

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



TESIS DE MAESTRÍA

Esquema de Control en Modo Deslizante basado en Lógica Borrosa aplicado a un robot neumático.

Tesis presentada en opción al grado de
Máster en Automática

Autor: Ing. Danelis García Llerena

Tutor: Dr.C. Francisco B. Herrera Fernández
Dr.C. Pablo José Prieto Entenza

Santa Clara

2019

“Año 61 de la Revolución”

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



TESIS DE MAESTRÍA

Esquema de Control en Modo Deslizante basado en Lógica Borrosa aplicado a un robot neumático.

Tesis presentada en opción al grado de
Máster en Automática

Autor: Ing. Danelis García Llerena
email: danielisgll@inpud.co.cu

Tutor: Dr.C. Francisco B. Herrera Fernández Prof. Titular
Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV
email: herrera@uclv.edu.cu

Dr.C. Pablo José Prieto Entenza
Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Instituto Tecnológico de Tijuana
email: pablojprieto@tectijuana.edu.mx

Santa Clara

2019

“Año 61 de la Revolución”



Hago constar que la presente Tesis de Maestría fue realizada en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la maestra en Automática y Sistemas Informáticas, 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.

Ing. 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.

Ing. Dianelis García Llerena
Autor

Fecha

Yunier Valeriano Medina, 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

“Lo importante en la ciencia no es tanto obtener nuevos datos, sino descubrir nuevas formas de pensar sobre ellos.”

William Lawrence Bragg

DEDICATORIA

A mis padres,
por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mi hermano.

A mis abuelos,
por quererme y apoyarme siempre, esto también se lo debo a ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer de manera muy especial a mis padres y hermano por el apoyo, amor y comprensión a lo largo de todos estos años. A Francisco Herrera, mi tutor, le agradezco por su incansable entusiasmo, por la confianza depositada en mí y en este proyecto. A Pablo mi gratitud, por la consagración y voluntad que garantizaron el éxito de este trabajo, que sin dudas es tan de él como mío.

Muchos amigos y compañeros de trabajo han contribuido indirecta o directamente en este estudio, su interés en el avance del proyecto fue un gran empuje en momentos que otras responsabilidades demandaban mi atención, me ayudaron mucho a reconsiderar mis prioridades y metas profesionales. Agradecer además a mis amigos del INPUD, Liana, Portal y Reynier por los buenos y malos momentos, pero sobre todo por la oportunidad de su amistad y cariño.

Me gustaría agradecer al comité académico en general, al colectivo del Departamento de Automática y Sistemas Computacionales, especialmente a los miembros del GARP, a todos mis profesores por su excelente guía académica y concederme una sólida base en mi formación profesional. En particular, me gustaría dar las gracias a Valeriano por sus valiosos comentarios y opiniones que ayudaron a mejorar la calidad de esta tesis.

Agradecer a todos aquellos que apoyaron directa o indirectamente la elaboración de esta tesis. Ustedes saben quiénes son. Finalmente, no hay palabras para describir mi gratitud hacia mi familia por su infinito apoyo y amor incondicional. Gracias por estar siempre ahí para mí.

Santa Clara, Cuba, 2019

RESUMEN

Los estudios en tecnologías relacionadas con la robótica han crecido de forma significativa en los últimos años. En las últimas décadas, se ha hecho un importante avance en la investigación de diseños alternativos basados en los conceptos de manipuladores paralelos. En estos mecanismos, la utilización de cilindros neumáticos de desplazamiento lineal como elemento actuador se ha hecho frecuente. El control de estos sistemas, se ha convertido en un desafío para la comunidad científica internacional, debido al alto acoplamiento existente entre sus articulaciones actuadas, las incertidumbres asociadas al modelo dinámico altamente no lineal, y las perturbaciones externas.

A lo largo de los años el control por modo deslizante ha sido objeto de investigación tanto en el punto de vista teórico como en su implementación práctica debido a las potencialidades de dicha metodología tales como convergencia en tiempo finito, y robustez ante incertidumbres y perturbaciones acopladas. Sin embargo, el control discontinuo excita dinámicas parasitarias lo cual provoca vibraciones en la señal de mando, conocido como chattering, que atentan contra el desempeño del proceso en aplicaciones experimentales.

Una alternativa de control en modo deslizante basado en lógica borrosa se reporta en el presente documento a fin de reducir el efecto de chattering en un robot paralelo de dos grados de libertad (2-DOF) accionado por actuadores electro-neumáticos. De acuerdo con los valores de la función de la superficie, se introduce un sistema de inferencia borrosa Mamdani para ajustar la acción de control sobre los actuadores y el valor de la pendiente de la superficie deslizante para reducir al mínimo las vibraciones en la señal de mando. Es probado que el sistema es asintóticamente estable en el sentido de Lyapunov; además, aunque los actuadores neumáticos presentan altas no linealidades, los resultados experimentales muestran atenuación de chattering y la convergencia hacia la referencia.

TABLA DE CONTENIDO

	<u>Página</u>
PENSAMIENTO	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CONTROL EN ROBOTS DE ESTRUCTURA PARALELA.	8
1.1. Génesis y desarrollo de robots paralelos	8
1.1.1. Características y utilidades de los robots paralelos.	11
1.1.2. Líneas actuales de aplicación	13
1.2. Control desacoplado	15
1.3. Elementos actuadores más empleados	16
1.3.1. Actuadores neumáticos de desplazamiento lineal	17
1.4. Estrategias de control en sistemas neumáticos	20
1.4.1. Estrategias de control convencional	21
1.4.2. Control adaptativo	22
1.4.3. Control Inteligente: Sistemas basados en redes neuronales	25
1.4.4. Control Inteligente: Control basado en lógica borrosa	28
1.4.5. Control en modo deslizante	29
1.5. Consideraciones finales del capítulo	31
2. CONTROL EN MODO DESLIZANTE Y LÓGICA BORROSA PARA EL ROBOT PARALELO NEUMÁTICO DE 2 GRADOS DE LIBERTAD.	32

2.1.	Plataforma de 2 grados de libertad (2-GDL)	32
2.1.1.	Modelo dinámico del actuador neumático	33
2.2.	Control en Modo Deslizante	36
2.2.1.	Diseño del controlador	40
2.2.2.	Robustez del control en modo deslizante	42
2.2.3.	Chattering	43
2.3.	Lógica Difusa: Conceptos básicos de conjuntos difusos	44
2.3.1.	Controladores borrosos	45
2.4.	Control Deslizante basado en Lógica Borrosa	47
2.4.1.	Robustez del control en modo deslizante basado en lógica difusa	51
2.5.	Consideraciones finales	52
3.	ESQUEMA DE CONTROL FSMC APLICADO AL ROBOT PARALELO DE 2 – GDL, SIMULACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES	54
3.1.	Diseño del control en modo deslizante para el sistema neumático	54
3.1.1.	Software de simulación de sistemas mecánicos	55
3.1.2.	Resultados de Simulación con ADAMS del Control en Modo Deslizante	56
3.2.	Diseño del control en modo deslizante basado en lógica borrosa para el sistema neumático	57
3.2.1.	Resultados de Simulación con ADAMS del Control en Modo Deslizante basado en Lógica Borrosa	59
3.3.	Resultados experimentales	60
3.3.1.	Experimentos con Control por Modo Deslizante clásico	61
3.3.2.	Experimentos con Control por Modo Deslizante basado en Lógica Borrosa	61
3.4.	Adaptación dinámica de la pendiente en el Control por Modo Deslizante basado en Lógica Borrosa	63
3.5.	Consideraciones finales	67
	CONCLUSIONES	68
	RECOMENDACIONES	70
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
A.	PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DE LA AUTORA.	82

B.	VALORES DE ERROR OBTENIDOS DURANTE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES EN EL ROBOT PARALELO NEUMÁTICO DE 2-GDL. . . .	83
B.1.	Experimentos con control en modo deslizante clásico con función de saturación:	83
B.2.	Experimentos con control en modo deslizante basado en lógica borrosa:	84
B.3.	Experimentos con control en modo deslizante basado en lógica borrosa luego de adicionar una inferencia borrosa para sintonizar el valor de la pendiente λ :	85

ÍNDICE DE TABLAS

<u>Tabla</u>	<u>Página</u>
1-1. Diferencias principales entre los robots series y paralelos	12
2-1. Datos mecánicos del simulador de conducción SIMPRO	33
3-1. Reglas borrosas	59
3-2. Parámetros del experimento	61
3-3. Reglas adaptador difuso de λ	65

ÍNDICE DE FIGURAS

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
1-1. Plataformas de Gough	9
1-2. Varios tipos de Mesas multiejes para la simulación de vehículos	9
1-3. Robot Delta presentado por Clavel en aplicaciones de pick and place.	11
1-4. Robot serie (izquierda) y paralelo (derecha).	12
1-5. Varias configuraciones estructurales de robots planares.	13
1-6. Robot espacial con rotaciones alrededor de un centro.	13
1-7. Diferentes aplicaciones de robots paralelos	14
1-8. Algoritmo PID convencional.	21
1-9. Algoritmo genérico de control adaptativo.	23
1-10. Control Adaptativo por Modelo de Referencia(MRAC).	24
1-11. Control Adaptativo de auto-sintonía.	24
1-12. Esquema de una red neuronal.	26
1-13. Identificación por el método back-propagation.	26
2-1. Plataforma de 2 GDL y su arquitectura geométrica	33
2-2. Esquema de un sistema neumático.	34
2-3. Diagrama de bloques para la identificación dinámica del sistema neumático	35
2-4. Efecto del control en modo deslizante sobre la trayectoria de un sistema de segundo orden representado en el plano-fase.	39
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 $x_d(t)$	41

2-6. Representación del efecto chattering resultado de la acción del control deslizante.	43
2-7. Forma típica de funciones de pertenencia: 1-triangular, 2-trapezoidal, 3-gaussiana, 4-campana generalizada, 5-singleton.	45
2-8. Esquema de control borroso.	46
2-9. Esquema de control FSMC con la sustitución del elemento discontinuo.	48
2-10. Esquema de control FSMC teniendo en cuenta la derivada de la superficie deslizante.	49
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.	50
3-1. Diagrama de bloques en Simulink de la ley de control SMC.	55
3-2. Modelo en ADAMS de la plataforma de 2 GDL y Esquema en ADAMS-Simulink del control SMC.	56
3-3. Simulación en ADAMS ante entrada escalón como referencia.	57
3-4. Diagrama de bloques en Simulink de la ley de control FSMC.	58
3-5. Funciones de pertenencia para las variables de entrada y salida.	58
3-6. Simulación en ADAMS ante entrada escalón como referencia con FSMC.	60
3-7. Simulación en ADAMS ante entrada sinusoidal como referencia con FSMC.	60
3-8. Respuesta de un actuador neumático del robot paralelo con la sustitución del elemento $sgn(s(t))$ por $sat(s/\phi)$ ante entrada escalón como referencia.	61
3-9. Respuesta del actuador neumático correspondiente al ángulo de ladeo ante entrada escalón de referencia en un experimento con FSMC.	62
3-10. Respuesta del actuador neumático correspondiente al ángulo de cabeceo ante pulsos de referencia en un experimento con FSMC.	62
3-11. Respuesta del actuador neumático correspondiente al ángulo de cabeceo ante cambio de referencia en un experimento con FSMC.	63
3-12. Derivada de la función de Lyapunov $\dot{V}(x)$ en los primeros instantes de experimentos para ambos cilindros.	63

3-13. Varios valores de la pendiente λ de la superficie deslizante.	64
3-14. Función de pertenencia para λ	64
3-15. Diagrama de bloques en Simulink de la ley de control FSMC con adaptación de pendiente λ	65
3-16. Respuesta del actuador neumático correspondiente al ángulo de ladeo ante entrada escalón de referencia en un experimento con FSMC con ajuste mediante inferencia borrosa de λ	66
3-17. Respuesta del actuador neumático correspondiente al ángulo de cabeceo ante pulsos de referencia en un experimento con FSMC con ajuste mediante inferencia borrosa de λ	66
3-18. Respuesta del actuador neumático correspondiente al ángulo de ladeo ante cambio de referencia en un experimento con FSMC con ajuste mediante inferencia borrosa de λ	67
B-1. Error de posición ante entrada escalón como referencia en un experimento con SMC.	83
B-2. Error de posición ante entrada escalón como referencia en un experimento con FSMC.	84
B-3. Error de posición ante pulsos como referencia en un experimento con FSMC.	84
B-4. Error de trayectoria ante entrada sinusoidal como referencia en un experimento con FSMC (Fase de adelanto igual a 3 rad).	84
B-5. Error de posición ante entrada escalón como referencia en un experimento con FSMC con ajuste mediante inferencia borrosa de λ	85
B-6. Error de posición ante pulsos como referencia en un experimento con FSMC con ajuste mediante inferencia borrosa de λ	85
B-7. Error de trayectoria ante entrada sinusoidal como referencia en un experimento con FSMC con ajuste mediante inferencia borrosa de λ	85

INTRODUCCIÓN

En los países más desarrollados, las inversiones en tecnologías relacionadas con la robótica han crecido de forma significativa y muy por encima de otros sectores, siendo consideradas una expresión de progreso y desarrollo tecnológico. Según todos los indicadores internacionales, la nueva sociedad robótica de consumo está por llegar en la próxima década. En un plazo muy breve, se pondrán a la venta robots de servicio con aplicaciones de asistencia personal a niños, ancianos y discapacitados, educación, entretenimiento, vigilancia, construcción, recolección de frutas y más. La innovación en robótica no solo tiene impacto socioeconómico en el sector productivo como mecanismo para elevar la productividad y calidad de los productos, también afecta fundamentalmente al sistema de producción y a la organización del proceso productivo en sí mismo.

De acuerdo al informe de la Federación Internacional de Robótica, *World Robotics 2018*, el parque mundial de robots industriales instalados a finales de 2017 era próximo a los 2.098.000 con índices de crecimiento sostenido del orden del 14 % anual. La mayoría de estos fueron instalados en la industria manufacturera, y alrededor del 35 % y 41 % en la industria automovilística y de componentes electrónicos respectivamente. Las aplicaciones más demandadas fueron las de soldadura y manipulación (IFR, 2018a). Por su parte el número de robots de servicio profesional vendidos alcanzó la cifra estimada de 109.543 unidades distribuidas en aplicaciones de defensa, logística, relaciones públicas, agricultura, rehabilitación física y medicina principalmente. Mientras que el número de robots de servicio para uso personal o doméstico alcanzó un incremento de 8.5 millones de unidades (IFR, 2018b).

Los sectores a los que actualmente está orientada la robótica son muy amplios desde la industria manufacturera (automóvil, máquina herramienta) (Jiaqi, 2017; Antonelli, 2017) hasta la exploración de ambientes hostiles, tales como entornos submarinos (Chutia, 2017; Scaradozzi, 2017) y el espacio (Gao, 2017). Sin embargo, la robotización no solo atañe a sectores industriales, sino también a una gran variedad de aplicaciones sociales, tales como asistencia personal (Henkemans, 2017), medicina (Tung, 2017), limpieza, inspección y mantenimiento de infraestructuras (Jiang, 2017; Lu, 2018), entre otras.

Se puede afirmar sin ninguna duda, que la robótica actual es una tecnología madura, se encuentra en la vanguardia de la integración de los más modernos avances en diferentes sectores, tales como actuadores, sensores, materiales, mecánica, comunicaciones, hardware

y software, etc. Es una tecnología en continuo desarrollo, aumentando sus prestaciones y consecuentemente el campo de aplicaciones, por lo que la investigación y desarrollo en robótica son claves para nuestro país, abriendo grandes posibilidades económicas y de progreso que pueden ser exportadas a otros países y sectores. Finalmente hay que señalar que la independencia y madurez tecnológica de nuestro país (o nuestras empresas) en áreas como la robótica, así como el nivel de formación técnica de los trabajadores permitirá la rápida absorción de estas tecnologías.

En las últimas décadas, se ha hecho un importante avance en la investigación de diseños alternativos de manipuladores basados en los conceptos de cadena cinemática cerrada, para mejorar la rigidez y la razón peso-carga de los manipuladores convencionales de cadena abierta (Wu, 2015; Lin, 2016). Por lo anterior, el interés en los robots paralelos se ha incrementado en los últimos años (Andrievsky, 2014; Chun-Peng, 2018).

En los robots paralelos la utilización de cilindros neumáticos de desplazamiento lineal como elemento actuador se ha hecho frecuente. Estos elementos se han aplicado satisfactoriamente en el posicionamiento continuo de robots paralelos, plataformas de simulación, sistemas de carga/descarga y otros (Tao, 2014; Shang, 2016). Ellos han demostrado ser la solución más económica para plataformas de simuladores y juegos (Andrievsky, 2014); ya 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 (Hirano, 2014; Chun-Peng, 2018).

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 (Rubio, 2009a; Meng, 2014). La presencia de estas no linealidades confiere al problema del control de movimiento vital importancia por la complejidad que implican los algoritmos (Laski, 2015) necesitando soluciones particulares de implementación.

Al trabajar con estructuras paralelas accionadas por cilindros neumáticos, los diseñadores se enfrentan al desafío de diseñar esquemas de control para procesos multivariables, de arquitecturas cinemáticas complejas, complicados modelos dinámicos altamente no lineales y de alta interacción, gran integración sensorial y exigentes especificaciones para los lazos de control (Nalluri, 2009; Shang, 2016), por lo que el control de trayectoria de estos sistemas se convierte en un reto para la comunidad científica internacional.

El campo de la robótica 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 consolas de simulación de movimiento, con resultados investigativos y de aplicación industrial (Izaguirre, 2011).

Los estudios realizados buscan extender el desarrollo logrado en simuladores de conducción implementando plataformas paralelas. Dado que actualmente la robótica y los ambientes virtuales han alcanzado amplios desarrollos tecnológicos en áreas como la defensa, donde se hace necesaria la implementación de modernas herramientas de preparación para el combate, insertando a los usuarios en ambientes imaginarios en tiempo real, dándole así la instrucción de las unidades y la planificación de las misiones. Estos nuevos dispositivos de aprendizaje de menor inversión y gran alcance, generan un nivel de preparación superior y permitan dar un seguimiento personalizado al usuario en su desarrollo profesional. El aprendizaje se desarrolla en un entorno seguro y los conocimientos adquiridos son fácilmente trasladados al mundo real. Su uso contribuye a la disminución de gastos de operación, tales como mantenimiento y combustible.

Entre los estudios realizados en el marco de dicho convenio podemos citar el realizado a partir de un estudio del estado del arte de los algoritmos empleados en el control de accionamientos neumáticos, para desarrollar un controlador empotrado aplicado a la plataforma neumática de dos grados de libertad ($2 - GDL$) construida en el CIDSIM (Rubio, 2007a). Los trabajos de investigación con dicha plataforma se centraron en la obtención del modelo de la misma, estableciendo una estrategia de control robusta desacoplada para el posicionamiento del sistema en su conjunto, que fue validada en la práctica (Rubio, 2007b), así como la implementación de dichos algoritmos en sistemas empotrados (Machado, 2007).

A pesar de contar con estrategias de control articular probadas y validadas experimentalmente (Izaguirre, 2012), estas requieren como base la existencia de un modelo preciso que tenga en cuenta las complejidades dinámicas del sistema, a fin de lidiar con las siguientes problemáticas:

Carácter acoplado del sistema: No siempre es aceptable la suposición de que el robot es una serie de eslabones dinámicamente desacoplados, de forma que el movimiento de uno de ellos no afecta a los demás (Han, 2018). Hay que considerar la existencia de inevitables interacciones dinámicas entre los actuadores del robot y bajo dichas consideraciones reales controlar el sistema.

Modelos del sistema: Las ecuaciones cinemáticas y dinámicas del sistema son multivariantes y presentan un carácter altamente no lineal. En particular, el modelo cinemático directo no presenta solución única, y hasta el momento, no existen algoritmos eficientes

para hallar su solución en tiempo real (Huang, 2012). El modelo dinámico debe ser lo suficientemente preciso, para poder representar lo más fielmente posible la dinámica de la planta, pero en contraposición, debe poseer simplicidad para su implementación dentro del lazo a bajos períodos de muestreo (Andrievsky, 2014; Shang, 2016).

Actuadores del robot: La presencia de actuadores electroneumáticos de gran potencia, los efectos de compresibilidad del aire, fuerzas de fricción, etc, hacen que se presenten fenómenos indeseables de no linealidad, perturbaciones dinámicas y variación de los parámetros del modelo (Meng, 2014); resultando necesario trabajar con un modelo no lineal, o bien, un modelo lineal aproximado.

Un exacto control de la trayectoria en los robots paralelos manipuladores es clave para cumplir con los requerimientos del sistema, en donde, muy a menudo, estos dispositivos requieren el seguimiento de una trayectoria deseada para desempeñar su labor. 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. 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 (Shang, 2016; Martínez-Jiménez, 2018). Sin embargo los controladores reportados, para lograr robustez ante las reconocidas variaciones en los parámetros de la planta a lo largo de la carrera del cilindro, necesitan sensores adicionales o resultan algoritmos de control de una complejidad tal que limita los dispositivos de cómputo a emplear.

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 (Kapoor, 2013b; Prieto, 2018). 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 (Cazarez, 2013).

Aunque las predicciones teóricas apuntan al extraordinario desempeño del sistema, algunos trabajos experimentales indican limitaciones en la práctica debido a la aparición de conmutaciones a alta frecuencia en la acción de mando, problema 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 (Shtessel, 2014).

Hoy en día existen avances en la computación, electrónica digital y en el procesamiento de señales que permiten la aplicación de nuevas técnicas que permiten mejorar el desempeño de este algoritmo. Diversos autores han propuesto alternativas de solución al problema, aunque no se han obtenido buenos resultados dado que por un lado, si se quiere ganar

en robustez se pueden generar oscilaciones y si se desea eliminarlas se pierde precisión (Boiko, 2013; Prieto, 2013). Entre las alternativas desarrolladas se destaca la combinación con técnicas basadas en sistemas de inferencia difusa para solucionar esta problemática (Nazir, 2010; Kapoor, 2013a; Prieto, 2017a). De ahí que una cantidad importante de investigadores han desarrollado variantes de control en modo deslizante combinado con sistemas difusos en aras de tomar ventajas de ambas metodologías (Prieto, 2015, 2017b).

