángulo que debe girar el servo, se emplea la siguiente ecuación:

$$\theta = \gamma + \phi - \frac{\pi}{2}$$

Siendo θ el valor que deberá girar el servo, para que el actuador llegue a la longitud deseada, de acuerdo a las coordenadas espaciales indicadas para la unión esférica correspondiente.

Sí se evalúa el problema de la cinemática inversa, dividiendo el problema en un actuador por separado, se facilita de gran manera el cálculo, haciéndolo mucho más sencillo de implementar en un software de control. La función de cálculo de la posición final del actuador se implementó en el software de control, utilizando la siguiente función (programada en Visual Basic .NET):

```
Public Function anguloServo(ByVal xm As Double,          ByVal ym As Double,
ByVal zm As Double, ByVal xf As Double,  ByVal yf As Double,  ByVal zf As Double,
ByVal ls As Double, ByVal lb As Double) As Double
    Dim salida As Double
    Dim vm(2, 0) As Double
    Dim vf(2, 0) As Double
    Dim vr(2, 0) As Double

    vm(0, 0) = xm
    vm(1, 0) = ym
    vm(2, 0) = zm

    vf(0, 0) = xf
    vf(1, 0) = yf
    vf(2, 0) = zf

    vr = Subtract(vm, vf)

    Dim p0x As Double = vr(0, 0)
    Dim p0y As Double = vr(1, 0)
    Dim p0z As Double = vr(2, 0)

    Dim r As Double = Sqrt(p0x ^ 2 + p0y ^ 2 + p0z ^ 2)
    Dim phi As Double = Atan2(p0z, Sqrt(p0x ^ 2 + p0y ^ 2))

    Dim A As Double = r
```

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

```
Dim B AsDouble = lb
```

```
Dim C AsDouble = ls
```

```
Dima_gama = Acos((B ^ 2 - A ^ 2 - C ^ 2) / (-2 * A * C))
```

```
salida = a_gama + phi - deg2rad(90)
```

```
Returnsalida
```

```
EndFunction
```

Esta función, utiliza los siguientes parámetros:

- Xm, Ym, Zm: Coordenadas espaciales en X, Y, Z del punto Ci
- Xf, Yf, Zf: Coordenadas espaciales en X,Y,Z del punto Ai
- Ls: Longitud en mm del brazo del servomotor
- Lb: Longitud en mm de la barra de unión

CAPÍTULO 3

3. IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

3.1. Introducción

En este capítulo se especifica las características de construcción de las partes de la estructura mecánica Stewart, así como la secuencia de ensamble de las mismas. Este proceso se realiza tomando en cuenta los diseños desarrollados en el capítulo 2.

En la parte electrónica se procede a la fabricación de la tarjeta de control de los servomotores y posteriormente colocar sobre ésta todos los componentes electrónicos que permitirán lograr el trabajo de control.

Para el funcionamiento de la plataforma Stewart se muestra el diseño y desarrollo de la interfaz de usuario, la cual se realizó como una aplicación didáctica para el estudio de controladores difusos.

3.2. Construcción de la estructura mecánica

En el capítulo anterior se realizó el diseño de cada una de las piezas con el apoyo del sistema CAD, en base a éstos se construyó las partes que conforman plataforma robótica.

3.2.1. Base fija

La construcción se realizó en placa de aluminio de 3mm de espesor, con dimensiones de 300x400mm, contiene tres grupos de agujeros separados 120° entre sí, véase la *Fig. 46*. No se realizó el agujero para mantener la rigidez de la plataforma fija.

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART



fig. 46. Base fija

3.2.2. Escuadra de fijación

Fue construida en aluminio de 3mm de espesor, con las dimensiones necesarias para acoplarse a los servomotores y a la base fija. En la *Fig. 47* se puede observar la escuadra de fijación,



fig. 47. Escuadra de fijación

3.2.3. Eslabones

Los eslabones de acoplamiento se realizaron en material de fibra de carbono y llevan en sus extremos articulaciones esféricas de aluminio, las cuales interconectan la plataforma móvil con los eslabones de entrada. Véase la *Fig. 48*.

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART



fig. 48. Eslabón de acoplamiento

3.2.4. Plataforma móvil

Se implementó en aluminio de 3mm de espesor, con tres soportes que conectan la plataforma móvil con los eslabones de acoplamiento. Véase la *Fig. 49*.



(a)



(b)

fig. 49. Base móvil: (a) vista superior, (b) vista inferior.

3.2.5. Tarjeta electrónica

El circuito impreso que se muestra en la *Fig. 50* ha sido fabricado de acuerdo al diseño expuesto en el capítulo 2.

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

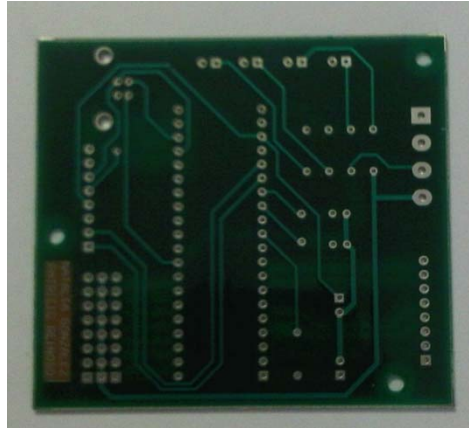


fig. 50. Tarjeta electrónica para el comando de los motores

Una vez listo el circuito impreso, los componentes quedarán soldados y distribuidos de la siguiente manera, véase la *Fig. 51*.

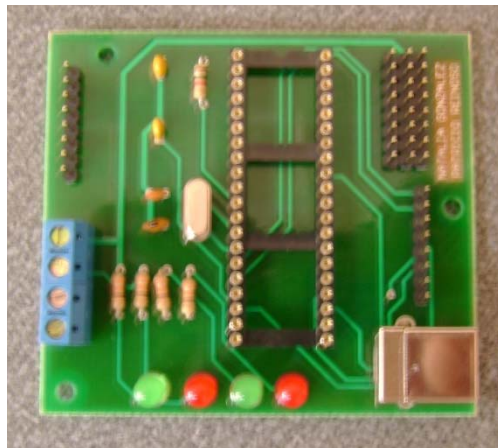


fig. 51. Tarjeta electrónica con los componentes

3.3. Ensamblaje de las partes del robot

Después de construir cada una de las partes de la plataforma Stewart se procede al acoplamiento de cada una de ellas, como se muestra en los apartados siguientes.

3.3.1. Acoplamiento de los motores a las escuadras de fijación

Para mantener firmes los motores a la plataforma fija, se ha optado por ensamblar a cada uno una escuadra de fijación, véase la *Fig. 52*.

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

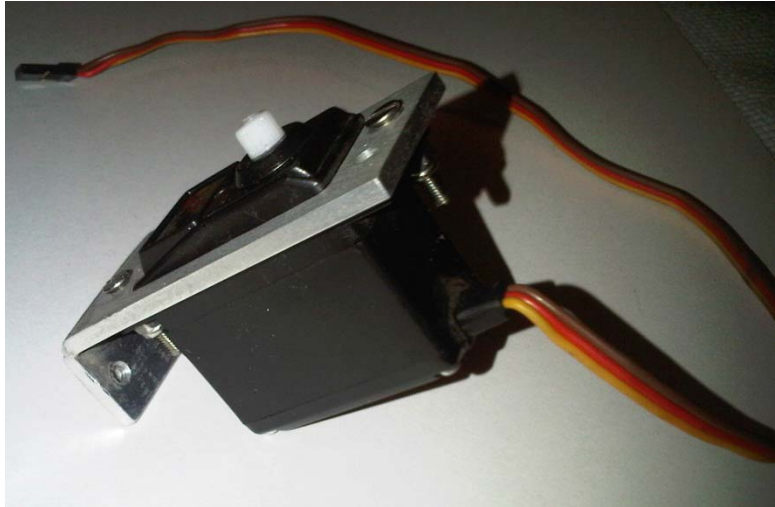


fig. 52. Motor acoplado a la escuadra de fijación

3.3.2. Acoplamiento de los motores a la base fija

Los motores son ensamblados a la base como se muestra en la *Fig.53*, el acople resulta fácil debido a que sólo se debe atornillar las partes.

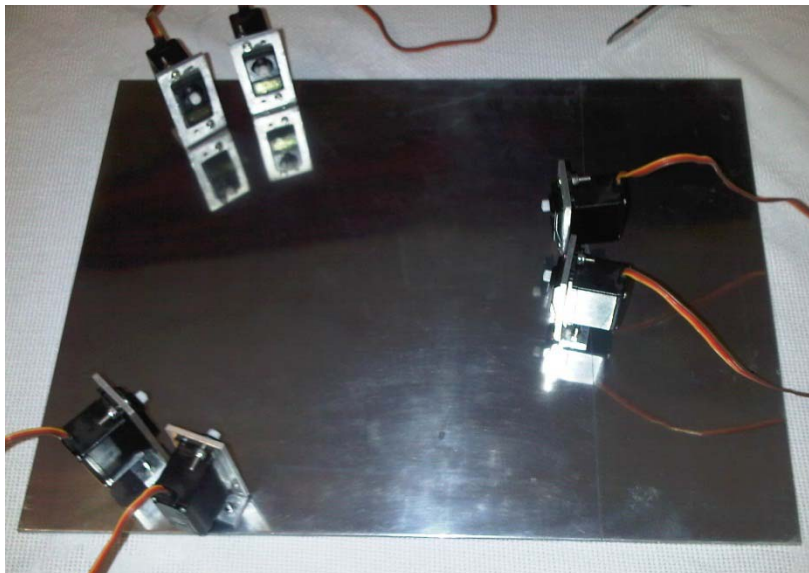


fig. 53. Servomotores acoplados a la base fija

3.3.3. Acoplamiento de los eslabones

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

Cada uno de los eslabones del robot son conectados por medio de juntas esféricas como se muestra en la *Fig. 54*.



fig. 54. Eslabones acoplados a los servomotores

3.3.4. Acoplamiento de la plataforma móvil

La conexión de la plataforma móvil al ensamble mayor se lo hace por medio de articulaciones esféricas, véase la *Fig. 55*.

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

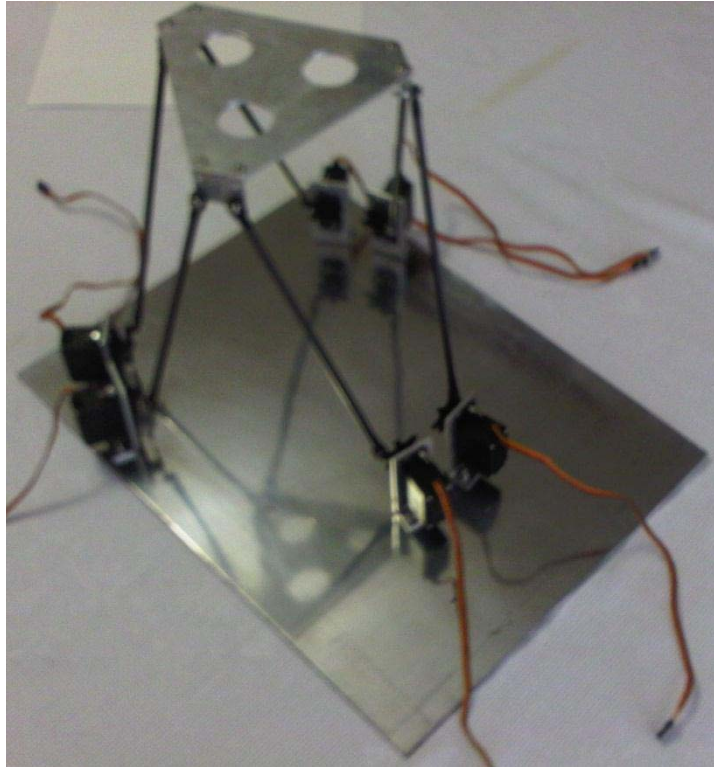


fig. 55. Acoplamiento de todas las piezas de la plataforma Stewart

3.3.5. Ensamble final de la plataforma Stewart

Una vez que las partes individuales del robot Stewart han sido acopladas, se procede a montar sobre la base móvil una plancha cuadrada (300x300mm) de madera mdf de 3mm de espesor, recubierta con foamie negro; este procedimiento se realiza para poder obtener un espacio de desplazamiento mayor para la esfera que se colocará posteriormente.

Además para poder implementar el sistema de control difuso que incluye visión artificial se incluye una estructura de soporte para la video-cámara, la cual se construyó con material plástico unido por termofusión, tiene 68cm. de altura y 60cm. de ancho. En la *Fig. 56* se puede ver el ensamble final.

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

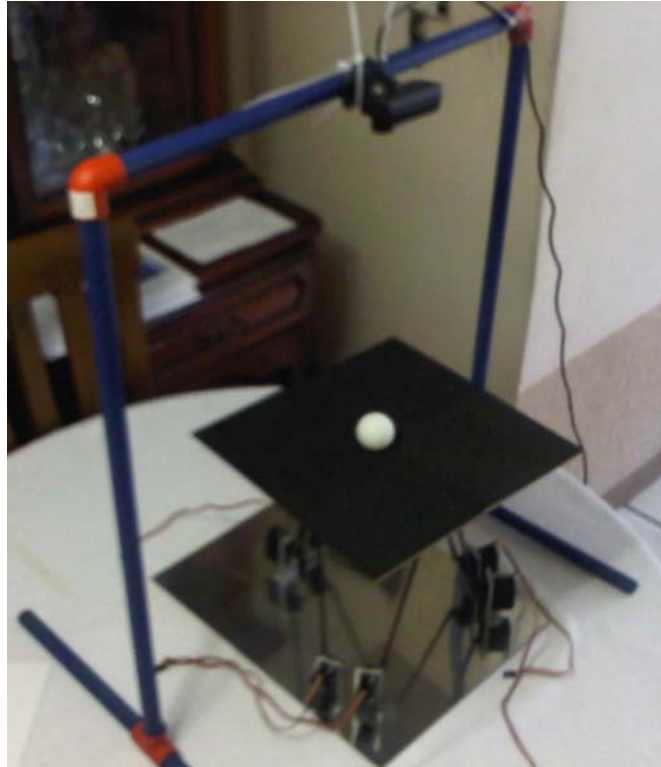


fig. 56. Ensamble final

3.4. Interfaz de usuario

El software diseñado para la plataforma Stewart, ha sido creado como una aplicación didáctica para el estudio de los sistemas de control.

Este software, tiene como objetivo, lograr que la plataforma lleve un objeto (una esfera) sobre su base móvil, desde una posición arbitraria hasta el centro de la misma.

Para cumplir con la tarea anterior, se usa como entrada el sistema de visión artificial, el cual, luego de capturar y procesar la imagen mediante una cámara de video, nos indica la posición del objeto sobre la plataforma móvil. Estos datos de posición son ingresados al bloque de control, el cual calculará la posición angular en la que deben ubicarse los servomotores para mover al objeto a la posición central de la plataforma móvil. Véase la *Fig.57*.

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

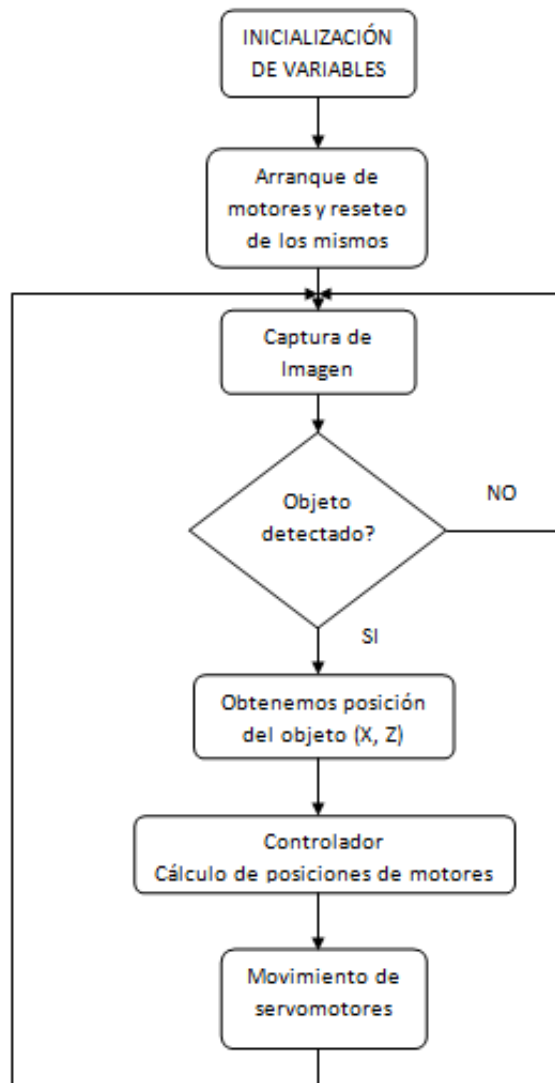


fig. 57. Diagrama de flujo del software de aplicación didáctica

La interfaz de usuario del software de control diseñado para esta aplicación específica, se realizó mediante Visual Studio 2008, mientras que la programación en Visual Basic .NET, véase la *Fig.58* .

La interfaz contiene 3 bloques de elementos:

1. Botonera de inicialización
2. Parámetros de configuración de la captura de imagen

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

3. Visualización de captura y posición del objeto

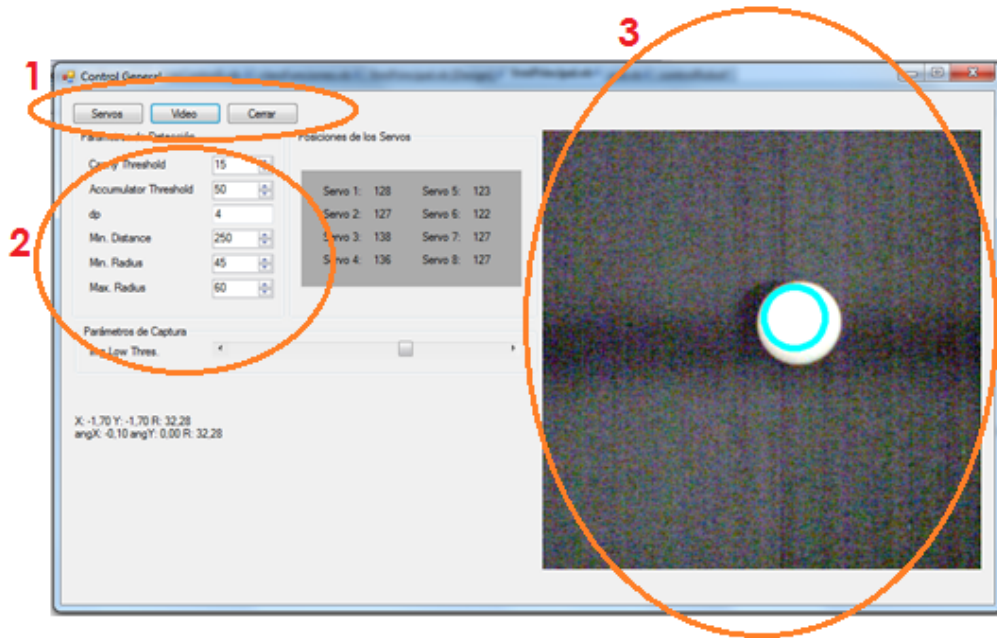


fig. 58. Interfaz de usuario del software de control

Los 3 botones ubicados en la parte superior, llamados “Servos”, “Video” y “Cerrar” tienen las siguientes funciones:

- **Servos:** Inicializa la tarjeta de control de los servos, colocándolos todos en una posición central.
- **Video:** Inicializa la WebCam y la captura de video, con los parámetros requeridos. Además acciona el bucle en la Fig. 57 que controla el robot.
- **Cerrar:** Cierra el programa.

En lo que corresponde a los parámetros de captura de imagen, se ha colocado algunos selectores numéricos para calibrar los parámetros requeridos de la captura y reconocimiento del objeto.

Para la visualización en tiempo real de la imagen capturada y la detección correcta del objeto se presenta un recuadro a la derecha de la interfaz, donde se muestra el video obtenido por la cámara. Sobre este video, en el momento en que se detecta el objeto se señala sobre éste un círculo, que corresponde al de la esfera. Esta marca, internamente contiene los valores de la posición del objeto en el plano XZ de la plataforma móvil.

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA TIPO STEWART

El software toma los valores de la posición, y los ingresa al controlador difuso programado, para que, por medio del cálculo, nos entregue a la salida los ángulos que deberá girar la plataforma móvil para mover el objeto hacia el centro de la misma. Los valores de rotación obtenidos, serán ingresados a la sección de cálculo de la cinemática inversa, para de esta manera obtener el ángulo que debe girar cada servomotor y ubicar la plataforma móvil en la posición requerida.

Los ángulos, serán enviados a través del bus USB a la tarjeta de control, que se encargará de proporcionar las señales necesarias para que los servomotores se coloquen en la posición requerida.

CAPÍTULO 4

4. CONTROLADORES DIFUSOS

4.1. Introducción

En el presente capítulo se expondrá los conceptos fundamentales, operaciones y principios subyacentes del control difuso, los mismos que nos permitirán avanzar con el desarrollo de los sistemas de control basados en la lógica difusa.

Una vez revisados los temas de lógica y control difuso se detalla las características de los diferentes tipos de controladores que se probaron en la plataforma Stewart. Tal es el caso del controlador tipo proporcional difuso, proporcional derivativo difuso y proporcional integral derivativo difuso.

4.2. Teoría de lógica difusa

En la lógica clásica, una afirmación puede ser verdadera o falsa – no toma valores intermedios – la lógica difusa es un concepto mucho más amplio que abarca a la tradicional, pues permite tomar valores entre cero y uno, entonces una afirmación puede ser más o menos verdad en lógica difusa.

El término “Conjunto Difuso” fue propuesto en el año de 1965 por un profesor de la Universidad de Berkeley en Estados Unidos, llamado Lofti A. Zadeh, éste publicó un artículo titulado “Fuzzy Sets” en la revista “Informations and Control” y tres años después “FuzzyAlgorithm”. La intención de Zadeh era manejar de forma más eficiente la imprecisión del razonamiento humano mediante la creación de un mecanismo matemático.

La lógica difusa a diferencia de la lógica clásica, tiene la capacidad de representar aceptablemente los modos usuales de razonamiento que empleamos para resolver problemas complejos de nuestra cotidianidad, es decir, este tipo de lógica es flexible, considera que la certeza de una proposición es una cuestión de grado, por lo tanto la precisión (lógica clásica) es un caso límite. Lo atractivo de la lógica difusa es que se basa en el lenguaje habitual de las personas y es capaz de modelar problemas no – lineales.

Paralelamente ciertos investigadores se han inclinado por la lógica difusa, en 1975 el profesor Mandani en Londres, desarrolló una estrategia para el control de los procedimientos necesarios para la conducción de un motor a vapor, pero a fines de 1980 es en el Japón donde verdaderamente se desarrolla este tipo de control, pues

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

ahora es común comprar en el mercado una lavadora o una cámara “FuzzyLogic”, en fin son innumerables las aplicaciones en la actualidad de esta revolucionaria teoría.

4.2.1. Conjuntos difusos

Los conjuntos difusos son el último desarrollo de la teoría matemática de conjuntos. Es posible expresar la mayor parte de las matemáticas en lenguaje de teoría de conjuntos.

Un sistema en el que las proposiciones deben ser verdaderas o falsas, pero no ambas, utiliza una lógica binaria. Como consecuencia de ello lo que no es cierto es falso y viceversa, pero la lógica binaria es sólo una aproximación a la razón humana. Zadeh en cambio focaliza sus estudios a la flexibilidad de ciertos términos que procesa el cerebro humano, tales como: “mucho”, “alto” y “bello”. Para definir un conjunto de hombres altos por medio de la teoría de conjuntos clásicos, denominaremos a este conjunto como $P(x)$, donde x es la altura de una persona y llamaremos altos a todos los hombres que cumplan la siguiente condición: $x \geq 176$ cm; esta es una aproximación brusca, sobre la definición de altura. Zadeh propone la inclusión de un grado de pertenencia, de manera que la transición de pertenencia a la no pertenencia es gradual y no abrupta. De allí que el grado de pertenencia de todos los elementos forma un conjunto difuso, *Fig. 59*.

Conjunto Difuso. Dado un conjunto de elementos U , un conjunto difuso A en U está definido como un conjunto de pares ordenados (Reznik, 1997)

$$A \equiv \{ \langle x, \mu_A(x) \rangle \mid x \in U \}$$

Donde $\mu_A(x)$ se le conoce como función de membresía o de pertenencia para el conjunto de todos los elementos x en U .

