ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE TRES TÉCNICAS DE CONTROL CLÁSICAS Y ROBUSTAS APLICADAS AL SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS ANTE LA PRESENCIA DE RETARDOS FIJOS PARA LA PLATAFORMA ROBÓTICA PIONEER 3DX

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL

BYRON FABRICIO SARABIA MORALES

byron.sarabia@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. GEOVANNY DANILO CHÁVEZ GARCÍA PhD.

danilo.chavez@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO PhD.

oscar.camacho@epn.edu.ec

Quito, Noviembre 2017

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Byron Fabricio Sarabia Morales, bajo nuestra supervisión.

ING. GEOVANNY DANILO CHÁVEZ GARCÍA PhD.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

ING. OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO PhD.
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo Byron Fabricio Sarabia Morales, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Byron Sarabia Morales

DEDICATORIA

.

“El talento se educa en la calma
y el carácter en la tempestad”.

J. W. Goethe

Dedico este trabajo, mis éxitos y mi vida

A Martha, mi madre.

A Segundo, mi padre.

AGRADECIMIENTO

Agradezco con todo amor y cariño a Martha, mi madre, quien me ha enseñado, a base de ejemplo y dedicación, que con esfuerzo y mucha paciencia no existen metas imposibles. Ella es el pilar fundamental en mi vida, gracias a su apoyo y sacrificio he podido culminar con esta etapa.

Agradezco a Segundo, mi padre, quien con su esfuerzo y colaboración me ha brindado las herramientas necesarias para convertirme en un profesional, y más allá del deber propio de un padre, me ha tenido paciencia en mis momentos de flaqueza.

Agradezco a mis tías Alicia y Carmen, y a mi tío Javier, quienes de una u otra forma estuvieron presentes en el transcurso de mi vida estudiantil, apoyándome de diversas maneras.

Agradezco a mis hermanas Gabriela, Cecilia, Mayra y Martha, a mi hermano Washington, a mi tía Marina, a mis tíos Víctor y Néstor, y a la familia Sarabia quienes desde la distancia no se han olvidado de mí.

Agradezco a mis tutores, Doc. Oscar Camacho y Doc. Danilo Chávez, que me han guiado con paciencia, predisposición y calidez humana, para poder culminar mi carrera profesional y cumplir con una de las metas más grandes en mi vida.

Agradezco a las amigas y amigos que la vida ha puesto en mi camino. También agradezco a mis amigos y compañeros de universidad con quienes hemos pasado alegrías y penurias, éxitos y fracasos, y de quienes me llevo el mejor de los recuerdos.

Finalmente agradezco a quienes, pese a mi ausencia y errores, compartieron su vida, esperanzas y sueños conmigo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA II
DEDICATORIA III
AGRADECIMIENTO IV
ÍNDICE DE CONTENIDO V
RESUMEN VIII
ABSTRACT IX
1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. OBJETIVOS 2
1.2. ALCANCE 2
1.3. MARCO TEÓRICO 3
Robótica 3
Robótica Móvil 4
Robótica Móvil Modelo Uniciclo 5
Plataforma Robótica Pioneer 3DX 8
Aproximación a Modelos de Orden Reducido 10
Retardos en Sistemas de Control 15
Controladores 19
Índice de Desempeño ISE 26
Software de Simulación 28
2. METODOLOGÍA 34
2.1. SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS 34
Generador de Trayectorias 35
Transformación Matemática para la Generación de Velocidades de Referencia 37
2.2. CONTROLADOR PD-LIKE 38
2.3. PREDICTOR DE SMITH 39
PD-Like + Predictor de Smith 39
Modelo de la Plataforma Robótica Pioneer 3DX Basado en un Modelo de Orden Reducido 40
2.4. CONTROLADOR POR MODOS DESLIZANTES (SMC) 43

SMC + Predictor de Smith 47
2.5. USO DE FILTROS Y SATURADORES 48
Uso de Filtros 48
2.6. ESQUEMA DE CONTROL FINAL PARA EL SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS 49
2.7. IMPLEMENTACIÓN DEL ESQUEMA DE CONTROL 50
Algoritmo General para el Seguimiento de Trayectorias 51
Rutina de Generación de Trayectorias 53
Generación de Referencias de Velocidad 54
Implementación de Controladores 57
Implementación del Índice de Rendimiento ISE. 61
Rutina de Generación del Retardo Fijo 61
Implementación de Filtros y Saturadores 63
2.8. DESARROLLO DE LA INTERFAZ GRÁFICA 64
Librería WxPython 64
Implementación de la Interfaz Gráfica 65
Resultados de la Implementación 66
Gráficas de Resultados 67
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 70
3.1. SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES 70
Sintonización del Controlador PD-Like 71
Sintonización del Controlador PD-Like + Predictor de Smith 75
Sintonización del Controlador SMC + Predictor de Smith 79
Resumen de Resultados 84
3.2. CALIBRACIÓN DE CONTROLADORES 85
Calibración de Controladores para la Trayectoria Circular 86
Calibración de Controladores para la Trayectoria Cuadrada. 97
Calibración de Controladores para la Trayectoria Lemniscata de Bernoulli. 108
3.3. COMPARACIÓN DE CONTROLADORES CALIBRADOS PARA EL SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS 116
Resultados en el Seguimiento de la Trayectoria Circular 116
Resultados en el Seguimiento de la Trayectoria Cuadrada 120

Resultados en el Seguimiento de la Trayectoria Lemniscata de Bernoulli 123
3.4. RESULTADOS ANTE LA VARIACIÓN DEL RETARDO EN EL ESQUEMA DE SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS 125
Variación del Retardo ante el Seguimiento de la Trayectoria Circular 126
Variación del Retardo ante el Seguimiento de la Trayectoria Cuadrada 130
Variación del Retardo ante el Seguimiento de la Trayectoria Lemniscata de Bernoulli 132
3.5. RESULTADOS ANTE LA PRESENCIA DE PERTURBACIONES DE VELOCIDAD. 134
Perturbaciones de Velocidad ante el Seguimiento de la Trayectoria Circular 139
Perturbaciones de Velocidad ante el Seguimiento de la Trayectoria Cuadrada. 142
Perturbaciones de Velocidad ante el Seguimiento de la Trayectoria Lemniscata de Bernoulli. 146
3.6. RESULTADOS ANTE ERRORES EN EL MODELO 148
Errores en el Modelo para el Controlador PD-Like + Predictor de Smith 149
Errores en el Modelo para el Controlador SMC + Predictor de Smith 151
4. CONCLUSIONES 154
4.1. CONCLUSIONES 154
4.2. RECOMENDACIONES 156
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 158
6. ANEXOS 163
ANEXO I 163
Guía de Instalación 163
ANEXO II 170
Procedimiento para el Desarrollo de Aplicaciones en Eclipse 170
ANEXO III 172
Manual de Usuario 172

RESUMEN

La investigación aborda el problema que surge ante la presencia de retardos temporales en los esquemas de control. Los retardos producen una reducción en el rendimiento de los controladores, e inclusive pueden provocar la inestabilidad del sistema, por esta razón se implementan técnicas de control dedicadas a la atenuación de los efectos negativos. De manera más específica, se estudia el efecto que tienen los retardos en el seguimiento de trayectorias con la plataforma robótica Pioneer 3DX. Los controladores analizados son: PD-Like y Controlador por Modos Deslizantes (SMC); además se implementa el esquema Predictor de Smith. En primer lugar, se obtiene la respuesta del seguimiento de trayectorias con el uso del controlador PD-Like, luego se ingresa el Predictor de Smith y se verifican los resultados. Finalmente se implementa el controlador SMC con superficie deslizante tipo PD-Like, manteniendo en el esquema al Predictor de Smith. Todas las técnicas de control en análisis buscan un mejor rendimiento en el seguimiento de trayectorias por lo que se estudia su efectividad con el índice de desempeño ISE (Integral del Error Cuadrático). Para la obtención de resultados se utiliza el simulador MobileSim, que contiene los modelos de todas las plataformas de MobileRobots.

PALABRAS CLAVE: pioneer 3dx, pd-like, predictor de smith, controlador por modos deslizantes, retardos fijos, mobilesim.

ABSTRACT

The research reports the problem that arises in the presence of time delays in control schemes. The delays produce a reduction in the performance of the controllers, and can even cause the instability of the system, for which control techniques dedicated to the attenuation of its negative effects are implemented. More specifically, the effect that delays have on trajectory tracking of the Pioneer 3DX robot is studied. The analyzed controllers are: PD-Like and Sliding Mode Controller (SMC); Besides, the compensator named Smith Predictor is implemented. First of all, the trajectory tracking response is obtained with PD-Like controller, after that the Smith Predictor scheme is used. Finally, the Sliding Mode Controller (SMC) with a PD-Like type sliding surface is implemented, keeping the Smith Predictor in the scheme. The effectiveness of the control techniques is examined using the ISE (Integral of the Quadratic Error) performance index. To obtain results, the MobileSim simulator is used, which contains the models of all MobileRobots platforms.

KEYWORDS: pioneer 3dx, pd-like, smith predictor, sliding mode controller, time-delay, mobilesim.

1. INTRODUCCIÓN

Las redes de comunicación y su integración en lazos de control cerrados cada vez son sistemas más comunes, con frecuencia se tiene una comunicación entre el controlador/operador con los sensores y actuadores a través de una red, a este tipo de sistema se lo conoce como 'Sistema de control distribuido en tiempo real' [1]. Los sistemas robóticos han adaptado el uso de las redes de comunicación para su aplicación en operación, transmisión de datos y/o video, envió y recepción de señales provenientes de sensores o actuadores por lo que ha puesto en tema de estudio los aspectos relacionados con el uso de estas redes. Generalmente la operación a distancia es implementada cuando se deben realizar tareas de alto riesgo o peligro para el ser humano [2], como por ejemplo el manejo de material radioactivo o la exploración en zonas con presencia de explosivos. Otro motivo para la operación remota es la imposibilidad física debido a la distancia para el uso de dispositivos o sistemas, como por ejemplo la operación de vehículos no tripulados submarinos o aéreos, uso de robots espaciales, telemedicina, entre otros [3].

En una aplicación robótica, el uso de una red de comunicaciones en la operación remota introduce retardos de transporte debido a la transmisión y recepción de datos a través de la arquitectura física [1] [4] [5] [6]. La presencia de retardos en el sistema de control con frecuencia tiene efectos negativos tales como cambio de fase, incremento en el error, bajo rendimiento en la ejecución de tareas e inclusive puede resultar en operaciones inestables [2] [7] [8]. El uso de técnicas clásicas de control no presentan resultados adecuados debido a que no se contempla un retardo en el cálculo de las acciones de control de la variable manipulada [4] [6].

Las investigaciones relacionadas con la presencia de retardos centran sus esfuerzos en garantizar la estabilidad del sistema [9], con frecuencia se tienen soluciones para la teleoperación bilateral de robots móviles [10] o manipuladores en una configuración maestro-esclavo [8]. Entre los esquemas que se han propuesto para garantizar la estabilidad están el uso de un control basado en impedancia [11], control basado en el modelo del operador [12], control basado en pasividad [13], compensación del retardo a través de un estimador de estado inspirado en un predictor [14] [15], uso de estructuras PD-Like [2] [16], entre otras técnicas.

En este trabajo se considera el robot comercial Pioneer 3DX, el esquema presenta un retardo invariante en el tiempo, simétrico en la trasmisión de las señales de control hacia el robot, así como la realimentación de los valores de los sensores hacia el controlador. La plataforma robótica no es teleoperada sino que se analiza su funcionamiento en el

seguimiento de trayectorias. Se aplica al esquema de control la técnica PD-Like. Luego de observar los resultados obtenidos, manteniendo el controlador PD-Like, se agrega al esquema el Predictor de Smith, que provee de una realimentación para el cálculo de los controladores sin los efectos del retardo. Y finalmente manteniendo en el esquema de control al Predictor de Smith, se reemplaza la técnica PD-Like por el controlador por modos deslizantes (SMC) con una superficie deslizante PD-Like, para una respuesta robusta ante la presencia de perturbaciones o errores en el modelado.

Todo lo anterior se llevará a cabo a nivel de simulación usando el lenguaje de programación Python y el paquete ARIA, además del simulador MobileSim que presenta un ambiente donde se tiene una respuesta del robot muy parecida a la real. A futuro, este trabajo servirá para el estudio con aplicaciones que poseen retardos variables y en la posible implementación de estos controladores en sistemas robóticos reales, no solo en robótica móvil sino en manipuladores, robots tipo péndulo invertido, entre otros, además de la adaptación de estas técnicas a procesos de otra naturaleza con la presencia de retardos.

1.1. Objetivos

El objetivo general de este estudio técnico es: diseñar y simular tres técnicas de control clásicas y robustas aplicadas al seguimiento de trayectorias ante la presencia de retardos fijos para la plataforma robótica Pioneer 3DX.

Los objetivos específicos de este Proyecto Integrador son:

- Revisar y recopilar información relacionada con publicaciones científicas que aborden los problemas temporales en sistemas robóticos.
- Diseñar controladores orientados al seguimiento de trayectorias para un robot tipo uniciclo ante la presencia de retardos fijos.
- Implementar los algoritmos de control en un simulador para obtener una respuesta aproximada del robot.
- Diseñar e implementar una interfaz gráfica para la configuración de parámetros y obtención de información importante en la simulación.
- Verificar los resultados obtenidos a través de las pruebas realizadas en el seguimiento de trayectorias.

1.2. Alcance

El alcance del proyecto de simulación aborda los siguientes puntos:

- Ante la presencia de retardos fijos, reunir información sobre los controladores PD-Like, SMC y Predictor de Smith orientados a su aplicación en robótica móvil.
- Diseñar controladores tipo: PD-Like, PD-Like más Predictor de Smith y SMC más Predictor de Smith para el seguimiento de trayectorias en una plataforma robótica Pioneer 3DX debido a la presencia de retardos fijos.
- Con el uso del simulador MobileSim a través de la programación en lenguaje Python y el paquete computacional ARIA, implementar los algoritmos de control diseñados para obtener una respuesta aproximada al comportamiento de la plataforma real.
- A través de una interfaz gráfica, vincular el código implementado en el programador Eclipse con el simulador MobileSim para la configuración de los controladores y la visualización de resultados.
- Usando el índice ISE (Integral del Error Cuadrático) verificar el desempeño de los controladores ante perturbaciones y errores en el modelado.

1.3. Marco Teórico

En esta sección se hace referencia a los conceptos básicos e información teórica que permitirá entender tanto el contexto del problema, así como el enfoque desarrollado para abordar la solución propuesta. Esto incluye una descripción del robot y del modelo matemático, del origen y los efectos que tienen los retardos en un sistema de control, y por último las técnicas de control a usarse, así como el software necesario para implementar estos controladores.

Robótica

A la robótica se la puede definir como una rama de la ciencia que aplica la informática al diseño y empleo de aparatos que, en sustitución de personas, realizan operaciones o trabajos, por lo general en instalaciones industriales [17].

La informática, mecánica, electrónica e ingeniería son algunas de las disciplinas que se combinan en la robótica, cuya meta principal es la construcción de dispositivos que funcionen de manera autónoma y tengan la capacidad de realizar trabajos de alta complejidad en ambientes hostiles o de difícil acceso para los seres humanos [18].

El desarrollo de la ciencia de materiales y la miniaturización combinado con la accesibilidad de componentes, sumado además el acceso inmediato a la información especializada y el aumento progresivo de la capacidad de procesamiento de los dispositivos han permitido un crecimiento exponencial de la robótica, tanto en aplicaciones industriales, así como en

aplicaciones orientadas al consumo en el hogar. En la Figura 1.1. se pueden observar ejemplos de robots de diversas formas creados con LEGO Mindstorm, una marca comercial para la creación de robots de tipo modular en base a la unión de piezas y programación interactiva.

Figura 1.1. Ejemplo de robots [19].

Los robots se clasifican de acuerdo con diversos criterios, ya sea por su construcción, su forma de locomoción, la actividad que realiza, su grado de autonomía, etc. De acuerdo con el desarrollo de este trabajo se enfoca la atención en la robótica móvil.

Robótica Móvil

Es un campo de la investigación y aplicación robótica que engloba a los dispositivos que tienen la capacidad de desplazarse en su entorno físico [20]. El movimiento se produce usando variadas composiciones mecánicas tales como ruedas, hélices, propulsores, patas, etc. Los robots móviles, de acuerdo con su construcción, pueden desplazarse en casi cualquier medio teniendo, en ciertos casos, restricciones mecánicas en su desplazamiento.

Clasificación de Robots Móviles

Este tipo de dispositivos, tomando en cuenta su modo de locomoción y el medio físico en el que se desplazan, se clasifican en las siguientes categorías [20]:

Terrestres:

- Con ruedas
- Con patas
- Con orugas

Acuáticos:

- Superficiales

- Submarinos

Aéreos:

- Con hélices
- Con propulsores

En el presente estudio nos vamos a centrar en el robot móvil terrestre con ruedas de modelo uniciclo y en la versión comercial Pioneer 3DX que más adelante se analiza a detalle.

Robótica Móvil Modelo Uniciclo

Este tipo de dispositivos robóticos cuentan usualmente con dos ruedas en tracción diferencial, lo que permite que cada rueda gire a diferente velocidad para tomar curvas hacia la izquierda o derecha de su posición. Adicionalmente, posee una o más ruedas tipo bola o tipo castor para la estabilidad mecánica.

Figura 1.2. Constitución física del robot móvil de tracción diferencial tipo uniciclo.

En la Figura 1.2 se puede observar de mejor manera la constitución física del robot. A continuación, se analiza la restricción en su desplazamiento que posee este mecanismo diferencial.

Restricción No-Holonómica del Robot Modelo Uniciclo

Una restricción no-holonómica es aquel conjunto de posiciones en el espacio a la cual el robot no puede dirigirse de manera instantánea, generalmente estas restricciones vienen a causa de la disposición de los elementos en la estructura mecánica [21]. Considerando el robot de tracción diferencial de modelo uniciclo, la restricción no-holonómica proviene de la imposibilidad que el robot se mueva de manera perpendicular a la orientación de sus ruedas, esto se puede observar en la Figura 1.3.

Figura 1.3. Representación de la restricción no-holonómica del robot de tracción diferencial del modelo uniciclo [21].

Modelo Cinemático

El modelo cinemático de un robot es con frecuencia aplicado para el desarrollo de controladores cuando el dispositivo va a realizar tareas a baja velocidad y cuya carga de trabajo sea pequeña en relación con su estructura [22].

En contexto con el estudio realizado, este modelo describe el comportamiento del robot móvil usado debido al rango de velocidades y al uso de un simulador, por lo que no será necesario un modelo que tome en cuenta fuerzas, inercias o deslizamiento en las ruedas como lo haría el modelo dinámico.

La Figura 1.4 muestra la disposición geométrica del robot tipo uniciclo, la posición del robot en este caso la define el centro del eje de las ruedas B. El modelo cinemático está representado en la Ecuación 1.1.

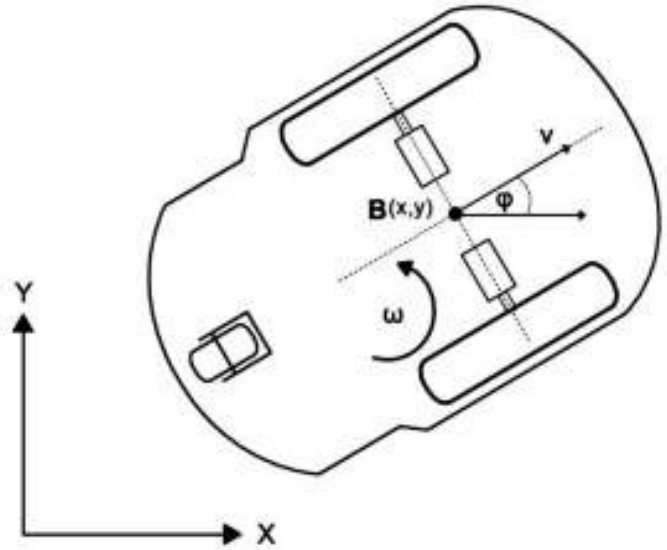


Figura 1.4. Modelo de la estructura del robot móvil tipo uniciclo [22].

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 \\ \sin\varphi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$$

Ecuación 1.1. Modelo cinemático del robot tipo uniciclo.

Donde:

B: Centro del eje de las ruedas y define la posición del robot.

x, y: Posiciones respecto al eje X y eje Y del punto B.

$\dot{x}, \dot{y}$: Velocidades respecto al eje X y eje Y del punto B.

φ: Ángulo de orientación respecto al eje X.

v: Velocidad lineal del robot.

ω: Velocidad angular del robot.

Al analizar el modelo de la Figura 1.4 se observa que la ubicación del punto B de interés restringe el desplazamiento a las posiciones que están perpendiculares a las ruedas de manera instantánea, por lo que para mejorar en cierta medida se tomará en cuenta un punto perpendicular al eje de las ruedas, a una distancia 'a' del punto B y que coincidirá con el centro de masa del robot para mejorar la estabilidad mecánica [22]. Esto se puede observar en la Figura 1.5, por lo que el modelo cinemático, incluyendo esta mejora, se puede analizar en la Ecuación 1.2.

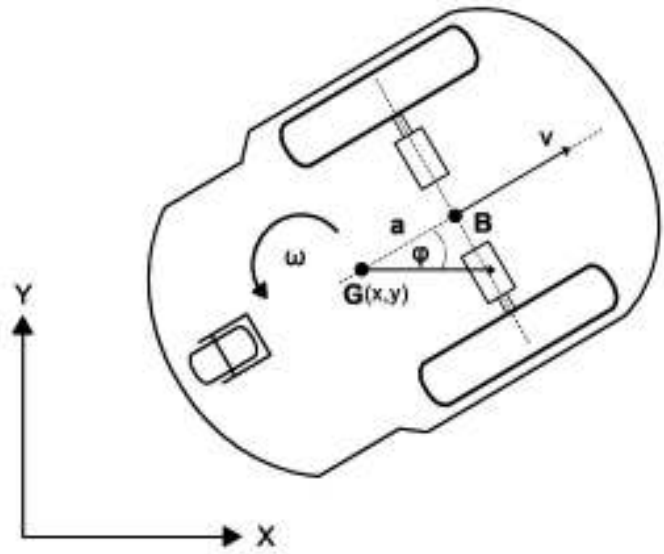


Figura 1.5. Modelo mejorado de la estructura del robot móvil tipo uniciclo [22].

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -a \cdot \sin\varphi \\ \sin\varphi & a \cdot \cos\varphi \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$$

Ecuación 1.2. Modelo cinemático del robot tipo uniciclo con mejora en la restricción no-holonómica.

Donde:

B: Centro del eje de las ruedas.

G: Centro de gravedad y define la posición del robot.

x, y: Posiciones respecto al eje X y eje Y del punto G.

$\dot{x}, \dot{y}$: Velocidades respecto al eje X y eje Y del punto G.

φ: Ángulo de orientación respecto al eje X.

v: Velocidad lineal del robot.

ω: Velocidad angular del robot.

a: Distancia entre el centro del eje de las ruedas y el centro de gravedad.

Plataforma Robótica Pioneer 3DX

Pioneer es el robot móvil de investigación más popular del mundo en la actualidad, debido principalmente a la versatilidad, fiabilidad y durabilidad, por lo que es la plataforma de referencia para la investigación robótica. El robot Pioneer incluye un controlador de movimiento con realimentación de encoder, y tiene la posibilidad de ser monitoreado usando mapeo/localización o controlado mediante teleoperación [23].

Tabla 1.1. Especificaciones del Robot Pioneer 3DX [24].

CARACTERÍSTICA	DETALLES
Construcción	Cuerpo de aluminio de 1,6 mm y neumáticos de caucho de espuma.
Masa	9 kg de peso del robot y hasta 17 kg de carga útil.
Límites de Operación	Máxima velocidad de avance/retroceso: 1,2 m/s Max. Velocidad de rotación: 300°/s Periodo de muestreo: 100ms.

Baterías	Hasta 3 baterías de ácido de plomo de 7200mAh a 12V, provee de 8 a 10 horas de operación. Tiempo de carga de 12h o 2,4h con un cargador de alta capacidad.
Microcontrolador	Sistema serial, 32 entradas digitales, 8 salidas digitales, 7 entradas analógicas, 3 puertos de expansión en serie
Panel de Usuario	Parlante programable MIDI, indicador de encendido, indicador de carga de batería, 2 switches auxiliares, sistema de reset, botón de habilitación de motores.

Adicional se incluye el siguiente software:

- ARIA, que provee un framework para controlar y recibir información desde todas las plataformas de MobileRobots incluido el Pioneer 3DX.
- MobileSim, que es un simulador de código abierto para todas las plataformas de MobileRobots.
- MobileEyes, que es una interfaz gráfica de usuario para una operación remota y el monitoreo del robot.
- Mapper 3-Basic, que sirve para crear y editar mapas para su uso con ARIA, MobileSim, etc.
- SONARNL, que provee una localización y navegación a través de una aproximación basada en el sonar.

El hardware adicional [23] que se incluye es:

- Computadora Onboard, que se puede integrar al robot o se puede usar una PC externa.
- Tarjeta de comunicación Wireless Ethernet para comunicación.
- Giroscopio para mejorar los datos de posicionamiento y rotación.
- Cámara de video para adquisición de imágenes para la computadora Onboard.
- Sensor Laser que viene incluido con el software ARNL.

- Además, se puede integrar accesorios tales como: brazos manipuladores, grippers, switches tipo bumper, etc.

En la Figura 1.6 se puede observar una vista real del robot Pioneer 3DX y un esquema de las dimensiones físicas.

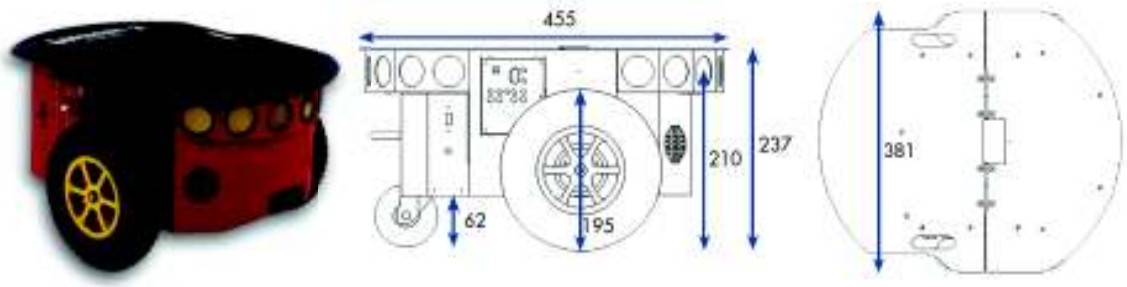


Figura 1.6. Vista lateral, vista superior e imagen real del Pioneer 3DX [8].

Aproximación a Modelos de Orden Reducido

En el desarrollo de controladores destinados a un proceso o dispositivo en específico, se puede notar que la mayoría de los modelos matemáticos son de características no lineales, como se observar en las Ecuaciones 1.1 y 1.2, por lo que el procedimiento para sintetizar controladores tomando en cuenta estos modelos tiende a ser complejo y requiere de amplios conocimientos matemáticos. Una manera de simplificar los modelos matemáticos es aproximarlos a un sistema de orden reducido, que permite tener un modelo simplificado de características lineales y que además presenta una respuesta muy parecida a la respuesta real del proceso o dispositivo. [25]

Una de las técnicas que proporciona buenos resultados se basan en una obtención de datos de la salida del sistema a lazo abierto ante un cambio de referencia. Posterior a esto se aproxima esta respuesta a un modelo de primer orden con retardo (FOPDT por sus siglas en inglés).

Curva de Reacción y Modelo de Primer Orden con Retardo

Para efecto de los métodos de sintonización de los controladores, y en el caso especial del desarrollo de este trabajo, el uso que se le da a una aproximación del comportamiento del robot en la implementación del Predictor de Smith y controlador SMC, usualmente se requiere que los sistemas sobreamortiguados de orden superior a uno se representen por medio de un modelo de primer orden más tiempo muerto [26], como el dado por la Ecuación 1.3. En la obtención del modelo aproximado del robot Pioneer 3DX la entrada de la función de transferencia es una referencia de velocidad, y la salida es la velocidad desarrollada por el robot, en las secciones 2.3 y 2.4 se especifica a detalle el uso del modelo reducido.

$$G_{apx}(s) = \frac{K_{apx} \cdot e^{-t_0 s}}{\tau s + 1}$$

Ecuación 1.3. Modelo aproximado de primer orden con retardo (FOPDT).

Donde:

$G_{apx}(s)$: Función de transferencia de aproximación de primer orden con retardo.

K_{apx}: Ganancia en estado estacionario del sistema.

t_0: Tiempo muerto del sistema.

τ: Constante de tiempo del sistema

La siguiente parte de la sección es tomada de [27]. La curva de reacción del proceso se obtiene mediante una prueba realizada en lazo abierto, donde se coloca el controlador en manual, se verifica que el proceso se encuentre en un estado estacionario y se realiza un cambio de referencia, registrando la entrada y salida del sistema desde que se realizó el cambio hasta que el proceso se estabiliza nuevamente. Usualmente la referencia es un punto donde el sistema vaya a operar en condiciones normales y no es recomendable llevarlo hasta los límites de su estabilidad. Una vez obtenida la curva, para identificar las constantes K_{apx}, t_0 y τ se procede a obtener la respuesta del sistema al 28.3% y 63.2% del valor final, esto se puede observar en la Figura 1.7.

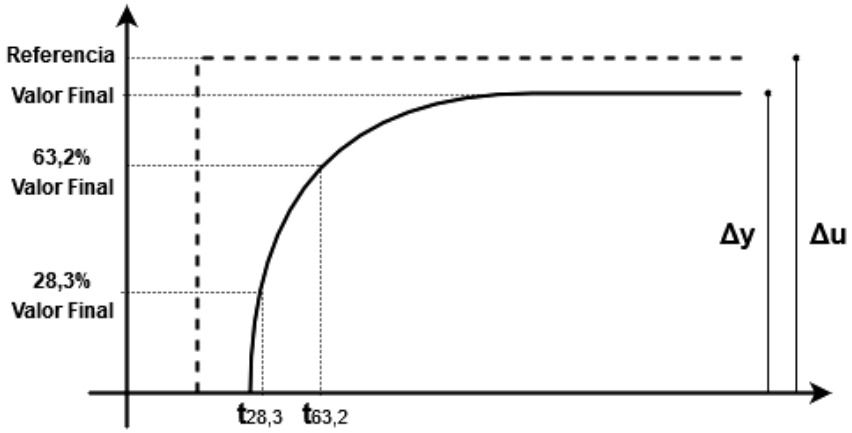


Figura 1.7. Curva de reacción y sus elementos.

Una vez obtenidos estos valores se aplican las Ecuaciones 1.4, 1.5 y 1.6 para determinar las constantes que definen el modelo de primer orden con retardo.

$$\tau = 1{,}5 \cdot (t_{63.2} - t_{28.3})$$

Ecuación 1.4. Constante de tiempo del modelo FOPDT.

$$t_0 = t_{63.2} - \tau$$

Ecuación 1.5. Tiempo muerto del modelo FOPDT.

$$K_{apx} = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

Ecuación 1.6. Factor de escalamiento del modelo FOPDT.

Luego de obtener la aproximación, para usar este modelo en la sintonización de un controlador, se observa que la parte de modelación del tiempo muerto del sistema presenta un inconveniente en su manejo matemático, por lo que se debe aproximar esta parte de alguna manera. A continuación, se analiza la opción más adecuada.

Aproximación del Tiempo Muerto en el Modelo FOPDT

Para la aproximación del tiempo muerto o retardo del modelo reducido de primer orden se pueden aplicar usualmente la aproximación de Padé o la aproximación de Taylor [28]. En la Figura 1.8 se puede ver una comparativa de estas dos aproximaciones.

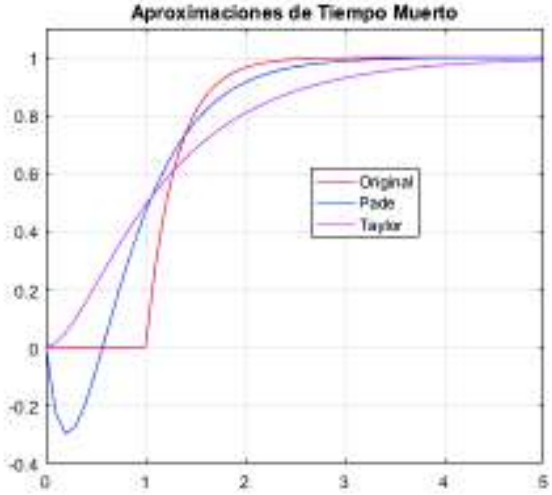


Figura 1.8. Comparación entre el modelo de orden reducido completo y usando la aproximación de Padé y Taylor.

Se puede observar que la aproximación de Padé provoca un comportamiento parecido al de un sistema de fase no mínima, pues al inicio se produce una respuesta inversa a lo que se desea con la referencia, a pesar de tener una respuesta más próxima a la respuesta real en el estado transitorio. Por su parte la aproximación de Taylor presenta una respuesta en estado transitorio menos apegada a la respuesta real, sin embargo, no posee el comportamiento de fase no mínima y su respuesta en estado permanente es buena, por lo que se usará para aproximar el tiempo muerto. En la Ecuación 1.7 se observa la aproximación de Padé y en la Ecuación 1.8 la aproximación de Taylor [28].

$$e^{-t_0 s} = \frac{1 - \frac{t_0 s}{2}}{1 + \frac{t_0 s}{2}}$$

Ecuación 1.7. Aproximación de Padé para el tiempo muerto.

$$e^{-t_0 s} = \frac{1}{t_0 s + 1}$$

Ecuación 1.8. Aproximación de Taylor para el tiempo muerto.

Desarrollo del Modelo Reducido del Robot Pioneer 3DX

En desarrollo de las técnicas de control, con frecuencia se emplean los modelos matemáticos de los procesos que se desean controlar, dichos modelos pueden ser de gran complejidad lo que dificulta la tarea de sintetización de los controladores. Se ha podido definir estrategias que simplifiquen el procedimiento, una solución sencilla y con buenos resultados es el uso de modelos de orden reducido. A continuación, se presentan los resultados obtenidos experimentalmente con el uso del simulador MobileSim para la plataforma robótica Pioneer 3DX.

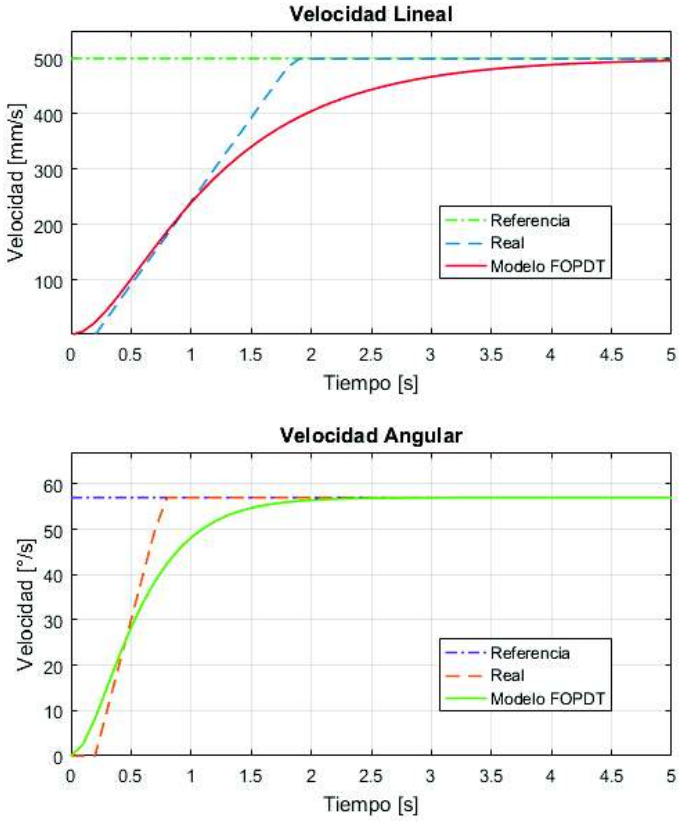


Figura 1.9. Curva de reacción y modelo FOPDT para el robot Pioneer 3DX.

Como se observa en la Figura 1.9, la aproximación del modelo de primer orden con retardo se apega mucho a la respuesta real del sistema ante un cambio en la referencia de: 500 [mm/s] en la velocidad lineal y de 57 [°/s] en la velocidad angular. Estos valores se usaron puesto que, representan un rango de funcionamiento adecuado en la tarea de seguimiento de trayectorias, considerando un modelo cinemático que no toma en cuenta cargas de transporte o grandes velocidades de funcionamiento.

El modelo de primer orden obtenido se usará tanto para la implementación del Predictor de Smith, así como para el Controlador por Modos Deslizantes (SMC) puesto que se desarrolla estas técnicas de control en base a la aproximación de primer orden (FOPDT) de la velocidad lineal y angular del robot. Los valores que definen al modelo aproximado en base a las Ecuaciones 1.4, 1.5 y 1.6 son presentados en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Resultados de la obtención del modelo FOPDT mediante la prueba de cambio de referencia.

Constantes del Modelo	**Velocidad Lineal [v]**	**Velocidad Angular [ω]**
$\boldsymbol{\tau} = 1{,}5 \cdot (t_{63.2} - t_{28.3})$	0.936	0.312
$\boldsymbol{t_0} = t_{63.2} - \tau$	0.364	0.288
$\boldsymbol{K_{apx}} = \dfrac{\Delta y}{\Delta u}$	1.0	1.0

Colocando las constantes expuestas en la Tabla 1.2. en forma de función de transferencia, usando la aproximación de Taylor para el tiempo muerto de la Ecuación 1.8, se tienen las siguientes relaciones:

$$G_{apx_v}(s) = \frac{1}{(0.936s + 1)(0.364s + 1)}$$

Ecuación 1.9. Función de transferencia del modelo FOPDT para la velocidad lineal.

$$G_{apx_\omega}(s) = \frac{1}{(0.312s + 1)(0.288s + 1)}$$

Ecuación 1.10. Función de transferencia del modelo FOPDT para la velocidad angular.

Cabe recalcar que estas funciones de transferencia tienen como entrada una referencia de velocidad y como salida la velocidad real desarrollada por el robot.

Retardos en Sistemas de Control

La presencia de retardos en un sistema de control es un fenómeno que se produce debido a diversos orígenes entre los que se encuentran: por la naturaleza del sistema, por el uso de procesadores digitales, por la extensión de los cálculos, por la ubicación de los actuadores, etc. Sin embargo, cabe recalcar que la disminución en el rendimiento y en consecuencia una respuesta inestable del sistema viene relacionado a la presencia de un retardo considerable. A continuación, se va a ahondar en las causas y consecuencias de la presencia de retardos, o también llamados tiempos muertos, en los sistemas de control.