Por todo ello, se hace necesario diseñar un esquema de control que, a pesar de las dificultades mencionadas anteriormente, garantice el cumplimiento de los índices de desempeño del robot paralelo bajo estudio, de manera particular en aplicaciones relativas al control de posición, planteándose el siguiente problema científico:

Problema científico: Debido al carácter acoplado y altamente no lineal de los mecanismos paralelos, producto de efectos de compresibilidad y fuerzas de fricción del sistema electro-neumático, holguras en las articulaciones e inercia del sistema, no se cuenta con un esquema de control que asegure robustez y altos índices de desempeño con ausencia de vibraciones en la señal de mando, sobre todo en una aplicación de tipo industrial, como la del simulador de movimiento.

El **objeto de investigación** se corresponde con el control de robots paralelos; y se define que el **campo de investigación**, se enmarca en el control de la trayectoria de un robot paralelo neumático, en aplicación industrial de simulador de movimiento,

Objetivo general: Desarrollar un esquema de control en modo deslizante basado en lógica borrosa para un robot paralelo de dos grados de libertad que garantice estabilidad, robustez, y atenuación del efecto de chattering producido por las no linealidades y dinámicas no modeladas de la planta.

Objetivos específicos:

1. Analizar los fundamentos teóricos en relación al proceso de control de robots paralelos neumáticos en la bibliografía especializada.
2. Establecer una metodología para el diseño de la estrategia de control por modo deslizante combinado con lógica borrosa para el sistema objeto de estudio.
3. Ajustar 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.
4. Validar el desempeño del algoritmo de control, mediante pruebas de simulación y experimentos con el robot.

Una vez realizada la revisión bibliográfica, considerando las posibles respuestas a las problemáticas científicas y después de confeccionado el marco teórico, que se describe en detalles en el capítulo uno, se plantea la siguiente hipótesis de investigación:

Hipótesis: *Un esquema de control en modo deslizante basado en lógica borrosa que prescindiendo del modelo dinámico del robot no exhibe el fenómeno del chattering, garantiza el cumplimiento de los índices de desempeño del simulador de movimiento de dos grados de libertad y asegura robustez y estabilidad a pesar del carácter acoplado y las no linealidades del sistema.*

Para cumplir con los objetivos del trabajo se consideran las siguientes tareas investigativas:

- Análisis de la literatura especializada con el tema objeto de investigación.
- Descripción del robot paralelo neumático objeto de estudio.
- Descripción de la metodología para el diseño de la estrategia de control en modo deslizante basado en lógica borrosa para posicionamiento continuo de los actuadores del robot.
- Ajuste del esquema de control en modo deslizante basado en lógica borrosa en función de las propiedades de estabilidad.
- Evaluación de la robustez de la estrategia de control presentada.
- Valoración del desempeño en aplicaciones de seguimiento de trayectoria de la estrategia de control en la plataforma de dos grados de libertad mediante simulación y pruebas experimentales.
- Elaboración del informe científico de la investigación.

La **novedad científica** del trabajo, radica en haber implementado una estrategia de control de trayectoria en modo deslizante basado en lógica borrosa para una estructura robótica paralela de dos grados de libertad accionada por cilindros neumáticos que prescindiendo del modelo dinámico del robot, de la realimentación de la velocidad y aceleración del sistema y, garantiza el cumplimiento de los índices de desempeño del sistema, en relación a las exigencias de un simulador industrial de movimiento, cuya solución no se encuentra reportada en una aplicación similar para este tipo de robot paralelo.

Las publicaciones científicas que contienen estos resultados se presentan en el Anexo [A](#).

Organización del Informe

El informe investigativo está formado por la introducción, el desarrollo organizado en tres capítulos, las conclusiones, seguido de las recomendaciones relativas a investigaciones futuras, y finalmente, las 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 un análisis de los principales aspectos relacionados con robots paralelos y actuadores neumáticos abarcando los fundamentos teóricos básicos del diseño de esquemas de control para este tipo de sistemas. Se aborda el marco teórico con un enfoque dirigido a concebir el planteamiento de la hipótesis de la tesis sobre la base de una actualizada revisión bibliográfica. Se incursiona en los conceptos asociados a este campo del conocimiento, disponiendo de la base teórica para asimilar los

aspectos tratados en capítulos siguientes. Finalmente, se efectúa una evaluación crítica de los esquemas de control de trayectoria aplicados en robots paralelos.

CAPÍTULO II: En el segundo capítulo se exponen las principales características constructivas y de funcionamiento del robot paralelo de 2-GDL SIMPRO utilizado como caso de estudio. Se realiza una descripción del modelo no lineal del sistema electro-neumático. 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 hace énfasis en la descripción de las diferentes variantes de solución del chattering. Finalmente se aborda el control en modo deslizante basado en lógica borrosa (FSMC) hasta llegar al diagrama de bloques propuesto.

CAPÍTULO III: En el capítulo tres se implementa un esquema de control en modo deslizante basado en lógica borrosa acompañado de la evaluación de la robustez del lazo. Se hace una descripción del paquete de simulación ADAMS, utilizado para realizar las simulaciones. Para confirmar el cumplimiento de los requisitos de diseño, se procede con la simulación del sistema de control, seguido de las correspondientes pruebas experimentales. Se efectúa el análisis de estabilidad del esquema en su conjunto. Los resultados arrojados por las pruebas experimentales se incluyen al final del capítulo, demostrándose el desempeño del sistema en una aplicación de simulador de movimiento.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CONTROL EN ROBOTS DE ESTRUCTURA PARALELA.

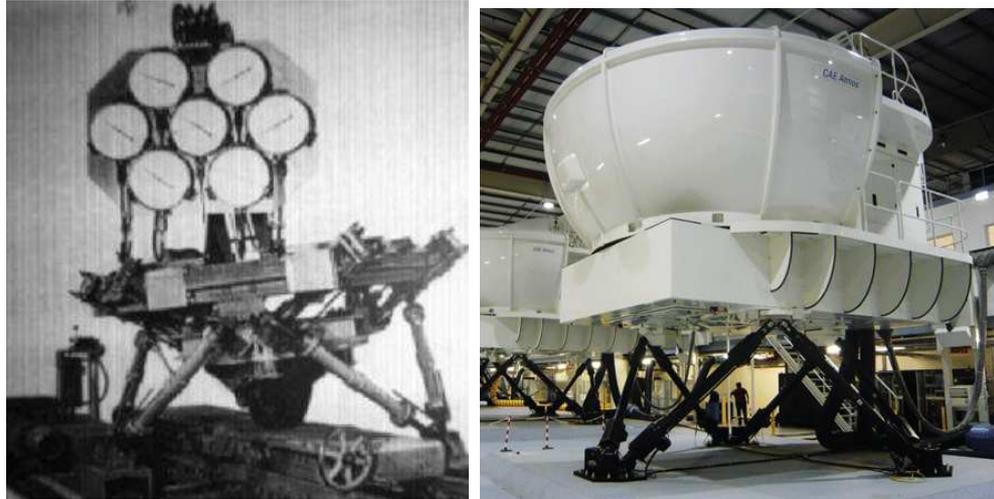
En este capítulo se realiza un análisis de los principales aspectos relacionados con robots paralelos y actuadores neumáticos abarcando los fundamentos teóricos básicos del diseño de esquemas de control para este tipo de sistemas. Se aborda el marco teórico con un enfoque dirigido a concebir el planteamiento de la hipótesis de la tesis sobre la base de una actualizada revisión bibliográfica. Se incursiona en los conceptos asociados a este campo del conocimiento, disponiendo de la base teórica para asimilar los aspectos tratados en capítulos siguientes. Finalmente, se efectúa una evaluación crítica de los esquemas de control de trayectoria aplicados en robots paralelos.

1.1. Génesis y desarrollo de robots paralelos

El interés en el desarrollo de simuladores de movimiento fue el precedente para la investigación y desarrollo de los robots paralelos actuales. 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 ([Huang, 2012](#)).

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, figura 1-1 (a) ([Merlet, 2006](#); [Aracil, 2006](#)). Esta plataforma móvil de seis grados de libertad fue empleada para la revisión del comportamiento de neumáticos de aviación bajo cargas aplicadas a diferentes ejes, intentando simular el aterrizaje de un avión y 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, que distribuyen la carga, de



(a) Plataforma de Gough presentada en 1947

(b) Plataforma de Gough moderna

Figura 1-1: Plataformas de Gough

modo que cada uno de sus 6 actuadores soporta aproximadamente $1/6$ de los esfuerzos totales, siendo además, estos esfuerzos de tracción y compresión, los que proporcionan gran rigidez al mecanismo; 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.

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](#)).

Con el tiempo, la arquitectura de la plataforma de Stewart fue sufriendo modificaciones. 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 ([Lombaerts, 2011](#); [Andrievsky, 2014](#)). En este sentido se destacan además novedosos simuladores de vuelo para el entrenamiento de pilotos, entre ellos, los simuladores de vuelo de la NASA, figura 1-1b ([Slob, 2008](#); [Huang, 2018](#)), 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](#)).

Más tarde en 1978, Hunt sugirió que los mecanismos actuados de forma paralela de los simuladores de vuelo, se usaran como robots manipuladores y destacó, que los manipuladores paralelos requerían de un estudio más detallado en el contexto de las aplicaciones robóticas a la vista de las ventajas en cuanto rigidez y precisión respecto a los robots serie convencionales ([Hunt, 1978](#)). Por otra parte, en 1979 McCallion y Pham 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. La gran rigidez asegura que las deformaciones de los actuadores sean mínimas. Esta característica contribuye en gran manera a la precisión en el posicionamiento del manipulador ([Valdez-Yañez, 2007](#)).

Dadas las principales limitaciones de la plataforma de Stewart en cuanto a espacio de trabajo reducido, dificultad en la resolución de la cinemática directa y complejidad en el diseño mecánico, comenzaron a desarrollarse diferentes estructuras paralelas con menos grados de libertad. En comparación con un manipulador paralelo de 6 grados de libertad, un manipulador paralelo de menos grados de libertad tiene como ventajas, un diseño mecánico más simple, un bajo coste de fabricación, un espacio de trabajo mayor y un controlador más sencillo ([Huang, 2012](#)).

En la década del '80 Raymond Clavel ([Clavel, 1988](#)) presenta sus estudios sobre el robot paralelo *DELTA*, figura 1-3, uno de los diseños paralelos más acertados con varios cientos de estructuras activas en todo el mundo. La idea básica detrás del diseño del robot Delta es el uso de paralelogramos para construir una estructura paralela robusta con tres grados de libertad de traslación y uno rotatorio ([Shi, 2013](#)).



Figura 1–3: Robot Delta presentado por Clavel en aplicaciones de pick and place.

El uso de actuadores montados en la base y la escasa masa de los acoplamientos permiten altas aceleraciones en la plataforma móvil. Esto hace del Delta el perfecto candidato para operaciones de posicionamiento de objetos ligeros (desde $10g$ hasta $1kg$). Los robots DELTA disponibles en el mercado tienen un espacio de trabajo cilíndrico con 1 m de diámetro y 0.2 m de altura (Hirano, 2014; Lin, 2016). Actualmente, se construyen algunos prototipos de robots Delta capaces de mover objetos pesados.

1.1.1. Características y utilidades de los robots paralelos.

Aunque no es nuevo, el concepto de *robot paralelo* no es muy común, pues los robots industriales típicamente usados son mecanismos antropomórficos de cadena abierta, con eslabones que actúan generalmente en serie (uno a continuación de otro). Los manipuladores seriales usualmente tienen gran alcance, un área de trabajo amplia y buena maniobrabilidad para alcanzar pequeños espacios; no obstante, este manipulador tiene una rigidez muy mala, una dinámica pobre a velocidades altas y una dinámica de carga compleja en condiciones de operación (Huang, 2012).

Los robots paralelos, también denominados máquinas cinemáticas paralelas o manipuladores paralelos, 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 (Huang, 2012).

Ambas arquitecturas, representadas en la figura 1–4, difieren en numerosos aspectos los cuales, en esencia, definen sus principales características, tabla 1–1. De hecho existe una extraña dualidad entre ambos tipos de mecanismos, ya que un problema de difícil solución para un tipo de estructura, es fácilmente resoluble por el otro tipo de estructura, y viceversa. 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 (izquierda) y paralelo (derecha).
 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

Existe una gran variedad de configuraciones mecánicas para este tipo de robots, según sea la estructura de las cadenas cinemáticas que unen la base con el efector final. La topología o arquitectura del 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 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 (Merlet, 2006). Por otro lado, un manipulador paralelo con un diseño de geometría variable es capaz de modificar sus dimensiones para alcanzar nuevas configuraciones (Sánchez, 2016).

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).

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 (Firmani, 2009; Ruizhou, 2018).



Figura 1–5: Varias configuraciones estructurales de robots planares.

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 ([Essomba, 2016](#); [Landure, 2018](#)).

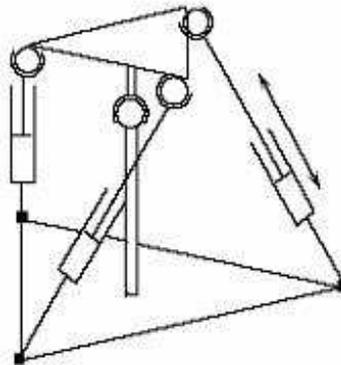


Figura 1–6: Robot espacial con rotaciones alrededor de un centro.

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 ([Domínguez-Velazco, 2007](#)).

1.1.2. Líneas actuales de aplicación

Debido a la profundización en el estudio del funcionamiento de los robots paralelos, y al aumento de la capacidad de cómputo de los nuevos procesadores, se ha extendido el

uso de los mismos en una gran cantidad de aplicaciones. La tendencia es la aplicación en estaciones de mecanizado, aunque continúan los desarrollos en las primeras aplicaciones de simuladores de vuelo, y comienzan a aparecer numerosas aplicaciones más específicas, tales como el diseño de muñecas en brazos manipuladores, y el diseño de maestros y esclavos en aplicaciones de teleoperación.

Los simuladores de movimiento por ejemplo, continúan con 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 (Pradipta, 2013), 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 (Andrievsky, 2014).

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 (Dalvand, 2013). De manera creciente en el campo de la rehabilitación médica (Tsoi, 2008; Essomba, 2016), 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) Aplicaciones médicas

(b) Aplicaciones industriales

Figura 1–7: Diferentes aplicaciones de robots paralelos

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. Entre los robots paralelos, el que más impacto industrial ha tenido hasta la fecha es el robot DELTA. Este robot se caracteriza por ser muy liviano y veloz, además de poseer una configuración cinemática

sencilla basada en paralelogramos. A nivel industrial este robot se utiliza en aplicaciones “*pick and place*”, es decir donde se requiere reposicionar objetos, una aplicación muy común a nivel industrial y llevada a cabo en la producción de alimentos, componentes electrónicos, farmacéuticos, manipulación de materiales, empaques, entre otros (Brinker, 2015).

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 (Serje-Martínez, 2017). 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. 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 (Han, 2018).

La precisión de un robot paralelo no sólo depende del control, sino también del buen conocimiento de sus características geométricas. Además de las tolerancias de fabricación, otros factores intervienen en la precisión del robot (Huang, 2012; Xiong, 2018). Wang y Masory demostraron que en una plataforma de Gough son necesarios 132 parámetros para describir sus características geométricas. Sin embargo mediante un cuidadoso diseño, estos parámetros se pueden reducir al conjunto de coordenadas articulares (36 parámetros) y los recorridos de los actuadores (6 parámetros) (Wang, 1995). El análisis de precisión de

posicionamiento de robots paralelos sigue vigente como un problema por resolver, aunque ha sido tratado por varios científicos (Cuong, 2015).

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.

1.3. Elementos actuadores más empleados

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 (Patel, 2016). De esta manera, los actuadores se encargan de producir las fuerzas y/o torques para generar el movimiento de las estructuras mecánicas del robot según las ordenes dadas por la unidad de control. En robótica, los más usados son clasificados de acuerdo a la dos criterios fundamentales (Valdez-Yañez, 2007):

- Según el **tipo de movimiento generado** se distinguen: los **actuadores lineales**, que desarrollan fuerza y movimiento de traslación en la misma dirección que la de la estructura a la cual están conectados, 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 y se clasifican en: cilindros neumáticos, de simple efecto y doble efecto; motores neumáticos, de aletas rotativas y pistones axiales;
 - **actuadores hidráulicos**, cuya potencia se basa en el fluido hidráulico presurizado y se clasifican en cilindro hidráulico y motor hidráulico;
 - **actuadores eléctricos**, cuya potencia se genera a partir de la energía eléctrica y se clasifican en: actuadores eléctricos, motores de corriente continua (DC), controlados por inducido y controlados por excitación; motores de corriente alterna (AC), sincrónicos y asincrónicos y motores paso a paso.

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.

En el caso de los motores neumáticos se obtiene el movimiento de rotación de un eje mediante aire a presión. Los más frecuentemente usados son los motores de aletas rotativas y los motores de pistones auxiliares (Krejcin, 2006). El arranque es rápido, pueden trabajar con velocidades variables sin necesidad de un control complejo y son capaces de asumir sobrecargas sin consecuencias posteriores. Se pueden arrancar y parar de forma ilimitada, el arranque, paro y cambio de sentido de giro son instantáneos, incluso cuando el motor esté funcionando a plena carga. Los motores neumáticos rotativos suelen ser de uso apropiado en robótica, empleándose habitualmente como elementos reductores de velocidad.

Los actuadores neumáticos de desplazamiento lineal constituyen una tecnología que se ha venido acoplando 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 (Lin, 2016). 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 (Rubio, 2009b). 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. 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 (Mattila, 2017).

Sin embargo, 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 (Barrientos, 2007). 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.

Los actuadores eléctricos en los robots industriales se identifican por la facilidad de control, sencillez y precisión (Barrientos, 2007). Generalmente se emplean cuando el movimiento requiere de un número de posiciones intermedias que se deben cambiar fácilmente.

1.3.1. 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

fuerza posee cualidades excelentes, propias del elemento de base ([Brun, 2000](#); [Laski, 2015](#)), entre estas cabe subrayar:

- El aire es abundante, barato y limpio (no provoca contaminación)
- No está sujeto a las limitaciones de temperatura de los fluidos hidráulicos por lo que carece del peligro de combustión o alteración con la temperatura.
- Los gases de escape del actuador no necesitan ser recolectados, por lo que las líneas de retorno de fluidos son innecesarias y el almacenamiento a largo plazo no es un problema porque los sistemas neumáticos están virtualmente secos, de esta manera se transporta y almacena sin dificultad.
- El actuador neumático tiene un peso específico más bajo y una tasa de potencia más alta (relación de par de torsión a inercia) que un actuador electromecánico equivalente.

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](#); [Hirano, 2014](#)).

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](#); [Meng, 2017](#)).

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 (Krejnin, 2006; Beater, 2007).

El posicionamiento continuo de las cargas, con actuadores lineales electro-neumáticos, ha resultado ser un complejo desafío para el diseño de sistemas de control. Esto corresponde esencialmente a que la dinámica de los actuadores lineales electro-neumáticos es altamente no lineal causando movimientos no uniformes en los pistones cuando se realizan avances lentos con carga aplicada. Las principales no linealidades presentes en actuadores neumáticos están motivados por la baja rigidez (causada por la compresibilidad de aire) (Andrighetto, 2006), la presencia de zona muerta en las servoválvulas (Valdiero, 2008), el comportamiento intrínsecamente no lineal del flujo de aire a través del orificio de las válvulas (Rao, 2008), la existencia de elevadas fuerzas de fricción estáticas y dinámicas entre el cilindro y el pistón, las variaciones de parámetros y el bajo amortiguamiento de los sistemas de actuadores, que hacen que sea difícil lograr el control de movimiento preciso (Hirano, 2014).

En este sentido se han propuesto varios enfoques para modelar con elevada precisión el comportamiento de los actuadores neumáticos. Uno de los métodos ampliamente utilizados para encontrar el modelo matemático del actuador neumático es el análisis teórico. El análisis de los actuadores neumáticos requiere una combinación de termodinámica, dinámica de fluidos y dinámica del movimiento. Para construir un modelo matemático, deben incluirse tres consideraciones principales (Ali, 2009; Patel, 2016):

- 1) La determinación de los caudales de masa a través de la válvula.
- 2) La determinación de la presión, volumen y temperatura del aire en el cilindro.
- 3) La determinación de la dinámica de la carga.

Dos formulaciones diferentes para modelar un actuador neumático se presentaron de acuerdo a estas consideraciones. En la primera se supuso una transformación termodinámica del aire y la simulación se llevó a cabo en el entorno Matlab-Simulink, mientras que en la segunda se introdujo también la ecuación de energía, por lo que se consideró el intercambio térmico entre las cámaras y el ambiente externo (Mattiazzo, 1999).

Posteriormente, un modelo matemático detallado de actuadores neumáticos de doble efecto controlados con válvulas de carrete proporcionales fue desarrollado. Efectos de flujo no

lineal a través de la válvula, la compresibilidad del aire en las cámaras del cilindro, las fugas entre las cámaras, zona muerta, retardo de tiempo y atenuación fueron considerados cuidadosamente. Se realizaron experimentos de identificación del sistema, la simulación numérica y validación del modelo para dos tipos de cilindros. Este modelo matemático se utiliza en el desarrollo de controladores de fuerza no lineal de alto rendimiento, con aplicaciones en la teleoperación, interfaces hápticas y robótica (Edmond, 2001).