La función de membresía asigna para cada valor de X un grado de pertenencia $\mu_A(x)$, el mismo que toma valores numéricos reales dentro del intervalo cerrado $[0, 1]$. Note que ahora es necesario trabajar con pares $\langle x, \mu_A(x) \rangle$, mientras que para los conjuntos clásicos es suficiente una lista de objetos, ya que su pertenencia está sobreentendida. Los conjuntos clásicos son un caso especial de los conjuntos difusos. (Reznik, 1997)

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

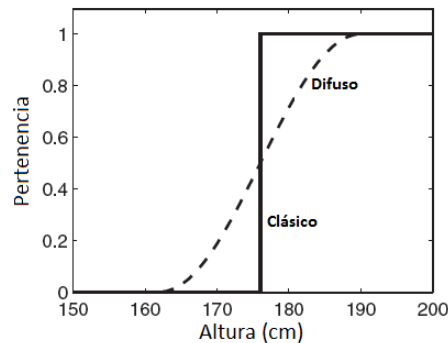


fig. 59. Definición para el conjunto de hombres altos, mediante conjunto clásico y difuso.

Ejemplos:

Los siguientes conjuntos pueden ser descritos mediante una función de pertenencia difusa.

- El conjunto de los números reales $X \gg 1$ (X mucho mayor que uno).
- El conjunto de temperaturas altas, el conjunto de vientos fuertes, o el conjunto de días bonitos son conjuntos difusos en el ámbito de los reportes del clima.

4.2.2. Función de pertenencia

Estas funciones indican el grado de pertenencia al conjunto A de cada elemento X . El rango de estas funciones está restringido al intervalo cerrado $[0,1]$, donde 1 señala la pertenencia total de un elemento a dicho conjunto. Existen dos alternativas para representar una función de membresía: continua o discreta, pero nos centraremos en el estudio de las funciones de pertenencia continuas. Un conjunto difuso continuo A se define mediante una función de membresía continua $\mu_A(x)$. (Reznik, 1997)

Según la forma de las de funciones de pertenencia se las puede clasificar en dos grupos, las “lineales” formadas por líneas rectas y las “curvas” que presentan formas gaussianas, entonces los distintos tipos de funciones se ilustran en la Tabla 3:

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

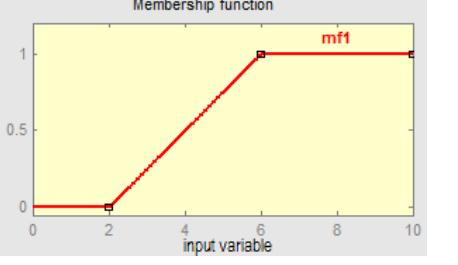
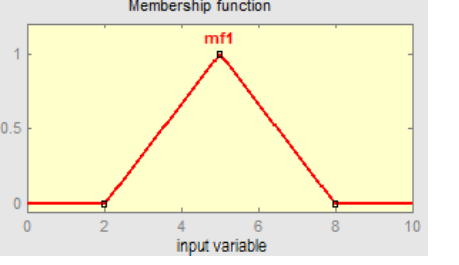
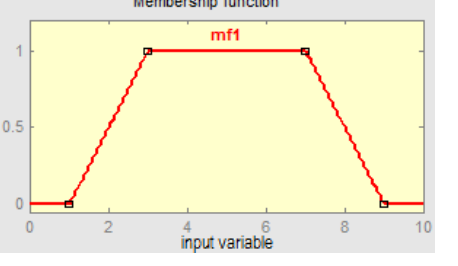
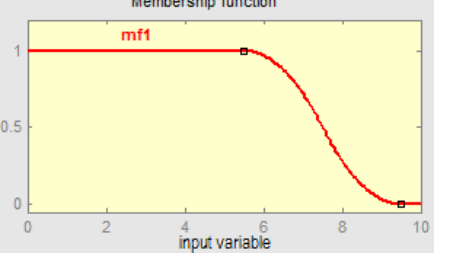
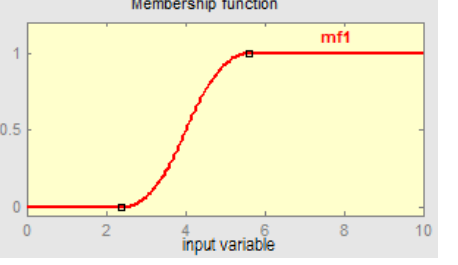
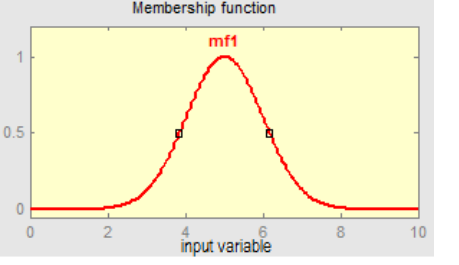
	
Función Gamma	Función Triangular
	
Función Trapezoidal	Función Z
	
Función S	Función Gaussiana

Tabla 3. Tipos de funciones de pertenencia para conjuntos difusos

Todas estas funciones de pertenencia fueron detalladas por Zadeh, pero en realidad cualquier función puede definir un conjunto difuso, sin embargo las antes mencionadas son las más utilizadas debido a su simplicidad matemática.

Según Zadeh, un conjunto difuso es una distribución de posibilidad en el universo, lo que implica que se puede interpretar los valores de pertenencia como una posibilidad.

4.2.3. Operaciones con conjuntos difusos

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

Con el fin de tratar y comparar los conjuntos difusos, la igualdad y la inclusión se definen por medio de funciones de pertenencia.

Definición Igualdad e inclusión de conjuntos difusos. Sea A y B dos conjuntos difusos definidos en un mutuo universo U. Los dos conjuntos difusos son iguales si tienen la misma función de membresía:

$$A = B \equiv \mu_A(x) = \mu_B(x)$$

Un conjunto difuso A es un subconjunto de un conjunto difuso B si la función de pertenencia de A es menor o igual que la de B,

$$A \subseteq B \equiv \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$$

Con el fin de generar nuevos conjuntos difusos a partir de otros ya existentes, se definen dos operaciones, que en ciertos aspectos son similares a la suma y a la multiplicación. La unión de los conjuntos X y Y, se simboliza como $X \cup Y$, es el conjunto resultante de todos los elementos que pertenecen al conjunto X o al Y, o a ambos, se expresa de la siguiente manera:

$$X \cup Y \equiv \{x \mid x \in X \text{ ó } x \in Y\}$$

La intersección de los conjuntos X y Y, se simboliza como $X \cap Y$, es el conjunto de todos los elementos que pertenecen a X y Y, se expresa como sigue:

$$X \cap Y \equiv \{x \mid x \in X \text{ y } x \in Y\}$$

El complemento de un conjunto X, se simboliza como \overline{X} , se expresa a continuación:

$$\overline{X} \equiv \{x \mid x \notin X\}$$

que es el conjunto de todos los elementos del universo que no pertenecen (\notin) a X.

Definición Unión, intersección y complemento de conjuntos difusos. Dado dos conjuntos difusos A y B definidos dentro de un mutuo universo U. La unión de A y B es:

$$A \cup B \equiv \{ \langle x, \mu_{A \cup B}(x) \rangle \mid x \in U \text{ y } \mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \}$$

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

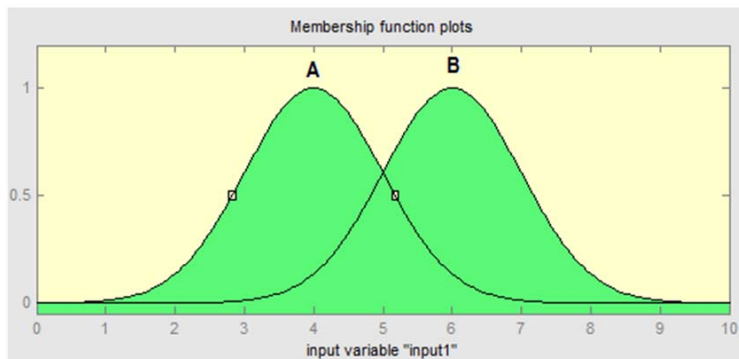


fig. 60. Unión de dos conjuntos difusos A y B

La intersección de A y B es:

$$A \cap B \equiv \left\{ \langle x, \mu_{A \cap B}(x) \rangle \mid x \in U \text{ y } \mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \right\}$$

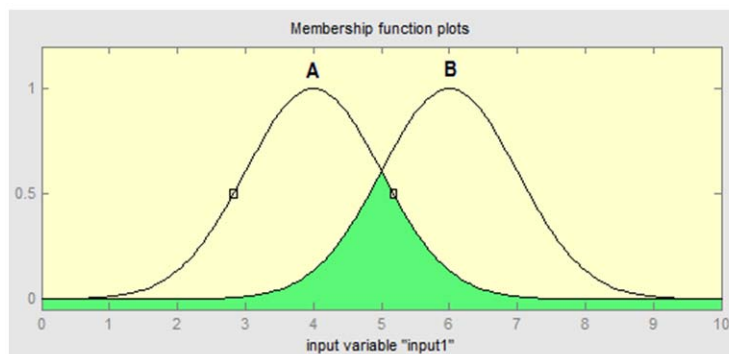


fig. 61. Intersección de dos conjuntos difusos A y B

El complemento difuso de A es:

$$\bar{A} \equiv \left\{ \langle x, \mu_{\bar{A}}(x) \rangle \mid x \in U \text{ y } \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \right\}$$

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

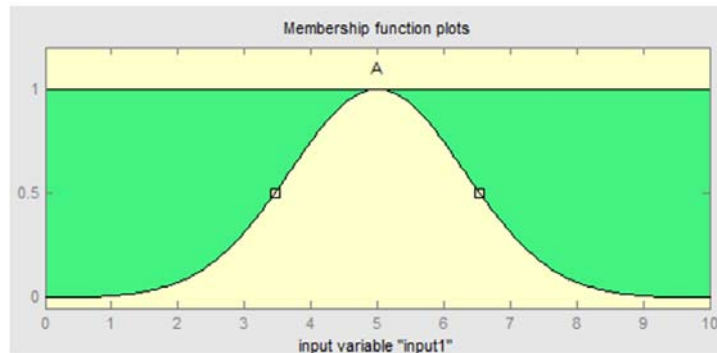


fig. 62. Complemento difuso de A

4.2.4. Variables lingüísticas

Una variable algebraica toma números como valores, en cambio una variable lingüística toma como valores palabras o sentencias; las palabras son menos precisas que los números, por lo que una variable lingüística da un significado aproximado a las características de los fenómenos de un problema. Por ejemplo la velocidad de un automóvil es una variable lingüística, donde velocidad es la etiqueta de la misma y puede tomar valores como “muy alta”, “alta”, “media”, “baja”, “muy baja”. Cada valor que toma la variable representa un conjunto difuso en el universo en discurso como lo muestra la Fig63.

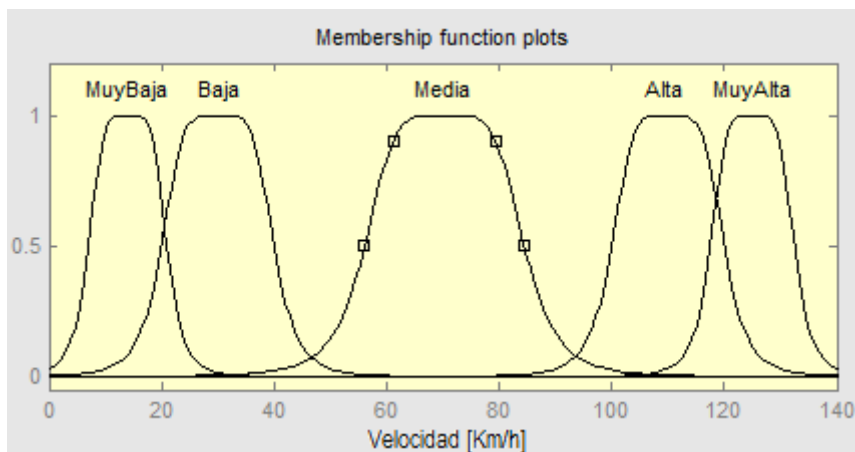


fig. 63. Variable lingüística (Velocidad).

Una variable lingüística esta formada por cinco partes:

- Etiqueta de la variable
- Conjunto de valores lingüísticos de velocidad.
- Universo de discurso donde se definen los valores de la variable

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

- Regla sintáctica para generar los nombres de los valores de la variable.
- Regla semántica para asociar cada valor a su significado.

4.2.5. Reglas difusas

Antes de presentar el concepto de reglas difusas, se explica en que consisten los conectores, pues son sencillamente palabras que tienen la capacidad de conectar o relacionar frases, por ejemplo: y, ó, Sí – Entonces (implicación) y Sí y solo sí.

Una frase que es modificada por la palabra ‘no’ se le denomina negación de la frase original. La palabra ‘y’ es utilizada para conectar dos frases y formar la conjunción de las mismas. El conector ‘o’ se utiliza para unir dos frases formando la disyunción de éstas. A partir de dos sentencias podemos construir una, de la forma ‘Si... entonces...’; a esto se le llama conector de implicación. Los símbolos que generalmente se usan para representar a los conectores son los siguientes:

- \neg Para “negación”
- \wedge Para “y”
- \vee Para “ó”
- \Rightarrow Para “sí - entonces” (implicación)
- \Leftrightarrow Para “sí y sólo sí” (equivalencia)

Las reglas difusas tienen la siguiente forma:

SÍ<Proposición Difusa> **ENTONCES**<Proposición Difusa>

La proposición contigua a SI, se le denomina “*antecedente*”; la proposición contigua a ENTONCES se le llama “*consecuente*”. Existen dos tipos de proposiciones difusas:

Atómica.- “x es A”, donde x es la variable lingüística y A es el valor lingüístico.

Compuesta.- es aquella que está formada por dos o más proposiciones difusas atómicas, enlazadas por medio de los conectores “y”, “o” o “no”, representando intersección, unión y complemento difuso, respectivamente. De allí que se puede conseguir la proposición compuesta que sigue, “x es A o x no es B”. En una sentencia difusa compuesta pueden intervenir algunas variables.

Por último la interpretación de una regla difusa involucra dos partes:

1. Evaluación del antecedente, conocido como proceso de fusificación de las entradas (aplicando los operadores necesarios en el caso de proposiciones compuestas).
2. Aplicar el resultado de la fusificación al consecuente, conocido como proceso de implicación.

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

4.2.6. Implicación difusa

Una implicación difusa expresa la relación existente entre el antecedente y el consecuente de una regla, es decir, cada una de las reglas o proposiciones forma un nuevo conjunto difuso con su propia función característica que mide el grado de verdad de la relación de implicación entre el antecedente y el consecuente. En el caso de la lógica difusa existen diferentes funciones de implicación, las más comunes son:

F. Implicación	Basada en	T	S	Expresión
Dienes-Resher	$(\neg p) \vee q$	-	max	$\mu_{Rb}(x, y) = \max[1 - \mu_A(x), \mu_B(y)]$
Mizumoto	$(\neg p) \vee q$	-	+	$\mu_{RM}(x, y) = 1 - \mu_A(x) + \mu_A(x)\mu_B(y)$
Lukasiewicz	$(\neg p) \vee q$		\oplus	$\mu_{Ra}(x, y) = \min[1, 1 - \mu_A(x) + \mu_B(y)]$
Zadeh	$(p \wedge q) \vee (\neg p)$	min	max	$\mu_{Rm}(x, y) = \max\{\min[\mu_A(x), \mu_B(y)], 1 - \mu_A(x)\}$
Goguen	L.M.V	-	-	$\mu_{R\Delta}(x, y) = \{1, \text{ si } \mu_A(x) \leq \mu_B(y); \mu_A(x) / \mu_B(y), \text{ si } \mu_A(x) > \mu_B(y)\}$
Gödel	L.M.V	-	-	$\mu_{Rg}(x, y) = \{1, \text{ si } \mu_A(x) \leq \mu_B(y); \mu_B(y), \text{ si } \mu_A(x) > \mu_B(y)\}$
Sharp	L.M.V	-	-	$\mu_{RS}(x, y) = \{1, \text{ si } \mu_A(x) \leq \mu_B(y); 0, \text{ si } \mu_A(x) > \mu_B(y)\}$
Mandani	$p \wedge q$	Min	-	$\mu_{Rl}(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$
Larsen	$p \wedge q$	Prod	-	$\mu_{Rp}(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y)$

Tabla 4. Tipos de funciones implicación

Para aclarar este concepto véase la Fig. 64y considere la regla que se presenta a continuación:

“SÍ la velocidad del automóvil es baja ENTONCES frenar poco”

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

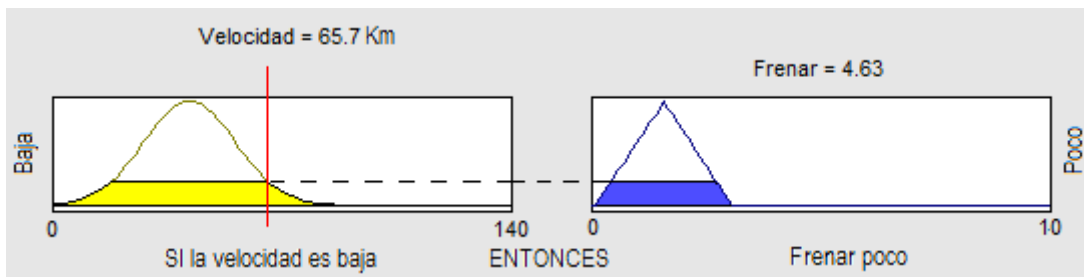


fig. 64. Implicación difusa, (método de Mandani)

En el ejemplo anterior se usó el método de implicación de Mandani, el mismo que utiliza el operador mínimo para relacionar la premisa y la consecuencia de una regla difusa.

4.2.7. Sistema de inferencia difusa

Existen varios mecanismos de inferencia, los mismos que cumplen con la tarea de obtener un valor a la salida del sistema difuso, basándose en todas las reglas lógicas que forman la base del conocimiento y en los valores difusos que toman las variables lingüísticas de entrada al sistema, en otras palabras “El bloque de inferencia difusa hace la traducción matemática de las reglas” (Cataluña, 2008), proporcionando a la salida un conjunto difuso con su propia función característica.

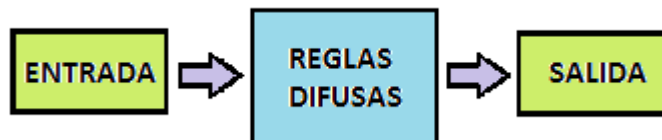


fig. 65. Sistema de inferencia Difusa

El proceso de interpretación de una regla del tipo SI/ENTONCES implica varios pasos:

- 1) **Fusificar las entradas:** consiste en evaluar el valor real de la variable de entrada en la función de pertenencia (conjunto difuso), por lo tanto los valores que se consiguen después de este procedimiento están dentro del intervalo $[0,1]$.

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS



fig. 66. Fusificación de la variable servicio
Fuente: (Alonso, 2009)

- 2) **Aplicación de operadores difusos:** sí el antecedente de la regla es una proposición compuesta, se debe identificar el conector y dependiendo de ello aplicar la operación de unión, intersección o complemento de conjuntos difusos, según corresponda; de allí que el resultado será un nuevo conjunto difuso.

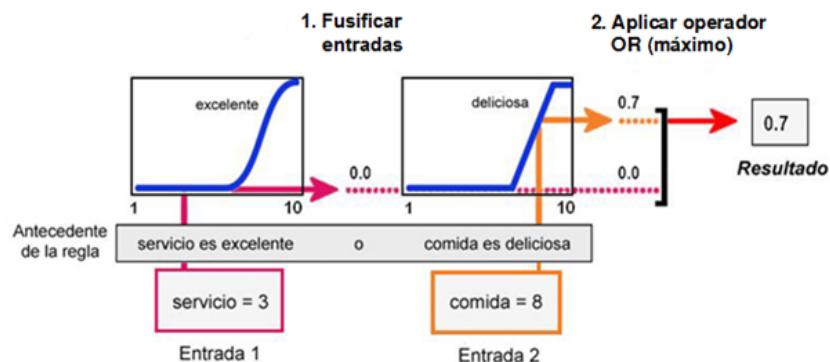


fig. 67. Aplicación del operador difuso OR
Fuente: (Alonso, 2009)

- 3) **Aplicación del método de implicación:** después de aplicar el paso número dos y obtener un valor difuso que represente a todo el antecedente, se aplica una nueva operación difusa entre dicho valor resultante y el conjunto difuso del consecuente. Generalmente se emplean los métodos de implicación directos, tales como el de Mandani y Sugeno; Mandani utiliza una estructura muy simple de operaciones “mín-max”.

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

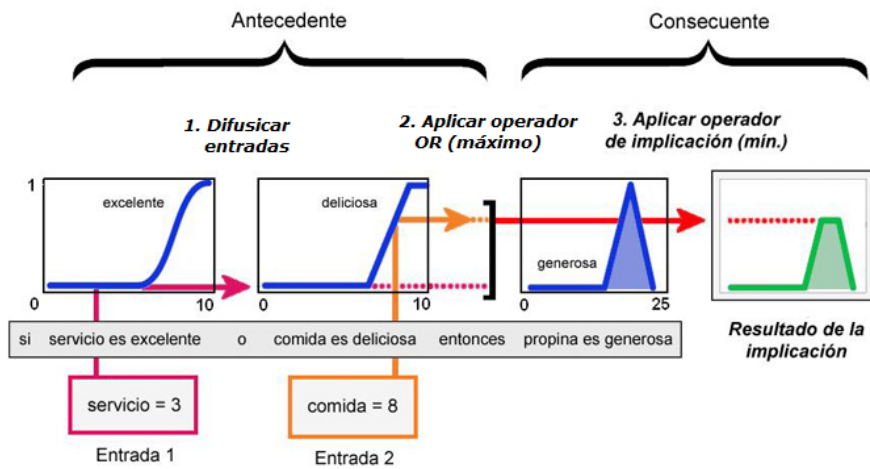


fig. 68. Método de implicación de Mandani

Fuente: (Alonso, 2009)

- 4) **Agregación de las salidas de todas las reglas:** una sola regla no sirve de mucho, es necesario tener algunas para que se puedan complementar. Con la consecuencia de la implicación aplicada a cada regla, se precisa obtener un solo conjunto difuso resultante, lo cual se realiza por medio una operación de agregación difusa, las más utilizadas son el máximo, la suma o el or probabilístico.

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

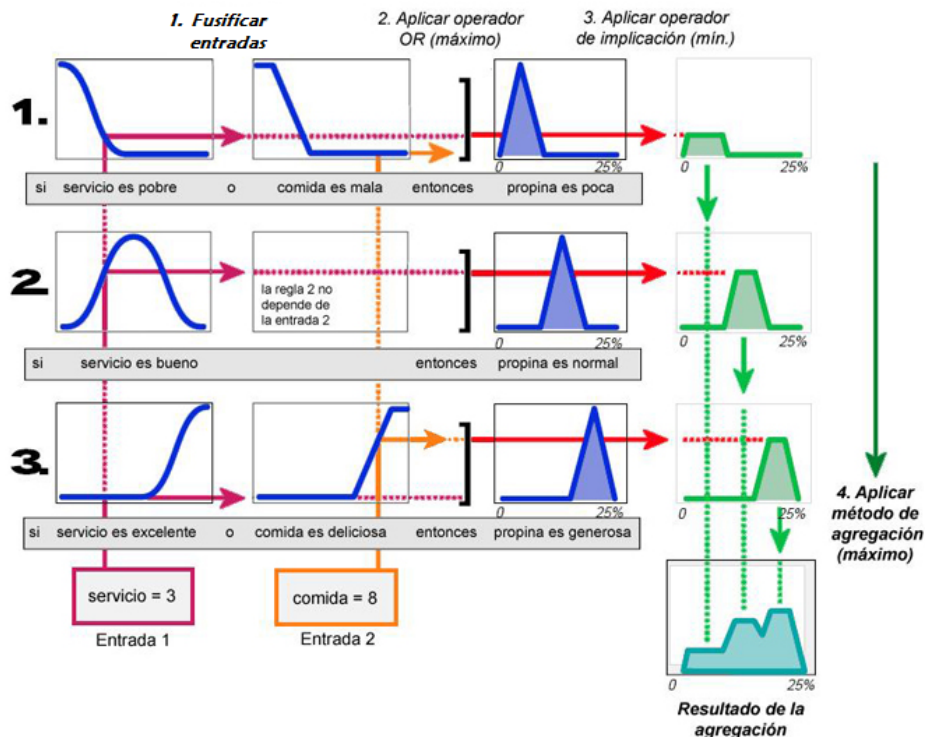


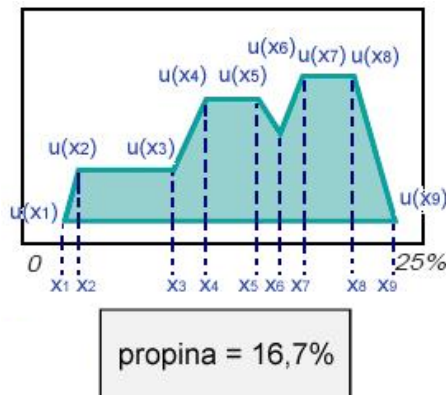
fig. 69. Agregación de las salidas de todas las reglas

Fuente: (Alonso, 2009)

- 5) **Defusificar la salida:** permite llevar el conjunto difuso que resultó de la agregación a valores que puedan ser interpretados de manera precisa, es decir, se requiere un número exacto y no un conjunto borroso. Uno de los métodos más utilizados para este cálculo es el del centroide, pero existen otros más. A continuación se presenta la fórmula que permite calcular el resultado de la defusificación.

$$g = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)}$$

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS



Resultado de la defusificación

fig. 70. Método del centroide
Fuente: (Alonso, 2009)

4.3. Controladores difusos

La teoría de sistemas de control moderno, se remonta a la época de la Segunda Guerra Mundial, o incluso antes, cuando el diseño, análisis y síntesis de servomecanismos son esenciales en la fabricación de sistemas electromecánicos. El desarrollo de la teoría de los sistemas de control desde entonces ha pasado por un proceso evolutivo, empezando por lo más básico y simple, luego por el análisis en el dominio de la frecuencia de los sistemas de control lineales con una entrada y una salida (SISO), lo cual después se generalizó con una sofisticada matemática que describe mediante ecuaciones diferenciales a los sistemas lineales o no-lineales de múltiples entradas y salidas (MIMO).

