

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Control en Modo Deslizante basado en Lógica Borrosa para una plataforma neumática de 2 Grados de Libertad (2-GDL)

Autor: Danelis García Llerena

Tutor: Msc. Pablo J. Prieto Entenza

Santa Clara

2013

“Año 55 de la Revolución”

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Control en Modo Deslizante basado en Lógica Borrosa para una plataforma neumática de 2 Grados de Libertad (2-GDL)

Autor: Dianelis García Llerena
email: dianelis@uclv.edu.cu

Tutor: Msc. Pablo J. Prieto Entenza Prof. Asistente
Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV
email: pablop@uclv.edu.cu

Santa Clara

2013

“Año 55 de la Revolución”



Hago constar que el presente TRABAJO DE DIPLOMA fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Dianelis García Llerena
Autor

Fecha

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Dianelis García Llerena
Autor

Fecha

Boris Luis Martínez Jiménez, Dr.C
Jefe del Departamento

Fecha

Responsable ICT o J' de Carrera, (Dr.C., M.Sc. o Ing.)
Responsable de Información Científico - Técnica

Fecha

PENSAMIENTO

“El futuro tiene muchos nombres. Para los débiles es lo inalcanzable. Para los temerosos, lo desconocido. Para los valientes es la oportunidad.”

Victor Hugo

DEDICATORIA

Especialmente a mi mamá y a mi abuela, que siempre me han apoyado y guiado.

A mi papá, que siempre ha estado cerca.

Y a mi hermano, para marcarle el difícil camino que conduce a la superación.

AGRADECIMIENTOS

Por encima de todo me gustaría expresar mi sincero aprecio a mi tutor que me ha guiado a lo largo del desarrollo de este Trabajo de Diploma con su dedicación y conocimiento, si bien permitiéndome trabajar a mi propia manera. Su consagración y voluntad fue fundamental al éxito de este trabajo, que sin dudas es tan de él como mío. Fue un honor para mí trabajar con él durante todo este tiempo.

Durante mis años de estudio en la Universidad, tuve la gran suerte de conocer a muchas personas maravillosas que hicieron de esta un lugar especial para mí. Muchas gracias a todos por su amistad y por los grandiosos momentos compartidos.

Me gustaría agradecer a todos mis profesores por su guía académica y a aquellos, cuyas contribuciones, sugerencias, discusiones técnicas y consideraciones han ayudado a mejorar la calidad de esta tesis.

Finalmente, no hay palabra para describir mi gratitud hacia mi familia por su infinito apoyo y amor incondicional. Gracias por estar siempre ahí para mí.

RESUMEN

Los simuladores de conducción, además de ser usados para la capacitación y entrenamiento de potenciales conductores de vehículos, tienen una aplicación muy cercana y creciente en juegos y entretenimientos. Dichas plataformas permiten el entrenamiento del personal y se minimiza así el uso de vehículos reales, con el consiguiente ahorro de recursos. Además evitan posibles accidentes de los principiantes en condiciones de peligrosidad, ya que el ordenador permite reproducir condiciones extremas de conducción en un ambiente virtual, seguro y totalmente controlado.

El Grupo de Automática Robótica y Percepción (*GARP*) tiene la tarea de desarrollar estrategias de control para sistemas no lineales aplicados en robots paralelos, esta vez, controles no lineales debido a las ventajas de los mismos. En este trabajo son expuestos criterios seguidos para el uso de estrategias de control en modo deslizante (*SMC*) por la efectividad del mismo ante elementos altamente no lineales.

Se hace énfasis en las limitaciones del control deslizante y por ende en la necesidad de buscar variantes del mismo para resolver su principal problema, el *chattering* que deteriora su desempeño en la práctica.

Son descritas, a lo largo de la tesis, las diferentes variantes para resolver y eliminar este fenómeno, haciendo énfasis en una variante llamada Control por modo deslizante basado en lógica borrosa (*FSMC*) que combina las ventajas de Control en Modo Deslizante y Control Borroso.

Los resultados obtenidos mediante simulación y pruebas experimentales demuestran las ventajas de dicho algoritmo de control.

TABLA DE CONTENIDO

	<u>Página</u>
PENSAMIENTO	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
Índice de tablas	VII
Índice de figuras	VIII
INTRODUCCIÓN	1
1.	
Robótica Paralela y Algoritmos de control.	6
1.1. Características de los robots paralelos	9
1.1.1. Campo de aplicación	11
1.2. Tipos de actuadores	13
1.2.1. Actuadores neumáticos de desplazamiento lineal	14
1.3. Control desacoplado	16
1.4. Algoritmos de control en sistemas neumáticos	17
1.4.1. Estrategias de control convencional	18
1.4.2. Control adaptativo	20
1.4.3. Sistemas basados en redes neuronales	22
1.4.4. Control basado en lógica borrosa	25
1.4.5. Control basado en modo deslizante	26
1.5. Consideraciones finales del capítulo	27
2.	
Control en modo deslizante y lógica borrosa para plataforma neumática de 2 grados de libertad	29

2.1.	Plataforma de 2 grados de libertad(2-GDL)	29
2.1.1.	Modelo dinámico del actuador neumático	30
2.2.	Control en Modo Deslizante	34
2.2.1.	Diseño del controlador	38
2.2.2.	Robustez del control en modo deslizante	40
2.2.3.	Chattering	41
2.3.	Lógica Difusa: Conceptos básicos de conjuntos difusos	43
2.3.1.	Controladores borrosos	44
2.4.	Control Deslizante basado en Lógica Borrosa	46
2.5.	Consideraciones finales	50
3.	Esquema de control FSMC para plataforma de 2 GDL. Simulación y resultados experimentales	51
3.1.	Diseño del control en modo deslizante para el sistema neumático	51
3.1.1.	Simulación con ADAMS	53
3.2.	Diseño del control deslizante basado en fuzzy para el sistema neumático	54
3.2.1.	Análisis por simulación mediante Simulink-Adams	56
3.2.2.	Resultados experimentales	58
3.3.	Análisis económico	61
3.4.	Consideraciones finales	62
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
	ANEXOS	73
A.	Funciones de Membresía más comunes	74
B.	Valores de error obtenidos durante las pruebas experimentales en la plataforma de 2-GDL.	76

Índice de tablas

<u>Tabla</u>		<u>Página</u>
1-1. Diferencias principales entre los robots series y paralelos		10
2-1. Datos mecánicos del simulador de conducción SIMPRO		30
3-1. Reglas borrosas		55

Índice de figuras

Figura	Página
1-1. Plataformas de Gough	7
1-2. Varios tipos de Mesas multiejes para la simulación de vehículos	7
1-3. Configuración del robot Delta presentado por Clavel.	9
1-4. Robot serie y paralelo.	9
1-5. Varias configuraciones de robots planares.	10
1-6. Robot espacial con rotaciones alrededor de un centro.	11
1-7. Robots paralelos en aplicaciones médicas	12
1-8. Algoritmo PID convencional.	18
1-9. Algoritmo genérico de control adaptativo.	20
1-10. Control Adaptativo por Modelo de Referencia(MRAC).	22
1-11. Control Adaptativo de auto-sintonía.	22
1-12. Esquema de una red neuronal.	23
1-13. Identificación por el método back-propagation.	24
2-1. Plataforma de 2 GDL y su arquitectura geométrica	30
2-2. Esquema de un sistema neumático.	31
2-3. Diagrama de bloques para la identificación dinámica del sistema neumático	32
2-4. Efecto del control en modo deslizante sobre la trayectoria de un sistema de segundo orden representado en el plano-fase.	37
2-5. Diagrama a bloques de un lazo de control ideal en modos deslizantes. Un controlador discontinuo obliga a la señal de salida $x(t)$ de la planta que siga a la trayectoria de referencia $x_d(t)$	40

2-6. Representación del efecto de chattering, resultado de la acción del control deslizante.	42
2-7. Forma típica de funciones de pertenencia: 1-triangular, 2-trapezoidal, 3-gaussiana, 4-campana generalizada, 5-singleton.	44
2-8. Esquema de control borroso.	45
2-9. Esquema de control FSMC con la sustitución del elemento discontinuo. . .	47
2-10. Esquema de control FSMC teniendo en cuenta la derivada de la superficie deslizante.	48
2-11. Esquema de control FSMC teniendo en cuenta la sintonización de λ	49
2-12. Esquema de control FSMC propuesto para la plataforma de 2 GDL.	49
3-1. Diagrama de bloques en Simulink de la ley de control SMC.	52
3-2. Modelo en ADAMS de la plataforma de 2 GDL y Esquema en ADAMS-Simulink del control SMC.	52
3-3. Respuesta de tiempo ante referencia escalón del control SMC.	53
3-4. Diagrama de bloques en Simulink de la ley de control FSMC.	54
3-5. Funciones de pertenencia para las variables de entrada y salida.	55
3-6. Simulación en ADAMS ante entrada escalón como referencia con FSMC.	56
3-7. Simulación en ADAMS ante entrada sinusoidal como referencia con FSMC.(Fase de adelanto igual a 3 rad)	57
3-8. Simulación en ADAMS ante entrada sinusoidal como referencia con FSMC.(Fase de adelanto igual a 5 rad)	57
3-9. Respuesta real del sistema ante entrada escalón como referencia con FSMC. . .	58
3-10. Respuesta real del sistema ante un tren de pulsos como referencia con FSMC. .	59
3-11. Respuesta del sistema ante entrada sinusoidal como referencia con FSMC (Fase de adelanto igual a 3 rad).	60
3-12. Respuesta del sistema ante entrada sinusoidal como referencia con FSMC (Fase de adelanto igual a 5 rad).	60

A-1. Función de pertenencia tipo triangular.	74
A-2. Función de pertenencia tipo trapezoidal.	74
A-3. Función de pertenencia tipo gaussiana.	75
B-1. Errores de posición.	76
B-2. Errores de trayectoria.	77

INTRODUCCIÓN

El continuo y acelerado avance de la ciencia y la tecnología en los últimos años, ha permitido el perfeccionamiento de ciencias aplicadas, como la robótica, de una manera rápida e intensa. Los aportes de una informática en inagotable desarrollo, las bases teóricas brindadas por la Teoría de Control Moderna, junto a los novedosos impulsos de la inteligencia artificial, permiten prever la disponibilidad, en pocos años, de robots dotados de una gran flexibilidad y capacidad de adaptación al entorno, que invadirán una gran cantidad de sectores productivos de forma imparable.

De acuerdo a la estructura cinemática del mecanismo los robots se dividen en tres grandes categorías: robots seriales, paralelos e híbridos.

Se dice que un robot es serie si su cadena cinemática es abierta; es decir, sus elementos se encuentran conectados uno a uno. Un robot paralelo, por su parte, posee una estructura mecánica formada por un mecanismo de cadena cinemática cerrada, en el que el efector final se une a la base por al menos dos cadenas cinemáticas independientes. Si aparecen ambos tipos de cadenas cinemáticas en un mismo robot se dice que éste es de estructura híbrida ([Merlet, 2006](#)).

El interés hacia la investigación y desarrollo de robots paralelos ha crecido vertiginosamente dentro de la comunidad científica internacional. Entre las principales ventajas de estos robots se tiene, la alta exactitud de posicionamiento, debido a que el error de las articulaciones no es acumulativo, mayor rigidez en su estructura mecánica, así como alta relación peso-carga y gran velocidad de movimiento ([Sebastian, 2007](#); [Ramdani, 2008](#); [Pierrot, 2009](#)).

Sin embargo, su estudio implica diversos desafíos, como limitaciones en el espacio de trabajo, la existencia de varios tipos de singularidades, mayor complejidad en los procedimientos de modelado y simulación, así como aspectos relativos al sistema sensorial (Staicu, 2009; Narayanan, 2010).

En los robots paralelos la utilización de cilindros neumáticos de desplazamiento lineal como elemento actuador se ha hecho frecuente. En los últimos años estos elementos se han aplicado satisfactoriamente en el posicionamiento continuo de robots paralelos, plataformas de simulación, sistemas de carga/descarga y otros. De esta manera han demostrado ser la solución más económica para plataformas de simuladores y juegos (Aracil, 2006); debido a que estos sistemas tienen grandes ventajas como la limpieza, altas razones de carga contra peso y carga contra volumen, desarrollan altas velocidades y grandes fuerzas, permitiendo el desarrollo de manipuladores compactos, ligeros y rentables que podrían ser utilizados en una gran variedad de aplicaciones (Pearce and Michael, 2005; Hahn, 2005).

Sin embargo, el control preciso y rápido de sistemas neumáticos se dificulta debido al alto orden del actuador y su dinámica variante en el tiempo, producto de la compresibilidad del aire, disturbios externos tales como fricciones estáticas y de Coulomb, variaciones de la carga útil y variaciones de la fuente de presión (Aracil, 2006; Rubio, 2009a). La presencia de estas no linealidades confiere al problema del control de movimiento de los simuladores vital importancia por la complejidad que implican los algoritmos (Brun, 2000; Krejnin, 2006) necesitando soluciones particulares de implementación.

El tema del control de posicionamiento de los actuadores neumáticos utilizados en las plataformas es objeto de estudio de numerosos científicos e investigadores donde son varias las propuestas de algoritmos así como los resultados obtenidos. Puesto que la dinámica de estos actuadores es altamente no lineal y variante en el tiempo el uso de los controles lineales clásicos como el PID, de fácil implementación y conocida simplicidad no es recomendable, debiendo aplicarse algún método de control robusto (Krejnin, 2006).

Uno de los algoritmos de control, caracterizado por su robustez independientemente del modelo matemático de la planta, es el Control por Modo Deslizante (SMC), el cual además ha sido muy estudiado en los últimos tiempos. Los sistemas con modo deslizante tienen la capacidad de ser una herramienta eficiente para el control complejo de alto orden de plantas dinámicas no lineales que operan bajo condiciones inciertas ([Bartoszewicz, 2009](#); [Krejinin, 2006](#)).

La estrategia sin embargo, presenta un problema fundamental que puede conllevar al deterioro de los sistemas electro-mecánicos, este es el fenómeno del chattering, que ha impedido a lo largo de tiempo implementar estrategias deslizantes en sistemas físicos reales. Muchos autores han propuesto alternativas de solución al problema, entre ellas la combinación con técnicas inteligentes que permitan atenuar dicho fenómeno. En la literatura es reportado el uso de técnicas borrosas en los algoritmos de control en modo deslizante mostrando alentadores resultados ([Bartoszewicz, 2009](#)).

El campo de la robótica paralela es casi exclusivo de países desarrollados, no obstante, en Cuba se cuenta con el Centro de Investigación y Desarrollo de Simuladores (SIMPRO) que diseña y fabrica simuladores industriales de movimiento. Dicha institución en colaboración con el Grupo de Automática, Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, ha venido desarrollando en los últimos años investigaciones conjuntas en robots paralelos accionados por cilindros neumáticos, para su empleo como simuladores industriales de movimiento, con resultados investigativos y de aplicación industrial ([Izaguirre, 2011](#); [Rubio, 2007a](#)).

Este trabajo toma como base, un simulador de movimiento de dos grados de libertad (2-GDL) desarrollado por la empresa SIMPRO, el cual es accionado por cilindros neumáticos de doble efecto. La posición del elemento terminal es la salida más importante del sistema. A pesar de contar con estrategias de control articular probadas y validadas experimentalmente, estas requieren como base la existencia de un modelo preciso que tenga en cuenta las complejidades dinámicas del sistema.

El uso de técnicas más robustas, que puedan resultar poco exigentes ante incertidumbres en los parámetros del modelo o prescindir totalmente de este, puede mejorar esta problemática. En el departamento de Automática y Sistemas Computacionales de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas se han realizado trabajos que involucran el control en modo deslizante (Prieto, 2013), pero la aplicación de técnicas de control borroso ha sido poco abordada.

El **problema científico** se enfoca entonces en la necesidad de ampliar y desarrollar algoritmos de control en modo deslizante basado en lógica borrosa robustos ante incertidumbres en el modelo y que permitan además atenuar el fenómeno de chattering y eliminar el efecto de las no linealidades inherentes a los sistemas neumáticos. Dentro de este contexto, se pretende con el trabajo de investigación, cumplir los siguientes objetivos:

Objetivo general: Implementar un sistema de control de posición en modo deslizante para actuadores neumáticos incorporando lógica borrosa con propósito de atenuar el chattering y las no linealidades de la planta.

Objetivos específicos:

- Analizar las estrategias, características generales y resultados obtenidos en relación al proceso de control de actuadores neumáticos en la bibliografía especializada.
- Establecer los fundamentos teóricos y pasos a seguir para el diseño de estrategias de control en modo deslizante, lógica borrosa y la combinación de ambos métodos.
- Plantear el esquema de control en modo deslizante basado en lógica borrosa aplicado al posicionamiento continuo de los actuadores neumáticos del robot paralelo de dos grados de libertad, capaz de cumplir con las especificaciones de diseño establecidas.
- Evaluar mediante simulación y experimentos reales el desempeño del algoritmo de control.

Organización del Informe: La investigación incluye tres capítulos, además de la introducción, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos correspondientes. Los temas que se abordan en cada capítulo se encuentran estructurados de la forma siguiente:

CAPÍTULO I: En el primer capítulo se realiza el análisis crítico de la literatura especializada consultada. Se ofrece una panorámica sobre las principales características de los robots paralelos, aplicaciones, así como los elementos actuadores empleados en su construcción. Se presenta un estudio comparativo sobre las principales metodologías aplicadas al control de sistemas neumáticos.

CAPÍTULO II: El segundo capítulo describe las características principales de la plataforma de 2-GDL. Se establecen los pasos para el diseño e implementación del algoritmo de control en modo deslizante y se presentan además las limitaciones que impiden su aplicación en sistemas físicos reales. Se detallan además los pasos metodológicos para el diseño del controlador de lógica borrosa. Finalmente se aborda el control en modo deslizante basado en lógica borrosa (FSMC) hasta llegar al diagrama de bloques propuesto.

CAPÍTULO III: Este capítulo está dedicado a sintetizar el control FSMC planteado. Se evalúan y analizan los resultados obtenidos mediante simulación y posteriormente se validan experimentalmente. Finalmente se presenta el análisis económico de la investigación.

CAPÍTULO 1

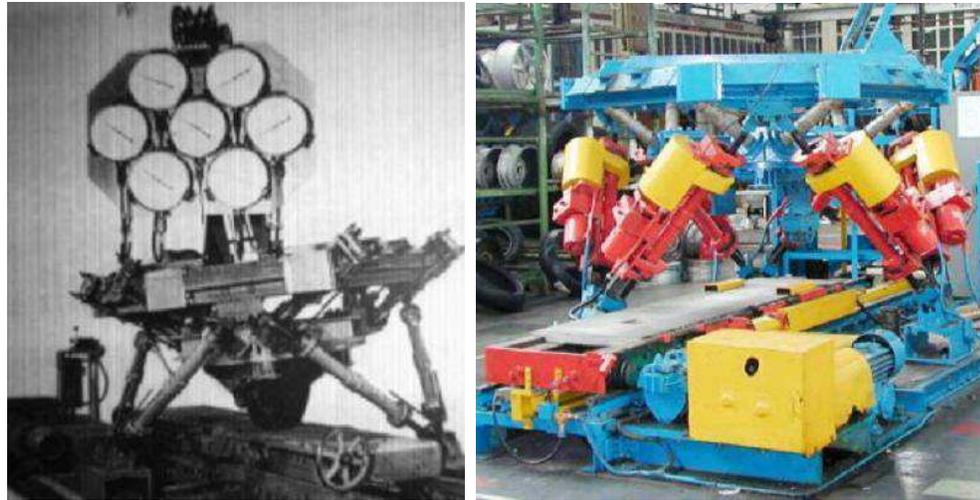
ROBÓTICA PARALELA Y ALGORITMOS DE CONTROL.

Los robots paralelos, también denominados máquinas cinemáticas paralelas o manipuladores paralelos ([Merlet, 2006](#)), se definen como aquellos cuya estructura mecánica que une la base fija con el elemento terminal está compuesta por múltiples e independientes cadenas cinemáticas cerradas donde al menos una es actuada. Poseen mayor fortaleza estructural gracias a que el elemento terminal es soportado en varios puntos, además las propias extremidades del robot permiten desempeñar simultáneamente la función de sostén estructural y de actuadores.

Eventualmente, el área de los simuladores de movimiento se consagró cuna para la investigación y desarrollo de los robots paralelos. Se registra que en el año 1931 J. E. Gwinnett patenta una de las primeras invenciones reconocidas de arquitecturas de esta índole. Se describe como una plataforma, denominada *Amusement Device*, sobre la cual estaban colocados los asientos de un teatro con el propósito de introducir un movimiento que ofreciese una apariencia más real del espectáculo. Según la información existente, la plataforma nunca llegó a construirse ([Zabalza, 2007](#)).

En 1947 Eric Gough, aplicando los principios básicos de los mecanismos de cadena cinemática cerrada, diseñó un robot paralelo con seis actuadores lineales formando una estructura de octaedro hexápodo con lados de longitud variable ([Merlet, 2006](#); [Aracil, 2006](#)). Esta plataforma móvil de seis grados de libertad fue adoptada para la revisión del comportamiento de neumáticos de aviación de la casa Dunlop bajo cargas aplicadas a diferentes ejes, intentando simular el aterrizaje de un avión, (Máquina Universal de Prueba

de Neumáticos). Se presentó en el Congreso de la Federación Internacional de Sociedades de Ingenieros y Técnicos del Automóvil (FISITA) en 1962 (Gough, 1962). La configuración mecánica de la plataforma de Gough permite la construcción de arquitecturas más rígidas utilizando cadenas cinemáticas idénticas. Lo cual implica poder manejar grandes cargas con elevada precisión además de reducciones en el costo y fácil mantenimiento. La figura 1-1 muestra diferentes modelos de esta construcción.



(a) Plataforma de Gough presentado en 1947

(b) Plataforma de Gough moderna

Figura 1-1: Plataformas de Gough

Actualmente, este ingenioso diseño establece el punto de partida para la construcción de múltiples prototipos de plataformas, entre ellas las populares Mesas de Simulación Multiejes (MAST: Multi-Axis Simulation Table) muy explotadas para la simulación de conducción de todo tipo de vehículos, mostrados en la figura 1-2.