La fricción no lineal es el factor más importante que afecta a la ecuación de movimiento. La fricción es un fenómeno no lineal difícil de describir analíticamente. La fricción a menudo cambia con el tiempo y puede depender de una manera desconocida de factores ambientales, como la temperatura y el estado del lubricante. Una metodología para derivar un modelo dinámico no lineal para un sistema servo neumático se presentó en (Shu, 2005). El modelo incluye dinámica de cilindros, movimiento de carga útil, fricción y características de las válvulas así como métodos para el estimado de los parámetros a partir de experimentos simples. Se incluyeron resultados experimentales demostrando la capacidad del modelo para predecir la posición medida del pistón y la presión de la cámara del cilindro.

Las técnicas de identificación también se utilizan para encontrar el modelo matemático de los actuadores neumáticos. El modelo preciso de actuador neumático es una condición importante tanto para el diseño de control como para optimizar su funcionamiento. 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. Estrategias de control en sistemas neumáticos

Las ventajas de los sistemas neumáticos son bien conocidas, dígase limpieza, baratos, fáciles de mantener, seguros en el funcionamiento, etc. Sin embargo, el diseño de un controlador de posición estable y robusto para un sistema neumático resulta difícil debido a la posible presencia de perturbaciones desconocidas provenientes de fugas de válvulas, cargas útiles que varían en el tiempo y perturbaciones externas. Además, las incertidumbres en los parámetros del sistema hacen que el problema de diseño del controlador sea más desafiante (Ritter, 2010; Andrievsky, 2014).

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 (Pradipta, 2013; Hirano, 2014). Para hacer frente a algunos de estos problemas, se han propuesto varios algoritmos de control avanzados (Meng, 2014).

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).

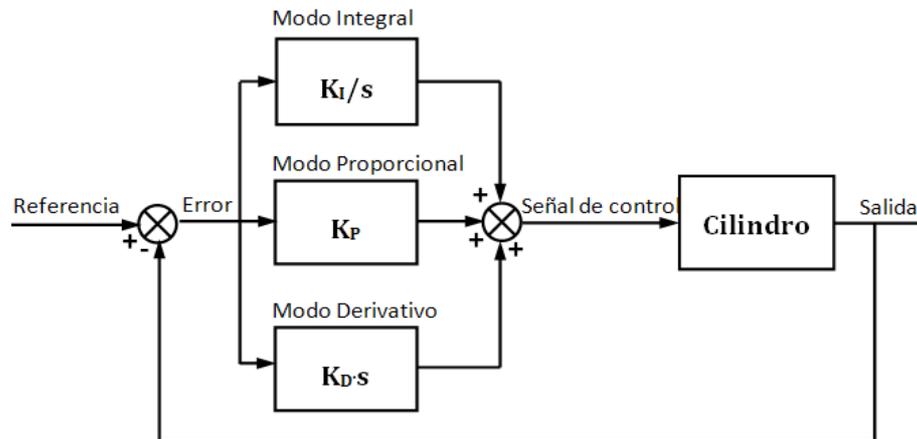


Figura 1–8: Algoritmo PID convencional.

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).

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.

La aplicación de técnicas de linealización por realimentación fue eficaz en muchos enfoques para lograr un control de seguimiento más preciso para sistemas servo neumáticos. Un método de control de posición y seguimiento de trayectoria fue propuesto mediante el empleo de un controlador PID con linealización por realimentación en el bucle de control de presión para anular la no linealidad que surge por la compresibilidad del aire, se agregó además una compensación de fricción usando un observador no lineal (Han, 2002).

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.

Muchos enfoques adaptativos se encuentran para atender las incertidumbres en los sistemas neumáticos. Un supuesto común para que estos esquemas adaptativos sean factibles es que todos los parámetros inciertos deben ser invariante en el tiempo (Ali, 2009). Un sistema de control adaptativo es un sistema que continuamente 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)(Shang, 2016).

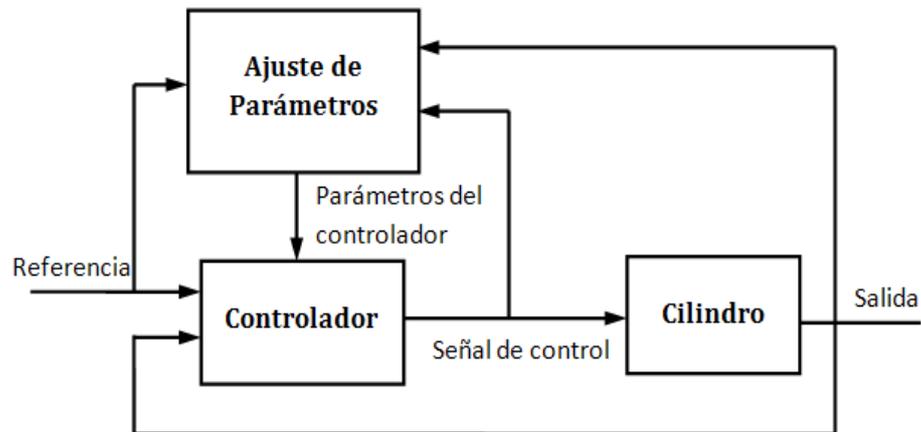


Figura 1–9: Algoritmo genérico de control adaptativo.

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 (Tao, 2014). 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 del 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 1–10 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 feedback. 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; Krejnin, 2006).

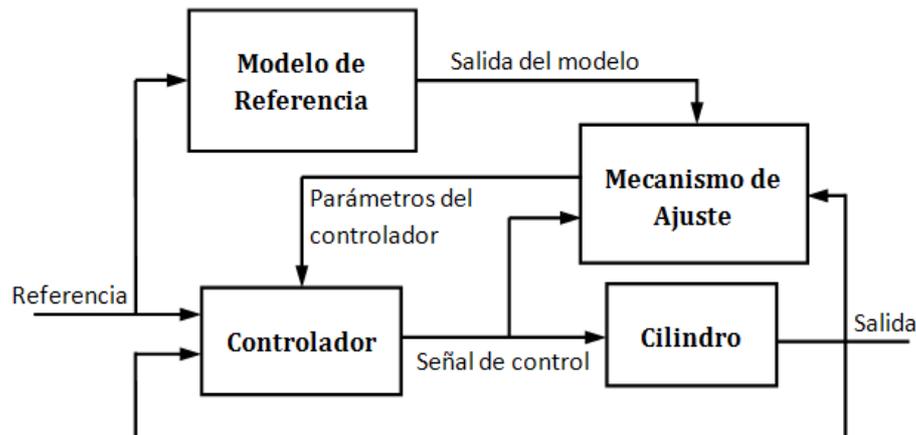


Figura 1–10: Control Adaptativo por Modelo de Referencia(MRAC).

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.

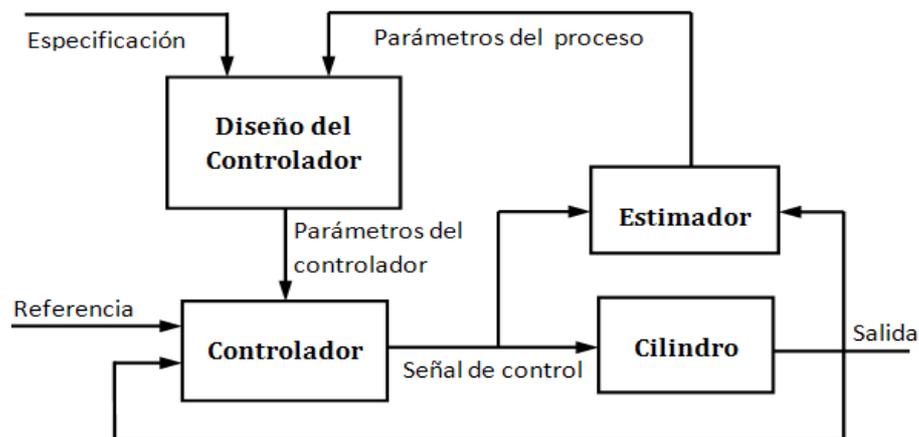


Figura 1–11: Control Adaptativo de auto-sintonía.

Diversos métodos de diseño para reguladores de autoajuste precisos han sido presentados (Xue, 2007), en ese sentido los resultados experimentales mostraron que el regulador de presión adaptativo propuesto mostraba buen desempeño estático y dinámico ante parámetros variantes. Un regulador de auto-sintonía asume un modelo lineal para el proceso que está 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 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).

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. Control Inteligente: Sistemas basados en redes neuronales

La línea de investigación de Control Inteligente nace con la intención de aplicar al control las técnicas de Inteligencia Artificial, las cuales estaban obteniendo una serie de resultados y se consolidaban como disciplina. La necesidad de aplicar un tipo de control basado en técnicas que emulan funcionalidades inteligentes de los seres vivos es demandada por muy variados motivos. El control inteligente es un procedimiento computacionalmente eficiente capaz de dirigir un sistema complejo a un objetivo, con una representación incompleta o inadecuada y/o bajo unas especificaciones imprecisas de cómo hacerlo; es decir, que actúa apropiadamente en un entorno con incertidumbre.

Las metodologías de control inteligente incluyen, por ejemplo, la lógica borrosa, sistemas expertos (control basado en reglas), aprendizaje, sistemas de planificación para control, algoritmos de búsqueda, sistemas híbridos, diagnóstico de fallos y reconfiguración, autómatas, redes de Petri, redes neuronales, algoritmos genéticos, etc. Algunas de las metodologías de control inteligente incluyen o son una síntesis de las desarrolladas para el control convencional.

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 (Krejmin, 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.

Existen varios tipos de estructuras de RNA, entre las que se destacan las redes simples y las multi-capas *feedforward*. El esquema para el modelo de simple capa es el perceptrón. Las entradas al perceptrón son individualmente multiplicadas por los pesos y luego sumadas.

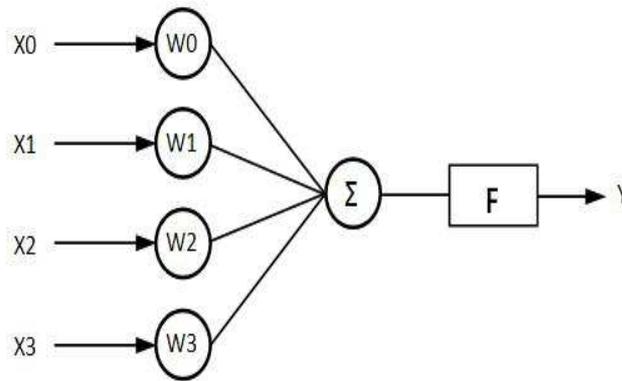


Figura 1–12: Esquema de una red neuronal.

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 multi-capas *feedforward* 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.

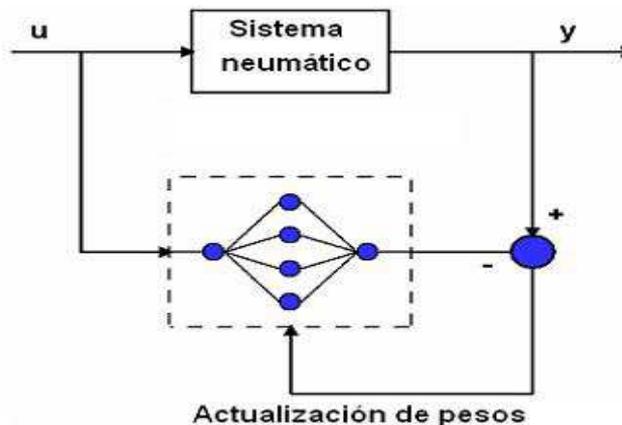


Figura 1–13: Identificación por el método back-propagation.

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).

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 (Song, 1997), 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.

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 alcanzando buenos resultados (Tanaka, 1999).

Uno de los fenómenos que más afecta el desempeño de los sistemas neumáticos es el fenómeno de *backlash* o zona muerta en las servo-válvulas. 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).

Otros autores han profundizado en los estudios sobre el modelado y control de movimiento de manipuladores impulsados por actuadores neumáticos. Luego de un detallado análisis del modelo dinámico del manipulador neumático se presenta un nuevo controlador por modelo interno para el sistema servo-neumático del robot, el cual consta de una red neuronal de tres capas como controlador (NNC) y una red neuronal recurrente diagonal (DRNN) como modelo predictor (NNM) (Xuesong, 2003). Los resultados de simulación por ordenador indicaron que el sistema tiene una fuerte robustez y mejora significativamente el rendimiento del control del manipulador neumático.

Posteriormente se presentó una estructura de control neuronal adaptativo con aplicación a un sistema servo neumático (Alexandru, 2006). Los resultados fueron muy prometedores como alternativa para el control clásico, demostrando que las redes neuronales eran capaces de hacer frente a tres de las dificultades principales encontradas en el control: la complejidad, no linealidad, y la incertidumbre.

Un algoritmo de conmutación del parámetro de control utilizando una red neuronal de cuantificación de vectores de aprendizaje (LVQNN) se propuso para lidiar con el deterioro del rendimiento de la respuesta transitoria debido a los cambios en la carga externa en una solución para el control de posición de un brazo robótico con movimiento lento impulsado por dos músculos neumáticos artificiales. La efectividad del algoritmo de control propuesto

se demostró a través de experimentos con diferentes cargas de trabajo externas ([Kyoung, 2007](#)).

1.4.4. Control Inteligente: 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 ([Martínez-Jiménez, 2018](#)).

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 ([Sala, 2009](#)). La lógica difusa permite incluir conjuntos de reglas que modelen las acciones de control del sistema de acuerdo a un conocimiento previo del funcionamiento del sistema físico. De esta forma es posible realizar acciones de control sobre el sistema físico de acuerdo al conocimiento previo del sistema ([Tanaka, 2001](#); [Lu, 2016](#)).

Las técnicas borrosas han sido aplicadas al mundo industrializado (procesos y automatización) brindando un buen desempeño ([Alzate, 2006](#)). Los resultados de este uso han demostrado que los sistemas borrosos presentan ventajas en comparación con algoritmos PID ([Precup, 2011](#)). Las ventajas principales de los borrosos son las siguientes ([Mattiazzo, 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.

Su empleo se diversifica sobre procesos complejos, es decir, plantas no lineales, de orden elevado, con parámetros internos variantes en el tiempo y/o dependientes del entorno que además, suelen presentar un pobre comportamiento con reguladores clásicos. 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-Llagostera, 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 (Tanaka, 2001).

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.

En una de sus investigaciones, Schulte describió el diseño de un nuevo controlador de movimiento para actuadores neumáticos utilizando modelos lineales locales con una aplicación a un variador servo-neumático bidireccional bajo una carga vertical variable en el tiempo. Las no linealidades dominantes en la planta son los acoplamientos entre movimiento y presión, presión y caudal, y la fuerza de fricción. El problema de control era mantener la precisión del control de posición independientemente de la carga útil y la posición del pistón. Para cada modelo lineal local se derivó un controlador de realimentación de estado. El controlador final del sistema se diseñó como un programador de ganancia difusa de los controladores de retroalimentación del estado local. Los resultados experimentales demostraron que este controlador era capaz de manejar las no linealidades dominantes de la planta y las diferentes cargas útiles, que se mantuvieron constantes durante cada experimento (Schulte, 2004).

Un nuevo controlador borroso-PD adaptativo se propone para un sistema de control de posición de un actuador servo neumático (Xiang, 2005). Se introduce un algoritmo de control por compensación de fricción para mejorar la precisión de los sistemas de control de posición servo neumáticos por medio del ajuste de un denominado parámetro controlador adaptativo. Varios experimentos se realizaron para mostrar que el controlador adaptativo difuso-PD podría controlar el sistema servo neumático con precisión.

La propuesta de un controlador inteligente basado en control difuso predictivo incorporando una regla de control y un modelo cuyo diseño utiliza el estado actual y las características de entrada-salida del actuador es presentada satisfactoriamente (Mikio, 2007). La efectividad del controlador inteligente propuesto se confirmó experimentalmente usando un sistema servo neumático.

En resumen, un sistema de control borroso tiene la habilidad de actuar apropiadamente en un entorno con incertidumbre, donde una acción apropiada es la que aumenta la probabilidad del éxito, y el éxito es la consecución de los subobjetivos de comportamiento que respaldan el último objetivo del sistema.

1.4.5. Control 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; Krejcin, 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).

En ese sentido, se destaca la aplicación de un control de retroceso no lineal y leyes de control en modo deslizante a un sistema electroneumático. Primero, se estableció un modelo no lineal para el sistema y luego se desarrollaron dos leyes de control no lineal para rastrear la posición y la presión deseada (Mohamed, 2006).

Posteriormente, el desempeño de dos algoritmos de control para el problema de seguimiento de posición se comparó experimentalmente en un actuador neumático. El primer algoritmo fue un control de modo deslizante basado en un modelo linealizado de la planta y el segundo fue un control de modo deslizante basado en el modelo no lineal de la planta. Se realizaron amplios experimentos que utilizaron diferentes cargas útiles, movimientos verticales y horizontales, y movimiento desde 3 hasta 250 mm (Gary, 2007).

(Yi, 2008) propuso un controlador deslizante de superficie múltiple (MSSC) para sistemas servo neumáticos con carga útil variable e incertidumbres no coincidentes. El sistema es primeramente modelado por una ecuación dinámica no autónoma con consideración de la dinámica de la válvula. Varias no linealidades e incertidumbres acotadas se agrupan en dos funciones limitadas para representar la ecuación del sistema en una forma formal para el diseño de la MSSC, de modo que las incertidumbres no coincidentes puedan compensarse adecuadamente. Se demostró que el sistema de lazo cerrado tiene un rendimiento asintóticamente estable mediante el uso de la teoría de estabilidad de Lyapunov. Los resultados experimentales mostraron que el algoritmo propuesto puede ofrecer un buen rendimiento independientemente de las incertidumbres y las variaciones de la carga útil.

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*. Este fenómeno se refiere a la aparición de oscilaciones, de amplitud y frecuencia finita, en el estado de la planta debido a la excitación por parte del control discontinuo de dinámicas no modeladas en sensores y actuadores. Es importante recalcar que el término *chattering* no se refiere a la conmutación del controlador, que

idealmente debe ser de frecuencia infinita, sino a las oscilaciones en el estado del sistema (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 (Hafedh, 2008; Nazir, 2010).

La combinación del control en modo deslizante y la lógica borrosa no es nueva, en la literatura existen muchas referencias de esta metodología (Xu, 2005; Kapoor, 2013a). 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 (Erbatur, 2001; Cazarez, 2013; Xu, 2018). 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 (Hafedh, 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.
- El control deslizante posibilita tratar de manera adecuada las no linealidades e incertidumbres 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, porque la experiencia del usuario puede ser introducida a través de reglas posibilitando mejorar el desempeño en el lazo cerrado.
- Se propone para el robot paralelo neumático de 2-GDL, un esquema de control en modo deslizante basado en lógica borrosa que no exhiba el fenómeno del *chattering*, garantice el cumplimiento de los índices de desempeño del simulador de movimiento y asegure robustez y estabilidad a pesar del carácter acoplado y las no linealidades del sistema.

CAPÍTULO 2

CONTROL EN MODO DESLIZANTE Y LÓGICA BORROSA PARA EL ROBOT PARALELO NEUMÁTICO DE 2 GRADOS DE LIBERTAD.

En este capítulo se describen los parámetros técnicos que definen al simulador SIMPRO de 2 grados de libertad accionado por cilindros neumáticos. Se presenta la metodología para el diseño de un controlador en modo deslizante (SMC) puro para sistemas neumáticos donde se ponen de manifiesto los criterios explicados anteriormente. Se hace especial énfasis en las oscilaciones sostenidas que se exhiben en el lazo de control por la acción del controlador.

Se describen las metodologías empleadas para suavizar la acción de control tales como el uso de funciones continuas y los sistemas borrosos de forma tal que el chattering sea atenuado. Se establecen criterios teóricos y prácticos para el diseño e implementación del esquema de control en modo deslizante basado en lógica borrosa de manera general.

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 (2-GDL), 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. Encoders del tipo LXEP-40 son usados para medir posición; la velocidad y aceleración son estimadas.

Esta plataforma presenta una estructura mecánica compuesta por cinco uniones esféricas y dos articulaciones prismáticas actuadas por pistones neumáticos de doble efecto. 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 un monitor ubicado en la propia cabina. La cabina pivotea

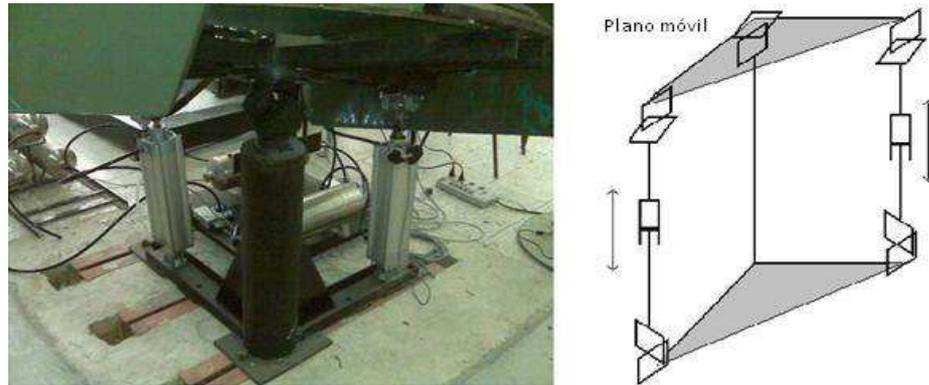


Figura 2-1: Plataforma de 2 GDL y su arquitectura geométrica

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

Las características más importantes del mecanismo están descritas en la Tabla 2-1:

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

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.

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 de un actuador requiere dividirse 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 carrete 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.