Definición de Retardos de Retardo o Tiempo Muerto

Tiempo muerto o retardo es el tiempo que le toma a un proceso iniciar un cambio de estado ante una variación en la entrada o referencia [29]. La causa de este retardo tiene diversos orígenes, y generalmente en los sistemas de control disminuye el rendimiento del controlador. Los efectos que pueden producir estos retardos dependen de la magnitud del retardo y de la velocidad propia del sistema, por lo que las técnicas de control apuestan por la reducción y, si es posible, la eliminación de estos efectos para una mejor respuesta. Usualmente se denomina tiempo muerto al tiempo propio en que el sistema toma en reaccionar a un cambio de referencia, y un retardo tiene un origen en la distribución de los elementos y el procesamiento de los datos.

Tipos de Retardos de Acuerdo con el Origen

Para iniciar con el análisis de los retardos que pueden ocurrir en los sistemas de control, se debe considerar que existen retardos propios del sistema, y retardos producidos por la forma en que se encuentra distribuido el sistema.

- Retardos Propios del Sistema

Usualmente los retardos de este tipo se producen en sistemas de transferencia de calor, transferencia de masa, tanques de nivel, tanques de nivel calefaccionados, procesos con algún tipo de incubación o maduración orgánica. Un ejemplo de esto es un sistema de calefacción de un edificio, cuya caldera se encuentra generalmente en los pisos superiores o inferiores, y para producir un aumento en la temperatura de todos los pisos, se debe esperar un tiempo mientras se produce un aumento en la temperatura de la caldera y la circulación del agua por las tuberías, que puede ser un sistema físico extenso [30].

Otra posible causa son los actuadores que pueden tener una respuesta lenta, como ejemplo se tiene a las válvulas de gran tamaño cuya apertura o cierre toma su tiempo en

producirse [31]. En la Figura 1.10. se observa el esquema de control de un sistema con un retardo propio del sistema.

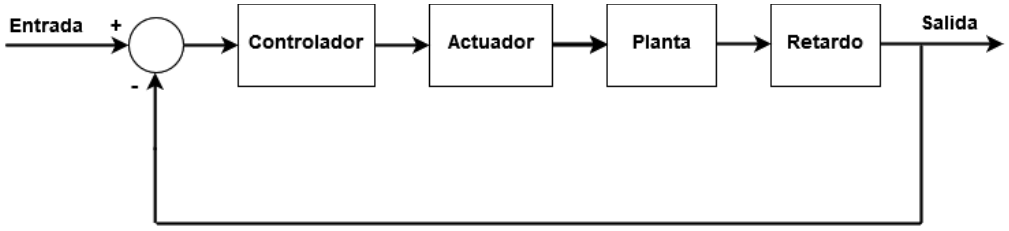


Figura 1.10. Esquema de control con un retardo propio del sistema.

Considerando los sistemas robóticos, acorde al hardware que utilice el controlador, se puede ingresar retardos debido al procesamiento de los datos, que se produce al realizar cálculos de gran complejidad y se tiene un procesador con una capacidad menor al flujo de datos requerido.

- Retardos de Acuerdo con la Distribución del Sistema

Este tipo de retardo se produce debido a la ubicación de los actuadores, sensores o controlador, las razones para esto serán:

Los sensores y actuadores se encuentran alejados del controlador, debido a la extensión del proceso o a la centralización de los controladores, por lo que no se tiene información de la planta en tiempo real y provoca que no se tomen acciones correctivas adecuadas antes variaciones a la salida. Estos sistemas utilizan cableado estructurado y es más típico en industrias.

El controlador y el conjunto actuador-planta-sensor se encuentran en locaciones distintas debido al manejo de elementos nocivos u operación a grandes distancias, es típico de sistemas distribuidos, por lo que, tanto las acciones de control como la realimentación de los sensores toman su tiempo en ser procesados, usualmente esta operación remota se realiza a través de canales de comunicación inalámbrica.

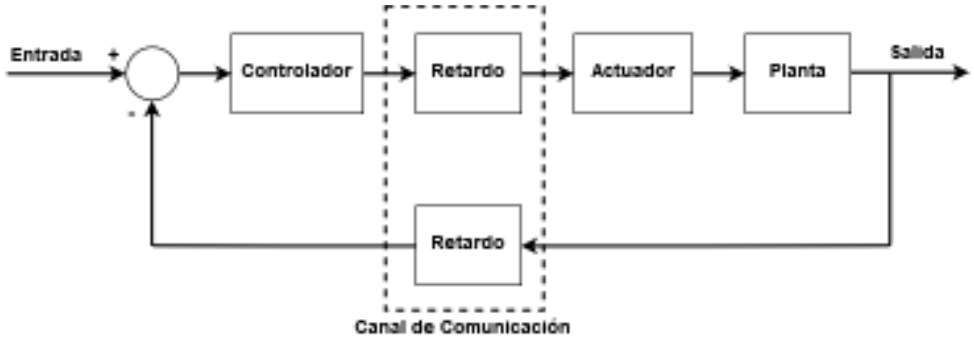


Figura 1.11. Esquema de control distribuido.

En la Figura 1.11 se puede observar el esquema de control de un sistema distribuido, un esquema similar a este se va a aplicar en el seguimiento de trayectorias para el robot Pioneer 3DX. Un ejemplo en el campo de la robótica que permite evidenciar los retardos de acuerdo con la distribución del sistema es la operación remota de los robots exploradores. Curiosity, un robot explorador en Marte que es teleoperado desde la Tierra a través de antenas de comunicación, posee un retardo promedio de 20 minutos debido a la distancia entre el operador y el robot [32].

Tipos de Retardos de Acuerdo con la Magnitud

Esta sección está basada de [1]. Tomando en cuenta únicamente a la magnitud de los retardos, independiente del origen que estos tienen, se pueden clasificar en 2 tipos, con regularidad es esta la clasificación que se toma en cuenta para el diseño de los controladores, estos son:

- Retardos Fijos

Son aquellos que poseen una magnitud fija, o cuyas variaciones no superan el tiempo de muestreo de los controladores. Son muy comunes en redes estables o redes que posean pocos usuarios.

$$x(t - (h_1 + \Delta h))$$

Ecuación 1.11. Modelo matemático del retardo fijo.

Donde:

h_1 : retardo principal fijo

Δh : variación de retardo cuya magnitud es menor al periodo de muestreo

- Retardos Variables

Son aquellos cuya magnitud no es fija, es decir que las variaciones superan el tiempo de muestreo de los controladores, por lo que este tipo de retardos tienen un rango de variación mayor. Estos retardos son comunes en redes extensas y con una carga de usuarios mayor.

$$x(t - h_2)$$

Ecuación 1.12. Modelo matemático del retardo variable.

Donde:

h_2 : retardo variable en un rango amplio.

Redes de Comunicación en Sistemas de Control

El desarrollo de las redes de comunicación, sobre todo en la accesibilidad y expansión que han tenido en las últimas décadas, han permitido que los sistemas de control se integren a estas redes creando canales de comunicación para el envío y recepción de datos. Este tipo de aplicaciones permiten tener al operador o controlador en una locación distinta del proceso o dispositivo. En la Tabla 1.2. se observa ventajas y desventajas de un sistema de control sobre una plataforma de comunicación.

Tabla 1.2. Ventajas y desventajas del uso de una red de comunicaciones [1].

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Seguridad para el operador o dispositivo controlador ante la posibilidad de realizar tareas nocivas o peligrosas.	La red de comunicación introduce retardos en la operación. Estos retardos pueden variar en un amplio rango.
Se puede operar o controlar a los dispositivos físicamente separados por grandes distancias, de acuerdo con la red que se utilice.	Los retardos introducidos por la red provocan un decaimiento en la controlabilidad y puede generan operaciones inseguras del dispositivo o sistema.
Reduce costos de cableado.	Si la red de comunicación que se usa es privada, presenta el pago del servicio o la adquisición de dispositivos dedicados a la comunicación lo que aumenta el costo y hardware físico del sistema.
Provee modularidad y flexibilidad en el diseño de un sistema.	Problemas de migración de software debido a que cada red posee sus características propias.

Retardos en un Esquema de Control Distribuido

Un sistema de control que se comunica con los sensores y actuadores a través de una red de comunicación se lo denomina como “Sistema de Control Distribuido en Tiempo Real”. [12] En la Figura 1.11 se puede observar el esquema básico de un sistema distribuido, a continuación, en la Figura 1.12 se observa a detalle un esquema de red aplicado al robot Pioneer 3DX y se analiza los retardos que se producen.

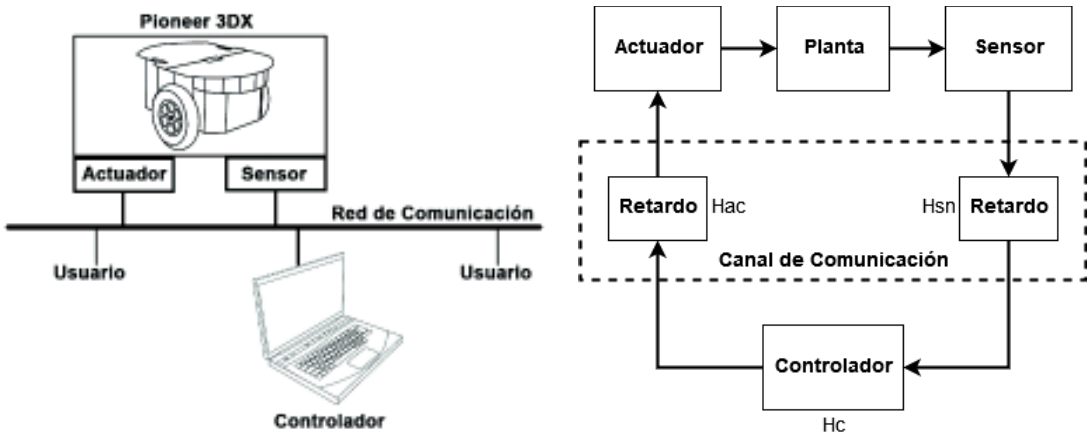


Figura 1.12. (a) Representación de un sistema de control distribuido usando una red de comunicación (b) Esquema de control de un sistema distribuido [12].

En este tipo de sistemas descritos, se va a considerar el retardo de control al tiempo desde el momento de muestro de una señal de medición hasta el momento en que esa información se utiliza en el actuador. La Ecuación 1.13 describe lo anterior.

$$h = H_{sn} + H_c + H_{ac}$$

Ecuación 1.13. Retardo total de control.

Donde:

h: Retardo usado en el control.

H_{sn}: Retardo que ocurre entre la comunicación del sensor y el controlador.

H_c: Retardo que ocurre en el procesamiento del controlador.

H_{ac}: Retardo que ocurre entre la comunicación del controlador y el actuador.

En el presente trabajo se va a desarrollar el seguimiento de trayectorias para el robot Pioneer 3DX, en un sistema distribuido similar al de la Figura 1.11. Los valores que se usan en los retardos descritos en la Ecuación 1.13 se analizan en la sección 3.2.

Controladores

La presencia de retardos en un sistema de control generalmente provoca efectos adversos tales como el decaimiento de la respuesta en estado transitorio y permanente. Por lo que las técnicas de control clásicas, como el controlador PID, no permite obtener una mejoría en el rendimiento de este tipo de esquemas. Un ejemplo de este fenómeno se observa en la Figura 1.13, donde inicialmente se tiene la respuesta de un sistema de primer orden realimentado ante una entrada paso, posterior se implementa un controlador PID para

mejorar su respuesta, finalmente se ingresa un retardo menor a la constante de tiempo del sistema. Los resultados ilustran los efectos de la presencia de retardos.

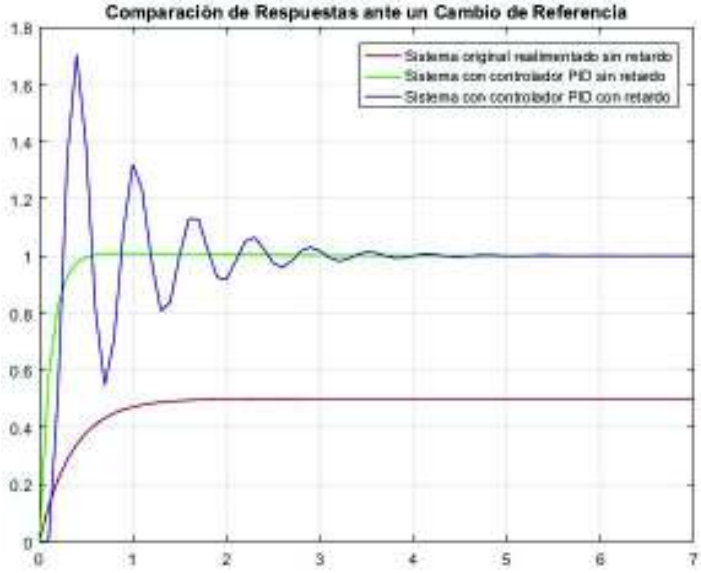


Figura 1.13. Comparación de respuestas de un sistema de primer orden: $G(s) = \frac{1}{0.7s+1}$, para una entrada paso unitario ante la presencia de un retardo menor a la constante de tiempo del sistema ($\tau = 0.7$).

Tomando en cuenta los resultados adversos que tiene la presencia de retardos en un sistema de control, y la respuesta poco favorable que tienen los controladores clásicos, se tiene la necesidad de aplicar técnicas de control adecuadas para este fenómeno, que reduzcan o eliminen los efectos negativos y se pueda obtener un rendimiento adecuado. Para iniciar, se analizan 2 técnicas de control clásicas orientadas a sistemas con presencia de retardos, el controlador PD-Like y el compensador llamado Predictor de Smith, estas técnicas proveen de una respuesta adecuada ante este fenómeno, aunque presentan ciertos inconvenientes de robustez. Para mejorar esta característica se implementa el controlador por modos deslizantes (SMC), que se acopla a las técnicas clásicas para obtener un buen desempeño ante retardos además de proveer las características de robustez deseada.

PD-Like

El controlador PD-Like utiliza el amortiguamiento de la respuesta para estabilizar el sistema [33]. El esquema actúa como un controlador PD, sin embargo, presenta ciertas modificaciones, la Ecuación 1.14 proporciona la acción de control del esquema propuesto para un robot móvil teleoperado bilateral, tomado de [2], donde se controla la velocidad lineal y angular, y se tiene una realimentación de fuerza.

$$U = k_s\left(k_g\eta_{ref}(t-h_1) - \eta + \Delta(\mathrm{f}_v)\right) - \alpha_s z + Q(\eta)\eta$$

Ecuación 1.14. Ley de control de la técnica PD-Like para un robot móvil teleoperado.

Donde:

U: Vector de control.

k_s: Matriz de constantes positiva, representan la ganancia proporcional.

k_g: Matriz de constantes que relacionan de manera lineal la posición de referencia.

η_{ref}: Vector de referencia de velocidad.

h_1: Retardo de ida, provocado por la comunicación desde el controlador al actuador.

η: Vector de velocidad, donde $\eta = [v_{real} \quad \omega_{real}]^T$

α_s: Matriz de constantes positiva, representan el amortiguamiento dependiente de la aceleración.

z: Salida de un observador que estima $\dot{\eta}$ a partir de información pasada y actual disponible, en la práctica $z \approx \dot{\eta}$

Δ: Función utilizada para evitar colisiones del robot móvil con eventuales obstáculos

f_v: Fuerza ficticia virtual.

Q: Matriz de Coriolis que representa el torque gravitacional.

Analizando a detalle este controlador, se puede observar que este esquema es muy parecido al controlador PD, de ahí que proviene su nombre de PD-Like. La diferencia más notable es que relaciona referencias pasadas $\eta_{ref}(t-h_1)$ con valores de medición actuales η, lo que es una analogía al valor de error que se utiliza en el controlador PID. Además, las constantes k_s y α_s son análogas a las constantes k_p y k_d de un controlador PD respectivamente.

El controlador PD-Like es una técnica clásica aplicada a sistemas que poseen retardos. En la Ecuación 1.14 se puede observar la ecuación que sintetiza la ley de control para la velocidad lineal y angular de un robot móvil teleoperado. Sin embargo, se va a simplificar esta relación para adaptarla a los objetivos de este trabajo, debido a que no se va a tener una realimentación de fuerza puesto que el sistema propuesto con la plataforma Pioneer 3DX no es teleoperado, y al ser llevado a nivel de simulación no se toma en cuenta el

torque gravitacional. Por lo que la ley de control de la técnica PD-Like (U_{PDL}) será la descrita en la Ecuación 1.15.

$$U_{PDL} = k_s\left(k_g\eta_{ref}(t-h_1) - \eta\right) - \alpha_s z$$

Ecuación 1.15. Ley de control de la técnica PD-Like simplificada.

Hay que considerar que el sistema propuesto para el seguimiento de trayectorias para la plataforma Pioneer 3DX con la presencia de retardos tiene dos variables a controlar, la velocidad lineal v y la velocidad angular ω, por lo que la Ecuación 1.15 será de tipo matricial. A continuación, se realiza el análisis dimensional de esta relación:

$$U_{PDL_{2\times1}} = \tau_{s_{2\times1}} = k_{s_{2\times2}}\left(k_{g_{2\times2}}\eta_{ref}(t-h_1)_{2\times1} - \eta_{2\times1}\right) - \alpha_{s_{2\times2}}\dot{\eta}_{2\times1}$$

Ecuación 1.16. Análisis dimensional de la ley de control de la técnica PD-Like.

Colocando la Ecuación 1.16 de manera más explícita se tiene que la ley de control será:

$$\begin{bmatrix} U_{PDL_v} \\ U_{PDL_\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{s_v} & 0 \\ 0 & k_{s_\omega} \end{bmatrix}\left(\begin{bmatrix} k_{g_v} & 0 \\ 0 & k_{g_\omega} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_{ref}(t-h_1) \\ \omega_{ref}(t-h_1) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{real} \\ \omega_{real} \end{bmatrix}\right) - \begin{bmatrix} \alpha_{s_v} & 0 \\ 0 & \alpha_{s_\omega} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{v}_{real} \\ \dot{\omega}_{real} \end{bmatrix}$$

Ecuación 1.17. Ley de control de la técnica PD-Like en forma matricial.

Donde los subíndices v y ω representan que las constantes afectarán a la velocidad lineal o angular respectivamente. Y los subíndices ref y $real$ representa que el valor es referencial o actual del robot respectivamente.

Predictor de Smith

El presente apartado está dedicado al análisis de uno de los métodos de compensación de tiempos muertos o retardos más popular llamado Predictor de Smith. Este tipo de compensador es ampliamente usado en la industria [30].

En la Figura 1.14. se observa el esquema básico de un Predictor de Smith, en el cual se diferencian 2 partes, el controlador primario o principal y el esquema compensador, por lo que el predictor no es como tal un controlador, sino que es una estructura compensadora o de predicción.

Generalmente el controlador primario es una estructura PID, aunque podría ser otro tipo de técnica dependiendo de los requerimientos del sistema.

.

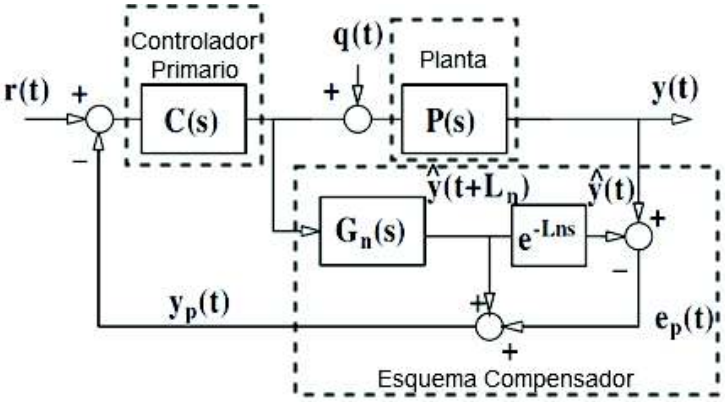


Figura 1.14. Esquema del Predictor de Smith [30].

Previo a la explicación del funcionamiento de esta técnica, se debe tener en claro lo siguiente:

$$P(s) = G_n(s)e^{-t_0 s}$$

Ecuación 1.18. Modelo de la planta en el esquema Predictor de Smith.

Donde:

$P(s)$: Función de transferencia de la planta.

$G_n(s)$: Función de trasferencia de la planta sin el retardo.

t_0: Retardo del sistema, se toma en cuenta que $t_0 = Ln$

El Predictor de Smith posee un modelo del sistema sin el retardo $G_n(s)$ y un modelo del retardo $e^{-t_0 s}$, cualquier entrada al modelo de la planta $P(s)$ también se usa como entrada para el modelo sin el retardo $G_n(s)$ y $e^{-t_0 s}$. Por lo que se provoca una salida $\hat{y}(t)$, esta se compara con la salida real $y(t)$, si se tiene una buena aproximación del retardo y del modelo del proceso sin el retardo $G_n(s)$ ambas salidas se anulan tornando a $e_p(t) = 0$. Por otra parte, el modelo $G_n(s)$ produce una salida sin el efecto del retardo, esta se adiciona a $e_p(t)$, que al ser cero ante una buena aproximación, provoca que la realimentación $y_p(t)$ usada para el cálculo del controlador sea una respuesta del sistema evitando los efectos del retardo, por lo que se considera una predicción del estado del sistema, que es la razón del nombre de Predictor de Smith para este compensador.

Hay que considerar que si existe una perturbación $q(t)$, esta perturbación no podrá ser compensada, puesto que en el modelo sin el retardo $G_n(s)$ no toma en cuenta este tipo de eventos, lo que resulta en que el sistema puede compensar los efectos de los retardos, pero no presenta mejores resultados ante perturbaciones en el esquema.

Controlador por Modos Deslizantes (SMC)

El controlador por modos deslizantes (SMC) es un tipo de "Control de Estructura Variable" (VSC), es decir que tiene la capacidad de modificar su estructura. La idea básica del control VSC es que el sistema cambie la estructura en ciertos instantes para combinar las propiedades útiles de cada una de estas estructuras. Esta característica otorga flexibilidad al sistema, que permite el uso de buenas propiedades dinámicas de ciertas estructuras, características que no pueden ser usadas durante largos periodos de tiempo. Por otra parte, una vez que el sistema se encuentra en el estado estacionario se denomina a esta operación como "Modo deslizante", en este modo el sistema es insensible a cargas aplicadas, perturbaciones externas y variaciones de parámetros, por lo que un VSC posee buen rendimiento en estado transitorio y una respuesta rápida [34].

SMC es un procedimiento simple y robusto para sintetizar controladores para procesos lineales y no lineales. El diseño de un SMC depende del modelo del proceso, y en particular, el número de parámetros de sintonización es proporcional al orden del modelo. Una alternativa eficiente ante esta característica de sintonización es el uso de métodos de modelación empírica como son los modelos de orden reducido revisados en los apartados anteriores, este tipo de modelos son adecuados para el análisis del control del proceso y su diseño. Con frecuencia este tipo de modelos presentan incertidumbres por el desconocimiento completo del modelo o los efectos de las no-linealidades, lo que contribuye a una degradación en el rendimiento de los controladores, a pesar de esto el controlador SMC puede ser diseñado tomando en cuenta estos modelos reducidos debido a que la robustez del controlador compensa los errores de modelado que provienen de la linealización de los procesos [35].

La ley de control de la técnica SMC consiste en dos partes aditivas, estas son: la parte continua o equivalente y la parte discontinua.

$$U(t) = U_{eq}(t) + U_d(t)$$

Ecuación 1.19. Ley de control general de la técnica SMC.

Donde:

$U(t)$: Ley de control

$U_{eq}(t)$: Ley de control equivalente o continua, modo deslizante de la ley de control.

$U_d(t)$: Ley de control discontinua, modo de alcanzabilidad de la ley de control.

El objetivo del controlador SMC se ilustra en la Figura 1.15, donde se puede entender de mejor manera las partes que forman la ley de control.

Figura 1.15. Interpretación gráfica del controlador SMC [35].

A continuación, se profundiza en cada una de las partes aditivas de la ley de control de la técnica SMC. La explicación de la ley de control equivalente y discontinua es tomada de [35].

- Ley de Control Equivalente o Modo Deslizante

El modo deslizante o equivalente se define al escoger una superficie deslizante $S(t)$, esta superficie puede ser de variadas formas. La característica principal de esta superficie se observa en la Ecuación 1.20, y en términos sencillos, sobre esta superficie el estado del proceso se debe "deslizar" hasta alcanzar el valor final deseado. El objetivo de esta parte de la ley de control es mantener la variable controlada igual a la referencia deseada, es decir que el error $e(t)$ y sus derivadas sean igual a cero.

$$\frac{dS(t)}{dt} = 0$$

Ecuación 1.20. Condición de deslizamiento de la ley de control equivalente.

A la Ecuación 1.20 también se la conoce como "condición de deslizamiento", y lo que se garantiza con esta condición es que la trayectoria del estado del proceso sea tangente a la

superficie deslizante, hasta llegar al valor final deseado donde la superficie toma un valor constante.

En esta parte de la ley de control, para desarrollarla, se usa tanto el modelo del proceso, así como la condición de deslizamiento.

- Ley de Control Discontinuo o Modo de Alcanzabilidad

Esta parte de la ley de control permite alcanzar a la superficie deslizante $S(t)$ desde el estado inicial del sistema, generalmente incorpora un elemento no-lineal y es la parte de switcheo de la ley de control. En la Ecuación 1.21 se puede observar la función Signo para definir la ley de control discontinuo.

$$U_d = K_d \cdot sign\big(S(t)\big)$$

Ecuación 1.21. Ley de control discontinuo usando la función signo.

Donde:

K_d: Parámetro que define la velocidad en que se alcanza la superficie deslizante.

$sign\big(S(t)\big)$: Función Signo de la superficie deslizante.

El uso de la función Signo produce “chattering”, que es una oscilación del estado sobre la superficie deslizante, por lo que para reducir este efecto adverso se aplica una función sigmoide, esta función se define en la Ecuación 1.22.

$$U_d = K_d \cdot \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta}$$

Ecuación 1.22. Ley de control discontinuo usando la función sigmoide.

Donde:

K_d: Parámetro que define la velocidad en que se alcanza la superficie deslizante.

δ: Parámetro usado para reducir el “chattering”.

Para finalizar este apartado, se debe tener en cuenta el modo de alcanzabilidad es la parte rápida de la ley de control, y el modo deslizante es un movimiento más lento para que una vez alcanzada la superficie $S(t)$ se pueda llegar al estado deseado.

Índice de Desempeño ISE

El índice ISE (Integral del Error Cuadrático), es un valor que se obtiene a partir del error, este índice de desempeño se utiliza en la sintonización de los controladores de este trabajo

debido a su sensibilidad, pues eleva el error al cuadrado. La relación matemática de este índice se presenta a continuación [36]:

$$ISE = \int_0^T e^2(t)\, dt$$

Ecuación 1.23. Índice ISE.

Donde:

T: Periodo de tiempo en que se realiza la medición.

e: Error de la variable respecto a una referencia.

Considerando que se requiere determinar el índice en un procesador de código, la Ecuación 1.23 se transforma en lo siguiente:

$$ISE = \sum_{n=1}^{k} \left(V_{ref_n} - V_{real_n}\right)^2$$

Ecuación 1.24. Índice ISE expresado como una sumatoria.

Donde:

n: Índice del sumatorio, variable que recorre desde el límite inferior al superior.

k: Número de mediciones que se obtuvo en el tiempo t.

V_{ref}: Valor de referencia.

V_{real}: Valor real.

Aproximación de Euler

La aproximación de Euler consiste en el cálculo del siguiente estado de una variable mediante una aproximación lineal [37]. En la siguiente relación se puede observar la aproximación:

$$\dot{y}_k \approx \frac{y_{k+1} - y_k}{t}$$

Ecuación 1.25. Aproximación de Euler.

Como ha definido anteriormente, la aproximación se utiliza para obtener el estado siguiente de una variable, pero en el caso del trabajo desarrollado se aplica la aproximación para obtener la derivada de una variable, que se utiliza en el cálculo de ley de control de las

diferentes técnicas en estudio. Por lo que para obtener esta derivada se usa la siguiente relación, basada en la aproximación de Euler.

$$\dot{y}_k \approx \frac{y_k - y_{k-1}}{t}$$

Ecuación 1.26. Cálculo de la derivada de una variable.

Donde:

$\dot{y}_k$: Primera derivada de la variable y.

y_k: Valor actual de la variable y.

y_{k-1}: Valor pasado de la variable y.

t: Tiempo transcurrido entre el valor actual y pasado de la variable y.

La Ecuación 1.26 se utiliza en la técnica PD-Like para la obtención de la primera derivada del vector de velocidades $\dot{\eta} = [\dot{v}_{real} \quad \dot{\omega}_{real}]^T$, y en la técnica SMC para el cálculo de $\dot{\eta}_{ref}(t - h_1) = [\dot{v}_{ref}(t - h_1) \quad \dot{\omega}_{ref}(t - h_1)]^T$.

Software de Simulación

Un simulador, según la Real Academia Española, es un aparato que reproduce el comportamiento de un sistema en determinadas condiciones, aplicado generalmente para el entrenamiento de quienes deben manejar dicho sistema [38]. Por lo que, una vez analizados tanto la plataforma robótica a usarse, así como la problemática de la presencia de retardos en el esquema de control, para la implementación y obtención de resultados de las técnicas de control propuestas, es conveniente el uso de simuladores para este fin.

Para la fiabilidad adecuada de los resultados obtenidos, se ha hecho énfasis en el uso de un simulador que brinde un comportamiento apegado a la respuesta real del robot móvil Pioneer 3DX. A continuación, se describe el software utilizado para la simulación y verificación de resultados.

Librería ARIA [39]

ARIA (Advanced Robot Interface for Applications) es una biblioteca C++ para todas las plataformas MobileRobots/ActivMedia. ARIA puede controlar dinámicamente la velocidad de su robot, el rumbo, el rumbo relativo y otros parámetros de movimiento, ya sea a través de comandos simples de bajo nivel o a través de su infraestructura de acciones de alto nivel. ARIA también recibe estimaciones de posición, lecturas de sonar y todos los demás datos operativos actuales enviados por la plataforma del robot. ARIA proporciona

herramientas para integrar E/S con su propio hardware personalizado, digital, analógico y de serie, e incluye soporte completo para todos los accesorios de robot de MobileRobots/ActivMedia.

ARIA también incluye una biblioteca llamada ArNetworking que implementa una infraestructura extensible para operaciones de red remota fácil para sus robots, interfaces de usuario y otros servicios en red. A través de un servidor que se ejecuta en la PC del robot, los clientes habilitados para ArNetworking se conectan desde otro equipo de la red para obtener datos y emitir comandos.

ARIA es la base para el resto de las librerías de software de MobileRobots, como por ejemplo ArNetworking que es un marco de trabajo de red tipo cliente-servidor, y ARNL que es una serie de paquetes que sirve para localización y navegación inteligente. Las características más sobresalientes de esta librería, tomadas de [40], son:

- Código fuente completo, bajo licencia pública general (GNU)
- Librería para Linux y Windows, además de ser una librería de C++ portable y puede ser recompilado por diversas plataformas.
- Biblioteca fácil de usar que emplea herramientas de desarrollo estándar (GCC y Make en Linux, MS Visual C++ en Windows)
- Interfaz incluido de Java, Python y Matlab a través de capas "wrapper". Además de tener disponible la interfaz ROS.
- Manuales de referencia y ejemplo de programas en todas las interfaces adicionales.
- ARIA posee un set de utilitarios que nos permiten obtener de la plataforma robótica la velocidad, posición de control, nivel de baterías, etc. Además de configurar parámetros tales como los límites de velocidad, rangos de tiempo, etc.
- Posee un marco de acciones de alto nivel, combina múltiples comportamientos de movimiento del robot en un estado unificado. Se proporciona varios componentes de acción predefinidos incluyendo la evasión de obstáculos.
- ARIA provee el software para la integración y uso de diversos dispositivos tales como: manipuladores, pinzas, sensores infrarrojos, cámaras, joysticks, módulos de comunicación, etc.
- Posee una variedad de otras herramientas útiles para la construcción de aplicaciones de robots como bibliotecas separadas, incluyendo síntesis y

reconocimiento de voz, reproducción de efectos de sonido, funciones matemáticas, etc.

Simulador MobileSim [41]

MobileSim es un software para simular robots móviles, para depurar y experimentar con ARIA u otro software que soporte plataformas robóticas ActivMedia/MobileRobots. Proporciona una conexión de control simulado accesible a través de un puerto TCP (similar a la conexión del puerto serie del robot real) por lo que ARIA es capaz de conectarse automáticamente a este puerto TCP en lugar del puerto serie, en consecuencia, es fácil ejecutar los mismos programas utilizados en el simulador y en el robot real sin realizar ningún cambio.

MobileSim utiliza datos de obstáculos de un mapa de MobileRobots (.map) para simular paredes y otros obstáculos en el entorno. MobileSim utiliza el mismo formato de mapa que ARNL, SONARNL y MOGS, por lo que se puede integrar dispositivos laser, sonar o GPS en el robot real y no interfiere con lo desarrollado en simulación. Se utiliza Mapper3 o Mapper3Basic para hacer mapas [42]. El simulador soporta todos los modelos actuales y antiguos de las plataformas móviles MobileRobots/ActivMedia. Estos robots son: Pioneer 3DX y AT, PowerBot, AmigoBot, PeopleBot, PatrolBot, Seekur, Pioneer 2 y Pioneer 1.

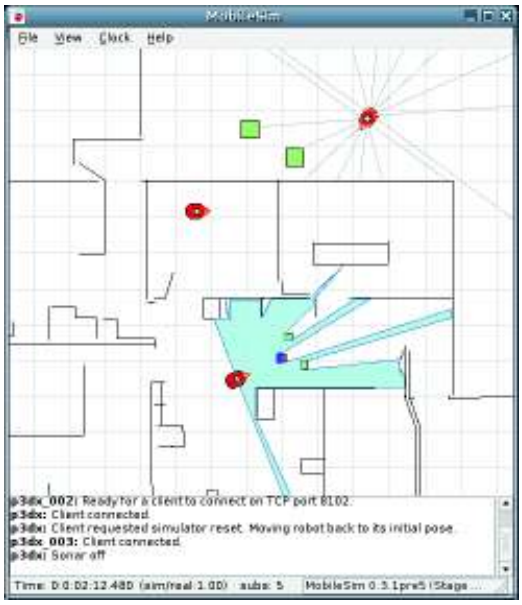


Figura 1.16. Espacio de trabajo del simulador MobileSim [42].

En la Figura 1.16 se observa el espacio de trabajo del simulador. Los parámetros de los modelos se pueden personalizar en un archivo de configuración o pueden definirse nuevos modelos basados en modelos existentes. MobileSim posee opciones de visualización de

sensores, robots y obstáculos, y puede dibujar trayectorias del robot para mostrar un historial de movimiento.

Lenguaje Python

El lenguaje de programación llamado Python es un lenguaje de alto nivel orientado a una fácil interpretación, es uno de los lenguajes que en la actualidad se emplea para el desarrollo de software de ingeniería y aplicaciones computacionales en general. Python es un lenguaje de tipado dinámico y puede ser utilizado en diversas plataformas y sistemas operativos tales como Windows, Mac OS X y Linux. Además, es un lenguaje de código abierto a partir de la versión 2.1.1 [43].

Sus principales características son:

- Lenguaje potente, flexible y con una sintaxis clara y concisa.
- Lenguaje interpretado por lo que el código no necesita ser pre-procesado mediante el uso de un compilador, por lo que el computador es capaz de ejecutar las instrucciones sin traducir todo el código.
- La ventaja de ser un lenguaje interpretado es que Python es un código independiente de la máquina o el sistema operativo. La desventaja es que se debe tener un equilibrio entre velocidad y portabilidad [44].
- Al ser un lenguaje multiparadigma, se puede tener diferentes estilos de programación de acuerdo con la aplicación que se desarrolla.
- Python es un lenguaje de código abierto por lo que cualquier persona puede contribuir en su desarrollo y divulgación. No es necesario pagar ninguna licencia para distribuir el software desarrollado con este lenguaje.
- Python posee 3 versiones de las cuales, hasta la fecha de publicación de este trabajo, sus versiones estables son la 3.6.1 y 2.7.11.

Figura 1.17. Logo oficial de Python [45].

En los últimos años, debido a las características de versatilidad y legibilidad, este lenguaje de programación se ha ido integrando a aplicaciones de ingeniería. En el caso de este

trabajo la librería ARIA, con la cual nos se puede comunicar con el simulador MobileSim, será utilizada usando lenguaje Python. La versión que se utiliza es Python 2.7 en 32 bits.

Finalmente, el programador donde se desarrolla la aplicación es Eclipse. En el siguiente apartado se analiza esta plataforma.

Plataforma de Software Eclipse

Eclipse es una plataforma de desarrollo de código abierto que posee herramientas de programación multiplataforma. El entorno de Eclipse es un entorno de desarrollo integrado (IDE), que usualmente consiste en un editor de código fuente, herramientas de construcción automática, un depurador, un compilador y un intérprete. Eclipse emplea módulos que produce una plataforma ligera para componentes de software.

Eclipse puede extenderse a lenguajes de programación tales como C/C++, Python. Además de permitir lenguajes de procesado de texto como LaTeX, aplicaciones de red como Telnet y sistemas de gestión de bases de datos [46] [47].

Las características principales de Eclipse son:

- Dispone de un editor de texto con analizador sintáctico.
- La compilación es en tiempo real.
- Posee asistentes de creación de proyectos, clases, etc.
- De manera extendida se usa a Eclipse como desarrollador de aplicaciones en Java, aunque tiene la posibilidad de usar otros lenguajes de programación.
- Posee la herramienta de coloreado de código, que permite un desarrollo más amigable con el programador ante la presencia de errores.

Figura 1.18. Logo oficial de Eclipse [48].

En el caso de este trabajo, esta plataforma se usa para el desarrollo e implementación de los controladores, para así verificar los resultados. El código desarrollado usa ARIA para la obtención de datos, la configuración de parámetros y la comunicación a través de un puerto

TCP con el simulador, que usará el modelo del robot Pioneer 3DX. En la Figura 1.19 se ilustra el funcionamiento del software de simulación y su integración.