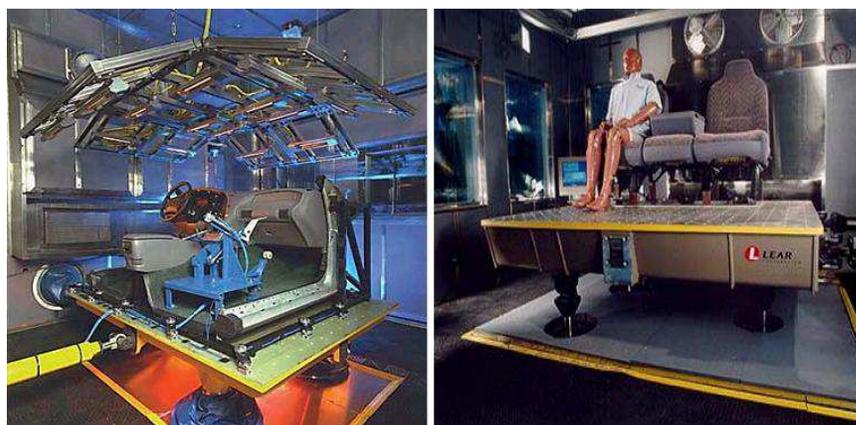


Figura 1-2: Varios tipos de Mesas multiejes para la simulación de vehículos

Posteriormente, D. Stewart presentó un artículo en el que describía una plataforma de movimiento de 6 grados de libertad destinada a operar como simulador de vuelo. Esta reproducía el patrón de extremidades ortogonales de la plataforma de Gough, en la cual la base y el elemento terminal estaban unidos por cadenas cinemáticas cerradas. El artículo de Stewart alcanzó gran influencia en el mundo académico, calificándose como uno de los primeros trabajos de análisis académico de plataformas paralelas ([Aracil, 2006](#); [Merlet, 2006](#)).

Así, en 1967 Klaus L. Cappel desarrolla un simulador de movimiento según la configuración Gough-Stewart, que fue empleado como simulador de helicópteros ([Cappel, 1967](#)). Desde entonces, los simuladores de movimiento constituyen el campo donde mayores créditos ha ganado la aplicación de robots paralelos ([Ahmad, 2006](#); [Lombaerts, 2011](#); [Changfeng, 2007](#)). En este sentido se destacan además novedosos simuladores de vuelo para el entrenamiento de pilotos, entre ellos, los simuladores de vuelo de la NASA ([Slob, 2008](#)), el simulador NADS de la Universidad de Iowa ([Ahmad, 2006](#)), y el TACOM con capacidad de carga de hasta 27 toneladas y alcanza aceleraciones verticales de magnitudes entre cuatro y seis veces la aceleración de la gravedad ([Reid, 1992](#)).

Por otra parte, en 1979 McCallion y Pham fueron los primeros que propusieron usar la plataforma de Stewart como un mecanismo paralelo para una célula de ensamblaje robotizada, básicamente porque la posición del efector final es mucho menos sensible a los errores que los sensores articulares que caracterizan a los robots serie ([Yañez, 2007](#)).

En la década del '80 Raymond Clavel ([Clavel, 1988](#)) presenta sus estudios sobre el robot paralelo Delta, mostrado en la figura 1-3. La idea básica detrás del diseño del robot Delta es el uso de paralelogramos. Estos robots se usan en operaciones rápidas como recoger y poner objetos ligeros (desde 10 *g* hasta 1 *kg*) a lo largo de trayectorias de alrededor de 200*mm* de longitud. Actualmente, se construyen algunos prototipos de robots Delta capaces de mover objetos pesados.

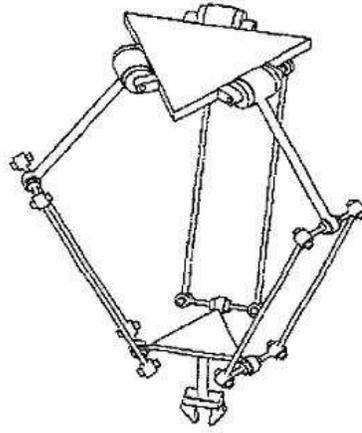


Figura 1-3: Configuración del robot Delta presentado por Clavel.

1.1. Características de los robots paralelos

La expresión *robot paralelo* identifica y diferencia a los robots de cadena cinemática cerrada de los robots de cadena cinemática abierta (robots serie), representado en la figura 1-4. Ambas arquitecturas difieren en numerosos aspectos los cuales, en esencia, definen sus principales características, tabla 1-1. El término *paralelo* se introduce en el sentido topológico más que por carácter puramente geométrico, ya que los actuadores accionan en conjunto o de manera paralela, sin embargo nada tiene que ver con la existencia de elementos alineados paralelamente (Wobbe, 2008).



Figura 1-4: Robot serie y paralelo.

La topología o arquitectura de un mecanismo paralelo define las articulaciones, conexiones, acoplamientos y actuadores que están dispuestos para lograr un determinado movimiento. En la literatura constan múltiples configuraciones estructurales para los robots

Tabla 1–1: Diferencias principales entre los robots series y paralelos

Descripción	Robot Serie	Robot Paralelo
Modelado Dinámico	Laborioso, complejo	Muy laborioso y complejo
Cadenas Cinemáticas	Abiertas	Cerradas
Espacio de Trabajo	Amplio	Reducido
Error Articular	Acumulativo	Promedio
Relación Peso-Carga	Buena	Excelente
Estructura Mecánica	Simple	Compleja
Cinemática Directa	Fácil, solución única	Difícil, múltiples soluciones
Cinemática Inversa	Difícil, múltiples soluciones	Fácil, solución única
Singularidades	Pierde movilidad	Pierde/gana movilidad
Inercia	Alta	Baja

paralelos. Las combinaciones de número de cadenas cinemáticas, tipo de las mismas, restricciones en el movimiento de las articulaciones, etc., hacen prácticamente irrealizable un análisis generalizado de las estructuras de los robots paralelos. El investigador francés Jean Pierre Merlet ha sido el autor que más ha profundizado sobre dichas configuraciones. En principio, y según el tipo de movimientos que son capaces de realizar se pueden distinguir dos grupos: los robots planares y los espaciales (Merlet, 2006).

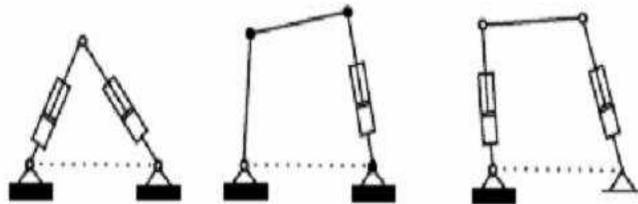


Figura 1–5: Varias configuraciones de robots planares.

Los mecanismos planares se identifican por un movimiento restringido al plano, por lo que pueden tener de 2 a 3 grados de libertad, correspondientes a dos traslaciones en el plano y una rotación sobre un eje perpendicular al mismo.

Por su parte, los robots espaciales se distinguen por su facultad para moverse en todo el espacio tridimensional y no en un plano. Es decir, se pueden trasladar (posición en el espacio) y girar (orientación en el espacio) sobre los tres ejes de coordenadas. Se componen de un efector final conectado con la base por un número de cadenas cinemáticas. El número de cadenas cinemáticas generalmente estipula los grados de libertad del manipulante, usualmente tres grados de libertad son suficientes para muchos usos. Particularmente,

los mecanismos esféricos de tres grados de libertad se pueden utilizar para los robots humanoides. Sin embargo, para analizar la adaptación de estos mecanismos a los elementos de un robot humanoide se debe considerar el estudio del espacio de trabajo y la destreza de estas plataformas (Merlet, 2006).

Los manipuladores que realizan rotaciones alrededor de un centro, son otra de sus variantes comúnmente explotadas. En la figura 1-6 se ilustra un mecanismo con un mástil central, que es acoplado a una plataforma móvil por mediación de una articulación esférica. Esta arquitectura habitualmente se aprovecha en simuladores de vuelo y de conducción.

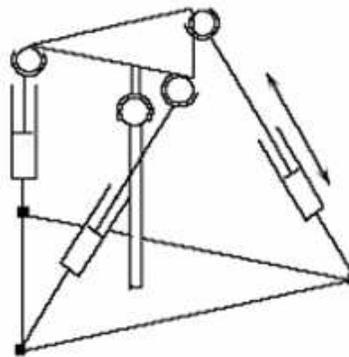


Figura 1-6: Robot espacial con rotaciones alrededor de un centro.

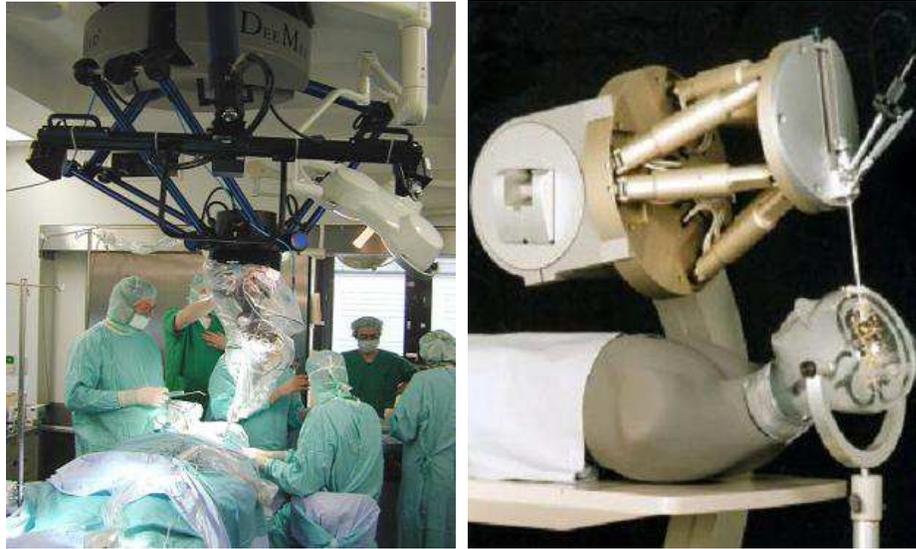
1.1.1. Campo de aplicación

Los simuladores de movimiento por ejemplo, encuentran una aplicación creciente para el entrenamiento y capacitación de personal en la conducción de automóviles, aviones, trenes e incluso naves espaciales (Sabrie, 2004; Chiew, 2008). La intención inicial de estas estructuras fue para la simulación de dispositivos aéreos, sin embargo numerosas compañías han diversificado su construcción y finalidades.

Los simuladores de conducción han incrementado su aceptación a nivel mundial en la medida que han aumentado sus potencialidades para recrear con mayor precisión, exactitud y realismo las condiciones de un mundo virtual.

En el campo de la medicina, particularmente en la cirugía (oftalmología, neurocirugía, etc), mostrado en la figura 1-7, el alto nivel de exactitud conquistado con los robots paralelos en el posicionamiento del elemento final es utilizado para lograr suturas precisas.

De manera creciente en el campo de la rehabilitación médica (Tsoi, 2008), se distingue la plataforma de movimiento *CAREN*, fabricada por la compañía holandesa *Motek Medical BV* (Lees, 2007), así como en el entrenamiento de deportistas figura el simulador de ciclismo KAIST (Kwon, 2001).



(a) Robot Delta (b) Robot Stewart
Figura 1–7: Robots paralelos en aplicaciones médicas

En la industria de componentes electrónicos también se ha potenciado su aplicación debido a la necesidad de una alta precisión en la soldadura por puntos. En el campo de las comunicaciones la ventaja de estas estructuras es patente donde se demande el manejo de pesos que genéricamente comprende desde decenas de kilogramos hasta toneladas, como es el caso de la orientación de radares y grandes antenas.

El sector industrial por su parte utiliza estas estructuras, en máquinas de herramientas, taladros, fresadoras, etc. El robot industrial *Hermes* desarrollado por Fatronik es un ejemplo de robot paralelo para este propósito (Aracil, 2006). Otras de las principales aplicaciones son el desarrollo de herramientas de perforación, rebajado de piezas, soldadura, ensamblaje en la industria de automóviles, etc. Por otra parte, la implementación de robots trepadores evidencia la versatilidad que pueden alcanzar las arquitecturas paralelas.

La esfera del entretenimiento y ocio, deriva otra de las destacadas y recientes aplicaciones de los simuladores de movimiento, que junto al empleo de las técnicas de realidad

virtual, permiten recrear gran variedad de entornos difíciles de lograr en la vida real (Sabrie, 2004; Izaguirre, 2011).

1.2. Tipos de actuadores

Como resultado del incremento en las aplicaciones de robots paralelos, numerosas variantes de dispositivos actuadores han sido desarrolladas con el propósito de adecuarse a los requerimientos técnicos de los diferentes sistemas. De esta manera, los actuadores se encargan de producir las fuerzas y/o torques para mover las estructuras mecánicas del robot según las órdenes dadas por la unidad de control. En la robótica, los más usados son clasificados de acuerdo a los siguientes criterios (Yañez, 2007):

- Según el tipo de movimiento generado se distinguen: los actuadores lineales, que desarrollan fuerza y movimiento de traslación en una misma dirección, y los actuadores de rotación, que desarrollan un par y generan un movimiento de rotación respecto al eje de torque.
- Según la naturaleza de la fuente primaria de energía se dispone de: actuadores neumáticos, que desarrollan su potencia a partir del fluido del aire comprimido; actuadores hidráulicos, cuya potencia se basa en el fluido hidráulico presurizado y, los más modernos, actuadores eléctricos.

Existen dos paradigmas de actuadores neumáticos, los cilindros neumáticos y los motores neumáticos. Los cilindros neumáticos pueden ser de simple efecto o doble efecto, en el primero el émbolo se desplaza en un sentido a causa del empuje de la presión de aire y en el otro sentido mediante la acción de un muelle que lo recupera a su posición de reposo. Para el segundo caso el aire mueve el émbolo en los dos sentidos.

Los actuadores neumáticos de desplazamiento lineal constituyen una tecnología que se ha venido acoplado en los robots paralelos que precisan de un posicionamiento continuo, probando ser una tecnología barata, de respuesta rápida, elevada relación potencia-peso y fácil mantenimiento (Rubio, 2009b). El control de los actuadores neumáticos es un proceso sobradamente complejo en si mismo originado por efectos no lineales tales como la fricción

a bajas velocidades y la compresibilidad del aire. Sin embargo, por las ventajas antes mencionadas, esta tecnología resulta una alternativa favorable, en tal caso se profundiza en el siguiente epígrafe.

Los actuadores hidráulicos de forma análoga a los neumáticos, se manifiestan del tipo cilindro y del tipo motores de aletas y pistones. Permiten el manejo de una fuerza considerable, sus aplicaciones se centran en el manejo de cientos de Newton-metros y la potencia de salida es de algunos Kilowatt ([Krejnin, 2006](#)). Puesto que utilizan fluidos poco compresibles ofrecen una alta frecuencia natural y respuesta rápida, por ende resultan idóneos para aplicaciones que demanden grandes fuerzas y movimientos rápidos. Adicionalmente disponen de buena fiabilidad con bajos niveles de ruido, características mecánicas simples y relativamente seguras durante la operación.

Con todo, es de tener en cuenta para estos sistemas la contaminación que ocurre por el paso del fluido dentro de las superficies del actuador y que el goteo de sustancias como el aceite puede dañar estas superficies. Además es frecuente la aparición de retardos así como cambios en la viscosidad del aceite debido a variaciones en la temperatura. Estas afectaciones en la temperatura favorecen además la formación de burbujas que al combinarse con cambios en la presión del fluido permiten la aparición de la cavitación.

1.2.1. Actuadores neumáticos de desplazamiento lineal

Muchos robots paralelos emplean actuadores neumáticos para generar el movimiento de los elementos de la estructura. La energía neumática que emplea aire comprimido como fuente de potencia posee cualidades excelentes, propias del elemento de base ([Krejnin, 2006](#); [Brun, 2000](#)), entre estas cabe subrayar:

- El aire es abundante y barato
- Se transporta y almacena sin dificultad.
- Es limpio (no provoca contaminación) y carece del peligro de combustión o alteración con la temperatura.

A pesar de estas ventajas, es conveniente señalar que siendo el aire un fluido compresible revela algunas desventajas, como pueden ser los movimientos no uniformes de los pistones cuando se realizan avances lentos con carga aplicada.

El aire es una combinación de varios elementos; esta mezcla gaseosa antes de ser distribuida a los actuadores requiere de determinados procedimientos que se realizan por mediación de compresores y de estaciones de regulación y tratamiento del aire comprimido.

Desde la automatización de bajo costo hasta aplicaciones de alta tecnología, la neumática es siempre adaptable e innovadora y se ha ganado un papel mayor en los sistemas modernos de automatización. El control cinemático de un sistema neumático es una solución alternativa para aplicaciones de posicionamiento industrial, que elimina la complejidad, costo y mantenimiento de motores y grandes suministros de energía asociados con los sistemas de control de movimiento convencionales, especialmente cuando se requiere largo trayecto y alta velocidad ([Izaguirre, 2011](#)).

Como importante elemento motriz, el cilindro neumático es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales para muchos propósitos de automatización gracias a su variedad de ventajas, como: simplicidad, limpieza, bajo costo, alta velocidad, alta razón potencia- peso y fácil mantenimiento. Tradicionalmente son usados para el movimiento entre dos puntos de parada. Sin embargo, nuevos requisitos en la habilidad y capacidad de los sistemas neumáticos están generándose con el advenimiento y expansión de la fabricación automatizada. Una de las tendencias notables es la necesidad del sistema neumático de lograr el seguimiento preciso del control de la posición. Persiguiendo este requisito, muchas investigaciones sobre sistemas neumáticos se han llevado a cabo ([Krejnin, 2006](#)).

El posicionamiento continuo de las cargas, con actuadores lineales electro-neumáticos, ha resultado ser un complejo inconveniente para el control. Esto corresponde esencialmente a que la dinámica de los actuadores lineales electro-neumáticos es altamente no lineal debido a la compresibilidad del aire, el comportamiento no lineal del flujo de aire a través

de las válvulas y la existencia de elevadas fuerzas de fricción estáticas y dinámicas entre el cilindro y el pistón (Rubio, 2009b).

Dado que el aire es compresible, el posicionamiento depende de la carga de trabajo. Por cuanto la precisión en trayectoria continua que podrá lograrse con este tipo de elementos será menor a la ganada por otros tipos de actuadores, salvo que se utilicen sensores de posicionamiento (Rubio, 2007b).

Los cilindros neumáticos de simple efecto tienen una sola conexión de aire comprimido. Solo pueden realizar trabajos en un sentido; el vástago retrocede por el efecto de un muelle incorporado o de una fuerza externa. El resorte incorporado se calcula de manera que haga retornar el émbolo a su posición inicial a una velocidad suficientemente grande. En los cilindros de simple efecto con muelle insertado, la longitud de éste último limita la carrera. Por lo general, con estos cilindros se procura un posicionamiento en los extremos del mismo y no un posicionamiento continuo (Beater, 2007).

En el caso de los cilindros de doble efecto la fuerza ejercida por el aire comprimido en ambas cámaras fuerza al émbolo a realizar un movimiento de traslación en los dos sentidos; se dispone de una fuerza útil en uno u otro sentido. Estos cilindros se aprovechan especialmente en los casos en que el émbolo tiene que ejecutar además alguna función en su movimiento de retorno a la posición inicial. En principio, la carrera de los cilindros no está limitada, pero hay que tener en cuenta el pandeo o deformación que puede experimentar el vástago cuando sale del cuerpo del cilindro. De igual forma, en esta circunstancia se prestan de empaquetadura los labios y émbolos de las membranas (Krejcin, 2006; Beater, 2007).

1.3. Control desacoplado

Pese a que el control de robots paralelos ha sido abordado en numerosas investigaciones, aún persisten considerables dificultades. Estas se originan como resultado de que el mecanismo sea un sistema multi-cuerpo, no lineal, acoplado y con parámetros inerciales variables en el tiempo, esto principalmente debido a variaciones de la carga soportada.

En numerosas aplicaciones no siempre es admisible la suposición de asumir la arquitectura del robot como una serie de eslabones dinámicamente desacoplados. Considerando la presencia de interacciones dinámicas entre los actuadores, se recurre a estrategias para controlar el sistema pese a los efectos indeseables sobre el lazo de tales perturbaciones.

El control desacoplado articular es utilizado con eficacia en robots paralelos fuertemente acoplados de hasta seis grados de libertad, reportándose en la literatura progresos en el desempeño del robot para aplicaciones de control de trayectoria, considerando el modelo dinámico de los actuadores del robot ([Ogbobe, 2010](#); [Yang, 2008](#)).

Los procedimientos de desacople dinámico imponen restricciones a la geometría y limitaciones en la capacidad de carga del robot ([Chen, 2004](#)). De este modo, como vía para eliminar o reducir los efectos indeseables del acople dinámico, se torna preferente contemplar la existencia real de las interacciones dinámicas y así diseñar un controlador asistido por un proceso de análisis de robustez para la aplicación en cuestión.

Para el caso de aplicaciones con actuadores neumáticos, corresponde afrontar las implicaciones de la no linealidad, causante de movimientos no uniformes de los pistones cuando se realizan avances lentos con carga aplicada, y de los efectos indeseables en las cámaras del pistón provocados por la compresibilidad del aire. En este terreno se han desarrollado trabajos anteriores relacionados con identificación, modelado y control desacoplado de actuadores electro-neumáticos, alcanzándose resultados satisfactorios para la plataforma neumática de dos grados de libertad de aplicación industrial ([Rubio, 2009a, 2007b](#)).

1.4. Algoritmos de control en sistemas neumáticos

El diseño de un controlador de posición estable y robusto para un sistema neumático es difícil dado que es una planta con desempeño no lineal debido a los factores antes mencionados. En tal sentido el control de actuadores neumáticos ha despertado un gran interés y motivación por parte de los investigadores, por lo que en los últimos años, diferentes tipos de estrategias y esquemas de control han sido estudiados e implementados para

gobernar estructuras robóticas paralelas. En la literatura científica se reportan numerosos antecedentes de la investigación objetiva de sistemas neumáticos (Krejcin, 2006).

1.4.1. Estrategias de control convencional

El controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) ha sido usado en aplicaciones industriales por más de 70 años, por consiguiente es usualmente la primera opción. Por esta razón, numerosas estrategias de control intentan perfeccionar el desempeño del PID ajustando sus parámetros de sintonía. Las primeras aplicaciones en tecnología neumática pueden ser atribuidas a las investigaciones de Shearer en 1956, y continuadas por Vaughan, Burrows y Webb. Estos trabajos iniciales fueron desarrollados con controladores lineales de ganancia fija, los cuales se diseñaron en base a un modelo de función transferencial obtenida mediante la linealización del sistema alrededor de condiciones específicas de operación. Estos artículos proporcionaron las bases para muchas de las investigaciones y desarrollo posteriores, y establecieron los principios fundamentales para la comprensión y control de sistemas neumáticos (Burrows, 1972).