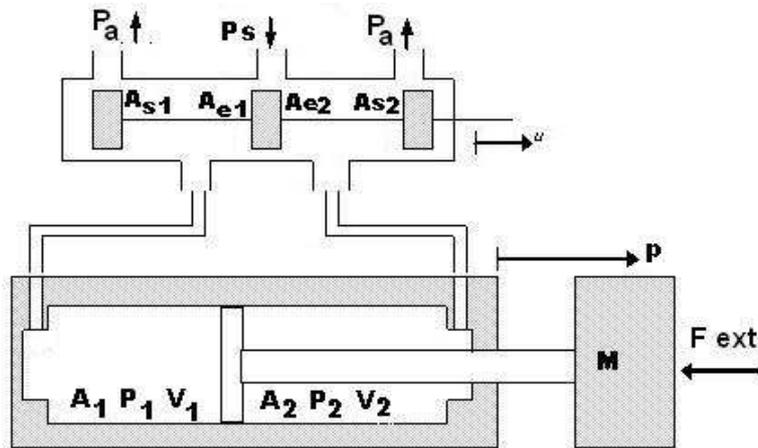


Figura 2-2: Esquema de un sistema neumático.

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).

Modelos similares a este han sido empleados para la síntesis de numerosos controladores (Laghrouche, 2006); no obstante, es común en la literatura que este modelo se linealice y obtenga 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.

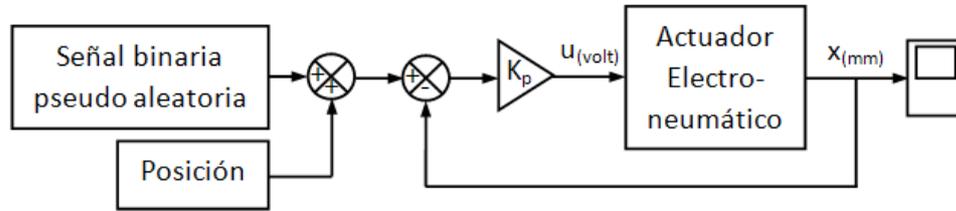


Figura 2-3: Diagrama de bloques para la identificación dinámica del sistema neumático. El modelo obtenido de acuerdo al planteamiento anterior es de tercer orden tipo 1 (Valdivia-Pacheco, 2012) por lo que para los pistones la relación transferencial obtenida se muestra en la ecuación 2.2:

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

La función transferencial representado de un modo general es:

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

se puede aplicar una transformación equivalente:

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

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:

$$\begin{aligned} f(x, t) &= -a_1 x_3 - a_0 x_2 \\ b(x, t) &= b_0 \end{aligned}$$

Donde x_1 representa la posición, x_2 velocidad y x_3 la aceleración.

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 (Prieto, 2015).

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:

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

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

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

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. Se contempla que el sistema esté sujeto a una perturbación externa $d(t)$, la cual se considera que no es completamente conocida pero es acotada por una cota superior ([Nazir, 2010](#)).

$$\|d(t)\| \leq D, \quad D > 0 \quad (2.9)$$

Siendo D la cota superior de la perturbación.

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 [2.10](#) define de manera generalizada la estructura de la superficie deslizante $s(t)$ para sistemas de orden n .

$$s(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e \quad (2.10)$$

donde λ es una constante positiva que se selecciona a partir del desempeño del sistema en cuanto a velocidad de respuesta se refiere ([Prieto, 2014](#)), 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, los cuales se pretende que converjan a cero, siendo $x_d(t) = [x_{d1}(t) \ x_{d2}(t) \ x_{d3}(t)]^T$ el estado deseado.

Para lograr ésto, el primer paso para el diseño de control por modos deslizantes es seleccionar la función de conmutación s , la cual está en términos del error de seguimiento. Para aquellos sistemas con representación dinámica de tercer orden, se obtiene la ecuación [2.11](#) que define la superficie como una función de segundo orden.

$$s(t) = e_3 + 2\lambda e_2 + \lambda^2 e_1 \quad (2.11)$$

donde:

e_1 Error de posición

e_2 Error de velocidad

e_3 Error de aceleración

Cuando el sistema de 2.11 alcanza la superficie deslizante el error de seguimiento disminuye exponencialmente y el valor que toma la función $s(t) = 0$ por tanto:

$$e_3 = -2\lambda e_2 - \lambda^2 e_1 \quad (2.12)$$

Cuya solución es:

$$e = E_{1,0}e^{-\lambda t} + E_{2,0}te^{-\lambda t} \quad (2.13)$$

donde:

e : Representa error en el tiempo.

$E_{1,0}$ y $E_{2,0}$: Representan condiciones iniciales.

Esta es llamada propiedad de invarianza que parece prometedora para diseñar un control de retroalimentación para plantas dinámicas que operan bajo condiciones inciertas. El tiempo en que el sistema alcance la referencia deseada una vez en la superficie deslizante es equivalente a $\frac{1}{\lambda}$ de allí se deduce que la rapidez del sistema depende de la pendiente λ (Prieto, 2014).

De la misma manera si el sistema es de segundo orden queda la expresión de la siguiente forma:

$$s(t) = e_2 + \lambda e_1 \quad (2.14)$$

y la solución de 2.14 es:

$$e_1 = e_{1,0}e^{-\lambda t} \quad (2.15)$$

De este modo, 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 cuya tasa de convergencia tendrá relación directa con el valor que se le dé a λ (Slotine, 1991; Van Damme, 2009).

Existen dos fases en el diseño de control por modos deslizantes. La primera etapa se llama fase de alcance, es donde las trayectorias (e_1, e_2, e_3) son atraídas hacia la superficie deslizante $s(t) = 0$. En la segunda etapa, que se conoce como modo deslizante, el vector de error se *desliza* por la superficie hasta alcanzar el punto de equilibrio $(0, 0)$. Una vez que ha sido seleccionada la superficie deslizante, el siguiente paso es diseñar la ley de control u , la cual permitirá que las trayectorias (e_1, e_2, e_3) alcancen la superficie deslizante.

La ley de control a diseñar tiene como propósito lograr que el sistema sea estable lo que se consigue asegurando la convergencia de $s(t)$ 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 . $\dot{V}(x)$ es definida negativa si $\dot{V}(0) = 0$ y $\dot{V}(x) < 0$ 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 $s(t)$ definida en la ecuación 2.11 es posible obtener una expresión para la ley de control que se debe diseñar, asegurándose la estabilidad del sistema y de tal forma que la siguiente condición, también llamada condición de alcanzabilidad, se cumpla para todo tiempo.

$$s\dot{s} \leq -F|s| \quad (2.16)$$

donde F representa una constante positiva.

La expresión 2.16 puede ser planteada como:

$$\text{sgn}(s)\dot{s} \leq -F \quad (2.17)$$

De esta manera se asegura que las trayectorias en un plano fase apunten hacia la superficie $s(t)$, 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 algunas perturbaciones o incertidumbres dinámicas puedan ser toleradas siempre y cuando la superficie no sufra variación.

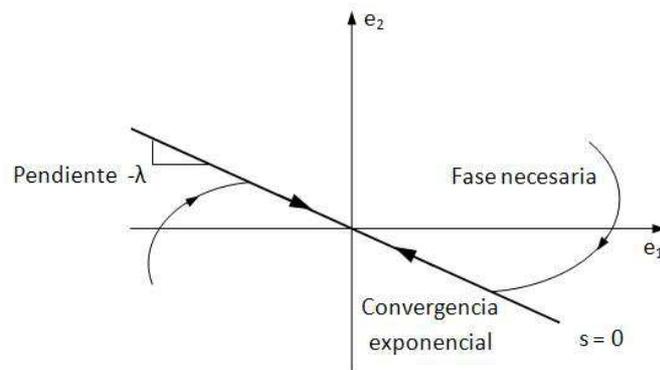


Figura 2-4: Efecto del control en modo deslizante sobre la trayectoria de un sistema de segundo orden representado en el plano-fase.

En resumen, la idea es utilizar una función conocida para $s(t)$ acorde a 2.11, 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:

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_s(t) \quad (2.18)$$

$u_{eq}(t)$: 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 de alcanzabilidad expresada por la ecuación 2.17. 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:

$$0 \leq b_{mín}(x, t) \leq b(x, t) \leq b_{máx}(x, t)$$

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).

$$\hat{b}(x, t) = \sqrt{b_{mín}(x, t)b_{máx}(x, t)}$$

La derivada de la superficie deslizante definida por la ecuación 2.11 en función del error está dada por:

$$\dot{s}(t) = \dot{e}_3 + 2\lambda\dot{e}_2 + \lambda^2\dot{e}_1 \quad (2.19)$$

Luego:

$$\dot{s}(t) = \dot{x}_{d3} - \dot{x}_3 + 2\lambda e_3 + \lambda^2 e_2 \quad (2.20)$$

Al sustituir la ecuación 2.20 en la ecuación 2.17 se llega a la siguiente expresión:

$$\text{sgn}(s)(\dot{x}_{d3} - \dot{x}_3 + 2\lambda e_3 + \lambda^2 e_2) \leq -F \quad (2.21)$$

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:

$$\text{sgn}(s)(f(x, t) + b(x, t)u(t) + d(t) - \dot{x}_{d3} - 2\lambda e_3 - \lambda^2 e_2) \geq F \quad (2.22)$$

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 del sistema de tercer orden, se obtiene a partir de la ecuación 2.22 y se define como:

$$u_{eq}(t) = \frac{1}{\hat{b}(x, t)}(-\hat{f}(x, t) - d(t) + \dot{x}_{d3} + 2\lambda e_3 + \lambda^2 e_2) \quad (2.23)$$

Para asegurar que la condición deslizante, expresada por la ecuación 2.22, se cumpla en todo momento es necesario implementar una ley de control que cumpla con la siguiente estructura (Slotine, 1991):

$$u(t) = u_{eq}(t) + K(x, t)\text{sgn}(s) \quad (2.24)$$

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

$$K(x, t) = G(x, t) + F \quad (2.25)$$

Siendo F una constante positiva. Como cota superior de esta ganancia se considera al parámetro constante K_s . Por su parte el término discontinuo $\text{sgn}(s)$ se define como:

$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & \text{para } s > 0 \\ 0 & \text{para } s = 0 \\ -1 & \text{para } s < 0 \end{cases} \quad (2.26)$$

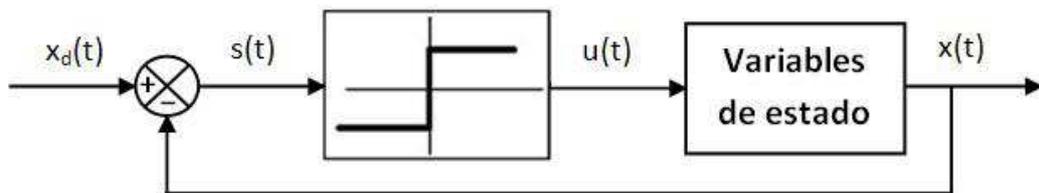


Figura 2-5: Diagrama a bloques de un lazo de control ideal en modos deslizantes. Un controlador discontinuo obliga a la señal de salida $x(t)$ de la planta que siga a la trayectoria de referencia $x_d(t)$.

La ley de control expresada por la ecuación 2.24 asegura que la trayectoria del sistema alcance en un tiempo finito la superficie deslizante $s(t)$, 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

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 $s(t)$, su derivada $\dot{s}(t)$ y la ley de control para un sistema de tercer orden son equivalentes a:

$$s(t) = e_3 + 2\lambda e_2 + \lambda^2 e_1 \quad (2.27)$$

$$\dot{s}(t) = \dot{x}_{d3} - (f(x, t) + b(x, t)u(t)) + 2\lambda e_3 + \lambda^2 e_2 \quad (2.28)$$

$$u(t) = \frac{1}{\hat{b}(x, t)}(-\hat{f}(x, t) + \dot{x}_{d3} + 2\lambda e_3 + \lambda^2 e_2 + K \operatorname{sgn}(s)) \quad (2.29)$$

Al sustituir 2.29 en 2.28 se tiene:

$$\dot{s}(t) = \dot{x}_{d3} - (f(x, t) + b(x, t)\left(\frac{1}{\hat{b}(x, t)}(-\hat{f}(x, t) + \dot{x}_{d3} + 2\lambda e_3 + \lambda^2 e_2 + K \operatorname{sgn}(s))\right)) + 2\lambda e_3 + \lambda^2 e_2 \quad (2.30)$$

$$\dot{s}(t) = \dot{x}_{d3}\left(1 - \frac{b(x, t)}{\hat{b}(x, t)}\right) + \left(\frac{b(x, t)}{\hat{b}(x, t)}\hat{f}(x, t) - f(x, t)\right) + 2\lambda e_3\left(1 - \frac{b(x, t)}{\hat{b}(x, t)}\right) + \lambda^2 e_2\left(1 - \frac{b(x, t)}{\hat{b}(x, t)}\right) - \frac{b(x, t)}{\hat{b}(x, t)}K \operatorname{sgn}(s) \quad (2.31)$$

$$\dot{s}(e) = \Delta \dot{x}_{d3} + \Delta f(x, t) + \Delta e_3 + \Delta e_2 - \frac{b(x, t)}{\hat{b}, t(x)}K \operatorname{sgn}(s) \quad (2.32)$$

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

De forma tal que:

$$\frac{b(x, t)}{\hat{b}(x, t)}K > \Delta \dot{x}_{d3} + \Delta f(x, t) + \Delta e_3 + \Delta e_2 \quad (2.33)$$

Por tanto:

$$K > \frac{\hat{b}(x, t)}{b(x, t)}(\Delta \dot{x}_{d3} + \Delta f(x, t) + \Delta e_3 + \Delta e_2) \quad (2.34)$$

De esta forma $\dot{s}(t)$ siempre presenta signo opuesto con respecto a $s(t)$. 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 (Prieto, 2015). 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).

Por otro lado, según (Rubio, 2007c) la estimación $\hat{b}(x)$, a través de una identificación experimental, es tal que conserva el mismo signo de $b(x, t)$ lo que garantiza que la parte izquierda de 2.33 sea positiva y la aproximación $\Delta f(x, t)$ sea despreciable. Por otro lado en 2.33 $\hat{b}(x, t)$ divide a $b(x, t)$ por ende, ya que ambos presentan el mismo signo, la parte izquierda siempre es positiva.

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. Como dinámicas no modeladas se tienen, por ejemplo, zonas muertas, saturaciones, histéresis y el ancho de banda limitado de los actuadores. 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*.

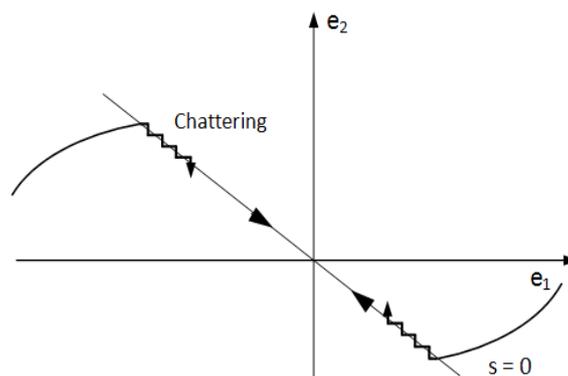


Figura 2-6: Representación del efecto chattering resultado de la acción del control deslizante.

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 (Kapoor, 2013b):

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

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 (García-Llerena, 2015).

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 (Sala, 2009). La lógica difusa es considerada un sistema lógico dirigido a proporcionar un modelo para los modos de razonamiento humano (dígase, el sentido común), los cuales son más aproximados que exactos (Alzate, 2006).

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 (Albertos, 2004).

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 $u(\mathbf{x})$: 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.

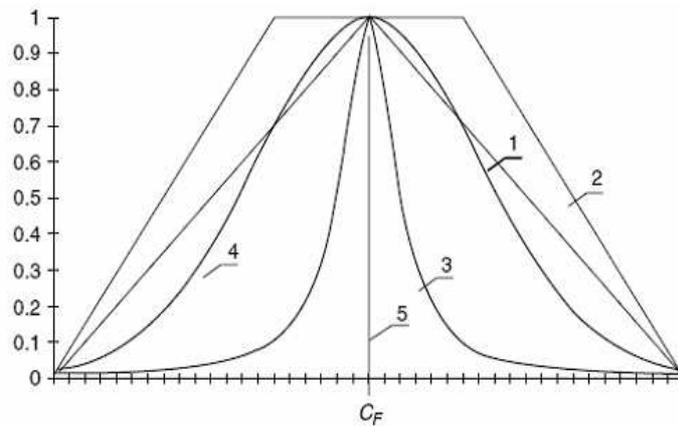


Figura 2-7: Forma típica de funciones de pertenencia: 1-triangular, 2-trapezoidal, 3-gaussiana, 4-campana generalizada, 5-singleton.

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 aplicación de sistemas de control inteligentes sobre sistemas no lineales permite obtener mejores resultados en el control y modelar de una manera más adecuada el comportamiento de los sistemas no lineales. Especialmente, cuando se combinan con sistemas difusos, que permiten modelar un sistema de control a partir de una base de reglas, es posible obtener controladores no lineales que consideran la no linealidad del sistema y permiten obtener respuestas sin oscilaciones sobre el sistema físico. Además, el controlador obtenido puede ser analizado a partir de las reglas generadas con el fin de determinar las reglas más influyentes sobre el sistema de control (Alzate, 2006; Wong, 2002).

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 (Albertos, 2004):

- Sistemas Mamdani, usualmente usado directamente como controlador en lazo-cerrado.
- Sistemas 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.

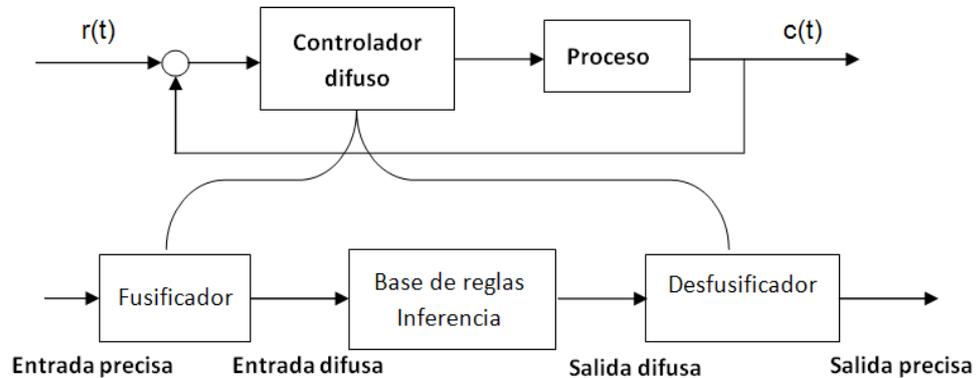


Figura 2–8: Esquema de control borroso.

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 2.35. 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.

$$COG : y_q^{crisp} = \frac{\sum_{i=1}^R c_q^i \int \mu_{A_q^i}(y_d) dy_q}{\sum \int \mu_{A_q^i}(y_d) dy_q} \quad (2.35)$$

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.

$$CA : y_q^{crisp} = \frac{\sum_{i=1}^R c_q^i \text{sup}_{y_p} \mu_{A_q^i}(y_d) dy_q}{\sum \text{sup}_{y_p} \mu_{A_q^i}(y_d) dy_q} \quad (2.36)$$

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.

La interpretación de estos paradigmas borrosos como modelos locales lineales permite fusionar técnicas borrosas y clásicas. En las ideas presentadas antes puede desprenderse que la lógica borrosa, nacida como una lógica de conceptos vagos e imprecisos, se utiliza generalmente, en las aplicaciones de control, de un modo totalmente determinista (como interpolador numérico) (Sala, 2009).

En controladores borrosos, la técnica provee un método de interpolación para generar una superficie de control determinista en la mayoría de los casos. De este modo, cabe considerar el enfoque borroso como un marco de aplicación práctica capaz de integrar e interactuar con sub-sistemas tanto numéricos como lógicos y humanos.

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 (Kapoor, 2013a; Hung-Yi, 2013). 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 (Xu, 2005; Abdelsalam, 2012).

Entre los métodos mas 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).

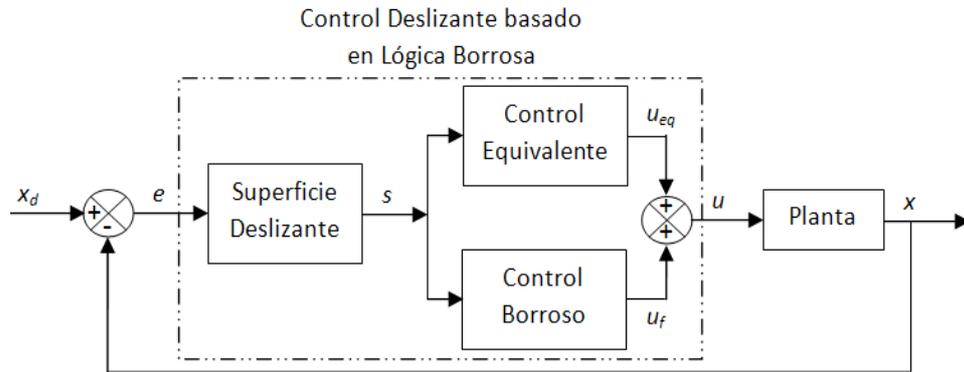


Figura 2–9: Esquema de control FSMC con la sustitución del elemento discontinuo.