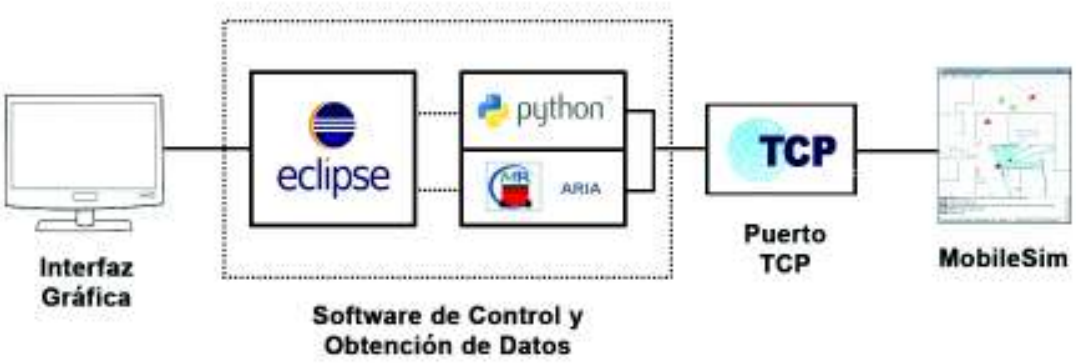


Figura 1.19. Interpretación Gráfica del Software de Simulación a Implementarse.

En la figura anterior se pueden observar la integración e interacción del software descrito en este capítulo, para poder llevar a cabo las simulaciones en un ambiente de fácil uso para el usuario y obtener así resultados confiables que muestren las características de las técnicas de control en análisis.

2. METODOLOGÍA

En este capítulo, en primer lugar, se revisa el esquema de seguimiento de trayectorias para el robot Pioneer 3DX, considerando el esquema de control para el seguimiento se desarrollan matemáticamente los controladores dedicados para sistemas con retardos o tiempos muertos. Luego se describen los detalles relacionados con la implementación de las estructuras de control necesarias para el seguimiento de trayectorias, así como las técnicas de control desarrolladas para el funcionamiento del dispositivo ante la presencia de retardos fijos en el esquema de control. Adicional se describe la interfaz gráfica para la elección de parámetros relacionados con la simulación.

2.1. Seguimiento de Trayectorias

Una trayectoria es el lugar geométrico que describe un objeto que se desplaza por el espacio [49]. Matemáticamente, una trayectoria es la sucesión de puntos ligados a un marco referencial que dependen del tiempo, por lo que una trayectoria no depende únicamente desde que punto se observe y el sistema de referencia que se use (coordenadas cartesianas, coordenadas polares, etc.) sino además depende del tiempo en que se realice la observación.

En robótica, la tarea de seguimiento de trayectorias es de importancia debido a que así se provee de independencia al dispositivo cuando se tiene un espacio físico conocido, donde no es necesario el control del robot a través de un operador en el desarrollo de tareas repetitivas. Si se considera a la robótica móvil, y en particular a la plataforma robótica Pioneer 3DX, el seguimiento de trayectorias se realiza en un plano de 2 dimensiones, por lo que el objetivo es que pueda completar una sucesión de puntos en el plano en un tiempo determinado, lo que conlleva una planificación tanto espacial-dimensional, así como referencial en cuanto a la velocidad lineal y angular del robot.

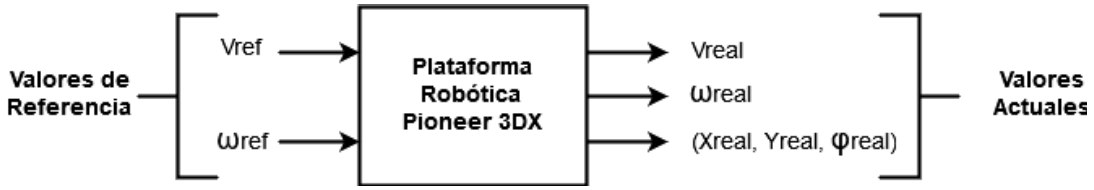


Figura 2.1. Esquema de representación del robot Pioneer 3DX.

En la Figura 2.1. se observa la representación simplificada del robot Pioneer 3DX, basándose en las instrucciones de alto nivel disponibles en la librería ARIA. Por lo que las entradas del esquema son la velocidad lineal y angular de referencia, y las salidas son la velocidad lineal y angular reales del robot, así como las coordenadas de la posición en el

plano y su ángulo de orientación. Considerando el esquema anterior del robot móvil, se obtiene el sistema completo de control para el seguimiento de trayectorias, esto se puede observar en la Figura 2.2.

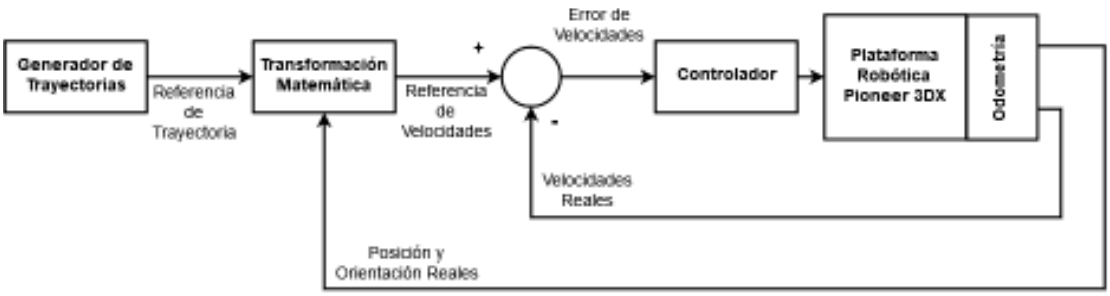


Figura 2.2. Esquema de control para el seguimiento de trayectorias del robot Pioneer 3DX.

Cabe señalar que el esquema anterior muestra el sistema clásico para el seguimiento de trayectorias de la plataforma Pioneer 3DX. Sin embargo, en el presente trabajo se analiza la presencia de retardos fijos y sus efectos en el seguimiento de trayectorias, por lo que se procede a modificar el esquema de la Figura 2.2, tratando de adaptarlo a un sistema distribuido, tal como se vio en el Capítulo 1 en la Figura 1.11. Los resultados se los observa en la Figura 2.3.

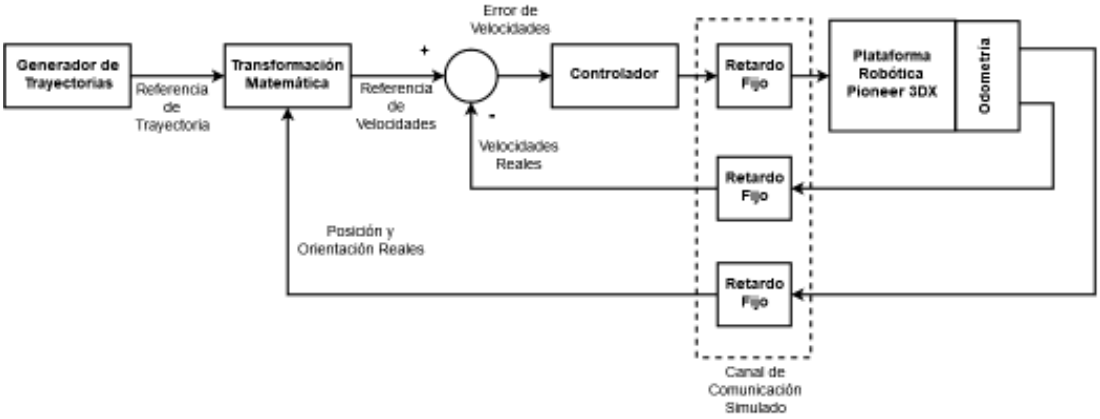


Figura 2.3. Esquema de control para el seguimiento de trayectorias de la plataforma Pioneer 3DX con la presencia de retardos fijos.

Generador de Trayectorias

El esquema de control para el seguimiento inicia con la generación de las trayectorias, para este trabajo se estudia el seguimiento de una trayectoria circular, trayectoria cuadrada y una trayectoria llamada “Lemniscata de Bernoulli” [50]. En primer lugar, se va a definir el

número de posiciones en el plano XY que tendrá la trayectoria, esto se realiza considerando el tiempo de simulación escogido y el periodo de muestreo del robot.

$$k = \frac{t_{sim}}{T}$$

Ecuación 2.1. Número de posiciones de la trayectoria en el plano XY.

Donde:

k: Número de posiciones que tendrá la trayectoria

t_{sim}: Tiempo de simulación

T: Periodo de muestreo

Una vez se ha definido el número de posiciones (puntos de la trayectoria), se procede a calcular las componentes X e Y para generar la trayectoria. El parámetro que describe estas posiciones será la velocidad de referencia v_{set} y la relación matemática correspondiente acorde a la trayectoria deseada. En la Tabla 2.1 se puede observar las coordenadas XY para cada una de las trayectorias:

Tabla 2.1. Ecuaciones para la generación de coordenadas de cada trayectoria [50].

CÍRCULO	CUADRADO	LEMNISCATA DE B.
$X_{circ_n} = R\cos(wnT)$	$X_{cuad_n} = \begin{cases} v_{set}nT, & 0 < nT < t_l \\ l, & t_l < nT < 2t_l \\ 3l - v_{set}nT, & 2t_l < nT < 3t_l \\ 0, & 3t_l < nT < 4t_l \end{cases}$	$X_{lem_n} = \frac{R\cos(wnT)}{1+\sin^2(wnT)} - \frac{R}{2}$
$Y_{circ_n} = R\sin(wnT)$	$Y_{cuad_n} = \begin{cases} 0, & 0 < nT < t_l \\ -l + v_{set}nT, & t_l < nT < 2t_l \\ l, & 2t_l < nT < 3t_l \\ 4l - v_{set}nT, & 3t_l < nT < 4t_l \end{cases}$	$Y_{lem_n} = \frac{R\sin(wnt)\cos(wnT)}{1+\sin^2(wnT)}$

Donde:

v_{set}: Velocidad lineal para el robot, se configura en la interfaz gráfica previo el inicio de la simulación.

$w = \frac{v_{set}}{R}$: Velocidad angular con que se genera la circunferencia y la lemniscata.

R: Radio de la circunferencia y Lemniscata de Bernoulli.

T: Periodo de muestreo del robot.

$n = 0,1,2,\dots,k-1$: Vector de conteo de posiciones para la generación de coordenadas.

$t_l = \frac{l}{v_{set}}$: Tiempo que se toma en recorrer un lado del cuadrado.

l: Lado del cuadrado.

En la Figura 2.4. se puede observar un ejemplo de las trayectorias basadas en las ecuaciones descritas anteriormente, como se puede ver la trayectoria se compone de un número finito de posiciones, en cada periodo de muestreo se envía la referencia adecuada (coordenada XY) al robot, por lo que constantemente se cambia la posición para que el robot pueda seguir la trayectoria deseada.

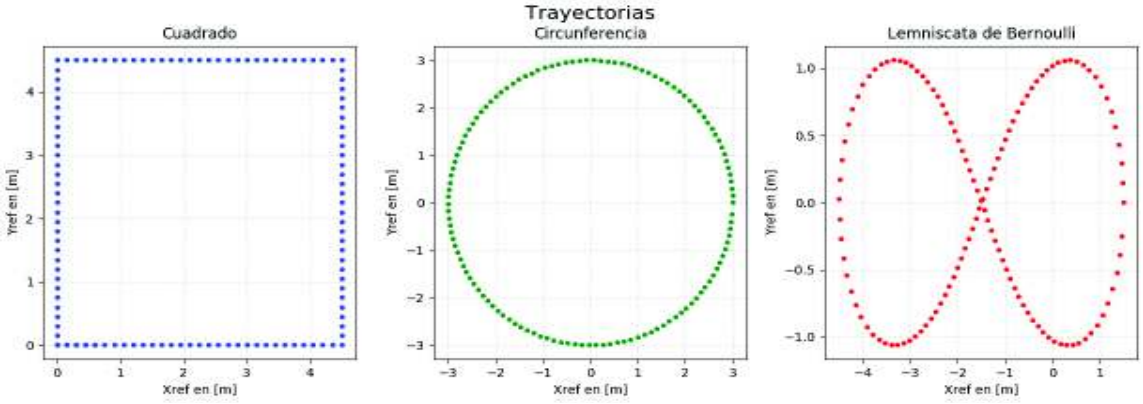


Figura 2.4. Trayectorias generadas con las siguientes especificaciones: $v_{set} = 0.3\ [\frac{m}{s}]$, $R = 3[m]$, $l = 4.5[m]$, $T = 0.5[s]$, $t_{sim} = 62[s]$

Transformación Matemática para la Generación de Velocidades de Referencia

Una vez se tiene una referencia de trayectoria, es decir una referencia de posición XY que cambia conforme avanza el tiempo, hay que considerar que, en la estructura de control para el seguimiento de trayectorias, la plataforma robótica tiene como entradas señales referenciales de velocidad o, en el caso de este trabajo, señales provenientes del controlador, por lo que de alguna manera se debe transformar la referencia de trayectoria en una referencia de velocidad, para ello se aplicarán las siguientes ecuaciones [51]:

$$v_{ref} = \sqrt{\left(\frac{X_{ref} - X_{real}}{T}\right)^2 + \left(\frac{Y_{ref} - Y_{real}}{T}\right)^2}$$

Ecuación 2.2. Velocidad lineal de referencia calculada basándose en la posición de referencia y real del robot.

$$\varphi_{ref} = \tan^{-1}\left(\frac{Y_{ref} - Y_{real}}{X_{ref} - X_{real}}\right)$$

Ecuación 2.3. Ángulo de orientación calculado basándose en la posición de referencia y real del robot.

$$\omega_{ref} = \frac{\varphi_{ref} - \varphi_{real}}{T}$$

Ecuación 2.4. Velocidad angular de referencia calculada basándose en el ángulo de orientación.

Donde:

v_{ref}, ω_{ref}: Velocidad lineal y angular de referencia generado por la transformación matemática.

X_{ref}, Y_{ref}, φ_{ref}: Posición y orientación de referencia provenientes del bloque de generación de trayectorias.

X_{real}, Y_{real}, φ_{real}: Posición y orientación reales.

T : Periodo de muestreo del robot.

Como se puede ver en las Ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4 se tiene las ecuaciones para transformar una referencia de trayectoria en referencia de velocidades, considerando que aparte de los valores de referencia de la trayectoria, también se debe tener los valores reales de la posición en el plano y de la orientación. En posteriores capítulos se presenta la implementación de esta transformación matemática donde se revisa el arreglo del ángulo φ debido a un problema de rango de valores de la función $\tan^{-1}$.

A continuación, se desarrollan los controladores dedicados a la aplicación en sistemas que poseen retardos, tomando en cuenta que las técnicas de control se aplican a la velocidad lineal y angular, aunque la tarea que se desea optimizar es el seguimiento de trayectorias. Por lo que la variable que nos interesa mantener sobre un valor controlado es la velocidad lineal, debido a que así se tiene el dominio de la forma de la trayectoria y del tiempo que se toma la plataforma en desarrollar esta actividad.

2.2. Controlador PD-Like

Como se pudo observar en el Capítulo 1, el controlador PD-Like es una técnica clásica aplicada a sistemas que poseen retardos. En la Ecuación 1.14 se puede observar la ecuación que sintetiza la ley de control para la velocidad lineal y angular de un robot móvil

teleoperado con realimentación de fuerza [2]. Sin embargo, se simplifica esta relación para adaptarla a los objetivos de este trabajo, debido a que no se va a tener una realimentación de fuerza puesto que el sistema propuesto con la plataforma Pioneer 3DX no es teleoperado, y al ser llevado a nivel de simulación no se toma en cuenta el torque gravitacional, obteniendo así la Ecuación 1.15, la cual es implementada en este trabajo. Como se puede notar esta estrategia de control no necesita ningún modelo del proceso o dispositivo, por lo que no requiere algún procedimiento adicional para su implementación.

2.3. Predictor de Smith

El Predictor de Smith, como tal no es un controlador sino es una estructura de compensación, por lo que necesariamente se debe tener un controlador primario, el cual usualmente es un controlador PID pero, tomando en cuenta el decaimiento en las técnicas clásicas de control ante retardos y para mejorar el desempeño, se va a combinar al predictor de Smith con el esquema PD-Like.

PD-Like + Predictor de Smith

La estructura de control de esta combinación se la puede observar en la Figura 2.5.

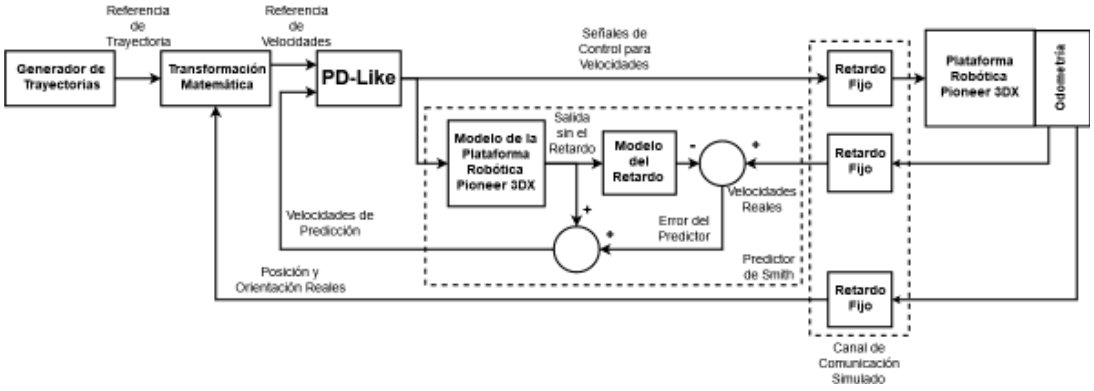


Figura 2.5. Esquema del controlador PD-Like combinado con el Predictor de Smith.

Al analizar la estructura anterior, para implementar el Predictor de Smith se debe usar un modelo de la plataforma robótica Pioneer 3DX. En el caso particular del desarrollo de este trabajo, se tiene la posibilidad de usar 2 modelos matemáticos: el modelo cinemático del robot de tracción diferencial tipo uniciclo de la Ecuación 1.2 o el modelo de orden reducido de la Ecuación 1.3. La desventaja del primer modelo es que se debe realizar cierto manejo matemático para obtener una respuesta de velocidad que se apegue al proceso real, debido a que este modelo es de tipo cinemático donde se trata de describir la posición y orientación de robot en el plano. Por su parte, el segundo modelo es más adecuado con respecto a la obtención de una respuesta real de las velocidades de la plataforma Pioneer

3DX, no necesita ningún manejo matemático adicional, y al ser un modelo empírico nos otorga una respuesta basada en la dinámica del robot.

Posterior a eso, se implementa un modelo del retardo fijo, que es incluido debido al canal de comunicación simulado. El modelo del retardo fijo puede ser implementado usando la aproximación de Padé o la aproximación de Taylor de las Ecuaciones 1.7 y 1.8 respectivamente. En este trabajo, considerando que el robot puede ser configurado y nos provee de información cada 100 [ms], el retardo será múltiplo de este valor. Por lo que, a través de un algoritmo de software que se explica en la sección 2.7 (Figura 2.18) se implementa el retardo fijo sin el uso las aproximaciones descritas. Hay que aclarar que el modelo del retardo fijo será del doble de magnitud del retardo que ingresa el canal de comunicación simulado, debido a que se tiene un retardo de ida entre la señal del controlador y el actuador, y un retardo de retorno entre el sensor y el esquema predictor.

La salida del bloque del modelo de retardo se compara con los valores reales de los sensores de velocidad obteniéndose así el error del predictor, finalmente este error se agrega a la salida del modelo del robot, que no presenta los efectos del retardo, y se obtiene la salida final del predictor que se usa como realimentación de velocidad para los cálculos de los controladores. En el siguiente literal se desarrolla el modelo matemático de orden reducido y su discretización.

Modelo de la Plataforma Robótica Pioneer 3DX Basado en un Modelo de Orden Reducido

A continuación, se presenta el desarrollo matemático del modelo de la plataforma robótica para la velocidad lineal, tomando en cuenta que se presenta un desarrollo similar para la velocidad angular. Considerando la Ecuación 1.3 que es el modelo de primer orden con retardo (FOPDT) y la Ecuación 1.8 que describe la aproximación de Taylor que se hace al retardo para su manejo matemático, se sintetiza la siguiente ecuación:

$$G_{apx}(s) = \frac{v(s)}{U_v(s)} = \frac{K_{apx_v}}{(\tau_v s + 1)(t_{0_v} s + 1)} = \frac{K_{apx_v}}{\tau_v t_{0_v}} \cdot \frac{1}{\left(s + \frac{1}{\tau_v}\right)\left(s + \frac{1}{t_{0_v}}\right)}$$

Ecuación 2.5. Modelo FOPDT incluyendo la aproximación de Taylor para el retardo.

La Ecuación 2.5 va a implementarse en un controlador discreto, en este caso una computadora, por lo que se debe discretizar esta relación para su posterior uso. A continuación, se presenta la transformada z que se va a aplicar [52]:

$$\frac{1}{(s+a)(s+b)} = \frac{1}{a-b}\left(\frac{z}{z-e^{-bT}} - \frac{z}{z-e^{-aT}}\right)$$

Ecuación 2.6. Transformada Z aplicada para el modelo FOPDT.

El modelo aproximado $G_{apx}(z)$ es una función de transferencia que va a tener como entrada a la señal proveniente del controlador $U_v(z)$ y la salida será el valor de velocidad del robot $v(z)$. El resultado de la discretización de la Ecuación 2.5 será:

$$G_{apx}(z) = \frac{v(z)}{U_v(z)} = \frac{K_{apx_v}}{\tau_v t_{0_v}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\tau_v} - \frac{1}{t_{0_v}}} \cdot \left(\frac{z}{z - e^{-\frac{T}{t_{0_v}}}} - \frac{z}{z - e^{-\frac{T}{\tau_v}}}\right)$$

Ecuación 2.7. Función de transferencia discreta del modelo FOPDT.

Para simplificar el desarrollo matemático se realiza las siguientes sustituciones:

$$A_1 = \frac{K_{apx_v}}{\tau_v t_{0_v}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\tau_v} - \frac{1}{t_{0_v}}} = \frac{K_{apx_v}}{t_{0_v} - \tau_v}$$

Ecuación 2.8. Constante A_1 para la simplificación matemática.

$$A_2 = e^{-\frac{T}{t_{0_v}}}$$

Ecuación 2.9. Constante A_2 para la simplificación matemática.

$$A_3 = e^{-\frac{T}{\tau_v}}$$

Ecuación 2.10. Constante A_3 para la simplificación matemática.

Reemplazando las Ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.10 en la Ecuación 2.7 y realizando el manejo matemático correspondiente se tiene que:

$$G_{apx}(z) = \frac{v(z)}{U_v(z)} = A_1 \cdot \left(\frac{z}{z - A_2} - \frac{z}{z - A_3}\right) = \frac{A_1(A_2 - A_3)z}{z^2 - (A_2 + A_3)z + A_2 A_3}$$

Ecuación 2.11. Función de transferencia discreta del modelo FOPDT simplificada.

Realizando una nueva sustitución, y considerando las Ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.10, para un desarrollo más sencillo se tiene que:

$$B_1 = A_1(A_2 - A_3) = \frac{K_{apx_v}}{t_{0_v} - \tau_v}\left(e^{-\frac{T}{t_{0_v}}} - e^{-\frac{T}{\tau_v}}\right)$$

Ecuación 2.12. Constante B_1 para la simplificación matemática.

$$B_2 = (A_2 + A_3) = e^{-\frac{T}{t_{0v}}} + e^{-\frac{T}{\tau_v}}$$

Ecuación 2.13. Constante B_2 para la simplificación matemática.

$$B_3 = A_2 A_3 = e^{-\frac{T}{t_{0v}}} \cdot e^{-\frac{T}{\tau_v}} = e^{-T\left(\frac{T}{t_{0v}} + \frac{T}{\tau_v}\right)}$$

Ecuación 2.14. Constante B_3 para la simplificación matemática.

Finalmente, a partir de la Ecuación 2.11 se va a obtener la secuencia discreta que puede ser implementada en un procesador de código:

$$G_{apx}(z) = \frac{v(z)}{U_v(z)} = \frac{B_1 z}{z^2 - B_2 z + B_3} \cdot \frac{z^{-2}}{z^{-2}} = \frac{B_1 z^{-1}}{1 - B_2 z^{-1} + B_3 z^{-2}}$$

Ecuación 2.15. Reemplazo de las Ecuaciones 2.12, 2.13 y 2.14 en 2.11.

$$(1 - B_2 z^{-1} + B_3 z^{-2}) \cdot v(z) = B_1 z^{-1} \cdot U_v(z)$$

Ecuación 2.16. Manejo matemático de la Ecuación 2.15.

$$v(z) = B_1 z^{-1} U_v(z) + B_2 z^{-1} v(z) - B_3 z^{-2} v(z)$$

Ecuación 2.17. Manejo matemático de la Ecuación 2.16.

Aplicando la propiedad de “Desplazamiento en el Tiempo” de la Transformada Z [53] a la Ecuación 2.17, se obtiene la secuencia discreta final:

$$v(z) = B_1 U_v(z-1) + B_2 v(z-1) - B_3 v(z-2)$$

Ecuación 2.18. Aplicación de la propiedad de desplazamiento en la Ecuación 2.17.

$$v_k = B_1 U_{v_{k-1}} + B_2 v_{k-1} - B_3 v_{k-2}$$

Ecuación 2.19. Secuencia discreta de la velocidad lineal.

La Ecuación 2.19 sirve para la implementación del modelo de la plataforma robótica en el Predictor de Smith, esta relación se encuentra en función de las constantes K_{apx}, t_0 y τ que provienen de la curva de reacción del modelo de primer orden con retardo (FOPDT) de la velocidad lineal, T que es el periodo de muestreo del robot, $U_{v_{k-1}}$ que es la entrada del modelo de la plataforma que usualmente será la señal proveniente de los controladores retrasada un periodo de muestreo, y de v_{k-1} y v_{k-2} que es la salida del modelo de la plataforma, generalmente es el valor de velocidad del sistema retrasada 1 y 2 periodos respectivamente. Una expresión similar a la Ecuación 2.19 se tiene para la velocidad angular considerando los valores del modelo de orden reducido de esta señal.

2.4. Controlador por Modos Deslizantes (SMC)

Tomando en consideración lo visto en la sección 1.3 del Capítulo 1, para obtener la ley de control $U_{SMC}(t)$ se debe desarrollar 2 partes aditivas, la parte equivalente o continua $U_{eq}(t)$ y la parte discontinua $U_d(t)$. Para sintetizar la parte equivalente se debe mencionar que el controlador SMC va a tener como superficie deslizante una relación tipo PD-Like, y que el modelo matemático que se utiliza es el modelo de orden reducido FOPDT de la Ecuación 2.5. El desarrollo matemático mostrado a continuación se realiza para la velocidad lineal de la plataforma robótica, tomando en cuenta que un desarrollo similar se realiza para la velocidad angular, por lo que partiendo de esto se tiene que:

$$G_{apx}(s) = \frac{v(s)}{U_v(s)} = \frac{K_{apx_v}}{(\tau_v s+1)(t_{0_v} s+1)} = \frac{K_{apx_v}}{(\tau_v t_{0_v})s^2+(\tau_v+t_{0_v})s+1}$$

Ecuación 2.20. Modelo FOPDT de la velocidad lineal del robot.

Realizando el siguiente reemplazo para la simplicidad matemática donde $\alpha = \tau_v t_{0_v}$ y $\beta = \tau_v + t_{0_v}$, se tiene que:

$$\frac{v(s)}{U_v(s)} = \frac{K_{apx_v}}{\alpha s^2 + \beta s + 1}$$

Ecuación 2.21. Modelo FOPDT de la velocidad lineal del robot posterior al reemplazo.

Aplicando la "Propiedad de Derivación" y la transformada de Laplace inversa [31] se tiene lo siguiente:

$$\alpha v(s)s^2 + \beta v(s)s + v(s) = K_{apx_v} U_v(s)$$

Ecuación 2.22. Manejo matemático de la Ecuación 2.21.

$$\alpha \frac{d^2 v(t)}{dt^2} + \beta \frac{dv(t)}{dt} + v(t) = K_{apx_v} U_v(t)$$

Ecuación 2.23. Manejo matemático de la Ecuación 2.22.

Cambiando de la nomenclatura de Leibniz a la nomenclatura de Newton para las derivadas se tiene:

$$\alpha\, \ddot{v} + \beta \dot{v} + v = K_{apx_v} U_v$$

Ecuación 2.24. Cambio de nomenclatura de la Ecuación 2.23.

Para seguir con el desarrollo de la ley de control equivalente, a continuación, se presenta la propuesta de superficie deslizante tipo PD-Like basada en la ecuación 1.15:

$$S(t) = \lambda_{s_v}\left(\lambda_{g_v} v_{ref}(t-h_1) - v_{real}\right) - \lambda_{e_v}\dot{v}_{real} = \lambda_{s_v} E_{PDL} - \lambda_{e_v}\dot{v}_{real}$$

Ecuación 2.25. Superficie deslizante tipo PD-Like.

$$E_{PDL} = \lambda_{g_v} v_{ref}(t-h_1) - v_{real}$$

Ecuación 2.26. Error PD-Like.

Donde:

λ_{s_v}: Constante positiva, representa la ganancia proporcional.

λ_{g_v}: Constante que relaciona de manera lineal la posición de referencia.

λ_{e_v}: Constante positiva, representa el amortiguamiento dependiente de la aceleración.

Cabe destacar que se denota la expresión $\left(\lambda_{g_v} v_{ref}(t-h_1) - v_{real}\right)$ como E_{PDL}, debido a que es una analogía de error con que se maneja los controladores PID, por lo que se lo llama "Error PD-Like". A continuación, se va a aplicar la condición de deslizamiento revisada en la Ecuación 1.20 a la superficie PD-Like de la Ecuación 2.25 obteniendo lo siguiente:

$$\frac{dS(t)}{dt} = \dot{S}(t) = \lambda_{s_v}\dot{E}_{PDL} - \lambda_{e_v}\ddot{v}_{real} = 0$$

Ecuación 2.27. Condición de deslizamiento aplicada a la Ecuación 2.25.

Despejando de la Ecuación 2.24 el término $\ddot{v}$ y reemplazando en la ecuación anterior se tiene:

$$\dot{S}(t) = \lambda_{s_v}\dot{E}_{PDL} - \frac{\lambda_{e_v}}{\alpha}(U_v - \beta\dot{v} - v) = 0$$

Ecuación 2.28. Reemplazo de $\ddot{v}$ en la Ecuación 2.27.

Por lo que la ley de control equivalente se obtiene despejando el término U_v de la Ecuación 2.28:

$$U_{eq_v} = U_v = \beta\dot{v} + v + \frac{\alpha\lambda_{s_v}}{\lambda_{e_v}}\dot{E}_{PDL}$$

Ecuación 2.29. Ley de control equivalente para la velocidad lineal.

Para desarrollar la ley de control discontinua se aplica la función sigmoide, tal como se vio en la Ecuación 1.22, por lo que la ley de control completa $U_{SMC}(t)$ se obtiene al sumar las Ecuaciones 2.29 y 1.20:

$$U_{SMC_v}(t) = \beta\dot{v} + v + \frac{\alpha\lambda_{s_v}}{\lambda_{e_v}}\dot{E}_{PDL} + K_{d_v}\frac{S_v(t)}{|S_v(t)| + \delta_v}$$

Ecuación 2.30. Ley de control completa de la técnica SMC para la velocidad lineal.

Se aplica la condición de alcanzabilidad a la ley de control completa para determinar el rango de valores de los parámetros de sintonización para la estabilidad:

$$S(t)\dot{S}(t) < 0$$

Ecuación 2.31. Condición de alcanzabilidad.

La primera derivada de la superficie deslizante se tiene desarrollada en la Ecuación 2.28, por lo que reemplazando la ley de control de la Ecuación 2.30 en 2.28 se tiene:

$$\dot{S}(t) = \lambda_{s_v}\dot{E}_{PDL} - \frac{\lambda_{e_v}}{\alpha}\left(\beta\dot{v} + v + \frac{\alpha\lambda_{s_v}}{\lambda_{e_v}}\dot{E}_{PDL} + K_{d_v}\frac{S_v(t)}{|S_v(t)| + \delta_v} - \beta\dot{v} - v\right)$$

Ecuación 2.32. Reemplazo de la Ecuación 2.30 en 2.28.

$$\dot{S} = \lambda_{s_v}\dot{E}_{PDL} - \frac{\lambda_{e_v}}{\alpha}\left(\frac{\alpha\lambda_{s_v}}{\lambda_{e_v}}\dot{E}_{PDL} + K_{d_v}\frac{S_v(t)}{|S_v(t)| + \delta_v}\right)$$

Ecuación 2.33. Desarrollo matemático de la Ecuación 2.32.

$$\dot{S} = -\frac{K_{d_v}\lambda_{e_v}}{\alpha}\frac{S_v(t)}{|S_v(t)| + \delta_v}$$

Ecuación 2.34. Desarrollo matemático de la Ecuación 2.33.

Sustituyendo la relación anterior en la ecuación (2.31) se obtiene:

$$S(t)\dot{S}(t) = -\frac{K_{d_v}\lambda_{e_v}}{\alpha}\frac{{S_v}^2(t)}{|S_v(t)| + \delta_v} < 0$$

Ecuación 2.35. Sustitución de la Ecuación 2.34 en 2.31.

Tomando en cuenta que $\alpha = \tau_v t_{0_v}$ este término será siempre positivo, λ_{e_v} será una constante positiva de la superficie PD-Like, δ_v es una constante para reducir el "chattering" por lo que no se tornará negativa puesto que en ese caso aumentaría este fenómeno adverso, por lo que para mantener la inecuación nos queda que:

$$K_{d_v} > 0$$

Ecuación 2.36. Rango de valores para la estabilidad.

Reemplazando la primera derivada de la Ecuación 2.26 que representa el "Error PD-Like" en la ley de control sintetizada en la Ecuación 2.30 se obtiene lo siguiente:

$$U_{SMC}(t) = \beta\dot{v} + v + \frac{\alpha\lambda_{s_v}}{\lambda_{e_v}}\left(\lambda_{g_v}\dot{v}_{ref}(t-h_1) - \dot{v}_{real}\right) + K_{d_v}\frac{S_v(t)}{|S_v(t)| + \delta_v}$$

Ecuación 2.37. Ley de control completa de la técnica SMC preliminar.

$$U_{SMC}(t) = \beta\dot{v} + v + \frac{\alpha\lambda_{s_v}\lambda_{g_v}}{\lambda_{e_v}}\dot{v}_{ref}(t-h_1) - \frac{\alpha\lambda_{s_v}}{\lambda_{e_v}}\dot{v}_{real} + K_{d_v}\frac{S_v(t)}{|S_v(t)| + \delta_v}$$

Ecuación 2.38. Manejo matemático de la Ecuación 2.37.

Hay que recalcar que el término v es la salida del modelo FOPDT y v_{real} es la señal de realimentación de velocidad lineal, por lo que ambas señales en la práctica son similares, obteniendo lo siguiente:

$$U_{SMC}(t) = \left(\beta - \frac{\alpha\lambda_{s_v}}{\lambda_{e_v}}\right)\dot{v}_{real} + v_{real} + \frac{\alpha\lambda_{s_v}\lambda_{g_v}}{\lambda_{e_v}}\dot{v}_{ref}(t-h_1) + K_{d_v}\frac{S_v(t)}{|S_v(t)| + \delta_v}$$

Ecuación 2.39. Manejo matemático de la Ecuación 2.38.

En la relación anterior se realiza las siguientes sustituciones:

$$A_v = \beta - \frac{\alpha\lambda_{s_v}}{\lambda_{e_v}} = \tau_v + t_{0_v} - \frac{\tau_v t_{0_v}\lambda_{s_v}}{\lambda_{e_v}}$$

Ecuación 2.40. Reemplazo para simplificación matemática.

$$B_v = \frac{\alpha\lambda_{s_v}\lambda_{g_v}}{\lambda_{e_v}} = \frac{\tau_v t_{0_v}\lambda_{s_v}\lambda_{g_v}}{\lambda_{e_v}}$$

Ecuación 2.41. Reemplazo para simplificación matemática.

El resultado de la sustitución para un mejor manejo matemático en la Ecuación 2.39 de las Ecuaciones 2.40 y 2.41 se tiene que:

$$U_{SMC}(t) = A_v\dot{v}_{real} + v_{real} + B_v\dot{v}_{ref}(t-h_1) + K_{d_v}\frac{S_v(t)}{|S_v(t)| + \delta_v}$$

Ecuación 2.42. Ley de control final de la técnica SMC para la velocidad lineal.

A continuación, tomando en cuenta un desarrollo similar para la velocidad angular, se tiene la ley de control de manera más explícita, considerando las dos variables a controlar:

$$\begin{bmatrix} U_{SMC_v} \\ U_{SMC_\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_v & 0 \\ 0 & A_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{real} \\ \dot{\omega}_{real} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{real} \\ \omega_{real} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_v & 0 \\ 0 & B_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{ref}(t-h_1) \\ \dot{\omega}_{ref}(t-h_1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{d_v} \dfrac{S_v(t)}{|S_v(t)| + \delta_v} \\ K_{d_\omega} \dfrac{S_\omega(t)}{|S_\omega(t)| + \delta_\omega} \end{bmatrix}$$

Ecuación 2.43. Ley de control final de la técnica SMC en forma matricial.

Cabe recalcar que esta técnica de control va a tener los siguientes parámetros de sintonización:

- K_{d_v}, δ_v, K_{d_ω}, δ_ω que sirven para sintonizar la parte de alcanzabilidad de la ley de control.
- λ_{s_v}, λ_{g_v}, λ_{e_v}, λ_{s_ω}, λ_{g_ω}, λ_{e_ω} que sirven para sintonizar la superficie deslizante tipo PD-Like.

SMC + Predictor de Smith

En el esquema de seguimiento de trayectorias, para tratar de mejorar el desempeño del controlador SMC, se va a implementar la estructura compensadora llamada Predictor de Smith, la cual provee de una realimentación al controlador basado en un valor de predicción. Lo que se desea es sintetizar un esquema de control que reúna las características positivas de cada una de las técnicas para que el desempeño ante la presencia de retardos sea óptimo y que además se tenga una estructura de control robusto. El esquema de control a implementarse se puede observar en la Figura 2.6.

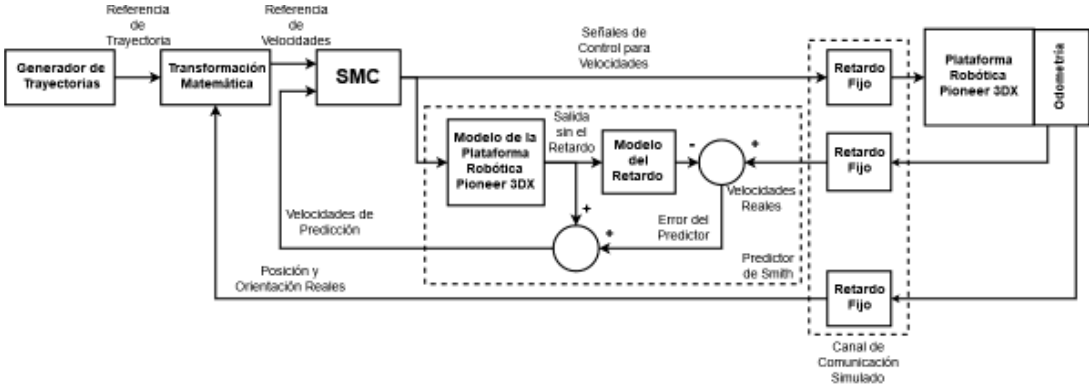


Figura 2.6. Esquema del controlador SMC combinado con el Predictor de Smith.