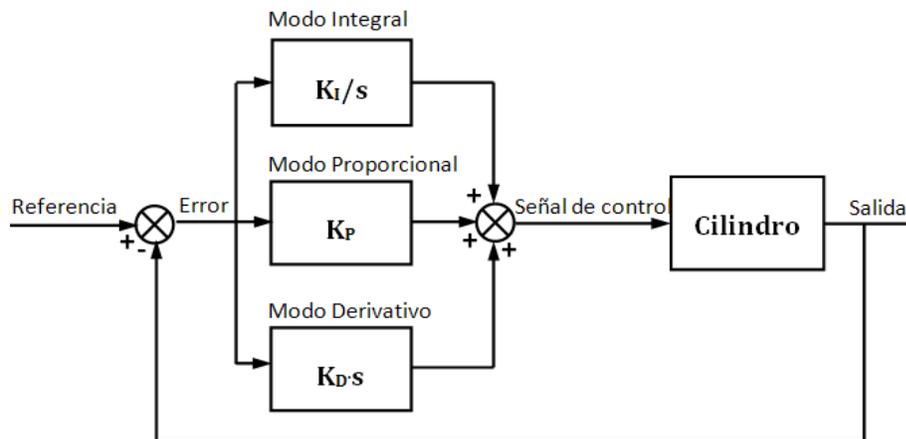


Figura 1-8: Algoritmo PID convencional.

El algoritmo de control PID es el más popular de los controladores feedback usados en la industria. Es un algoritmo de fácil implementación que puede proporcionar un excelente desempeño de control a pesar de las características dinámicas variadas de la planta en cuestión. Es importante notar que el controlador PID de ganancia fija es un método muy efectivo en casos donde el modelo lineal presenta parámetros que no varían durante la operación. Por otro lado, la simplicidad del controlador pone limitaciones sobre

sus capacidades para proceder con problemas de control complejos, como los casos antes mencionados. Es difícil alcanzar el control de posición, velocidad y fuerza satisfactorio de un sistema neumático vía control PID de ganancia fija a causa de las no linealidades inherentes del actuador, tales como stick slip, zonas muertas y fricciones viscosas, estáticas y dinámicas ([Krejcin, 2006](#)).

La literatura aborda que la respuesta de los sistemas neumáticos con algoritmos PID suele ser rápida por lo que resultan ser oscilatorias amortiguadas. Con el objetivo de resolver dicho problema se plantea el uso de un prefiltro a la entrada del sistema, con ello se garantiza una referencia suave. De esta forma, son evitadas oscilaciones en la salida y excesiva amplitud en la señal de mando que pudiera dañar la estructura mecánica del robot. Otros autores hacen uso del mismo brindando buenos resultados experimentales ([Karpenko, 2006](#); [Rubio, 2007a](#)).

El método de control lineal de ganancia fija cuenta con la asunción clave de un rango de operación pequeño para que el modelo lineal sea válido. Estos rangos de operación pueden involucrar la posición del cilindro, la presión del aire y la posición de la válvula. Cuando el rango de operación requerido es grande, el controlador lineal puede presentar un desempeño muy pobre o ser inestable, a causa de la limitación de la tolerancia del controlador lineal para los efectos adversos de las no linealidades.

Consecuentemente, el desempeño de un controlador convencional depende totalmente del conocimiento de los parámetros del sistema. El complejo proceso de posicionamiento neumático tiene comportamientos no lineales y variantes en el tiempo, en consecuencia es difícil deducir e identificar un modelo dinámico apropiado para los controladores tradicionales. Recientemente, un número de investigaciones han sido dedicadas a modificar los algoritmos PID y que puedan ser utilizados en actuadores neumáticos en lazo cerrado ([Kikuuwe, 2006](#); [Van Damme, 2009](#)). Finalmente se ha generalizado la línea de tomar las estrategias convencionales basadas en PID como base para la comparación contra algún otro esquema del control.

1.4.2. Control adaptativo

Si se puede identificar continuamente la función de transferencia de la planta, se pueden compensar las variaciones de la misma, simplemente variando los parámetros ajustables del control y por tanto, obtener un funcionamiento satisfactorio del sistema en forma continua bajo las diversas condiciones externas. Un método adaptativo es muy útil para enfrentar un problema en que la planta está normalmente expuesta a variaciones de sus parámetros de tiempo en tiempo. En lugar de diseñar el mecanismo de sintonía o programación de ganancia del controlador analíticamente y/o experimentalmente fuera de servicio, muchos trabajos se han enfocado en buscar un mecanismo de ajuste del controlador en estado activo, referido como control adaptativo.

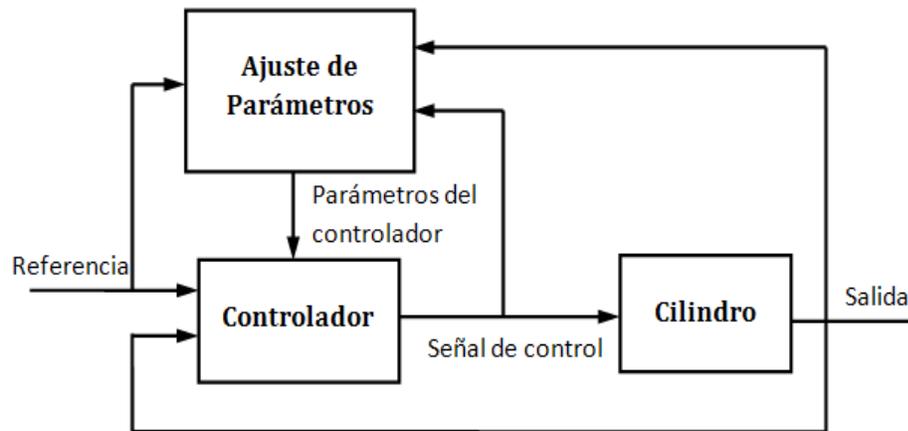


Figura 1-9: Algoritmo genérico de control adaptativo.

Un sistema de control adaptativo es un sistema que continua y automáticamente mide las características dinámicas de la planta (como la función de transferencia), las compara con las características dinámicas deseadas y usa la diferencia para variar parámetros ajustables del sistema (generalmente características del controlador)(Slotine, 1991).

Los sistemas de control adaptativos con ajuste de parámetros del controlador son usualmente empleados para mejorar el desempeño de control del sistema en el caso donde la dinámica cambia durante el funcionamiento. El control adaptativo es entonces la capacidad del sistema de modificar su propio funcionamiento para lograr el mejor modo posible de operación. Una definición general de control adaptativo implica que el sistema debe ser capaz de desempeñar las funciones siguientes:

- Proporcionar información continua sobre el estado presente del sistema o identificar el proceso. (Identificación de las características dinámicas de la planta)
- Comparar el desempeño del sistema presente con el deseado u óptimo y elaborar una decisión correctiva. (Toma de decisión basada en la identificación)
- Iniciar una modificación apropiada para conducir el sistema de control al estado óptimo. (Modificación o acción basada en la decisión tomada)

Estos tres principios (identificación, decisión, y modificación) son inherentes a cualquier sistema adaptativo. En la práctica los métodos más representativos usados para el diseño del control adaptativo son: el control adaptativo por modelo de referencia y el regulador de auto-sintonía.

El control adaptativo por modelo de referencia, mostrado en la figura 1–11 fue originalmente propuesto para resolver un problema en que las especificaciones de desempeño son dadas en términos de un modelo de referencia. Este modelo especifica como la salida del proceso debe responder idealmente a la señal de comando. El controlador adaptativo es entonces diseñado para forzar al sistema o planta a comportarse como un modelo de referencia propuesto. La salida del modelo es comparada con la salida del proceso, y la diferencia es usada para ajustar los parámetros del controlador de lazo cerrado. Una de las grandes ventajas de este método es que provee adaptaciones rápidas para entradas definidas. El principal problema es determinar el mecanismo de ajuste para obtener un sistema estable cuyo error sea cero. Otra desventaja es que presenta problemas para adaptarse a procesos desconocidos o disturbios arbitrarios (Slotine, 1991; Krejtin, 2006).

El esquema adaptativo discutido anteriormente es uno de los denominados métodos directos, en que las reglas de ajuste indican directamente como los parámetros del controlador deben ser actualizados. Un regulador de auto-sintonía asume un modelo lineal para el proceso que esté siendo controlado (usualmente no lineal). Se emplea una ley de control feedback que contiene los coeficientes ajustables y los algoritmos de auto-sintonía que cambian los coeficientes. Típicamente contienen un lazo interno y otro externo. El interno consiste en un lazo ordinario y la planta, actuando sobre la salida de la planta por

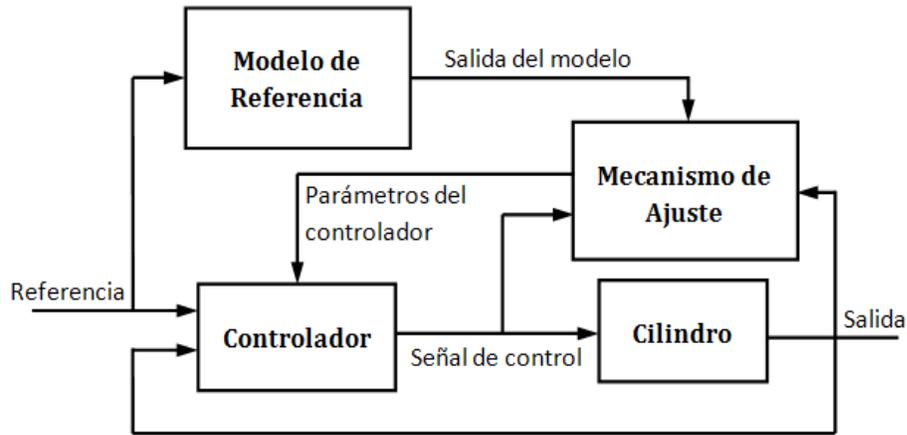


Figura 1–10: Control Adaptativo por Modelo de Referencia(MRAC).

la vía convencional. El lazo externo ajusta los parámetros del controlador del lazo interno, consta de un estimador de parámetros recursivo combinado con un algoritmo de diseño de control. El estimador recursivo monitorea la salida de la planta y estima su dinámica por los valores de los parámetros en el modelo de la misma. Estos parámetros estiman el algoritmo de diseño de la ley de control que envía nuevos coeficientes al controlador convencional en el lazo interno (Slotine, 1991; Krejnin, 2006).

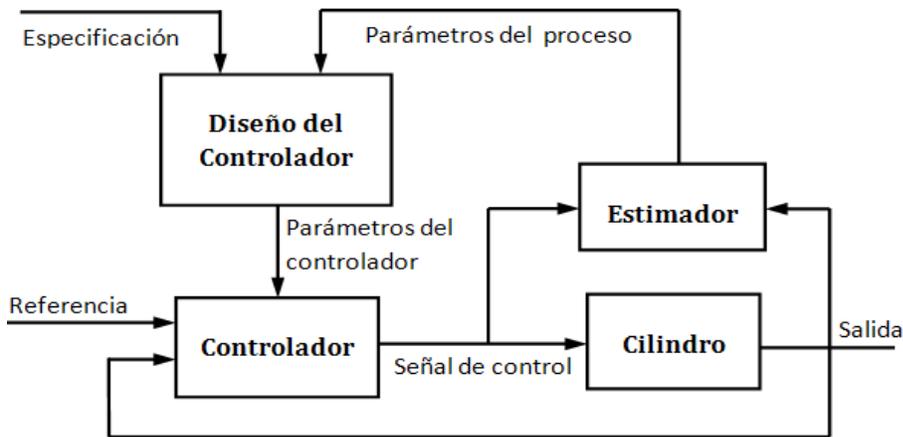


Figura 1–11: Control Adaptativo de auto-sintonía.

En muchos casos la literatura no ofrece una distinción clara entre estos controladores; esto es particularmente apreciable cuando estas técnicas se combinan con los métodos de Inteligencia Artificial.

1.4.3. Sistemas basados en redes neuronales

Las redes neuronales artificiales (RNA) constituyen un área importante de la inteligencia artificial que ha despertado interés en los últimos años. Esto es debido a su capacidad

de resolver problemas cuya solución por otros métodos convencionales resulta difícil. Las redes neuronales son muy usadas en el control de posición para sistemas neumáticos (Krejcin, 2006). La cualidad más sobresaliente de las redes neuronales es que se basan en el sistema de aprendizaje del cerebro humano. En lugar de programar una red, se le presenta una serie de ejemplos, a partir de los cuales esa red aprende las relaciones fundamentales que están implícitas en las bases de datos de entrenamiento. Puesto que estas relaciones pueden ser fuertemente no lineales las redes pueden constituir una herramienta general y potente para modelar la dinámica de plantas complejas. Por ello constituyen un excelente sistema para identificación de modelos entrada-salida y en la compensación de sistemas no lineales.

La ciencia de redes neuronales artificiales está relacionada con la neurona. El modelo mostrado en la figura 1-12 representa un esquema de red neuronal basada en el funcionamiento del cerebro humano. Las entradas $X_0 - X_3$ representan las dendritas. Cada entrada es multiplicada por los pesos $W_0 - W_3$. La salida del modelo de la neurona, Y , se encuentra en función de F que es la sumatoria de las señales de entrada.

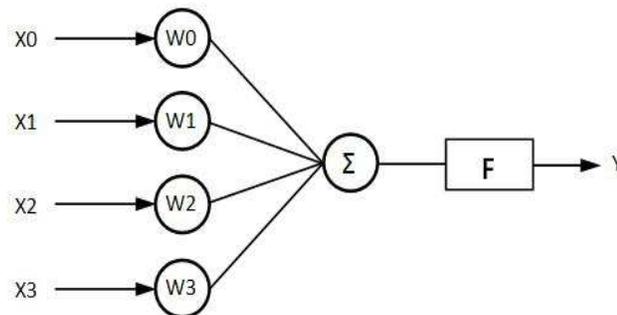


Figura 1-12: Esquema de una red neuronal.

Existen varios tipos de estructuras de RNA, entre las que se destacan las redes simples y las multicapas. El esquema para el modelo de simple capa es el perceptrón. Las entradas al perceptrón son individualmente multiplicadas por los pesos y luego sumadas. Los perceptrones calculan la salida a través de la función de activación F , que introduce una no linealidad en la red. Esto las convierte en un algoritmo muy usado para representar dinámicas altamente no lineales.

En las redes multicapas la dirección de la señal va desde la entrada a la salida. Adicionando capas a la red neuronal este puede lidiar con procesos cuya dinámica es compleja y ser capaz de reproducir de manera fiable cualquier sistema. Pero ello implica que la implementación a nivel computacional del mismo sea extremadamente cara por tanto en ello se trata de llegar a un compromiso.

El método más común para la identificación de sistemas a través de RNA es el llamado back-propagation, figura 1-13. Durante el entrenamiento son tomados los datos de entrada del proceso y aplicados sobre la red neuronal. Ambas salidas (proceso y red) son comparadas y el error es enviado a la red actualizando los pesos de la misma. Sin embargo, a veces, con dicho método no se garantiza la convergencia de la solución y a veces se recurre a otros algoritmos más rápidos y fiables (Norgaard, 2000).

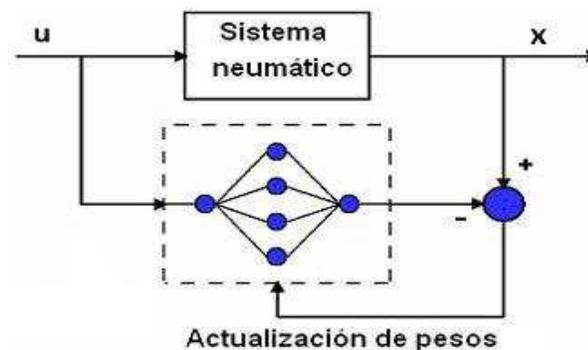


Figura 1-13: Identificación por el método back-propagation.

Muchas aplicaciones de redes neuronales pueden encontrarse en la literatura. Un esquema de control basado en redes neuronales multicapas entrenadas mediante el algoritmo extendido múltiple de Kalman se propuso para el sistema de posicionamiento de un cilindro neumático. Los resultados experimentales mostraron que el método propuesto tenía menos sensibilidad que la red neuronal entrenada por los sencillos algoritmos de descenso de pendiente (Song, 1997).

Uno de los fenómenos que más afecta el desempeño de los sistemas neumáticos es el fenómeno de backlash en las servo-válvulas o zona muerta. Como solución a esta limitante se proponen estrategias que emplean la combinación de dos redes neuronales. La primera RNA es usada como estimador de zona muerta y la segunda como compensador. La primera

red evalúa el desempeño y permite lograr un ajuste sobre la segunda RNA. Esta última actúa sobre el control ([Rastko, 2000](#)).

Intentando lograr un desempeño de control satisfactorio se presenta una técnica de control adaptativo por modelo de referencia con redes neuronales para un sistema electro-neumático ([Tanaka, 1998](#)). Poco después de este trabajo propuso un método de control adaptativo por modelo de referencia con redes neuronales tipo multi-rate para el control de posición de un cilindro neumático. El papel de la red neuronal es realizar la compensación de las no linealidades alcanzado buenos resultados ([Tanaka, 1999](#)).

1.4.4. Control basado en lógica borrosa

En 1965 el Profesor Lotfi Zadeh introdujo la lógica borrosa proponiendo una vía matemática de mirar la vaguedad intrínseca del lenguaje humano, y desde ese momento varias aplicaciones exitosas, principalmente en control, han aparecido en la literatura ([Reznik, 1997](#)).

Basado en que el razonamiento humano habitualmente recurre a variables que son vagas, Zadeh introdujo el concepto de variables lingüísticas. Los valores de estas variables son expresiones que describen una condición, como Alto, Pequeño, Grande, Cero, Pobre, Rico, Muy Largo. Estos valores lingüísticos no son entidades independientes sino un conjunto de elementos que asumen diferentes grados de pertenencia en el conjunto, el cual es denominado conjunto borroso. En conjuntos convencionales un elemento pertenece al conjunto o no; en conjuntos borrosos, un elemento puede pertenecer completamente, parcialmente o no pertenecer al conjunto.

Las técnicas borrosas han sido aplicadas al mundo industrializado (procesos y automatización) brindando un buen desempeño. Los resultados de este uso han demostrado que los sistemas borrosos presentan ventajas en comparación con algoritmos PID. Las ventajas principales de los borrosos son las siguientes ([Sorli, 1999](#)):

- No es necesario construir un modelo matemático detallado.
- Pueden funcionar con un gran número de entradas.

- Pueden ser adaptados fácilmente en sistemas no lineales.
- El conocimiento humano puede ser aplicado fácilmente.

La aplicación de control borroso a un sistema de posicionamiento neumático continuo fue desarrollada por Ferraresi en 1988, resultando particularmente ventajosa en términos de simplicidad de diseño e implementación ([Moreno, 2000](#)).

La esencia del control fuzzy, o borroso, es que las reglas lingüísticas apropiadas están elegidas, basados en usar un cierto procedimiento de toma de decisión, de una tabla de reglas construida basado en la experiencia y bases de datos del control humano. Las reglas borrosas son establecidas por ensayo y error con el concepto de simetría.

Estas características hacen de la lógica borrosa una herramienta útil para enfrentar complejos problemas de control, donde las estrategias convencionales no trabajan muy bien, o simplemente fallan.

1.4.5. Control basado en modo deslizante

Unas de las estrategias recomendadas para el control continuo de sistemas neumáticos es el control en modo deslizante por su robustez y el comportamiento ante fenómenos altamente no lineales. Consiste en forzar al estado del sistema a un comportamiento deseado, en este caso llevar la dinámica del sistema a una superficie deslizante. El Control en Modo Deslizante fue desarrollado originalmente por Utkin en 1977 para el control de manipuladores robóticos ([Utkin, 1999](#); [Krejnín, 2006](#)).

A principios de la década del '80 los sistemas SMC fueron usados casi exclusivamente para controlar sistemas electro-mecánicos simples, como motores eléctricos. Estos trabajos fueron seguidos y usados exitosamente en un largo número de investigaciones en robótica ([Sira-Ramirez, 1987](#)), en sistemas de control de vuelo y electrónica de potencia. Los SMC han mostrado robustez ante disturbios e incertidumbres en el modelo, así como simplicidad en el diseño ([Van Damme, 2009](#)).

A pesar de las predicciones teóricas de extraordinario desempeño del sistema de lazo cerrado del modo deslizante, algunos trabajos experimentales indicaron limitaciones en la

práctica, debido a la aparición de conmutaciones a alta frecuencia en la acción de mando, referido como *chattering* (Kikuuwe, 2006; Fridman, 2002; Laghrouche, 2006).

En la mayoría de los trabajos experimentales que involucraron el modo deslizante, el esfuerzo consumido en comprender las bases teóricas de control fue generalmente minimizado, mientras un gran coste de energía fue destinada en técnicas empíricas para atenuar el *chattering* (Bartoszewicz, 2009). La implementación de lógica borrosa en modo deslizante a permitido atenuar la influencia del mismo (Abid, 2008; Babar, 2010).

La combinación del control en modo deslizante y la lógica borrosa no es nueva, en la literatura existen muchas referencias de esta metodología . Estas investigaciones se han enfocado en dos aspectos, unos han ensayado el uso de las reglas fuzzy para sintonizar SMC, otros el uso de reglas fuzzy para diseñar la superficie deslizante. En dichos trabajos, los resultados de simulación y la comparación de estos con los resultados de control en modo deslizante muestran las ventajas de aplicar la lógica borrosa en los métodos del control; entre ellas, el efecto del *chattering* fue minimizado a un grado insignificante (Abid, 2008, 2009; Dehghani, 2007).

1.5. Consideraciones finales del capítulo

Presentado el marco teórico y luego de un análisis crítico de la bibliografía consultada, se arriban a las siguientes conclusiones:

- A pesar de las ventajas de los robots paralelos gobernados por cilindros neumáticos, las características no lineales de dichos actuadores hacen necesario diseñar una estrategia de control robusta.
- Como resultado de la revisión bibliográfica realizada se pudo comprobar que las estrategias de control no convencionales más frecuentemente utilizadas en actuadores neumáticos son: Control Adaptativo, Control Inteligente (Redes Neuronales y Lógica Borrosa) y Control Deslizante.