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_s(t) = u_{eq}(t) + u_f(t) \quad (2.37)$$

$$u_f(t) = FSMC(s(t)) \quad (2.38)$$

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 y su derivada, como se muestra en la ecuación 2.39, 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 las incertidumbres severas, aunque el número elevado de reglas borrosas, dado por la ecuación 2.40, hace complejo el análisis y surge una pesada carga computacional en algunas aplicaciones (Nazir, 2010). Además, el tratamiento con elementos derivativos puede amplificar los ruidos y con ello se puede tener un pobre desempeño del controlador (Amer, 2012). El esquema se muestra en la figura 2–10.

$$u_f(t) = FSMC(s(t), \dot{s}(t)) \quad (2.39)$$

$$R_t = l_{in1} * l_{in2} * (\dots) l_{ink} \quad (2.40)$$

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

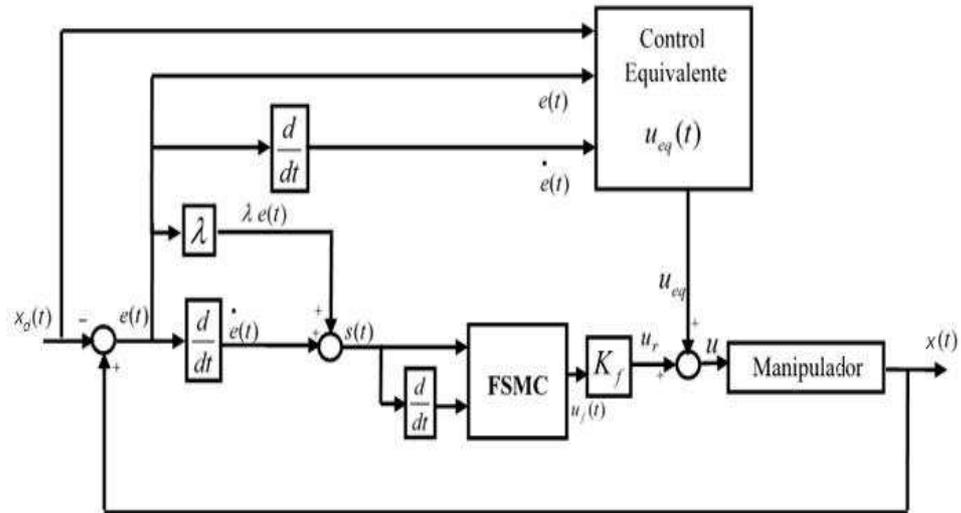


Figura 2–10: Esquema de control FSMC teniendo en cuenta la derivada de la superficie deslizante.

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 (Hafedh, 2009). El esquema se muestra en la figura 2–11.

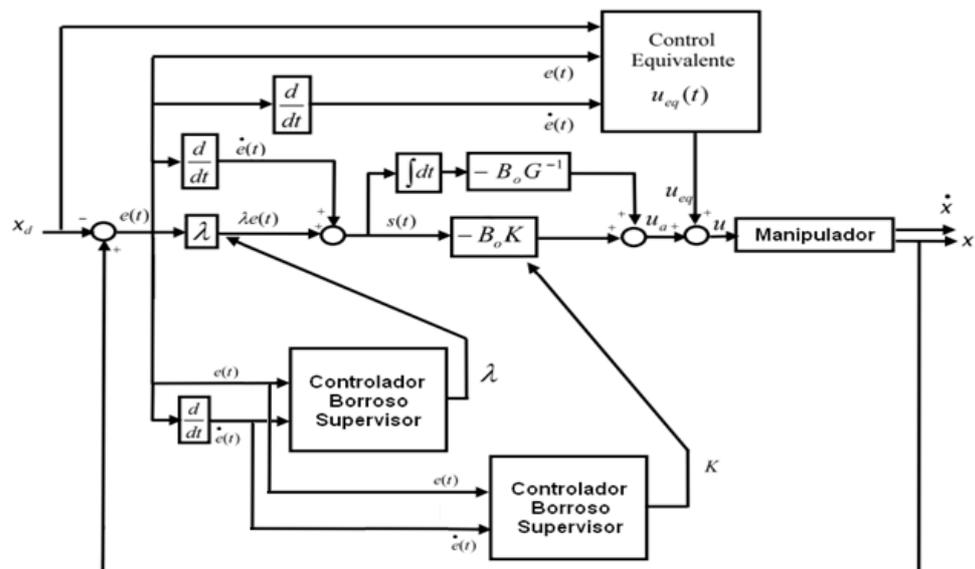


Figura 2–11: Esquema de control FSMC teniendo en cuenta la sintonización de λ .

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, y 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 (Prieto, 2015). 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.

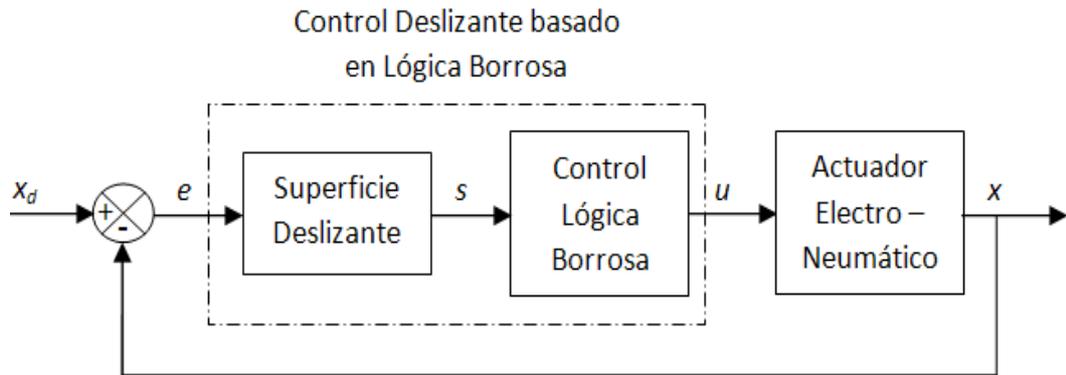


Figura 2–12: Esquema de control FSMC propuesto para la plataforma de 2 GDL.

De acuerdo con (Slotine, 1991) la parte discontinua de 2.29 puede ser sustituida por una función de saturación con el objetivo de reducir el chattering, esto es:

$$u(t) = \frac{1}{\hat{b}(x, t)} (-\hat{f}(x, t) + \dot{x}_{d3} + 2\lambda e_3 + \lambda^2 e_2 + K \text{sat}(\frac{s(t)}{\epsilon})) \quad (2.41)$$

Siendo:

$$\text{sat}(\frac{s(t)}{\epsilon}) \begin{cases} \frac{s(t)}{\epsilon} & \text{para } |s(t)| \leq \epsilon \\ \text{sgn}(s(t)) & \text{para } |s(t)| > \epsilon \end{cases}$$

Donde $\epsilon > 0$ denota la proximidad a la superficie deslizante. La salida de la entrada de control podría ser normalizada como $u(t) \in [u_{min}, u_{max}]$. De acuerdo con (Prieto, 2017b) y a partir de 2.34, se puede asumir:

$$u(t) \approx \text{sat}(K \text{sat}(\frac{s(t)}{\epsilon})) \quad (2.42)$$

De esta manera:

$$u(t) = \begin{cases} u_{min} & \text{para } s(t) < -\epsilon \\ K \frac{s(t)}{\epsilon} & \text{para } |s(t)| \leq \epsilon \\ u_{max} & \text{para } s(t) > \epsilon \end{cases}$$

Para un sistema SMC:

$$\begin{aligned} s(t) < -\epsilon &\implies u_{min} \\ \frac{s(t)}{\epsilon} \in [-1, 1] &\implies u \approx K \frac{s(t)}{\epsilon} \\ s(t) > \epsilon &\implies u_{max} \end{aligned}$$

En este caso, el controlador SMC debe ser continuo. En realidad eso no sucede, y aún más, aparece chattering en la superficie de deslizamiento debido a la dinámica excitada.

El FSMC sigue el mismo principio:

$$s(t) \ll -\epsilon \implies u^{crisp}(t) = u_{min} \quad (2.43)$$

$$s(t) < -\epsilon \implies u^{crisp}(t) < 0 \wedge u^{crisp}(t) > u_{min} \quad (2.44)$$

$$\frac{s(t)}{\epsilon} \in [-1, 1] \implies u^{crisp}(t) = 0 \quad (2.45)$$

$$s(t) > \epsilon \implies u^{crisp}(t) > 0 \wedge u^{crisp}(t) < u_{max} \quad (2.46)$$

$$s(t) \gg \epsilon \implies u^{crisp}(t) = u_{max} \quad (2.47)$$

De esta manera, existe una idea similar entre el SMC y FSMC, pero este último garantiza que $u(t) = 0$ en la vecindad de la superficie deslizante. Sin embargo, la pendiente de la superficie deslizante y los conjuntos difusos correspondientes a las etiquetas lingüísticas deben ser cuidadosamente seleccionados.

Entonces, con el objetivo de acelerar la convergencia hacia la superficie deslizante y minimizar el problema de chattering, el sistema de inferencia borroso es diseñado para reemplazar la ley de control SMC (Prieto, 2014). En este caso $u(t)$ está directamente relacionado con $s(t)$ por medio de las reglas borrosas basadas en el Método de Inferencia Mamdani (Mamdani, 1974). La ley de control queda entonces:

$$u(t) = u_{borroso}(s(t)) \quad (2.48)$$

De esta manera una vez definida la superficie 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 $s(t)$. 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.

2.4.1. Robustez del control en modo deslizante basado en lógica difusa

Dado el sistema de tercer orden y con base a lo expuesto en el 2.2.1 para la estrategia borrosa en modo deslizante se sigue la misma idea. La ley de control en 2.49 muestra la

relación directa que existe entre $s(t)$ y $u(t)$ reemplazando la ley de control en 2.24.

$$u^{crisp}(t) = u_{borroso}(s(t)) \quad (2.49)$$

En 2.49 se puede observar que $u_{borroso}(s(t))$ es la salida de la inferencia borrosa basada en Mandami. En este caso $u(t)$ presenta el mismo signo que $s(t)$. Sigue la demostración de la siguiente manera:

$$\dot{s}(t) = \dot{x}_{d3} - \dot{x}_3(t) + 2\lambda(x_{d3} - x_3(t)) + \lambda^2(x_{d2} - x_2(t)) \quad (2.50)$$

Para un control de posición $\dot{x}_{d3} = x_{d3} = x_{d2} = 0$. Se abrevia como:

$$\dot{s}(t) = -\dot{x}_3(t) - 2\lambda x_3(t) - \lambda^2 x_2(t) \quad (2.51)$$

Sustituyendo 2.8 en 2.52 se obtiene:

$$\dot{s}(t) = -f(x, t) - b(x, t)u_{borroso}(s(t)) - 2\lambda x_3(t) - \lambda^2 x_2(t) \quad (2.52)$$

y de esta manera siendo $u_{crisp}(t) = u_{borroso}(s(t))$, que presenta el mismo signo de $s(t)$ se cumple $\dot{s}s < 0$ (Prieto, 2017b). Sin embargo, se debe ser cuidadoso con la selección no solo de la pendiente de la superficie deslizante sino con los conjuntos difusos correspondientes a las etiquetas lingüísticas (Prieto, 2015).

2.5. Consideraciones finales

Efectuado el diseño de la estrategia 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 del robot de 2GDL objeto de estudio.

CAPÍTULO 3

ESQUEMA DE CONTROL FSMC APLICADO AL ROBOT PARALELO 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 2 – GDL. Se realizan diferentes pruebas de simulación donde se compara el desempeño de la metodología propuesta tipo FSMC con respecto al SMC en un sistema neumático y además se muestran los principales defectos que impiden la real implementación del SMC en sistemas mecánicos. Un análisis comparativo experimental es llevado a cabo haciéndose énfasis en la acción de control donde se verifica la habilidad del FSMC para atenuar las vibraciones. 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.

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:

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

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

Estas expresiones se implementan en el Simulink de MATLAB, eligiéndose para el diseño un valor de ganancia ($K = 10\,000$) 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} .

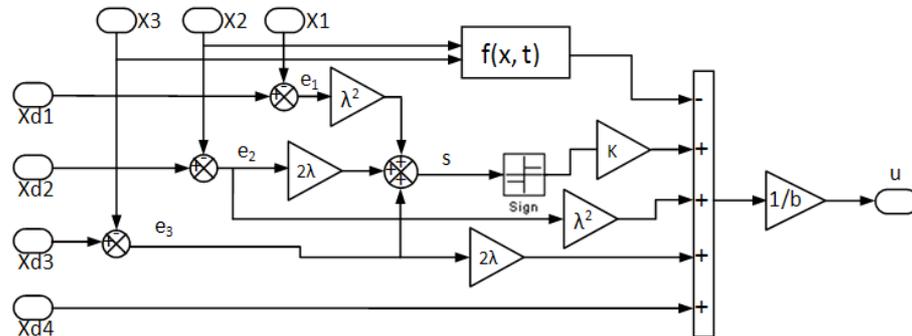


Figura 3–1: Diagrama de bloques en Simulink de la ley de control SMC.

3.1.1. Software de simulación de sistemas mecánicos

Para obtener un diseño fiable de los reguladores que controlen el desempeño de las estructuras robóticas, es necesario obtener previamente un modelo que describa lo más fielmente posible el comportamiento del sistema. De esta manera, utilizando herramientas de software, se puede realizar el análisis del comportamiento dinámico de un producto con el objetivo de aplicar modificaciones en su diseño mecánico y cambios en la sintonía de los reguladores diseñados.

Los robots paralelos de múltiples articulaciones actuadas constituyen mecanismos de una alta complejidad de modelado. No obstante, el desarrollo de herramientas de software para el análisis y simulación, ha hecho posible que este proceso se desarrolle de una manera más simple y eficiente. Los programas de propósito general para el modelado y la simulación de los sistemas mecánicos de múltiples cuerpos han llamado poderosamente la atención durante esta última década. Un programa CAD (*Computer Aided Design*) para la dinámica de los sistemas multicuerpos, minimiza la posibilidad del error humano en el manejo de modelos complejos.

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 (Li, 2009; Software, 2005).

Gracias a este programa, se pueden desarrollar y poner a prueba prototipos virtuales, realizar simulaciones realistas por el ordenador de manera visual y matemática del comportamiento real de los sistemas mecánicos multicuerpos. Además, se puede explorar una multitud de variables de diseño de manera rápida y visualizar los resultados mediante gráficos, animaciones y cámara rápida (Xu, 2009).

El modelo virtual del simulador de movimiento de estructura paralela se muestra en la figura 3–2. Su diseño presta especial atención al modelado geométrico de los elementos integrantes del robot, considerando las dimensiones físicas, articulaciones, cuerpos rígidos y el tipo de material constructivo del robot. Contempla las coordenadas de localización de todos y cada uno de los puntos en que el sistema se encuentra en posición estática.

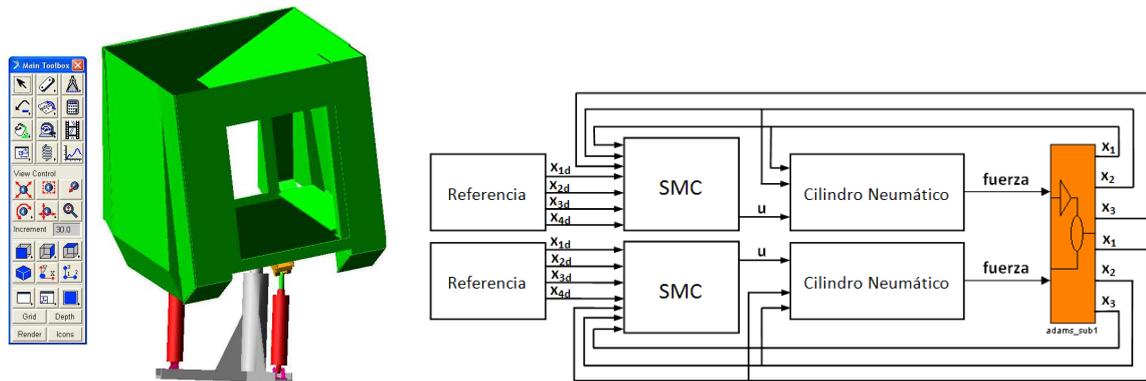


Figura 3–2: Modelo en ADAMS de la plataforma de 2 GDL y Esquema en ADAMS-Simulink del control SMC.

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.

3.1.2. Resultados de Simulación con ADAMS del Control en Modo Deslizante

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. 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 adecuado 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

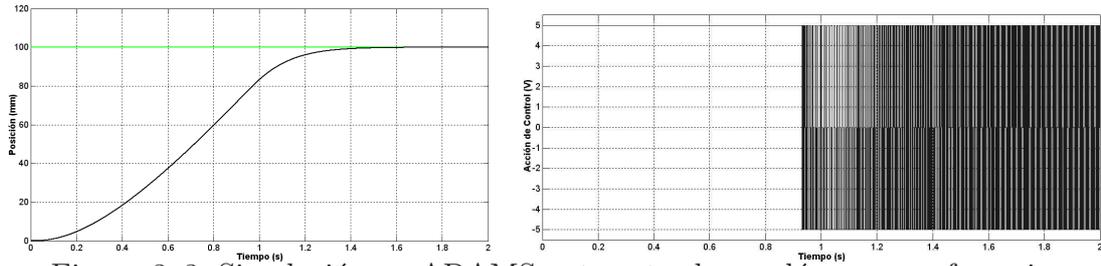


Figura 3-3: Simulación en ADAMS ante entrada escalón como referencia.

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 en modo deslizante basado en lógica borrosa para el sistema neumático

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. Estas oscilaciones pueden ser reflejadas en la función de superficie deslizante $s(t)$ y acentuadas con la ganancia de robustez K para la acción de corrección, este valor debe ser grande con el objetivo de garantizar convergencia del sistema mecánico (Slotine, 1991).

Para las válvulas Festo estas oscilaciones pueden ser vistas en el voltaje aplicado a las servo-válvulas, estas son las comúnmente conocidas como chattering (Slotine, 1991; Utkin, 1999). 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 (Prieto, 2015).

Por medio de las reglas difusas, basados en criterios de Lyapunov, puede ser reemplazada la ley de control planteada en la ecuación 3.2 para los sistemas SMC con el objetivo de eliminar chattering. En el presente caso la ley de control $u(t)$ sobre la servo-válvula, toma valores en función de $s(t)$ con el objetivo de forzar la dinámica del sistema hacia la superficie deslizante. Esta vez se establecen reglas difusas que relacionen ambas variables de manera directa y asegure la convergencia de la planta hacia una referencia dada. En otras palabras, el control en modo deslizante clásico descrito en la sección 2.2 es reemplazado por un sistema de inferencia difusa con implicación Mandami basado en la regla composicional $max - min$ representada en la ecuación:

$$\mu_{A \circ R_l} = \max_{s \in X} (\min(\mu_A(s), \min(\mu_{A_l}(s), \mu_{B_l}(u_s)))) \quad (3.3)$$

La configuración del esquema de control en modo deslizante basado en lógica borrosa *FSMC* se muestra en la figura 3-4.

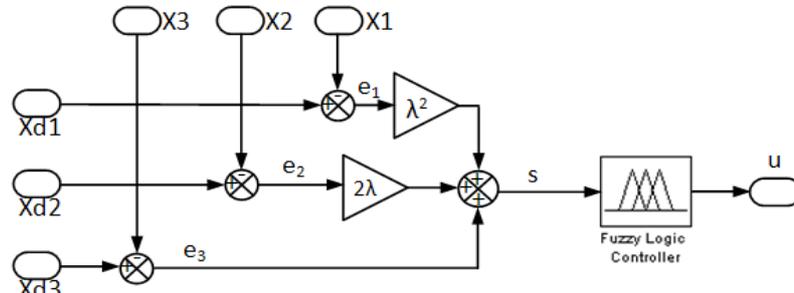


Figura 3-4: Diagrama de bloques en Simulink de la ley de control FSMC.

La superficie deslizante y la acción de control son divididos en cinco sub-conjuntos difusos cuyas funciones de membresía 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**):

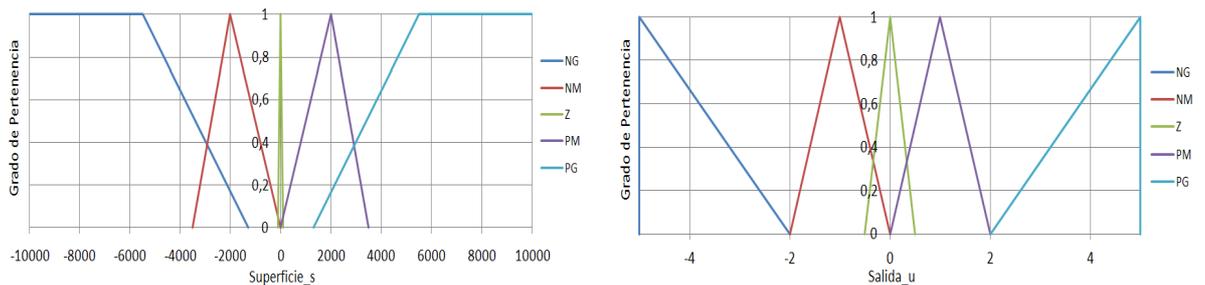


Figura 3-5: Funciones de pertenencia para las variables de entrada y salida.

El estado **NG** representa la situación donde el vector de estado de la planta se encuentra muy lejos de la superficie deslizante en el lado negativo. El estado **NM** representa la situación cuando el vector de estado se encuentra en el lado negativo de la superficie deslizante. El estado **Z** merece especial atención. Está dado cuando en vector de estado de la planta se encuentra en la vecindad de la superficie deslizante; de esta forma cualquier valor muy cercano a $s(t) = 0$ puede ser aceptado. El estado **PM** representa la situación donde el vector de estado de la planta se encuentra en el lado positivo de la superficie deslizante. El estado **PG** representa la situación donde el vector de estado se encuentra muy lejos en el lado positivo de la superficie deslizante.

Se emplean funciones de pertenencia con formas triangulares y trapezoidales para cuantificar los conjuntos lingüísticos de las variables de entrada y salida debido a que se basan en funciones lineales que son de fácil implementación, usadas 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 $s(t)$ la acción de control sea pequeña lo cual contribuye a disminuir el chattering (Prieto, 2015).

Las reglas del control borrosas pueden representarse como la asignación de la variable lingüística de entrada **Superficie** $s(t)$ a la variable lingüística de salida **Salida** $u(t)$ como sigue:

Tabla 3–1: Reglas borrosas

Superficie $s(t)$	Salida $u(t)$
NG	NG
NM	NM
Z	Z
PM	PM
PG	PG

El universo de discurso de $x_{s(t)} = x \in [-4, 5 * 10^6, 4, 5 * 10^6]$ y $y_{u(t)} = y \in [-5, 5]$. De la Tabla 3–1 se deduce que: si la superficie deslizante $s(t)$ es **NG**, el control aplicado es **NG** para forzar la dinámica de la planta $s(t)$ a $s(t) = 0$. Por otro lado si la superficie deslizante $s(t)$ es **Z**, el control aplicado es **Z** para mantener $s(t) = 0$. Estas reglas lingüísticas son definidas heurísticamente de la siguiente forma:

$$R^{(l)} :: \text{If } \mathbf{Superficie } s \text{ is } A^l \text{ Then } \mathbf{Salida } u \text{ is } B^l \quad (3.4)$$

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 3.3, y el método de defusificación empleado es el de centro de gravedad.