La teoría de control en la actualidad sigue progresando rápidamente con el uso de matemática avanzada tal como geometría diferencial, ecuaciones diferenciales y análisis funcional; además se vincula con otras ciencias teóricas aplicadas como inteligencia artificial, robótica, informática, entre otras. La teoría de sistemas de control convencional se ha desarrollado ampliamente, por lo que se supone, que esta relativamente completa en lo que respecta a los sistemas de control lineal, pues ha tomado la delantera en la tecnología actual y en las aplicaciones industriales, donde el control y la automatización son esenciales; como mencionamos anteriormente se fundamenta en la ciencia matemática contemporánea y en la ingeniería eléctrica, por lo tanto puede proporcionar un análisis riguroso y, a menudo dar soluciones perfectas cuando un sistema se define en términos matemáticos precisos.

En nuestro entorno existen muchas situaciones que podemos resolver no de un modo determinístico sino más bien difuso, y es precisamente este el inconveniente de la matemática convencional, pues excluye de su estudio y análisis a lo que se ha llamado

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

sistemas difusos; la principal contribución de la teoría de control difuso es su capacidad de manejar muchos problemas prácticos que no pueden ser operados adecuadamente por las técnicas de control convencional.

Para poder estudiar los sistemas de control difuso, primero debemos familiarizarnos con ciertos términos relacionados con los sistemas de control, según(Ogata, 1997):

- **Variable Controlada:** *Se trata de la cantidad o condición que se mide y controla. Normalmente la variable controlada será la salida (el resultado).*
- **Variable Manipulada:** *Es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada.*
- **Controlar:** *Significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar una desviación en el valor medido a partir de un valor deseado.*
- **Plantas:** *A cualquier objeto físico que se va a controlar.*
- **Procesos:** *A cualquier operación que se va a controlar.*
- **Sistemas:** *Es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado.*
- **Perturbaciones:** *Se trata de una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema.*
- **Control realimentado (negativo):** *Se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones impredecibles, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia y lo continúa haciendo con base a ésta diferencia.*
- **Sistemas de Control Realimentados o en Lazo Cerrado:** *Se trata de un sistema que mantiene una relación prescrita entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control.*
- **Sistemas de Control en Lazo Abierto:** *Son aquellos sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control. En otras palabras, no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. Por tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones no realiza la tarea deseada.*

4.3.1. Elementos del controlador difuso

Los sistemas reales presentan, en general, parámetros muy complejos y un comportamiento no lineal; ante esta situación la obtención de un modelo matemático del sistema mediante ecuaciones diferenciales es un proceso complicado, tedioso y toma mucho tiempo de cálculo. Por lo que el control difuso, mediante la base de reglas trata de incorporar la experiencia de un individuo sobre el control de algún proceso, para dar una solución automática al sistema.

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

Podría decirse que un controlador difuso es un algoritmo que se basa en un conjunto de reglas, en las que intervienen variables lingüísticas; dichas reglas se relacionan entre sí a través de un método de inferencia difusa, luego por medio de un mecanismo de agregación se traduce la acción del controlador difuso a una salida concreta (valor no-difuso).

En el diagrama de bloques de la *Fig. 7* se muestra la estructura genérica de un controlador difuso; éste se encuentra entre el bloque de pre-procesamiento y el bloque de post-procesamiento.

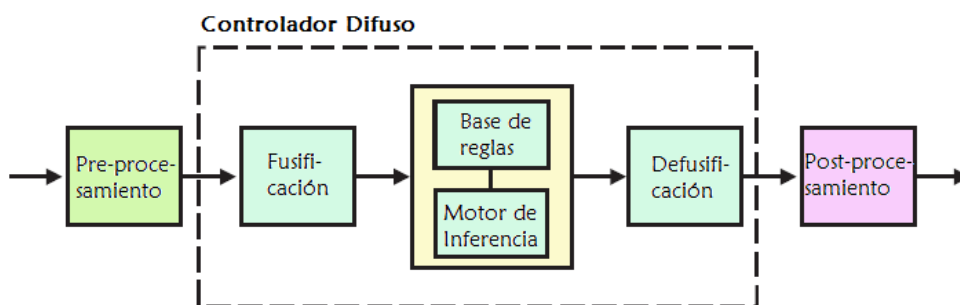


fig. 71. Diagrama de bloques de un controlador difuso

A continuación se expone la función de cada uno de los bloques del controlador.

Bloque de Pre-procesamiento

Es aquel donde llegan los valores sin acondicionamiento de las variables que permitirán el control de alguna situación o problema. Por ejemplo:

- El valor de la velocidad de un automóvil en km/h;
- La distancia en metros;
- El caudal en lt/min, etc.

Bloque de Fusificación

Es el primer bloque dentro del controlador, permite obtener un grado de pertenencia de cada una de las entradas, de acuerdo al antecedente de las reglas.

Bloque de la Base de Reglas

Tanto el antecedente como el consecuente de una regla permiten la intervención de diversas variables, por lo tanto un controlador difuso puede tener múltiples entradas y salidas (MIMO), o simplemente una sola entrada y una sola salida (SISO).

Bloque del Motor de Inferencia

Constituye el núcleo del controlador, permitiendo obtener una salida en base a una colección de reglas y a los valores difusos que toman las variables de entrada. El mecanismo de inferencia toma como sustento al razonamiento aproximado, este es un

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

proceso q trata de conseguir consecuencias a partir de un arreglo de antecedentes constituidos por afirmaciones imprecisas. El Modus Ponens es el método mejor conocido y más utilizado.

Bloque de defusificación

El conjunto difuso resultante de la inferencia se debe convertir en un solo número para formar una señal de control a la planta. Existen distintos métodos: Punto de Máximo Criterio (PMC) o Media de Máximos (MoM), Centro de Gravedad (CoG), etc.

Bloque de Post-procesamiento

Sí el valor de la señal a la salida del controlador está normalizado, éste se encarga de convertirlos a unidades de ingeniería, por ejemplo: voltios, metros o toneladas por hora. El bloque de post-procesamiento contiene una ganancia de salida que puede ser ajustada.

4.3.2. Sistema de control difuso

azo cerrado, por tal motivo centraremos nuestro estudio en los de este tipo; en la sección 4.3 se explica lo que significa sistema y control, el primero se define como un conjunto de elementos que interactúan para conseguir un objetivo específico y, el segundo consiste en verificar si el proceso ocurre como se desea. En los sistemas de control difuso interviene un controlador borroso, además de otros componentes así mismo antes mencionados. Para tener una idea más clara se presenta un diagrama a bloques en la *Fig. 72*, cada bloque representa los diferentes componentes del sistema de control conectados de tal manera que caracterizan la dirección del flujo de la señal de control.

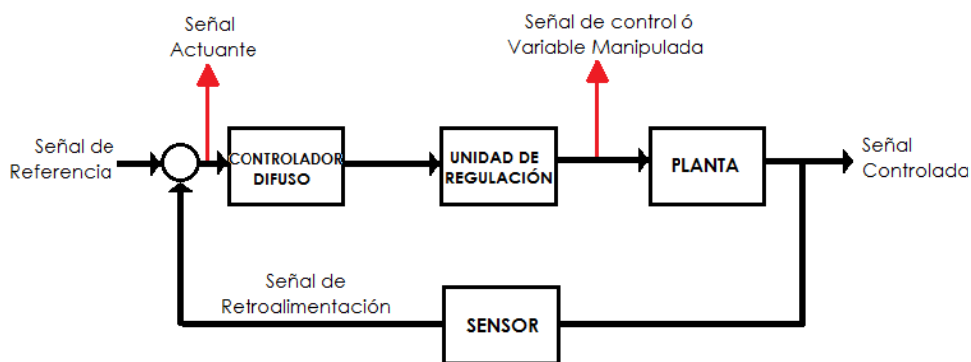


fig. 72. Diagrama de bloques de un sistema de control difuso

Con el gráfico anterior se puede interpretar mucho mejor cada una de las partes de los sistemas de control. La señal de referencia entrega al controlador el valor deseado de la variable controlada; a la señal actuante también se la llama señal de error y consiste en la diferencia existente entre la de referencia y la de salida; el controlador difuso es

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

un dispositivo electrónico o computacional que actúa directamente sobre la variable manipulada después de recibir la señal de error; la unidad de regulación es el mecanismo por el cual el controlador ejecuta la acción de control, se les denomina actuadores; por último se tiene el bloque del sensor, éste proporciona la señal de retroalimentación que no es más que la medida de la variable controlada.

4.4. Criterios de estabilidad para sistemas de control difuso

Ahora que comprendemos cómo opera un controlador difuso. El siguiente problema es saber si funciona bien. Por lo general la calidad de un sistema de control se juzga mediante el estudio de la curva de respuesta del sistema. La curva muestra su dinámica, respondiendo a los cambios en sus entradas.

Pero para dar una opinión sobre el funcionamiento del sistema de control, no es necesario considerar todas las entradas, por lo general se toma un conjunto pequeño de señales para el estudio de la estabilidad; una entrada de escalón unitario representa un cambio abrupto en la entrada, es decir que conmuta de un estado a otro rápidamente; la rampa unitaria simula un cambio lineal de la señal, y rara vez se emplea una función parabólica, solo cuando se necesita simular una variable de rapidez de cambio.

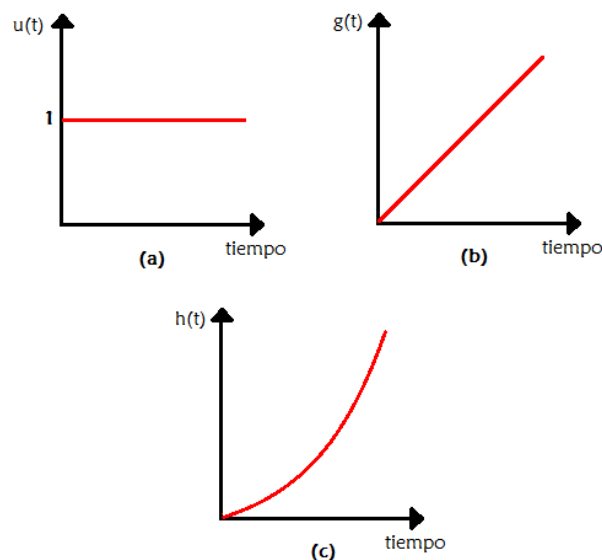


fig. 73. Funciones de excitación para los sistemas de control.

Sí el sistema responde bien a estas señales, se dice que el controlador funciona apropiadamente; para ello el sistema debe llegar a ser estable. La estabilidad es un concepto muy complejo, tan complejo que existen diferentes definiciones, pero tomemos la más simple; un sistema se dice estable si ante cualquier señal de entrada

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

acotada (que no alcanza valores infinitos) responde con una señal de salida acotada (Reznik, 1997).

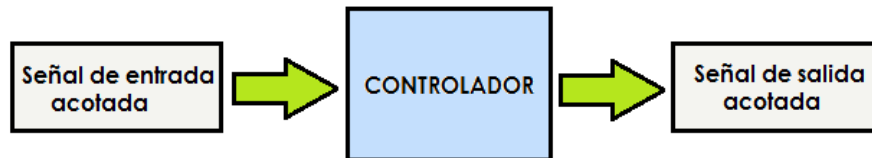


fig. 74. Definición de sistema estable

Dentro de la teoría de control existen algunos criterios de estabilidad, los principales son:

- Criterio de estabilidad de Nyquist
- Criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz

Desafortunadamente estos criterios no se pueden emplear para el análisis de la estabilidad de sistemas de control difuso, pues generalmente se desconoce el modelo matemático de la planta, lo que dificulta la aplicación de las técnicas mencionadas anteriormente. Debido a que aún no se ha encontrado un método fiable universal para el análisis de la estabilidad de los sistemas difusos los expertos recomiendan la evaluación de la misma mediante la observación de la respuesta del sistema y sus parámetros.

4.4.1. Indicadores de estabilidad y rendimiento

Los parámetros que intervienen en el análisis de estabilidad y rendimiento del sistema son el tiempo de levantamiento y el deestablecimiento, pero existen otros indicadores como por ejemplo el error de estado estacionario, o los criterios integrales, sin embargo, no siempre se pueden aplicar.

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

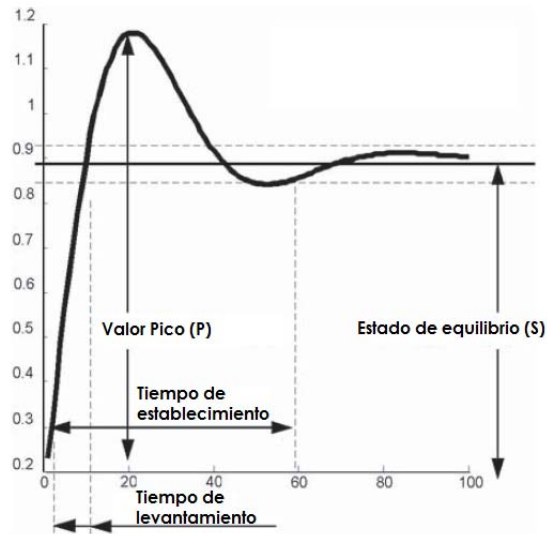


fig. 75. Parámetros de rendimiento de un sistema
Fuente: (Reznik, 1997)

Se dice que un sistema de control es estable si la curva de respuesta cumple con un tiempo de establecimiento corto y un sobresalto pequeño.

4.4.2. Evaluación de la estabilidad a través de la observación de la trayectoria del disparo de reglas

Hay un método de predicción de la estabilidad del sistema difuso, el mismo que observa y analiza el orden en que las reglas se disparan. Si dibujamos la trayectoria ordenadamente en la tabla de reglas para un buen sistema estable, el error y el cambio de error debe disminuir gradualmente durante el proceso de disparo de las reglas. Esto significa que tenemos que movernos desde los extremos de la tabla hasta su centro, observe la Fig. 76.

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

		$\Delta\epsilon$						
		NA	NM	NB	C	PB	PM	PA
ϵ	NA	NA	NA	NA	NA	N	NB	C
	NM	NA	NA	NA	N	M	NB	C
	NB	NA	NA	N	M	NB	C	PB
	C	NA	N	M	NB	C	PB	PM
	PB	N	M	NB	C	PB	PM	PA
	PM	NB	C	PB	PM	PA	PA	PA
	PA	C	PB	PM	PA	PA	PA	PA

fig. 76. Orden de disparo típico en un sistema estable
Fuente: (Velasco, 2006)

Para un sistema inestable la trayectoria de disparo de reglas es diferente, ésta se presenta en la Fig. 77, debemos tener cuidado con estos gráficos, pues sólo representan un ejemplo y, por supuesto, demuestran una tendencia, no un orden exacto a seguir.

		$\Delta\epsilon$						
		NA	NM	NB	C	PB	PM	PA
ϵ	NA	NA	NA	NA	NA	N	NB	C
	NM	NA	NA	NA	N	M	NB	C
	NB	NA	NA	N	M	NB	C	PB
	C	NA	N	M	NB	C	PB	PM
	PB	N	M	NB	C	PB	PM	PA
	PM	NB	C	PB	PM	PA	PA	PA
	PA	C	PB	PM	PA	PA	PA	PA

fig. 77. Orden de disparo típico en un sistema inestable
Fuente: (Velasco, 2006)

Hay diferentes maneras de obtener un sistema estable, la primera y la más obvia es tratar de no cometer errores en el diseño del controlador, o lo que es lo mismo, evitar la elección errónea de las reglas y de las funciones de pertenencia, porque esto puede hacer que el sistema sea inestable.

4.5. Aplicación de un sistema de control difuso a una plataforma Stewart

Para implementar un sistema de control difuso a una plataforma Stewart se tiene que identificar todos los componentes, estos son: variable manipulada, variable controlada, planta, señal de retroalimentación, etc. Luego de todo el estudio de la teoría de control se ha podido destacar a los siguientes parámetros:

- Señal de referencia.- es la posición a la que se desea que llegue la esfera.
- Variable controlada.- en nuestro caso es la posición de la esfera.
- Variable manipulada.- es la rotación del efector final de la plataforma Stewart.
- Planta.- se identificó a plataforma móvil como la planta.
- Sensor.- para el proyecto se empleo un sistema de visión artificial para detectar la posición de la esfera, pues los sensores táctiles resultaban muy lentos en respuesta.
- Controlador difuso.- Se ha optado por el modelo de Takagi-Sugeno, debido a que los de tipo Mandani no daban una respuesta optima cuando la esfera se encontraba en los extremos de la placa móvil.
- Unidad de regulación.- son los seis servomotores ubicados en la parte de la plataforma fija, estos son los que permiten que el efector pueda rotar.

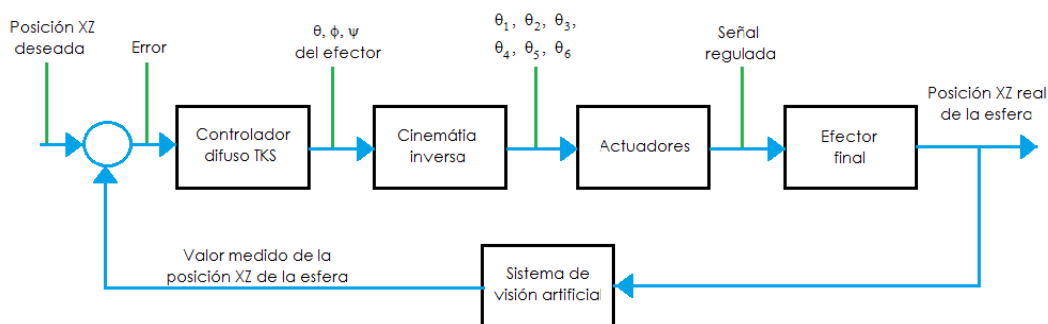


fig. 78. Diagrama de bloques del sistema de control difuso implementado a una plataforma paralela tipo Stewart

Ahora que ya se ha identificado cada parte del sistema de control, se debe diseñar el controlador, para lo cual se necesita en primer lugar identificar las variables de entrada y salida, en este caso, la señal de entrada al controlador es la posición de la esfera en el plano $X-Z$, mientras que la salida son los ángulos de rotación de la plataforma móvil alrededor de los ejes X y Z . Véase la Fig. 79.

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS



fig. 79. Estructura general del controlador difuso para la plataforma Stewart

4.5.1. Controlador difuso proporcional

Se ha realizado un sistema de control muy sencillo, por tal motivo se ha dividido en dos controladores con método de inferencia difusa Takagi-Sugeno. Cada controlador posee entrada y una salida (tipo SISO), con este procedimiento el número de reglas difusas se reduce considerablemente. A continuación se muestra el esquema en MatLab 7.10.0 de los dos controladores empleados, los cuales son del tipo proporcional difuso, es decir, la salida esta en función solamente de la señal de error. Véase las Fig. 80 y Fig. 81.

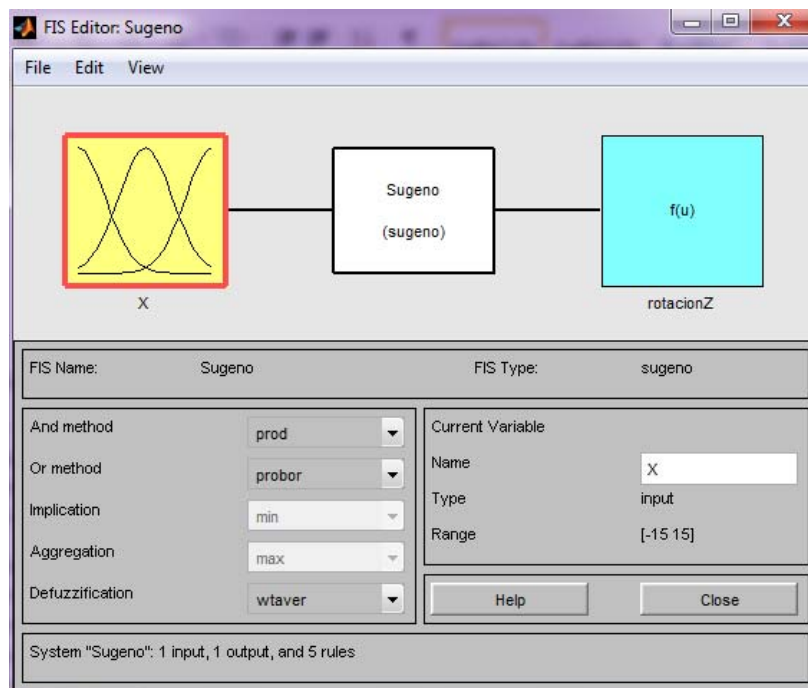


fig. 80. Controlador Sugeno para la rotación en Z de la plataforma móvil

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

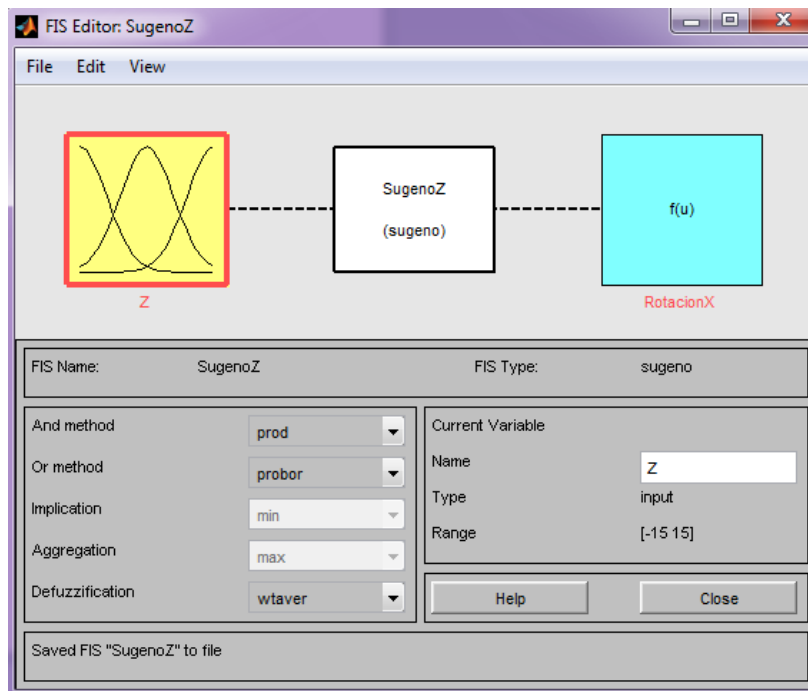


fig. 81. Controlador Sugeno para la rotación en X de la plataforma móvil

Después de realizar lo anterior, se debe fusificar las entradas con la ayuda de las funciones de membresía; se probó el controlador con diferentes tipos pero la que respondió de mejor manera fue la triangular. En este paso es imprescindible ingresar el rango de la variable lingüística de entrada, para este trabajo de tesis tomamos el intervalo cerrado $[-15,15]$ cm; la suma de sus valores absolutos da como resultado la longitud de la plataforma móvil a lo largo del eje X.