2.5. Uso de Filtros y Saturadores

Los filtros son redes físicas o estructuras digitales que permiten o detienen el paso de un determinado grupo de frecuencias [54]. Por su parte, un saturador es una estructura que limita los valores a un rango entre valores mínimos y máximos.

Los filtros y saturadores, en el caso particular de la estructura de seguimiento de trayectorias para un robot de tracción diferencial, cumplen con requerimientos específicos para mejorar el desarrollo de esta tarea. A continuación, se profundiza en el uso de estas estructuras:

Uso de Filtros

Debido en gran parte a la velocidad de reacción del robot y del uso de estructuras de control, tales como el controlador PD-Like y el controlador SMC, se puede producir el aparecimiento del fenómeno denominado “chattering”, que es una excesiva variación de valores de pequeña magnitud y de alta frecuencia. Centrando la atención en la estructura de control implementada en este trabajo, se pudo determinar que se produce “chattering” en las velocidades lineal y angular que tiene un origen en una variación excesiva en las señales provenientes del controlador. Por lo que se decide depurar esta señal a través del uso de un filtro pasabajos, denominado “Filtro Promediador”, la relación que define este tipo de filtro es la siguiente:

$$U_{Filtro} = \frac{u_k + u_{k-1}}{A}$$

Ecuación 2.44. Filtro pasabajos denominado “Filtro Promediador”.

Donde:

U_{Filtro}: Señal filtrada.

u_k: Valor actual sin filtro.

u_{k-1}: Valor anterior sin filtro.

A: Parámetro de atenuación, mayor a 1.

A continuación, en la Figura 2.7 se observan los resultados obtenidos en la implementación de filtros en las señales de control para la velocidad lineal y angular con un valor del parámetro de atenuación $A = 2$.

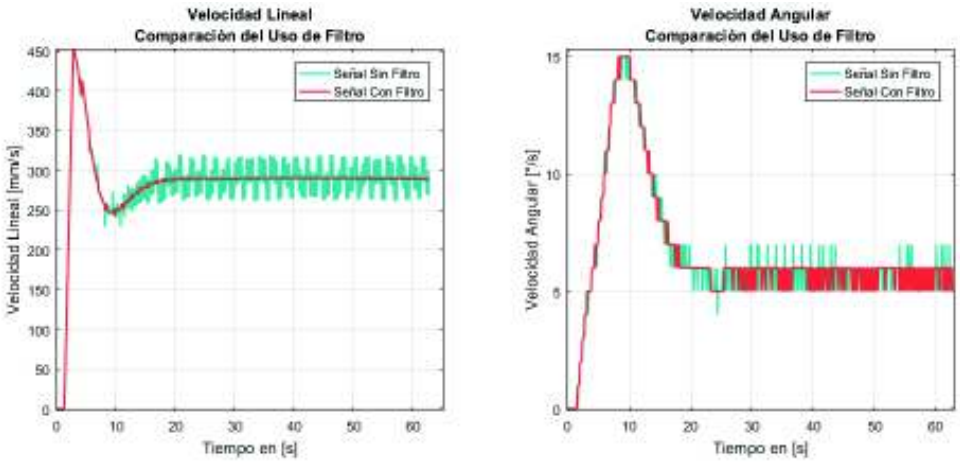


Figura 2.7. Comparación de la velocidad lineal y angular del robot con el uso de filtros.

Como se puede observar las señales de velocidad sin filtro poseen una variación excesiva, y al agregar el filtro se ve una mejora, en mayor medida en la señal de velocidad lineal, eliminando el "chattering" y por consiguiente sus efectos negativos en el seguimiento de trayectorias. Al ser filtros agregados a la salida del controlador también se conoce a este procedimiento como 'smoothing', que es un suavizado de la señal de control.

Uso de Saturadores

Los saturadores en un sistema de control generalmente se usan para restringir los valores que provienen del controlador, para que no se llegue a tener referencias que podrían poner en peligro la integridad física de los actuadores y elementos que conforman a la planta o proceso. En el caso particular de este trabajo, y considerando el uso del robot Pionner 3DX, los limites superiores de los saturadores de velocidad lineal y angular respectivamente son 1000 mm/s y 100°/s y los límites inferiores son respectivamente 0 mm/s y -100°/s. Estos saturadores nos permiten tener un funcionamiento acorde a los valores máximos y mínimos correspondientes a los datos de fábrica del robot. Sin embargo, el valor mínimo de la velocidad lineal es cero debido a que no se desea que el robot tenga la posibilidad de retroceder ante un adelantamiento en la trayectoria.

2.6. Esquema de Control Final para el Seguimiento de Trayectorias

A continuación, en la Figura 2.8 se presenta el esquema de control final implementado para el seguimiento de trayectorias considerando la presencia de retardos fijos. Este esquema sintetiza las estrategias de control analizadas en las secciones 2.2, 2.3 y 2.4. Los filtros y saturadores se encuentran dentro del bloque 'Controlador', pues suavizan y limitan las acciones de control para la velocidad lineal y angular. Además, no se considera la

presencia de perturbaciones, pues el análisis de la ubicación de las perturbaciones en el esquema de control se realiza en la sección 3.5 del Capítulo 3.

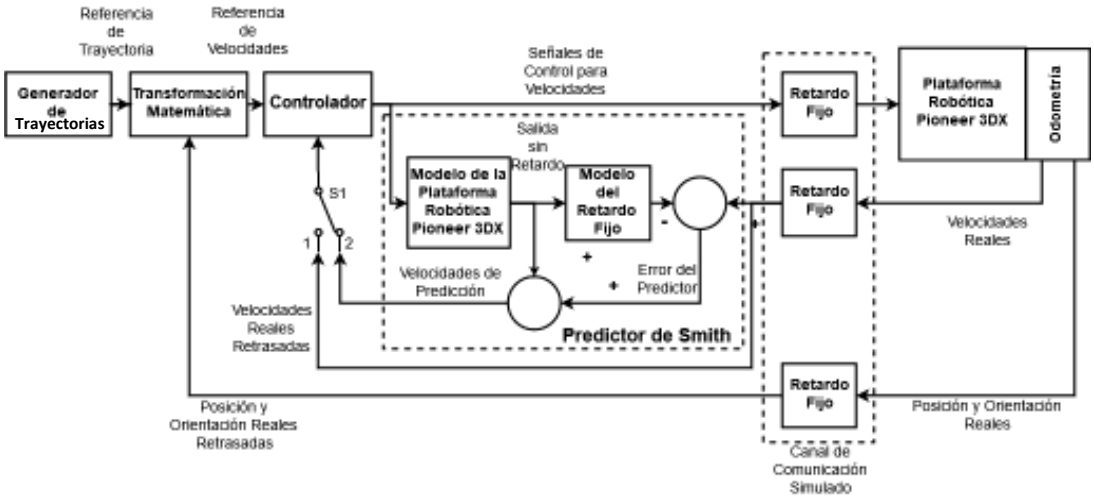


Figura 2.8. Esquema del control final para el seguimiento de trayectorias con el uso del robot Pioneer 3DX y la presencia de retardos fijos.

En la Tabla 2.2 se puede analizar las diferentes técnicas de control implementadas de acuerdo con la posición del selector S1, y del controlador primario que se tenga en el esquema de control.

Tabla 2.2. Estrategias de control implementadas en este trabajo.

POSICIÓN SWITCH S1	CONTROLADOR PRIMARIO	PREDICTOR DE SMITH	ESTRATEGIA DE CONTROL FINAL
1	PD-Like	NO	PD-Like
1	SMC	NO	Técnica No Estudiada
2	PD-Like	SI	PD-Like + Predictor de Smith
2	SMC	SI	SMC + Predictor de Smith

2.7. Implementación del Esquema de Control

En la presente sección se describen los detalles relacionados con la implementación de las estructuras de control necesarias para el seguimiento de trayectorias, así como las técnicas de control desarrolladas para el funcionamiento del dispositivo ante la presencia de

retardos fijos en el esquema de control. Adicional se describe la interfaz gráfica desarrollada para la elección de parámetros relacionados con la simulación

Algoritmo General para el Seguimiento de Trayectorias

El seguimiento de trayectorias implementado para un dispositivo móvil, en particular el robot Pioneer 3DX, presenta la implementación de ciertas estructuras en el esquema de control, estas estructuras se pueden revisar en la sección 2.6, en la Figura 2.8. En esta gráfica se observa que el esquema presenta ciertos bloques tales como: generador de trayectorias, transformación matemática, retardo fijo, controladores, etc. Basando el funcionamiento de la plataforma robótica en las funciones disponibles de la librería ARIA, el programa principal de seguimiento de trayectorias tiene las siguientes características:

- La obtención de los datos provenientes de los sensores, los cálculos y la configuración de los valores de referencia se realizarán cada 100 [ms], debido a que la frecuencia de trabajo de la plataforma es de 10 [Hz].
- El desarrollo de la simulación tendrá un tiempo definido por el usuario, por lo que la trayectoria depende únicamente de la velocidad lineal de referencia, ocasionando así que no necesariamente se alcance a completar la trayectoria escogida en su totalidad en el tiempo de simulación previamente configurado.
- Se implementa el algoritmo de retardo fijo en el envío de las señales de control hacia los actuadores del robot, y un retardo en las realimentaciones de velocidad y posición. El retardo fijo, acorde al robot y su característica de procesamiento discreto, puede ser de valores múltiplos del periodo de muestreo (T_{samp}=100 [ms]).
- Se implementa una transformación matemática que convierte las referencias de posición en referencias de velocidad. Como se mencionó en el Capítulo 2, en el apartado 2.1, se requiere implementar un arreglo en el ángulo de orientación φ que en esta sección se analiza más a fondo.
- Se describen subrutinas tales como: interfaz gráfica, generación de trayectorias, controladores, etc. Estas subrutinas proveen de una mejor organización en la descripción de los diagramas de flujo, así como en la implementación del código fuente.

En la Figura 2.9 se observa el diagrama de flujo del programa principal implementado:

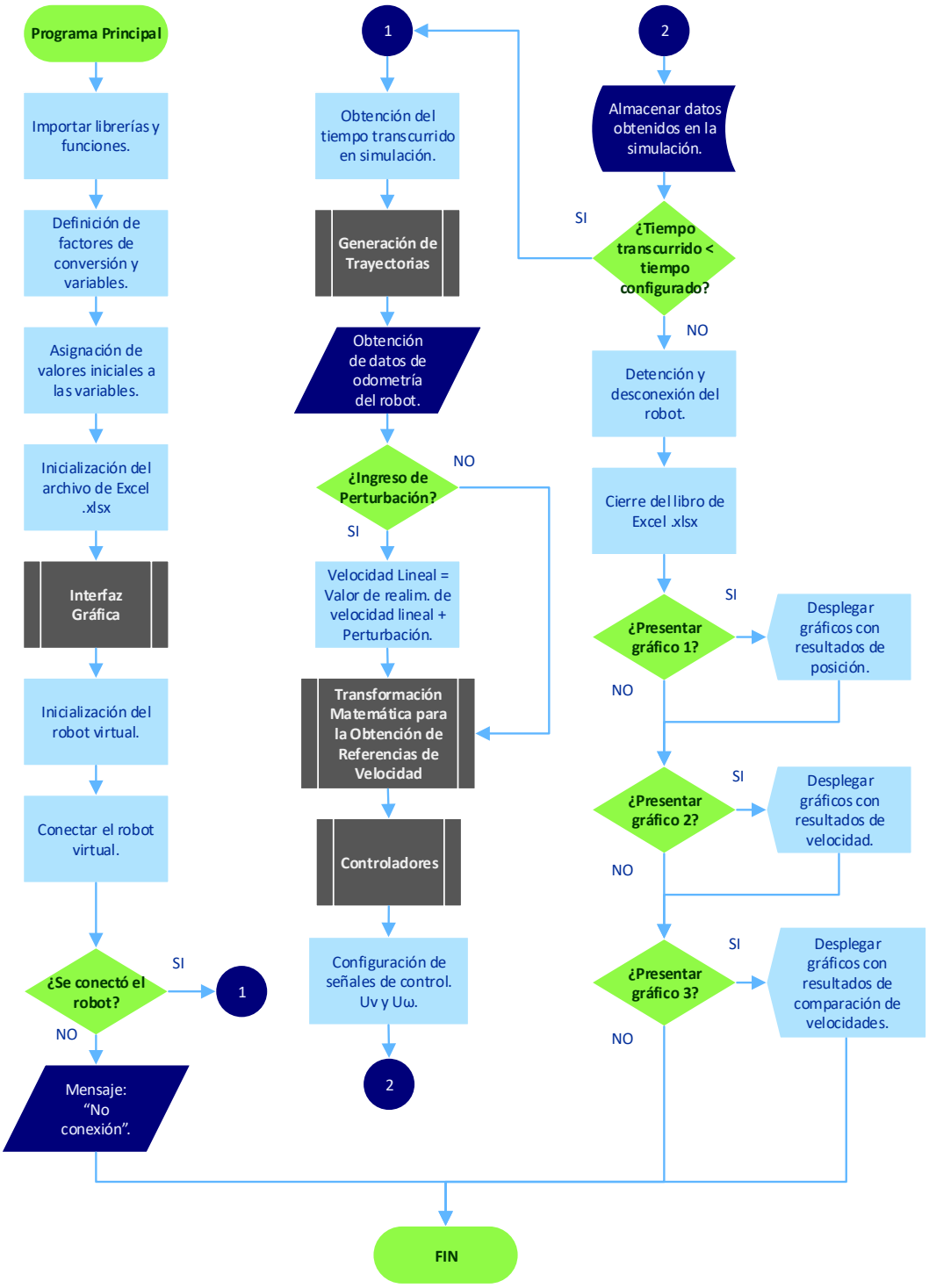


Figura 2.9. Diagrama de flujo de la rutina principal del programa.

Rutina de Generación de Trayectorias

En lo relacionado a la generación de trayectorias, en el apartado 2.1, se aborda el desarrollo matemático de las coordenadas respecto al plano XY para la creación de los puntos que conforman la trayectoria deseada. En el caso particular de este trabajo, las trayectorias de interés son las siguientes:

- Trayectoria circular, que es adecuada para la verificación del seguimiento a una velocidad lineal y angular constante.
- Trayectoria cuadrada, que es adecuada para poner a prueba el seguimiento ante cambios bruscos en cuanto a la orientación del robot, provocada en las esquinas de la trayectoria.
- Lemniscata de Bernoulli o trayectoria infinito, esta trayectoria es adecuada puesto que se realizan cambios en la orientación crecientes y decrecientes.

En la Figura 2.10 se expone el diagrama de flujo de la rutina de generación de trayectorias:

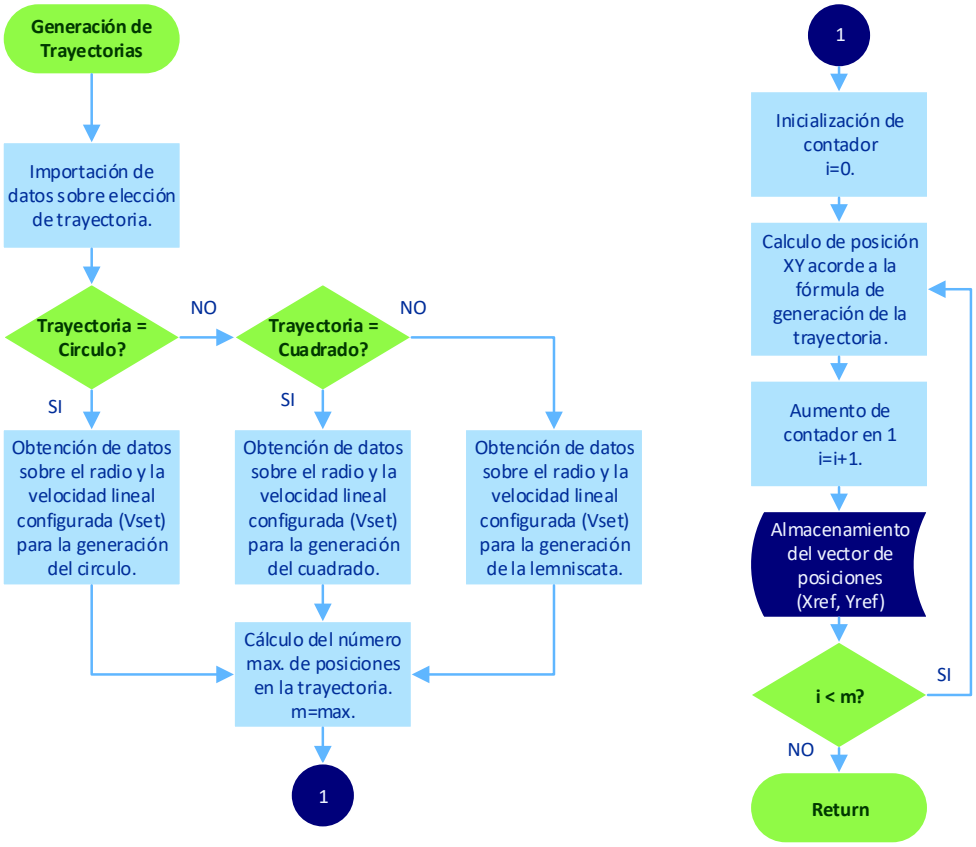


Figura 2.10. Diagrama de flujo de la rutina de generación de trayectorias.

Generación de Referencias de Velocidad

En la tarea de seguimiento de trayectorias, es de conveniencia no solo tener el control de los puntos que se desea seguir, sino además del tiempo que se toma en realizar esta acción. Por ello en la generación de trayectorias se requiere una velocidad lineal de referencia v_{set} para que adecuadamente se dispongan los puntos en el plano XY. Sin embargo, el robot Pioneer 3DX presenta dos opciones de configuración:

- Configuración de la posición y orientación deseada en el plano.
- Configuración de la velocidad lineal y angular de referencia.

Por lo que, para tener un control no solo de la trayectoria sino además del tiempo de realización de la tarea, se escoge la segunda opción de configuración. Esta posibilidad de configurar la velocidad lineal y angular presenta un inconveniente, puesto que se tiene un vector de posiciones en el plano y se desea una referencia de velocidades, en estas circunstancias se implementa una transformación matemática, el desarrollo matemático de la trasformación se puede observar en las Ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4. A continuación, en la Figura 2.11 se muestra el algoritmo completo para implementar esta transformación:

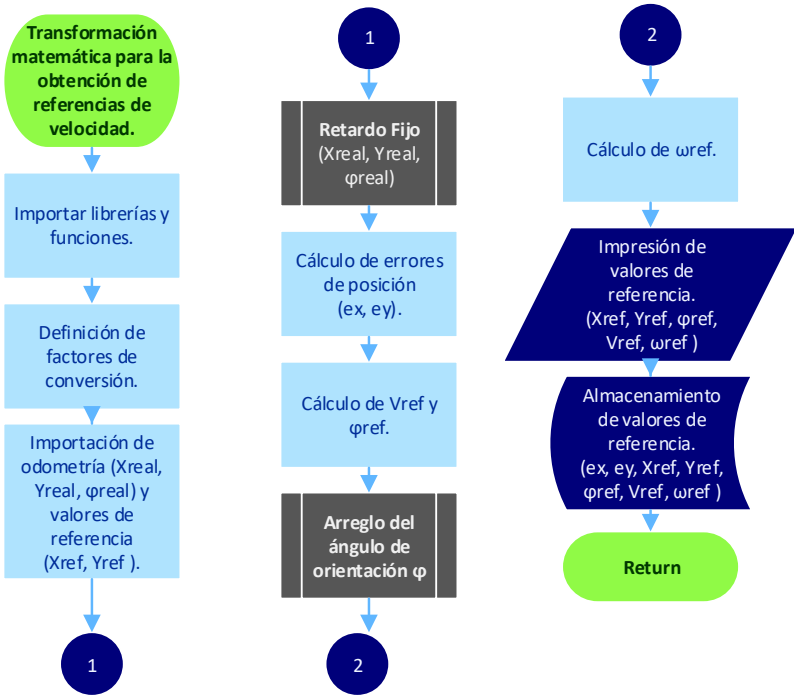


Figura 2.11. Diagrama de flujo de la transformación matemática para la generación de referencias de velocidad lineal y angular.

Arreglo del Ángulo de Referencia φ

El cálculo del ángulo de referencia φ, que se puede observar en la Ecuación 2.3, se lo realiza a través de la aplicación de la función tan^{-1}, esto supone un rango de la función de $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$. Generalmente se usa la función "atan2" que es parte de librerías matemáticas en lenguajes de programación, y que no es más que la función tan^{-1} con 2 argumentos, donde cualquiera de ambos argumentos puede ser cero. La diferencia de esta función es que el signo de ambos argumentos sirve para determinar el cuadrante de ubicación y el rango de la función es mayor $(-\pi, \pi)$. Los resultados de usar esta función son los siguientes:

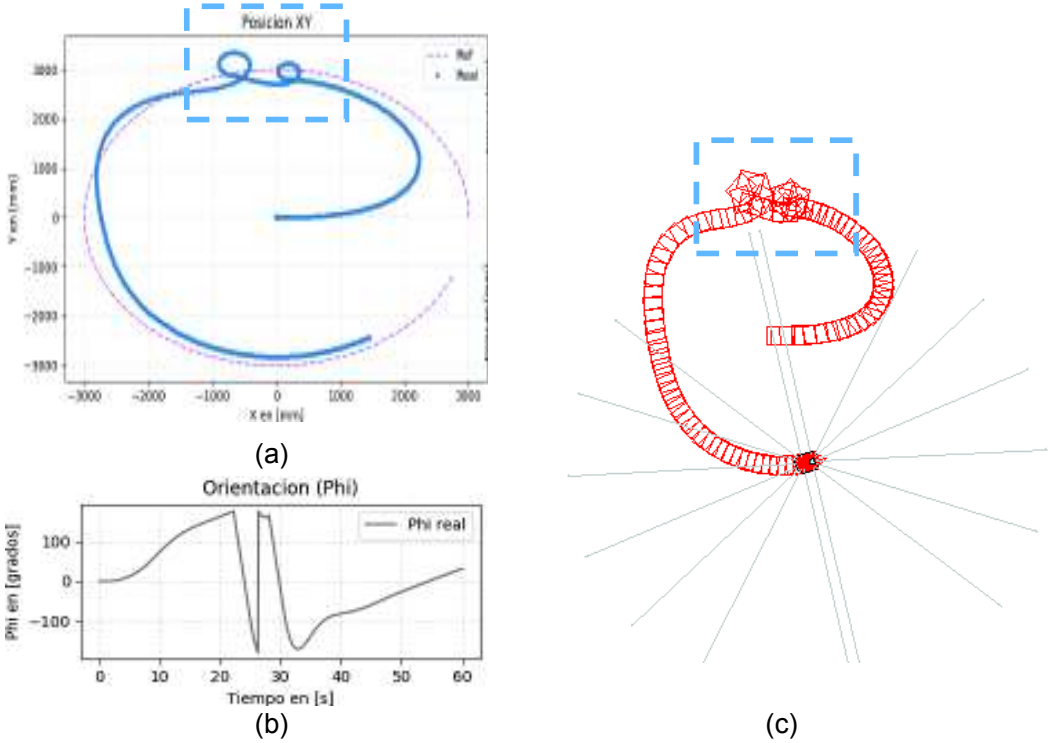


Figura 2.12. (a) Posición en el plano XY. (b) Gráfico de la orientación del robot vs. Tiempo. (c) Vista superior del robot Pioneer 3DX en su desplazamiento en el plano.

Como se observa en el recuadro de la Figura 2.12 (a) y (c), se tiene un mal seguimiento en la trayectoria en la parte superior, esto es provocado por el cambio en la referencia de orientación de π a $-\pi$. Al analizar la Figura 2.12 (b) se puede notar que la función "atan2" no provee de valores correctos en esta transición. Para corregir este error se implementa el arreglo de ángulo descrito en la Figura 2.13. Este algoritmo es tomado de [20].

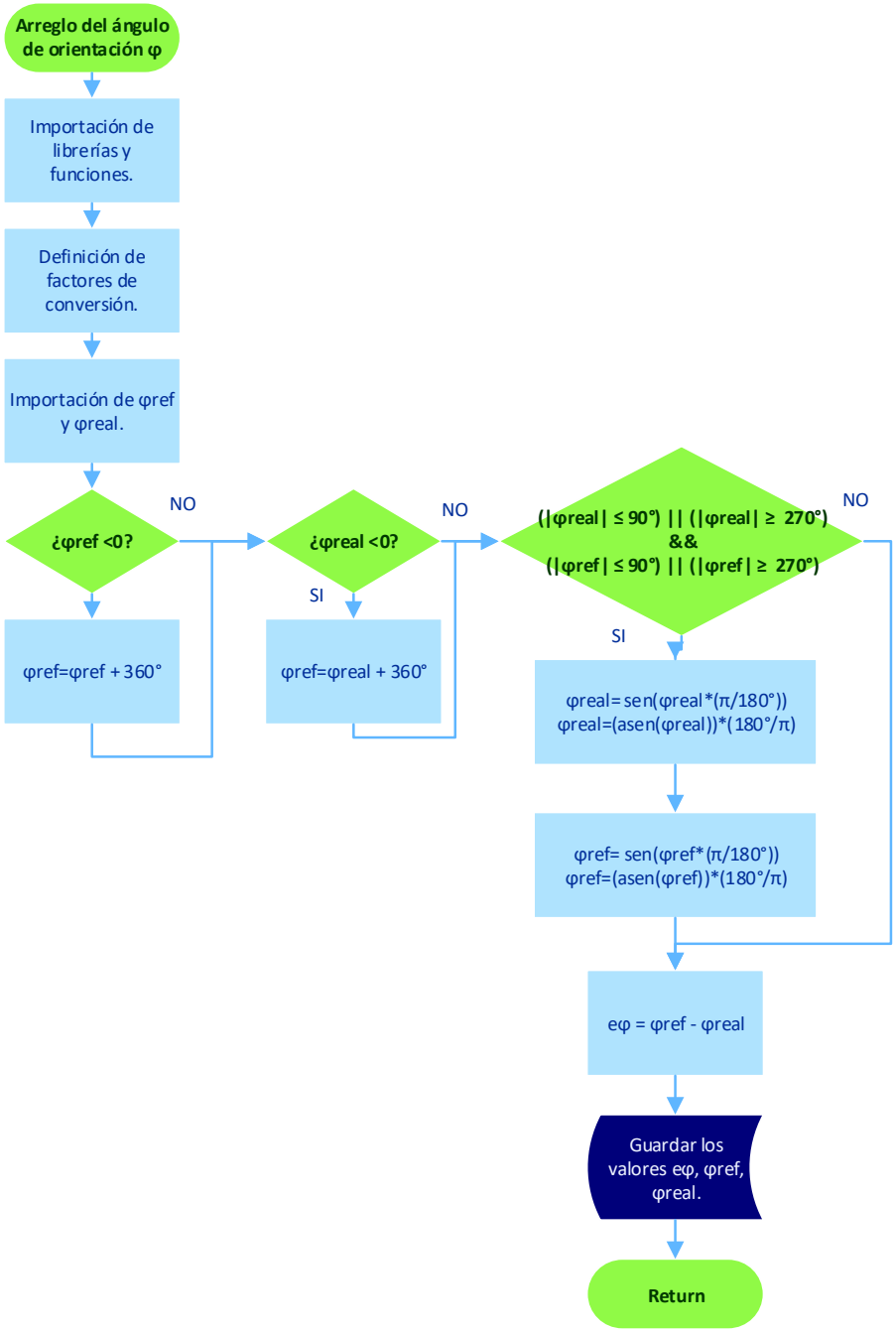


Figura 2.13. Diagrama de flujo del arreglo matemático del ángulo de orientación φ del robot [20].

Al implementar el algoritmo de arreglo del ángulo de orientación φ, se obtienen los resultados que se pueden verificar en la Figura 2.14.

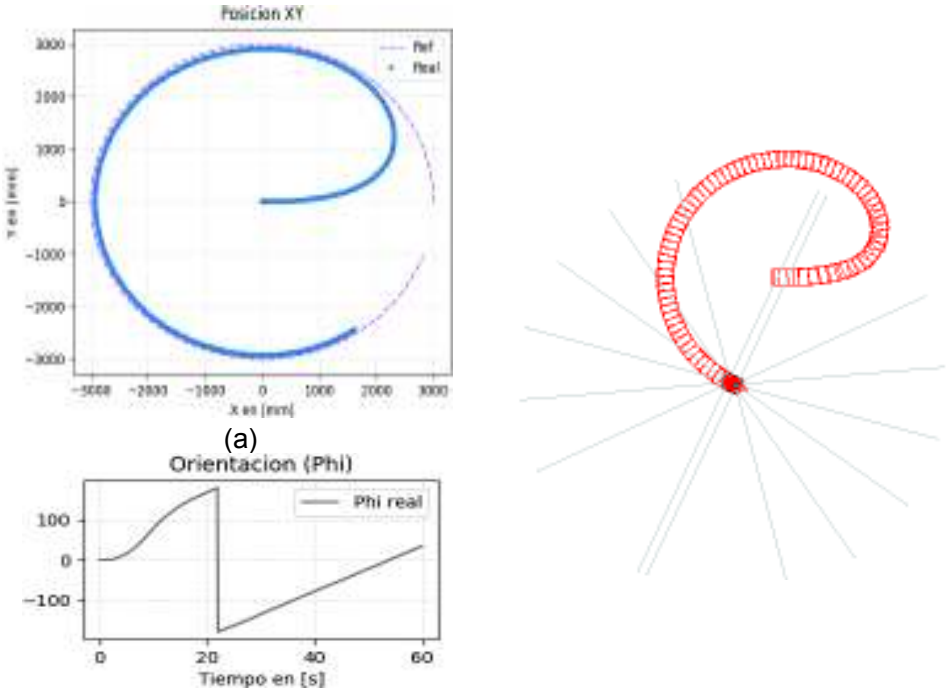


Figura 2.14. (a) Posición en el plano XY. (b) Gráfico de la orientación del robot vs. tiempo. (c) Vista superior del robot Pioneer 3DX en su desplazamiento en el plano.

Como se puede notar, no existe el error en el seguimiento de trayectoria y el cambio en la referencia de orientación es inmediata cuando la referencia de orientación cambia de π a $-\pi$, corrigiendo así el problema.

Implementación de Controladores

Como se ha podido revisar en los anteriores capítulos, los controladores y las estructuras a analizar son las siguientes:

- Controlador PD-Like.
- Controlador PD-Like en combinación con el Predictor de Smith.
- Controlador SMC con una superficie deslizante tipo PD-Like y en combinación con el Predictor de Smith.

Usualmente la implementación de los controladores no presenta grandes complicaciones, la mayoría de los controladores se valen para sus cálculos de valores de estado o valores de realimentación proveniente de sensores, que pueden requerir, en ciertas ocasiones, almacenarse para usos a posterior. En la Figura 2.15 se muestra el diagrama de flujo del bloque de control para la velocidad lineal y angular de la plataforma robótica.

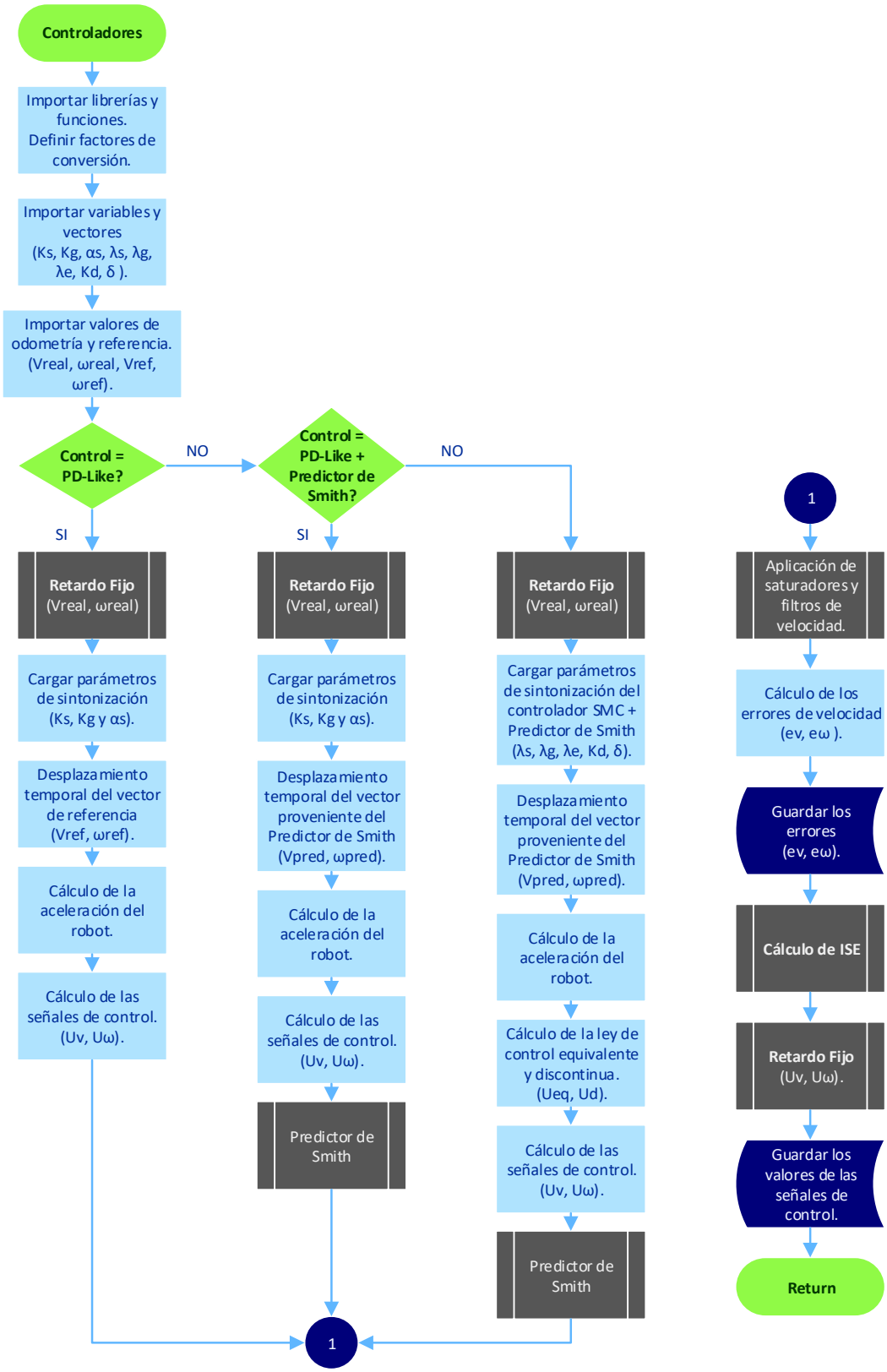


Figura 2.15. Diagrama de flujo del bloque de control del esquema de seguimiento de trayectorias para el robot Pioneer 3DX.

En la figura anterior básicamente se describe la operación de los controladores que inicia partir de la referencia de velocidad lineal y angular, y que a través de la obtención de los parámetros de sintonización previamente configurados se realizan los cálculos correspondientes de acuerdo con el controlador deseado. Uno de los procedimientos más relevantes es la implementación del Predictor de Smith, pues necesita un modelo del proceso real para su adecuado funcionamiento, en el siguiente apartado se ahondará en los detalles para implementar esta estructura.

Implementación del Predictor de Smith

Para implementar el Predictor de Smith, como se pudo analizar en el apartado 2.3, se requiere el uso de un modelo del proceso, en este caso un modelo del comportamiento de la velocidad lineal y angular en términos de la transformada de Laplace, a este modelo se lo llama 'modelo sin retardo' debido a que no presenta los retardos que se ven involucrados en el esquema debido al canal de comunicación simulado.

En el Capítulo 1, se obtuvo el modelo de primer orden con retardo (FOPDT) que cumple con las características descritas, pese a ello hay que considerar que se debe implementar en un procesador discreto, por lo que las Ecuaciones 1.9 y 1.10 deben discretizarse, las relaciones para la discretización fueron desarrolladas con anterioridad en las Ecuaciones 2.12, 2.13, 2.14 y 2.19. Los resultados de la discretización se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Resultados de la obtención de las constantes de la secuencia discreta para la velocidad lineal y angular.

Constantes de la Secuencia Discreta	Velocidad Lineal $[v]$	Velocidad Angular $[\omega]$
$\boldsymbol{B_1} = \frac{K_{apx}}{t_0 - \tau}\left(e^{-\frac{T}{t_0}} - e^{-\frac{T}{\tau}}\right)$	0.242816037959	0.797019606716
$\boldsymbol{B_2} = e^{-\frac{T}{t_0}} + e^{-\frac{T}{\tau}}$	1.65845242482	1.43242502628
$\boldsymbol{B_3} = e^{-T\left(\frac{T}{t_0} + \frac{T}{\tau}\right)}$	0.682793449589	0.512868889379

Reemplazando las constantes B_1, B_2 y B_3, en la Ecuación 2.19 se obtiene las siguientes ecuaciones en diferencias:

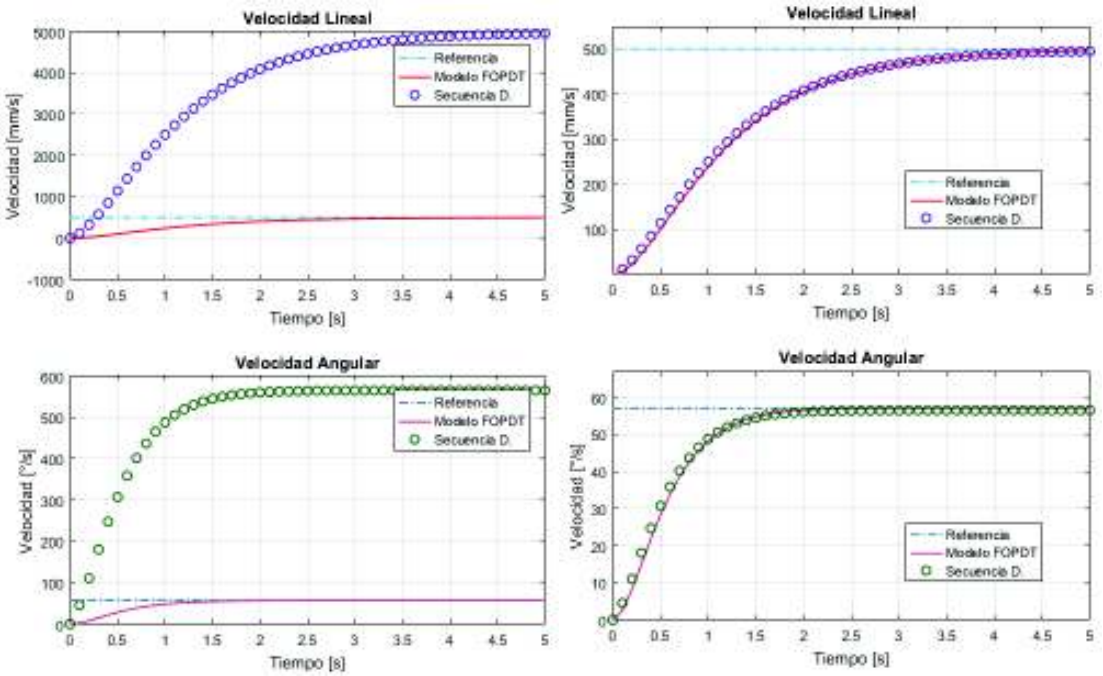
$$v_k = 0{,}242816037959U_{v_{k-1}} + 1{,}65845242482v_{k-1} - 0{,}682793449589v_{k-2}$$

Ecuación 2.45. Ecuación en diferencias de la velocidad lineal del robot Pioneer 3DX.

$$\omega_k = 0{,}797019606716\, U_{\omega_{k-1}} + 1{,}43242502628\omega_{k-1} - 0{,}512868889379\omega_{k-2}$$

Ecuación 2.46. Ecuación en diferencias de la velocidad angular del robot Pioneer 3DX.