Es importante destacar algunos criterios para el ajuste: si el conjunto de **Z** se encuentra muy cerca de $s(t) = 0$ el chattering se incrementa, por otro lado si el conjunto es grande se garantiza ausencia de chattering pero va a existir un error en estado estable. Por tanto, los conjuntos correspondientes a las funciones de pertenencia deben ser cuidadosamente definidos (Prieto, 2017b).

3.2.1. Resultados de Simulación con ADAMS del Control en Modo Deslizante basado en Lógica Borrosa

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

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.

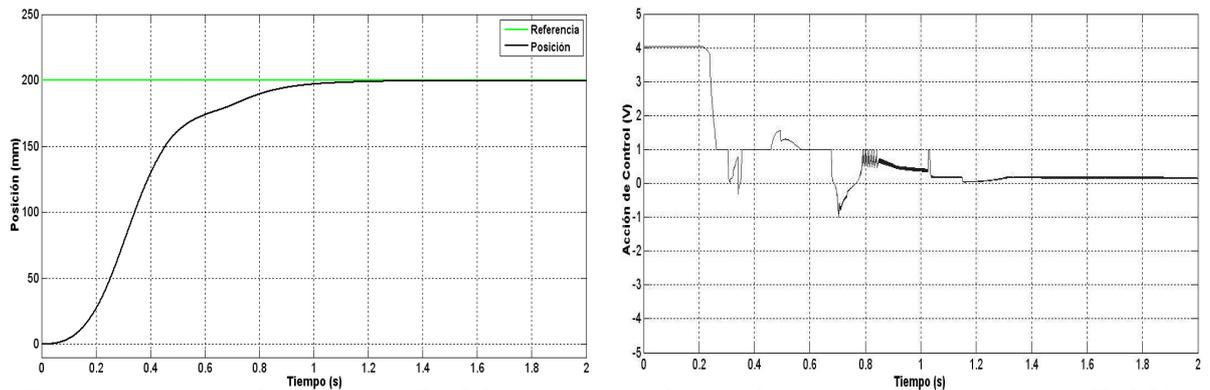


Figura 3–6: Simulación en ADAMS ante entrada escalón como referencia con FSMC.

Similar análisis se puede realizar para el seguimiento de trayectoria, mostrado en la figura 3–7. En este caso, el control desacoplado llevado a cabo permite la aplicación a cada articulación de señales de referencia definidas por la función siguiente:

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

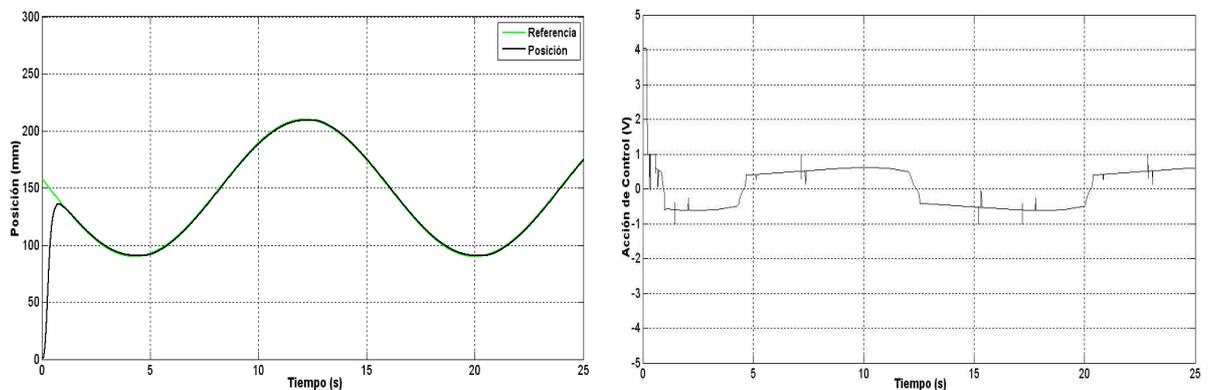


Figura 3–7: Simulación en ADAMS ante entrada sinusoidal como referencia con FSMC.

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.

3.3. Resultados experimentales

Para realizar la experimentación correspondiente, los algoritmos de control han sido implementados 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 $1ms$, 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.

3.3.1. Experimentos con Control por Modo Deslizante clásico

La manera más común de eliminar chattering es introducir una capa límite reemplazando el término discontinuo $sgn(s(t))$ en 3.2 por una función de saturación definida por:

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

donde ϕ representa una constante positiva. Se ha demostrado que el uso de la función de saturación en lugar de la función de signo reduce la vibración. De esta forma se establece una capa límite $sat(\frac{s}{\phi})$ al término $sgn(s(t))$ en un límite de la vecindad $s(t) = 0$ (Slotine, 1991; Utkin, 1999). Los principales parámetros del control por modo deslizante implementado se encuentran en la Tabla 3-2:

Tabla 3-2: Parámetros del experimento

Descripción	Valores
λ	10 seg^{-1}
K	100 000
ϕ	$100 \frac{\text{mm}}{\text{seg}^2}$

La figura 3-8 muestra los resultados experimentales para un cilindro del robot paralelo. Se observa la respuesta sobre-amortiguada y convergente del sistema. Sin embargo, a pesar de que el chattering no alcanza todo el rango de voltaje de la válvula, este no es eliminado cuando el sistema alcanza la referencia y con ello el desempeño del control se ve comprometido. El costo de esta tecnología es una reducción en la precisión del rendimiento de seguimiento (Prieto, 2017b).

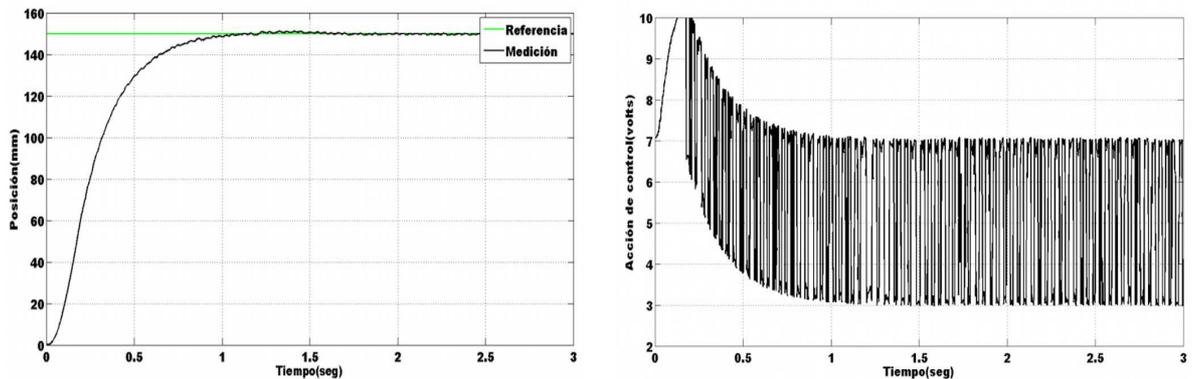


Figura 3-8: Respuesta de un actuador neumático del robot paralelo con la sustitución del elemento $sgn(s(t))$ por $sat(s/\phi)$ ante entrada escalón como referencia.

3.3.2. Experimentos con Control por Modo Deslizante basado en Lógica Borrosa

Respecto a FSMC, las figuras 3-9 y 3-10 muestran la respuesta de los actuadores neumáticos en lo que respecta al control de posicionamiento ante referencias tipo escalón primero y

seguidamente pulsos con el control en modo deslizante basado en lógica borrosa propuesto. Se puede observar la respuesta sobre-amortiguada del sistema neumático, característica propia de los sistemas en modo deslizante y la convergencia hacia la respuesta deseada.

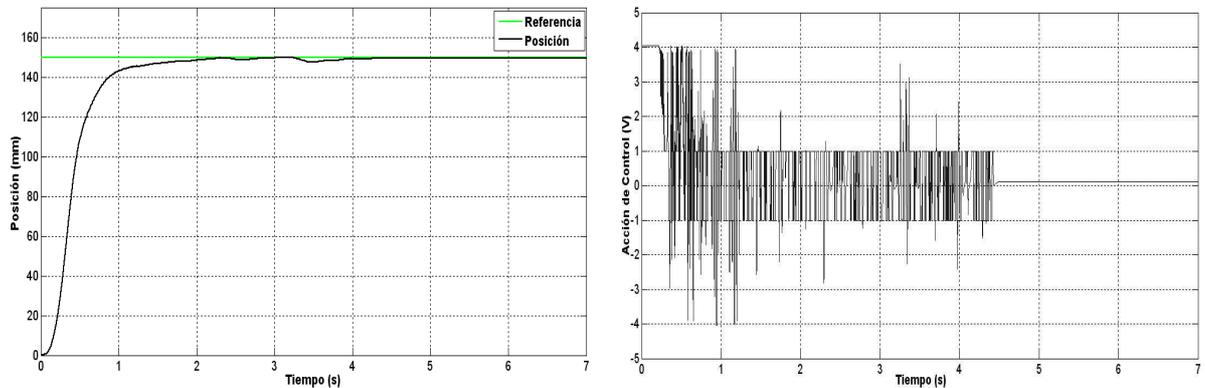


Figura 3–9: Respuesta del actuador neumático correspondiente al ángulo de lado ante entrada escalón de referencia en un experimento con FSMC.

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. En este caso el conjunto borroso correspondiente a la etiqueta \mathbf{Z} se fija entre $[-100\ 100]$. Cuando la función de superficie tenga un valor perteneciente al conjunto se dispara la acción de control en la servo-válvula $u(t) = 0$. Por tanto, el chattering desaparece en la vecindad de la superficie deslizante. Esta es la principal contribución de este algoritmo de control.

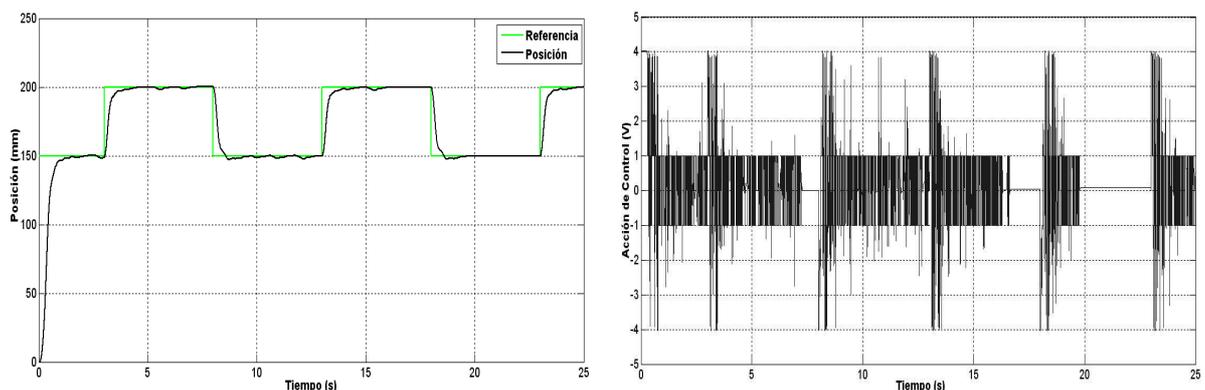


Figura 3–10: Respuesta del actuador neumático correspondiente al ángulo de cabeceo ante pulsos de referencia en un experimento con FSMC.

El seguimiento preciso de trayectoria puede ser evaluado en la figura 3–11 para la misma función 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 $s(t)$ está en la vecindad de la superficie deslizante y el chattering aumenta considerablemente. 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.

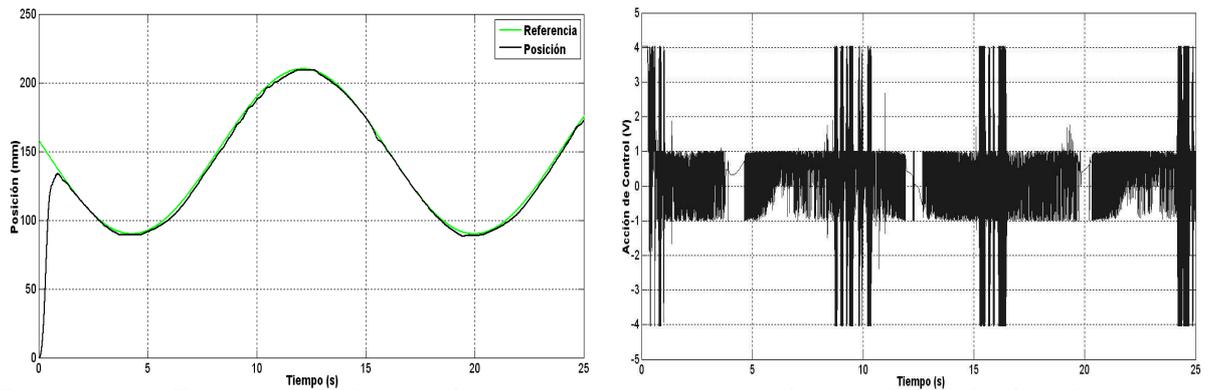
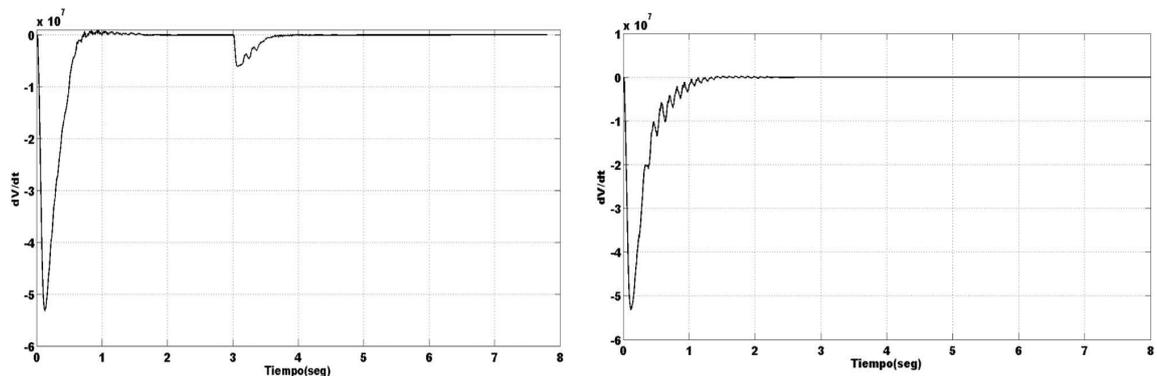


Figura 3–11: Respuesta del actuador neumático correspondiente al ángulo de cabeceo ante cambio de referencia en un experimento con FSMC.

Como elemento adicional para verificar la validez del controlador propuesto, la figura 3–12 muestra la derivada de la función candidata de Lyapunov para los cilindros, misma que como se predijo es negativa y por lo tanto el sistema es estable en sentido de Lyapunov. Los valores de error obtenidos durante las pruebas experimentales pueden consultarse en el Anexo B.



(a) $\dot{V}(x)$ para el primer cilindro

(b) $\dot{V}(x)$ para el segundo cilindro

Figura 3–12: Derivada de la función de Lyapunov $\dot{V}(x)$ en los primeros instantes de experimentos para ambos cilindros.

3.4. Adaptación dinámica de la pendiente en el Control por Modo Deslizante basado en Lógica Borrosa

En la Sección 3.2 se apuntó la necesidad de ser cuidadoso con la selección no solo de la pendiente de la superficie deslizante sino con los conjuntos difusos correspondientes a las etiquetas lingüísticas. Dado que si el conjunto difuso correspondiente a \mathbf{Z} es muy estrecho las reglas pueden dispararse constantemente ante variaciones de la función de superficie. Con ello el chattering se acentúa, incluso más si se selecciona una pendiente de superficie deslizante que presente una constante de tiempo pequeña con el objetivo de lograr rapidez de respuesta. Por otro lado si el soporte de \mathbf{Z} aumenta el chattering se reduce, pero no se garantiza ausencia de error en estado estable. Por lo tanto, con el objetivo de garantizar

la convergencia hacia un estado deseado se introduce un mecanismo de auto-ajuste con respecto a la pendiente de superficie deslizante de tal forma que no solo garantice respuesta estable sino que se reduzca el chattering en la vecindad de la superficie deslizante.

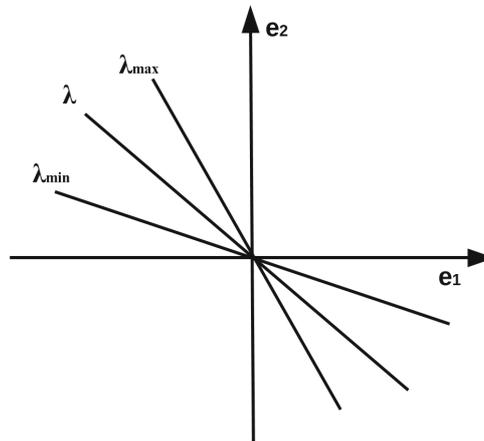


Figura 3–13: Varios valores de la pendiente λ de la superficie deslizante.

Con el objetivo de garantizar estabilidad λ siempre es positiva, por tanto la función de superficie se mueve entre el segundo y cuarto cuadrante en el plano-fase (Prieto, 2017b). La figura 3–13 representa esta idea. Siempre es difícil ajustar el valor de λ en el control en modo deslizante. De acuerdo a Korondi y Gyeveiki se plantea que si la pendiente de superficie es grande se garantiza una rápida respuesta pero se incrementa el chattering, por lo contrario, si la pendiente es pequeña el chattering se reduce pero la convergencia es lenta (Korondi, 2006). Por lo planteado, se introduce una inferencia difusa donde λ se convierte en la variable de salida, figura 3–14; no es constante y depende de la función de superficie deslizante $s(t)$.

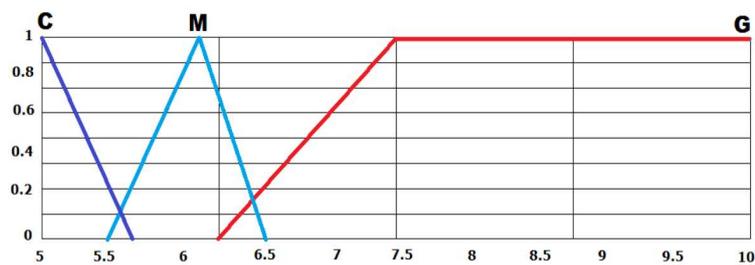


Figura 3–14: Función de pertenencia para λ .

La regla de sintonización para λ es disminuir su valor cerca de la superficie de deslizamiento para reducir el impulso de la trayectoria significativamente al golpear la superficie, amortiguando así la amplitud de vibración. Por otro lado, se sugiere elegir el mayor valor permitido para λ para maximizar la velocidad de la trayectoria hacia la superficie y reducir el tiempo de alcance. Por lo tanto, para tener un valor de λ que pueda mantener un equilibrio entre los dos hechos, se propone una base de reglas de controlador difuso para la

afinación λ donde la superficie deslizante y la pendiente son divididas y se representa como sigue: $X_{s(t)} = [NG; NM; Z; PM; PG]$ y la variable de salida se plantea $\lambda = [C; M; G]$.

El estado **G** representa al vector de estado de la planta cuando se encuentra muy lejos de la superficie deslizante en el lado negativo o positivo. El estado **M** representa la situación cuando el vector de estado se encuentra en el lado negativo o positivo de la superficie deslizante. El estado **C** esta dado cuando en vector de estado de la planta se encuentra en la vecindad de la superficie deslizante. A partir de la Tabla 3–3 se deduce que a medida que la función de superficie converge a $s(t) = 0$ la pendiente de superficie decrece, o viceversa (Prieto, 2014).

Tabla 3–3: Reglas adaptador difuso de λ

Superficie $s(t)$	Pendiente λ
NG	G
NM	M
Z	C
PM	M
PG	G

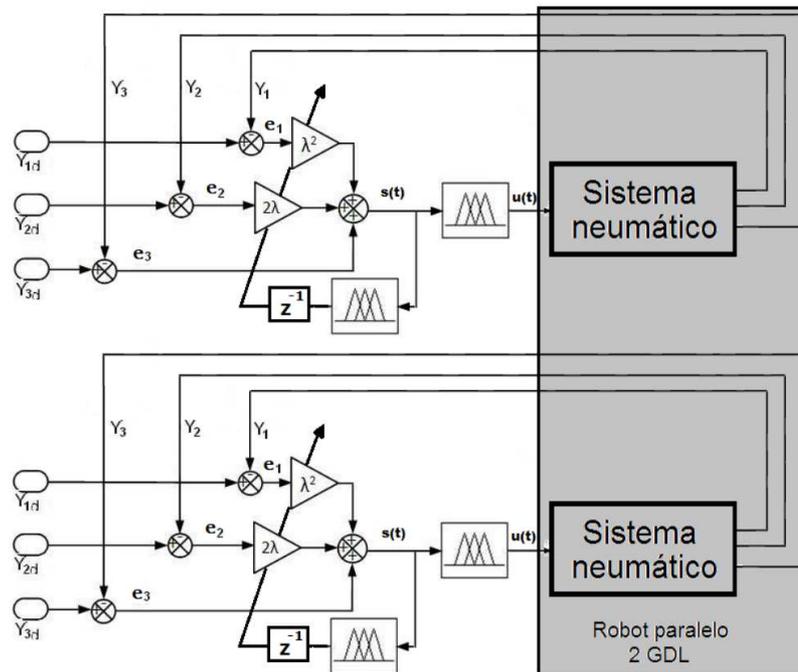


Figura 3–15: Diagrama de bloques en Simulink de la ley de control FSMC con adaptación de pendiente λ .