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS



fig. 82. Funciones de pertenencia para la variable lingüística X

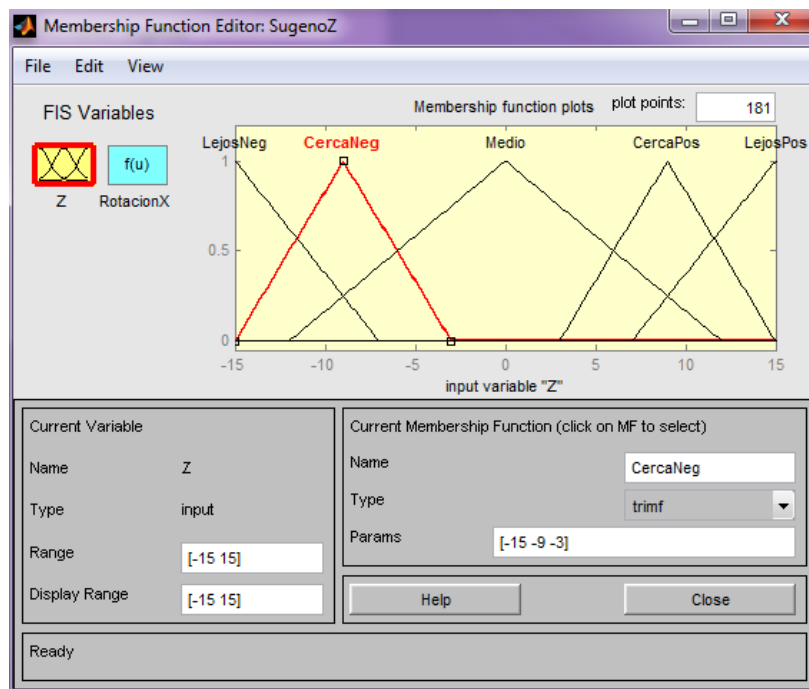


fig. 83. Funciones de pertenencia para la variable lingüística Z

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

En seguida es necesario fusificar las salidas, en el presente proyecto se ha manejado el modelo Takagi-Sugeno-kang (TSK), éste tiene una característica muy especial y es que su base de reglas de inferencia posee consecuentes determinísticos; la variable de salida es una función directa de la entrada, toma valores tipo singleton; de esta manera el tipo de reglas que usa el modelo TSK es diferente al de Mandani, a continuación se ilustra esta idea:

SÍ la posición en X está LejosNeg **ENTONCES** la RotacionZ = F(Posición en X)

La variable de salida tiene cinco valores singleton:

- **MuchoNeg.**- esta ubicado en el valor de -1, que indica la máxima rotación que debe realizar la plataforma móvil en sentido antihorario.
- **PocoNeg.**- se instaló en el valor de -0.5, también determina una rotación en sentido antihorario pero en menor proporción.
- **Nada.**- significa que no debe moverse alrededor del eje, se sitúa en 0.
- **PocoPos.**- representa una mediana rotación en sentido horario, se colocó en 0.5.
- **MuchoPos.**- esta última, es similar a la primera, sólo que el sentido de rotación es contrario.

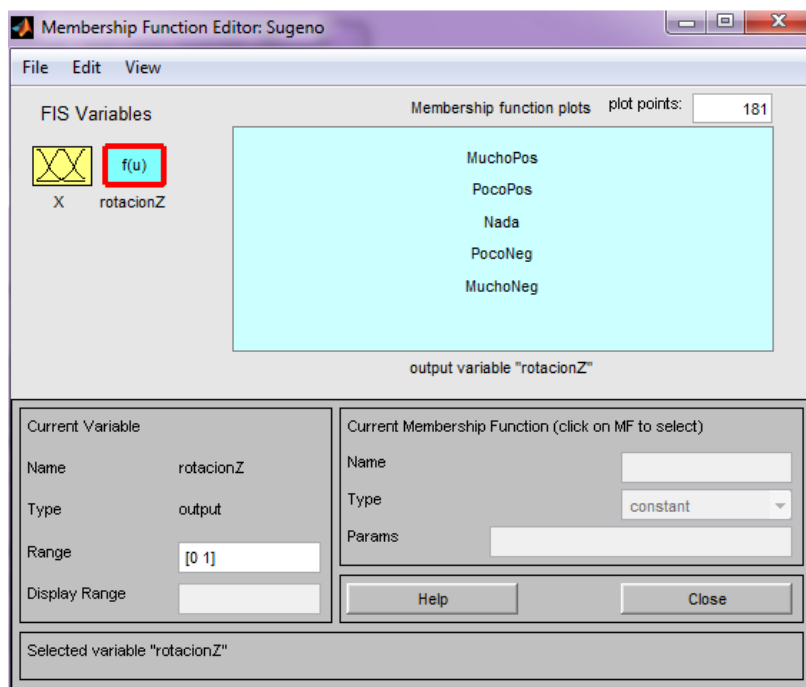


fig. 84. Valores que toma la salida RotacionZ

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

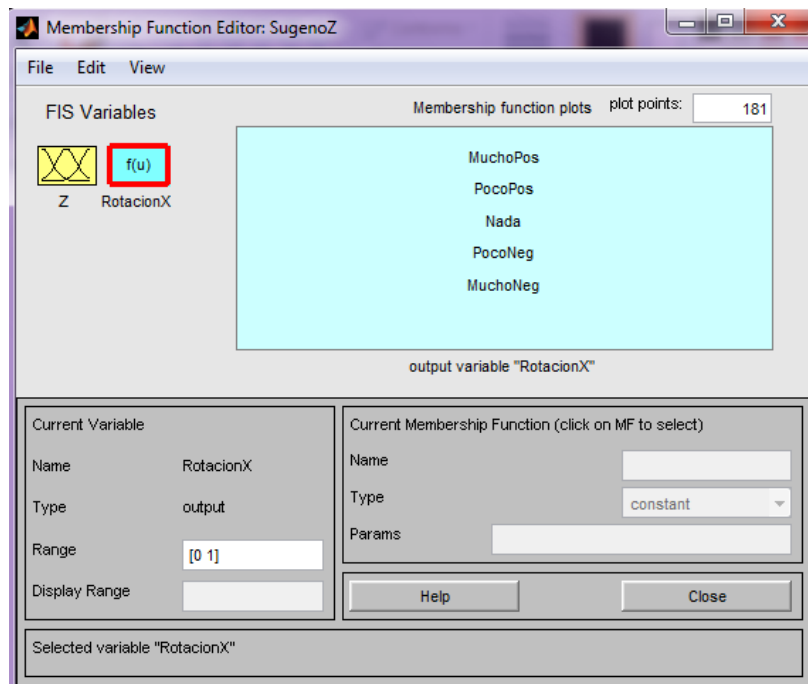


fig. 85. Valores que toma la salida RotacionX

El siguiente paso es editar toda la base de reglas, la misma que debe ser consistente (que no haya contradicciones entre ellas). Se ha diseñado un motor de inferencia para cada controlador con cinco reglas, esto permite tener una base de conocimiento completo del sistema, observe la Fig. 86 y Fig. 87

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

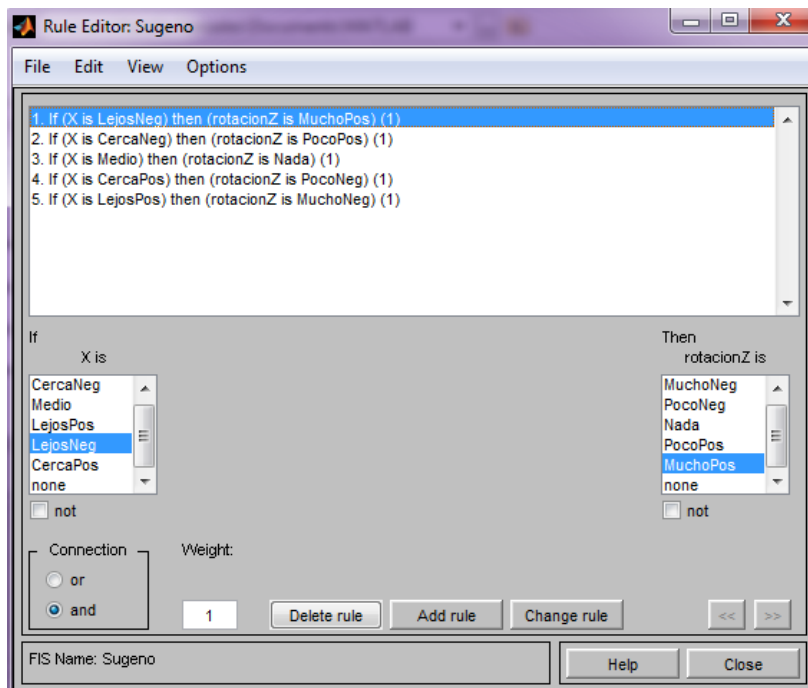


fig. 86. Motor de Inferencia para el controlador de la RotacionX

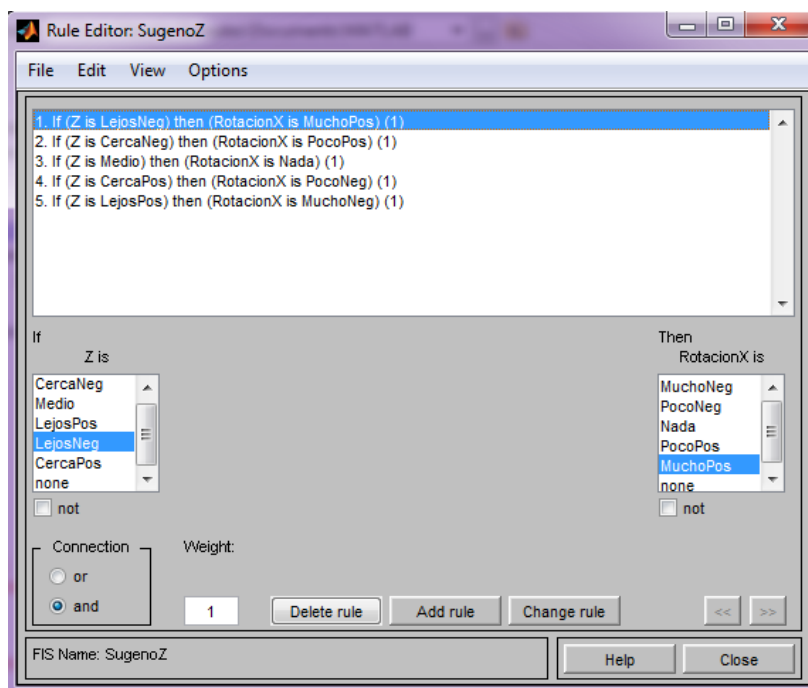


fig. 87. Motor de Inferencia para el controlador de la RotacionZ

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

Por último queda simular el controlador, se puede hacer de dos maneras, la primera dando un valor específico a la entrada y observar el resultado de la salida, en esta parte se puede distinguir claramente la diferencia entre el modelo de Mandani y el de TSK.

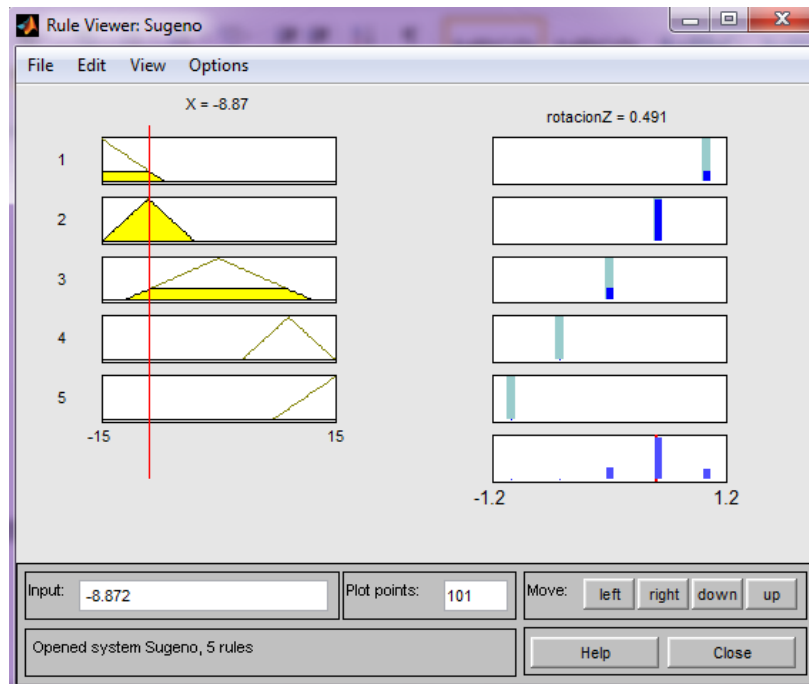


fig. 88. Simulación del controlador diseñado para la Rotación en Z de la plataforma móvil

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

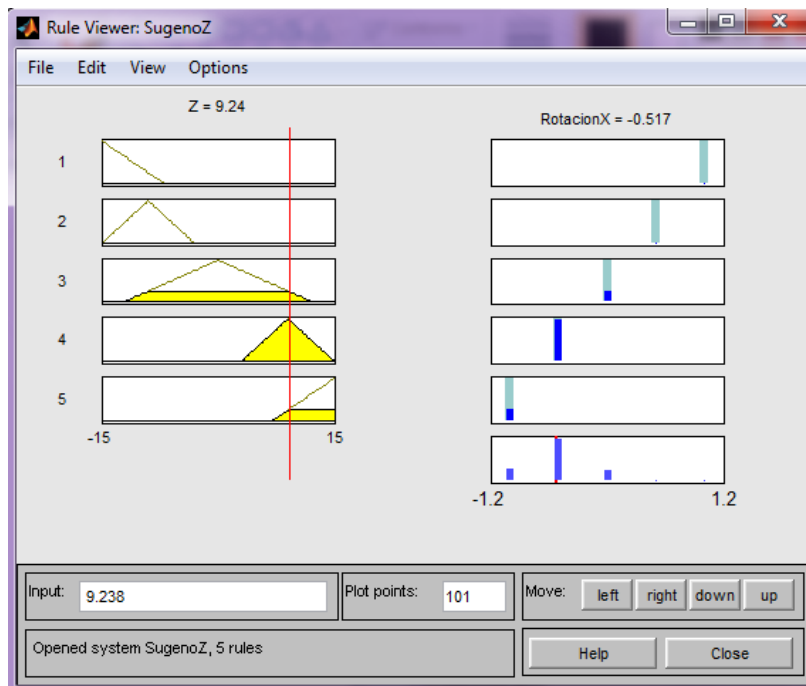


fig. 89. Simulación del controlador diseñado para la Rotación en X de la plataforma móvil

El segundomodo de simulación es graficar la curva de respuesta del controlador, esto permite ver de manera global el comportamiento del sistema a todo el conjunto de valores de entrada [-15,15].

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

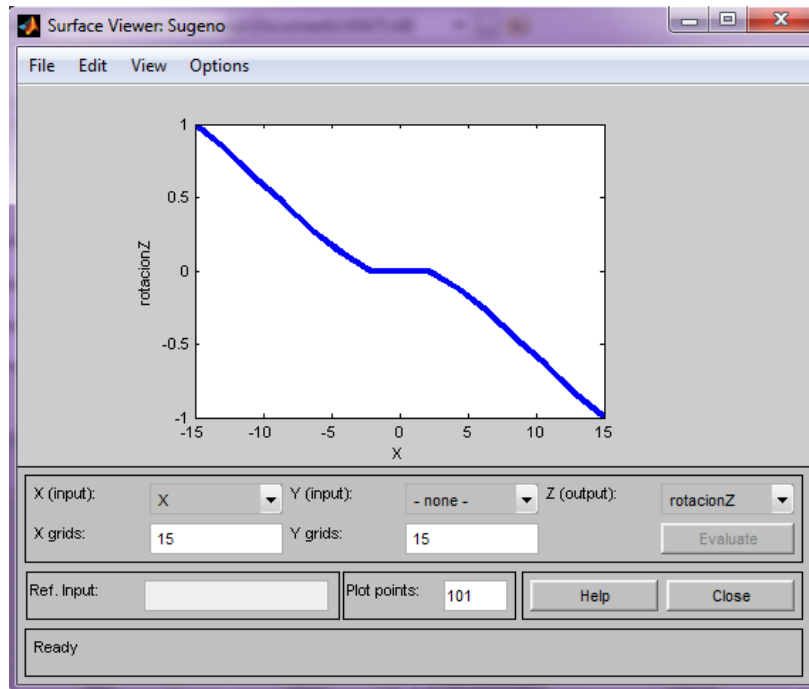


fig. 90. Curva de respuesta del controlador difuso para la Rotación en Z

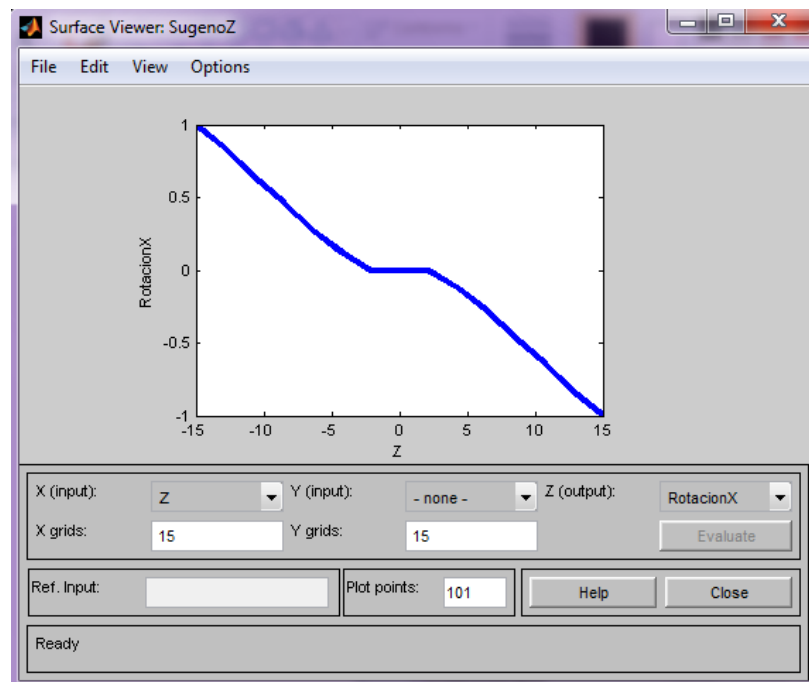


fig. 91. Curva de respuesta del controlador difuso para la Rotación en X

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

La curva de respuesta al conjunto de valores de entrada indica que mientras más alejada este la pelota del centro de la plataforma mayor deberá ser la rotación de ésta, a medida que la bola se acerca al centro la rotación es mucho menor, se observa además que en valores muy cercanos al centro no hay rotación. Esto satisface las necesidades de nuestro proyecto.

Ahora que ya se tien la curva, se necesita encontrar una función que cumpla con estas condiciones, la misma que se ingresará al SOFTWARE DE CONTROL DIFUSO ORIENTADO A UNA PLATAFORMA STEWART, para lo que hemos tomado treinta valores de entrada con sus respectivas salidas, y con estos se debe interpolar una función que sea lo más parecida posible a la de la simulación de MatLab.

Posición en X	Rotación en Z	Posición en X	Rotación en Z
-15	-1	1	0
-14	-0,6	2	0,01
-13	-0,3	3	0,02
-12	-0,2	4	0,03
-11	-0,1	5	0,04
-10	-0,09	6	0,05
-9	-0,08	7	0,06
-8	-0,07	8	0,07
-7	-0,06	9	0,08
-6	-0,05	10	0,09
-5	-0,04	11	0,1
-4	-0,03	12	0,2
-3	-0,02	13	0,3
-2	-0,01	14	0,6
-1	0	15	1
0	0		

Tabla 5. Valores de entrada al controlador difuso con su correspondiente salida

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

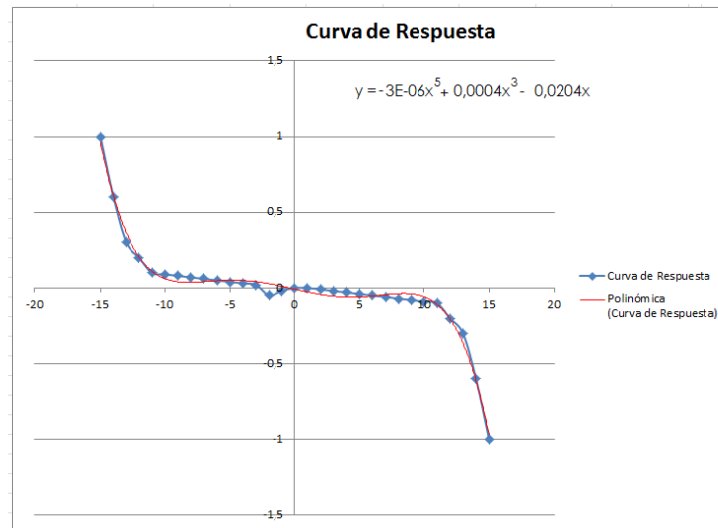


fig. 92. Curva de interpolación para los controladores

La función que interpoló Excel a través de los puntos dados, esta graficada con color rojo, su ecuación es la siguiente:

$$y = -3E - 6x^5 + 0,0004x^3 - 0.0204x$$

4.5.2. Controlador proporcional derivativo difuso

Éste fue programado directamente en el software de control aplicado a una plataforma tipo Stewart. Se caracteriza por el incremento de una entrada, es decir, la salida dependerá de dos señales de entrada: el error y el cambio en el error.

Para ingresar las características de este controlador al software se realizó la simulación en MatLab con el toolboxFuzzy. En la Fig. 93. se muestra la estructura general del controlador PD difuso.