Estas ecuaciones se usarán para implementar el 'modelo sin retardo' en la estructura compensadora Predictor de Smith. Para verificar estas ecuaciones se comparará su salida con la obtenida usando las funciones de transferencia de las Ecuaciones 1.9 y 1.10. A continuación, en la Figura 2.16 se puede observar la comparación entre la función de transferencia y su equivalente discreto:



(a) (b)

Figura 2.16. (a) Comparación entre la función de transferencia y la ecuación en diferencias del modelo del Robot Pioneer 3DX. (b) Re-escalamiento de la secuencia discreta y su comparación con la función de transferencia.

Como puede observar en la Figura 2.16 (a) las ecuaciones en diferencias no proporcionan los valores adecuados en comparación con el modelo de orden reducido. Sin embargo, hay que notar que los valores de estabilización son 10 veces mayores a los valores de estabilización de la función de transferencia. Por lo que se plantea un re-escalamiento de los valores de las ecuaciones en diferencias para que se reduzcan al 10% de su valor actual, obteniendo los resultados que se puede observar en la Figura 2.16 (b). Como se puede ver la función de transferencia que representa la respuesta de velocidad del robot y la ecuación en diferencias desarrollada tiene buenos resultados dando prácticamente la

misma curva, por lo que se confirma la validez de la ecuación y su implementación para la obtención del modelo de la plataforma robótica en el Predictor de Smith.

Implementación del Índice de Rendimiento ISE.

Para medir el rendimiento de los controladores, con fines de sintonización, se utilizan índices de rendimiento, que con frecuencia utilizan el error de la variable controlada respecto a una referencia. En el caso pertinente de este trabajo se utiliza el índice ISE (Integral del Error Cuadrático), por su característica de sensibilidad ante los errores.

La Figura 2.17. muestra el diagrama de flujo para la implementación del índice de desempeño.

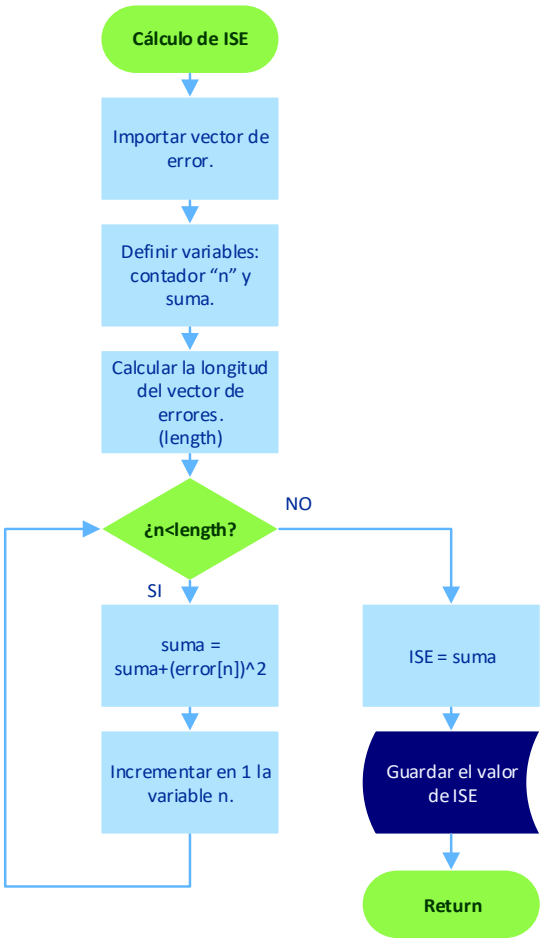


Figura 2.17. Diagrama de flujo del cálculo del índice de rendimiento ISE.

Rutina de Generación del Retardo Fijo

Tomando en consideración el tema central de este trabajo, que es el estudio de los efectos que tienen los retardos fijos en los sistemas de control, y de manera más específica en la

tarea de seguimiento de trayectorias para un robot móvil, se torna de interés la implementación de un algoritmo que genere o simule un retardo fijo. La característica de este tipo de retardo debe ser que, de acuerdo con la configuración que se realice en la interfaz gráfica, el retardo se pueda modificar en valores múltiplos del periodo de muestreo (T_{samp}=100 [ms]) con que trabaje el procesador del robot Pioneer 3DX, esto debido a que se desea verificar la robustez que pueden tener los controladores ante un aumento o reducción del tiempo de retardo. En la Figura 2.18 se puede observar el algoritmo para su implementación:

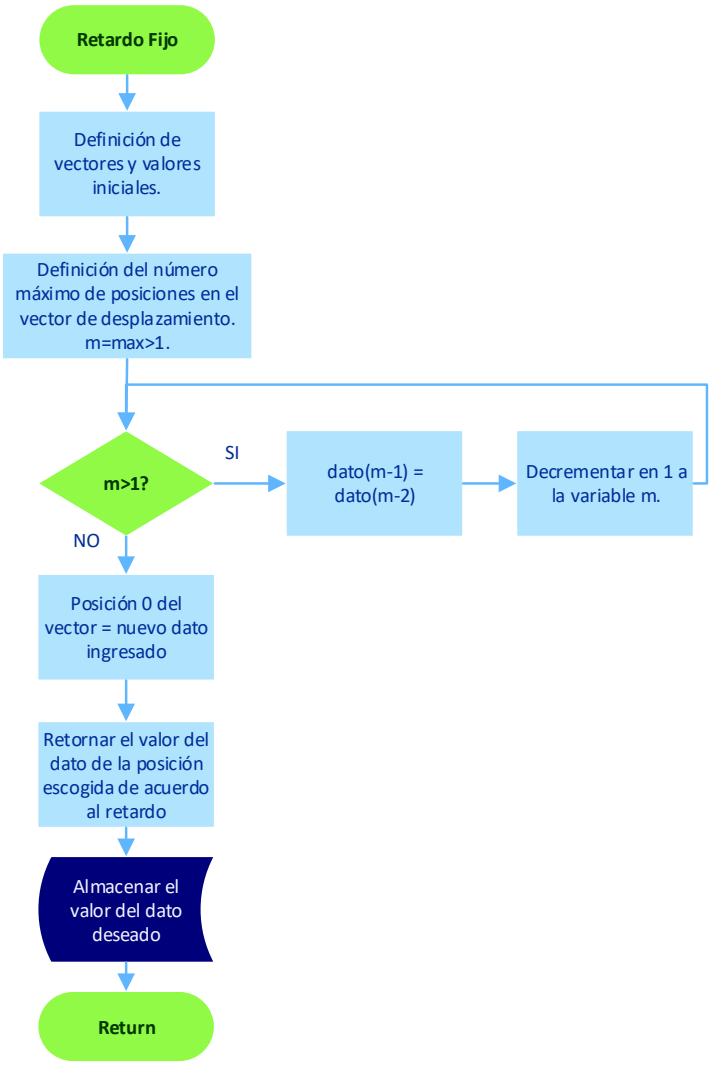


Figura 2.18. Diagrama de flujo para la implementación del retardo fijo.

Adicionalmente, este tipo de algoritmo también funciona para almacenar valores una serie de iteraciones determinadas por lo que es útil en la implementación de los controladores que requieren ciertos valores pasados de la entrada o salida del sistema.

Implementación de Filtros y Saturadores

En la Figura 2.19, se presenta el diagrama de flujo del algoritmo implementado para el proceso de saturación y filtrado de la señal proveniente del controlador.

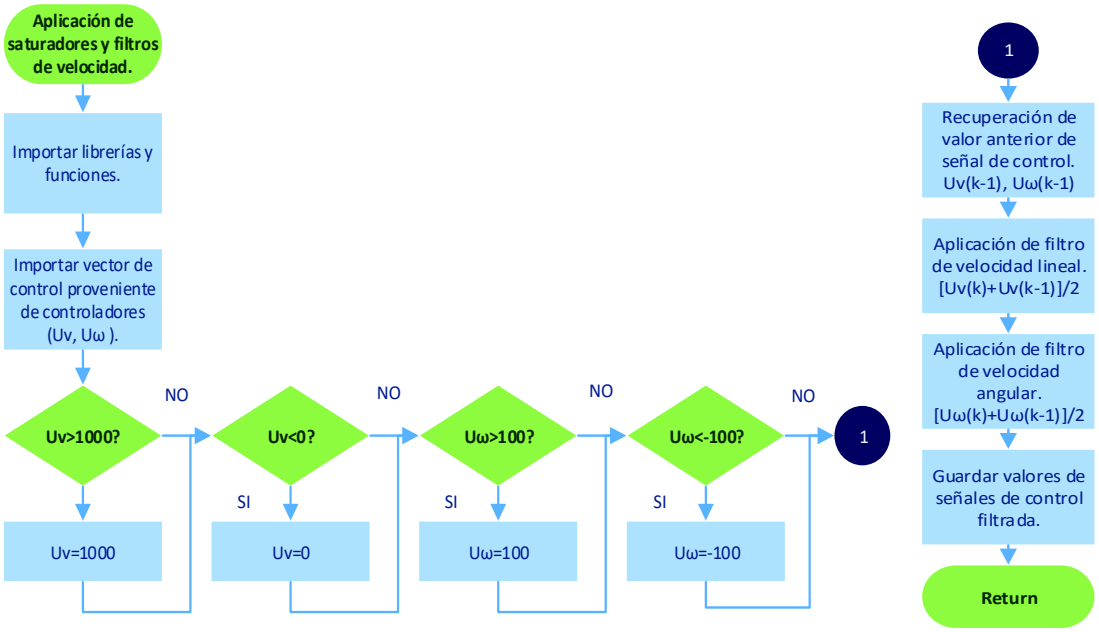


Figura 2.19. Diagrama de flujo para la implementación de saturadores y filtros.

A continuación, en la Figura 2.20 se presenta el esquema de control de las técnicas implementadas en este trabajo, con la adición de filtros y saturadores para las señales de control de la velocidad lineal y angular.

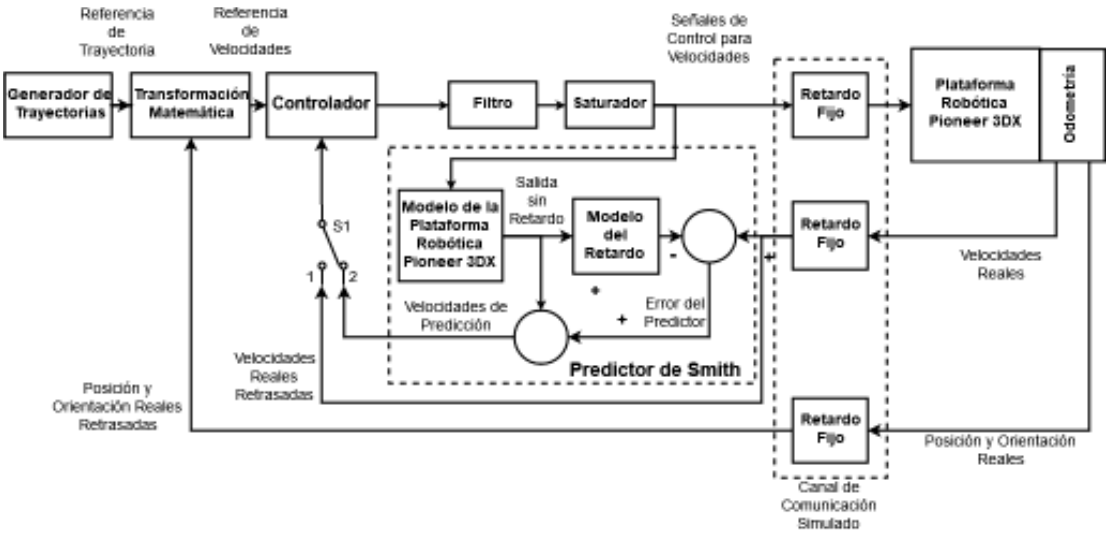


Figura 2.20. Esquema de control general con la inclusión de filtros y saturadores.

2.8. Desarrollo de la Interfaz Gráfica

La interfaz gráfica que se desarrolla tiene como propósito una fácil configuración de parámetros involucrados en la simulación tales como: tiempo de simulación, trayectoria, controladores y sus parámetros, perturbaciones, gráficas de resultados, etc. Además, se diseña una interfaz capaz de ser usada de manera intuitiva y con la posibilidad de desplegar información relacionada a los parámetros que se configuran. Todo lo anterior se debe acoplar al sistema desarrollado para el control del robot con el objetivo de implementar un sistema integrado de simulación que vincule al usuario, la interfaz gráfica y el sistema robótico.

Figura 2.21. Diagrama del sistema integrado de simulación.

En la Figura 2.21 se puede observar el diagrama que presenta en términos globales el sistema implementado, donde se nota que la interfaz gráfica es el vínculo entre el usuario y todo los algoritmos implementados y sistemas usados. A continuación, se describe la librería usada para la implementación de la interfaz gráfica:

Librería WxPython

Para el desarrollo de la interfaz gráfica se usa la librería WxPython, la cual es una adaptación de la librería WxWidgets (escrita en C++) orientada para el lenguaje Python [55]. Las características principales para el uso en la implementación de la interfaz son [56]:

- Completo conjunto de elementos gráficos (listados, árboles, grillas, etc.)
- Control flexible del comportamiento de la interface
- Rápido y de apariencia nativa (diseñado para utilizar funciones propias de cada plataforma)
- Soporta las características comunes de Windows, y las emula en Linux/Mac OS cuando no se pueden hacer de manera interna (y viceversa).

- Es fácil armar y usa componentes personalizados, tanto que incorpora widgets que no están en wxWidgets, ya que están escritos en Python.
- Documentación completa y ejemplos extensivos.

Implementación de la Interfaz Gráfica

La implementación de la interfaz gráfica se realiza mediante el siguiente algoritmo de generación, hay que especificar que visualmente la interfaz se conecta con el resto de los subprogramas del software desarrollado y es el único enlace entre el usuario y el código fuente y con el simulador. En el apartado de Anexos se presenta los pasos adecuados para tener una simulación correcta. En la Figura 2.22 se muestra el diagrama de flujo para la generación de la interfaz gráfica.

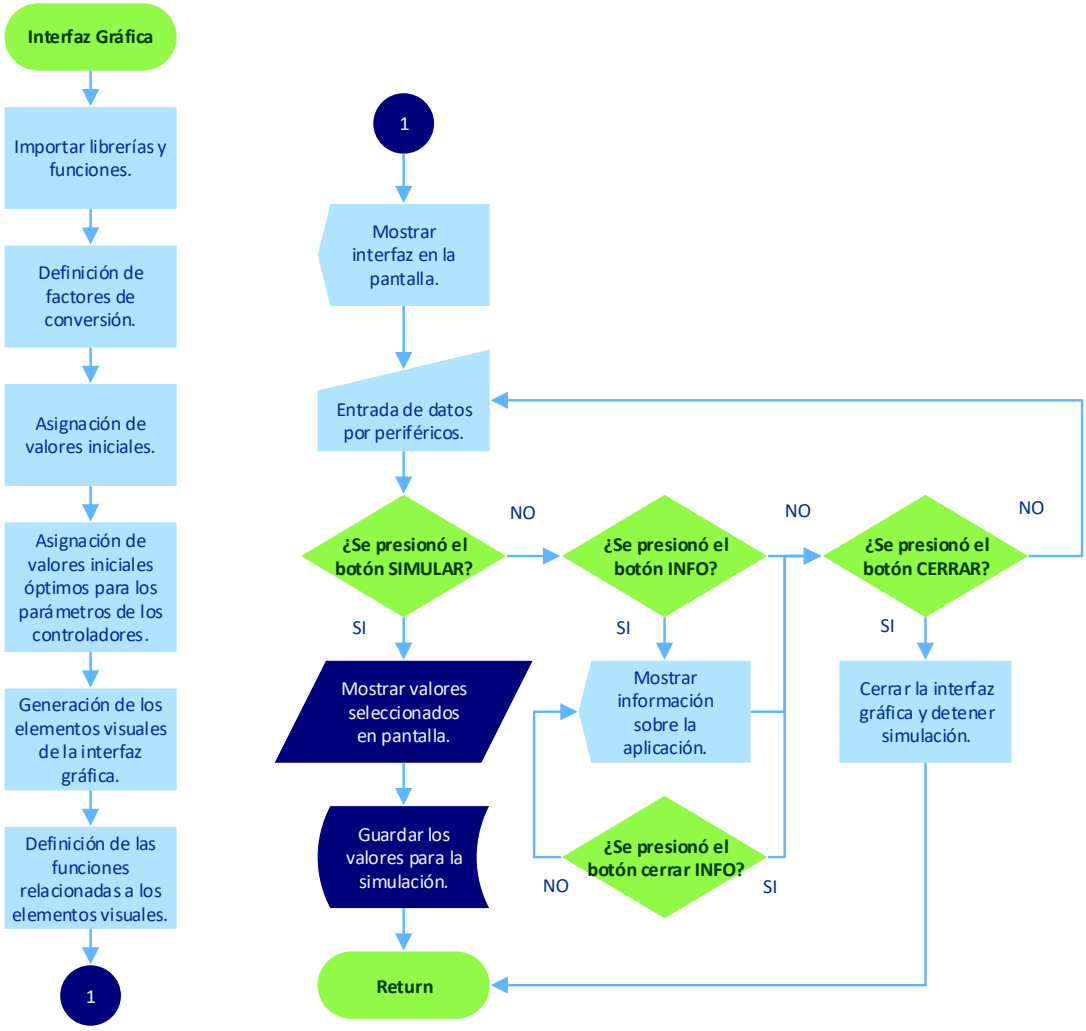


Figura 2.22. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica.

Resultados de la Implementación

En la Figura 2.23. se puede observar la interfaz gráfica desarrollada, donde se constata cada uno de los bloques que se utiliza para la configuración de diferentes aspectos de la simulación. Los bloques de configuración son:

- Trayectorias: Se puede configurar 3 trayectorias y aspectos tales como el radio o lado de la trayectoria y la velocidad lineal de referencia.
- Simulación: En este bloque se configura el tiempo de simulación, el retardo que llevará el sistema y el archivo de Excel en que se almacenarán los datos.
- Controladores: Se puede configurar el tipo de controlador y el valor de las constantes de sintonización.
- Perturbaciones de Velocidad: En este bloque se configuran los tipos de perturbación y su magnitud.
- Gráficas de Resultados: Se pueden elegir tres opciones de pantallas de resultados que se despliegan al terminar la simulación.

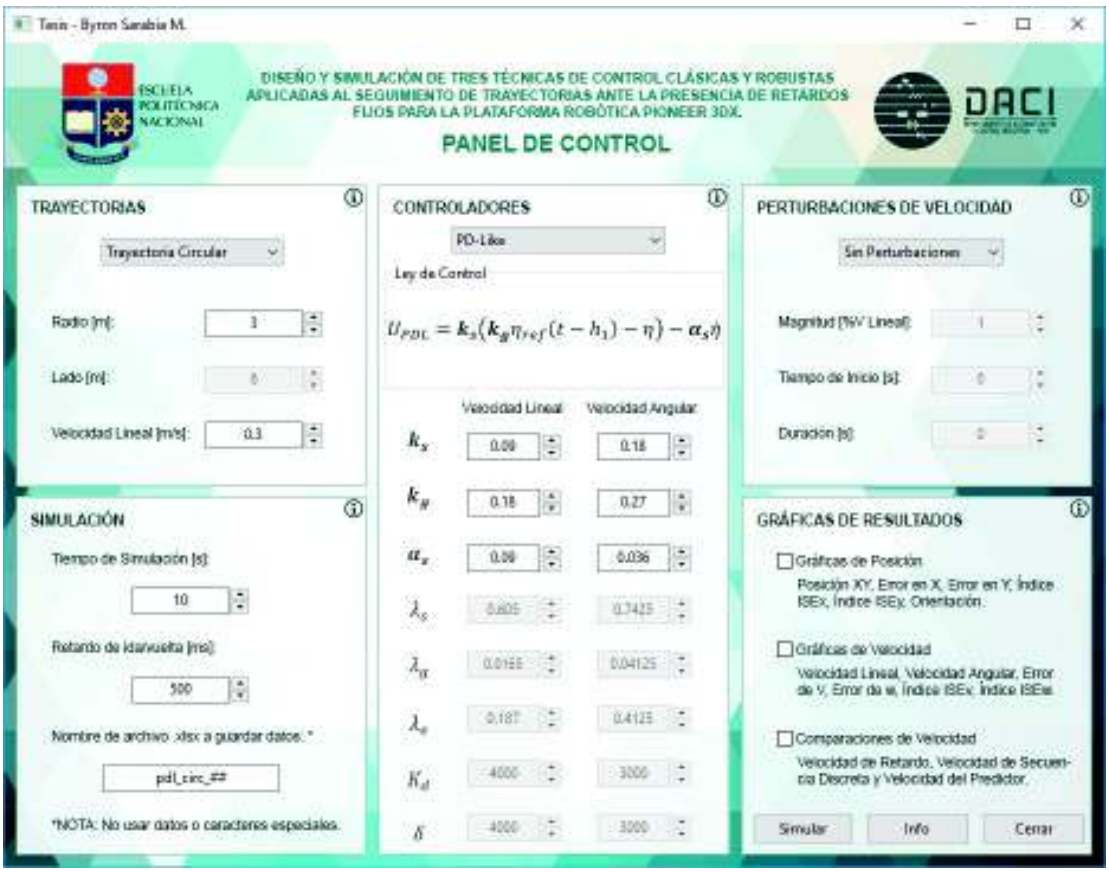


Figura 2.23. Panel de control para la configuración de la simulación.

En la Figura 2.24. se puede observar uno de los botones de información, que se hallan en cada uno de los bloques, que proveen más a detalle los rangos de variación de cada parámetro o datos relevantes sobre las opciones en la simulación.

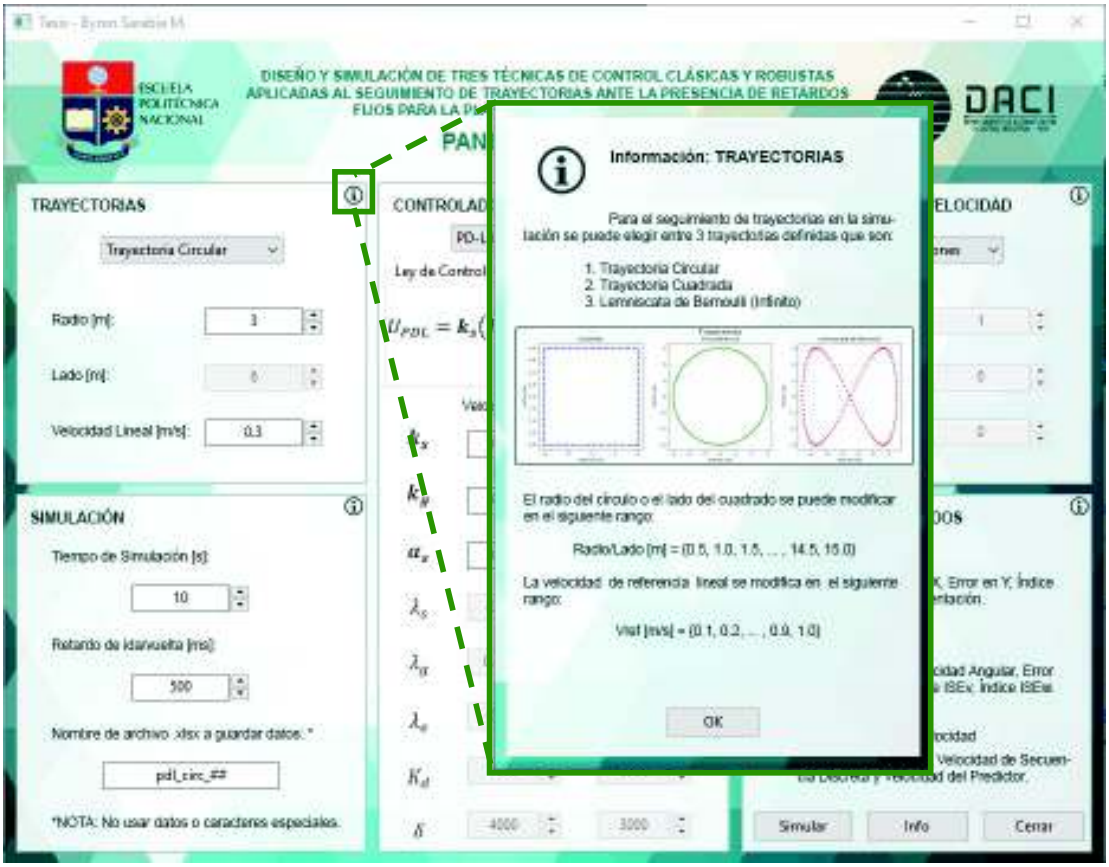


Figura 2.24. Pantalla de información desplegada del bloque “Trayectorias”.

Gráficas de Resultados

Una de las opciones más importantes, y que está vinculada directamente con el ámbito de la interfaz gráfica es la presentación de resultados. Los resultados se observan al finalizar la simulación y proveen de información sobre distintos aspectos ya sean estos de posición, velocidad, índices de desempeño, etc. A continuación, se describen las 3 gráficas que se pueden desplegar, y los parámetros y datos que engloban sus resultados ante la simulación de una trayectoria circular con el controlador PD-Like + PS, con las siguientes especificaciones: $v_{set} = 0.3\ [\frac{m}{s}]$, $R = 3[m]$, $T_{retardo} = 500[ms]$, $t_{sim} = 62.8[s]$.

Resultados de Posición

Presenta datos sobre la trayectoria recorrida en el plano XY, los errores de las coordenadas XY, el módulo del error que representa la distancia entre la posición actual del robot y la

referencia en ese instante, los índices ISE de la coordenada X e Y, y la orientación del robot. En la Figura 2.25 se observa las gráficas de resultados de posición.

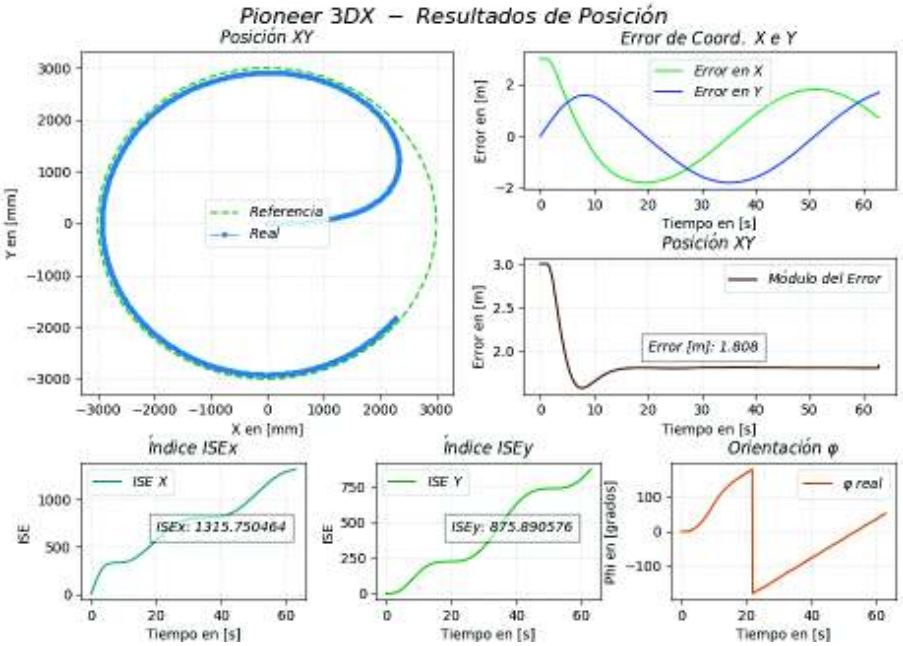


Figura 2.25. Gráfica de resultados de posición.

Resultados de Velocidad

Presenta datos sobre la velocidad lineal y angular desarrollada en la simulación, errores de velocidad lineal y angular, y los índices de rendimiento ISE de velocidad. En la Figura 2.26 se observa las gráficas de resultados de velocidad.

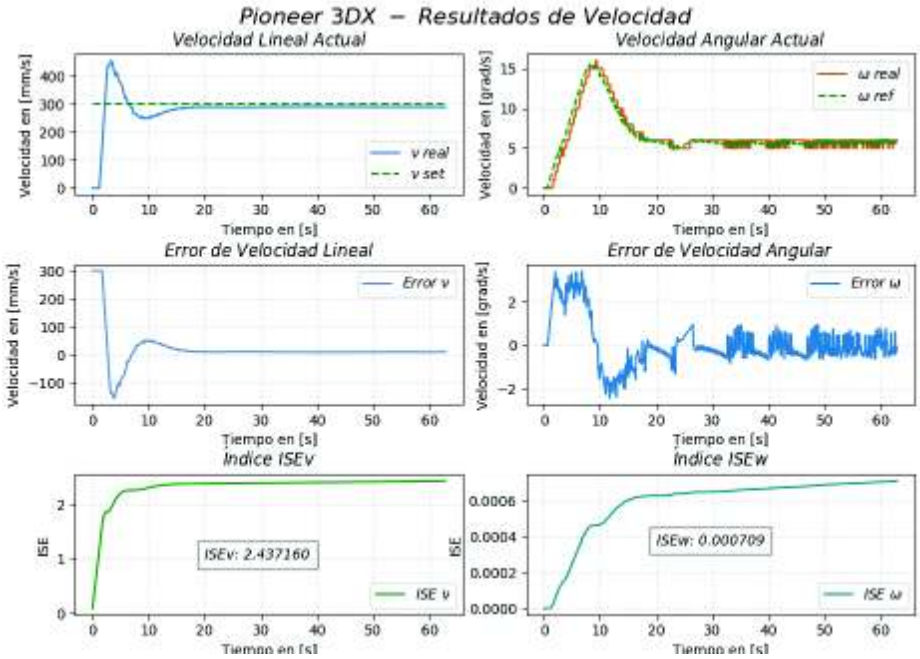


Figura 2.26. Gráfica de resultados de velocidad.

Comparación de Velocidades

Presenta una comparación entre las velocidades reales y las velocidades que se usan en la realimentación para observar el retardo, se presentan una comparación entre la velocidad real y la velocidad de salida del modelo sin retardo para verificar el correcto funcionamiento de las secuencias discretas y se presenta además una comparación entre las velocidades reales y la salida del Predictor de Smith que permite observar el funcionamiento de este compensador. En la Figura 2.27 se observa las gráficas de comparación de velocidades.

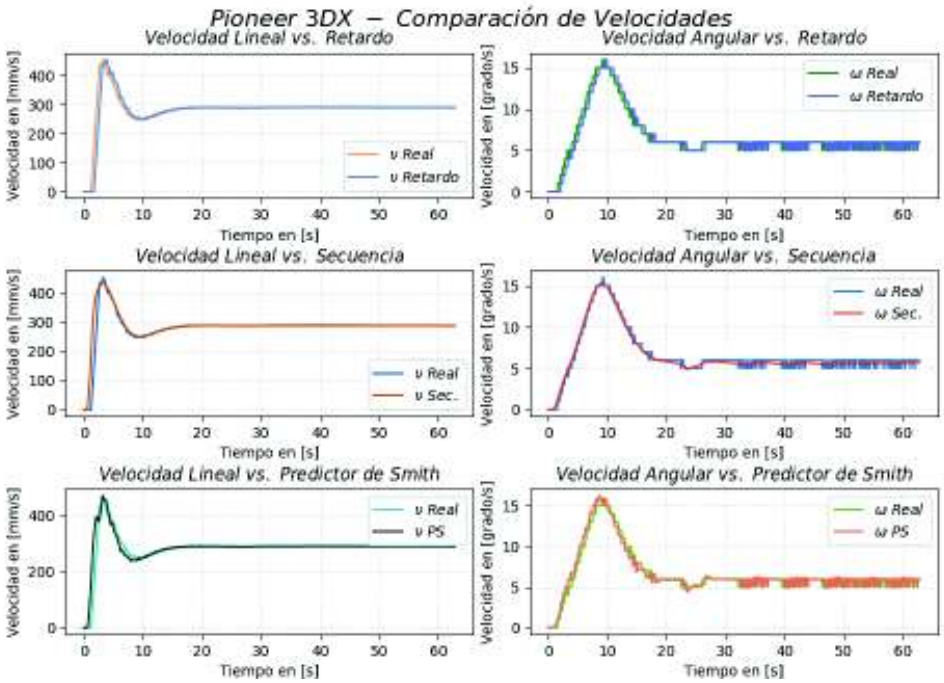


Figura 2.27. Gráfica de resultados de comparaciones de velocidad.

Como se puede observar en las gráficas anteriores, las opciones de resultados presentan un completo despliegue de información para discernir, comprobar y presentar un adecuado criterio sobre los efectos de la presencia de retardos y la efectividad de las soluciones planteadas. En la sección de Anexos, se puede encontrar más información acerca del uso de la interfaz y las posibilidades de configuración a detalle.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se describe el proceso de sintonización y calibración de los controladores, y las diferentes pruebas realizadas con los resultados obtenidos para verificar el funcionamiento de los controladores en base a parámetros de rendimiento. Entre las pruebas que se han aplicado están: comparación de los controladores calibrados, variación del retardo fijo en el esquema de control, ingreso de perturbaciones de velocidad, y análisis ante la presencia de errores en el modelado. Todas las pruebas descritas se realizan para las tres trayectorias definidas previamente, y se presentan resultados respecto a las tres combinaciones de técnicas de control que se implementan para la reducción de los efectos de la presencia de retardos en el esquema de control.

3.1. Sintonización de Controladores

El proceso de sintonización de un controlador no es más que encontrar los valores adecuados de las constantes de sintonización que nos provean la mejor respuesta posible del sistema. La respuesta se la cuantifica acorde a índices de desempeño, que usualmente se relacionan con el error respecto a la referencia que se desea. El índice seleccionado en este trabajo es la Integral del Error Cuadrático ISE, descrito en el Capítulo 1, en las Ecuaciones 1.23 y 1.24. El procedimiento de sintonización se desarrolla de la siguiente manera:

- Se inicia con la obtención de los valores de las constantes de cada controlador que brinde una respuesta estable y provea un seguimiento adecuado de las trayectorias. La obtención se realiza a través de un proceso de prueba y error, donde no se considera ningún índice de rendimiento.

- Una vez que se tiene un controlador estable inicial, se ingresa un factor modulante K en las constantes de sintonización de los controladores, para variar su valor en un rango determinado y obtener una respuesta que va a ser analizada mediante los índices ISE de velocidad lineal y angular para cada trayectoria.

- Finalmente, se realiza una gráfica comparativa entre el factor modulante K y el índice ISE obtenido, para verificar el valor del factor K que provee el índice ISE más bajo y por ende el más adecuado. El índice se obtiene en el instante de tiempo final de la simulación de cada trayectoria.

Las trayectorias que se utilizan para el proceso de sintonización tienen las especificaciones descritas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Especificaciones para la sintonización de cada trayectoria.

Trayectoria	Circular	Cuadrada	Lemniscata
Velocidad Lineal [m/s]	0.3	0.3	0.3
Tiempo de Simulación [s]	62.8	80	62.8
Radio/Lado [m]	3	6	3
Retardo de ida/vuelta [ms]	500	500	500

Sintonización del Controlador PD-Like

La sintonización del controlador PD-Like se realiza a través de la manipulación de los parámetros $k_{s_v}, k_{g_v}, k_{e_v}, k_\omega, k_{g_\omega}$ y k_{e_ω} de la Ecuación 1.17. La combinación inicial de los parámetros de sintonización obtenidos en un proceso de prueba y error con la inclusión del factor modulante K se puede observar en la Ecuación 3.1.

$$\begin{bmatrix} U_{PDL_v} \\ U_{PDL_\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{,}1K & 0 \\ 0 & 0{,}2K \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 0{,}2K & 0 \\ 0 & 0{,}3K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ref}(t-h_1) \\ \omega_{ref}(t-h_1) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{real} \\ \omega_{real} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} 0{,}1K & 0 \\ 0 & 0{,}04K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{real} \\ \dot{\omega}_{real} \end{bmatrix}$$

Ecuación 3.1. Ley de control de la técnica PD-Like con el factor modulante K.

Una vez obtenida la ley de control anterior, se varía el factor modulante K en un rango desde 0.5 hasta 1.4 en pasos de 0.1 y se obtiene la respuesta de los índices de desempeño ISE de velocidad lineal y angular para la trayectoria circular y Lemniscata de Bernoulli, con esta información se puede escoger la mejor combinación de los parámetros de sintonización.

Cabe recalcar que para la trayectoria cuadrada se tuvo que modificar ligeramente la relación o ley de control de la Ecuación 3.1 debido a que se requiere una mejor respuesta ante cambios bruscos de referencia producidos en las esquinas de la trayectoria, la ley de control modificada para el cuadrado es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} U_{PDL_v} \\ U_{PDL_\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{,}15K & 0 \\ 0 & 0{,}2K \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 0{,}2K & 0 \\ 0 & 0{,}3K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ref}(t-h_1) \\ \omega_{ref}(t-h_1) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{real} \\ \omega_{real} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} 0{,}1K & 0 \\ 0 & 0{,}04K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{real} \\ \dot{\omega}_{real} \end{bmatrix}$$

Ecuación 3.2. Modificación de la Ecuación 3.1 para la trayectoria cuadrada.