- El control deslizante posibilita tratar de manera adecuada las no linealidades presentes en los actuadores. Sin embargo la presencia de conmutaciones de alta frecuencia en la señal de mando limitan su aplicación a sistemas neumáticos.
- Se han desarrollado numerosas alternativas que permitan la atenuación de este fenómeno a través de la combinación con otras técnicas. La estrategia de control en modo deslizante basada en lógica borrosa se presenta como una alternativa que ha sido exitosamente reportada en la literatura.
- Por todo lo anterior, en esta investigación se diseña un Controlador en Modo Deslizante basado en Lógica Borrosa para la plataforma SIMPRO.

CAPÍTULO 2

CONTROL EN MODO DESLIZANTE Y LÓGICA BORROSA PARA PLATAFORMA NEUMÁTICA DE 2 GRADOS DE LIBERTAD

En este capítulo se establecen los parámetros técnicos que definen la plataforma SIMPRO de 2 grados de libertad conformada por cilindros neumáticos. Se hace una descripción del sistema neumático permitiendo un acercamiento hacia los problemas a tratar. Se presenta la metodología para el diseño de un controlador en modo deslizante. Las ecuaciones dinámicas que definen la estructura del control en modo deslizante que están determinadas por las no linealidades y las incertidumbres del sistema. Es descrita la metodología de los sistemas borrosos y con ello las diferentes alternativas de implementación de control en modo deslizante basado en lógica borrosa.

2.1. Plataforma de 2 grados de libertad(2-GDL)

El simulador de conducción de sello SIMPRO producido por CIDSIM es un robot paralelo de dos grados de libertad, ladeo y cabeceo, que permite por igual la simulación del comportamiento de vehículos ligeros o pesados. La cabina de conducción cuenta con mandos reales que simulan el comportamiento del vehículo al ser maniobrado por el conductor y un monitor que recrea el escenario virtual con que interacciona. Cada articulación está formada por un cilindro FESTO DNC B-100-320-PPV-A gobernado por una válvula proporcional de flujo FESTO MPYE-5-3/8-010-B.

Esta plataforma presenta una estructura mecánica compuesta por cinco uniones esféricas y dos articulaciones prismáticas actuadas por pistones neumáticos de doble efecto. La

cabina pivotea sobre una columna central mediante una articulación pasiva en cuyo extremo superior se encuentra una unión universal.

Los movimientos de la plataforma móvil se logran mediante la acción de los cilindros neumáticos, cuyos desplazamientos lineales le imprimen al efector final rotaciones sobre dos ejes perpendiculares entre sí. Estas rotaciones simulan las pendientes del mundo virtual las cuales son visualizadas en el monitor ubicado en la propia cabina.

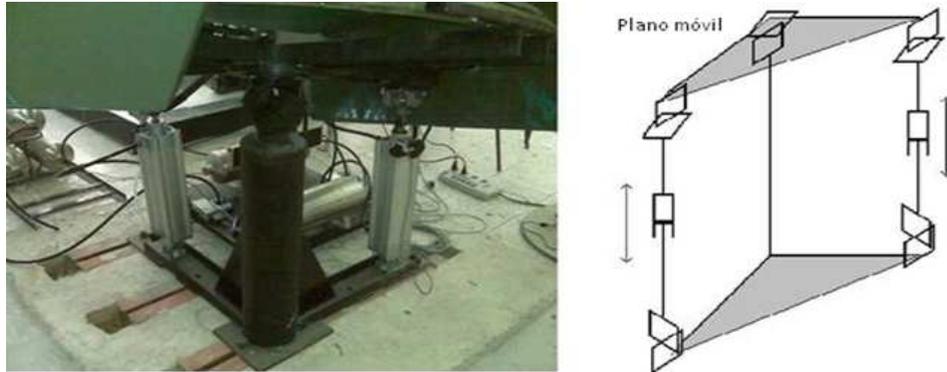


Figura 2-1: Plataforma de 2 GDL y su arquitectura geométrica

En ambos extremos de las articulaciones prismáticas se encuentran uniones esféricas que le brindan la movilidad necesaria para lograr las orientaciones de la plataforma móvil superior, representado en la figura 2-1. La acción de cada uno de los actuadores tiene efecto sobre una sola articulación lo que permite que esta se comporte de forma desacoplada.

Tabla 2-1: Datos mecánicos del simulador de conducción SIMPRO

Descripción	Parámetros
Masa de la cabina	300 kg
Ángulo de ladeo	$\pm 13^\circ$
Ángulo de Cabeceo	$\pm 13^\circ$
Elongación del pistón	320 mm
Diámetro del cilindro	100 mm

2.1.1. Modelo dinámico del actuador neumático

Se utilizan pistones neumáticos de doble efecto debido a que la fuerza ejercida por el aire comprimido empuja al vástago para realizar un movimiento de traslación en los dos sentidos, disponiéndose de una fuerza útil tanto en la ida como en el retorno del vástago; la elección se justifica debido a que los actuadores de la plataforma se mueven

de manera controlada en ambas direcciones. El modelo no lineal del actuador se divide en tres sub-sistemas para su análisis:

1. Modelo de la válvula: Contempla la dinámica del flujo de aire a través de la válvula en función de la acción de control y las presiones en sus extremos.
2. Modelo del actuador: Contempla la dinámica de las presiones en las cámaras del cilindro en función del flujo de aire y los volúmenes de las cámaras del cilindro, así como sus variaciones. Estos dos últimos parámetros quedan definidos por la posición y velocidad del émbolo (y, por tanto, de la carga) si se conoce el área de sus dos caras.
3. Modelo de la carga: Contempla la dinámica del movimiento de la carga en función de las presiones aplicadas a cada lado del émbolo y las fuerzas externas y de fricción que estén presentes en la estructura mecánica

El aire es suministrado a una presión P_s que penetra a través de unos orificios de áreas A_{e1} y A_{e2} y sale a la atmósfera a través de una presión P_a . Además el aire penetra a las cámaras del cilindro a través de unos orificios que se consideran de salidas para la válvula. Estos son denominados A_{s1} y A_{s2} . Las presiones con que los flujos de aire entran al cilindro P_1 y P_2 según la acción sobre el carrito actúan sobre las caras del émbolo perteneciente al cilindro y la fuerza resultante mueve al vástago del actuador a determinada posición. En la figura 2-2 se representa un gráfico donde están presentes las principales variables que definen al modelo matemático del actuador.

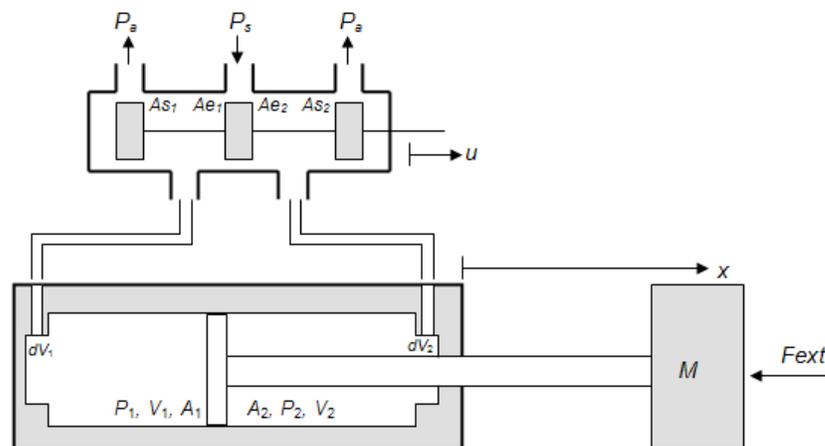


Figura 2-2: Esquema de un sistema neumático.

Con el objetivo de implementar un control en modo deslizante para un sistema neumático se parte de una estimación lineal de la dinámica de la planta. En este caso, el modelo analítico del actuador lineal neumático, considera el dimensionamiento de la válvula y las constantes de tiempo del cilindro, de modo que describe con mayor exactitud la dinámica real del sistema (Burrows, 1972), definiéndose el modelo por la expresión:

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{\frac{A_1 G_1 / C_1}{\tau_1 s + 1} + \frac{A_2 G_2 / C_2}{\tau_2 s + 1}}{s \left(M s + F_v + \frac{A_1 K_{1x} / C_1}{\tau_1 s + 1} + \frac{A_2 K_{2x} / C_2}{\tau_2 s + 1} \right)} \quad (2.1)$$

Donde las constantes de tiempo se calculan como: $\tau_1 = \frac{K_{1p}}{C_1}$; $\tau_2 = \frac{K_{2p}}{C_2}$

P_1, P_2 : Presiones aplicadas en las cámaras de los cilindros (Pa)

A_1, A_2 : Área del pistón en cada cámara (m^2)

M : Masa (kg)

F_v : Fricción viscosa (N s/m)

X : Posición del vástago (m)

Las constantes G_1, G_2 en ($kg/s m^2$) y C_1, C_2 en ($kg/s Pa$) se obtienen de las derivadas parciales de las ecuaciones que consideran el flujo másico de aire a través de la válvula proporcional de flujo: $q_m = f(x, P_{ent}, P_{sal})$. Por su parte, las constantes K_{1p}, K_{2p} en (kg/Pa) y K_{1x}, K_{2x} en (kg/m) son obtenidas mediante diferenciación de la ecuación de estado de los gases ideales respecto a la presión y el volumen de aire, dependientes de la posición del pistón (Rubio, 2007b; Izaguirre, 2011).

Es común en la literatura obtener una familia de modelos en función de la posición (Karpenko, 2006). En tal sentido, se identifica dinámicamente el sistema válvula-pistón de cada extremidad activa del robot, para lo cual se emplea el diagrama mostrado en la figura 2-3.

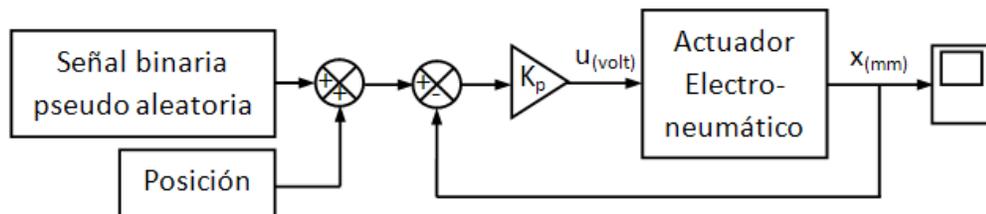


Figura 2-3: Diagrama de bloques para la identificación dinámica del sistema neumático

El modelo obtenido de acuerdo al planteamiento anterior es de tercer orden tipo 1 (Valdivia, 2012) por lo que para los pistones la relación transferencial obtenida se muestra en la ecuación 2.2:

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{4744}{s(s^2 + 1,66s + 55,38)} \quad (2.2)$$

La función transferencial representado de un modo general es:

$$\frac{X}{U} = \frac{Kw_n^2}{s(s^2 + 2\varphi w_n s + w_n^2)} \quad (2.3)$$

Se puede aplicar una transformación equivalente:

$$\frac{X}{U} = \frac{b_0}{s(s^2 + a_1 s + a_0)} \quad (2.4)$$

Donde:

$$b_0 = Kw_n^2 = 4744$$

$$a_0 = w_n^2 = 55,38$$

$$a_1 = 2\varphi w_n = 1,66$$

La representación en el espacio-estado es:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -a_0 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_0 \end{bmatrix} u \quad (2.5)$$

Se asume que:

$$f(x, t) = -a_1 x_3 - a_0 x_2$$

$$b(x, t) = b_0$$

2.2. Control en Modo Deslizante

El comportamiento no lineal de los sistemas mecánicos puede introducir efectos negativos en la operación de la planta. El Control en Modo Deslizante (SMC) se caracteriza por su robustez frente a tales efectos. Este apartado muestra los criterios y fundamentos más importantes de dicha estrategia.

El control por modo deslizante se basa en la teoría de los controladores de estructura variable, en la cual el controlador está compuesto por distintos subcontroladores y un esquema lógico de conmutación entre ellos ([Rubio, 2007a](#)). El propósito de la ley de control en modo deslizante radica en conducir un sistema no lineal a un estado deseado dentro de una superficie específica representada en el plano-fase y mantener el estado de la planta en esa superficie por todo el tiempo subsiguiente, la cual es denominada superficie deslizante.

De ahí se desprende el concepto de control de estructura variable (VSC), ya que el sistema es gobernado mediante la conmutación. En otras palabras, si el sistema se encuentra encima o debajo de la superficie deslizante el algoritmo de control conmuta con el objetivo de mantener a la dinámica del sistema en la vecindad de dicha superficie.

Cuando el estado del sistema está sobre la superficie, el esquema de control tiene una ganancia determinada y en caso contrario la ganancia tendrá un valor diferente. Idealmente, una vez interceptada la superficie, el control en modo deslizante mantiene el estado de la planta sobre la misma para todo el tiempo subsiguiente. Por tanto los esfuerzos deben centrarse en diseñar un control en modo deslizante que conduzca a la planta a la superficie deslizante y la mantenga sobre la misma.

El diseño de un Controlador Deslizante consta de tres etapas fundamentales. Primero se define la superficie deslizante, la segunda etapa consiste en el diseño de la ley de control para sostener la trayectoria del sistema en la superficie deslizante y el tercer paso y más importante es la implementación libre de chattering ([Bartoszewicz, 2009](#)).

En esta sección se desarrolla el control en modo deslizante para el sistema de tercer orden descrito por las ecuaciones siguientes:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2.6)$$

$$\dot{x}_2 = x_3 \quad (2.7)$$

$$\dot{x}_3 = f(x, t) + b(x, t)u(t) + d(t) \quad (2.8)$$

Donde x_1, x_2, x_3 son variables de estado del sistema y $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t)]^T$ es el vector de estado, $u(t)$ es la entrada de control. Por su parte $f(x, t)$ y $b(x, t)$ son generalmente funciones dependientes del estado y del tiempo. La función $f(x, t)$ agrupa los términos no lineales y que son complejos de modelar y $b(x, t)$ está integrada por parámetros del modelo del sistema que son poco conocidos. El término $d(t)$ agrupa las perturbaciones que afectan al sistema (Babar, 2010).

El problema de control consiste en que el estado del sistema (x) siga un estado específico y variable en el tiempo ($x_d(t)$) independientemente de las imprecisiones y no linealidades del modelo ($b(x, t)$, $f(x, t)$).

La ecuación 2.9 define matemáticamente la estructura de la superficie deslizante $s(x, t)$.

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e \quad (2.9)$$

Donde λ es una constante positiva que se selecciona a partir del desempeño del sistema en cuanto a velocidad de respuesta se refiere, n es el orden del sistema y $e(t) = [e_1(t) \ e_2(t) \ e_3(t)]^T = x_d(t) - x(t)$ es el vector de errores de la salida del sistema, siendo $x_d(t) = [x_{d1}(t) \ x_{d2}(t) \ x_{d3}(t)]^T$ el estado deseado.

Para aquellos sistemas con representación dinámica de segundo orden, se obtiene la ecuación 2.10 que define la superficie como una función de primer orden, entonces $s(x, t)$

es simplemente la suma del error de posición y el error de velocidad.

$$s(x, t) = e_2 + \lambda e_1 \quad (2.10)$$

Cuando el sistema de 2.10 se encuentra sobre la superficie deslizante el error disminuye exponencialmente y el valor que toma la función $e(x, t) = 0$ de forma que la ecuación 2.11:

$$e_2 = -\lambda e_1 \quad (2.11)$$

Cuya solución es:

$$e_1 = e_{1,0} e^{-\lambda t} \quad (2.12)$$

De esta manera, la superficie deslizante constituye una línea recta de pendiente λ por lo que el comportamiento del sistema, una vez alcanzada la superficie deslizante, será similar al de un sistema de primer orden (Slotine, 1991; Van Damme, 2009). La variable $e_{1,0}$ representa el error inicial, el tiempo en que el sistema alcance la superficie deslizante es equivalente a $\frac{1}{\lambda}$ de allí se deduce que la rapidez del sistema depende de la pendiente λ . Si el sistema es de tercer orden queda la expresión de la siguiente manera:

$$s(x, t) = e_3 + 2\lambda e_2 + \lambda^2 e_1 \quad (2.13)$$

Donde:

e_1 Error de posición

e_2 Error de velocidad

e_3 Error de aceleración

La ley de control a diseñar tiene como propósito lograr que el sistema sea estable lo que se consigue asegurando la convergencia de $s(x, t)$ a cero. Para lograr este objetivo se aplica el criterio de estabilidad de Lyapunov. El método de estabilidad de Lyapunov es usualmente utilizado para determinar las propiedades de estabilidad de un punto de equilibrio sin solucionar la ecuación de estado. Se parte de considerar a $V(x)$ como una

función escalar diferenciable definida en un dominio D que contiene el origen. El método de Lyapunov plantea que la función $V(x)$ es definida positiva si $V(0) = 0$ y $V(x) > 0$ para todo valor de x . $V(x)$ es definida negativa si $V(0) = 0$ y $V(x) < 0$ para todo valor de x (Slotine, 1991).

En este caso se selecciona la función $V = \frac{1}{2}s^2$ debido a que es definida positiva y su derivada es definida negativa (Utkin, 1999). Si se deriva la función candidata con respecto a la superficie deslizante $s(x, t)$ definida en la ecuación 2.13 es posible obtener una expresión para la ley de control que se debe diseñar, asegurándose la estabilidad del sistema.

$$s\dot{s} \leq -F|s| \quad (2.14)$$

Donde F representa una constante positiva.

La expresión 2.14 puede ser planteada como:

$$\text{sgn}(s)\dot{s} \leq -F \quad (2.15)$$

De esta manera se asegura que las trayectorias en un plano fase apunten hacia la superficie $s(x, t)$, y una vez dentro de la superficie, las trayectorias del sistema permanezcan sobre la misma, tal como se muestra en la figura 2-4. Adicionalmente, esto implica que

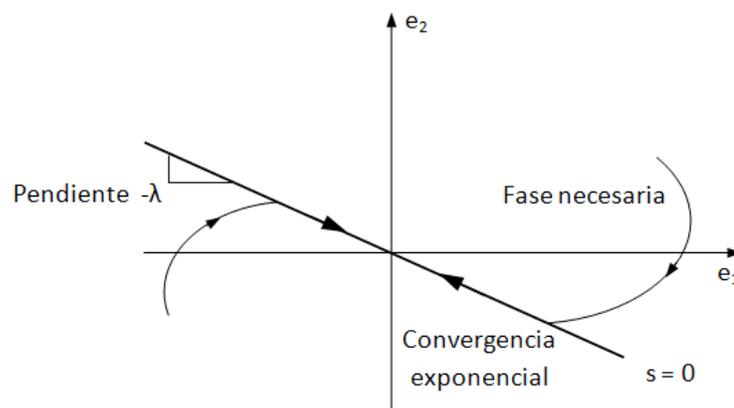


Figura 2-4: Efecto del control en modo deslizante sobre la trayectoria de un sistema de segundo orden representado en el plano-fase.

algunas perturbaciones o incertidumbres dinámicas puedan ser toleradas siempre y cuando la superficie no sufra variación.

En resumen, la idea es utilizar una función conocida para $s(x, t)$ acorde a 2.10, y entonces seleccionar la ley de control $U(t)$ en 2.8 de manera tal que el sistema en lazo cerrado mantenga el comportamiento definido por la superficie deslizante seleccionada, a pesar de la presencia de imprecisiones que contenga el modelo y el efecto de las perturbaciones.

2.2.1. Diseño del controlador

La señal de mando $u(t)$ del control en modo deslizante está integrada por dos partes:

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_s(t) \quad (2.16)$$

$u_{eq}(t)$: Mando compensado, tiene como función cancelar las no linealidades y los parámetros con incertidumbres del modelo.

$u_s(t)$: Mando discontinuo, asegura la robustez del sistema.

La ley de control $u_{eq}(t)$ se implementa para cumplir con la condición deslizante expresada por la ecuación 2.20. El término discontinuo $u_s(t)$ se justifica debido a que la implementación de la conmutación de control es imperfecta, lo que conduce al *chattering*. El *chattering* es indeseable en la práctica puesto que provoca una alta acción de control que estará afectada por términos dinámicos de alta frecuencia que no se hayan tenido en cuenta en el modelado (Utkin, 1999).

De acuerdo con la ecuación 2.8 el término $f(x, t)$ es no lineal y variable en el tiempo y una vez estimado a partir del modelo se puede expresar como $\hat{f}(x, t)$. El error que se produce debido a la estimación de $f(x, t)$ está dado por:

$$\left| \hat{f}(x, t) - f(x, t) \right| \leq G(x, t)$$

Siendo $G(x, t)$ una función conocida.

Por su parte el término $b(x, t)$ puede variar dentro de un rango determinado por:

$$0 \leq b_{min}(x, t) \leq b(x, t) \leq b_{max}(x, t)$$

De ahí que $b(x, t)$ puede ser estimado con un nivel de exactitud razonable utilizando solo los valores mínimos y máximos del mismo (Slotine, 1991).

$$\hat{b}(x, t) = \sqrt{b_{\min}(x, t)b_{\max}(x, t)}$$

La derivada de la superficie deslizante definida por la ecuación 2.13 en función del error está dada por:

$$\dot{s}(x, t) = \dot{e}_3 + 2\lambda\dot{e}_2 + \lambda^2\dot{e}_1 \quad (2.17)$$

Luego:

$$\dot{s}(x, t) = \dot{x}_{d3} - \dot{x}_3 + 2\lambda e_3 + \lambda^2 e_2 \quad (2.18)$$

Al sustituir la ecuación 2.18 en la ecuación 2.15 se llega a la siguiente expresión:

$$\text{sgn}(s)(\dot{x}_{d3} - \dot{x}_3 + 2\lambda e_3 + \lambda^2 e_2) \leq -F \quad (2.19)$$

Teniendo en cuenta que la ecuación 2.8 define la dinámica de un sistema de tercer orden, es posible reescribir la expresión anterior a partir de los términos estimados que definen a \dot{x}_3 como:

$$\text{sgn}(s)(f(x, t) + b(x, t)u(t) - \dot{x}_{d3} - 2\lambda e_3 - \lambda^2 e_2) \geq F \quad (2.20)$$

Esta expresión constituye la condición deslizante que debe cumplirse para asegurar el desempeño adecuado del sistema. La ecuación para el mando compensado de un control deslizante, encargado de cancelar las no linealidades e incertidumbres de un sistema de tercer orden, se obtiene a partir de la ecuación 2.20 y se define como:

$$u_{eq}(t) = \frac{1}{\hat{b}(x, t)}(-\hat{f}(x, t) + \dot{x}_{d3} + 2\lambda e_3 + \lambda^2 e_2) \quad (2.21)$$

Para asegurar que la condición deslizante, expresada por la ecuación 2.20, se cumpla en todo momento es necesario implementar una ley de control que cumpla con la siguiente

estructura (Slotine, 1991):

$$u(t) = u_{eq}(t) + K(x, t) \operatorname{sgn}(s) \quad (2.22)$$

Donde $K(x, t)$ se selecciona tal que:

$$K(x, t) = G(x, t) + F$$

Por su parte el término discontinuo $\operatorname{sgn}(x)$ se define como:

$$\operatorname{sgn}(\mathbf{x}) \begin{cases} 1 & \text{para } x > 0 \\ \in [-1, 1] & \text{para } x = 0 \\ -1 & \text{para } x < 0 \end{cases}$$

La ley de control expresada por la ecuación 2.22 asegura que la trayectoria del sistema alcance en un tiempo finito la superficie deslizante $s(x, t)$, asegurando que los errores tiendan exponencialmente a cero. Un esquema de control en modo deslizante puede ser aproximado al presentado en la figura 2-5

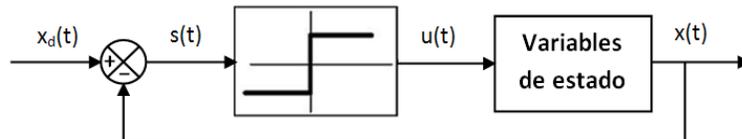


Figura 2-5: Diagrama a bloques de un lazo de control ideal en modos deslizantes. Un controlador discontinuo obliga a la señal de salida $x(t)$ de la planta que siga a la trayectoria de referencia $x_d(t)$.