El esquema generalizado del algoritmo de control se muestra en la figura 3–15. En el mismo se observa la imposición de un retardo de un instante de tiempo ya que en el primer tiempo de muestreo no se tiene un valor de pendiente de superficie.

Respecto al FSMC adaptable las figuras 3–16 y 3–17 muestran la respuesta de los actuadores neumáticos en lo que respecta al control de posicionamiento ante referencias tipo escalón y pulsos.

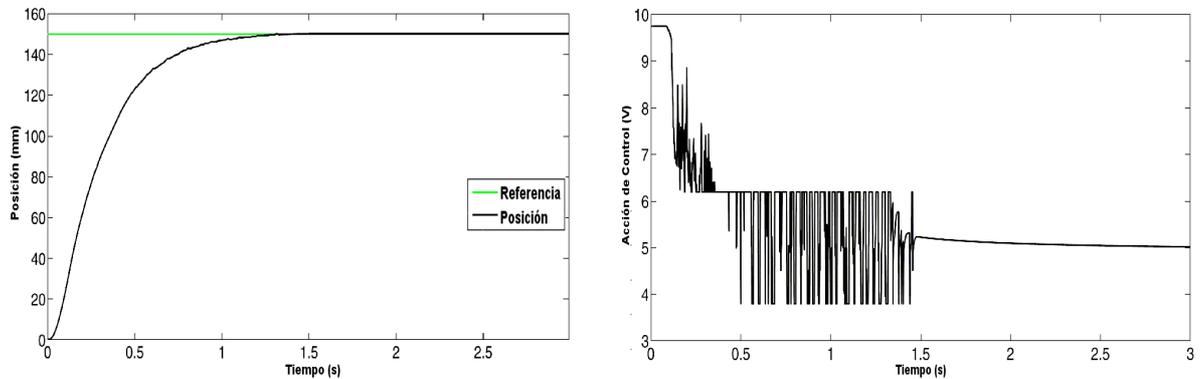


Figura 3–16: Respuesta del actuador neumático correspondiente al ángulo de ladeo ante entrada escalón de referencia en un experimento con FSMC con ajuste mediante inferencia borrosa de λ .

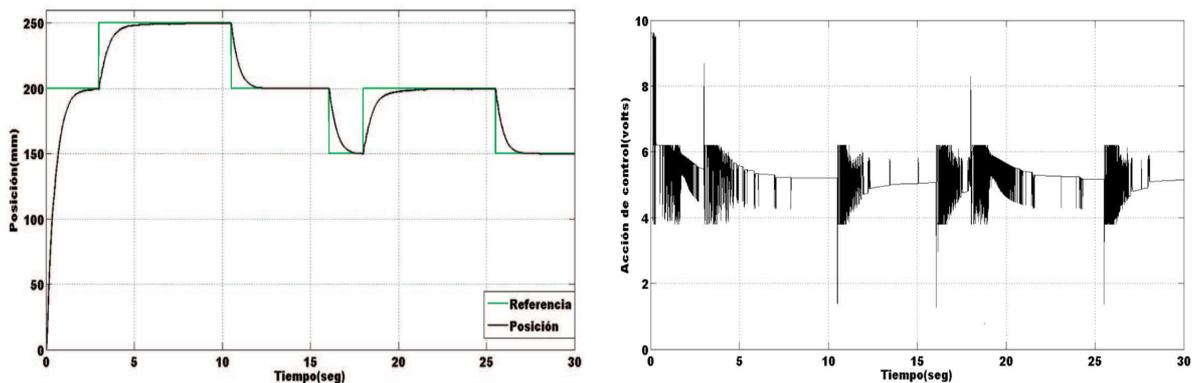


Figura 3–17: Respuesta del actuador neumático correspondiente al ángulo de cabeceo ante pulsos de referencia en un experimento con FSMC con ajuste mediante inferencia borrosa de λ .

Se puede observar un mejor desempeño en la respuesta sobreamortiguada del sistema neumático y la convergencia hacia la respuesta deseada. 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 gracias a la acción de la inferencia difusa. En el orden en que el sistema se acerque a la superficie deslizante la pendiente se reduce; así como la acción de mando. Cuando la función de superficie tenga un valor perteneciente a conjunto Z se dispara la acción de control en la servo-válvula $u(t) = 0$. Por tanto, el chattering es minimizado en la vecindad de la superficie deslizante.

Es importante destacar que a pesar de las altas no linealidades de la planta el chattering es reducido. El controlador propuesto, no presenta un modelo estimado de la planta. Sin embargo, a pesar de la variación constante de los coeficientes del modelo con respecto a la posición, descrito en el Epígrafe 2.1.1, la estabilidad y la habilidad de seguir una referencia es garantizada, figura 3–18.

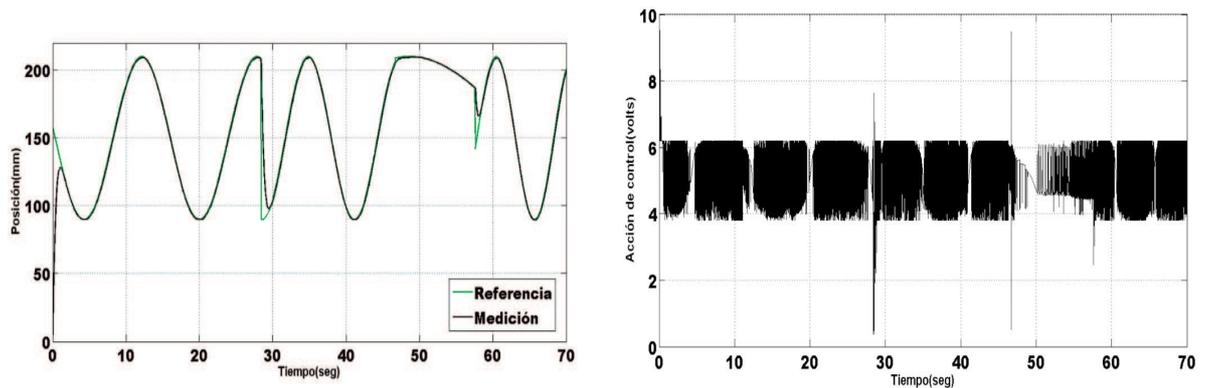


Figura 3–18: Respuesta del actuador neumático correspondiente al ángulo de ladeo ante cambio de referencia en un experimento con FSMC con ajuste mediante inferencia borrosa de λ .

3.5. 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, aspecto esencial en la síntesis de los controladores deslizantes.
- La ley de control obtenida asegura que el comportamiento del sistema sea el establecido por la superficie deslizante seleccionada. Los resultados experimentales y de simulación verifican que el controlador propuesto es superior al SMC original en estabilidad, convergencia y robustez.
- En las pruebas experimentales el controlador propuesto manifestó oscilaciones de alta frecuencia en la señal de mando de magnitud reducida en la vecindad de s , las cuales fueron suprimidas cuando el sistema alcanzó la superficie deslizante.
- Por otro lado, la dinámica del sistema es capaz de seguir una referencia determinada a pesar de la variación constante de los términos del modelo con respecto a la posición del cilindro tales como los volúmenes de las cámaras, los cambios bruscos del flujo de aire provenientes del compresor y con ello la fricción viscosa.
- La capacidad que tiene el control en modo deslizante basado en lógica borrosa de asegurar un adecuado desempeño en un amplio rango de operación quedó demostrada, exponiendo que soluciones de control adecuadas son capaces de contrarrestar las inexactitudes y bajas prestaciones de una arquitectura sensorial de bajo costo.

CONCLUSIONES

Como resultado final arrojado por esta investigación, tenemos que se propone un esquema de control en modo deslizante basado en lógica borrosa, que cumple con los requisitos especificados para la aplicación de simulador de movimiento industrial, en un robot paralelo de dos grados de libertad accionado por actuadores neumáticos, lo cual queda comprobado mediante pruebas experimentales. A partir de estos resultados, se plantean las conclusiones generales siguientes:

- A partir del estudio realizado del marco teórico relativo a los procedimientos de control de robots paralelos accionados por sistemas neumáticos las estrategias avanzadas en modo deslizante son las más recomendables para lidiar con las altas no linealidades presentes en estos sistemas; sin embargo la drástica acción del control discontinuo junto a la excitación de dinámicas no modeladas posibilitan la existencia del fenómeno conocido como *chattering*, que impide el desarrollo exitoso del mismo. En este sentido se ha hecho necesario incorporar una propuesta de control difuso capaz de suavizar la acción de mando, resultando en un esquema FSMC para el robot paralelo 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. La estabilidad del diseño realizado se analizó utilizando el método de estabilidad de *Lyapunov*. El diseño de la lógica borrosa permite prescindir de la estimación del modelo del sistema y se introduce como solución práctica en la ley de control con el objetivo de disminuir el efecto del *chattering*.
- El sistema difuso presentado de simple entrada-simple salida hace más sencilla la implementación del control porque solo presenta como entrada la función de superficie deslizante, que contiene todo el proceso, y la lógica difusa establecida permite la obtención de una acción de mando. Dicha metodología suaviza la acción de control y el ajuste del sistema difuso solo satura la salida de control cuando la función de superficie alcanza su valor máximo. Por otro lado, el algoritmo de control propuesto resulta ser genérico y puede ser aplicado a otros sistemas mecánicos actuados ya que no depende de un modelo matemático y sí de las variables de estado.
- 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, los experimentos en sistemas neumáticos, altamente no lineales, muestran la convergencia asintótica hacia la referencia. Las vibraciones en la señal de mando son atenuadas en

la vecindad de la superficie deslizante siendo la principal contribución de este algoritmo de control.

Con las conclusiones presentadas se satisfacen los objetivos del trabajo y se justifica plenamente la necesidad de la investigación, quedando corroborada la hipótesis inicial establecida.

RECOMENDACIONES

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

1. Extender los resultados obtenidos a sistemas empotrados con vista a su aplicación industrial.
2. Establecer una metodología de ajuste para las funciones de pertenencias, basado en los métodos de Lyapunov, tal que el sistema de lazo cerrado sea capaz de atenuar perturbaciones acopladas y no acopladas, así como perturbaciones desvanecientes y no desvanecientes.
3. Dada la simplicidad de la estrategia, y que constituye una implementación viable para cualquier tipo de aplicación, emplear el esquema de control en nuevos escenarios tales como seguimiento de camino de vehículos autónomos no tripulados y evaluar su desempeño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelsalam, M.M.; Areed, M.F. (2012). Decoupled fuzzy sliding mode control for a synchronous motor speed control. *International Journal of Computer Applications* **47**(11), 29–35.
- Ahmad, O.; Papelis, Y.E. (2006). Comprehensive Management of Simulator Research Subjects. In: *First Driving Simulation Conference of Asia and Pacific*. Tsukuba, Japan. pp. 2–10.
- Aissaoui, A.G; Abid, H.; Abid M. (2009). Robust fuzzy sliding mode controller design for motor driver. *Acta Electrotechnica et Informatica Vol* **9**(2), 64–71.
- Albertos, P.; Sala, A. (2004). El control borroso: una metodología integradora. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* **1**(2), 22–31.
- Alexandru, S.; Gheorghe, P.; Bogdan C. (2006). Aspects regarding the neuroadaptive control structure properties application to the nonlinear pneumatic servo system benchmark. *Electrotechnics, Electronics, Automatic Control, Informatics* pp. 82–86.
- Ali, H.; Mohd-Noor, S.B.; Bashi S.M.; Marhaban M.H. (2009). A review of pneumatic actuators (modeling and control). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* **3**(2), 440–454.
- Alzate, A.; Suárez, E.G. (2006). Aplicación de controles inteligentes sobre sistemas no lineales y análisis de estabilidad en el plano de fase. *Scientia et Technica* **12**(32), 169–174.
- Amer, A.F; Sallam, E.A; Elawady W.M (2012). A new adaptive fuzzy sliding mode control using fuzzy self-tuning for 3 dof planar robot manipulators. *Applied Intelligence* **37**(4), 613.
- Andrievsky, B.; Kazunin, D.; Kostygova D. (2014). Control of pneumatically actuated 6-dof stewart platform for driving simulator. In: *Proceedings of the 2014 19th international conference on methods and models in automation and robotics (MMAR)*. IEEE. New York. pp. 663–668.
- Andrighetto, P.L; Valdiero, C.A.; Carlotto L. (2006). Study of the friction behavior in industrial pneumatic actuators. In: *ABCN Symposium Series in Mechatronics, ed. Rio de Janeiro: ABCN Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. Vol. 2. pp. 369–376.
- Antonelli, D.; Bruno, G. (2017). Human-robot collaboration using industrial robots. In: *2nd International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME)*. *Advances in Engineering Research*. Vol. 86. pp. 99–102.

- Aracil, R.; Saltarén, R.; Sabater J.M.; Reinoso O. (2006). Robots paralelos: Máquinas con un pasado para una robótica del futuro. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* **3**, 16–28.
- Barrientos, A.; Peñin, L. (2007). *Fundamentos de Robótica*. 2nd ed.. McGraw-Hill, Interamericana.
- Bartoszewicz, A.; Nowacka-Leverton, A. (2009). *Time-Varying Sliding Modes for Second and Third Orders Systems*. Springer.
- Beater, P. (2007). *Pneumatic Drives. System Design, Modelling and Control*. Springer.
- Boiko, I.M. (2013). Chattering in sliding mode control systems with boundary layer approximation of discontinuous control. *International Journal of Systems Science* **44**(6), 1126–1133.
- Brinker, J.; Corves, B. (2015). A survey on parallel robots with delta-like architecture. *Proceedings of the 14th IFToMM World Congress* pp. 407–414.
- Brun, X.; Belgharbi, M.; Sesmat S.; Thomasset D.; Scavarda S. (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.
- Cazarez, N.R.; Aguilar, L.T.; Castillo O. (2013). Presence and elimination of chattering on fuzzy controllers designed following the fuzzy lyapunov synthesis. *Congreso Nacional de Control Automático, CNCA* pp. 843–848.
- 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.K.A.; 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.
- Chun-Peng, Y.; Lian-Wang, L.; I-Hsum L.; Hsin-Han C. (2018). A translational parallel manipulator with three horizontal-axial pneumatic actuators for 3-d path tracking. In: *2018 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*. IEEE. pp. 1–6.
- Chutia, S.; Kakoty, N.M.; Deka D. (2017). A review of underwater robotics, navigation, sensing techniques and applications. In: *Proceedings of the Advances in Robotics AIR '17, New Delhi, India*. Association for Computing Machinery.
- Clavel, R. (1988). Delta: a fast robot with parallel geometry. In: *Proceedings of 18th International Symposium on Industrial Robots*. Sydney, Australia. pp. 91–100.
- Cuong, P.V.; Wang, Y.N. (2015). Adaptive trajectory tracking neural network control with robust compensator for robot manipulators. *Neural Computing and Applications*

- 27**(2), 525–536.
- Dalvand, M.M.; Shirinzadeh, B. (2013). Motion control analysis of a parallel robot assisted minimally invasive surgery/microsurgery system. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* **29**(2), 318–327.
- 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*.
- Domínguez-Velazco, S.E. (2007). Modelo cinemático y dinámico para plataforma de dos grados de libertad. Tesis de maestría. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Edmond, R.; Yildirim, H. (2001). A high performance pneumatic force actuator system. *ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* **122**(3), 416–425.
- Erbatur, K.; Kaynak, O. (2001). Use of adaptive fuzzy systems in parameter tuning of sliding-mode controllers. *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS* **6**(4), 474–482.
- Essomba, T.; Laribi, M.A.; Zeghloul S.; Poisson-G. (2016). Optimal synthesis of a spherical parallel mechanism for medical application. *Robotica* **34**(3), 671–686.
- Firmani, F.; Podhorodeski, R.P. (2009). Singularity analysis of planar parallel manipulators based on forward kinematic solutions. *Mechanism and Machine Theory* **44**(7), 1386–1399.
- Fridman, L.; Levant, A. (2002). *Sliding Mode Control in Engineering*. Chap. 3. MARCEL DEKKER, INC.. New York.
- Gao, Y.; Chien, S. (2017). Review on space robotics: Toward top-level science through space exploration. *Science Robotics: American Association for the Advancement of Science*.
- García-Llerena, D.; Prieto, P.J.; Martínez B.L.; Urquijo O. (2015). Fuzzy based sliding mode control on platform of 2 degree of freedom (2-dof). In: *Memorias de la XVI Convención de Ingeniería Eléctrica, CIE-2015*. Hotel Memories Paradiso Cayo Santa María, Villa Clara, Cuba. pp. 280–286.
- Gary, M.B.; Shu, N. (2007). Experimental comparison of position tracking control algorithms for pneumatic cylinder actuators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **12**(5), 557–561.
- 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.
- Hafedh, A.; Mohamed, C.; Ahmed T. (2008). Robust fuzzy sliding mode controller for discrete nonlinear systems. *International Journal of Computers, Communications and Control* **3**(1), 6–20.
- Hafedh, A.; Mohamed, C.; Ahmed T. (2009). Adaptive fuzzy sliding-mode control of dynamic model based car-like mobile robot. *International Journal of Fuzzy Systems* **11**(4), 272–286.

- Han, J.W.; Wei, W.; Yang Z.D. (2018). Dynamics decoupling control of parallel manipulator. In: *Dynamic Decoupling of Robot Manipulators*. pp. 97–124. Springer.
- Han, K.L.; Gi, S.C.; Gi H.C. (2002). A study on tracking position control of pneumatic actuators. *Mechatronics* **12**, 813–831.
- Henkemans, O.A.; Bierman, B.P.B.; Janssen J.; Looije R.; Neerinx M.A.; van Dooren M.M.M.; de Vries J.L.E.; van der Burg G.J.; Huisman S.D. (2017). Design and evaluation of a personal robot playing a self-management education game with children with diabetes type 1. In: *International Journal of Human-Computer Studies*. Vol. 106. pp. 63–76.
- Hirano, J.; Tanaka, D.; Watanabe T.; Nakamura T. (2014). Development of delta robot driven by pneumatic artificial muscles. In: *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2014 IEEE/ASME International Conference*. Besacon. pp. 1400–1405.
- Huang, Y.; Pool, D.M; Stroosma O.; Chu Q. (2018). Robust incremental nonlinear dynamic inversion controller of hexapod flight simulator motion system. In: *Advances in Aerospace Guidance, Navigation and Control*. pp. 87–99. Springer.
- Huang, Z.; Li, Q.; Ding H. (2012). *Theory of parallel mechanisms*. Vol. 6. Springer Science & Business Media. Berlin.
- Hung-Yi, C.; Liang, J.W.; Wu J.W. (2013). Active pneumatic vibration control by using pressure and velocity measurements and adaptive fuzzy sliding-mode controller. *Sensors* **13**, 8431–8444.
- Hunt, K. (1978). *Kinematic Geometry of Mechanisms*. Oxford University Press. New York.
- IFR, International Federation of Robotics (2018a). *World Robotics 2018 Industrial Robots*. IFR Statistical Department c/o VDMA Robotics + Automation. Disponible en: www.ifr.org Accedido 15-12-2018.
- IFR, International Federation of Robotics (2018b). *World Robotics 2018 Service Robots*. IFR Statistical Department c/o VDMA Robotics + Automation. Disponible en: www.ifr.org Accedido 15-12-2018.
- Izaguirre, E. (2012). Control cinemático en el espacio de tareas de robot paralelo neumático en aplicación de simulador de movimiento. Tesis doctoral. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Izaguirre, E.; Hernández, L.; Rubio E.; Prieto P.J.; 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.
- Jiang, W.; Wu, G.; Fan F.; Wang W.; Zhang J.; Ye X.; Zhou P. (2017). Autonomous location control of a robot manipulator for live maintenance of high-voltage transmission lines. *Industrial Robot: An International Journal* **44**(5), 671–686.

- Jiaqi, J.; Zhenwei, X.; Liyong Z.; Baisheng M.; Chang L. (2017). The application of industrial robots in automobile manufacturing. In: *Automobile Applied Technology*. Vol. 3. p. 18.
- Kapoor, N.; Jyoti, O. (2013a). Fuzzy sliding mode controller (fsmc) with global stabilization and saturation function for tracking control of a robotic manipulator. *Journal of Control and Systems Engineering* **1**(2), 50–56.
- Kapoor, N.; Jyoti, O. (2013b). Integrating a few actions for chattering reduction and error convergence in sliding mode controller in robotic manipulator. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)* **2**(5), 466–472.
- Karpenko, M.; Sepeshri, 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.
- Korondi, P.; Gyeviki, J. (2006). Robust position control for a pneumatic cylinder. In *Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 12th International* pp. 513–518.
- Krejcin, G.V.; Krivts, I.L. (2006). *Pneumatic Actuating Systems for Automatic Equipment*. 2nd 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.
- Kyoung, K.A.; T.C. Huynh (2007). Intelligent switching control of a pneumatic muscle robot arm using learning vector quantization neural network. *Mechatronics* **17**(25), 52–62.
- 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.
- Landure, J.; Gosselin, C. (2018). Kinematic analysis of a novel kinematically redundant spherical parallel manipulator. *Journal of Mechanisms and Robotics*.
- Laski, P.A.; Takosoglu, J.E.; Blasiak S. (2015). Design of a 3-dof tripod electro-pneumatic parallel manipulator. *Robotics and Autonomous Systems* **72**, 59–70.
- 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.
- Li, C.; Yang, B.; Cai G. (2009). Optimization design of 3-tpt parallel robot based on adams simulation technology. *International Workshop on Intelligent Systems and Applications* **25**, 71–86.