A continuación, se presentan los resultados para las trayectorias circular, cuadrada y Lemniscata de Bernoulli. En la Tabla 3.2 se puede observar los resultados obtenidos en la trayectoria circular a los 62.8 [s] que es el tiempo de simulación para esta trayectoria.

Además, se presentan los gráficos comparativos para una mejor visualización de los resultados. En la Tabla 3.2 se observa el resumen de resultados en la sintonización.

Tabla 3.2. Tabla de resultados para la trayectoria circular con el controlador PD-Like.

Trayectoria Circular										
Controlador: PD-Like										
K	**0.5**	**0.6**	**0.7**	**0.8**	**0.9**	**1.0**	**1.1**	**1.2**	**1.3**	**1.4**
ISE_v	12.03	6.611	3.750	2.570	**2.430**	3.009	4.201	5.735	7.501	9.490
ISE_ω $[\times 10^{-4}]$	**1.81**	2.3	3.33	4.73	7.23	12.44	24.85	64.74	200.7	715.4

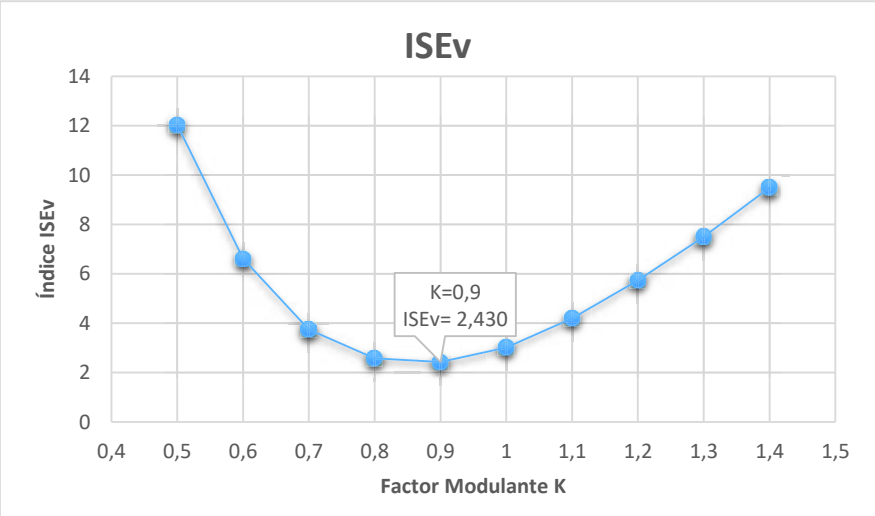


Figura 3.1. Índice ISE de velocidad lineal vs. Factor modulante K.

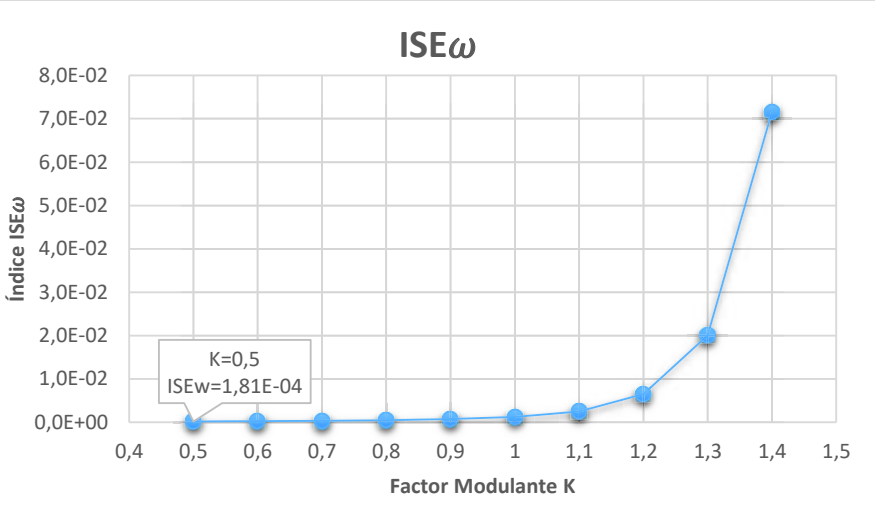


Figura 3.2. Índice ISE de velocidad angular vs. Factor modulante K.

Para la trayectoria circular, con el uso del controlador PD-Like, se puede observar en las Figuras 3.1 y 3.2 que el índice ISE_v adecuado es aquel que se obtiene con el uso del factor modulante $K = 0.9$, y el índice ISE_ω viene a través de un factor modulante $K = 0.5$.

Observando la Figura 3.1. se verifica que entre el rango $K = 0.5$ y $K = 1$ la variación en el índice de desempeño ISE_v no es muy pronunciado, por lo que para esta trayectoria se ha escogido el factor $K = 0.9$ como aquel que brinda la mejor respuesta, pese a que no necesariamente es el mejor índice que se obtiene con este factor modulante para la velocidad angular. En el proceso de sintonización solo se consideran los índices ISE_v e ISE_ω, en posteriores procesos se consideran otros índices y parámetros de calidad.

En pruebas realizadas con las trayectorias restantes se verifica que sucede algo similar, es decir que no se tiene un mismo factor modulante K para ambas variables que nos provean del valor de índice ISE más adecuado. Sin embargo, de acuerdo con las características del índice ISE_ω, que es en el orden de 10^{-4}, la respuesta sigue siendo aceptable a pesar de las variaciones, que son despreciables. En la Tabla 3.3 se muestra los resultados en el seguimiento de la trayectoria cuadrada.

Tabla 3.3. Tabla de resultados para la trayectoria cuadrada con el controlador PD-Like.

Trayectoria Cuadrada										
Controlador: PD-Like										
K	**0.5**	**0.6**	**0.7**	**0.8**	**0.9**	**1.0**	**1.1**	**1.2**	**1.3**	**1.4**
ISE_v	9.014	6.524	5.229	4.403	3.808	**3.457**	3.482	3.707	4.549	12.58
ISE_ω $[\times 10^{-4}]$	**1.49**	4.36	14.17	38.34	90.23	215.4	512.5	1155	2892	12048

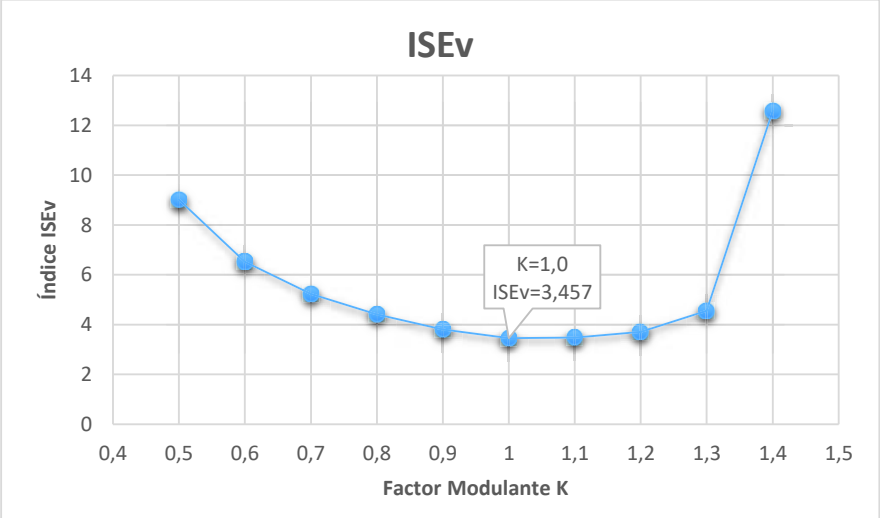


Figura 3.3. Índice ISE de velocidad lineal vs. Factor modulante K.

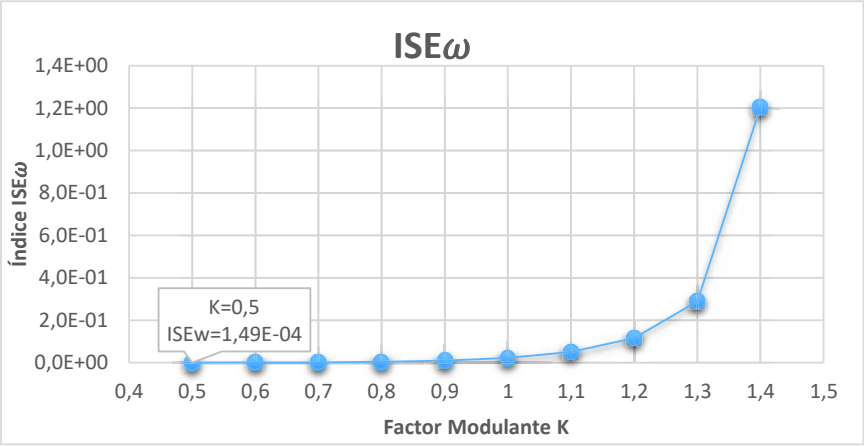


Figura 3.4. Índice ISE de velocidad angular vs. Factor modulante K.

Como se observa en la Figura 3.3 y 3.4, para la trayectoria cuadrada usando el controlador PD-Like, los factores modulantes para el índice de desempeño adecuado para la velocidad lineal y angular respectivamente son: $K = 1{,}0$ y $K = 0{,}5$. Al observar la Figura 3.4 se verifica que en el rango de variación de K, el índice ISE_ω no presenta variaciones bruscas, por lo que el factor modulante que provee la mejor respuesta de velocidad lineal y angular simultáneamente es $K = 1{,}0$. En la Tabla 3.4 se muestra los resultados en el seguimiento de la trayectoria cuadrada.

Tabla 3.4. Tabla de resultados para la Lemniscata de B. con el controlador PD-Like.

Trayectoria Lemniscata de Bernoulli										
Controlador: PD-Like										
$\boldsymbol{K}$	**0.5**	**0.6**	**0.7**	**0.8**	**0.9**	**1.0**	**1.1**	**1.2**	**1.3**	**1.4**
$\boldsymbol{ISE_v}$	27.69	19.75	13.23	9.142	6.675	5.313	4.581	**4.398**	4.534	4.774
$\boldsymbol{ISE_\omega}$ $\boldsymbol{[\times 10^{-4}]}$	396.8	**10.63**	15.26	21.01	30.74	43.44	67.61	118.4	264.6	714.4

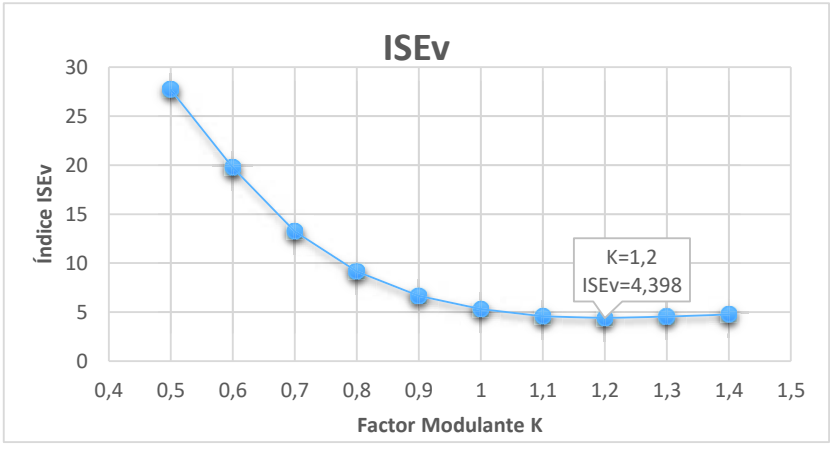


Figura 3.5. Índice ISE de velocidad lineal vs. Factor modulante K.

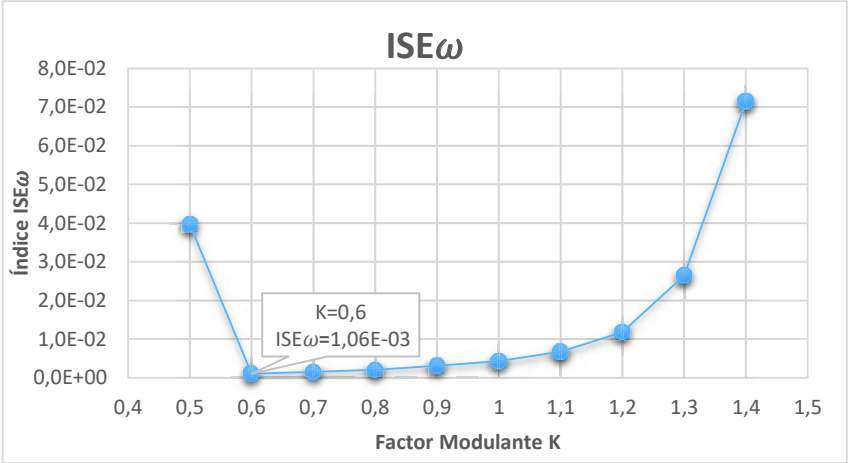


Figura 3.6. Índice ISE de velocidad angular vs. Factor modulante K.

En la Figura 3.5 y 3.6 se observa que en la trayectoria denominada Lemniscata de Bernoulli el mejor índice de desempeño en la velocidad lineal y angular proviene de los factores modulantes $K = 1{,}2$ y $K = 0{,}6$ respectivamente, por lo que para esta trayectoria se ha escogido como la mejor respuesta a la que se obtiene con un factor modulante de magnitud $K = 1{,}2$.

Considerando los resultados obtenidos con estas tres trayectorias y el controlador PD-Like, se puede observar que el factor modulante K más adecuado que proporciona el mejor índice de desempeño ISE no coincide en la velocidad lineal y angular, para escoger el factor K adecuado en cada una de las trayectorias se toma en cuenta el mejor índice de velocidad lineal puesto que las magnitudes del índice en la velocidad angular son al menos 1000 veces más pequeñas. Por lo que, para la sintonización del controlador PD-Like para cada trayectoria va a depender del mejor índice ISE_v, a pesar de que el índice ISE_w no sea el adecuado.

Sintonización del Controlador PD-Like + Predictor de Smith

El predictor de Smith como tal no posee parámetros de sintonización, por lo que se consideran las Ecuaciones 3.1 y 3.2 para hallar el factor modulante adecuado, usando los mismos valores de sintonización que con el controlador PD-Like. En esta prueba se puede verificar los efectos que tiene la estructura Predictor de Smith en el rendimiento de la velocidad lineal y angular. Los resultados para el seguimiento de la trayectoria circular se resumen en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Resultados del índice ISE con el controlador PD-Like + Predictor de Smith.

Trayectoria Circular										
Controlador: PD-Like + Predictor de Smith										
K	**0.5**	**0.6**	**0.7**	**0.8**	**0.9**	**1.0**	**1.1**	**1.2**	**1.3**	**1.4**
ISE_v	12.05	6.597	3.735	2.550	**2.438**	3.101	4.331	5.968	7.906	10.28
ISE_ω $[\times 10^{-4}]$	**1.80**	2.27	3.11	4.40	7.10	13.00	26.00	66.67	202.9	693.0

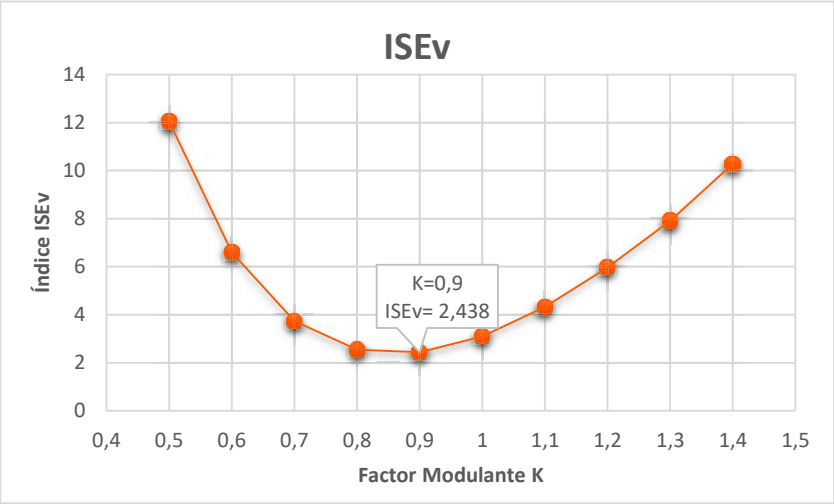


Figura 3.7. Índice ISE de velocidad lineal vs. Factor modulante K.

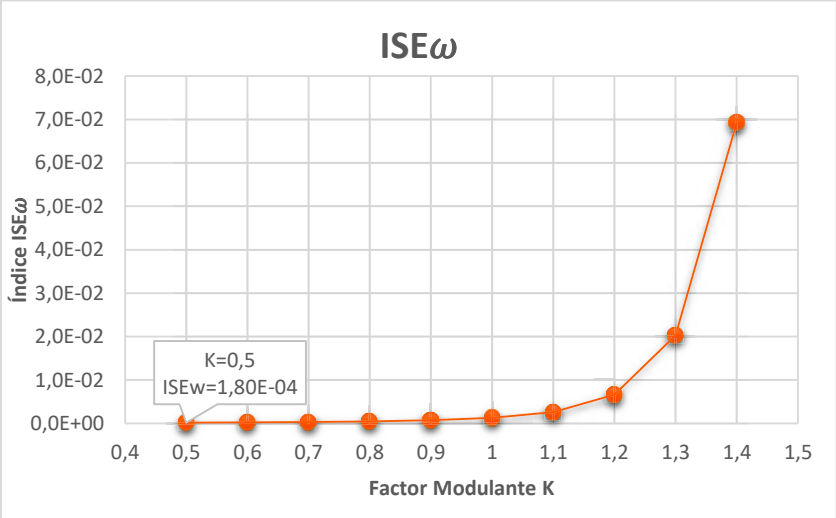


Figura 3.8. Índice ISE de velocidad angular vs. Factor modulante K.

Como se observa en la Figura 3.7 y 3.8, para la trayectoria circular usando el controlador PD-Like en combinación con el Predictor de Smith se obtiene que el mejor índice ISE_v e ISE_ω vienen con el uso del factor modulante $K = 0.9$ y $K = 0.5$ respectivamente. Nuevamente la Figura 3.8 muestra una mínima variación en el índice ISE_ω en el rango de

$K = 0.5$ hasta $K = 1.0$, por lo que el factor modulante más adecuado para esta trayectoria es $K = 0.9$. Cabe recalcar que con el uso del predictor se mejoró el índice ISE_v de 2.427 a 2.438. En general, se observa un comportamiento parecido con el resto de los factores de modulación K. En la Tabla 3.6 se tiene los resultados del seguimiento de la trayectoria cuadrada.

Tabla 3.6. Resultados del índice ISE con el controlador PD-Like + Predictor de Smith.

Trayectoria Cuadrada										
Controlador: PD-Like + Predictor de Smith										
$\boldsymbol{K}$	**0.5**	**0.6**	**0.7**	**0.8**	**0.9**	**1.0**	**1.1**	**1.2**	**1.3**	**1.4**
$\boldsymbol{ISE_v}$	9.026	6.552	5.271	4.467	3.852	**3.519**	3.540	4.101	4.245	7.800
$\boldsymbol{ISE_\omega}$ $\boldsymbol{[\times 10^{-4}]}$	**1.51**	4.45	14.27	39.58	90.21	200.7	470.8	1002	1692	5891

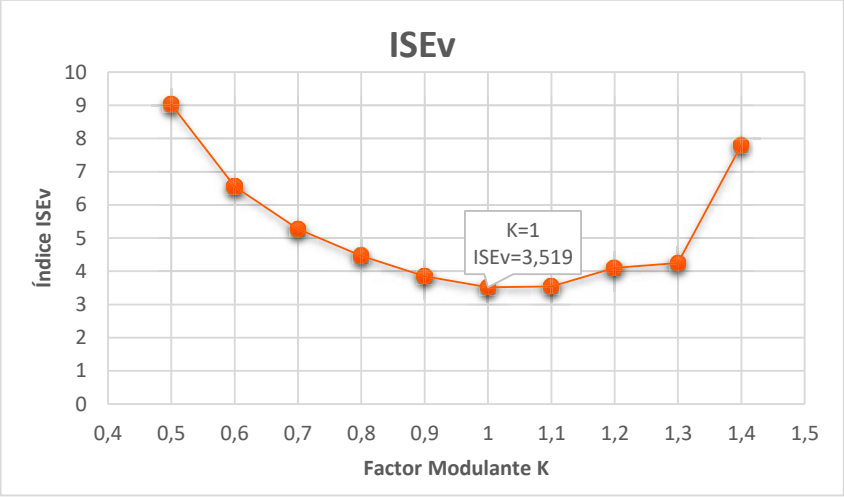


Figura 3.9. Índice ISE de velocidad lineal vs. Factor modulante K.

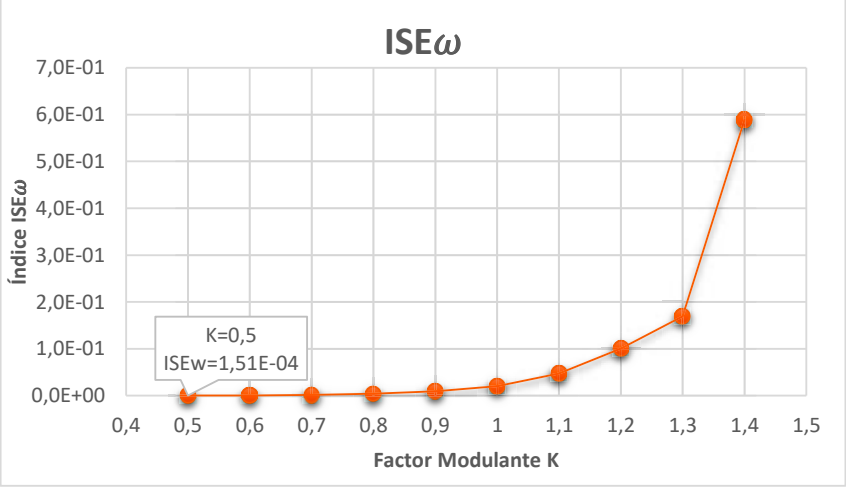


Figura 3.10. Índice ISE de velocidad angular vs. Factor modulante K.

En las Figuras 3.9 y 3.10 se puede ver que los factores modulantes que mejor respuesta obtuvieron son $K = 1.0$ y $K = 0.5$ para los índices ISE_v e ISE_ω respectivamente. Hubo un decaimiento de 3.457 a 3.519 en el índice de rendimiento de la velocidad lineal. Tomando en cuenta los resultados, el factor modulante para esta trayectoria será $K = 1.0$. En la Tabla 3.7 se tiene los resultados del seguimiento de la trayectoria Lemniscata de B.

Tabla 3.7. Resultados del índice ISE con el controlador PD-Like + Predictor de Smith.

Trayectoria Lemniscata de Bernoulli										
Controlador: PD-Like + Predictor de Smith										
K	**0.5**	**0.6**	**0.7**	**0.8**	**0.9**	**1.0**	**1.1**	**1.2**	**1.3**	**1.4**
ISE_v	27.66	19.71	13.22	9.102	6.647	5.230	4.578	**4.330**	4.503	4.805
ISE_ω $[\times 10^{-4}]$	353.2	**10.54**	15.30	21.34	31.31	43.95	68.73	118.8	247.1	655.6

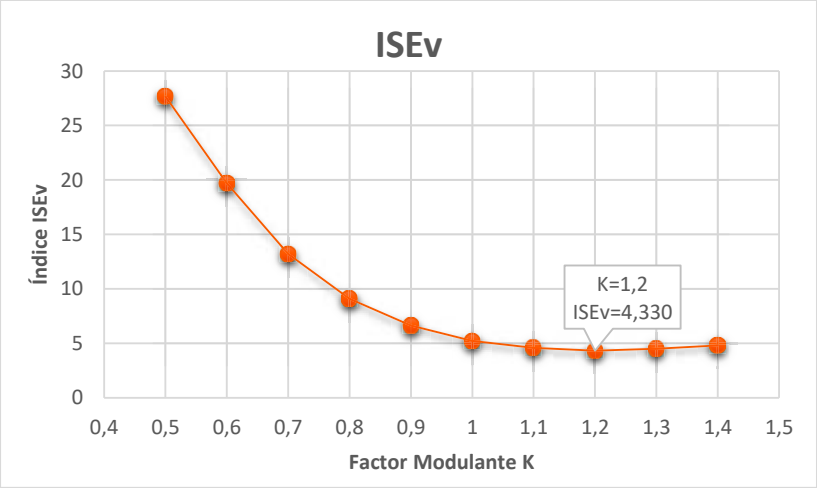


Figura 3.11. Índice ISE de velocidad lineal vs. Factor modulante K.

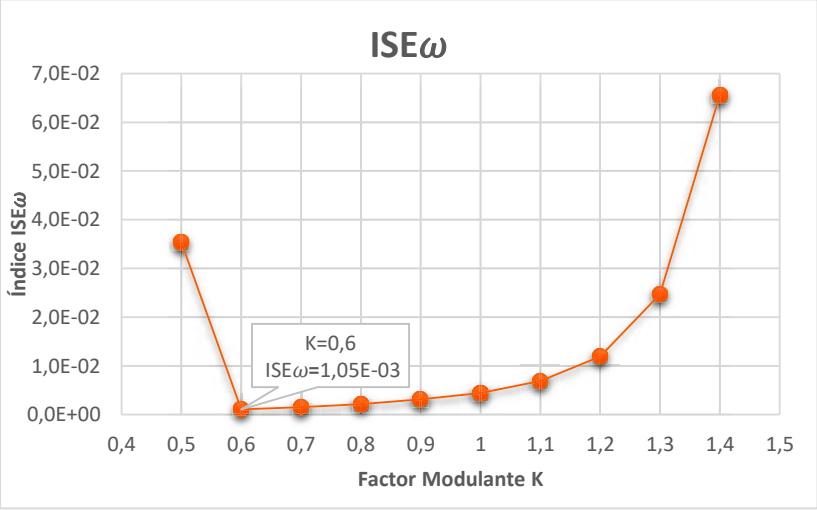


Figura 3.12. Índice ISE de velocidad angular vs. Factor modulante K.

Considerando las Figuras 3.11 y 3.12 se puede observar que para obtener los mejores índices de rendimiento ISE_v e ISE_ω se usaron respectivamente las constantes $K = 1.2$ y $K = 0.6$, estos resultados son similares a los obtenidos al usar solo el controlador PD-Like. En este caso cabe recalcar que, a diferencia de las anteriores trayectorias, hubo una mejora en la velocidad lineal y angular con el uso del predictor. El índice ISE_v pasa de 4.398 a 4.330 en el caso de la velocidad lineal. Finalmente tomando en cuenta los resultados para esta trayectoria y controlador, el factor modulante más adecuado que nos provee una mejor respuesta en la velocidad lineal y angular es $K = 1.2$.

Al analizar los datos obtenidos en la sintonización de todas las trayectorias, se observa que en ciertos casos el resultado obtenido con el uso del predictor de Smith es mejor respecto al desempeño que tuvo el controlador PD-Like. Sin embargo, esto no es una constante existiendo en algunas ocasiones un mejor desempeño del controlador sin el predictor. La mejora en los índices de desempeño es del orden de las centésimas por lo que los resultados en cuanto al factor modulante K adecuado para una respuesta adecuada son parecidos a los obtenidos con el controlador PD-Like.

Sintonización del Controlador SMC + Predictor de Smith

Los parámetros de sintonización del controlador SMC, como se puede observar en la sección 2.4, son:

- K_{d_v}, δ_v, K_{d_ω}, δ_ω que sirven para sintonizar la parte de alcanzabilidad de la ley de control.
- λ_{s_v}, λ_{g_v}, λ_{e_v}, λ_{s_ω}, λ_{g_ω}, λ_{e_ω} que sirven para sintonizar la superficie deslizante tipo PD-Like.

Inicialmente se busca una respuesta estable inicial en el seguimiento de cada trayectoria, modificando los parámetros de sintonización, sobre la cual se agrega los factores modulantes k_1 y k_2 para variar su magnitud y así obtener una mejor respuesta. La combinación inicial para la ley de control se observa en la Ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5, y se obtienen a partir de la Ecuación 2.25.

$$S_v(t) = 1.1k_1\big(0.03k_1 v_{ref}(t - h_1) - v_{real}\big) - 0.34k_1\dot{v}_{real}$$

Ecuación 3.3. Superficie deslizante para la velocidad lineal con el factor modulante k_1.

$$S_\omega(t) = 0.9k_2\big(0.05k_2\omega_{ref}(t - h_1) - \omega_{real}\big) - 0.5k_2\dot{\omega}_{real}$$

Ecuación 3.4. Superficie deslizante para la velocidad angular con el factor modulante k_2.

$$\begin{bmatrix} U_{SMC_v} \\ U_{SMC_\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_v & 0 \\ 0 & A_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{real} \\ \dot{\omega}_{real} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{real} \\ \omega_{real} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_v & 0 \\ 0 & B_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{ref}(t-h_1) \\ \dot{\omega}_{ref}(t-h_1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 4000 \dfrac{S_v(t)}{|S_v(t)|+3000} \\ 3000 \dfrac{S_\omega(t)}{|S_\omega(t)|+3000} \end{bmatrix}$$

Ecuación 3.5. Ley de control final de la técnica SMC.

Donde los valores de las siguientes constantes A_v, A_ω, B_v y B_ω se obtienen al reemplazar los valores de la Tabla 1.2 y los parámetros de sintonización de las Ecuaciones 3.3 y 3.4:

$$A_v = \tau_v + t_{0_v} - \frac{\tau_v t_{0_v} \lambda_{s_v}}{\lambda_{e_v}} = \tau_v + t_{0_v} - \frac{\tau_v t_{0_v} 1.1 k_1}{0.34 k_1} = 0.197722$$

Ecuación 3.6. Valor de la constante A_v.

$$B_v = \frac{\tau_v t_{0_v} \lambda_{s_v} \lambda_{g_v}}{\lambda_{e_v}} = \frac{\tau_v t_{0_v} 1.1 k_1 0.03 k_1}{0.34 k_1} = 0.033068 k_1$$

Ecuación 3.7. Valor de la constante B_v.

$$A_\omega = \tau_\omega + t_{0_\omega} - \frac{\tau_\omega t_{0_\omega} \lambda_{s_\omega}}{\lambda_{e_\omega}} = \tau_\omega + t_{0_\omega} - \frac{\tau_\omega t_{0_\omega} 0.9 k_2}{0.5 k_2} = 0.438259$$

Ecuación 3.8. Valor de la constante A_ω.

$$B_\omega = \frac{\tau_\omega t_{0_\omega} \lambda_{s_\omega} \lambda_{g_\omega}}{\lambda_{e_\omega}} = \frac{\tau_\omega t_{0_\omega} 0.9 k_2 0.05 k_2}{0.5 k_2} = 0.008087 k_2$$

Ecuación 3.9. Valor de la constante B_ω.

Se puede observar en las relaciones anteriores que se utiliza dos términos modulantes k_1 y k_2, a través de una modulación experimental se obtiene que estas dos constantes se relacionan a través de la siguiente ecuación:

$$k_2 = 1{,}5 k_1$$

Ecuación 3.10. Relación entre las constantes k_1 y k_2.

Los resultados en el seguimiento de cada una de las trayectorias para la sintonización del controlador SMC en combinación con la estructura Predictor de Smith, considerando que $K = k_1$, se presentan a continuación. En la Tabla 3.8 se observa los resultados en el seguimiento de la trayectoria circular.

Tabla 3.8. Resultados del índice ISE con el controlador SMC + Predictor de Smith.

Trayectoria Circular										
Controlador: SMC + Predictor de Smith										
K	**0.40**	**0.50**	**0.55**	**0.58**	**0.60**	**0.62**	**0.65**	**0.70**	**0.80**	**0.90**
ISE_v	68.68	**2.172**	2.253	2.347	2.424	2.524	2.677	3.073	3.992	11.41
ISE_ω $[\times 10^{-4}]$	3580	**5.99**	6.37	6.79	7.49	8.28	9.05	12.94	1792	9759

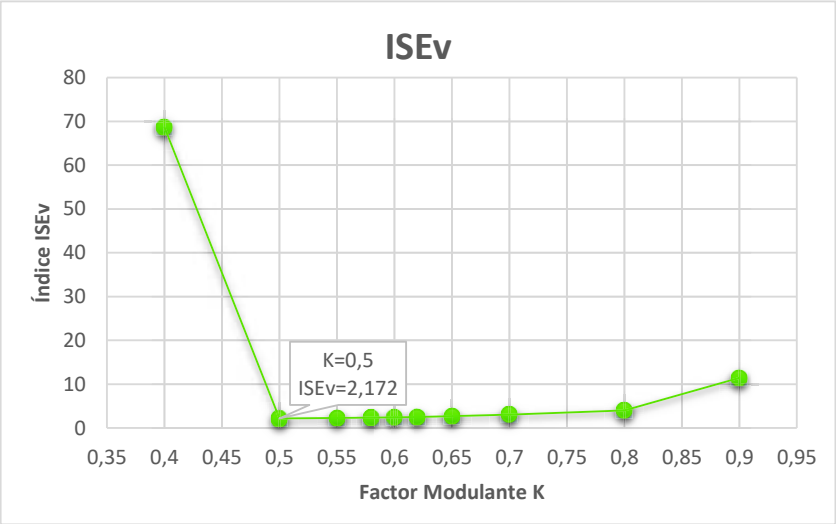


Figura 3.13. Índice ISE de velocidad lineal vs. Factor modulante K.

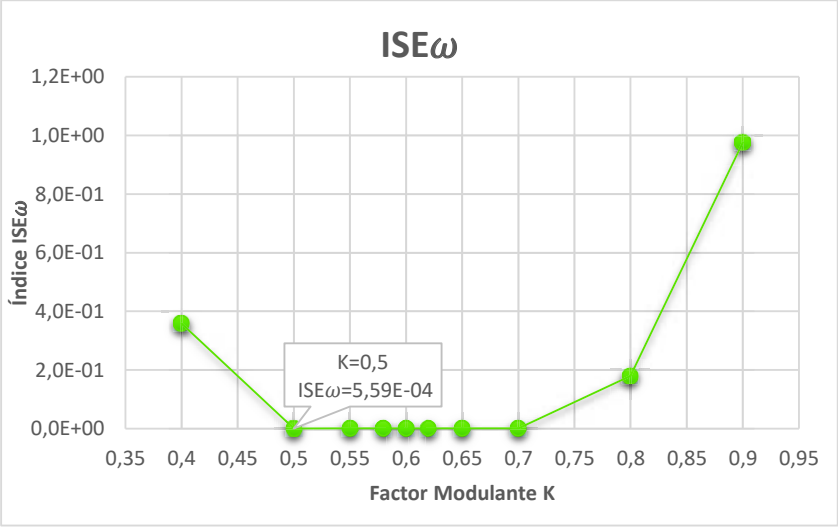


Figura 3.14. Índice ISE de velocidad angular vs. Factor modulante K.

En las Figuras 3.13 y 3.14 se observa que los factores modulantes más adecuados para la velocidad lineal y angular en conjunto son $K = 0.5$. En comparación con los anteriores

controladores, la combinación SMC y Predictor de Smith posee la mejor respuesta en velocidad lineal. En la Tabla 3.9 se observa los resultados en el seguimiento de la trayectoria cuadrada

Tabla 3.9. Resultados del índice ISE con el controlador SMC + Predictor de Smith.

Trayectoria Cuadrada										
Controlador: SMC + Predictor de Smith										
K	**0.40**	**0.50**	**0.55**	**0.58**	**0.60**	**0.62**	**0.65**	**0.70**	**0.80**	**0.90**
ISE_v	15.22	4.606	4.260	4.074	3.964	3.881	3.706	**3.519**	3.181	7.176
ISE_ω $[\times 10^{-4}]$	2966	**33.18**	45.42	55.13	63.06	72.46	83.23	113.8	1827	9358

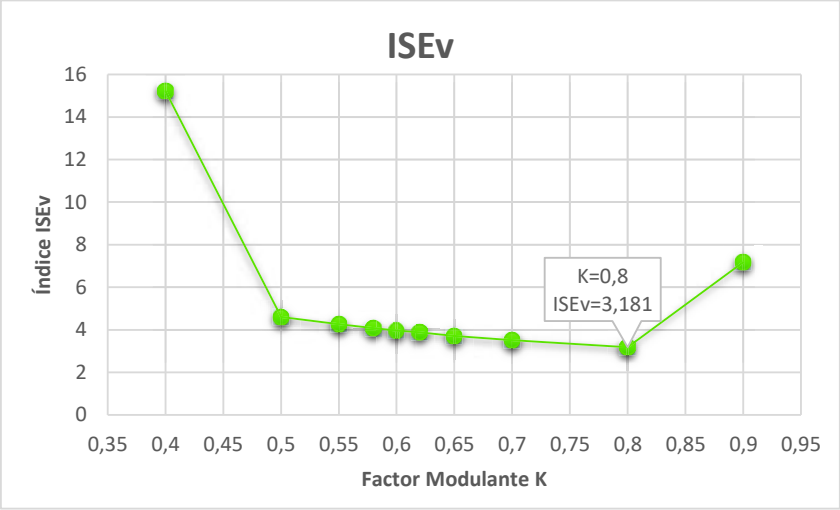


Figura 3.15. Índice ISE de velocidad lineal vs. Factor modulante K.

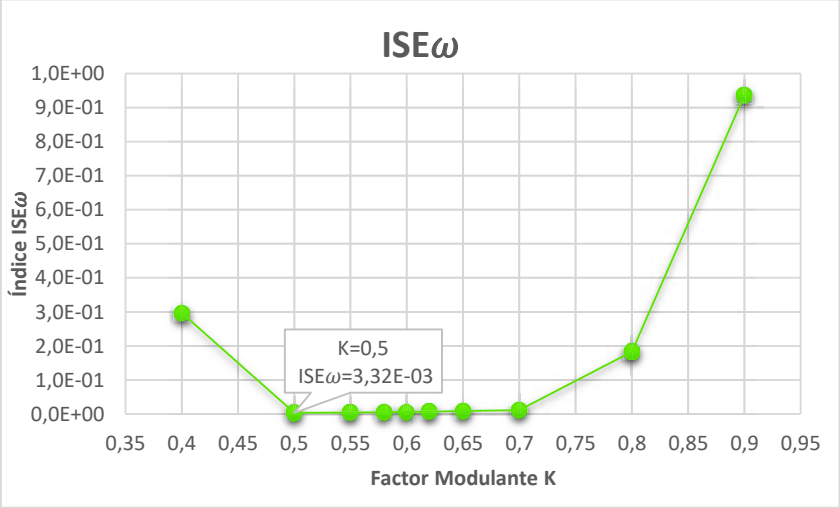


Figura 3.16. Índice ISE de velocidad angular vs. Factor modulante K.