2.2.2. Robustez del control en modo deslizante

La puesta a punto del control en modo deslizante se basa en la estimación de parámetros pertenecientes al modelo matemático del sistema. Sin embargo los parámetros estimados nunca van a corresponder a los modelos propios de la planta real. Dado el sistema de tercer orden y basados en los epígrafes 2.2 y 2.2.1 se tiene que la superficie deslizante $s(x, t)$, su derivada $\dot{s}(x, t)$ y la ley de control para un sistema de tercer orden son equivalentes a:

$$s(x, t) = e_3 + 2\lambda e_2 + \lambda^2 e_1 \quad (2.23)$$

$$\dot{s}(x, t) = \dot{x}_{d3} - (f(x, t) + b(x, t)u(t)) + 2\lambda e_3 + \lambda^2 e_2 \quad (2.24)$$

$$u(t) = \frac{1}{\hat{b}(x)}(-\hat{f}(x) + \dot{x}_{d3}(t) + 2\lambda e_3 + \lambda^2 e_2 + K \operatorname{sgn}(s)) \quad (2.25)$$

Al sustituir 2.25 en 2.24 se tiene:

$$\dot{s}(x) = \dot{x}_{d3} - (f(x) + b(x)\left(\frac{1}{\hat{b}(x)}(-\hat{f}(x) + \dot{x}_{d3} + 2\lambda e_3 + \lambda^2 e_2 + K \operatorname{sgn}(s))\right)) + 2\lambda e_3 + \lambda^2 e_2 \quad (2.26)$$

$$\dot{s}(x) = \dot{x}_{d3}\left(1 - \frac{b(x)}{\hat{b}(x)}\right) + \left(\frac{b(x)}{\hat{b}(x)}\hat{f}(x) - f(x)\right) + 2\lambda e_3\left(1 - \frac{b(x)}{\hat{b}(x)}\right) + \lambda^2 e_2\left(1 - \frac{b(x)}{\hat{b}(x)}\right) - \frac{b(x)}{\hat{b}(x)}K \operatorname{sgn}(s) \quad (2.27)$$

$$\dot{s}(x) = \Delta \dot{x}_{d3} + \Delta f(x) + \Delta e_3 + \Delta e_2 - \frac{b(x)}{\hat{b}(x)}K \operatorname{sgn}(s) \quad (2.28)$$

Donde $\Delta \dot{x}_{d3} = \dot{x}_{d3}\left(1 - \frac{b(x)}{\hat{b}(x)}\right)$, $\Delta f(x) = \frac{b(x)}{\hat{b}(x)}\hat{f}(x) - f(x)$, $\Delta e_3 = 2\lambda e_3\left(1 - \frac{b(x)}{\hat{b}(x)}\right)$, $\Delta e_2 = \lambda^2 e_2\left(1 - \frac{b(x)}{\hat{b}(x)}\right)$. Asumiendo que $b(x)$, $\Delta f(x)$, λ , y K son positivas.

De forma tal que:

$$\frac{b(x)}{\hat{b}(x)}K \operatorname{sgn}(s) > \Delta \dot{x}_{d3} + \Delta f(x) + \Delta e_3 + \Delta e_2 \quad (2.29)$$

De esta forma $\dot{s}(x, t)$ siempre presenta signo opuesto con respecto a $s(x, t)$. Al obedecer el teorema de Liapunov la dinámica del sistema converge hacia la superficie deslizante. Si la ganancia de robustez del algoritmo de control es lo suficientemente alta las incertidumbres de los parámetros se hacen despreciables y el sistema presenta un comportamiento deseable. De esta forma el SMC constituye una estrategia de control robusta ante incertidumbres en los parámetros del modelo, lo cual representa su principal ventaja (Slotine, 1991; Van Damme, 2009).

2.2.3. Chattering

A diferencia de los sistemas de control continuo, un controlador discontinuo excita la dinámica no prevista en el modelo, obteniendo por resultado oscilaciones en el vector de estado. Este problema se conoce como chattering en la literatura de control. Estas oscilaciones de frecuencia y amplitud finita dan por resultado una baja precisión en el control, alta disipación de potencia en los circuitos conmutadores y desgaste en los componentes

mecánicos (Utkin, 1999; Bartoszewicz, 2009). En la figura 2-6 se muestra la representación de la trayectoria de un sistema afectado por el fenómeno del *chattering*.

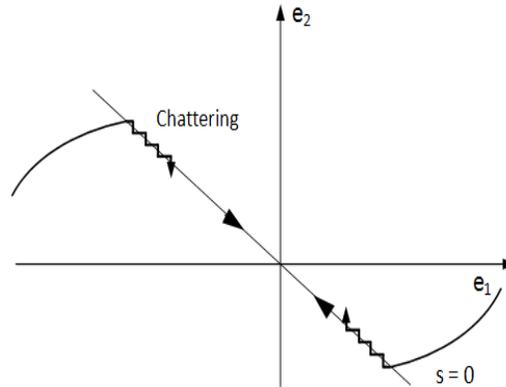


Figura 2-6: Representación del efecto de chattering, resultado de la acción del control deslizante.

Resolver el problema del chattering es importante cuando se busca explotar al máximo los beneficios de los modos deslizantes en el control de sistemas reales, dado que sin un manejo adecuado del mismo este puede transformarse en el mayor obstáculo para la implementación (Utkin, 1999).

La eliminación de chattering puede lograrse introduciendo una capa límite que contiene la superficie deslizante. La introducción de la capa límite es equivalente al reemplazo de la ley de control por una función de saturación como:

$$u_s(t) \begin{cases} \frac{s}{\phi}, & \text{para } |s| \leq 1 \\ \text{sgn}(s) & \text{para } |s| > 1 \end{cases}$$

Donde ϕ representa una constante positiva.

Sin embargo la ley del control expresada anteriormente no garantiza la convergencia del error a cero, ni el desempeño adecuado en su implementación real. Es por eso que tomando la idea anterior como base los sistemas deslizantes han combinado las técnicas borrosas con el objetivo de proveer estabilidad a los controladores en modo deslizante. Esta combinación de los dos principios es lo que es conocido como Control en Modo Deslizante basado en Lógica Borrosa(FSMC) representando este una alternativa para el diseño de algoritmos para sistemas no lineales con incertidumbres (Kim, 1995).

2.3. Lógica Difusa: Conceptos básicos de conjuntos difusos

A diferencia del álgebra de Boole clásica, en la cual la propiedad de un ente de pertenecer a un conjunto específico sólo puede tomar dos valores (falso, verdadero) a los que se les asigna por convenio los valores extremos 0 y 1, los conjuntos borrosos son aquellos en los que se permite el grado de pertenencia parcial de los elementos que los forman, así como la descripción de conceptos en los cuales los límites entre poseer una propiedad y no poseerla no son claros.

La lógica difusa es considerada un sistema lógico dirigido a proporcionar un modelo para los modos de razonamiento humano, los cuales son más aproximados que exactos. (La mayoría del razonamiento humano, en particular el sentido común, es así.)

En la teoría de los conjuntos difusos todo es una cuestión de grados, o todo tiene elasticidad. Está dirigida a tratar con fenómenos complejos que no pueden ser analizados mediante métodos clásicos basados en la lógica bivalente o la teoría de probabilidades. Para un conjunto clásico, cualquier elemento del universo, o bien pertenece al conjunto o no pertenece. Para el caso de conjuntos difusos, un elemento del universo puede pertenecer a uno o más conjuntos con distintos grados de pertenencia.

Universo de discurso U : Determina la gama de valores que pueden tomar los elementos que poseen la propiedad expresada por la variable lingüística.

Etiquetas: Son las diferentes clasificaciones que se efectúan sobre la variable lingüística. Cada etiqueta tendrá un conjunto difuso asociado.

Función de pertenencia o membresía $u(x)$: Es una relación que asocia cada elemento en un conjunto con su grado de pertenencia al mismo (un número real en el intervalo $[0, 1]$). Puede expresarse como un grupo de valores discretos o como una función continua.

Soporte: Proporciona el rango de definición de la función de pertenencia. Es una manera de restringir el universo de discurso para cada etiqueta.

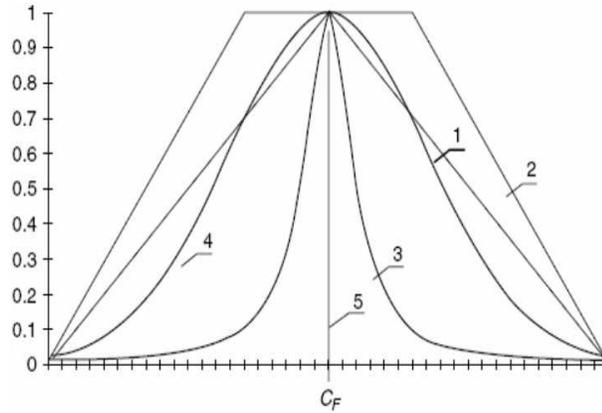


Figura 2-7: Forma típica de funciones de pertenencia: 1-triangular, 2-trapezoidal, 3-gaussiana, 4-campana generalizada, 5-singleton.

Las expresiones matemáticas correspondientes a las funciones de membresía más comunes pueden encontrarse en el Anexo A.

Los conjuntos y operadores borrosos no son más que el sujeto y el verbo de esta lógica, empleados en las llamadas condiciones de tipo *IF* (expresión) *THEN* (relación, conclusión), como una manera de emular la toma de decisiones de un experto. Una forma de conformar estas reglas sería: *if x is A then y is B*, donde A y B son valores lingüísticos definidos por los conjuntos dentro del universo de entrada X y salida Y . La parte *if x is A* de la regla es llamada premisa o antecedente mientras que la parte *then y is B* es llamada consecuencia o conclusión (Reznik, 1997).

2.3.1. Controladores borrosos

La teoría de control convencional se basa en la utilización de modelos matemáticos (analíticos) explícitos del proceso que será controlado y las especificaciones del comportamiento deseado en lazo cerrado para diseñar el controlador. Este enfoque puede fallar si el modelo del proceso es:

- Difícil de obtener
- Parcialmente desconocido
- Altamente no lineal

El sistema de inferencia es considerado como el corazón de cualquier controlador borroso en cuestión. La inferencia borrosa no es más que el proceso de formular la asignación

de una entrada a una salida usando la lógica borrosa. Este proceso involucra a todas las piezas, conceptos a los que se hicieron alusión anteriormente: funciones de membresía, reglas (*If – Then*) y operadores lógicos. Se distinguen dos clases de sistemas basados en reglas borrosas, de acuerdo con la forma de las reglas y del tipo de entradas y salidas (Babuska, 2001):

- Controladores Mamdani, usualmente usado directamente como controlador en lazo-cerrado.
- Controladores Takagi-Sugeno, típicamente usados como un controlador supervisor.

El controlador borroso se compone de tres etapas:

1. Borrosificación de las Variables de Entrada: a cada variable de entrada se le asigna su valor de pertenencia correspondiente con cada conjunto del universo de discurso.
2. Inferencia Basada en Reglas: el controlador aplica el mecanismo de inferencia a la información de entrada y proporciona una conclusión difusa que determina los grados de pertenencia a los conjuntos difusos de salida.
3. Desborrosificación de la Variable de Salida: mediante métodos matemáticos se obtiene un valor concreto de la variable de salida, o sea, el resultado.

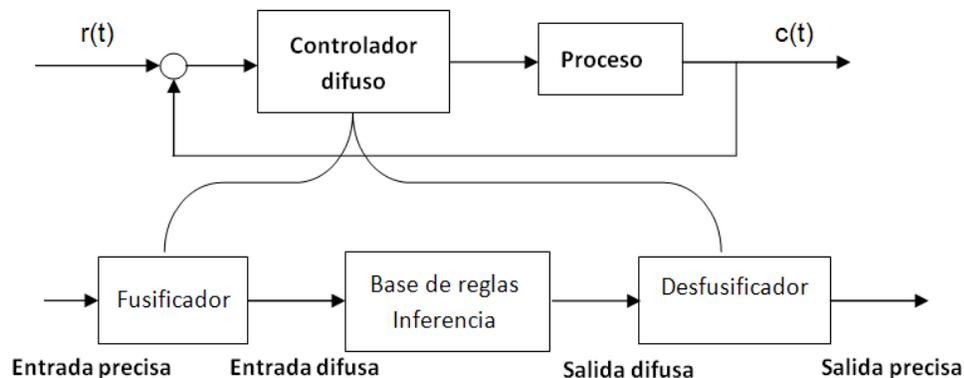


Figura 2–8: Esquema de control borroso.

Existen muchas estrategias que pueden ser usadas para convertir las conclusiones del mecanismo de inferencia a un valor comprensible para el proceso. El método de desborrosificación de Centro de Gravedad (llamado también método de Centroide o Centro del Área) es el más recurrido; mostrado en la ecuación 2.30. Consiste en calcular el centro de área del conjunto difuso resultante; en su versión exacta puede resultar excesivamente

costoso desde el punto de vista de cómputo para su realización en tiempo real, ya que implica el cálculo de integrales de figuras eventualmente irregulares.

$$COG : y_q^{crisp} = \frac{\sum_{i=1}^R c_q^i \int \mu_{A_q^i}(y_d) dy_q}{\sum \int \mu_{A_q^i}(y_d) dy_q} \quad (2.30)$$

Donde R es el número total de reglas de control, y_q es el grado de pertenencia a la función μ_A para la entrada A y regla i , c_q^i señala el valor central de y_q en la región de salida de la regla i .

El método de Promedio de los Centros representa el promedio ponderado de los centros de las funciones de pertenencia implicadas para la salida.

$$CA : y_q^{crisp} = \frac{\sum_{i=1}^R c_q^i \sup_{y_p} \mu_{A_q^i}(y_d) dy_q}{\sum \sup_{y_p} \mu_{A_q^i}(y_d) dy_q} \quad (2.31)$$

Donde \sup_{y_p} representa la altura de la función de pertenencia en ese centro.

Los pasos para el diseño de un sistema de control difuso simple son:

1. Identificar las variables (entradas, estados, y salidas) de la planta.
2. Particionar el universo de discurso para cada variable en conjuntos difusos, asignando a cada uno una etiqueta lingüística.
3. Asignar o determinar una función de membresía para cada conjunto difuso.
4. Asignar la relación difusa entre los conjuntos difusos de las entradas o estados y los conjuntos difusos de salida, lo que constituye la base de reglas.
5. Fusificar las entradas al controlador.
6. Inferir la salida contribuida por cada regla.
7. Agregar la salida difusa recomendada por cada regla.
8. Aplicar la defusificación para formar la salida precisa.

2.4. Control Deslizante basado en Lógica Borrosa

La lógica borrosa se combina con el control en modo deslizante para reducir el efecto de chattering y mejorar la precisión en el seguimiento de la trayectoria así como la robustez del controlador. Esto se justifica debido a que el Control de Lógica Borrosa es

una ley del control no convencional y robusta, conveniente para sistemas complejos o no lineales caracterizados por fluctuación en sus parámetros o incertidumbres. Cabe destacar entre las ventajas del FSMC, que no está directamente ligado al modelo matemático del sistema como el caso del SMC, asegura la estabilidad y reduce el número de reglas borrosas (Abdelsalam, 2012). Entre los métodos más generalizados se propone la sustitución del término discontinuo por un bloque de lógica borrosa que toma como entrada el valor del componente s de la ley de control deslizante y como salida el componente discontinuo u_s . La estabilidad de este sistema es garantizado por la teoría de Lyapunov. La figura 2-9 muestra que el Controlador Borroso es una extensión de un Control Deslizante con una capa límite (Aissaoui, 2009).

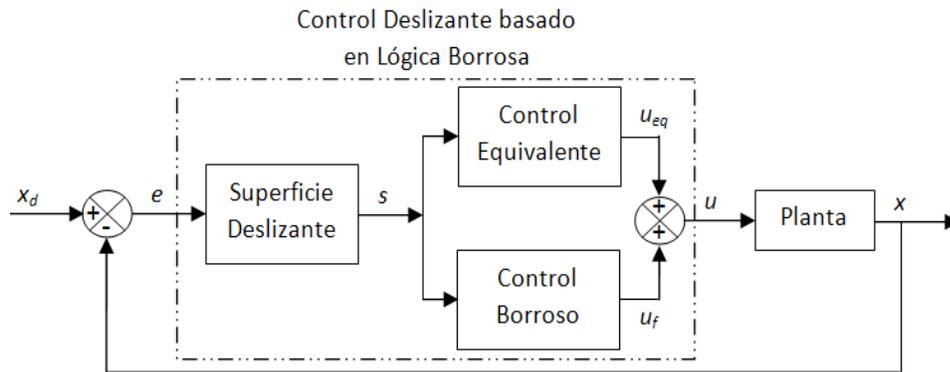


Figura 2-9: Esquema de control FSMC con la sustitución del elemento discontinuo.

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_s(t) = u_{eq}(t) + u_f(t) \quad (2.32)$$

$$u_f(t) = FSMC(s(t)) \quad (2.33)$$

Este sistema provee buen desempeño y rechazo a perturbaciones, logra el seguimiento de la trayectoria deseada con precisión y una respuesta dinámica rápida, sobreamortiguada y con cero error en estado estable (Aissaoui, 2009).

Si el esquema adopta dos entradas, el valor de la función de superficie deslizante $s(x, t)$ y su derivada, como se muestra en la ecuación 2.34, aumenta la precisión en el seguimiento de la trayectoria y se acelera la velocidad de respuesta. Mediante una amplia base de reglas heurísticas un controlador de lógica borrosa puede cubrir satisfactoriamente con incertidumbres severas, aunque el número elevado de reglas borrosas, dado por la

ecuación 2.35, hace complejo el análisis y surge una pesada carga computacional en algunas aplicaciones (Babar, 2010; Amer, 2012). El esquema se muestra en la figura 2–10.

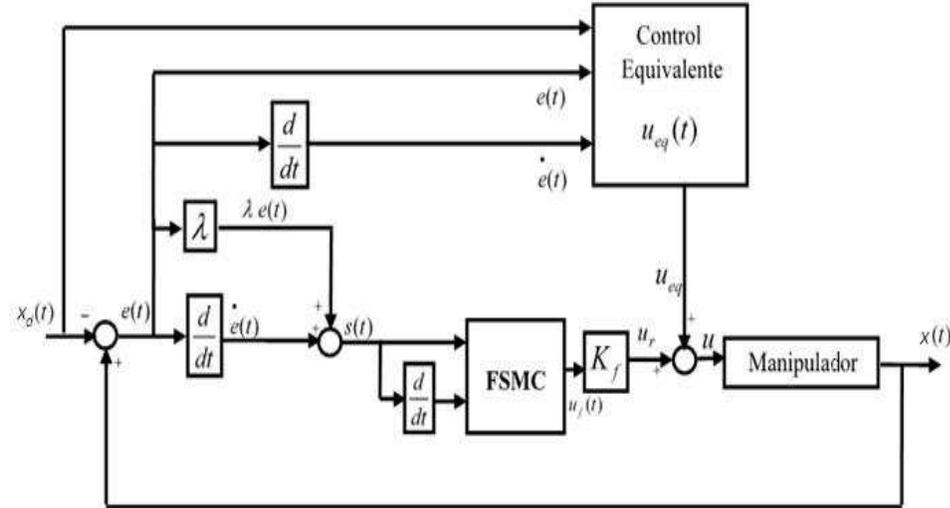


Figura 2–10: Esquema de control FSMC teniendo en cuenta la derivada de la superficie deslizante.

$$u_f(t) = FSMC(s(t), \dot{s}(t)) \quad (2.34)$$

$$R_t = l_{in1} * l_{in2} * (\dots) l_{ink} \quad (2.35)$$

Donde R_t representa el total de reglas, y l es el número de etiquetas lingüísticas de cada entrada.

Otros autores prefieren tomar como entradas para el controlador borroso del esquema anterior el error de posición y su derivada, debido a que el rango de valores de estos es más pequeño y su variación más suave. Incluso se han desarrollado estrategias más complejas en aras de potenciar la robustez como el diseño de Controladores Borrosos Supervisores para sintonizar dinámicamente parámetros como la Ganancia del control y el valor de λ , pendiente de la superficie deslizante (Amer, 2012). El esquema se muestra en la figura 2–11.