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

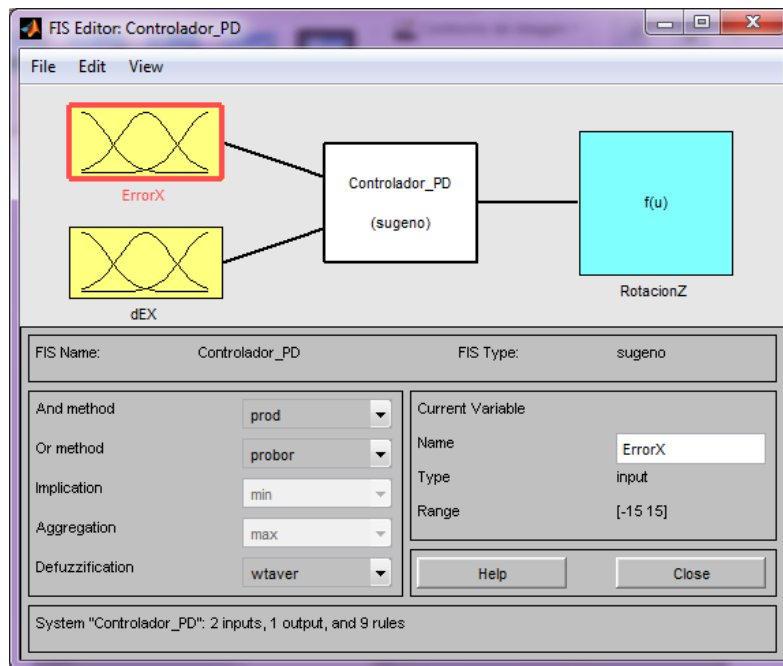


fig. 93. Controlador PD difuso

Las entradas $ErrorX$ y dEX están conformadas por funciones de pertenencia de tipo triangular y trapezoidal. Observe la Fig 94 y Fig. 95

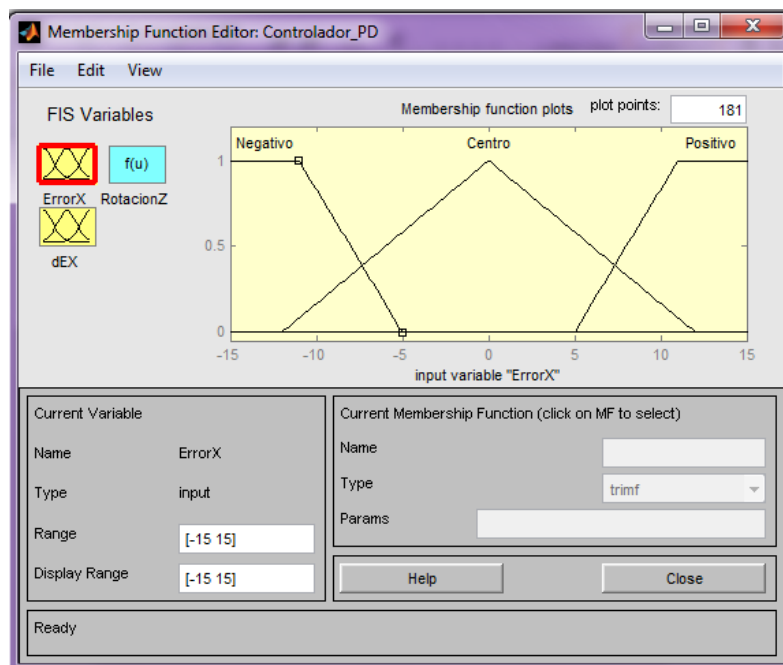


fig. 94. Funciones de pertenencia para la entrada $ErrorX$

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

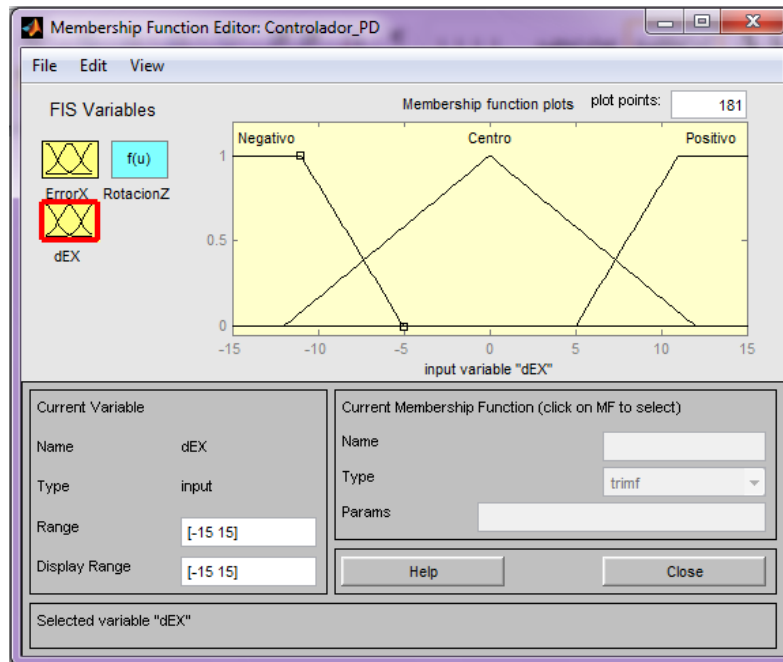


fig. 95. Funciones de pertenencia para la entrada dEX

El método de inferencia que se ha usado es el de Takagi-Sugeno, es por eso que la salida toma valores singletón, refiérase a la Fig. 96

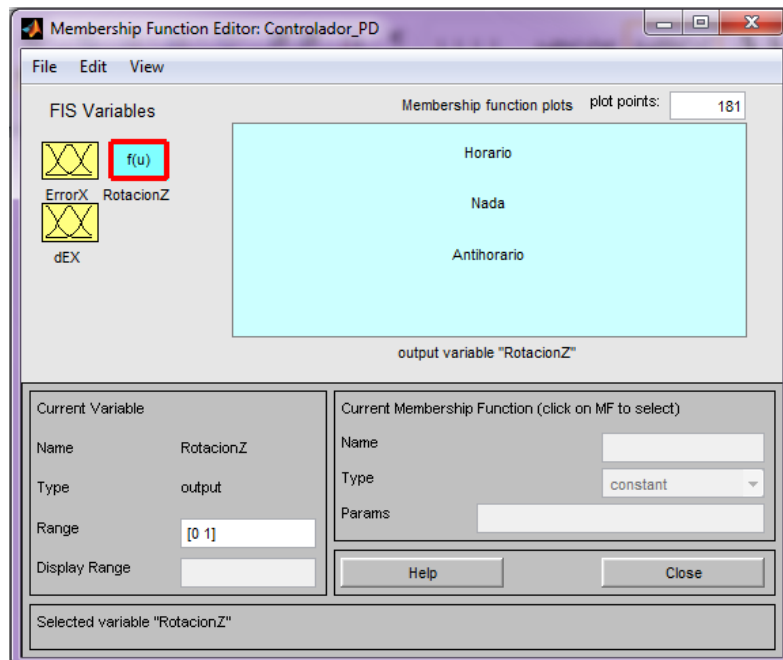


fig. 96. Valores que toma la salida RotacionZ

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

Las reglas que se han construido para el controlador PD difuso son las que se pueden observar en la *Fig.97*.

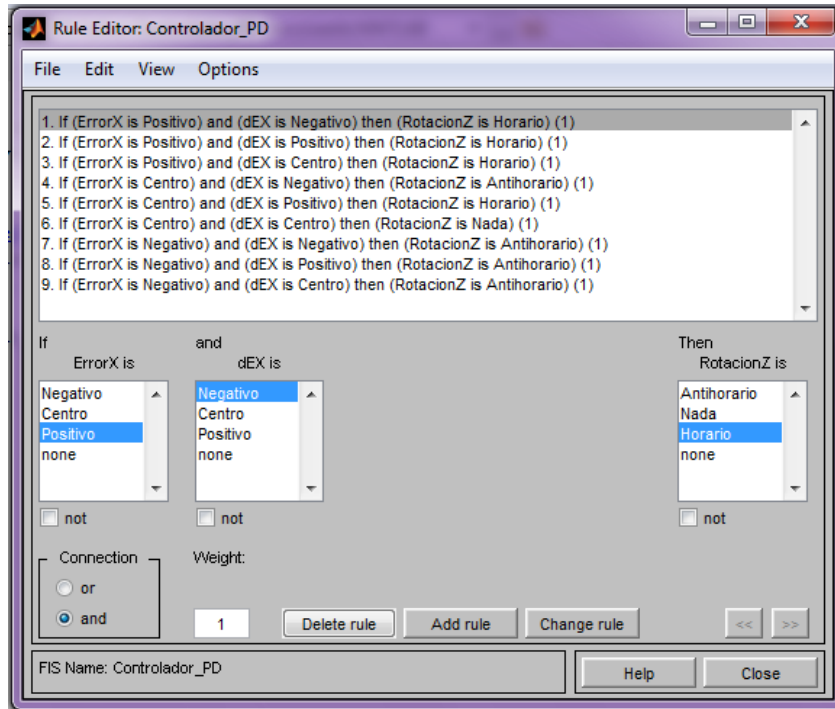


fig. 97. Reglas para el controlador PD difuso

4.5.3. Controlador proporcional integral derivativo difuso PID

El controlador PID difuso que se ha empleado es de tipo MIMO, es decir, posee tres entradas: la señal de error (Errorx), la señal de cambio del error (dex) y el incremento del error (iex). Véase la *Fig. 98*

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

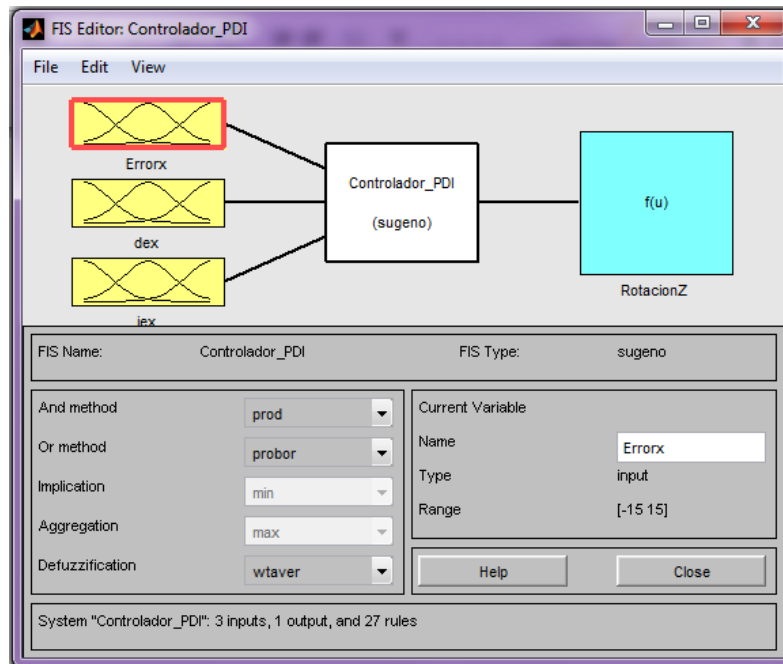


fig. 98. Controlador PID difuso

Las funciones de pertenencia empleadas para la entrada Errorx son las que se muestran en la Fig. 99

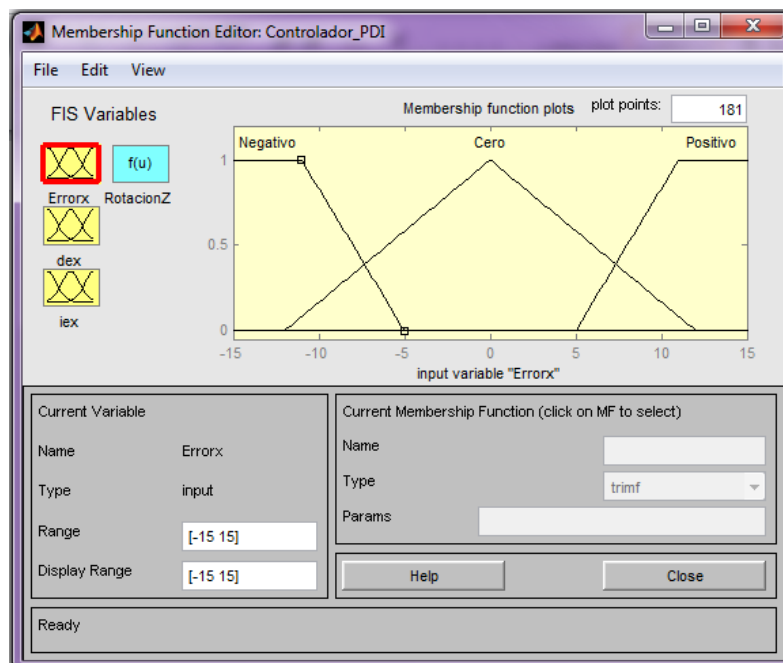


fig. 99. Funciones de pertenencia para la entrada Errorx

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

Las funciones de pertenencia que se utilizaron para la entrada de dex son las que se muestran en la Fig. 100.

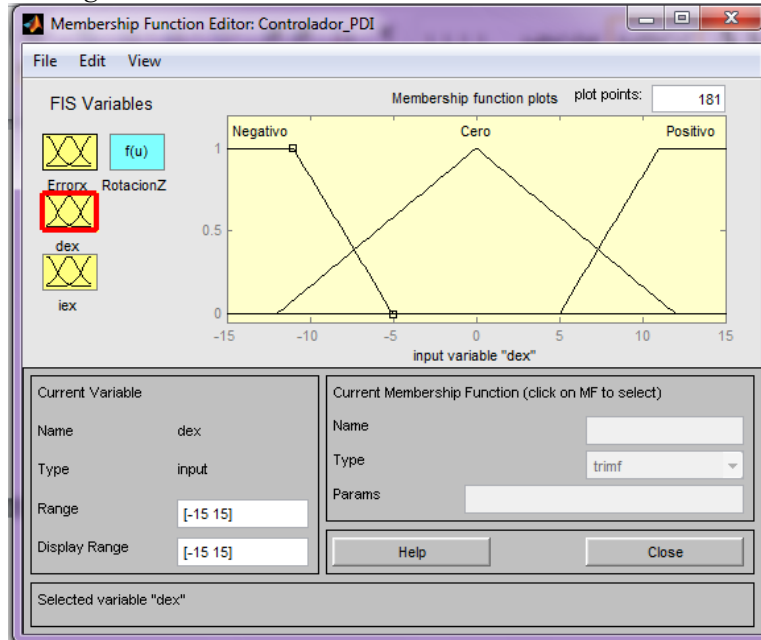


fig. 100. Funciones de pertenencia de la entrada dex

Por último las funciones de pertenencia para la entrada de iex son las que se muestran en la Fig. 101.

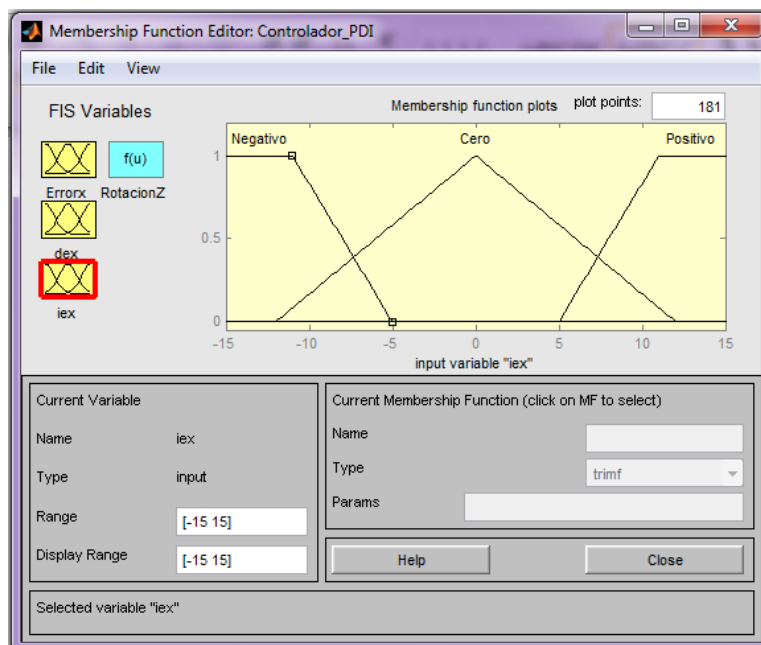


fig. 101. Funciones de pertenencia para la entrada iex

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

Para la salida RotacionZ se usan valores singletón, como los que se muestran en la Fig. 102.

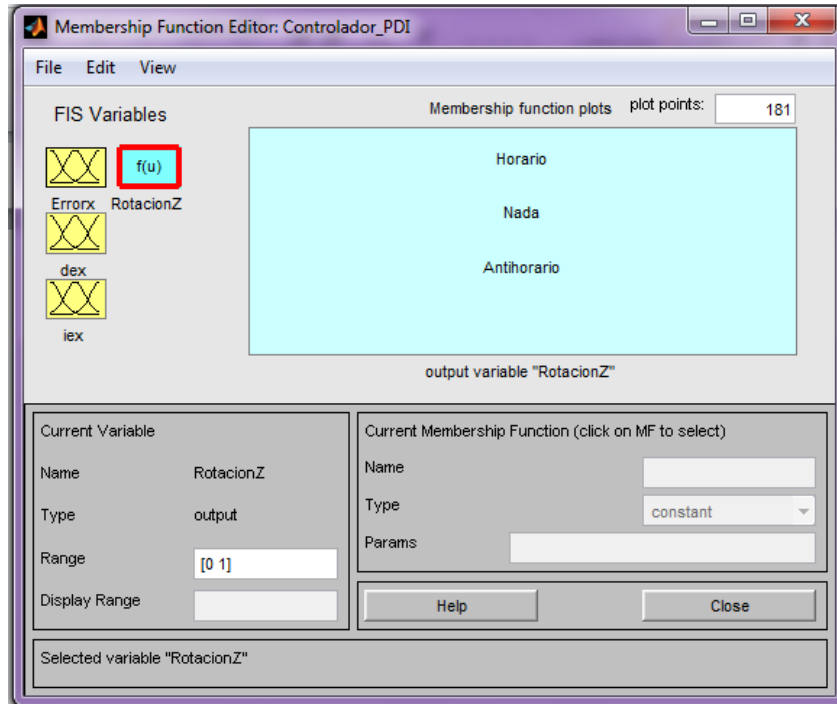


fig. 102.valores para la salidaRotacionZ

El motor de inferencia es el que se muestra en la Fig. 103.

CAPÍTULO 4. CONTROLADORES DIFUSOS

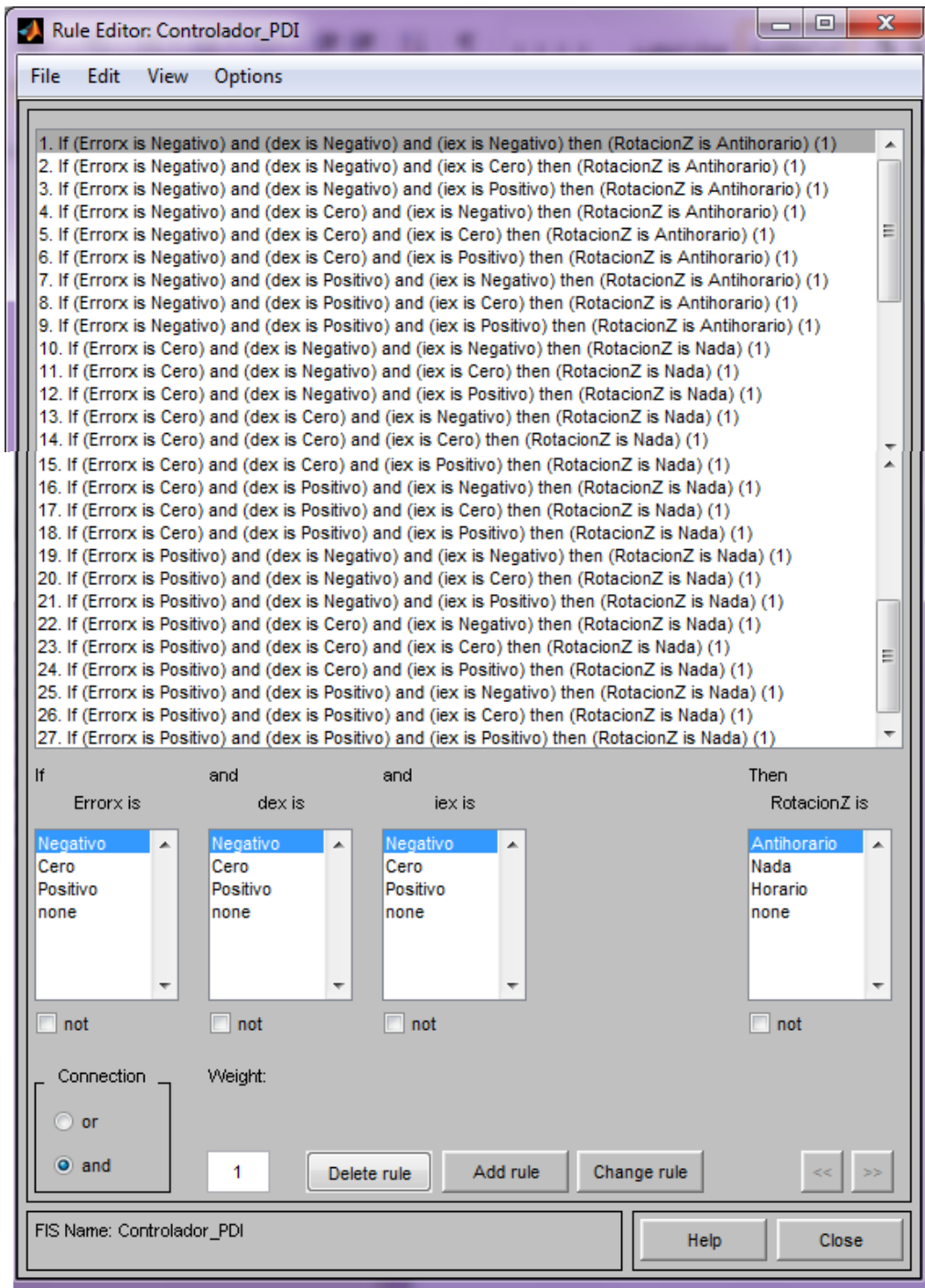


fig. 103. Reglas para el controlador PID difuso

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1. Introducción

Una vez construido el robot y diseñado el controlador, la mejor forma de comprobar su funcionamiento es mediante pruebas físicas.

Pendiente.

5.2. Consideraciones generales del sistema

En este caso, las pruebas a realizarse tuvieron varias etapas, las cuales se enumeran a continuación:

1. Pruebas de la tarjeta electrónica: Se realizará para comprobar su correcto funcionamiento como interfaz entre el computador y los servomotores.
2. Pruebas de movilidad: Para estas pruebas se ha creado un programa de computador, que utiliza las librerías para el cálculo de la cinemática del robot. Se ejecuta las pruebas de desplazamiento y rotación en los 6 ejes sobre los cuales tiene movilidad el robot.
3. Pruebas del controlador: Una vez comprobada la correcta movilidad del robot, se procede a probar el funcionamiento del controlador diseñado para la aplicación didáctica indicada. La evaluación de este controlador implicará la prueba de todo el software de control, incluyendo el bloque de visión artificial.

Para iniciar las pruebas de funcionamiento del robot, se ha optado por diseñar un plan de pruebas que permitan comprobar el correcto funcionamiento del mismo. La evaluación se efectúa en cada bloque funcional, con el fin de descubrir cualquier problema de funcionamiento antes de avanzar a la siguiente etapa, esto permite encontrar y corregir las fallas con mayor facilidad que al probar todo el robot en conjunto. Se tiene que tomar en cuenta ciertas consideraciones en cuanto a los equipos e instrumental necesario para ejecutar las pruebas, entre ellas se citan las siguientes:

- Verificar que el robot se encuentre ensamblado correctamente, con todos sus soportes debidamente ajustados.
- Comprobar que las conexiones de los servomotores hacia la tarjeta electrónica se encuentren en el orden correcto.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

- Verificar que la tarjeta electrónica de control de los servomotores se encuentre debidamente conectada al puerto USB del computador, que los drivers requeridos estén instalados y que activen correctamente la tarjeta en el computador. Esta tarjeta deberá detectarse como un puerto serie virtual.
- Comprobar que en las rutinas de inicialización del software de control, se halle bien direccionado el número de puerto serial usado, hacia el puerto serie virtual creado por la tarjeta electrónica.
- Asegurarse de que la fuente de alimentación esté correctamente conectada, y alimente a los servomotores.

Una vez que se ha confirmado el cumplimiento de los requerimientos previos, se procede a las pruebas de funcionamiento. Dependiendo de la etapa de prueba que se vaya a evaluar, se utilizará una metodología determinada, que será detallada en los puntos subsiguientes de este capítulo.

5.3. Análisis técnico del funcionamiento

Para comprobar el funcionamiento del robot, se verificó lo siguiente:

1. La tarjeta de control de los servomotores
2. La librería creada para la interfaz entre el computador y la tarjeta de control de los servomotores
3. La librería de cálculo de la cinemática inversa del robot
4. El movimiento correcto del robot, sobre sus 6 grados de libertad.

5.3.1. Prueba de la tarjeta de control de los servomotores

La tarjeta de control funciona como vínculo entre el computador y los actuadores, tiene la capacidad de comandar hasta 8 servomotores simultáneamente, cuyas posiciones pueden ser cargadas directamente desde la PC utilizando comandos sencillos que deben ser enviados por el puerto serial emulado por el hardware de la tarjeta. Los comandos que dispone la tarjeta son los siguientes:

- 's' : Devuelve 'ok' si la tarjeta está conectada correctamente
- 't' : Coloca todos los servos en la posición central
- 'p' : Envía un valor para actualizar la posición del servo. Se debe enviar a continuación de este comando el número del servo a actualizar (entre 0 y 7) y el valor de su posición (un byte, con valor entre 0 y 255)

Para probar la correcta conexión entre el computador y la tarjeta de control, se debe utilizar un software de Emulación de Terminal, como Hyperterminal® de

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Windows. Para poder conectarnos a la tarjeta usando este programa, deberemos colocar los siguientes parámetros de conexión:

- Velocidad: 115200bps
- Bits de datos: 8
- Bits de parada: 1
- Paridad: Ninguna
- Control de flujo: Ninguno

Al configurar estos parámetros en Hyperterminal, y conectar el software a la tarjeta se puede enviar el carácter 'S', recibiendo como respuesta 'OK.', lo que indica que la tarjeta se encuentra activa y la conexión se ha realizado con éxito.

5.3.2. Prueba de la librería de interfaz entre el computador y la tarjeta de control de los servomotores

Para probar el funcionamiento de los motores, se ha desarrollado un Control Personalizado para Visual Basic, compilado en una librería DLL de .NET. Esta librería se ha creado de tal manera, que nosotros ingresemos únicamente los datos del número del puerto serie virtual para inicializarla, y una vez que se ha realizado la conexión con el hardware de la tarjeta de control, basta con enviar el dato del número de servomotor, y el valor de su ángulo de giro, y esta librería se encargará de la conexión con la tarjeta y la transmisión de datos.



fig. 104. Cuadro de diálogo de la librería de control de servomotores

Para probar esta librería, simplemente la cargaremos en un nuevo proyecto de Visual Studio, y configurando valores predefinidos, podremos comprobar el correcto funcionamiento de los servomotores. Luego de algunas pruebas, la librería funcionó correctamente, permitiéndonos continuar con las siguientes etapas del proyecto.