Al analizar las Figuras 3.15 y 3.16 se verifica que los factores modulantes que dan los resultados más bajos en los índices ISE_v e ISE_ω son $K = 0.8$ y $K = 0.5$ respectivamente. Sin embargo, el factor modulante que se escogerá para una respuesta adecuada en conjunto de la velocidad lineal y angular será $K = 0.7$, a diferencia de las trayectorias y controladores anteriores donde prevalece el factor K que provee la mejor respuesta de velocidad lineal. En este caso se lo realiza de esta manera debido a que con el factor $K = 0.8$ la respuesta de velocidad angular presenta una respuesta 10 veces más grande que el valor obtenido con el factor inmediato inferior. Mientras que la respuesta con el factor $K = 0.7$ presenta una adecuada respuesta en velocidad lineal y angular simultáneamente. Considerando la trayectoria cuadrada, el controlador SMC posee una respuesta similar de velocidad lineal al controlador PD-Like + PS.

A continuación, en la Tabla 3.10 se presentan los resultados de la sintonización para el seguimiento de la trayectoria Lemniscata de Bernoulli con el uso de la combinación entre el controlador SMC y el Predictor de Smith.

Tabla 3.10. Resultados del índice ISE con el controlador SMC + Predictor de Smith.

Trayectoria Lemniscata de Bernoulli										
Controlador: SMC + Predictor de Smith										
K	**0.40**	**0.50**	**0.55**	**0.58**	**0.60**	**0.62**	**0.65**	**0.70**	**0.80**	**0.90**
ISE_v	11.18	6.464	5.711	5.382	5.202	5.013	4.809	**4.519**	4.144	4.923
ISE_ω $[\times 10^{-4}]$	1533	**26.55**	29.35	31.69	32.57	35.69	37.62	43.99	1812	9635

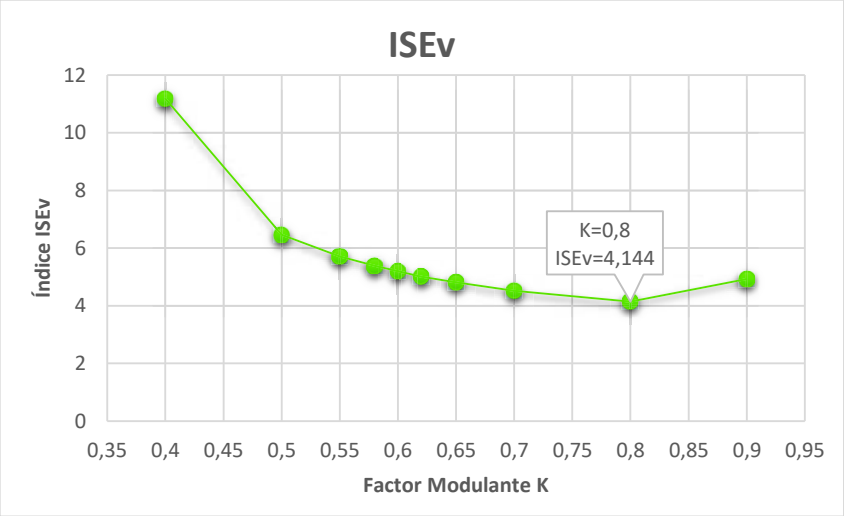


Figura 3.17. Índice ISE de velocidad lineal vs. Factor modulante K.

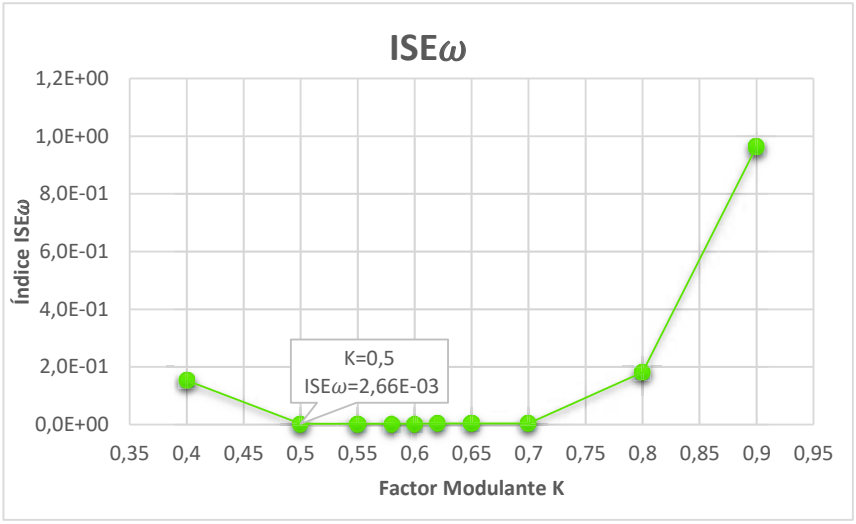


Figura 3.18. Índice ISE de velocidad angular vs. Factor modulante K

Para la trayectoria denominada Lemniscata de Bernoulli se puede observar en las Figuras 3.17 y 3.18 que los índices más bajos para la velocidad lineal y angular se obtienen a partir de los factores de modulación $K = 0.8$ y $K = 0.5$ respectivamente. En este caso sucede algo similar a lo ocurrido con la trayectoria anterior, por lo que para una respuesta adecuada en conjunto de la velocidad lineal y angular se escoge al factor modulante $K = 0.7$.

Resumen de Resultados

A continuación, en la Figura 3.19 se presenta el resumen de resultados obtenidos en el proceso de sintonización.

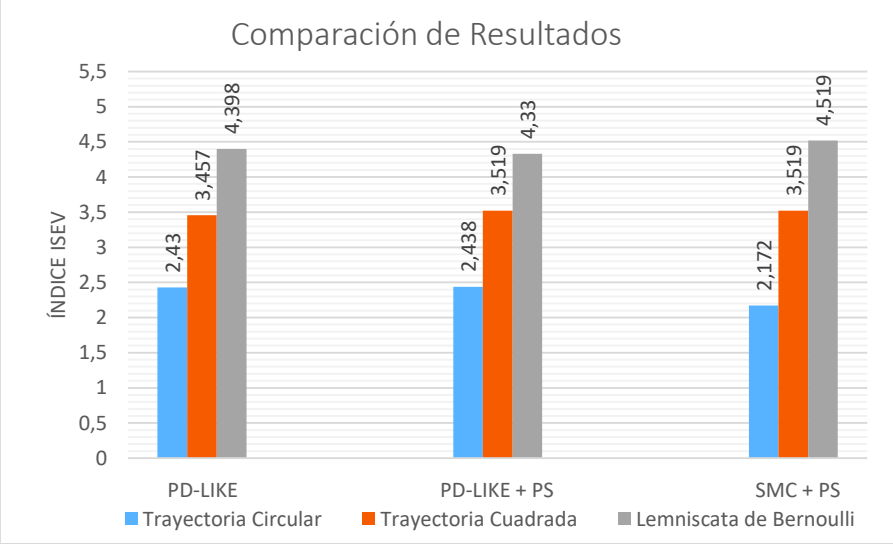


Figura 3.19. Comparación de resultados de sintonización para la velocidad lineal.

Analizando la Figura 3.19, y considerando que la variable controlada es la velocidad lineal, para las 3 trayectorias los resultados del controlador con mejor rendimiento son variados.

3.2. Calibración de Controladores

En la sección anterior se realizó la sintonización de los controladores considerando el índice de rendimiento ISE para la velocidad lineal y angular, lo que se buscó obtener en la sintonización es que el índice de rendimiento de las velocidades sea el más bajo y por consiguiente el más adecuado. Sin embargo, no se prestó especial atención a la tarea de seguimiento de trayectorias como tal, puesto que solo se deseaba que cada controlador pueda alcanzar a la velocidad lineal de referencia con un estado transitorio adecuado y con un error en estado estable mínimo. En el presente apartado, una vez que se tienen los parámetros de sintonización adecuados para cada controlador y trayectoria, se procede a la calibración de los controladores para que, además de tener una buena respuesta en velocidad, también posea excelentes resultados en el seguimiento de cada trayectoria.

La calibración se realiza partiendo de los controladores sintonizados previamente y en base al índice de rendimiento ISE de las coordenadas X y Y. Además, se toma en cuenta al módulo del error de las coordenadas $\|e\|$, que representa la distancia entre la posición real del robot y la posición de referencia XY en ese instante. Todos estos criterios ayudan a determinar los parámetros del controlador adecuado que brinde la mejor respuesta. El módulo del error se lo calcula usando la Ecuación 3.11 que se presenta a continuación:

$$\|e\| = \sqrt{(X_{ref} - X_{real})^2 + (Y_{ref} - Y_{real})^2}$$

Ecuación 3.11. Módulo del error de posición.

Donde:

$\|e\|$: Módulo del error en el instante t.

X_{real}, Y_{real}: Coordenadas de la posición real del robot en el instante t.

X_{ref}, Y_{ref}: Coordenadas de la posición de referencia en el instante t.

La siguiente relación describe el valor de tolerancia permitido en función del retardo del sistema h, que se analizó en la Ecuación 1.13:

$$Tol_{\|e\|} = (V_{set} \cdot h) \cdot \left(1 + \frac{\%\ de\ tol}{100}\right)$$

Ecuación 3.12. Valor de tolerancia máxima permitida.

Donde:

$Tol_{\|e\|}$: Tolerancia max. permitida en el módulo del error de posición en [m].

V_{set}: Velocidad lineal de referencia en [m/s].

h: Retardo del sistema en [s].

$\%\ de\ tol$: Porcentaje de tolerancia permitida.

Tomando en cuenta las especificaciones para el seguimiento de trayectorias de la Tabla 3.1, que serán utilizadas en el proceso de calibración. Además, considerando el parámetro t_0 del modelo FOPDT de la velocidad lineal descrito en la Tabla 1.2, que es el retardo más grande del modelo del robot, el valor del retardo del sistema es:

$$h = H_{sn} + H_c + H_{ac} = 0.5 + 0.364 + 0.5 = 1.364\ [s]$$

Ecuación 3.13. Valor del retardo total del sistema basado en la Ecuación 1.3.

El valor de retardo de comunicación desde el sensor hacia el controlador H_{sn}, y el valor de retardo desde el controlador hacia el actuador H_{ac} es de 500 [ms], considerando el análisis descrito en [57], donde la comunicación a través de internet presenta retardos máximos alrededor de este valor, y a pesar de que este trabajo de titulación simula el retardo del canal de comunicación, los resultados en el análisis de los controladores pueden ser aplicados en sistemas que usen canales reales. Aplicando el valor del retardo total del sistema en la Ecuación 3.12 con una tolerancia de 150% se obtiene lo siguiente:

$$Tol_{\|e\|} = (V_{set} \cdot h) \cdot \left(1 + \frac{\%\ de\ tol}{100}\right) = 0.3(1.364) \cdot \left(1 + \frac{150}{100}\right) = 1.023 \cong 1\ [m]$$

Ecuación 3.14. Valor de tolerancia máxima permitida para el seguimiento de trayectorias.

Por lo que un rango de valores aceptables en el módulo del error de posición $\|e\|$ para la calibración en el seguimiento de las distintas trayectorias se considera a aquellos valores menores a 1 [m]. A continuación, se presentan los resultados para la trayectoria circular calibrando los tres controladores para obtener una respuesta adecuada.

Calibración de Controladores para la Trayectoria Circular

Para calibrar cada uno de los controladores ante el seguimiento de una trayectoria circular se tiene que tomar en cuenta las siguientes especificaciones:

- La trayectoria circular posee un radio de 3 [m].
- La velocidad lineal de referencia es de 0.3 [m/s].
- El retardo de ida/vuelta que se tiene es de 500 [ms].

- Se desea que el módulo del error $\|e\|$ sea menor a 1 [m] de acuerdo con la Ecuación 3.14.
- Índices ISE_x, ISE_y, ISE_v e ISE_ω adecuados.
- Se realiza el análisis de estado transitorio donde se desea un máximo sobrepico ($M_p\%$) menor al 10%, y el menor tiempo de establecimiento (t_s) posible.

Calibración del Controlador PD-Like

A continuación, en la Figura 3.20 se presenta los resultados obtenidos para el controlador PD-Like.

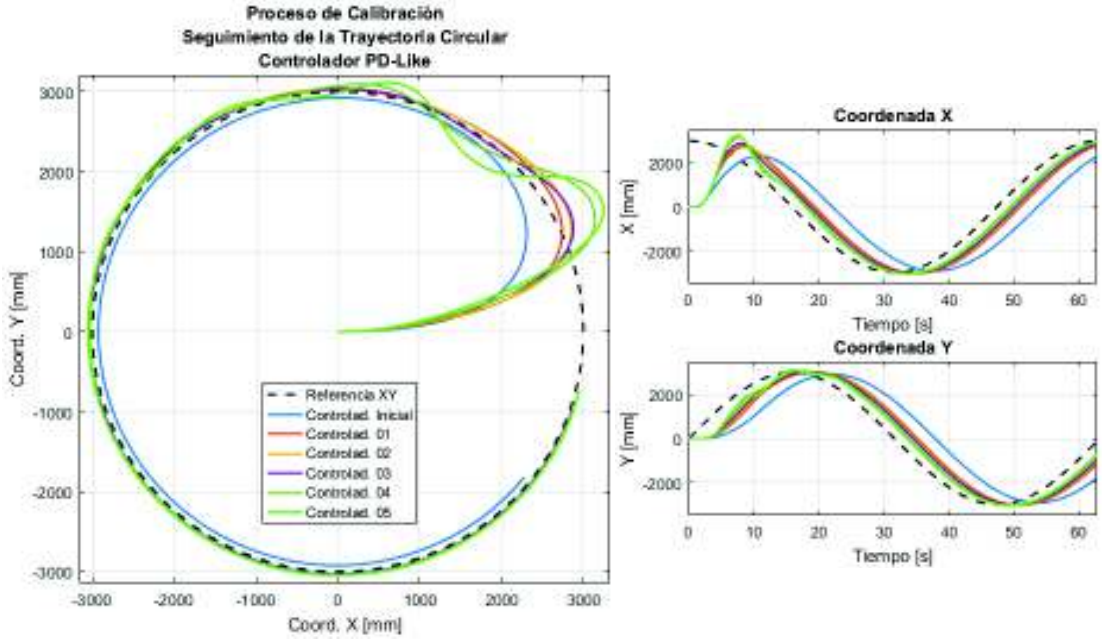


Figura 3.20. Vista del plano XY y coordenadas en función del tiempo.

En primera instancia se procede a obtener la respuesta del controlador inicial con los parámetros sintonizados en el apartado 3.1, para posterior basados en esta respuesta modificar las constantes del controlador y conseguir un mejor seguimiento de la trayectoria en análisis. En la Figura 3.20 se puede observar el seguimiento de la trayectoria circular para las 5 distintas variaciones del controlador inicial en el plano XY, la respuesta de cada uno de los controladores es diferente, teniendo algunos controladores un seguimiento más suave, como el controlador 01, y otros controladores tienen una respuesta más oscilante en la etapa de alcanzabilidad de la trayectoria, como el controlador 05. En las Figuras 3.21 y 3.22 se observan valores de interés para la elección de los parámetros adecuados del controlador.

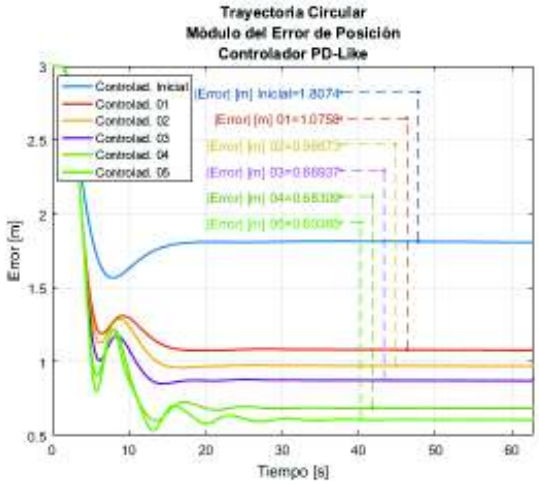


Figura 3.21. Módulo del error de posición

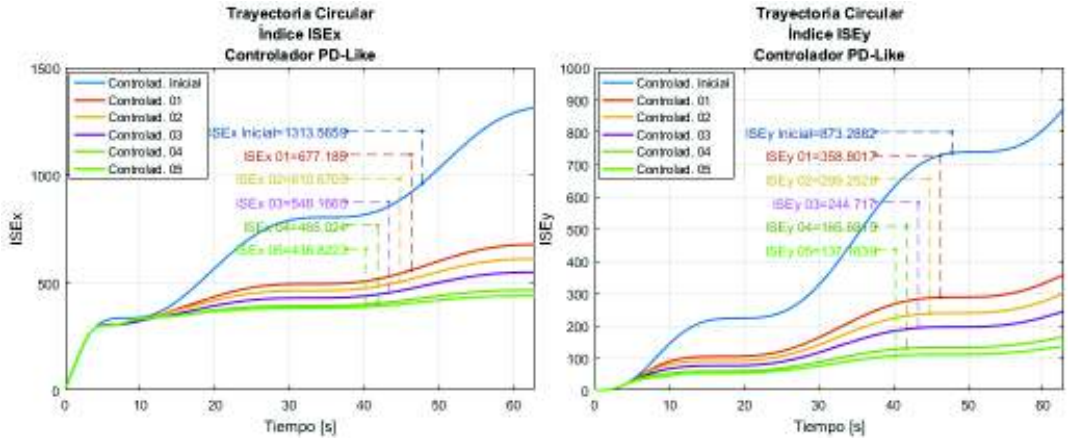


Figura 3.22. Índices ISE_x e ISE_y obtenidos en la simulación de las distintas variaciones del controlador PD-Like.

Una gran diferencia entre cada uno de los controladores es el módulo del error de posición $\|e\|$, entre más oscilante es la respuesta del robot en el estado transitorio, menor es el módulo del error, este resultado se explica debido a que la oscilación se produce por una alta velocidad en el proceso para alcanzar la trayectoria, lo que provoca que se supere a la trayectoria de referencia. Sin embargo, la misma magnitud de la velocidad genera una rápida corrección en la trayectoria del robot, que compensa esta oscilación en el estado transitorio y provoca a la final que se tenga un módulo del error menor, es decir que la alta velocidad inicial provoca las oscilaciones, pero permite que la distancia entre la posición de referencia y la posición real del robot en el recorrido sea menor. Esto se puede verificar con el controlador 05, donde se observa una excesiva oscilación en el estado transitorio, pero que tiene el menor módulo del error de posición $\|e\|$ con respecto al resto de controladores. Algo parecido ocurre con los índices ISE_x e ISE_y, debido a que el controlador 05 posee los índices más adecuados respecto al resto de controladores en estudio.

En la Figura 3.23 se puede observar las gráficas obtenidas a partir del cálculo de la distancia entre la posición real del robot y el centro de la circunferencia, donde se puede analizar aspectos puntuales como el sobrepico producido M_p en la trayectoria y el tiempo de establecimiento t_s.

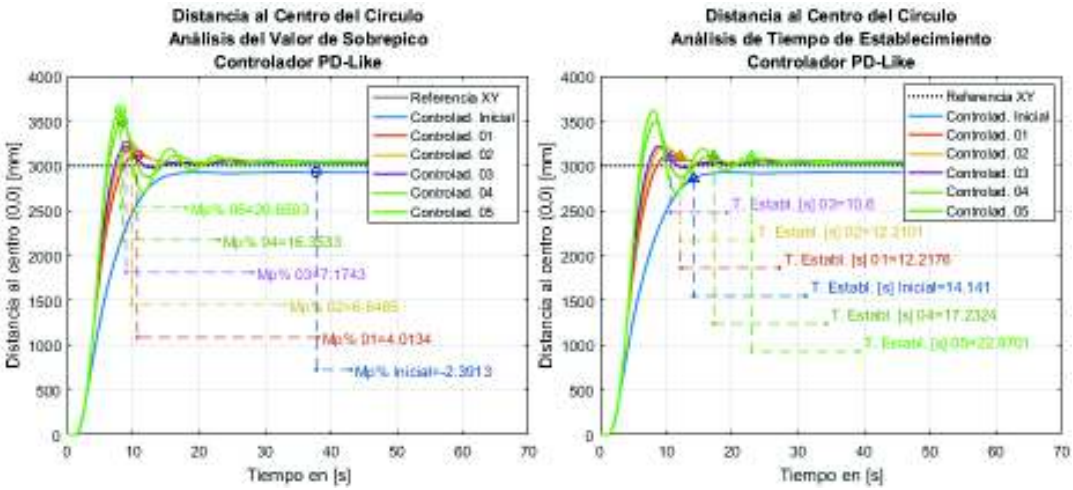


Figura 3.23. Distancia entre el robot y el centro de la circunferencia para el análisis del estado transitorio.

En la Figura 3.23 se puede notar la respuesta en estado transitorio que tiene el robot en el seguimiento de la trayectoria circular para cada una de las variaciones del controlador PD-Like; respuesta que va a ser de utilidad para elegir los parámetros adecuados del controlador. En el análisis de sobrepico, y tomando en cuenta la Figura 3.21, se puede notar que ciertos controladores poseen una sobre-elongación mayor que se relaciona a un menor módulo del error. Además, si se considera el análisis del tiempo de establecimiento, entre menor es el módulo del error más tiempo le toma al robot pasar a su estado permanente por lo que el tiempo de establecimiento es mayor.

En este caso para la elección de la variación del controlador PD-Like adecuado se toma en cuenta que el módulo del error de posición $\|e\|$ sea menor a 1 [m], como se determinó en la Ecuación 3.14, que posea los valores de los índices ISE_x e ISE_y adecuados, que no posea una excesiva oscilación en la etapa transitoria reflejada en el tiempo de establecimiento y un valor de sobrepico menor al 15% respecto al radio de la circunferencia. En la Tabla 3.11 se tiene una recopilación de las características de cada una de las variaciones del controlador PD-Like.

Tabla 3.11. Resultados de la calibración del controlador PD-Like para el seguimiento de la trayectoria circular.

Índices y Parámetros	Controlador					
	Inicial	**01**	**02**	**03**	**04**	**05**
ISE_v	2.4311	5.2665	6.3876	**7.3137**	11.0269	13.1332
ISE_ω $[\times 10^{-4}]$	7.1476	34.332	54.224	**115.28**	311.34	886.29
ISE_x	1313.57	677.19	610.67	**548.17**	465.02	438.82
ISE_y	873.29	358.80	299.25	**244.72**	165.68	137.16
$\|\|e\|\|$ $[m]$	1.8074	1.0758	0.96873	**0.86937**	0.68309	0.60385
M_p $[\%]$	-2.39	4.01	6.85	**7.17**	16.35	20.65
t_s $[s]$	14.141	12.2176	12.2101	**10.6**	17.2324	22.9701

Considerando todos los parámetros e índices antes expuestos, se tiene que el controlador 03 es aquel que presenta la mejor respuesta. A continuación, en la Ecuación 3.15 se exponen los parámetros del controlador PD-Like de la variación 03.

$$\begin{bmatrix} U_{PDL_v} \\ U_{PDL_\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.14 & 0 \\ 0 & 0.23 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 0.24 & 0 \\ 0 & 0.37 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ref}(t-0.5) \\ \omega_{ref}(t-0.5) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{real} \\ \omega_{real} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} 0.09 & 0 \\ 0 & 0.036 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{real} \\ \dot{\omega}_{real} \end{bmatrix}$$

Ecuación 3.15. Ley de control de la técnica PD-Like con mejores resultados.

Calibración del Controlador PD-Like + Predictor de Smith

En la Figura 3.24 se muestran los resultados en el seguimiento de la trayectoria circular.

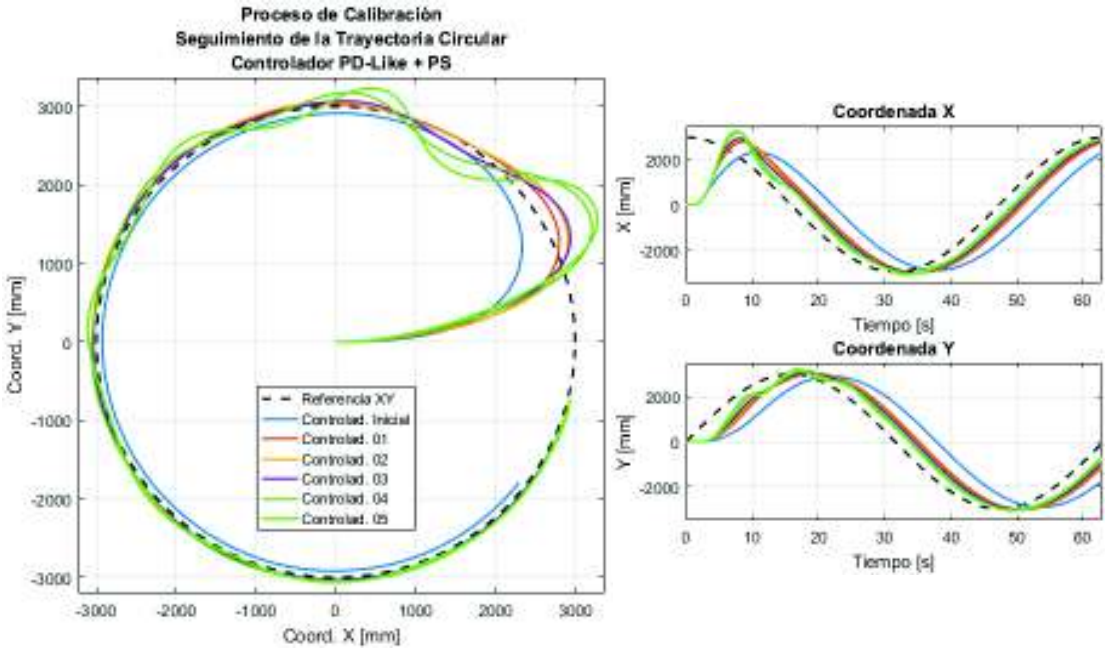


Figura 3.24. Vista del plano XY y coordenadas en función del tiempo.

Para la calibración de la combinación entre el controlador PD-Like y el Predictor de Smith se usarán los valores de los parámetros de cada variación del controlador PD-Like, analizados en el apartado anterior, y se obtendrán las respuestas del robot, pero con el Predictor de Smith adicionado en el sistema de control.

Tomando en cuenta la Figura 3.24, y contrastando con los resultados del seguimiento de la trayectoria circular con el uso del controlador PD-Like analizados en la Figura 3.20, se puede observar que, a pesar del uso de los mismos valores en los parámetros, la adición del Predictor de Smith provoca una mayor oscilación en el seguimiento de la trayectoria, esto se puede justificar debido a una realimentación más apegada a la velocidad lineal y angular real desarrollada en ese instante por el robot, dicha realimentación la provee el predictor que aísla y compensa el retardo existente. Hay que considerar que al agregar el predictor se modifica la estructura de control y, por consiguiente, se requiere ajustar los parámetros del controlador. En conclusión, si se agrega a una estructura de control el Predictor de Smith, para que se pueda aprovechar todas las propiedades o ventajas que provee esta técnica, se requiere que se modifiquen las constantes del controlador primario que se esté usando. Para efectos de la calibración se usarán las 5 variaciones del controlador PD-Like para realizar una comparación objetiva con el uso del predictor, pero debido a lo anteriormente expuesto se puede intuir que al agregar el predictor no necesariamente se obtendrá los mismos resultados en cuanto a la variación del controlador con la mejor respuesta.

En las Figuras 3.25 y 3.26 se puede observar el módulo del error $\|e\|$ y los índices ISE de las coordenadas X y Y.

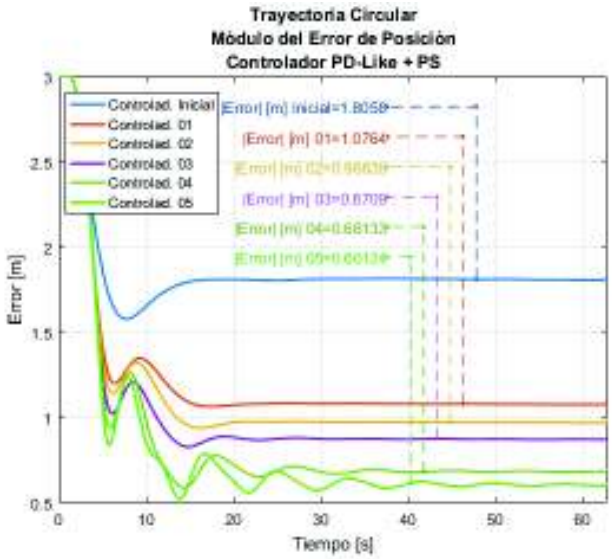


Figura 3.25. Módulo del error de posición.

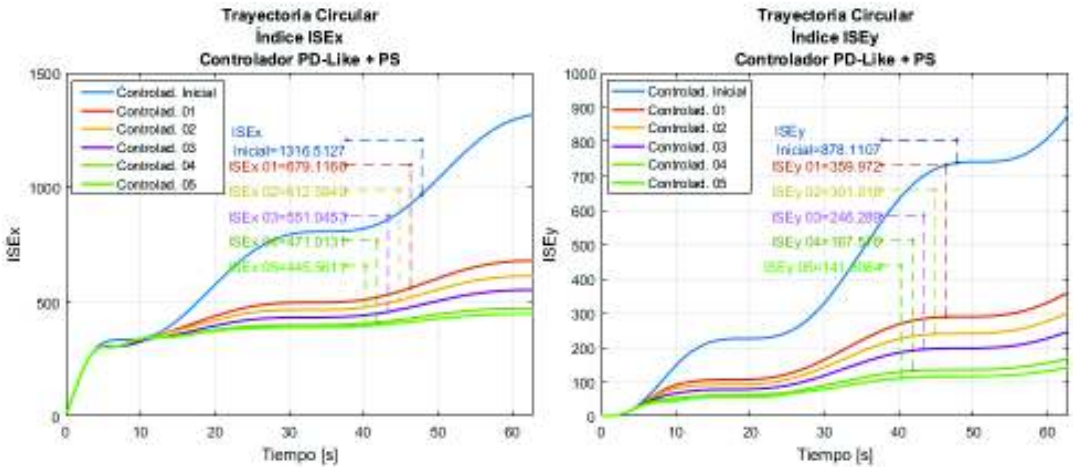


Figura 3.26. Índices ISE_x e ISE_y obtenidos en la simulación de las distintas variaciones del controlador PD-Like + Predictor de Smith.

Considerando los resultados obtenidos en el módulo del error de posición $\|e\|$, que se puede observar en la Figura 3.25 con la combinación PD-Like + Predictor de Smith, y comparando con los resultados obtenidos en la Figura 3.21 con el uso solo del controlador PD-Like, se puede notar que la adición del predictor al esquema no afecta en gran medida al error de posición $\|e\|$, debido a que en general el error aumenta con el uso del predictor, pero el aumento es menor a 1 [cm] en la mayoría de los casos.

Al prestar atención en los resultados de los índices ISE_x e ISE_y, y comparando con los resultados obtenidos con el uso del controlador PD-Like, se puede notar un aumento en los índices con el uso del predictor. Sin embargo, hay que recalcar que el aumento, en el peor de los casos es en el orden de unidades, por lo que no representa un gran decaimiento en los índices por el uso del compensador. En la Figura 3.27. se puede observar el análisis del estado transitorio

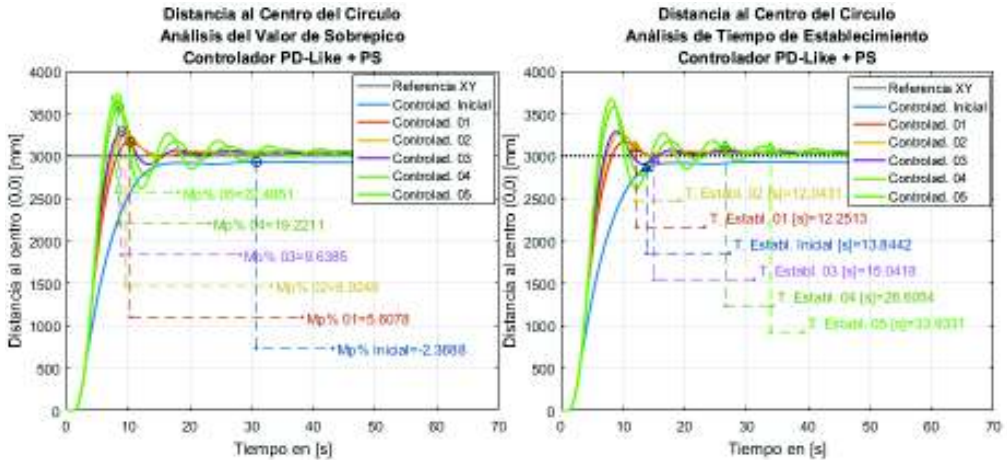


Figura 3.27. Distancia entre el robot y el centro de la circunferencia para el análisis del estado transitorio.

Al observar la figura anterior, considerando el máximo sobrepico M_p [%] se tiene un aumento en el orden de las unidades en todas las variaciones del controlador respecto a los resultados obtenidos en el apartado anterior. Por su parte, el tiempo de establecimiento t_s [s] tiene resultados variados existiendo controladores que aumentan en gran medida el valor de este parámetro, mientras que existen otras variaciones del controlador en que el tiempo de establecimiento aumenta o disminuye en décimas de unidad.

Un resumen de resultados se puede observar en la Tabla 3.12 para realizar la elección del controlador que mejor respuesta haya tenido. En la elección se usarán las mismas especificaciones y requerimientos que se usaron con el controlador PD-Like.

Tabla 3.12. Resultados de la calibración del controlador PD-Like + Predictor de Smith para el seguimiento de la trayectoria circular.

Índices y Parámetros	**Controlador**					
	Inicial	**01**	**02**	**03**	**04**	**05**
ISE_v	2.4379	5.4941	**6.6879**	7.6845	11.6201	13.5525
ISE_ω [$\times 10^{-4}$]	7.102	35.627	**51.92**	114.26	294.54	789.09
ISE_x	1316.51	679.12	**612.58**	551.05	471.01	445.56
ISE_y	878.11	359.97	**301.02**	246.29	167.58	141.3
$\|\|e\|\|$ [m]	1.8058	1.0764	**0.96839**	0.8709	0.68133	0.60124
M_p [%]	-2.37	5.61	**8.92**	9.64	19.22	22.49
t_s [s]	12.8442	12.2513	**12.0431**	15.0418	26.6054	33.933

Considerando todos los parámetros e índices antes expuestos, se tiene que el controlador 02 es aquel que presenta la mejor respuesta. A continuación, en la Ecuación 3.16 se exponen los parámetros del controlador PD-Like + Predictor de Smith de la variación 02.

$$\begin{bmatrix} U_{PDL_v} \\ U_{PDL_\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.14 & 0 \\ 0 & 0.23 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 0.22 & 0 \\ 0 & 0.31 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ref}(t-0.5) \\ \omega_{ref}(t-0.5) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{real} \\ \omega_{real} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} 0.09 & 0 \\ 0 & 0.036 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{real} \\ \dot{\omega}_{real} \end{bmatrix}$$

Ecuación 3.16. Ley de control de la técnica PD-Like + PS con mejores resultados.

Calibración del Controlador SMC + Predictor de Smith

La calibración del Controlador por Modos Deslizantes (SMC) con superficie deslizante PD-Like en combinación con el Predictor de Smith se la realiza a partir de los parámetros sintonizados para la trayectoria circular que se obtuvieron en la sección 3.1. Se analizan 5 variaciones del controlador que fueron obtenidas al modificar los parámetros del

controlador sintonizado inicial. Los resultados del seguimiento de trayectoria son los siguientes:

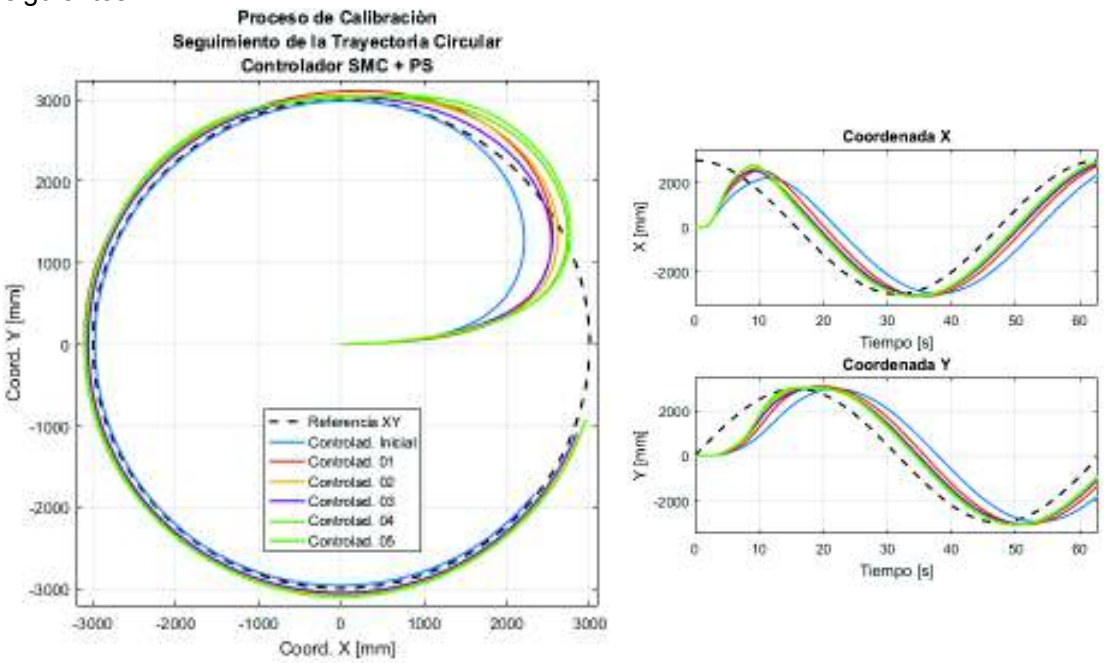


Figura 3.28. Vista del plano XY y coordenadas en función del tiempo.

Como se observa la Figura 3.28, la combinación del controlador SMC + Predictor de Smith provee de un seguimiento de trayectoria menos oscilante que la respuesta de las anteriores técnicas, estos aspectos se los puede analizar de manera cuantitativa considerando las siguientes graficas que engloban el desarrollo de los parámetros e índices a través del tiempo de simulación. A continuación, en las Figura 3.29 y 3.30 se presentan parámetros como el módulo del error de posición y los índices ISE_x e ISE_y.