Los principales inconvenientes de este planteamiento son, por un lado la maldición de la dimensionalidad, el número de reglas crece geoméricamente con el número de variables,

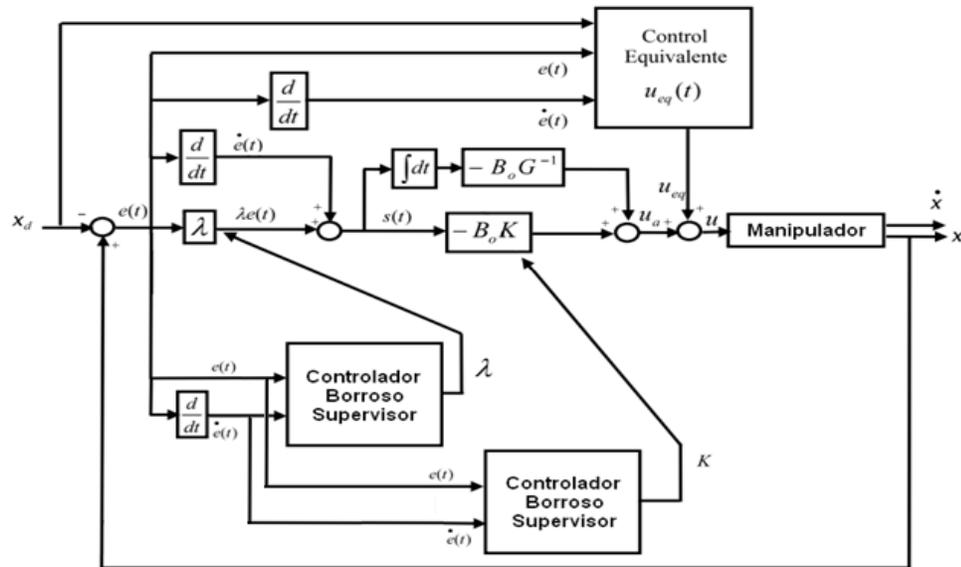


Figura 2-11: Esquema de control FSMC teniendo en cuenta la sintonización de λ .

por otro lado aumenta el número de procesos de inferencia que deben ser calculados simultáneamente.

Debido a las limitaciones de los esquemas antes planteados, en este trabajo se propone desarrollar un sistema de inferencia borroso que sustituya no solo a la función signo de la ley de control sino también al control equivalente. El esquema propuesto según la figura 2-12, no necesita el modelo matemático del sistema por lo que es relativamente fácil de diseñar. Esta decisión se fundamenta porque cuando el modelo matemático del proceso no existe, o existe pero con incertidumbres, la lógica borrosa es un modo alternativo eficaz para tratar con dinámicas desconocidas. De esta manera una vez definida la superficie

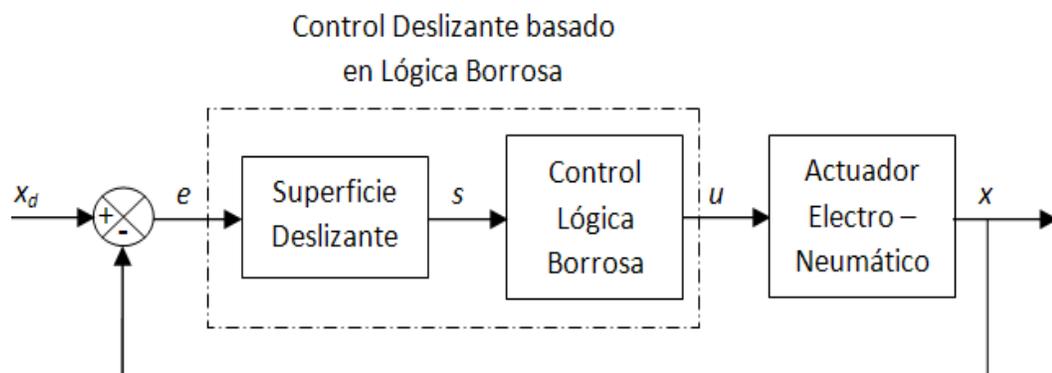


Figura 2-12: Esquema de control FSMC propuesto para la plataforma de 2 GDL.

deslizante el controlador de lógica borrosa se dispone para transmitir una señal de salida directamente proporcional a la distancia entre las variables de estado y la superficie $s(x, t)$

por medio de las reglas borrosas. Este planteamiento cuenta entre sus ventajas el poco número de reglas borrosas que requiere para su implementación, y además, debido al alto grado de robustez, no requiere de un modelo matemático estimado del sistema.

2.5. Consideraciones finales

Efectuado el análisis teórico de las estrategias de control a emplear en los elementos actuadores del robot bajo estudio, se pueden concluir los siguientes aspectos:

- El objetivo de la ley de control en modo deslizante obtenida es cancelar los parámetros no lineales y con incertidumbres del modelo; como se especifica, el valor de ganancia y la pendiente de la superficie deslizante se seleccionan para asegurar la robustez y rapidez en la respuesta del sistema respectivamente; la superficie deslizante asegura que el comportamiento de la respuesta sea similar a un sistema de segundo orden sobre-amortiguado.
- Cuando los procesos a controlar son altamente no lineales o cuando se dispone de un modelo matemático demasiado complejo, la lógica borrosa se presenta como una estrategia de control robusta que no está rigurosamente ligada al modelo matemático del sistema y asegura la estabilidad.
- El fenómeno del chattering es el principal inconveniente para que las técnicas deslizantes sean implementadas con éxito, la combinación con técnicas borrosas se agrega como solución práctica al esquema de control con el objetivo de atenuar dicho fenómeno en la respuesta.
- Las herramientas expuestas en el presente capítulo brindan la posibilidad de desarrollar una estrategia de control robusta para los actuadores electro-neumáticos de la plataforma de 2-GDL desarrollada por SIMPRO.

CAPÍTULO 3

ESQUEMA DE CONTROL FSMC PARA PLATAFORMA DE 2 GDL. SIMULACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se presenta el diseño de un controlador en modo deslizante basado en lógica borrosa (FSMC) designado para el control de los actuadores de la plataforma de 2GDL. Se presenta inicialmente el diseño de un controlador SMC para expresar sus limitaciones y luego se desarrolla el diseño del controlador FSMC. Los resultados satisfactorios del control FSMC se alcanzan con una correcta selección y delimitación de la pendiente de la superficie deslizante y de las funciones de pertenencia respectivamente, lo cual permite un tratamiento adecuado del fenómeno chattering. El controlador debe ser capaz de asegurar un desempeño adecuado para un amplio rango de operación.

3.1. Diseño del control en modo deslizante para el sistema neumático

A partir de los pasos seguidos para el diseño del control en modo deslizante descritos en los epígrafes 2.2 y 2.2.1 donde se obtuvo la superficie deslizante y la ley de control para el sistema de tercer orden descrito en el epígrafe 2.1.1:

$$s(x, t) = e_3 + 2\lambda e_2 + \lambda^2 e_1 \quad (3.1)$$

$$u(t) = \frac{1}{\hat{b}(x, t)}(-\hat{f}(x, t) + \dot{x}_{d3} + 2\lambda e_3 + \lambda^2 e_2 + K \operatorname{sgn}(s)) \quad (3.2)$$

Estas expresiones se implementan en el Simulink de MATLAB, eligiéndose para el diseño un valor de ganancia ($K = 10000$) que asegure la robustez del sistema. El valor de λ de la superficie se selecciona igual a 10. En la figura 3-1 se presenta la estructura de control implementada en Simulink siendo x_{d4} la 3^{ra} derivada de la posición deseada x_{d1} .

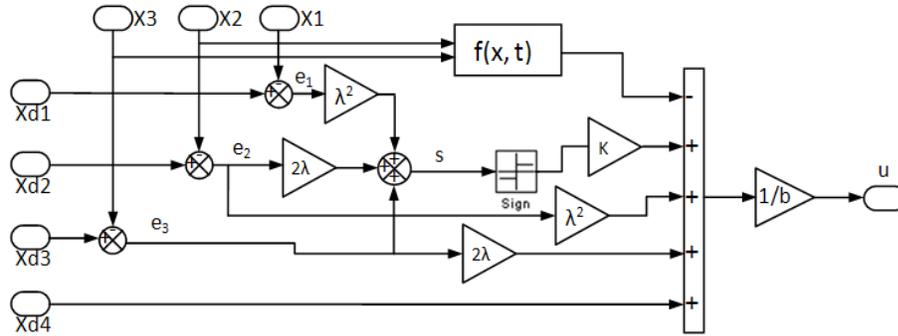


Figura 3–1: Diagrama de bloques en Simulink de la ley de control SMC.

El modelo virtual del simulador de movimiento de estructura paralela se muestra en la figura 3–2. El sistema en su conjunto se simula mediante el empleo del modelo virtual de la plataforma, modelado en ADAMS.

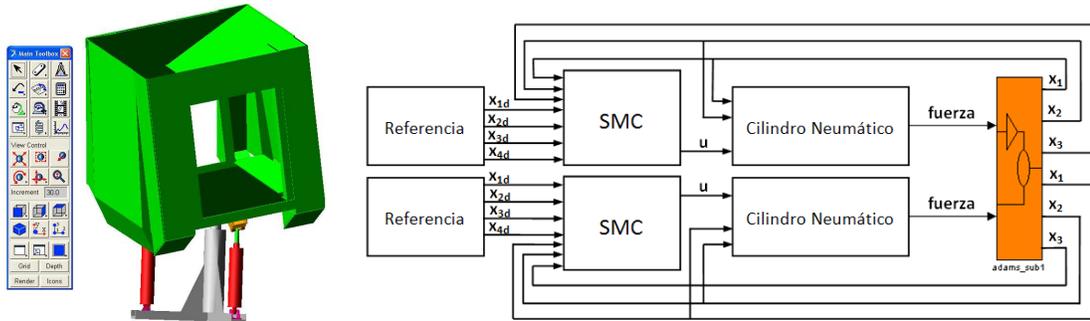


Figura 3–2: Modelo en ADAMS de la plataforma de 2 GDL y Esquema en ADAMS-Simulink del control SMC.

ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems): Análisis Dinámico Automático de Sistemas Mecánicos, es un software para simulación dinámica de sistemas mecánicos que por medio de la implementación de herramientas numéricas ofrece una gran variedad de elementos que sirven para modelar cualquier sistema mecánico. Es capaz de exportar el modelo CAD del sistema como bloque hacia el Simulink del Matlab, incrementando notablemente la funcionalidad a la hora de efectuar los procesos de simulación, diseño y análisis, dado que se pueden integrar en simulación conjunta las potencialidades y herramientas de ambos softwares (Software, 2005).

La idea principal es modelar la estructura mecánica en el paquete de simulación ADAMS y la dinámica de cada uno de los dos actuadores, de manera desacoplada, en el Simulink. El modelo en el ADAMS importa las fuerzas calculadas en el Simulink y exporta hacia el Matlab, calculado por el propio software, las variables articulares, en

este caso posición, velocidad y aceleración de cada una de las articulaciones. Los cilindros de la plataforma, implementada en ADAMS, son sometidos a fuerzas, cada uno desde Matlab, estas fuerzas se declaran en ADAMS como variables que reciben valores desde el Simulink. En ADAMS se pueden plantear los coeficientes de fricción estáticos y dinámicos correspondientes al sistema real.

3.1.1. Simulación con ADAMS

Dada la complejidad del ajuste de los parámetros del control y debido al modelo altamente no lineal se procede a verificar las mismas mediante herramientas de simulación, a partir del modelo CAD del robot desarrollado para tales fines. Pruebas de simulación fueron realizadas con el objetivo de evaluar, en un primer paso, el comportamiento del sistema y del desempeño del controlador.

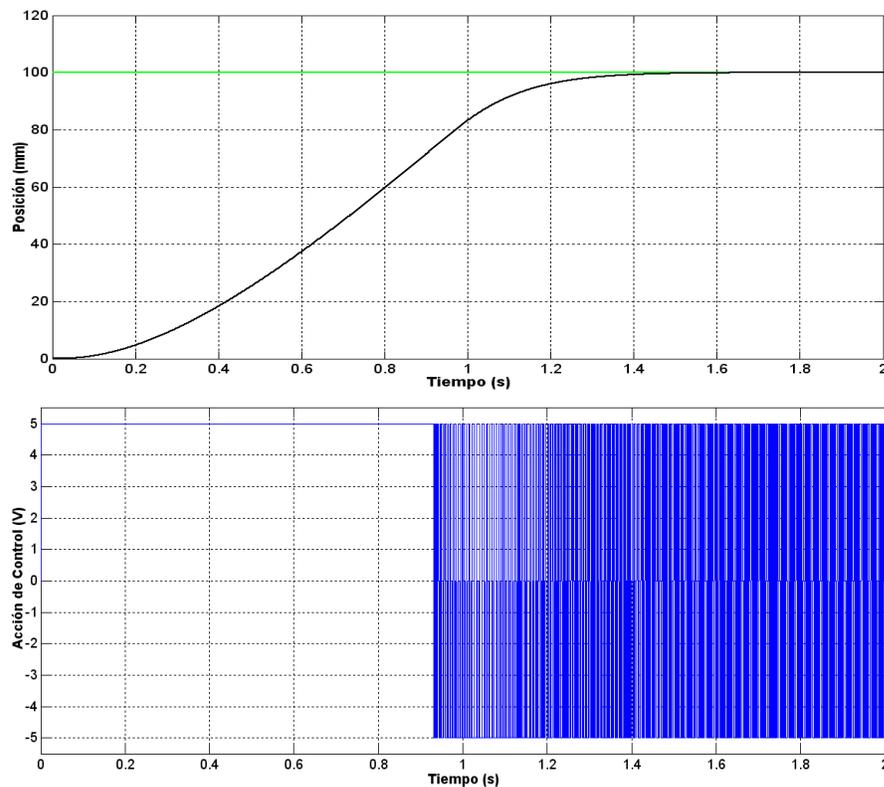


Figura 3–3: Respuesta de tiempo ante referencia escalón del control SMC.

En la figura 3–3 se muestra la respuesta del sistema con el control de posición articular basado en modo deslizante. Como se puede apreciar, la respuesta a la señal escalón es adecuada en relación a la posición. Se puede observar una respuesta sobre-amortiguada,

además de la tendencia del error a un valor equivalente a cero de manera exponencial decreciente.

Sin embargo, cuando la posición del actuador neumático se acerca a la deseada, se puede apreciar la aparición de oscilaciones constantes en el mando, resultado del fenómeno del chattering. El rango de valores para la acción de mando se encuentra entre $[-5 \ 5]$. Los resultados de simulación muestran que la implementación del SMC en sistemas reales es imposible debido a los efectos negativos que, como se especificó en capítulos anteriores, causaría.

3.2. Diseño del control deslizante basado en fuzzy para el sistema neumático

Para disminuir los efectos negativos de las oscilaciones de alta frecuencia en la señal de mando, en el capítulo anterior se propuso el diseño de un sistema de inferencia borroso en sustitución de todo el algoritmo de control equivalente y lógica conmutada capaz de arrastrar al sistema sobre la superficie deslizante. La ventaja principal de este método es que garantiza el comportamiento robusto del sistema y su desempeño, en el sentido de eliminar el chattering, es mejorado. El esquema de control deslizante basado en lógica borrosa *FSMC* emplea el método de inferencia de Mamdani y su configuración se muestra en la figura 3-4.

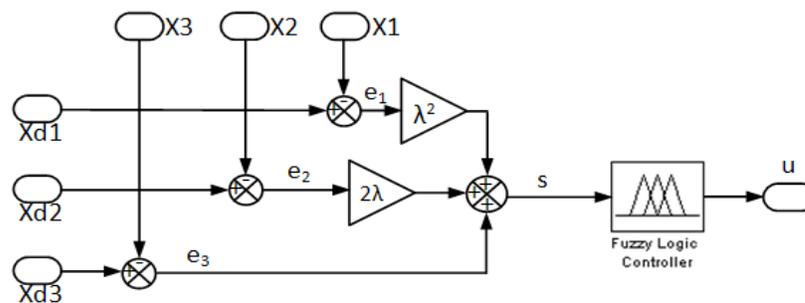


Figura 3-4: Diagrama de bloques en Simulink de la ley de control FSMC.

Las funciones de pertenencia para las variables lingüísticas de entrada y salida son mostradas en la figura 3-5; donde las etiquetas lingüísticas se expresan, en el conjunto borroso, como negativo grande (**NG**), negativo mediano (**NM**), cero (**Z**), positivo mediano (**PM**) y positivo grande (**PG**):

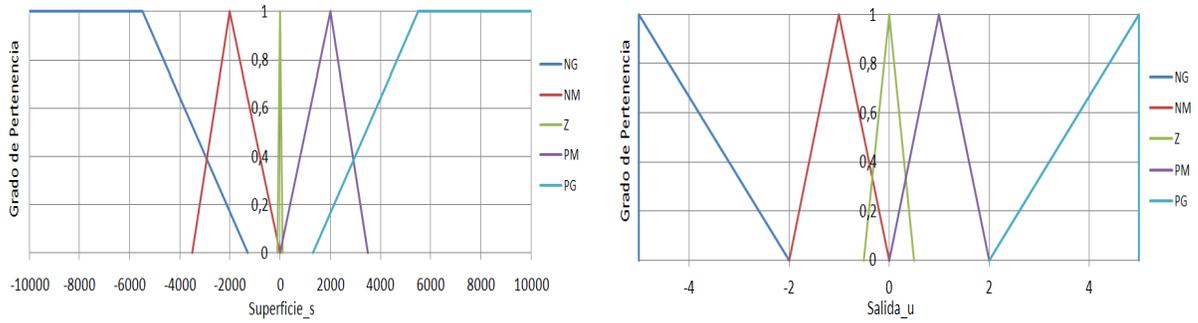


Figura 3–5: Funciones de pertenencia para las variables de entrada y salida.

Se emplean funciones de pertenencia triangulares para cuantificar los conjuntos lingüísticos de las variables de entrada y salida por ser el estándar usado en muchos de los trabajos mencionados que aplican este sistema de inferencia (Aissaoui, 2009; Amer, 2012). Particularmente para la variable de entrada se definen funciones trapezoidales en los extremos para dilatar estos conjuntos y se contrae el conjunto central para que cuando el estado del sistema esté en la vecindad de la superficie s la acción de control sea pequeña lo cual contribuye a disminuir el chattering.

Las reglas del control borrosas pueden representarse como la asignación de la variable lingüística de entrada **Superficie s** a la variable lingüística de salida **Salida u** según la tabla 3–1:

Tabla 3–1: Reglas borrosas

Superficie s	NG	NM	Z	PM	PG
Salida u	NG	NM	Z	PM	PG

Estas reglas lingüísticas son definidas heurísticamente de la siguiente forma:

$$R^{(l)} :: \text{If } \mathbf{Superficie } s \text{ is } A^l \text{ Then } \mathbf{Salida } u \text{ is } B^l \tag{3.3}$$

Donde A^l es la etiqueta del conjunto borroso de entrada y B^l es la etiqueta del conjunto borroso de salida, $l = 1, 2, \dots, 5$ denota el número de reglas borrosas *IF – THEN*. Siendo X y Y los espacios de las relaciones difusas de entrada y salida, y A un conjunto borroso arbitrario en X . Entonces un conjunto borroso, $A \circ R_l$ en Y , puede determinarse para cada regla R_l usando la regla composicional de inferencia max - min de la ecuación 3.4, y el

método de desfuzificación empleado es el de centro de gravedad.

$$\mu_{A \circ R_l} = \max_{s \in X} (\min(\mu_A(s), \min(\mu_{A_l}(s), \mu_{B_l}(u_s)))) \quad (3.4)$$

3.2.1. Análisis por simulación mediante Simulink-Adams

El controlador FSMC diseñado anteriormente se verifica mediante herramientas de simulación, a partir del modelo CAD del robot desarrollado en ADAMS. Estas pruebas fueron desarrolladas con el objetivo de evaluar, en un primer paso, el comportamiento del sistema y el desempeño del controlador.

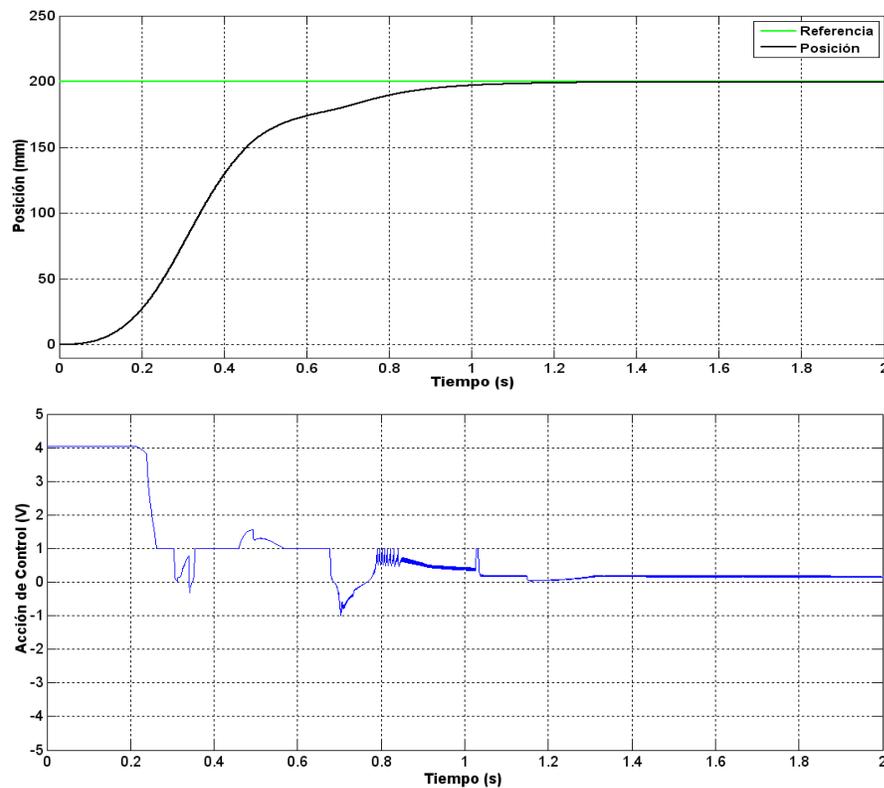


Figura 3–6: Simulación en ADAMS ante entrada escalón como referencia con FSMC.

En la figura 3–6 se muestra la respuesta del sistema, se puede apreciar la respuesta a la señal escalón sobre-amortiguada, además de la tendencia del error a un valor equivalente a cero de manera exponencial decreciente. En este caso, cuando la posición del actuador neumático se acerca a la deseada, se aprecia la aparición de oscilaciones de alta frecuencia en el mando solo durante un corto lapso de tiempo y con una magnitud reducida. Similar análisis se puede realizar para el seguimiento de trayectoria, mostrado en las figuras 3–7 y 3–8.