5.3.3. Prueba de la librería de la cinemática del robot

Para mantener la modularidad en la programación del software de control del robot, hemos programado una librería DLL de .NET que nos permitirá encapsular en un solo bloque, todo el cálculo cinemático del robot.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

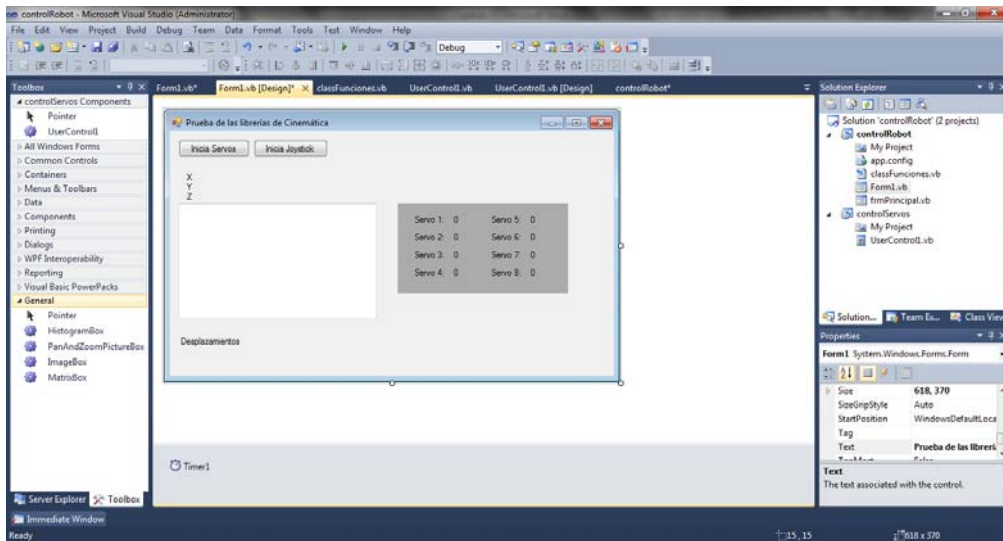


fig. 105. Visual studio con la aplicación de prueba de cinemática

Esta librería como tal, está compuesta de dos bloques internos de subrutinas, para su aplicación en nuestro robot.

Bloque de rutinas de cálculo matricial: Se utilizarán para poder realizar el cálculo vectorial, requerido para el cálculo de la cinemática inversa del robot.

Bloque de rutinas de cálculo cinemático: Utilizando el modelo matemático del robot, se han definido las ecuaciones cinemáticas, cuyo cálculo se lo realiza utilizando las rutinas de este bloque. Específicamente, estas rutinas nos permiten calcular el ángulo de giro necesario para cada servo, dadas la traslación y rotación de la base móvil requerida.

Esta librería ha sido probada ingresando valores arbitrarios de las coordenadas de la placa móvil y fija, para verificar si los valores de rotación de los servos son los correctos.

5.3.4. Pruebas de movimiento del robot en sus seis grados de libertad

Para esta prueba, que se resume en la prueba completa del robot, se ha creado una pequeña interfaz de usuario, que permite mover al robot, mediante el uso de un joystick conectado al computador personal.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

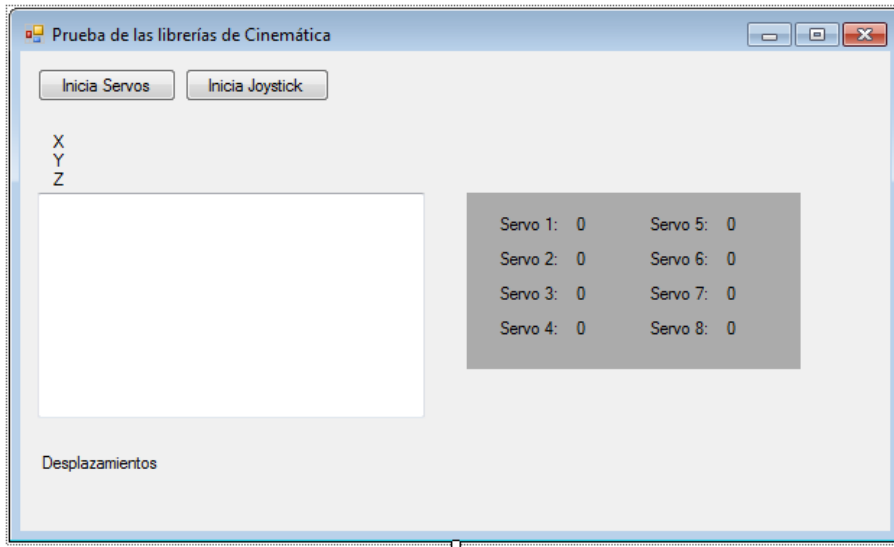


fig. 106. Aplicación de prueba de cinemática inversa

Mediante el uso del joystick, hemos probado el desplazamiento sobre los ejes X, Y y Z de la plataforma Stewart, comprobando los valores correctos del cálculo de la cinemática inversa. Por cuestiones prácticas, se ha predeterminado que el joystick entregue valores entre -10 y 10, y estos valores, en mm, serán aplicados para el cálculo cinemático del robot.

Con estos valores, se ha comprobado, que el robot se mueve de una manera muy precisa (con un error menor a 1mm en el desplazamiento en cada eje) para la posición marcada por el desplazamiento del joystick. A continuación, colocamos mostramos los datos obtenidos realizando mediciones de desplazamiento sobre el eje X, para tener un ejemplo de los valores obtenidos

Desplazamiento Joystick (X) en mm	Desplazamiento Plataforma (X) en mm
1	1
2	2
4	4
6	5.8
8	7.5

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

9	8.4
10	9.2

Tabla 6. Datos de desplazamiento deseado y medido para el eje x

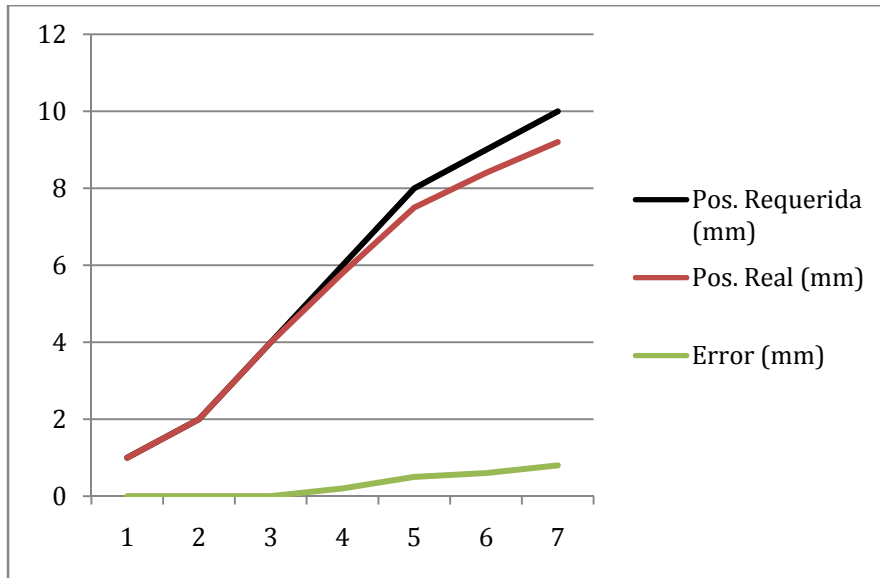


fig. 107. Desplazamientos y error obtenido

Para el desplazamiento, hemos calculado la desviación estándar del error, la cual nos da un valor de $SD=0.3316$.

Para la rotación sobre los ejes, simplemente se modifica el código para aplicar el cálculo de rotación en lugar del de traslación, realizando rotaciones entre -10 y 10 grados sobre cada eje.

Rotación Joystick (Z) en mm	Rotación Plataforma (Z) en mm
1	1
2	2
3	3.2

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4	4.2
5	5.5
6	6.5
7	7
8	8.5
9	9
10	10

Tabla 7. Datos de rotación deseado y medido para el eje z

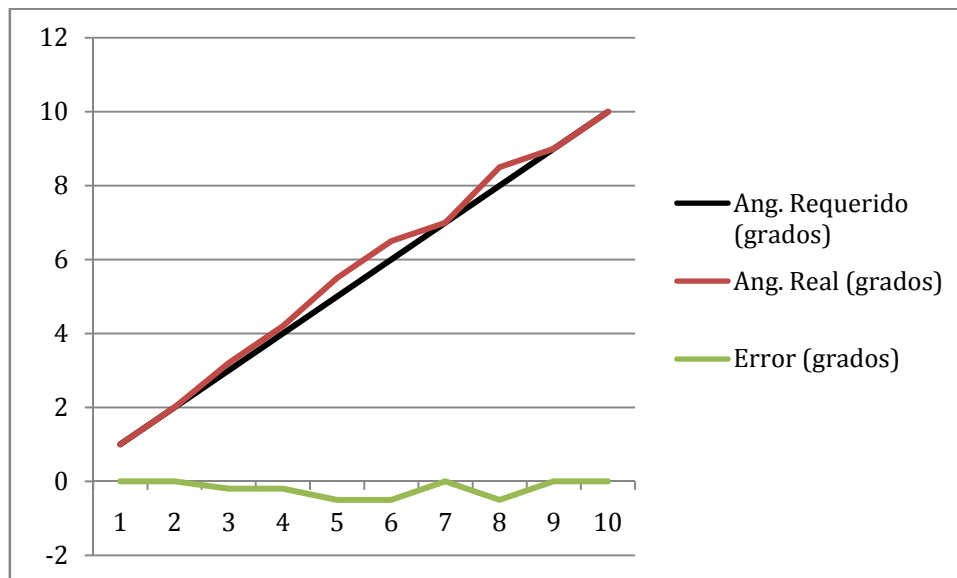


fig. 108. Rotación y error obtenido

Para la rotación, hemos calculado la desviación estándar del error, la cual nos da un valor de $SD=0.228$, resultando que la desviación estándar del error en la rotación, es menor a la desviación estándar del error de desplazamiento.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Al medir la rotación en cada eje, podemos observar que es bastante aproximada a los valores deseados, lo que comprueba el correcto cálculo cinemático de la librería creada. Cabe recalcar que la medición de los valores también tiene cierto error, ya que los medidores angulares usados tienen como unidad de medida el grado, y los valores intermedios han sido aproximados visualmente.

5.4. Análisis del sistema de control

Una vez que se ha comprobado el correcto funcionamiento de todo el hardware del robot, y su software de cálculo cinemático, procedemos a realizar las pruebas de funcionamiento del sistema de control.

Nuestra aplicación didáctica para el sistema de control, consiste en que, colocado un objeto (una pelota para nuestro propósito) en cualquier parte de la plataforma adaptada a la plataforma móvil del robot, el sistema de control tratará de llevarla hacia el centro de la plataforma, balanceándola y evitando que se salga fuera de los límites de la plataforma.

Para esta aplicación, debemos plantear ciertas condiciones iniciales, que nos ayudarán a definir los lineamientos de nuestro sistema de control, los cuales listaremos a continuación:

- Se usará únicamente rotación en los ejes X y Z de la placa móvil.
- El punto de destino será el centro de la placa móvil, con coordenadas [0,0] en los ejes anteriormente mencionados.
- Como objeto de prueba, se utilizará una pelota blanca de 4cm de diámetro, que contrastará con el fondo oscuro de la placa móvil utilizada.
- Para probar la diferencia entre diferentes controladores, se colocará inicialmente el objeto siempre en la misma posición, para mantener la igualdad de condiciones iniciales para los distintos controladores.
- En todas las pruebas realizadas, se registrarán los datos de la posición en X y Z del objeto, y los datos de salida del controlador, los cuales estarán en valores entre -1 y 1. Estos datos se graficarán para poder compararlos a futuro.

Se realizaron varias pruebas con distintos controladores, y vamos a presentar los resultados más relevantes de las mismas, para los distintos tipos de controladores usados.

5.4.1. Controlador proporcional #1

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con este controlador, el sistema es realmente inestable, la plataforma sigue el movimiento del objeto, pero no logra controlar la velocidad del mismo, para llevarla al punto final indicado.

Para este controlador, obtuvimos los siguientes resultados:

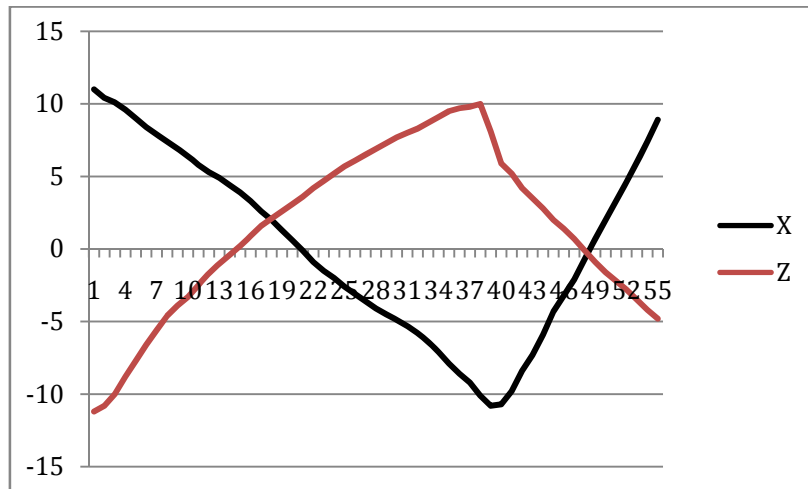


fig. 109. Posición en X y Z del objeto para el controlador lineal #1

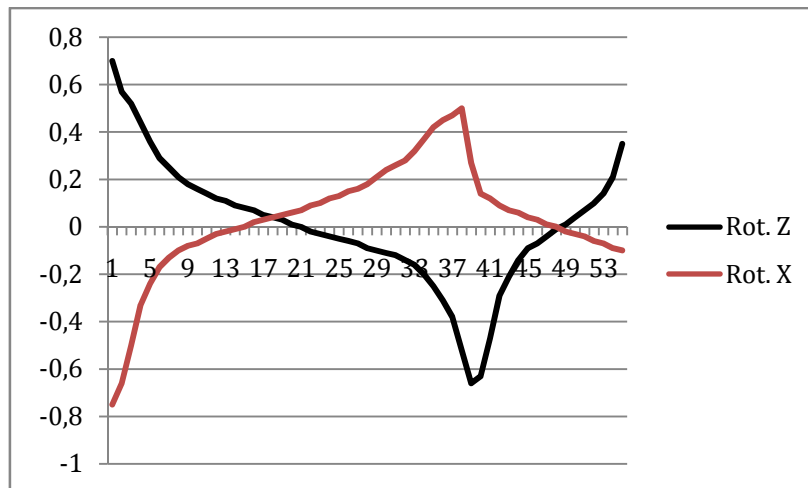


fig. 110. Ángulos de giro de la plataforma móvil para el controlador lineal #1

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

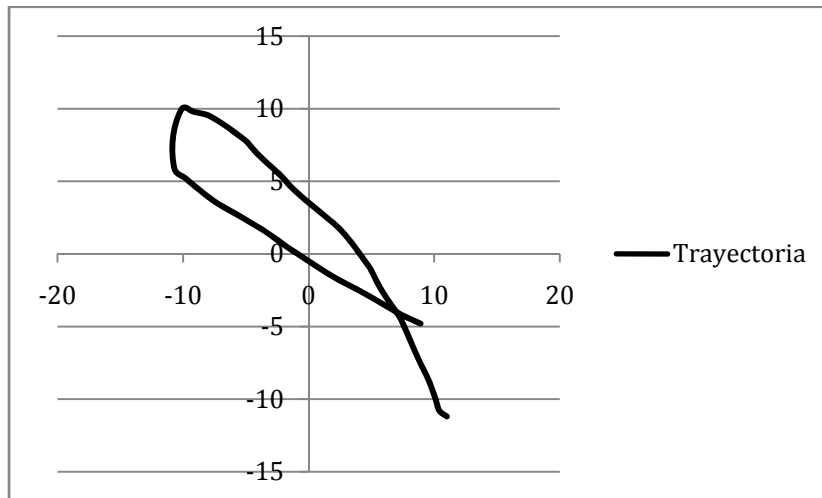


fig. 111. Trayectoria del objeto sobre la plataforma para el controlador lineal #1

Como podemos observar, la inestabilidad de este controlador lo hace inaplicable para nuestra aplicación. Los movimientos de la placa móvil son demasiado bruscos y retardados para poder controlar el objeto.

5.4.2. Controlador proporcional #2

Este controlador, utiliza la misma función de cálculo del anterior, pero hemos reducido la curva en un 50%. Con esto hemos logrado suavizar el movimiento de la plataforma móvil, ganando un poco de estabilidad, pero aún no es la suficiente para balancear el objeto.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

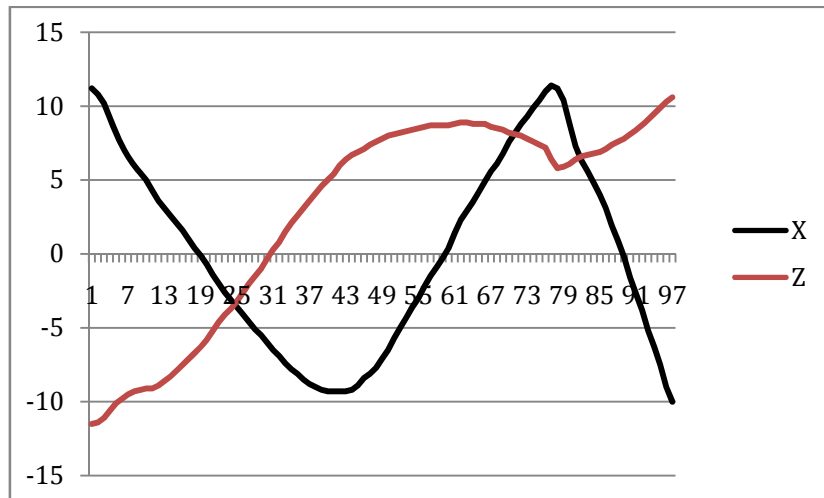


fig. 112. Posición en X y Z del objeto para el controlador lineal #2

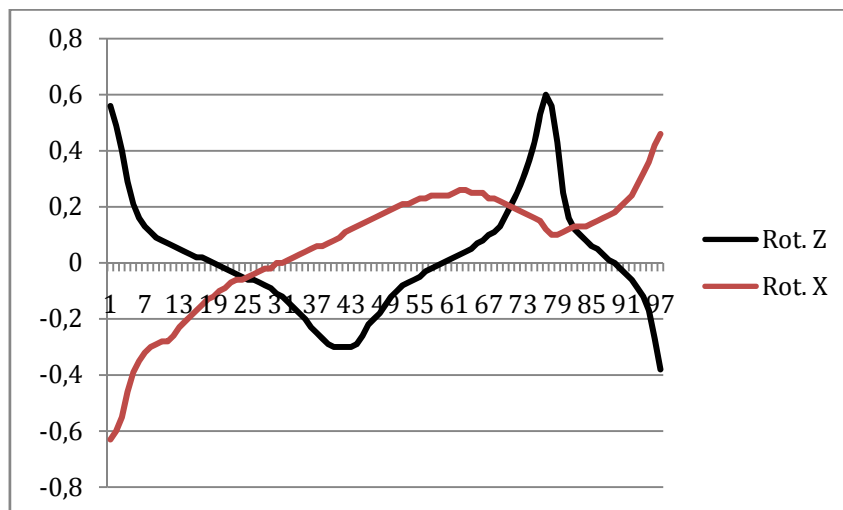


fig. 113. Ángulos de giro de la plataforma móvil para el controlador lineal #2

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

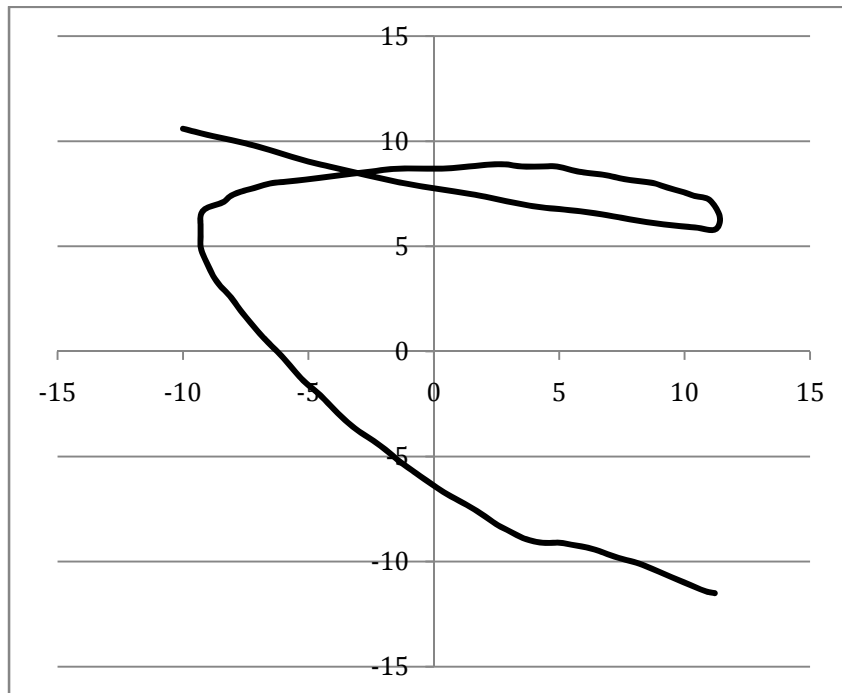


fig. 114. Trayectoria del Objeto para el controlador lineal #2

5.4.3. Controlador proporcional #3

Para este controlador, hemos utilizado la misma función, pero de igual manera que en el caso anterior, la hemos atenuado para suavizar el movimiento de la placa móvil.

Con esta función, hemos logrado estabilizar el objeto, pero no en la posición central como es esperado. Esto sucede ya que en los puntos cercanos al centro de la placa móvil, los movimientos son tan suaves, que prácticamente mantiene al objeto estable en esa posición. Esto lo podemos observar en los siguientes gráficos.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

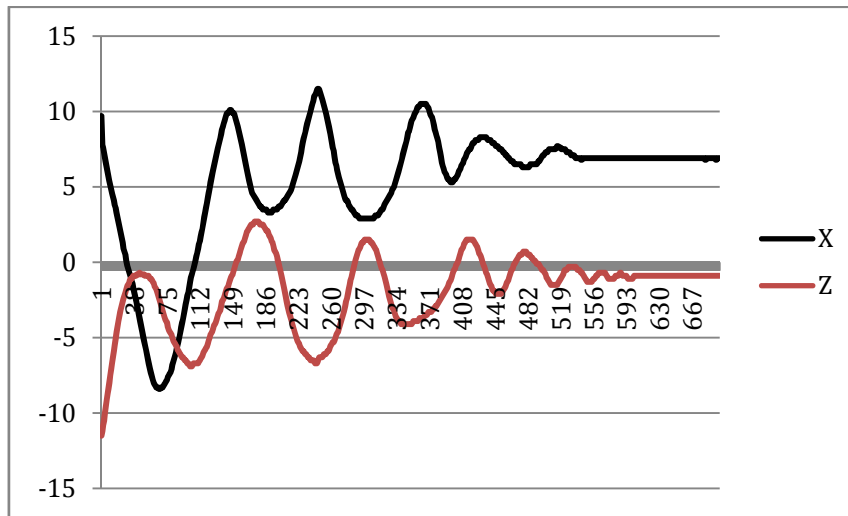


fig. 115. Posición en X y Z del objeto para el controlador lineal #3

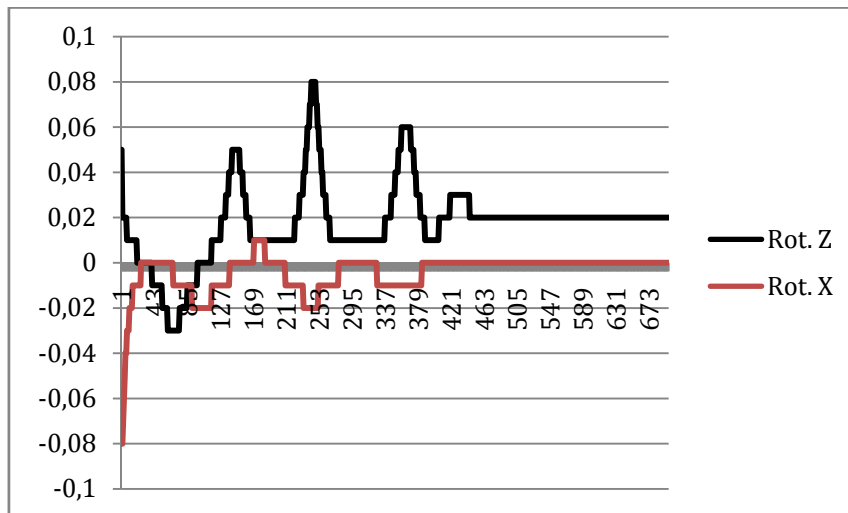


fig. 116. Ángulos de giro de la plataforma móvil para el controlador lineal #3

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

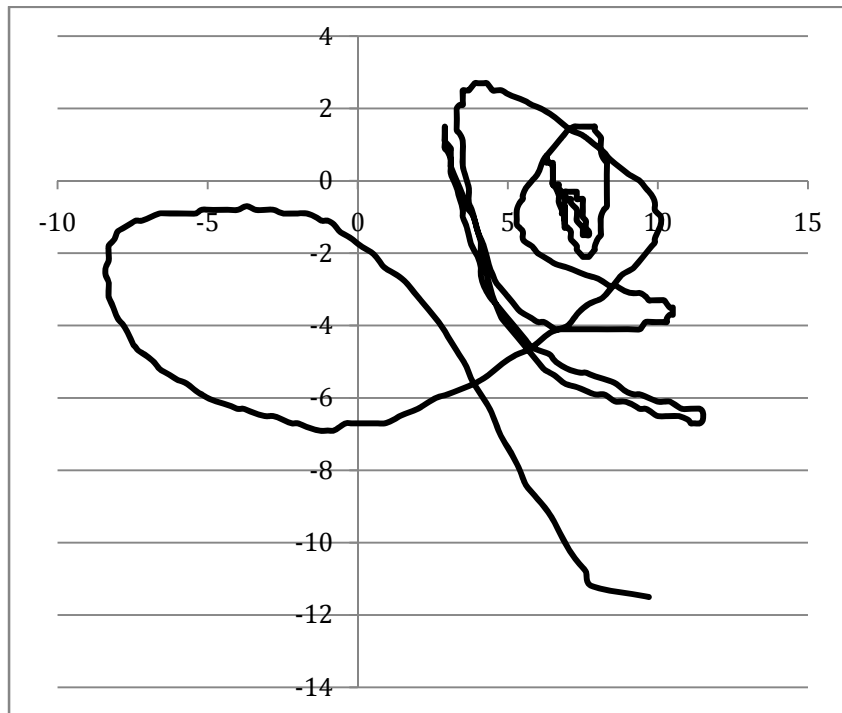


fig. 117. Trayectoria del Objeto para el controlador lineal #3

5.4.4. Controlador difuso tipo P

Para este caso, hemos diseñado un controlador difuso simple. El modelo de este controlador, lo podemos analizar con más detalle, en el capítulo IV, observando la figura 80.