- Lin, H.T.; Chiang, M.H. (2016). The integration of the image sensor with a 3-dof pneumatic parallel manipulator. *Sensors* **16**(7), 1026.
- Lombaerts, T.J.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.
- Lu, X.; Liu, M. (2016). Optimal design and tuning of pid-type interval type-2 fuzzy logic controllers for delta parallel robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*.
- Lu, X.; Zhao, S.; Liu X.; Wang Y. (2018). Design and analysis of a climbing robot for pylon maintenance. In: *Industrial Robot: An International Journal*.
- Machado, A.; Hernández, L.; Rubio E. (2007). Controlador empotrado para plataforma neumática de simulador de conducción. *XIII Convención de Ingeniería Eléctrica*.
- Mamdani, E.H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. In *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, IET* **121**, 1585–1588.
- Martínez-Jiménez, B.L.; Urquijo, O.; García-Llerena D.; Feitó A.; Rubio E. (2018). Pd-fuzzy+i control for a two degrees-of-freedom parallel robot. In: *2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*. pp. 1–6.
- Mattiazzo, G.; Mauro, S.; Pastorelli S.; Sorli M. (1999). Dynamic analysis of pneumatic actuators. *Simulation Practice and Theory* **7**(5), 589–602.
- Mattila, J.; Koivumäki, J.; Caldwell D.G.; Semini C. (2017). A survey on control of hydraulic robotic manipulators with projection to future trends. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **22**(2), 669–680.
- Meng, D.; Li, A.; Tao G. (2014). High performance motion trajectory tracking control of pneumatic cylinders: a comparison of some nonlinear control algorithms. *Advances in Mechanical Engineering*.
- Meng, D.; Wei, W.; Tang C.; Wang W.; Ding X. (2017). Modeling of a 6-dof parallel manipulator driven by pneumatic muscles. In: *Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), 2017 IEEE International Conference on*. IEEE. pp. 688–692.
- Merlet, J.P. (2006). *Parallel Robots*. Vol. 128. second ed.. Springer. France.
- Mikio, Y.; Seiji, Y. (2007). An intelligent control for state-dependent nonlinear actuator and its application to pneumatic servo system. *SICE Annual Conference*.
- Mohamed, S.; Xavier, B.; Daniel T. (2006). Systematic control of an electropneumatic system: integrator backstepping and sliding mode control. *IEEE. Transactions on Control Systems Technology*.
- Moreno-Llagostera, H. (2000). Control of a pneumatic servosystem using fuzzy logic. In: *Proc. of 1st FPNI-PhD Symp. Hamburg*. pp. 189–201.
- Nalluri, M.; Mallikarjuna, R. (2009). Dimensional synthesis of a spatial 3-rps parallel manipulator for a prescribed range of motion of spherical joints. *Mechanism and Machine Theory* **44**(1), 477–486.

- Nazir, M.B.; Wang, S. (2010). Optimized fuzzy sliding mode control to enhance chattering reduction for nonlinear electro-hydraulic servo system. *International Journal of Fuzzy Systems* **12**(4), 291–299.
- 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.
- Patel, V.; Shah, K.; Vora P.; Bagale G. (2016). Survey on actuators used in automation. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* **5**(10), 17906–17912.
- Pradipta, J.; Klunder, M.; Weickgenannt M. (2013). Development of a pneumatically driven flight simulator stewart platform using motion and force control. In: *Proceedings of the 2013 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics (AIM)*. IEEE. Wollongong, Australia. pp. 158–163.
- Precup, R.E.; Hellendoorn, H. (2011). A survey on industrial applications of fuzzy control. *Computers in Industry* **62**, 213–226.
- Prieto, P.J. (2018). Control por modos deslizantes basado en lógica difusa aplicado a sistemas dinámicos. Tesis doctoral. Instituto Tecnológico de Tijuana, Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Tijuana, Mexico.
- Prieto, P.J.; Cazarez, N.R.; Aguilar L.T.; Cardenas S.L. (2017a). Chattering existence and attenuation in fuzzy-based sliding mode control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **61**, 152–160.
- Prieto, P.J.; Cazarez, N.R.; García-Llerena D.; Aguilar L.T. (2017b). Fuzzy slope adaptation for the sliding mode control of a pneumatic parallel platform. *International Journal of Fuzzy Systems* **19**(1), 167–178.
- Prieto, P.J.; Cazarez, N.R.; García-Llerena D.; Cardenas S.L. (2014). Control por modo deslizante basado en lógica difusa aplicado en un robot neumático. In: *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, CLCA 2014*. Cancún, Quintana Roo, Mexico. pp. 343–348.
- Prieto, P.J.; Cazarez, N.R.; García-Llerena D.; Cardenas S.L. (2015). Estabilidad para un control borroso en modo deslizante aplicado a un robot paralelo neumático. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* **15**(4), 488–496.
- Prieto, P.J.; Rubio, E.; Hernandez-L.; Urquijo O. (2013). Proxy-based sliding mode control on platform of 3 degree of freedom (3-dof). *Advanced Robotics of Society of Japan*.
- Rao, Z.; Bone, G.M. (2008). Nonlinear modeling and control of servo pneumatic actuators control systems technology. *IEEE Transactions on Control System Technology* **16**(3), 562–569.

- Rastko, R.S.; Lewis, F.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, L. (1997). *Fuzzy Controllers*. Newnes.
- Ritter, C.S.; Valdiero, A.C.; Andrighetto-P.L.; Zago F. (2010). Nonlinear characteristics systematic study in pneumatic actuators. *ABCM Symposium Series in Mechatronics* 4, 818–826.
- Rubio, E. (2007a). Modelación, Identificación y Control de Actuadores Lineales electro-neumáticos para Aplicaciones Industriales. Tesis doctoral. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- 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, E.; Hernández, L.; Aracil-R.; Saltarén 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-*. Morelos, Mexico. pp. 338–343.
- Rubio, E.; Hernández, L.; Aracil-R.; Saltarén R.; Guerra J.A. (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*. Mexico.
- Rubio, E.; Hernández, L.; Aracil-R.; Saltarén R.; Moreno R. (2007c). 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.
- Ruizhou, W.; Xianmin, Z. (2018). Parameters optimization and experiment of a planar parallel 3-dof nanopositioning system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 65(3), 2388–2397.
- Sabrie, E.; Dufourand, P.; Gosselin-C. (2004). Kinematic and Dynamic Analysis of a New Rotational Motion Simulator. In: *ROMANSY 2004*. Montreal, Canada.
- Sala, A.; Arino, C.V. (2009). Reduciendo distancias entre el control borroso y el control no lineal: luces y sombras. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 6(2), 26–35.
- Sánchez, R.; González, J.; Castillo-E.; García M. (2016). Análisis cinemático de un novedoso robot paralelo reconfigurable. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática*

Industrial **13**, 247–257.

- Scaradozzi, D.; Palmieri, G.; Costa-D.; Pinelli A. (2017). Bcf swimming locomotion for autonomous underwater robots: a review and a novel solution to improve control and efficiency. In: *Ocean Engineering*. Vol. 130. pp. 437–453.
- Schulte, H.; Hahn, H. (2004). Fuzzy state feedback gain scheduling control of servo-pneumatic actuators. *Control Engineering Practice* **12**, 639–650.
- Serje-Martínez, D.A.; Pacheco-Bolívar, J.A. (2017). Parallel kinematics machine tools: Research, development and future trends. *Dyna* **84**(201), 17–26.
- Shang, C.; Tao, G.; Meng D. (2016). Adaptive robust trajectory tracking control of a parallel manipulator driven by pneumatic cylinders. *Advances in Mechanical Engineering*.
- Shi, B.P.; Han, S.K.; Changyong S.; Kyunghwan K. (2013). Dynamics modeling of a delta-type parallel robot. In: *44th International Symposium on Robotics (ISR)*. Seoul.
- Shtessel, Y.; Edwards, C.; Fridman L.; Levant A. (2014). *Sliding Mode Control and Observation*. Birkhauser.
- Shu, N.; Gary, M.B. (2005). Development of a nonlinear dynamic model for a servo pneumatic positioning system. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. Canada. pp. 43–48.
- 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.
- Tanaka, K.; Wang, H.O. (2001). *Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach*. John Wiley and Sons, Inc.
- 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.
- Tao, G.; Zuo, H. (2014). Cross-coupling adaptive robust control study of single/multiple 3-dof pneumatic parallel platforms. In: *Proceedings of the 9th Japan Fluid Power System Society (JFPS) International Symposium on Fluid Power*. Tokyo, Japan.

- 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.
- Tung, V.; Wing, S.; Law R. (2017). The potential for tourism and hospitality experience research in human-robot interactions. *International Journal of Contemporary Hospitality Management* **29**(10), 2498–2513.
- Utkin, V.; Guldner, J.; Shi J. (1999). *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*. Taylor & Francis. New Jersey.
- Valdez-Yañez, R. (2007). Resolución de mecanismo paralelo planar 3rrr impulsado por actuadores eléctricos.
- Valdiero, A.C; Bavaresco, D.; Andrighetto P.L (2008). Experimental identification of the dead zone in proportional directional pneumatic valves. *International Journal of Fluid Power* **9**, 27–34.
- Valdivia-Pacheco, A. (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.; Lefebber D. (2009). Proxy-based sliding mode control of a planar pneumatic manipulator. *The International Journal of Robotics Research*.
- Wang, J.; Masory, O. (1995). On the accuracy of a stewart platform-part i: The effect of manufacturing tolerances. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 114–120.
- Wobbe, F.; Kolbus, M.; Schumacher W. (2008). *Enhanced Motion Control Concepts on Parallel Robots*. 11th ed.. InTech Education and Publishing (Eds.) Institute of Control Engineering, Germany.
- Wong, L.K.; Leung, F.H.F.; Tam P.K.S. (2002). Design of fuzzy logic controllers for takagi-sugeno fuzzy model based system with guaranteed performance. *International Journal of Approximate Reasoning* **30**, 41–55.
- Wu, J.; Wang, D.; Wang L. (2015). A control strategy of a two degrees-of-freedom heavy duty parallel manipulator. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*.
- Xiang, G.; Zheng, J.F. (2005). Design study of an adaptive fuzzy-pd controller for pneumatic servo system. *Control Engineering Practice* **13**, 55–65.
- Xiong, W.; Chen, Z.T.; Wu H.; Xu G.; Ding T.; Mei H.P.; Li Y.M. (2018). Solution to the motion of a delta manipulator with three degrees of freedom. *Ferroelectrics* **529**(1), 159–167.
- Xu, B.; Hayakawa, Y.; Pandian S.R. (2005). A sliding mode fuzzy force tracking controller for pneumatic cylinders. *Proceedings of the 6th JFPS International Symposium on Fluid Power* pp. 173–178.
- Xu, J.; Wang, Q.; Lin Q. (2018). Parallel robot with fuzzy neural network sliding mode control. *Advances in Mechanical Engineering*.

- Xu, Q.; Li, Y. (2009). Dynamic modeling and robust control of a 3-prc translational parallel kinematic machine. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* **25**(3), 630–640.
- Xue, S.W.; Yu, H.C.; Guang Z.P. (2007). Modeling and self-tuning pressure regulator design for pneumatic-pressure-load systems. *Control Engineering Practice* **15**, 1161–1168.
- Xuesong, W.; Guangzheng, P. (2003). Modeling and control for pneumatic manipulator based on dynamic neural network. *IEEE* **223**(1), 22–36.
- 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.
- Yi, C.T.; An, C.H. (2008). Multiple-surface sliding controller design for pneumatic servo systems. *Mechatronics* **15**, 52–62.

ANEXO A

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DE LA AUTORA.

Los principales resultados de esta tesis han sido presentados en revistas y eventos científicos:

Revistas indexadas:

- Prieto, Pablo J., Nohe R. Cazarez, Dianelis García and Selene L. Cardenas (2015). Estabilidad para un control borroso en modo deslizante aplicado a un robot paralelo neumático. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 15(4), pp. 488-496.
- Prieto, Pablo J., Nohe R. Cazarez, Dianelis García y Luis T. Aguilar (2017). Fuzzy slope adaptation for the sliding mode control of a pneumatic parallel platform. International Journal of Fuzzy Systems 19(1), pp. 167-178.

Congresos internacionales:

- Prieto, Pablo J., Nohe R. Cazarez, Dianelis García and Selene L. Cardenas (2014). Control por modo deslizante basado en lógica difusa aplicado en un robot neumático. XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, CLCA 2014. Cancún, Quintana Roo, Mexico. pp. 343-348 Memorias en CD-ROOM, ISBN: 978-612-4057-69-4.
- García, Dianelis, Pablo J. Prieto, Boris L. Martínez and Orlando Urquijo (2015). Fuzzy based sliding mode control on platform of 2 degree of freedom (2-dof). XVI Convención de Ingeniería Eléctrica, CIE-2015. Hotel Memories Paradiso Cayo Santa María, Villa Clara, Cuba. pp. 280-286 Memoria en CD-ROM, ISBN: 978-959-312-025-8.
- Martínez, Boris L., Orlando Urquijo, Dianelis García, Andrés Feitó y Ernesto Rubio (2018). Pd-fuzzy+i control for a two degrees-of-freedom parallel robot. IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA). pp. 1-6. Memoria en CD-ROM, ISBN: 978-1-5386-5586-3.

ANEXO B

VALORES DE ERROR OBTENIDOS DURANTE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES EN EL ROBOT PARALELO NEUMÁTICO DE 2-GDL.

B.1. Experimentos con control en modo deslizante clásico con función de saturación:

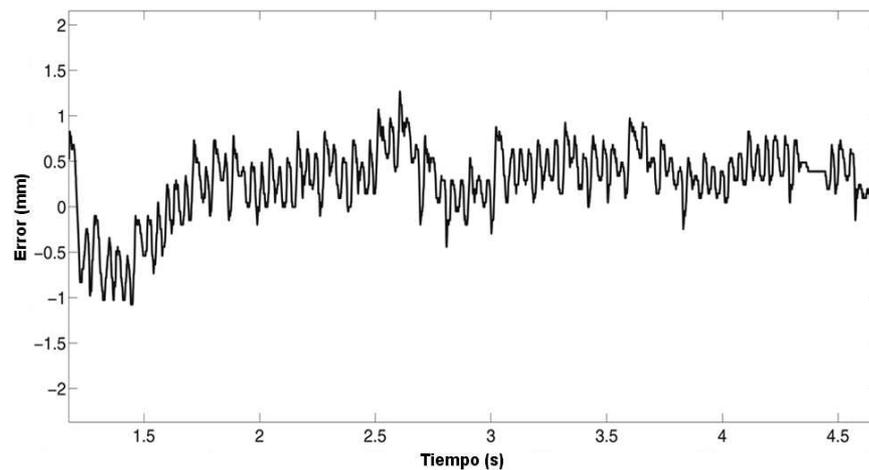


Figura B-1: Error de posición ante entrada escalón como referencia en un experimento con SMC.

B.2. Experimentos con control en modo deslizante basado en lógica borrosa:

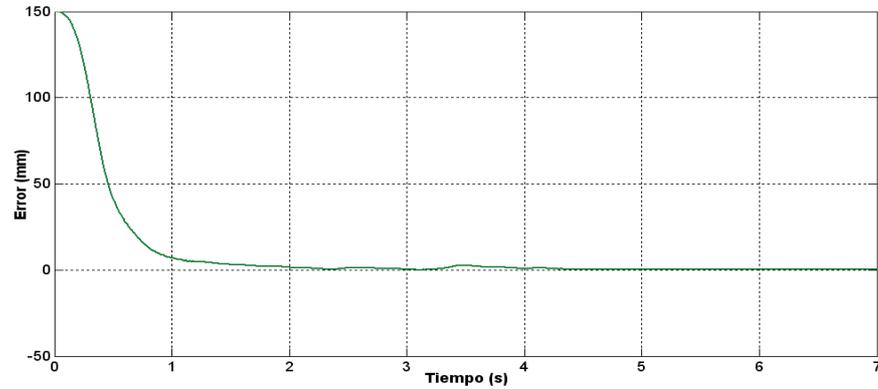


Figura B-2: Error de posición ante entrada escalón como referencia en un experimento con FSMC.

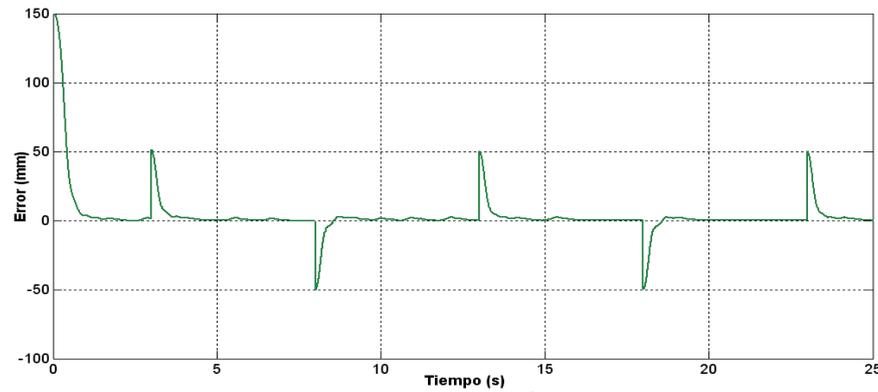


Figura B-3: Error de posición ante pulsos como referencia en un experimento con FSMC.

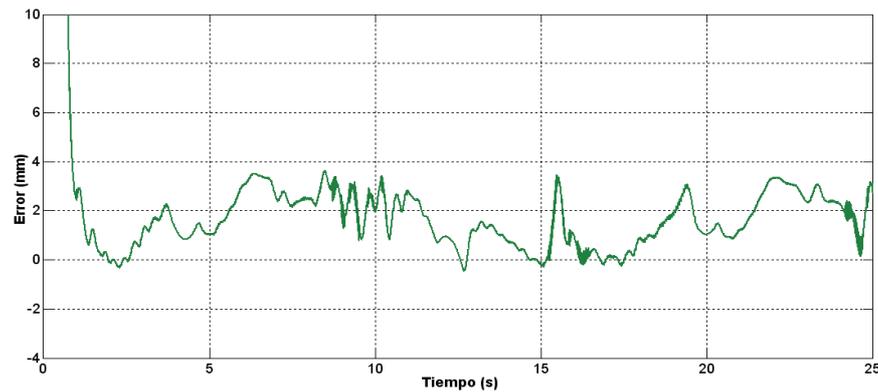


Figura B-4: Error de trayectoria ante entrada sinusoidal como referencia en un experimento con FSMC (Fase de adelanto igual a 3 rad).

B.3. Experimentos con control en modo deslizante basado en lógica borrosa luego de adicionar una inferencia borrosa para sintonizar el valor de la pendiente λ :

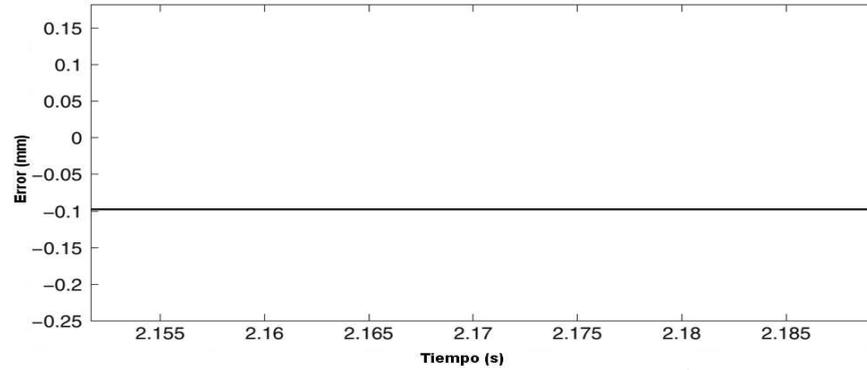


Figura B-5: Error de posición ante entrada escalón como referencia en un experimento con FSMC con ajuste mediante inferencia borrosa de λ .

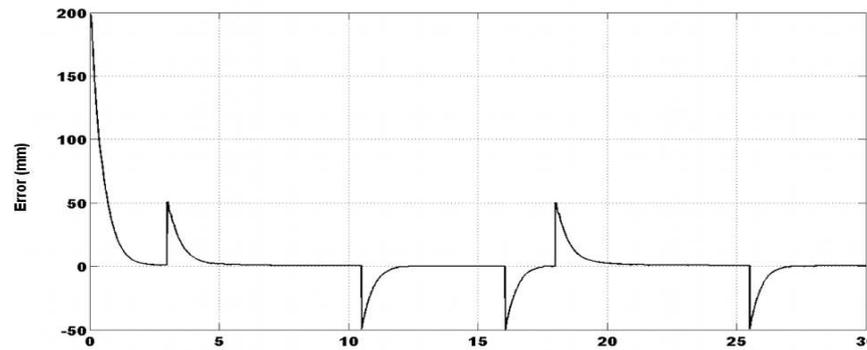


Figura B-6: Error de posición ante pulsos como referencia en un experimento con FSMC con ajuste mediante inferencia borrosa de λ .

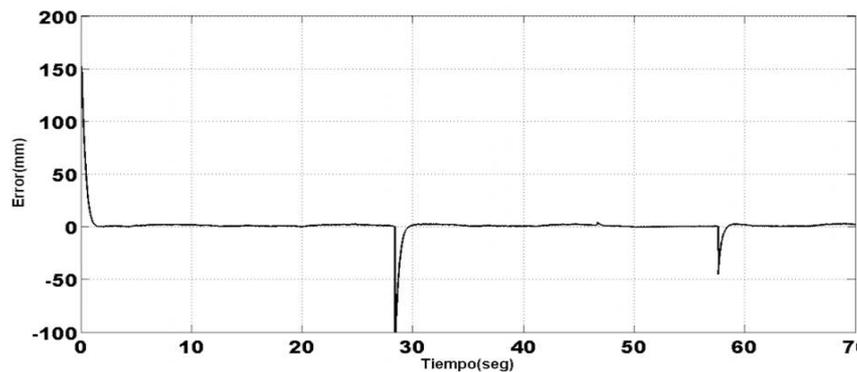


Figura B-7: Error de trayectoria ante entrada sinusoidal como referencia en un experimento con FSMC con ajuste mediante inferencia borrosa de λ .