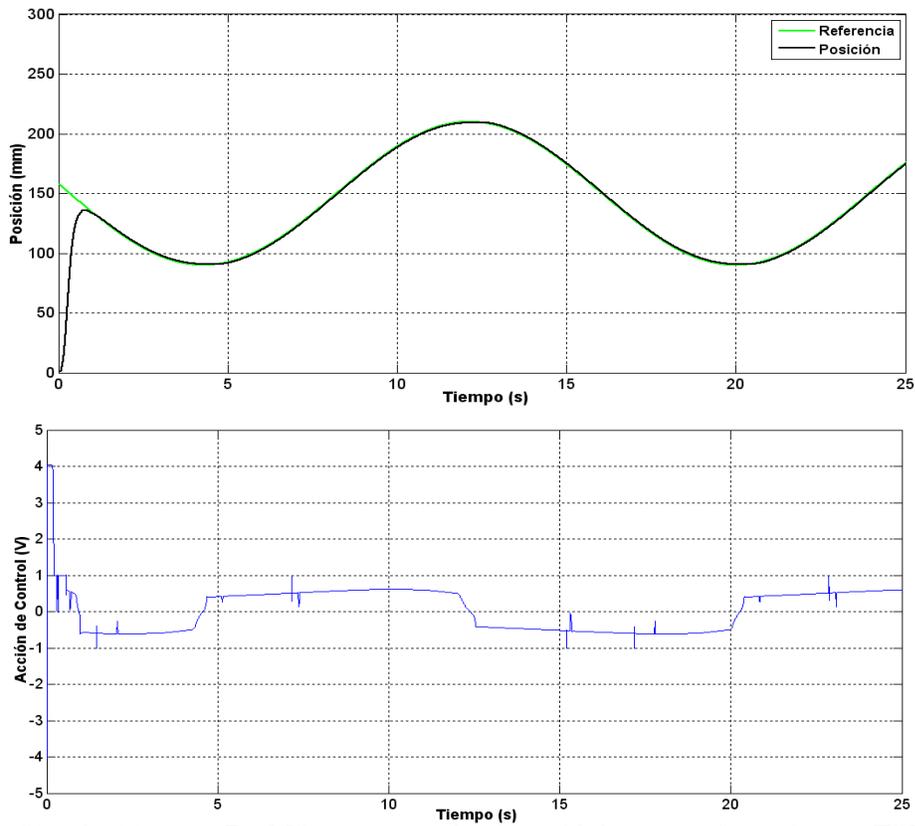


Figura 3-7: Simulación en ADAMS ante entrada sinusoidal como referencia con FSMC.(Fase de adelanto igual a 3 rad)

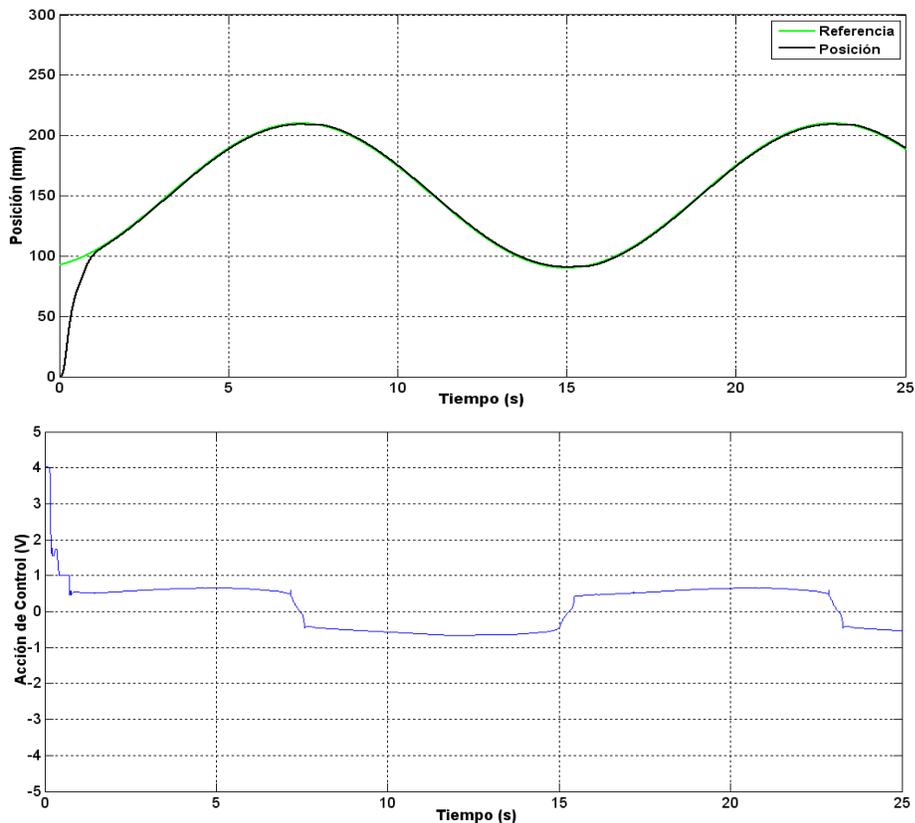


Figura 3-8: Simulación en ADAMS ante entrada sinusoidal como referencia con FSMC.(Fase de adelanto igual a 5 rad)

En este caso, el control desacoplado llevado a cabo permite la aplicación a cada articulación de señales de referencia definidas por las funciones siguientes:

- Cilindro 1: $x(t) = 150 + 60\sin(0,4t + 3)$
- Cilindro 2: $x(t) = 150 + 60\sin(0,4t + 5)$

3.2.2. Resultados experimentales

Al realizar las simulaciones de ensayo del algoritmo de control FSMC diseñado se obtuvieron los resultados esperados, de esta forma están creadas las condiciones para evaluar el desempeño de la estrategia de control mediante experimentos con el robot. Las gráficas fueron tomadas del movimiento de lado, pero para el cabeceo se obtienen resultados similares. El algoritmo de control fue implementado en Simulink con la herramienta Real Time Workshop y Real Time Windows Target. Con el uso de la tarjeta de adquisición Humusoft 624, que opera bajo un tiempo de muestreo de 1 ms, se obtiene la posición del pistón de la lectura del encoder y se envían las señales de mando hacia las válvulas proporcionales de flujo, la velocidad y la aceleración son estimadas.

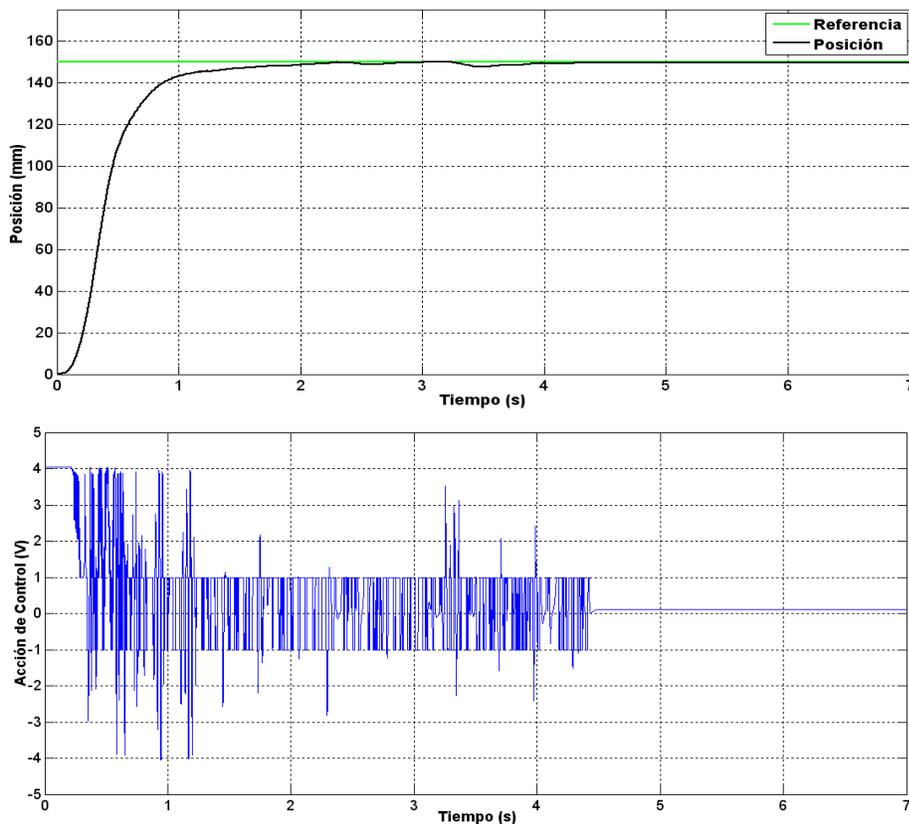


Figura 3–9: Respuesta real del sistema ante entrada escalón como referencia con FSMC.

El actuador neumático fue sometido a señales de referencia paso, tren de pulsos y sinusoidales durante 50 segundos. En las figuras 3-9 y 3-10 se puede observar la respuesta sobre-amortiguada del sistema para alcanzar posiciones específicas.

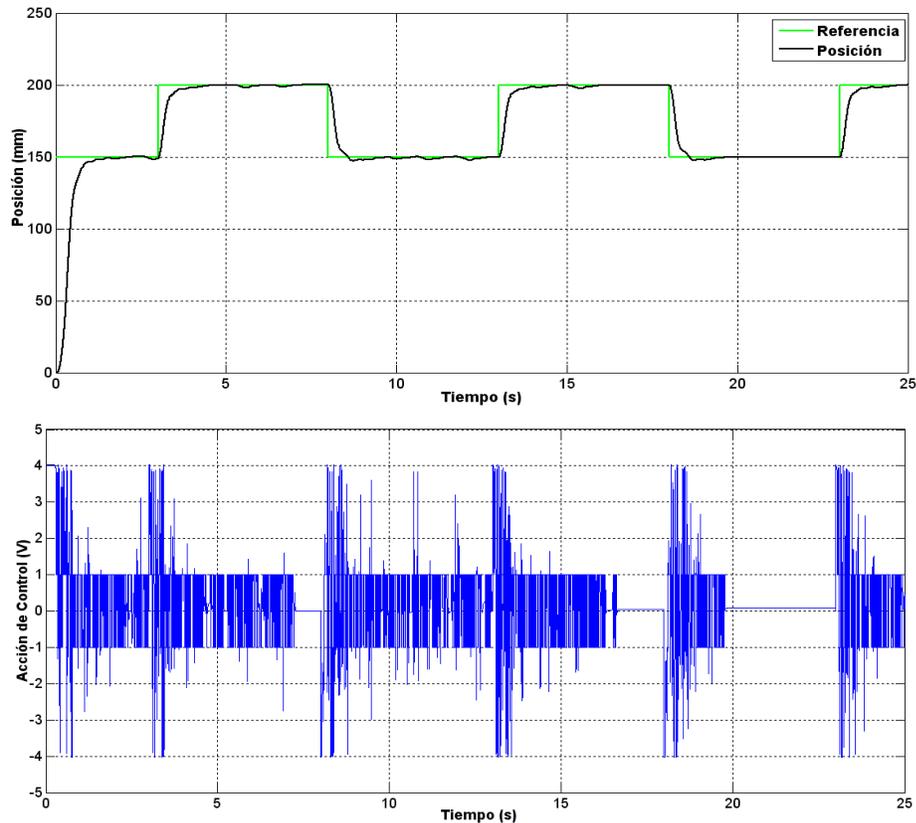


Figura 3-10: Respuesta real del sistema ante un tren de pulsos como referencia con FSMC.

En estas pruebas se puede apreciar que la señal de mando se ve afectada por el chattering, pero este es atenuado en magnitud y una vez alcanzada la posición deseada la señal de mando se estabiliza y el fenómeno desaparece. El seguimiento preciso de trayectoria puede ser evaluado en las figuras 3-11 y 3-12 para las mismas funciones de referencia de la simulación.

En estos casos el error puede ser reducido, pero no exactamente a cero, durante el seguimiento; de esta manera la respuesta del sistema sigue a la referencia, la función $s(x, t)$ está en la vecindad de la superficie deslizante y el chattering aumenta considerablemente. Se observa la respuesta sobre-amortiguada del actuador neumático durante el seguimiento de la referencia.

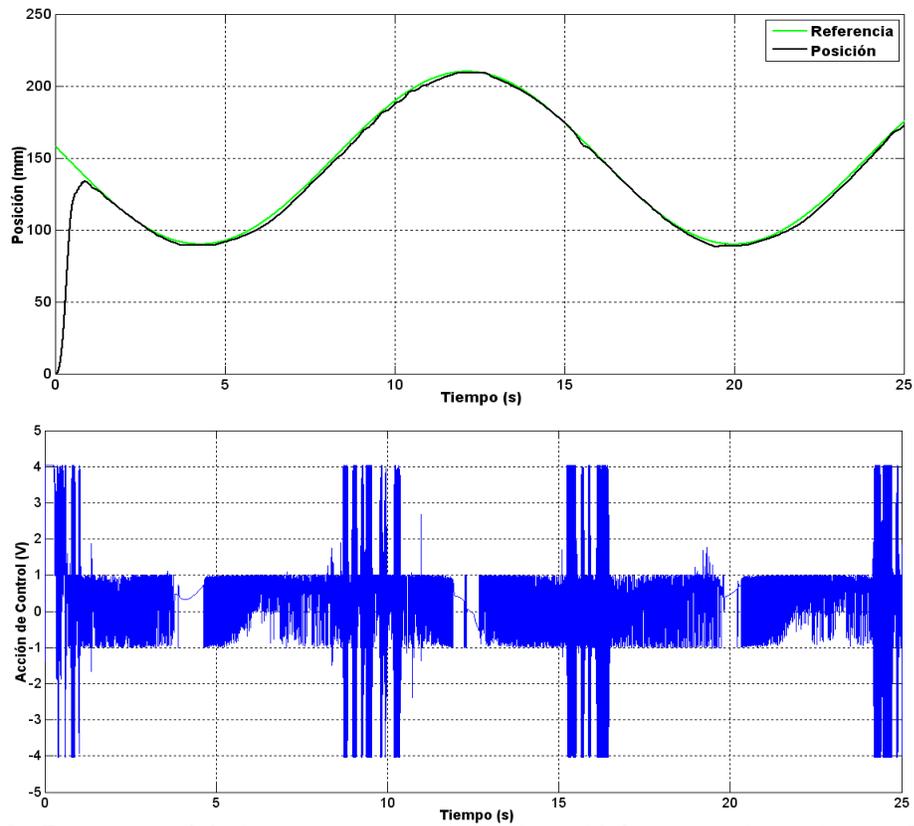


Figura 3-11: Respuesta del sistema ante entrada sinusoidal como referencia con FSMC (Fase de adelanto igual a 3 rad).

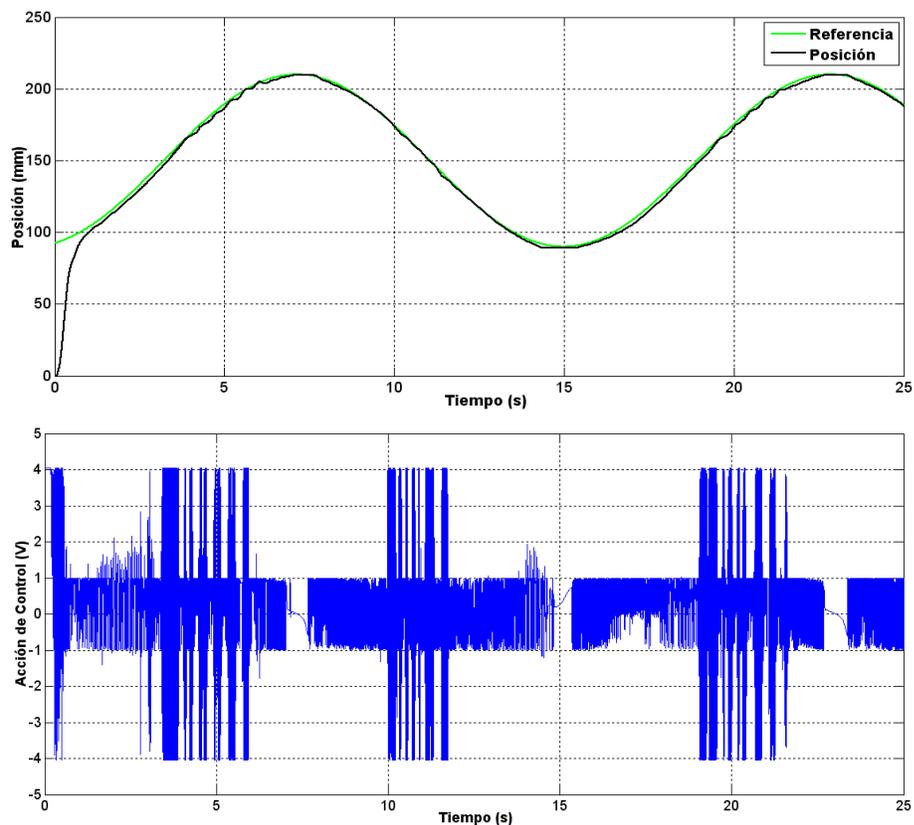


Figura 3-12: Respuesta del sistema ante entrada sinusoidal como referencia con FSMC (Fase de adelanto igual a 5 rad).

Es importante resaltar en el comportamiento de la acción de control que aunque hay chattering, este es reducido e incluso durante algún tiempo se advierte su ausencia. Los valores de error obtenidos durante las pruebas experimentales pueden consultarse en el Anexo B.

3.3. Análisis económico

El precio de la plataforma estudiada con el control implementado es de aproximadamente 12 000 *USD* y con la cabina del simulador completo incluyendo el sistema de visualización y mandos oscila entre 30 000 a 40 000 *USD*.

El costo de un paquete de electrodos de soldar por arco eléctrico vale en el mercado 3,00 *USD*, el metro cuadrado de plancha de acero de 3 *mm* cuesta 13,00 *USD*, las articulaciones universales 2,50 *USD*, y las vigas de acero de perfil *U* cuestan alrededor de 8,00 *USD* el metro, un cilindro neumático de doble efecto 50,00 *USD*, de ahí la importancia que reviste realizar un diseño y construcción de la plataforma de manera adecuada, puesto que estos materiales forman parte de los necesarios para construir una plataforma de este tipo.

El empleo de esta plataforma de conducción permite el adiestramiento del personal a la hora de conducir un vehículo lo que representa un ahorro de combustible, gomas, rodamientos y piezas de automóviles y se logra el perfeccionamiento de la técnica de conducción evitando accidentes de tránsito.

Es meritorio destacar que con el uso de software como Matlab y ADAMS para la simulación y análisis a priori de plataformas de conducción electro-neumáticas se ahorran recursos y evitan riesgos relacionados con funcionamiento inadecuado o resultados que puedan provocar accidentes.

Por último cabe mencionar que esta plataforma contribuye a la formación profesional de estudiantes en la UCLV ya que a raíz de la misma se diseñan y validan estrategias de control y modelos matemáticos, lo cual también representa una ventaja económica considerable.

3.4. Consideraciones finales

Presentado el control deslizante basado en lógica borrosa para el sistema electro-neumático, el trabajo conjunto de simulación MATLAB/Simulink-ADAMS, así como las correspondientes pruebas experimentales, se enuncian las siguientes conclusiones:

- La estrategia de control propuesta se presenta como camino simple dentro de los algoritmos deslizantes basados en lógica borrosa y no requiere la estimación del modelo matemático
- En las pruebas experimentales controlador propuesto manifestó oscilaciones de alta frecuencia en la señal de mando de magnitud reducida las cuales fueron suprimidas cuando el sistema alcanzó la superficie deslizante.
- Los resultados experimentales y de simulación verifican que el controlador propuesto es superior al SMC original en estabilidad, convergencia y robustez.
- Por último, se presentó el análisis económico que demuestra la viabilidad económica de la investigación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Esta investigación permite el estudio y evaluación de estrategias de control no convencionales con el propósito de lograr un mejor desempeño del sistema electro-neumático en la plataforma de 2-GDL. Los principales resultados obtenidos se exponen a manera de conclusiones:

- De acuerdo a la literatura referenciada las estrategias avanzadas en modo deslizante son las más recomendables para lidiar con las altas no linealidades e incertidumbres presentes en los sistemas neumáticos; sin embargo el fenómeno del *chattering* impide el desarrollo exitoso del mismo. El uso de la lógica borrosa se ha reportado como herramienta para atenuar dicho fenómeno brindando resultados satisfactorios. Es por eso que en este trabajo se desarrolla una estrategia de control en modo deslizante basado en lógica borrosa para la plataforma de 2-GDL.
- La estrategia propuesta mantiene las ventajas propias de los sistemas deslizantes al establecer como estado deseado del sistema una superficie deslizante de segundo orden. El diseño de la lógica borrosa permite prescindir de la estimación del modelo del sistema, aspecto esencial en la síntesis de los controladores deslizantes, y se introduce como solución práctica en la ley de control con el objetivo de disminuir el efecto del *chattering*.
- Los resultados del diseño realizado fueron evaluados mediante simulación y de forma experimental en la plataforma de 2-GDL. La respuesta obtenida a partir de la implementación de la ley de control en modo deslizante basado en lógica borrosa es estable, con un comportamiento similar al de un sistema de segundo orden sobreamortiguado y la afectación del *chattering* fue atenuada.

- La capacidad que tiene el control en modo deslizante basado en lógica borrosa de asegurar un adecuado desempeño en el seguimiento de la trayectoria para un amplio rango de operación quedó demostrada.

Recomendaciones

Para establecer la necesaria continuidad que debe tener este trabajo se recomienda lo siguiente:

1. Mejorar el aparato sensorial de la plataforma de 2-GDL en el sentido de permitir la medición de velocidad y aceleración.
2. Perfeccionar el diseño del sistema de inferencia borroso para lograr una mayor atenuación del chattering.
3. Utilizar los resultados de la presente investigación como material bibliográfico para estudiantes y profesores de la carrera de Automática y miembros del GARP, tomándola como referente para posteriores investigaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelsalam, Mohamed; Areed, Marwa (2012). Decoupled fuzzy sliding mode control for a synchronous motor speed control.. *International Journal of Computer Applications* **47**(11), 29–35.
- Abid, Hafedh; Chtourou, Mohamed; Toumi Ahmed (2008). Robust fuzzy sliding mode controller for discrete nonlinear systems. *International Journal of Computers, Communications and Control* **III**(1), 6–20.
- Abid, Hafedh; Chtourou, Mohamed; Toumi Ahmed (2009). Adaptive fuzzy sliding-mode control of dynamic model based car-like mobile robot. *International Journal of Fuzzy Systems* **11**(4), 272–286.
- Ahmad, O.; Papelis, Y. (2006). Comprehensive Management of Simulator Research Subjects. In: *First Driving Simulation Conference of Asia and Pacific*. Tsukaba, Japan. pp. 2–10.
- Aissaoui, Abdel; Abid, H.; Abid M. (2009). Robust fuzzy sliding mode controller design for motor driver. *Acta Electrotechnica et Informatica Vol* **9**(2), 64–71.
- Amer, A.; Sallam, E.; Elawady W. (2012). A new adaptive fuzzy sliding mode control using fuzzy self-tuning for 3 dof planar robot manipulators. *Applied Intelligence* **37**(4), 613.
- Aracil, Rafael; Saltarén, Roque; Sabater José; Reinoso Oscar (2006). Robots paralelos: Máquinas con un pasado para una robótica del futuro. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* **3**, 16–28.
- Babar, Muhammad; Wang, Shaoping (2010). Optimized fuzzy sliding mode control to enhance chattering reduction for nonlinear electro-hydraulic servo system. *International Journal of Fuzzy Systems*.
- Babuska, Robert (2001). Fuzzy and neural control. disc course lecture notes. *Delft University of Technology. Delft, the Netherlands*.