Este controlador brinda una estabilidad similar al controlador lineal atenuado, como podemos observar en los siguientes gráficos:

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

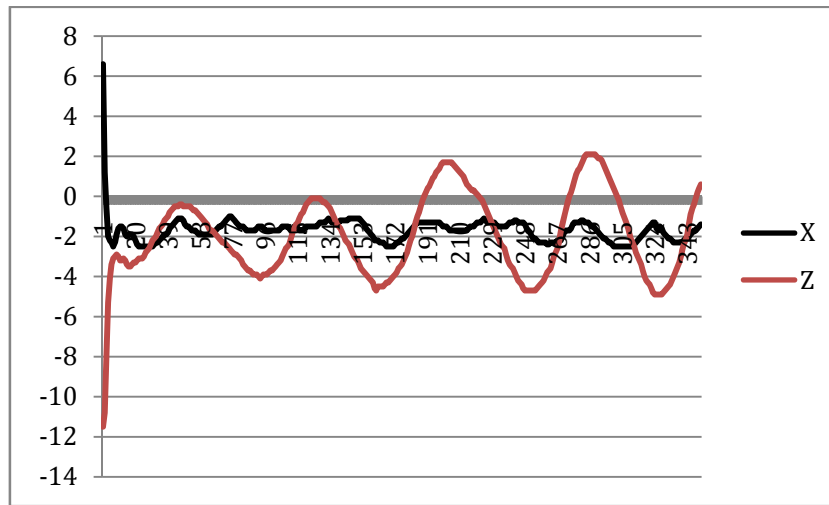


fig. 118. Posición en X y Z del objeto para el Controlador Difuso Tipo P

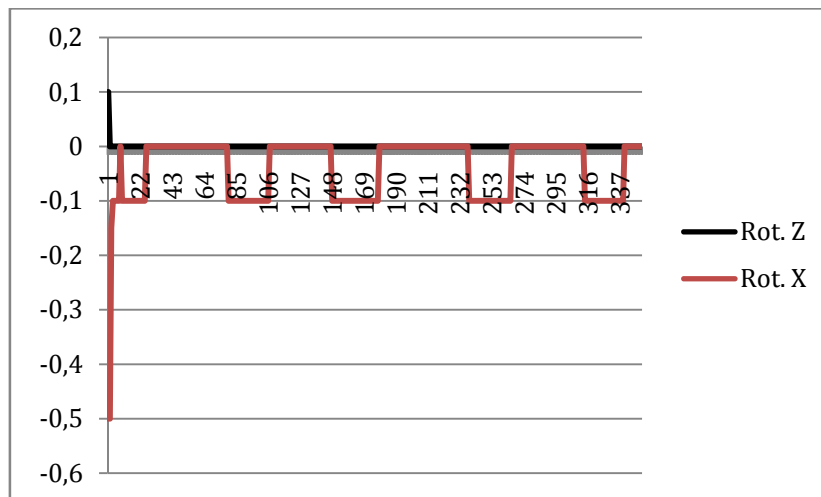


fig. 119. Ángulos de giro de la plataforma móvil para el Controlador Difuso Tipo P

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

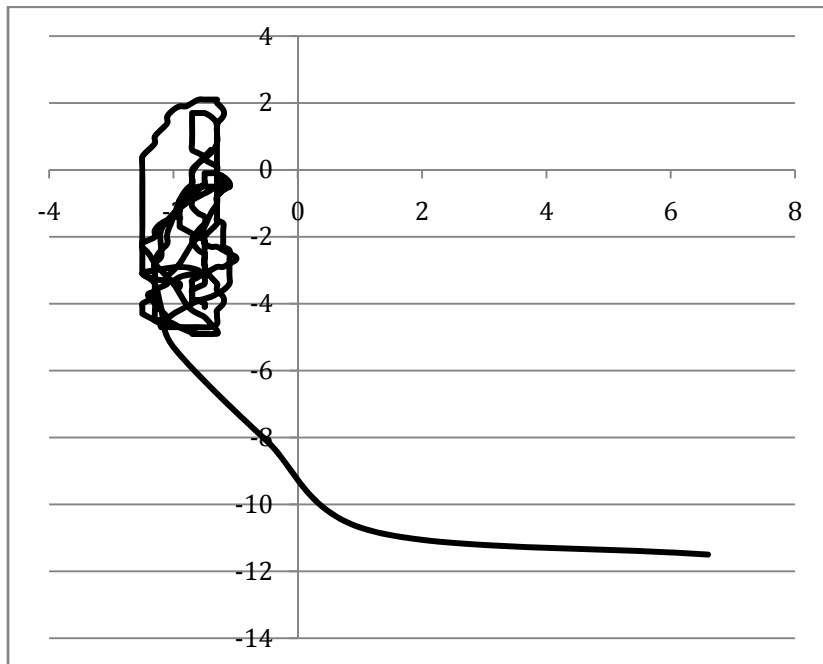


fig. 120. Trayectoria del Objeto para el Controlador Difuso Tipo P

5.4.5. Controlador difuso tipo PD

Para esta prueba, hemos diseñado un controlador difuso PD, cuyas características, al igual que en el caso anterior, podemos revisarlo en el capítulo IV, en la figura 91.

Para este controlador, hemos obtenido los siguientes resultados

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

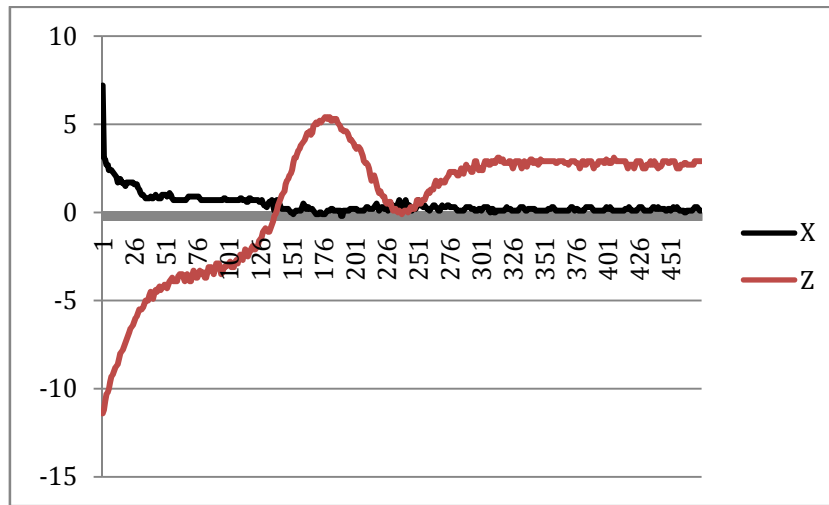


fig. 121. Posición en X y Z del objeto para el Controlador Difuso Tipo PD

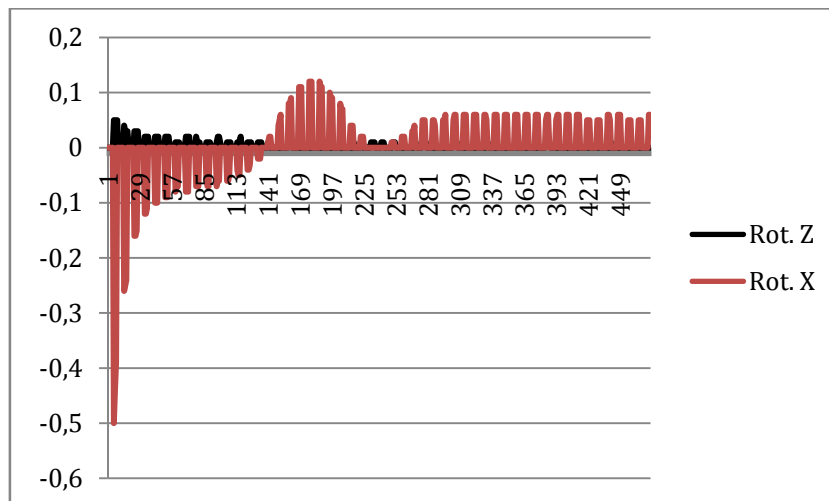


fig. 122. Ángulos de giro de la plataforma móvil para el Controlador Difuso Tipo PD

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

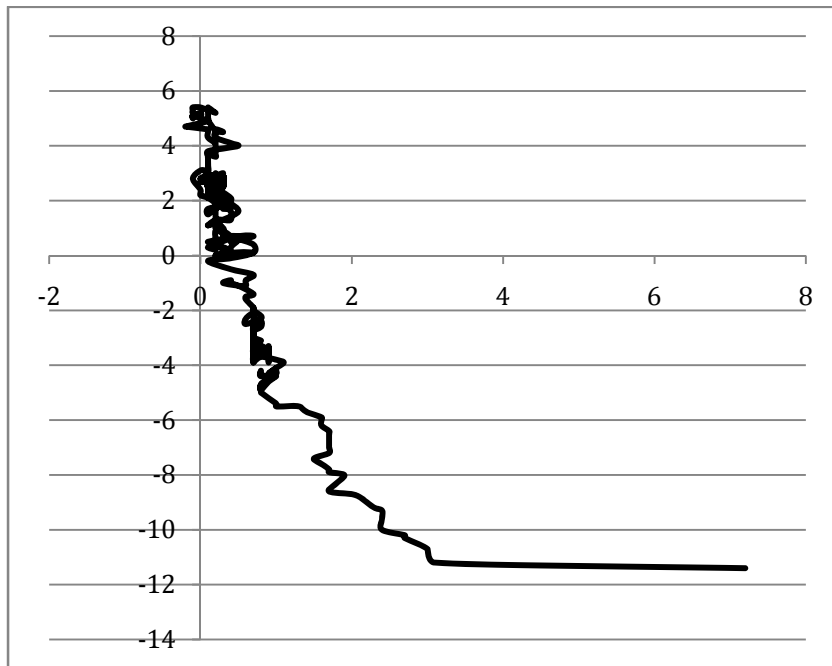


fig. 123. Trayectoria del Objeto para el Controlador Difuso Tipo PD

5.4.6. Controlador difusos tipo PID

Para esta última prueba, hemos diseñado un controlador PID difuso, cuyas características las podemos revisar en el capítulo IV, en la figura 96.

Los resultados de este controlador, los podemos observar en las siguientes imágenes:

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

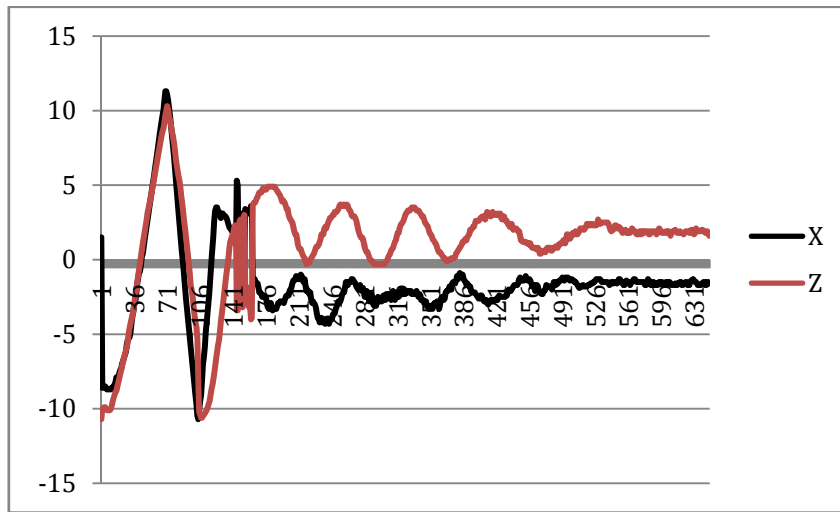


fig. 124. Posición en X y Z del objeto para el Controlador Difuso Tipo PID

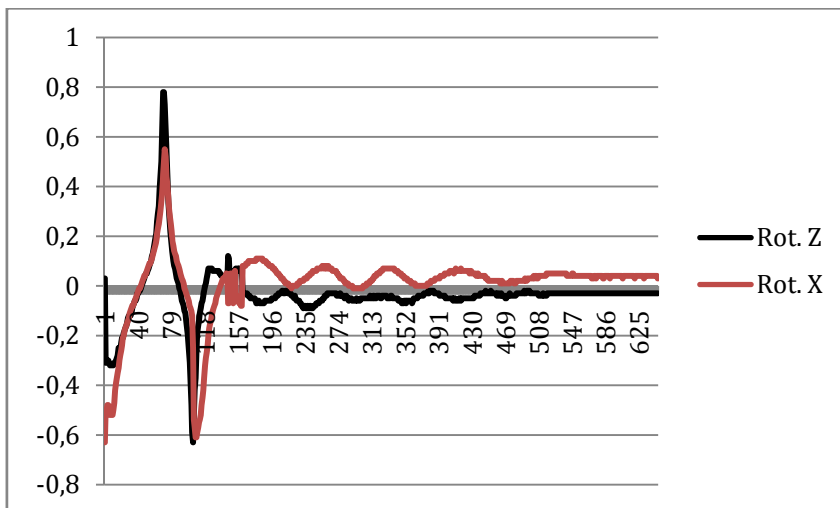


fig. 125. Ángulos de giro de la plataforma móvil para el Controlador Difuso Tipo PID

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

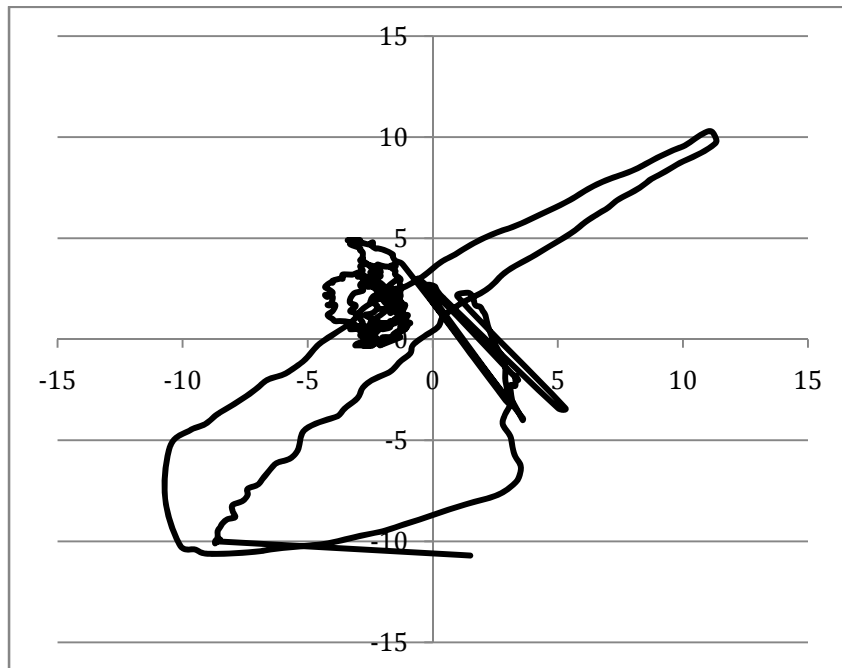


fig. 126. Trayectoria del Objeto para el Controlador Difuso Tipo PID

5.4.7. Análisis de resultados experimentales

Como hemos observado en los gráficos de resultados presentados, la mejor estabilidad se presenta en los controladores PD y PID Difusos. Esto se debe a que un controlador lineal, no tiene la velocidad de reacción necesaria para este caso particular. Los controladores lineales (normales o difusos) tendrían una aplicación en esta plataforma, en los casos donde la posición de la plataforma móvil deba ser proporcional a una variable de entrada, pero en los casos como el nuestro, donde el objeto en cuestión tiene una velocidad variable, es necesario que el controlador pueda anticiparse al movimiento del objeto, es por eso que con el controlador PD obtenemos resultados mucho mejores a los de los controladores lineales probados.

Para mejorar la estabilidad del sistema, mediante prueba y error, será necesario ajustar las funciones de pertenencia de entrada y salida de los controladores difusos, para llegar a un punto donde la estabilidad del sistema sea la requerida.

Además del controlador, existen algunas variables mecánicas que también afectan el funcionamiento del sistema. Por ejemplo, con el uso de servomotores de mejor calidad y precisión (por ejemplo, servomotores digitales, con encoders ópticos internos) mejorarían en gran manera la precisión y la velocidad de movimiento de la plataforma

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

móvil. Obviamente esto aumentaría el precio de la plataforma, lo que en nuestro caso, al ser un proyecto orientado a aplicaciones didácticas, se trató de mantener el costo de producción lo más bajo posible.

CAPÍTULO 6

6. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el Capítulo 1 se presenta una introducción a las plataformas robóticas y su evolución histórica, incluyendo los robots que han marcado la pauta para cada época, y han servido como guía para la robótica actual. Además se expone la clasificación de los paralelos de acuerdo a la movilidad que presentan, y se realiza una introducción al análisis cinemático de estos mecanismos, su espacio de trabajo y las singularidades que pueden alcanzar. De igual forma se analizan las ventajas y desventajas que brindan los manipuladores paralelos frente a otra configuración de robots industriales (tipo serie). Finalmente se indican las aplicaciones más importantes de los robots paralelos, entre las cuales se revisan: en el sector industrial los simuladores de vuelo y manejo de automóviles; en el campo de la medicina su aplicación en cirugías, rehabilitaciones ortopédicas, entre otras; su uso como manipuladores para colocar objetos en posiciones y orientaciones que dependen de condiciones externas como por ejemplo: hora del día, estado del clima, etc. Con el estudio de este capítulo se determinó las siguientes conclusiones:

- Los robots paralelos son mecanismos complejos desde el punto de vista matemático, debido a que el cálculo de la cinemática directa es difícil de realizar, por las cadenas cinemáticas cerradas que poseen. Esta consideración es de suma importancia para el posterior diseño del sistema de control que se implementará en la plataforma Stewart.
- Se ha obtenido un mayor conocimiento general sobre la robótica, y los robots paralelos. Existen innumerables aplicaciones de los robots que utilizan la configuración paralela, y la utilidad que pueden brindar, a estudios didácticos, en este caso al de los controladores difusos.

En el Capítulo 2 se describe la funcionalidad de cada una de las partes y del robot en su totalidad, además se especifica las características del sistema mecánico y del diseño individualmente las piezas que conforman la plataforma Stewart. El capítulo expone el diseño de la parte electrónica que comanda a los servomotores, integrados para proporcionar el movimiento al robot. Por último se incluye el análisis matemático de la plataforma robótica para posteriormente emplearlo en el software de control, necesario para realizar los cálculos de la cinemática inversa del mismo. Una vez terminado este capítulo se llega a las siguientes conclusiones:

- Es posible diseñar una plataforma robótica tipo Stewart para aplicaciones didácticas. Para poder obtener el diseño final, se hapasado por varias

CAPÍTULO 6. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

etapas, desde el análisis matemático del robot para obtener su cinemática, hasta la simulación del robot utilizando herramientas computacionales de última generación.

- Los actuadores que se utilizaron para el robot fueron los servomotores estándar, por dos razones principales: bajo costo y disponibilidad local. Los servomotores, en conjunto con los brazos de soporte y las articulaciones esféricas utilizadas, pueden reemplazar sin mayores complicaciones a los actuadores lineales, que frecuentemente se encuentran en los robots paralelos, a una fracción del costo de un actuador lineal. Obviamente, utilizando estos servomotores, se sacrifica un poco la precisión en el movimiento del robot, pero como se ha mencionado a lo largo de este estudio, la plataforma está diseñada con fines puramente didácticos, y por esto, no es necesaria una elevada precisión en el sistema.

Se recomienda para el modelado de las piezas mecánicas en tres dimensiones software de diseño asistido por computador (CAD), existen en el mercado diversos programas CAD, tal es el caso de AutoDesk Inventor, SolidWorks, entre otros.

En el Capítulo 3 se especifica las características de construcción de las partes de la estructura mecánica Stewart, así como la secuencia de ensamble de las mismas. Este proceso se realiza tomando en cuenta los diseños desarrollados en el capítulo 2. En la parte electrónica se procede a la fabricación de la tarjeta de control de los servomotores para luego colocar sobre ésta todos los componentes electrónicos que permitirán lograr el trabajo de regular el movimiento de la plataforma móvil, para su funcionamiento se muestra el diseño y desarrollo de la interfaz de usuario, la cual se realizó como una aplicación didáctica para el estudio de controladores difusos. A continuación se muestra las conclusiones de este capítulo:

- La construcción de un robot de este tipo se la puede realizar en la localidad, utilizando los materiales y equipos disponibles en el medio. La fabricación del robot en aluminio y materiales compuestos (plástico, fibra de carbono) presenta una gran ventaja en el momento de fabricar las piezas, ya que además de un bajo costo de producción, se obtienen partes de una elevada precisión y resistencia.
- Para el diseño de la electrónica de control de los servomotores, se ha planteado el uso de un sistema microcontrolado, que utiliza una interfaz USB para la comunicación con el computador. Esta interfaz muestra una gran ventaja con respecto a la RS232 utilizada usualmente en este tipo de controladores, ya que permite que sea conectada en una amplia gama de equipos modernos. En la actualidad, muchos computadores (especialmente los portátiles) no incluyen un puerto RS232 en su circuitería.
- Para el diseño y programación de la interfaz de usuario del robot, se optó por generar una librería .NET que incluirá todas las funciones requeridas para el

CAPÍTULO 6. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

cálculo de la cinemática inversa del mismo, facilitando así el uso de esta librería en diferentes proyectos, dependiendo de la aplicación que se esté programando sobre esta Plataforma Stewart. Esta librería facilitará tanto el uso del robot, que permitirá que ingresemos (aparte de los parámetros físicos de la plataforma) los valores de desplazamiento y giro sobre sus ejes respectivos, y la plataforma se ubicará directamente en la posición indicada. Esto, igual que la librería de control de los motores, facilitará de gran manera la implementación de diferentes controladores que pudieran utilizarse, dependiendo de la aplicación diseñada para el robot.

- Dentro de la interfaz de usuario, y como parte del sistema de control a aplicarse se ha desarrollado de un sistema de visión artificial en tiempo real, que para este caso detectará un objeto definido (una esfera blanca) sobre la plataforma móvil del robot.

Se recomienda estudiar librerías para el procesamiento de imágenes y detección de objetos, necesarios para implementar un sistema de visión artificial con detección en tiempo real. El bloque de visión artificial detecta la esfera con una velocidad de 60 cuadros por segundo, permitiendo que estos datos de captura sean utilizados por el controlador diseñado para el robot, funcionando mucho mejor que otros sensores de posición que se analizaron como opciones.

En el capítulo 4 se expone los conceptos fundamentales, operaciones y principios subyacentes del control difuso, los mismos que nos permitirán avanzar con el desarrollo de los sistemas de control basados en la lógica difusa. Una vez revisados los temas de lógica y control difuso se detalla las características de los diferentes tipos de controladores que se probaron en la plataforma Stewart. Tal es el caso del controlador tipo proporcional difuso, proporcional derivativo difuso y proporcional integral derivativo difuso. Después de esto se llega a las siguientes conclusiones:

- Los controladores difusos resuelven el problema de control de los sistemas no lineales, debido a que no es necesario conocer la función de transferencia de la planta para poder implementarlos, esto simplifica de gran manera los cálculos de diseño.
- El controlador difuso será fácil de interpretar siempre y cuando el número de reglas difusas y variables lingüísticas sea reducido, por esta razón se ha optado por dividir al controlador en dos, uno para la regulación de la rotación de la plataforma móvil alrededor del eje x y el otro para el control de la rotación alrededor del eje z.

El capítulo 5 se enfoca en las pruebas de funcionamiento del robot, y en la obtención de resultados experimentales del mismo. Para obtener estos resultados, se ha

CAPÍTULO 6. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

procedido a realizar pruebas en cada uno de los bloques del robot. Para estas pruebas de funcionamiento, se ha ido probando bloque por bloque la correcta operación de los componentes del robot, así como del conjunto total del mismo. La evaluación da una idea de que tan bueno es el funcionamiento del robot para la aplicación creada, el balanceo de la esfera. Los resultados obtenidos de las pruebas permiten concluir que:

- Un controlador proporcional es demasiado lento para la aplicación planteada, menos en el caso de que el controlador sea lo suficientemente lento a la salida, como para no provocar inestabilidad en el sistema, tomando en cuenta que la pelota usada no tiene velocidad inicial; por lo que este controlador resulta poco práctico en la realidad.
- Usando los controladores difusos, se nota que la estabilidad del sistema mejora, siendo el controlador difuso tipo PD el que reduce el tiempo de establecimiento del mismo. El controlador PID difuso, por sus características de funcionamiento, llega a estabilizarse en un tiempo mayor al logrado por el anterior.

A partir de las pruebas realizadas se recomienda lo siguiente:

- Se puede mejorar el rendimiento mecánico del robot (velocidad y precisión) usando servomotores de mejor calidad, como los digitales, debido a que poseen un mayor torque y engranes metálicos, los cuales disminuyen el juego mecánico propio de los servomotores, y aumentan la precisión y velocidad de rotación.
- El algoritmo de visión artificial funciona perfectamente para el estudio de controladores difusos, pero siempre hay espacio para la optimización del mismo. El sistema de visión trabaja a 60 cuadros por segundo, procesando las imágenes y detectando el objeto, con el uso del procesador del computador de aproximadamente el 80% (tomando en cuenta que no es un equipo con rendimiento de punta).
- Los controladores de prueba usados, en especial el PD Difuso, que fue el que mejor rendimiento presentó, pueden ser mejorados ajustando las funciones de entrada.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Presupuesto

La plataforma Stewartno ha sido realizada con el objetivo de producción en serie, sino que la construcción dela misma fue necesaria para el estudio de controladores difusos, por lo que no se va a efectuar estudios de mercado ni costos de producción en serie. Simplemente, se analizará el costo de fabricar un solo robot, con las especificaciones inicialmente propuestas. El presupuesto se divide en tres partes, del sistema mecánico, del sistema electrónico y de mano de obra.

La siguiente tabla hace referencia a los costos del sistema mecánico:

N°	Descripción	Cant.	V. Unit. (\$)	V. Total (\$)
1	Placa de Aluminio 60x60cm 3mm	1	16.00	16.00
2	Maquinado de la base fija	1	10.00	10.00
3	Maquinado de las escuadras de fijación	6	4.00	24.00
4	Maquinado de la plataforma móvil	1	8.00	8.00
5	Servomotores 6kg/cm	6	11.50	69.50
6	Juntas esféricas	12	1.50	18.00
7	Tubo de carbono 5mm diámetro, 225mm longitud	6	2.00	12.00
8	Tornillos 3mm x 20mm, con tuerca de presión	36	0.30	10.80
9	Placa de carga superior	1	5.00	5.00
10	Adhesivo epoxico (en tubo)	1	7.00	7.00
11	Soporte plástico para cámara	1	15.00	15.00
12	Varios		20.00	20.00
COSTO TOTAL PARTES (USD)				314.80

CAPÍTULO 6. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La siguiente tabla hace referencia a los costos del sistema electrónico:

N°	Descripción	Cant.	V. Unit. (\$)	V. Total (\$)
1	Tarjeta de control de motores, con puerto USB	1	44.00	44.00
2	Cámara de Video PS3 Eyecam	1	48.00	48.00
3	Computador personal (Core2Duo 2.2Ghz)	1	350.00	350.00
COSTO TOTAL (USD)				442.00

La siguiente muestra los costos de la mano de obra para el ensamblaje del robot, así como de la programación del software de control.

N°	Descripción	Horas	Costo/Hora	TOTAL
1	Diseño y Ensamblaje del robot	10	15.00	150.00
2	Diseño de la tarjeta de control y del software del microcontrolador	10	15.00	150.00
3	Diseño y Programación del software de captura de video y procesamiento de imágenes	20	30.00	600.00
4	Programación del software de control difuso	40	30.00	600.00
COSTO TOTAL DE DESARROLLO (USD)				1500.00

Con los presupuestos expuestos anteriormente se obtiene el costo total de la plataforma paralela tipo Stewart para el estudio de controladores difusos, el mismo que es de **\$2256,8**

Como podemos observar, el costo de la mano de obra en este proyecto, supera al costo de los materiales utilizados. Este valor, en caso de una producción a mayor escala, sería mucho menor, al haber pasado ya la etapa de investigación y desarrollo del mismo.

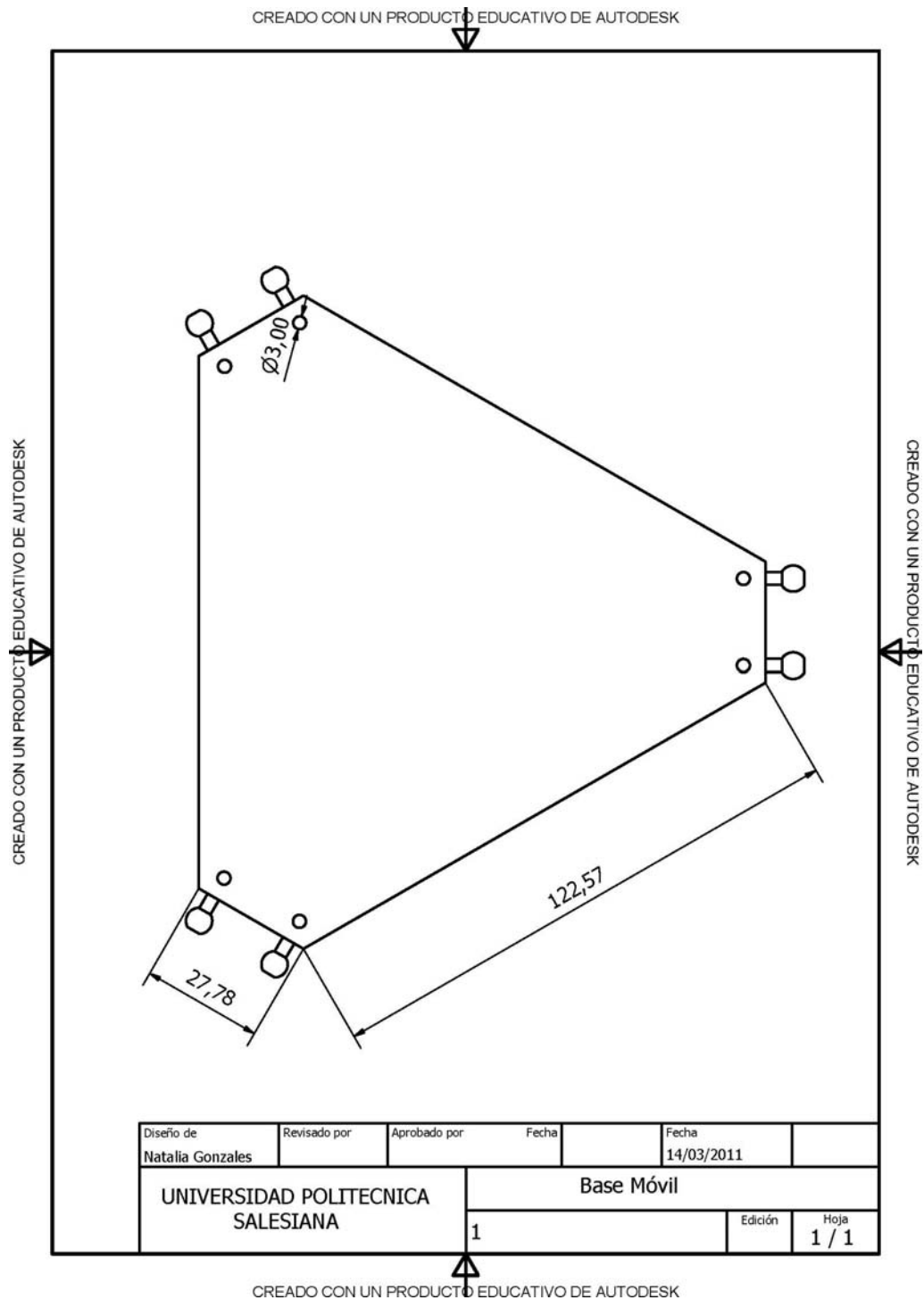
APÉNDICE B

Las láminas que se encuentran a continuación muestran las dimensiones de:

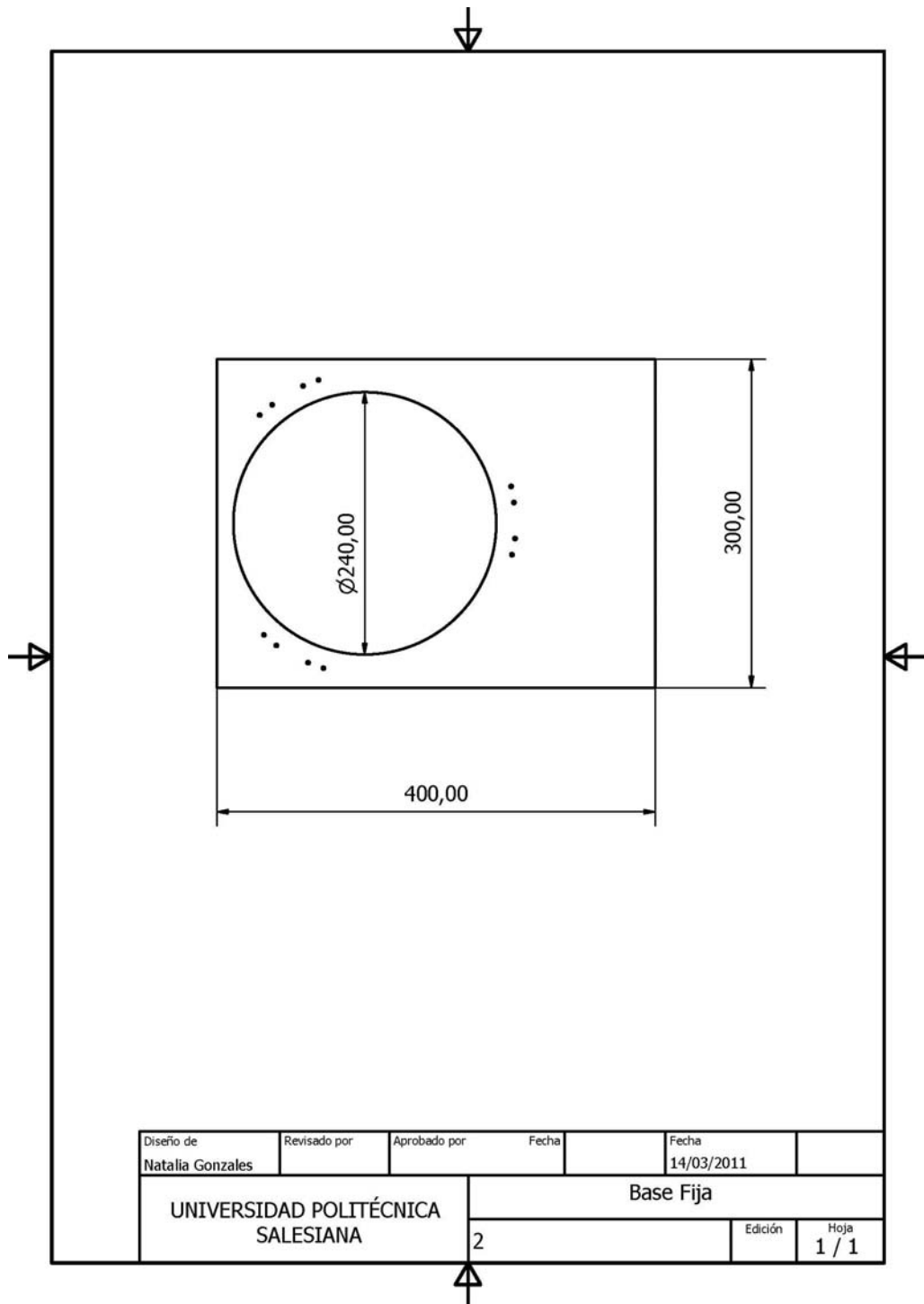
- La base móvil de la plataforma Stewart
- La base fija
- Los eslabones de acoplamiento y de entrada del mecanismo paralelo
- La escuadra de fijación empleada para sujetar los motores a la base fija

Con las vistas de las piezas del robot se puede apreciar que son relativamente sencillas de diseñar y construir.

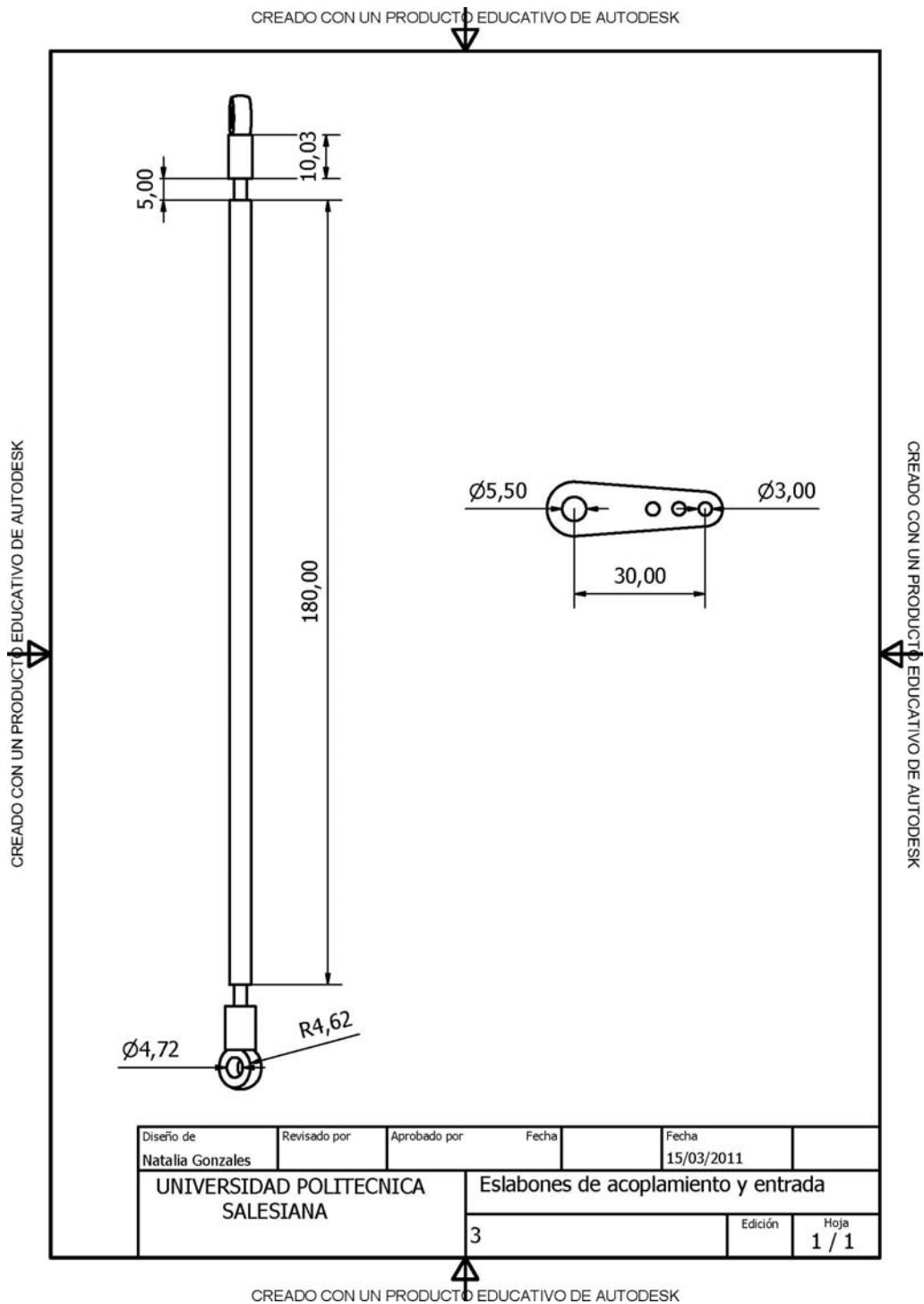
CAPÍTULO 6. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



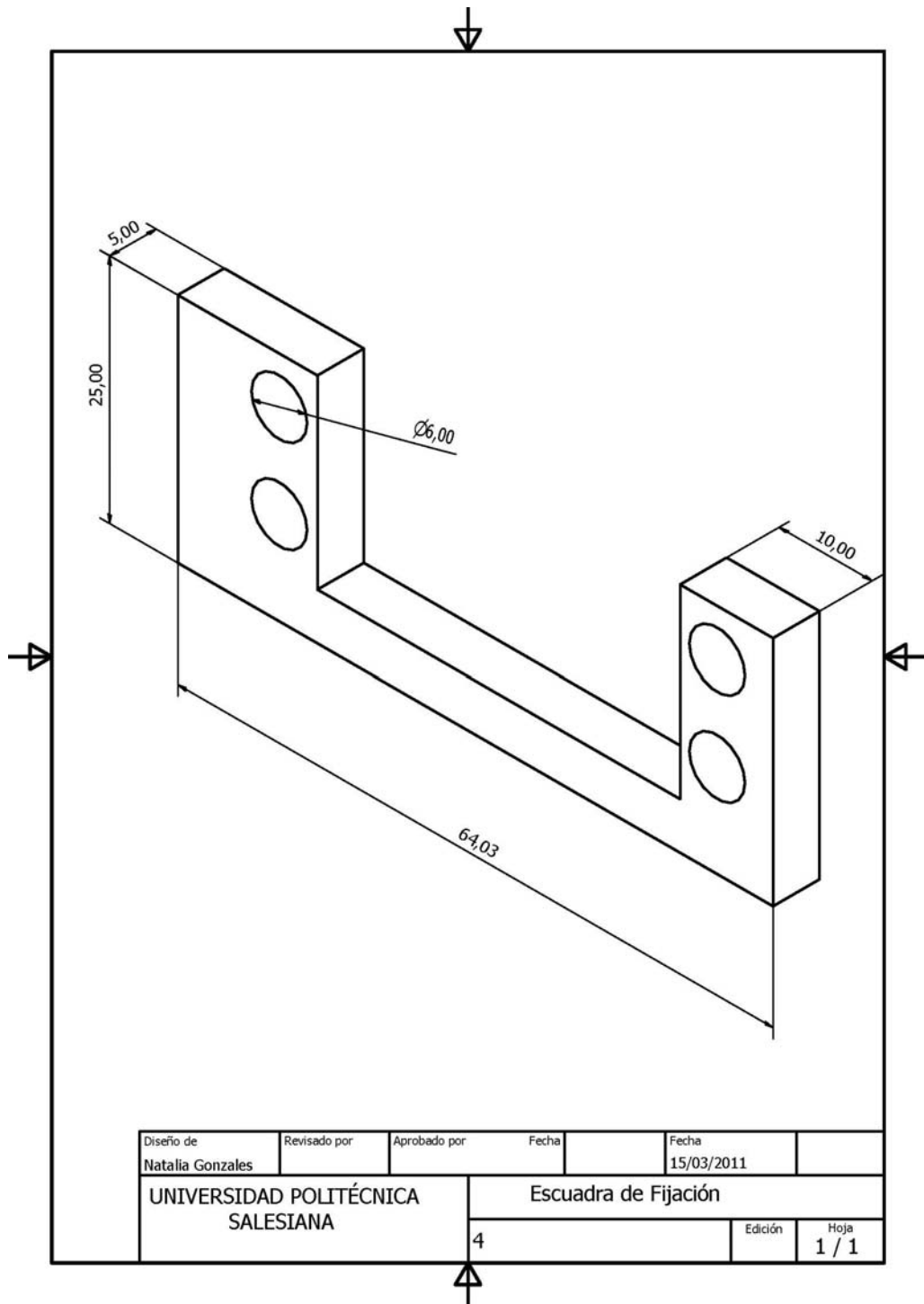
CAPÍTULO 6. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



CAPÍTULO 6. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



CAPÍTULO 6. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



BIBLIOGRAFIA

- Alonso, S. K. (2009). *eMathTeacher*. Recuperado el 21 de 02 de 2011, de eMathTeacher:
<http://www.dma.fi.upm.es/research/FundMatSoftComputing/fuzzyinf/mamda ni1.htm>
- Amazon. (2011). *www.amazon.com*. Recuperado el 12 de 03 de 2011, de www.amazon.com:
<http://www.amazon.com/gp/aw/d.html?is=200&a=B000VTQ3LU&in=3>
- Cataluña, U. P. (2008). *www.tdr.cesca.es*. Recuperado el 04 de 03 de 2011, de www.tdr.cesca.es: http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0207105-105056//04Rpp04de11.pdf
- Hernán González, M. S. (2006). *www.catic.unab.edu.co*. Recuperado el 28 de 02 de 2011, de www.catic.unab.edu.co:
<http://catic.unab.edu.co/2congresomecatronica/images/docum/14.pdf>
- IFR. (2011). *www.cfievalladolid2.net*. Recuperado el 01 de Marzo de 2011, de www.cfievalladolid2.net:
http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/industrial.htm
- Isidro Zabalza, J. R. (23 de 10 de 2007). *www.imem.unavarra.es*. Recuperado el 28 de 02 de 2011, de www.imem.unavarra.es:
<http://www.imem.unavarra.es/isidro/articles/Zabalza-Cuzco.pdf>
- León, J. A. (28 de 05 de 2009). Diseño, análisis y construcción de un robot paralelo traslacional. *Diseño, análisis y construcción de un robot paralelo traslacional*. Querétaro, México.
- Madrid, U. P. (2007). *www.sadesisam.etsii.upm.es*. Recuperado el 26 de 02 de 2011, de www.sadesisam.etsii.upm.es:
<http://sadesisam.etsii.upm.es/trepa/es/project.asp>
- Ogata, K. (1997). *Ingeniería de Control Moderno*. Minnesota: Prentice-Hall.
- Palitroquez, P. (27 de 12 de 2008). *www.picmania.garcia-cuervo.net*. Recuperado el 12 de 03 de 2011, de www.picmania.garcia-cuervo.net: http://picmania.garcia-cuervo.net/invitados_primer18f4550.php

CAPÍTULO 6. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Rafael Aracil, R. S. (01 de 2006). *arvc.umh.es*. Recuperado el 03 de 03 de 2011, de *arvc.umh.es*: <http://arvc.umh.es/documentos/articulos/RIAI%202006.pdf>

Reznik, L. (1997). *Fuzzy Controllers*. Melbourne, Australia: NEWNES.

Robotmania. (18 de 11 de 2010). *www.robotionary.com*. Recuperado el 26 de 02 de 2011, de *www.robotionary.com*: <http://robotionary.com/robotics/world%E2%80%99s-fastest-robot-quattro.php>

Silva, L. A. (2005). *www.oa.upm.es*. Recuperado el 29 de 02 de 2011, de *www.oa.upm.es*: http://oa.upm.es/378/1/luis_angel_silva.pdf

Varbuchta, R. (2004). *www.capek.misto.cz*. Recuperado el 28 de 02 de 2011, de *www.capek.misto.cz*: <http://capek.misto.cz/english/robot.html>

Velasco, I. H. (2006). *www.docentes.unal.edu.co*. Recuperado el 21 de 02 de 2011, de *www.docentes.unal.edu.co*: <http://www.docentes.unal.edu.co/hfvelascop/docs/OTROS/LOGICADIFUSA/5%20An%E1lisis%20de%20Controladores%20Difusos.pdf>

Wikipedia. (10 de 02 de 2011). *es.wikipedia.org*. Recuperado el 03 de 03 de 2011, de *es.wikipedia.org*: http://es.wikipedia.org/wiki/Karel_%C4%8Capek