- Bartoszewicz, A.; Nowacka-Leverton, A. (2009). *Time-Varying Sliding Modes for Second and Third Orders Systems*. Springer.
- Beater, Peter (2007). *Pneumatic Drives. System Design, Modelling and Control*. Springer.
- Brun, Xavier; Belgharbi, Mazouz; Sesmat Sylvie; Thomasset Daniel; Scavarda Serge (2000). Control of an electropneumatic actuator, comparison between some linear and nonlinear control laws. *Journal of Systems and Control Engineering*.
- Burrows, C. R. (1972). *Fluid Power Servomechanisms*. Van Nostrand. London, England.
- Cappel, K. L. (1967). Motion Simulator. In: *United States Patent No. 3,295,224*. The Franklin Institute, Philadelphia. pp. 1–12.
- Changfeng, L.; Lining, S.; Dongsheng Q.; Yanwu L. (2007). Error Analysis and Compensation of Precision Parallel Robot for Sensor Locating in ICF. In: *2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2007*. China. pp. 1297–1306.
- Chen, Y.; McInroy, J.E. (2004). Decoupled Control of Flexure-jointed Hexapods using Estimated Joint-space Mass-inertia Matrix. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **12**(3), 413–421.
- Chiew, Y.S.; Jalil, M.; Hussein M. (2008). Motion Cues Visualisation of a Motion Base for Driving Simulator. In: *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics ROBIO 2008*. Bangkok, Thailand. pp. 1497–1502.
- Clavel, R. (1988). Delta: a fast robot with parallel geometry. In: *Proceedings of 18th International Symposium on industrial Robots*.
- Dehghani, M.; Shabaninia, F. (2007). Chattering elimination with fuzzy sliding mode control in parallel robots. In: *First Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems Ferdowsi University of Mashhad*.
- Fridman, L.; Levant, A. (2002). *Sliding Mode Control in Engineering*. Chap. 3. MARCEL DEKKER, INC.. New York.
- Gough, V.E.; Whitehall, S.G. (1962). Universal Tire Test Machine. In: *9th International Technical Congress F.I.S.I.T.A.*. Vol. 117. USA. pp. 117–135.

- Hahn, H. (2005). Mathematical Modeling, Control, Computer Simulation and Laboratory Experiments of a Spatial Servopneumatic Parallel Robot. *Nonlinear Dynamics*, **40**(1), 387–417.
- Izaguirre, E.; Hernández, L.; Rubio E.; Prieto P.; Hernández A. (2011). Control Desacoplado de Plataforma Neumática de 3-gdl utilizada como Simulador de Movimiento. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, **8**(4), 345–356.
- Karpenko, M.; Sepehri, N. (2006). Development and Experimental Evaluation of a Fixed-gain Nonlinear Control for a Low-cost Pneumatic Actuator. *IEEE Proceedings - Control Theory and Applications*, **143**(1), 629–640.
- Kikuuwe, R; Fujimoto, H. (2006). Proxy-based sliding mode control for accurate and safe position control. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. pp. 25–30.
- Kim, Sung-Woo; Lee, Ju-Jang (1995). Design of a fuzzy controller with fuzzy sliding surface. *FUZZY, Sets and Systems*.
- Krejnín, G. V.; Krivts, I. L. (2006). *Pneumatic Actuating Systems for Automatic Equipment*. 2nd edition ed.. CRC Press Taylor and Francis Group.
- Kwon, D-S.; Yang, G-H.; Lee C-W.; Shin J-C.; Park Y.; Jung B. (2001). Kaist Interactive Bicycle Simulator. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Seoul, Korea. pp. 2313–2318.
- Laghrouche, S.; Smaoui, M.; Plestan-F.; Brun X. (2006). Higher order sliding mode control based on optimal approach of an electropneumatic actuator. *International Journal of Control* **79**(2), 119–131.
- Lees, A.; Vanrenterghem, J.; Barton-G.; Lake M. (2007). Kinematic Response Characteristics of the CAREN Moving Platform System for use in Posture and Balance Research. *Medical Engineering and Physics*, **29**(3), 629–635.
- Lombaerts, T.J.; Chu, Q.P.; Mulder-J.A.; Joosten D.A. (2011). Modular Flight Control Reconfiguration Design and Simulation. *Control Engineering Practice*, **19**(6), 540–554.

- Merlet, J.P. (2006). *Parallel Robots*. Vol. 128. second ed.. Springer. France.
- Moreno, Hipòlit (2000). Control of a pneumatic servosystem using fuzzy logic. In: *Proceedings of 1st FPNI-PhD Symp. Hamburg*. pp. 189–201.
- Narayanan, M. S.; Chakravarty, S.; Shah H.; Krovi-N. (2010). Kinematic, Static and Workspace Analysis of a 6-PUS Parallel Manipulator. In: *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Montreal, Canada. pp. 1–8.
- Norgaard, M.; Ravn, O.; Poulsen N. K.; Hansen-L. K. (2000). *Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems*. Springer-Verlag.
- Ogbobe, P.O.; ZhengMao, Y.; Hongzhou J.; Yang C.; Junwei H. (2010). Modal Space Decoupled Controller for Hydraulically Driven 6-dof Parallel Robot. In: *2nd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE)*. Kyoto, Japan. pp. 280–284.
- Pearce and Michael (2005). Is there an alternative to fluid power?. *IEEE Journal of Computing and Control Engineering* **16**(2), 8–11.
- Pierrot, F.; Baradat, C.; Nabat V.; Company O.; Krut S.; Gouttefarde-M. (2009). Above 40g Acceleration for Pick-and-Place with a New 2-dof PKM. In: *IEEE International Conference of Robotics and Automation (ICRA-09)*. Kobe, Japan. pp. 1794–1800.
- Prieto, Pablo J. (2013). Control por modo deslizante basado en proxy de una plataforma con tres grados de libertad. Tesis de maestría. Universidad Central de Las Villas.
- Ramdani, N.; Gouttefarde, M.; Pierrot F.; Merlet J.P. (2008). First Results on the Design of High Speed Parallel Robots in Presence of Uncertainty. In: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS-08*. Nice, France. pp. 2410–2415.
- Rastko, R.; Lewis, Frank L. (2000). Deadzone compensation in motion control systems using neural networks. *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL*.
- Reid, A. A. (1992). Safety Assessment of TACOM's Crew Station/Turret Motion Base Simulator. *Research, Development and Engineering Center, Technical Report No.13549*, **1**(2), 1–63.

- Reznik, Leonid (1997). *Fuzzy Controllers*. Newnes.
- Rubio, E. (2007a). *Modelación, Identificación y Control de Actuadores Lineales electro-neumáticos para Aplicaciones Industriales*. Tesis Doctoral, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Rubio, E.; Hernández, L.; Aracil R.; Saltaren R.; Guerra J. (2009a). Implementation of Decoupled Model-Based Controller in a 2-DOF Pneumatic Platform used in Low-Cost Driving Simulators. In: *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference - Cerma 2009*. Morelos, Mexico. pp. 338–343.
- Rubio, E.; Hernández, L.; Aracil R.; Saltarén R. (2007b). Modelado, Identificación y Control de Actuadores Lineales Electro-neumáticos. Aplicación en Plataforma de Dos Grados de Libertad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 4(4), 58–69.
- Rubio, Ernesto; Hernández, Luis; Aracil Rafael; Saltarén Roque; Guerra Jorge (2009b). Implementation of decoupled model based controller in a 2 dof pneumatic platform used in low cost driving simulators. In: *IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, CERMA 09*.
- Sabrie, E.; Dufourand, P.; Gosselin C. (2004). Kinematic and Dynamic Analysis of a New Rotational Motion Simulator. In: *ROMANSY 2004*. Montreal, Canada.
- Sebastian, J. M.; Traslosheros, A.; Angel L.; Roberti F.; Carelli R. (2007). *Parallel Robot High Speed Object Tracking*. 1st edition ed.. Springer Berlin, Heidelberg.
- Sira-Ramirez, H.; Dwyer, T. (1987). Variable structure controller design for spacecraft nutation damping. *Transactions of IEEE on Automatic Control* **32**(5), 435–439.
- Slob, J.J (2008). State of the Art Driving Simulators, a Literature Survey. In: *DCT report, Control Systems Technology Group*. Eindhoven University of Technology. pp. 1–19.
- Slotine, J. J.; Li, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall. New Jersey.
- Software, MSC (2005). MSC.ADAMS BASIC FULL SIMULATION PACKAGE.
- Song, J.; Bao, X.; Ishida Y. (1997). Application of mnn trained by meka for the position control of pneumatic cylinder.. In: *Proceedings of IEEE International Conference on*

- Neural Networks*. Vol. 2. pp. 829–833.
- Sorli, M.; Gastaldi, L.; Codina E.; De las Heras S. (1999). Dynamic analysis of pneumatic actuators. *Simulation Practice and Theory* **7**(5), 589–602.
- Staicu, S. (2009). Recursive Modelling in Dynamics of Agile Wrist Spherical Parallel Robot. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **25**(2), 409–416.
- Tanaka, K.; Yamada, Y.; Sakamoto M.; Uchilado S. (1998). Model reference adaptive control with neural network for electro-pneumatic servo system. In: *Control Applications, 1998. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on*. Vol. 2. IEEE. pp. 1130–1134.
- Tanaka, K.; Yamada, Y.; Satoh T.; Uchibori A.; Uchikado S. (1999). Model reference adaptive control with multi-rate type neural network for electro-pneumatic servo system. In: *Control Applications, 1999. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on*. Vol. 2. IEEE. pp. 1716–1721.
- Tsoi, Y.H.; Xie, S.Q. (2008). Design and Control of a Parallel Robot for Ankle Rehabilitation. In: *15th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*. Auckland, New-Zealand. pp. 515–520.
- Utkin, V. ; Guldner, J.; Shi J. (1999). *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*. Taylor & Francis. New Jersey.
- Valdivia, Ariel (2012). Interfaz para la identificación y ajuste de los controladores de un simulador de conducción.. Trabajo de diploma. Universidad Central de las Villas.
- Van Damme, M.; Vanderborght, V.; Verrelst B.; Van Ham R.; Daerden-F.; Lefeber D. (2009). Proxy-based sliding mode control of a planar pneumatic manipulator. *The International Journal of Robotics Research*.
- Wobbe, F.; Kolbus, M.; Schumacher W. (2008). *Enhanced Motion Control Concepts on Parallel Robots*. 11th edition ed.. InTech Education and Publishing (Eds.) Institute of Control Engineering, Germany.
- Yañez, Ricardo (2007). Resolución de mecanismo paralelo planar 3rrr impulsado por actuadores eléctricos.

- Yang, Z.; Wu, J.; Mei J.; Gao J.; Huang T. (2008). Mechatronic Model Based Computed Torque Control of a Parallel Manipulator. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **5**(1), 123–128.
- Zabalza, I.; Ros, J. (2007). Aplicaciones Actuales de los Robots Paralelos. In: *8th Latin American Congress of Mechanical Engineering*. Cusco, Perú.

ANEXOS

Apéndice A

FUNCIONES DE MEMBRESÍA MÁS COMUNES

- **Triangular:** Definida por sus límites inferior a y superior b , y el valor modal m , tal que $a < m < b$.

$$A(x) \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{si } x \in (a, m] \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{si } x \in (m, b] \\ 0 & \text{si } x \geq b \end{cases}$$

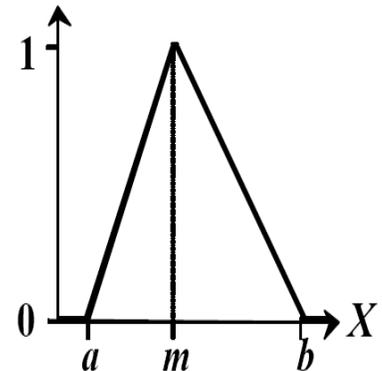


Figura A-1: Función de pertenencia tipo triangular.

- **Función Trapezoidal:** Definida por sus límites inferior a y superior d , y los límites de su soporte, b y c , inferior y superior respectivamente.

$$A(x) \begin{cases} 0 & \text{si } (x \leq a) \text{ o } (x \geq d) \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{si } x \in (a, m] \\ 1 & \text{si } x \in (b, c] \\ \frac{d-x}{d-m} & \text{si } x \in (c, d] \\ 0 & \text{si } x \geq b \end{cases}$$

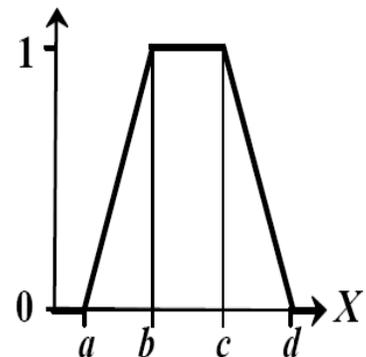


Figura A-2: Función de pertenencia tipo trapezoidal.

- **Función Gaussiana:** Definida por su valor medio m y el valor $k > 0$.

$$A(x) \{ A(x) = e^{-k(x-m)^2}$$

- Es la típica campana de Gauss.
- Cuanto mayor es k , más estrecha es la campana.

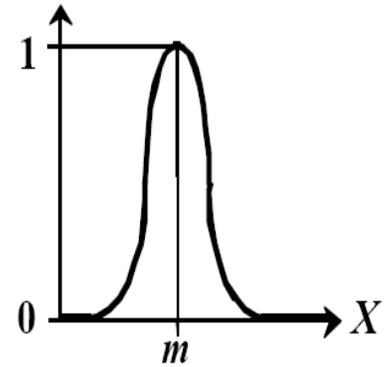
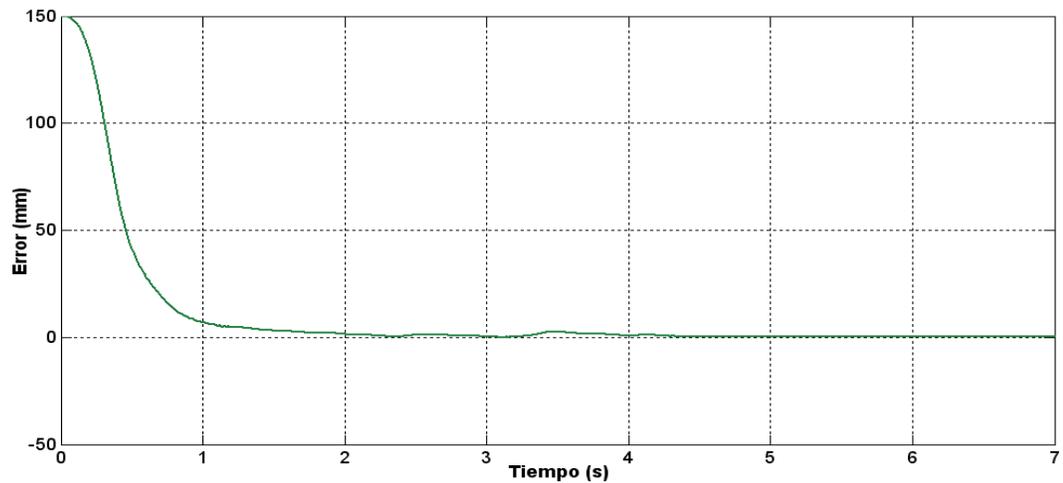


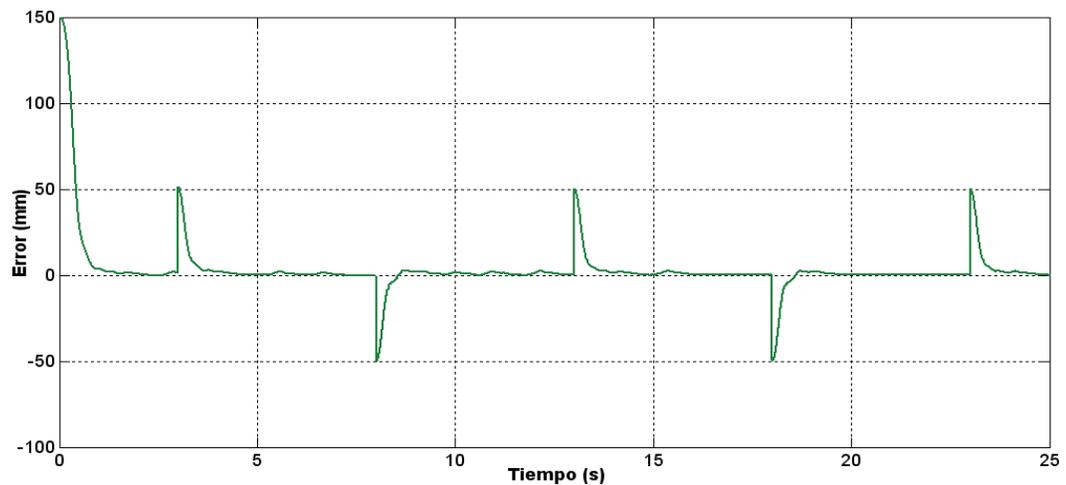
Figura A-3: Función de pertenencia tipo gaussiana.

Apéndice B

VALORES DE ERROR OBTENIDOS DURANTE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES EN LA PLATAFORMA DE 2-GDL.

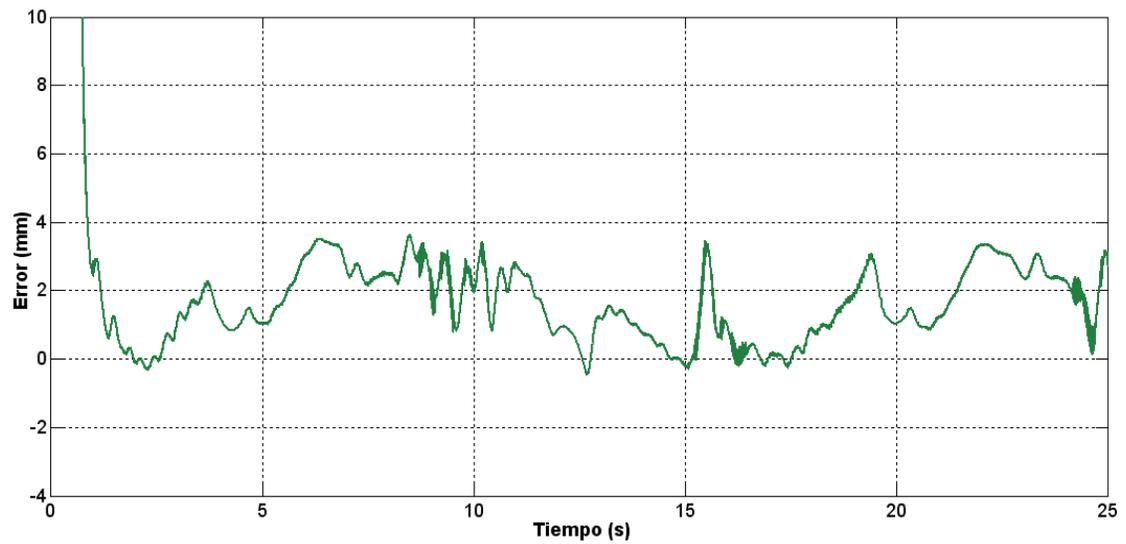


(a) Error de posición ante entrada escalón como referencia con FSMC.

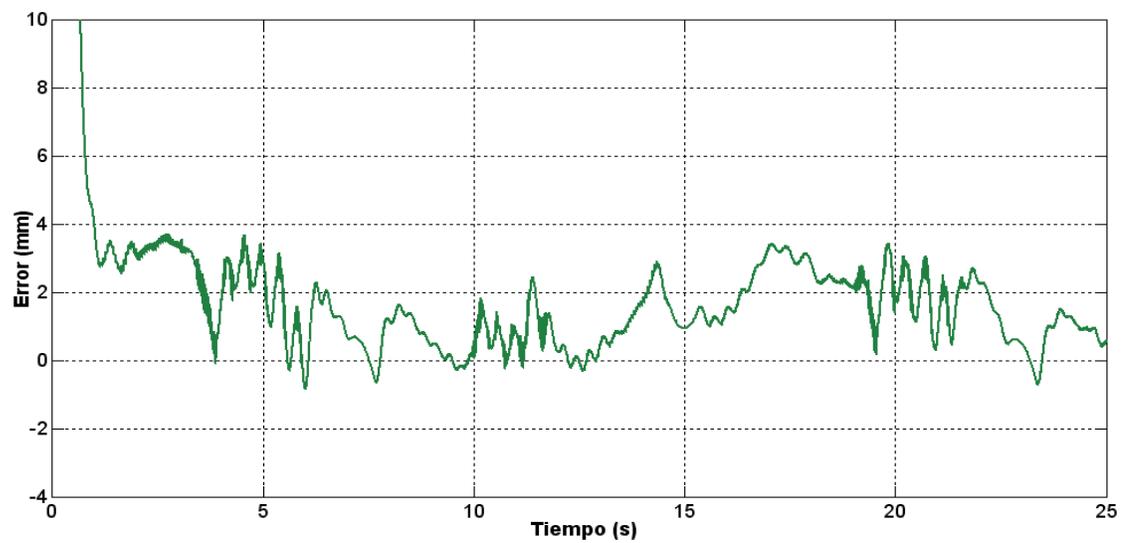


(b) Error de posición ante un tren de pulsos como referencia con FSMC.

Figura B-1: Errores de posición.



(a) Error de trayectoria ante entrada sinusoidal como referencia con FSMC (Fase de adelanto igual a 3 rad).



(b) Error de trayectoria ante entrada sinusoidal como referencia con FSMC (Fase de adelanto igual a 5 rad).

Figura B-2: Errores de trayectoria.