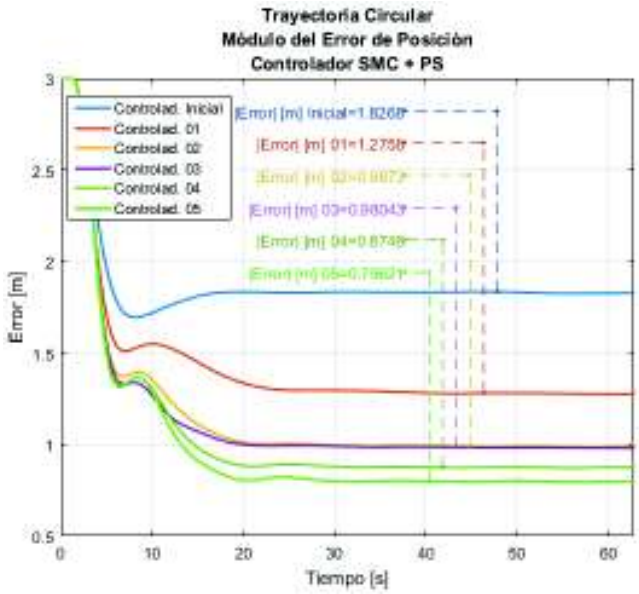


Figura 3.29. Módulo del error de posición.

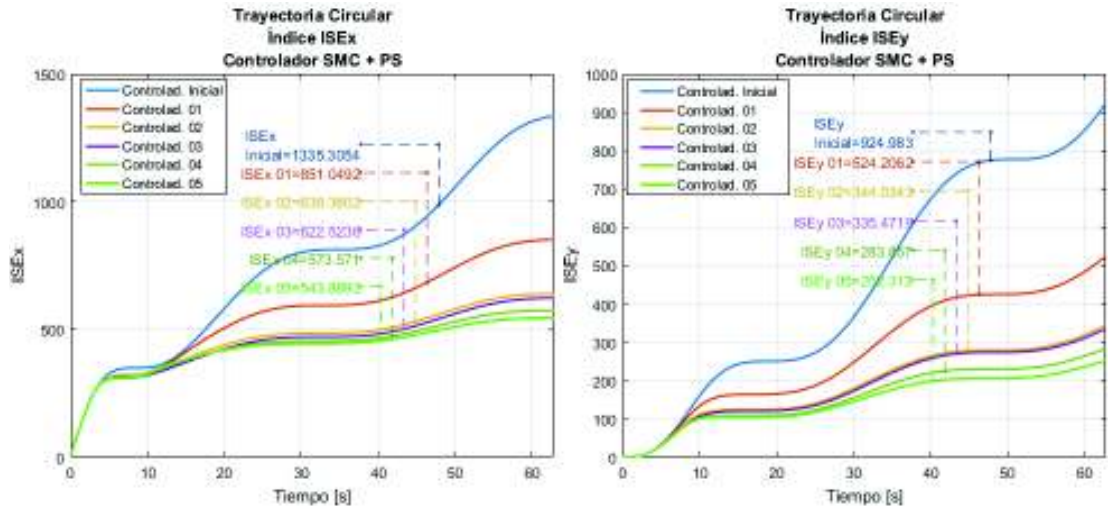


Figura 3.30. Índices ISE_x e ISE_y obtenidos en la simulación de las distintas variaciones del controlador SMC + Predictor de Smith.

Al analizar la gráfica del módulo del error de posición en función del tiempo, se puede notar que el error mínimo es de alrededor de 79 [cm] con el uso del controlador 05, esto contrasta con los resultados obtenidos con las técnicas anteriores, en las cuales el error mínimo que se pudo lograr fue de 60 [cm]. Respecto a los índices ISE_x e ISE_y sucede algo parecido, puesto que, con las técnicas anteriores se tuvo unos valores mínimos de 438 y 137 respectivamente, mientras que con el controlador SMC + Predictor de Smith los valores mínimos son 543 y 252 respectivamente. Esto supone una imposibilidad de igualar el rendimiento de los anteriores controladores en lo que respecta a los valores mínimos de estos parámetros.

En la Figura 3.31. se puede observar el análisis del estado transitorio obtenido en la simulación del controlador inicial y sus 5 variaciones.

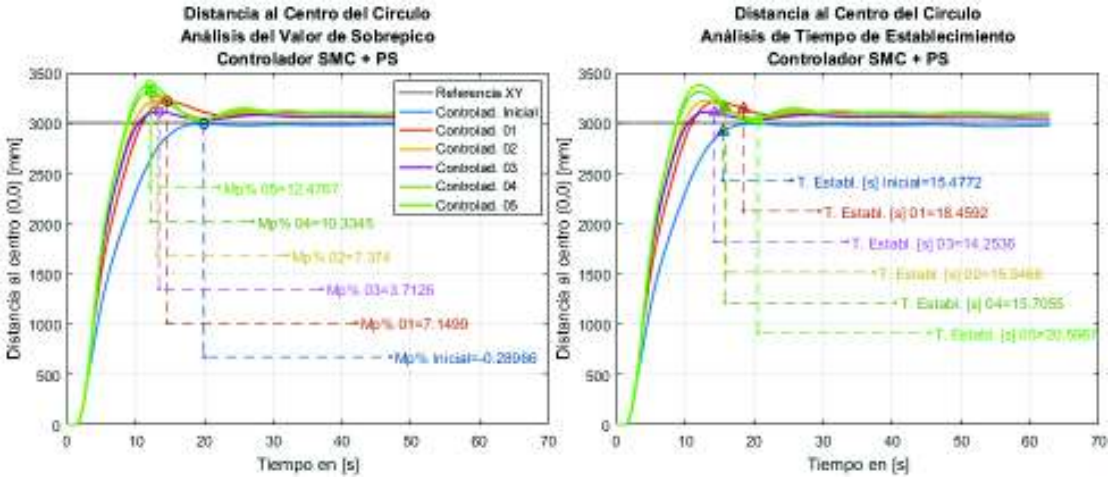


Figura 3.31. Análisis del estado transitorio de la curva de distancia al centro del círculo.

Al analizar los datos que se obtienen en la Figura 3.31. se puede notar que los valores de máximo sobrepico M_p [%] y tiempo de establecimiento t_s [s] de las distintas variaciones del controlador SMC + Predictor de Smith están en un rango similar a los resultados obtenidos con las anteriores técnicas de control, e inclusive en ciertos casos tiene un mejor rendimiento, por lo que se ve una mejora en el estado transitorio con el uso de la técnica SMC.

En la Tabla 3.13 se puede observar un resumen de los parámetros e índices de rendimiento para la elección de la variación del controlador adecuado con la mejor respuesta. Hay que puntualizar que el controlador adecuado se escoge considerando las especificaciones de elección usadas con los anteriores controladores, para poder obtener una comparación objetiva respecto al uso de las 3 técnicas de control.

Tabla 3.13. Resultados de la calibración del controlador SMC + Predictor de Smith para el seguimiento de la trayectoria circular.

Índices y Parámetros	**Controlador**					
	Inicial	**01**	**02**	**03**	**04**	**05**
ISE_v	2.1756	3.2769	4.3559	**4.1942**	5.4476	6.2808
ISE_ω [$\times 10^{-4}$]	5.739	9.753	14.99	**16.05**	19.22	22.85
ISE_x	1335.31	851.049	638.36	**622.52**	573.57	543.89
ISE_y	924.98	524.21	344.03	**355.47**	283.86	252.31
$\|\|e\|\|$ [m]	1.8268	1.2758	0.9873	**0.98043**	0.8746	0.79621
M_p [%]	-0.29	7.15	7.37	**3.71**	10.33	12.48
t_s [s]	15.4772	18.4592	15.9468	**14.2536**	15.7055	20.5967

Considerando todos los parámetros e índices antes expuestos, se tiene que el controlador 03 es aquel que presenta la mejor respuesta. A continuación, en las Ecuaciones 3.17, 3.18 y 3.19 se exponen los parámetros del controlador SMC + Predictor de Smith de la variación 03.

$$\begin{bmatrix} U_{SMC_v} \\ U_{SMC_\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.21755 & 0 \\ 0 & 0.4382592 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{real} \\ \dot{\omega}_{real} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{real} \\ \omega_{real} \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} 29 & 0 \\ 0 & 8.944 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \right) \begin{bmatrix} \dot{v}_{ref}(t-0.5) \\ \dot{\omega}_{ref}(t-0.5) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 9000 \dfrac{S_v(t)}{|S_v(t)| + 8000} \\ 3000 \dfrac{S_\omega(t)}{|S_\omega(t)| + 3000} \end{bmatrix}$$

Ecuación 3.17. Ley de control de la técnica SMC + PS con mejores resultados.

Donde:

$$S_v(t) = 0.61\big(0.0268\, v_{ref}(t-0.5) - v_{real}\big) - 0.192\, \dot{v}_{real}$$

Ecuación 3.18. Superficie deslizante para la velocidad lineal.

$$S_\omega(t) = 0.7425\big(0.0553\, \omega_{ref}(t-0.5) - \omega_{real}\big) - 0.4125\, \dot{\omega}_{real}$$

Ecuación 3.19. Superficie deslizante para la velocidad angular.

Calibración de Controladores para la Trayectoria Cuadrada.

La calibración de los controladores en el seguimiento de la trayectoria cuadrada se la realiza en base a los siguientes lineamientos:

- La trayectoria cuadrada posee 6 [m] de lado.
- La velocidad lineal de referencia es de 0.3 [m/s].
- El retardo de ida/vuelta que se tiene es de 500 [ms].
- Se desea que el módulo del error $\|e\|$ sea menor a 1 [m] de acuerdo con el valor de tolerancia desarrollado en la Ecuación 3.14.
- Máximo sobrepico $M_p\%$ menor al 10% y el tiempo de establecimiento t_s menor posible.
- Índices ISE_x, ISE_y, ISE_v e ISE_ω adecuados.
- El tiempo de simulación es de 80 [s], que será la referencia para la obtención de los parámetros ISE y $\|e\|$.

El procedimiento de calibración se basa en el controlador obtenido en la sintonización realizada en la sección 3.1, a partir de ese controlador se realizan 5 variaciones en los parámetros y se analiza el seguimiento de la trayectoria, tratando de hallar un controlador que cumpla con todos los lineamientos expuestos con anterioridad.

Calibración del Controlador PD-Like

Para el seguimiento de la trayectoria cuadrada, se aplica el controlador PD-Like, la posición inicial del robot es en el origen de coordenada (0,0) y con una orientación de 0°. Los resultados en el seguimiento para el controlador inicial sintonizado y las 5 variaciones son presentados en la Figura 3.32.

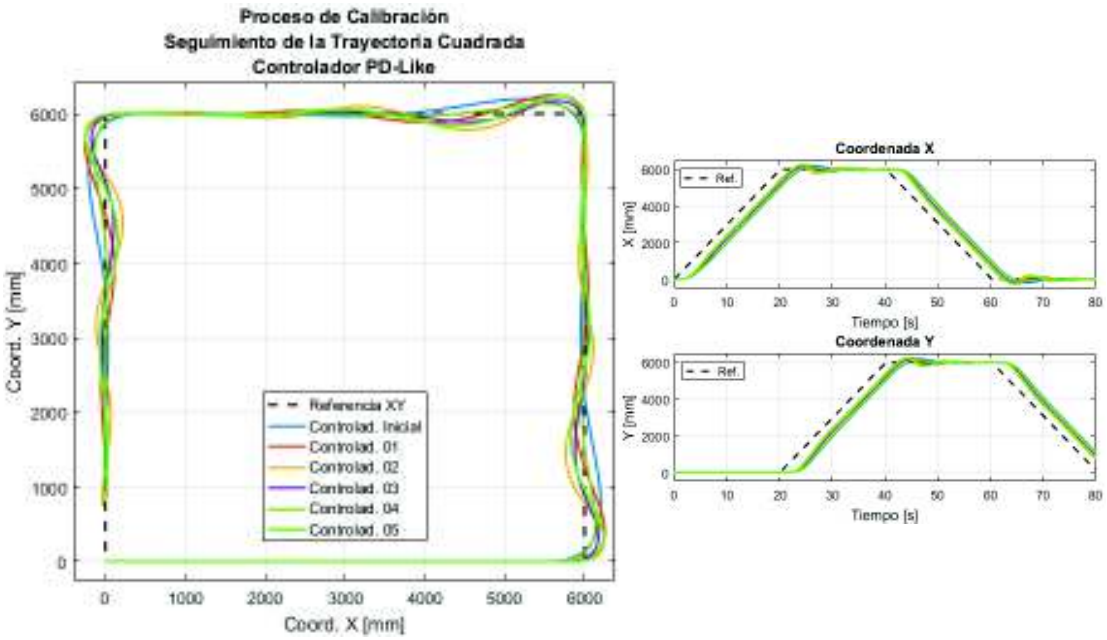


Figura 3.32. Vista del plano XY y coordenadas en función del tiempo.

Como se observa, los aspectos más interesantes en el análisis son las esquinas del cuadrado, pues aquí se produce un cambio brusco en la orientación, y debido a la velocidad desarrollada por el robot se produce una salida en la trayectoria. Dependiendo de los parámetros de cada una de las variaciones del controlador sintonizado, se produce una mayor o menor salida de la trayectoria y también una variación en el tiempo de recuperación. A continuación, en las Figuras 3.33 y 3.34 se procede a analizar el módulo del error de posición $\|e\|$ y los índices de rendimiento de las coordenadas X e Y (ISE_x e ISE_y).

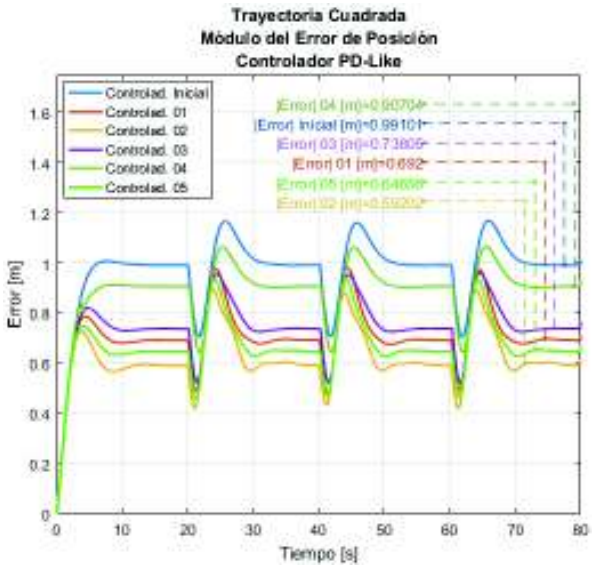


Figura 3.33. Módulo del error de posición $\|e\|$.

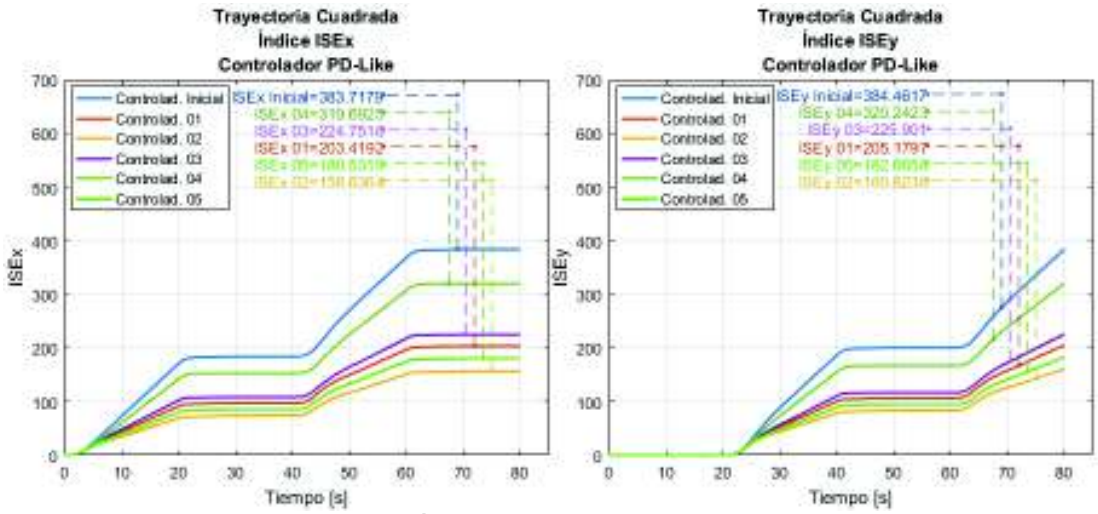


Figura 3.34. Índices de rendimiento ISE_x e ISE_y.

Como se observa en la Figura 3.33 respecto al módulo del error, todos los controladores cumplen con la condición de tener un error menor a 1 [m], por lo que se puede considerar adicionalmente, y solo en este caso, a los controladores que nunca superan el valor límite por sobre los controladores que si lo hacen. En la gráfica además se observan unos picos que son producidos cuando el robot pasa por las esquinas de la trayectoria, y que luego de un periodo de tiempo son compensados.

En la Figura 3.34, con lo que respecta a los índices de rendimiento ISE_x e ISE_y se observa crecimientos y regiones estables. En particular en el índice ISE_y se observa que en los primeros 20 [s] aproximadamente posee un valor de 0 debido a que el robot inicia con una orientación de 0° y el primer lado de la trayectoria se genera sobre el eje X.

Para el estudio del estado transitorio en el seguimiento de la trayectoria cuadrada, se realiza un análisis previo cuantificando en cuál de los lados se ha producido la transición con mayores sobrepicos, en este caso para todas las variaciones del controlador PD-Like los máximos sobrepicos se producen en la esquina superior izquierda. Dependiendo del lado a analizar para la obtención del estado transitorio, se procede a tomar en consideración la coordenada adecuada que representa la distancia perpendicular hacia el cuadrado de referencia. En la siguiente figura se profundiza la manera de obtener las gráficas de análisis del estado transitorio.

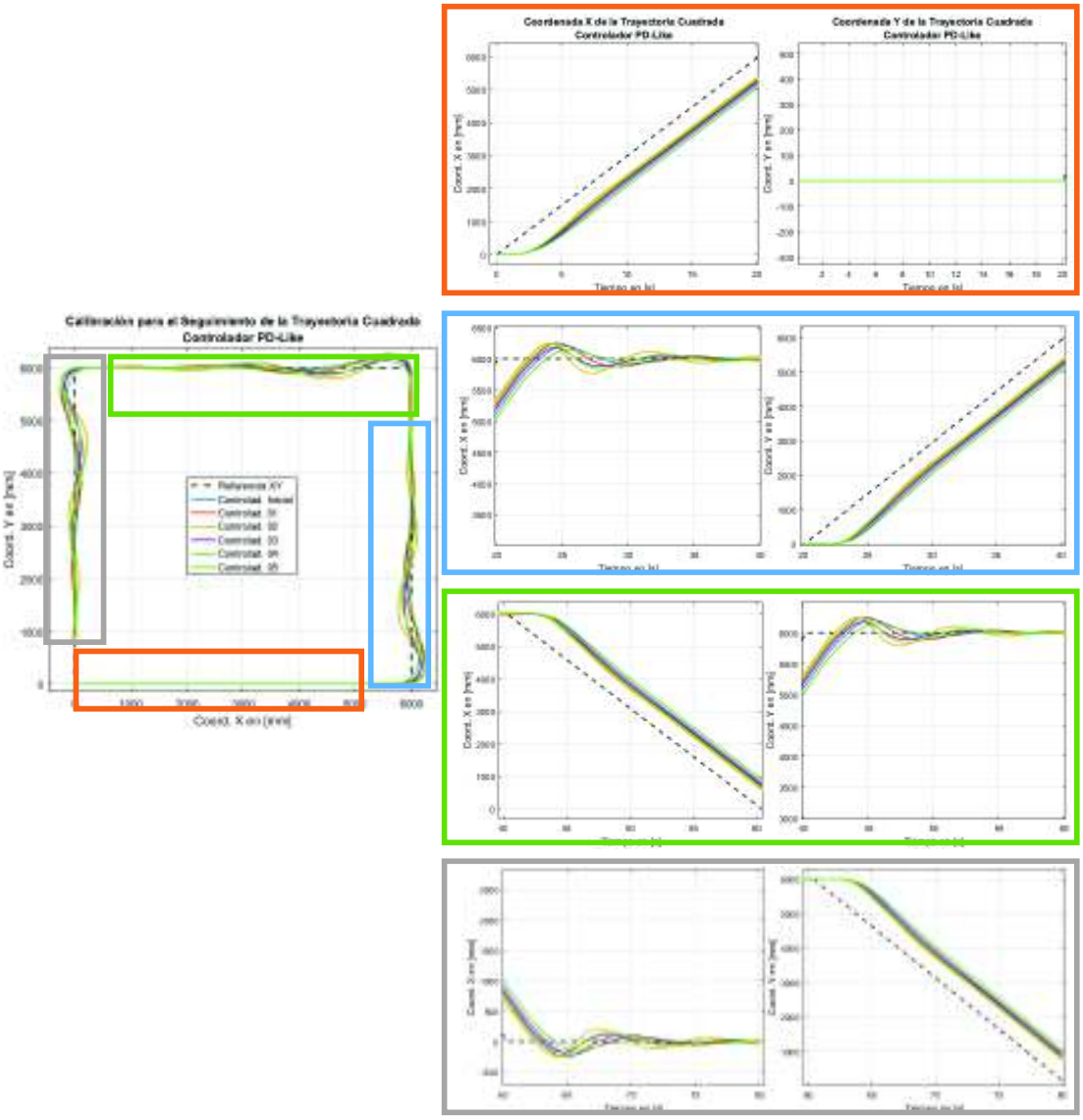


Figura 3.35. Coordenadas X e Y en función del tiempo de cada lado del cuadrado.

En la Figura 3.35 se puede observar las coordenadas de la trayectoria en función del tiempo dividida convenientemente en gráficas para cada uno de los lados del cuadrado, esto permite entender de mejor manera cómo se obtiene las gráficas de la Figura 3.36 para el análisis de la etapa transitoria. Si se presta atención en los lados rojo y naranja, que son los lados horizontales, la distancia perpendicular al cuadrado de referencia viene dada por la coordenada Y, esto se verifica en las gráficas correspondientes de la coordenada en función del tiempo. Por su parte los lados azul y verde, que son los lados verticales, la distancia viene a través de la coordenada X, que se verifica en las gráficas de la coordenada en función del tiempo correspondiente a cada lado. Finalmente, para un adecuado análisis de la función “stepinfo” incluida en el software matemático MATLAB, que

nos permite analizar el estado transitorio y permanente de un sistema SISO ante una entrada tipo escalón, es conveniente no solo analizar el lado donde se produce la transición sino además el lado adyacente. Por ejemplo, si se requiere analizar la transición en la esquina superior izquierda del cuadrado, se toma en cuenta la coordenada X del lado verde, y además la coordenada X del lado adyacente naranja. La gráfica que se obtiene se la puede observar en la Figura 3.36 que se presenta a continuación.

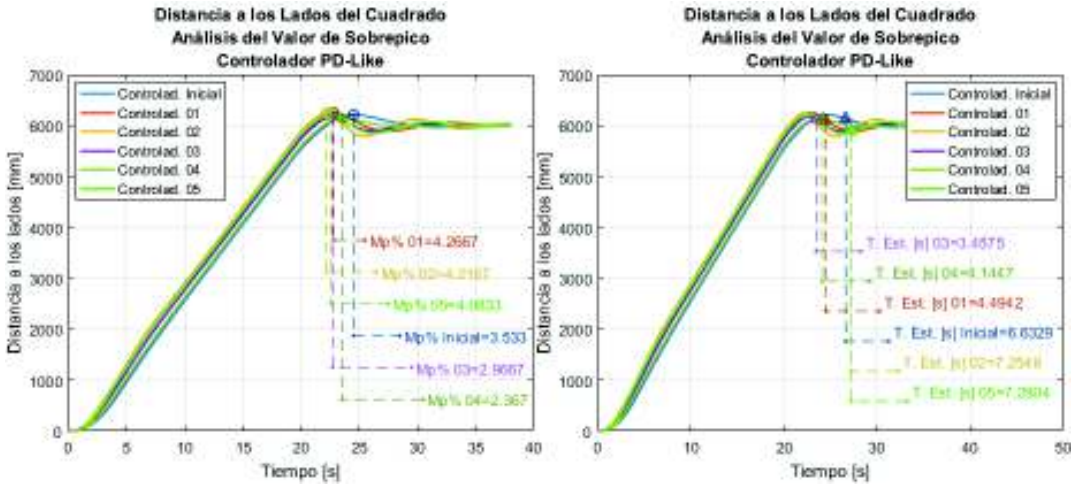


Figura 3.36. Análisis del estado transitorio de la distancia del robot hacia el lado.

En la Figura 3.36 se puede verificar el análisis del estado transitorio, donde se nota que respecto al sobrepico todos los controladores no superan una salida de la trayectoria mayor al 5% respecto de la magnitud del lado, por lo que todos los controladores cumplen con los lineamientos especificados inicialmente. Por su parte la variación con el tiempo de establecimiento menor es el controlador 03, y en general todos los controladores no superan los 7.3 [s] en este parámetro, lo que representa el 36.5% del tiempo que toma en transitar un lado del cuadrado. En la Tabla 3.14 y 3.15 se presenta un resumen de los resultados de todos los parámetros e índices obtenidos.

Tabla 3.14. Resultados de la calibración del controlador PD-Like para el seguimiento de la trayectoria cuadrada.

Índices y Parámetros	**Controlador**					
	Inicial	**01**	**02**	**03**	**04**	**05**
ISE_v	3.457	3.5654	3.8357	**3.3327**	3.3126	3.609
ISE_ω [$\times 10^{-4}$]	215.41	761.67	1943.3	**1078.7**	431.84	1201.4
ISE_x	383.72	203.42	156.64	**224.75**	319.69	180.53
ISE_y	384.46	205.18	160.62	**225.90**	320.24	182.67
$\|\|e\|\|$ $[m]$	0.99101	0.692	0.59202	**0.73805**	0.90704	0.64656

Tabla 3.15. Resultados de la calibración del controlador PD-Like para el seguimiento de la trayectoria cuadrada.

Índices y Parámetros	Controlador					
	Inicial	**01**	**02**	**03**	**04**	**05**
M_p [%]	3.53	4.27	4.22	**2.97**	2.37	4.08
t_s [s]	6.6329	4.4942	7.2549	**3.4575**	4.1447	7.2804

Considerando todos los parámetros e índices antes expuestos, se tiene que el controlador 03 es aquel que presenta la mejor respuesta. A continuación, en la Ecuación 3.20 se exponen los parámetros del controlador PD-Like de la variación 03.

$$\begin{bmatrix} U_{PDL_v} \\ U_{PDL_\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.145 & 0 \\ 0 & 0.23 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 0.265 & 0 \\ 0 & 0.38 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ref}(t-0.5) \\ \omega_{ref}(t-0.5) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{real} \\ \omega_{real} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} 0.08 & 0 \\ 0 & 0.018 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v_{real}} \\ \dot{\omega_{real}} \end{bmatrix}$$

Ecuación 3.20. Ley de control de la técnica PD-Like con mejores resultados.

Calibración del Controlador PD-Like + Predictor de Smith

La adición del Predictor de Smith requiere un ajuste en los parámetros del controlador, pues al agregar esta estructura el esquema de control se modifica. En la calibración que se realiza en este apartado orientado a la trayectoria cuadrada, no se usarán las variaciones usadas con el controlador PD-Like del apartado anterior, sino que se calibrará con nuevas variaciones para así obtener un resultado más adecuado.

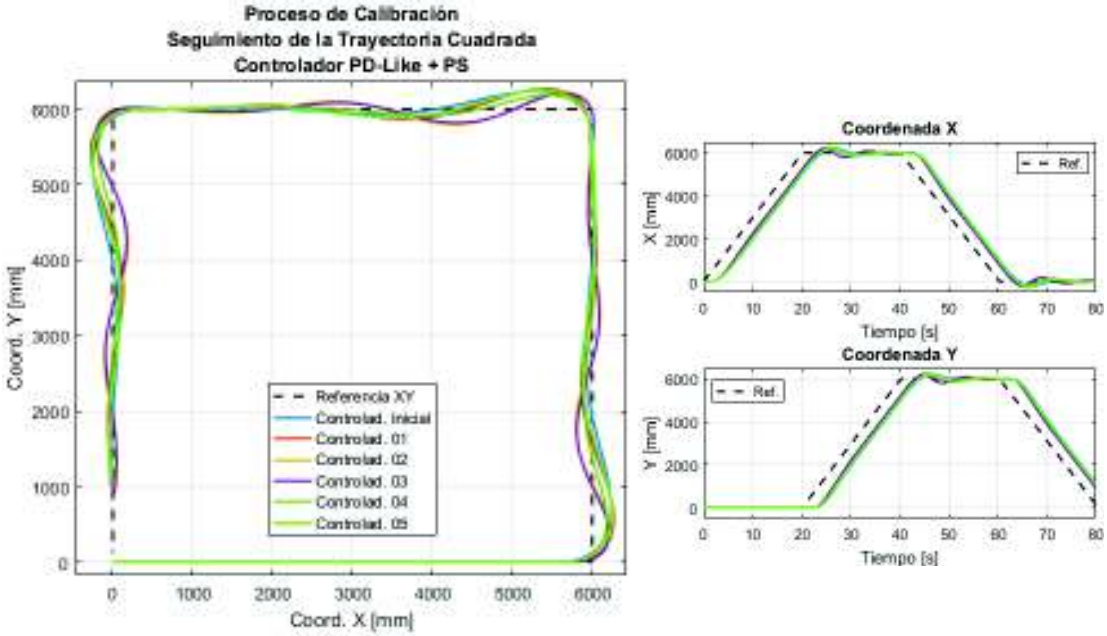


Figura 3.37. Vista del plano XY y coordenadas en función del tiempo.

Como se observa en la Figura 3.37, las variaciones del controlador inicial han producido respuestas oscilantes ante los cambios en la orientación que se genera en las esquinas, esta oscilación que se produce, en primera instancia, parece no ser muy diferente a lo que se obtuvo en la sección anterior con el uso del controlador PD-Like. Para verificar esta afirmación se analiza más detenidamente los índices de rendimiento y los parámetros de la respuesta transitoria. En cuanto al seguimiento de la trayectoria, se puede concluir que el controlador permite al robot seguir la trayectoria propuesta con resultados adecuados en todos los casos. A continuación, en las Figuras 3.38 y 3.39 se presenta un análisis del error de posición $\|e\|$, y de los índices ISE_x e ISE_y.

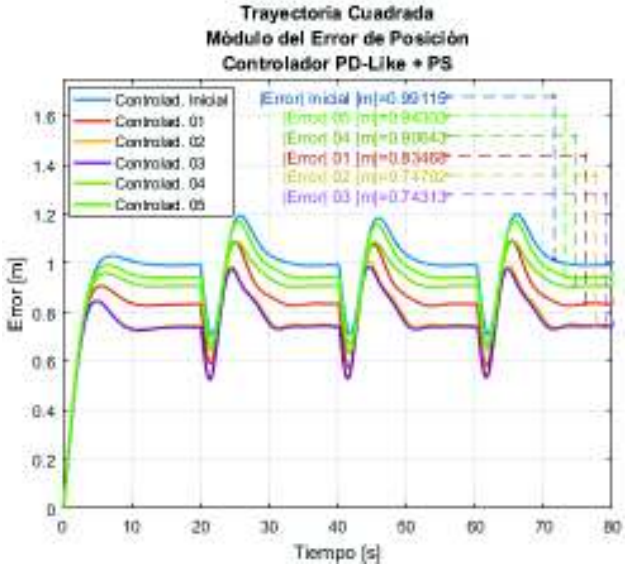


Figura 3.38. Módulo del error de posición $\|e\|$.

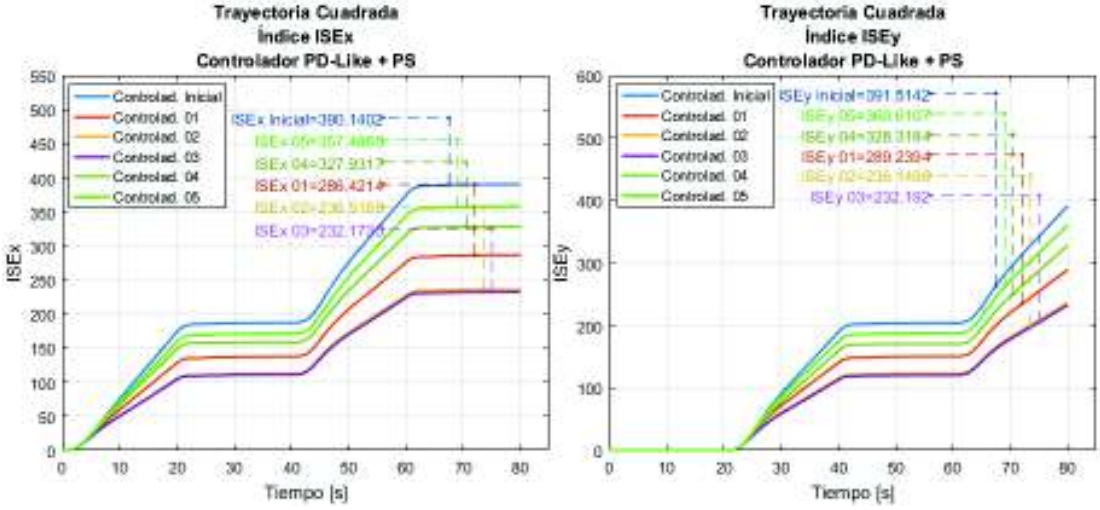


Figura 3.39. Índices de rendimiento ISE_x e ISE_y.

En la Figura 3.38 se puede notar que respecto al módulo del error de posición $\|e\|$, la mayoría de las curvas superan en ciertos periodos de tiempo el límite de 1 [m], algo que

difiere con el análisis del controlador PD-Like. Sin embargo, considerando el valor final, todas las variaciones logran recuperarse y tomar un valor menor al límite. Respecto a los índices ISE_x e ISE_y de la Figura 3.39, se puede verificar que el rango de variación es de 60 unidades, pero al contrastar con los resultados del análisis con el uso del controlador PD-Like, se comprueba que los valores mínimos de los índices ISE de la combinación PD-Like + Predictor de Smith son mayores y por ende menos eficientes respecto a los resultados obtenidos con la técnica anterior.

En la Figura 3.40 se presentan los resultados obtenidos en el análisis de la etapa transitoria de cada una de las variaciones del controlador PD-Like + Predictor de Smith. Cabe señalar que las variaciones 1, 4, 5 y el controlador inicial sintonizado tienen los sobrepicos máximos en la esquina superior izquierda, mientras que las variaciones 2 y 3 tienen los sobrepicos máximos en la esquina inferior derecha de la trayectoria cuadrada, por lo que se aislaron los lados adyacentes a la esquina en estudio, como se especificó en la Figura 3.35.

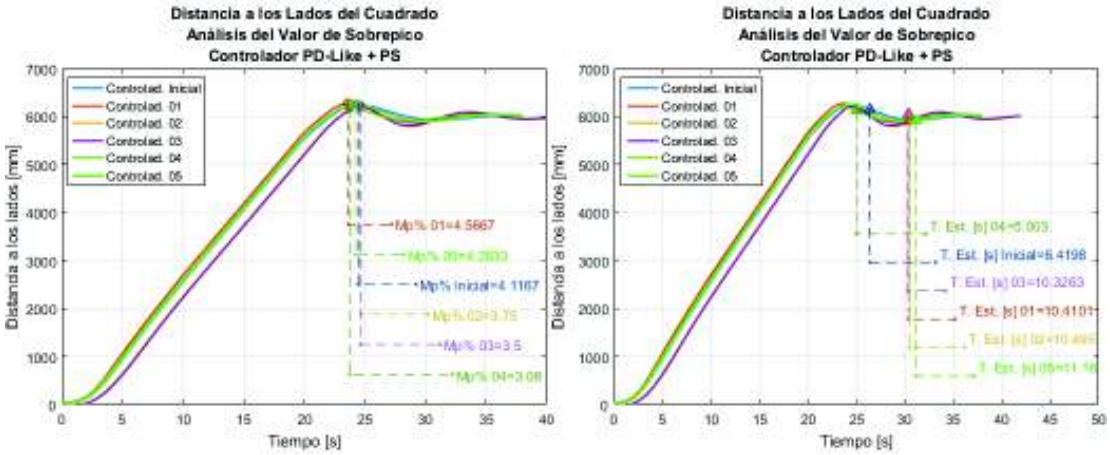


Figura 3.40. Análisis del estado transitorio de la distancia del robot hacia el lado.

Respecto a los resultados del apartado anterior, con el uso del controlador PD-Like, las variaciones analizadas con la técnica PD-Like en combinación con el Predictor de Smith han tenido resultados que muestran un decaimiento tanto en el Máximo Sobrepico $M_p\%$ asi como en el tiempo de establecimiento t_s, aunque esta caída de rendimiento no es tan pronunciada. En conclusión, se puede notar que al agregar en Predictor de Smith la respuesta se vuelve más oscilante debido a una mejor realimentación de la velocidad lineal y angular, lo que se comprueba específicamente analizando el tiempo de establecimiento.

En la Tabla 3.16 se tiene un resumen de los parámetros e índices para la elección de la variación del controlador con la mejor respuesta, cabe recalcar que esta elección se realizará tomando en cuenta los lineamientos especificados previamente usados.

Tabla 3.16. Resultados de la calibración del controlador PD-Like + Predictor de Smith para el seguimiento de la trayectoria cuadrada.

Índices y Parámetros	Controlador					
	Inicial	**01**	**02**	**03**	**04**	**05**
ISE_v	3.5199	3.4955	3.4597	3.4076	**3.3754**	3.5307
ISE_ω $[\times 10^{-4}]$	197.98	363.58	804.67	828.43	**356.89**	249.68
ISE_x	390.14	286.42	236.52	232.17	**327.93**	357.49
ISE_y	391.51	289.24	236.15	232.19	**328.32**	360.61
$\|\|e\|\|$ $[m]$	0.99115	0.83468	0.74702	0.74313	**0.90643**	0.94303
M_p $[\%]$	4.12	4.57	3.75	3.5	**3.08**	4.28
t_s $[s]$	6.4198	10.4101	10.495	10.3263	**5.003**	11.1855

Considerando todos los parámetros e índices antes expuestos, se tiene que el controlador 04 es aquel que presenta la mejor respuesta. A continuación, en la Ecuación 3.21 se exponen los parámetros del controlador PD-Like + Predictor de Smith de la variación 04.

$$\begin{bmatrix} U_{PDL_v} \\ U_{PDL_\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.155 & 0 \\ 0 & 0.24 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 0.21 & 0 \\ 0 & 0.31 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ref}(t-0.5) \\ \omega_{ref}(t-0.5) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{real} \\ \omega_{real} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} 0.07 & 0 \\ 0 & 0.024 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{real} \\ \dot{\omega}_{real} \end{bmatrix}$$

Ecuación 3.21. Ley de control de la técnica PD-Like + PS con mejores resultados.

Calibración del Controlador SMC + Predictor de Smith

En la Figura 3.41 se puede observar la respuesta del seguimiento de la trayectoria cuadrada realizada con las 5 variaciones realizadas.

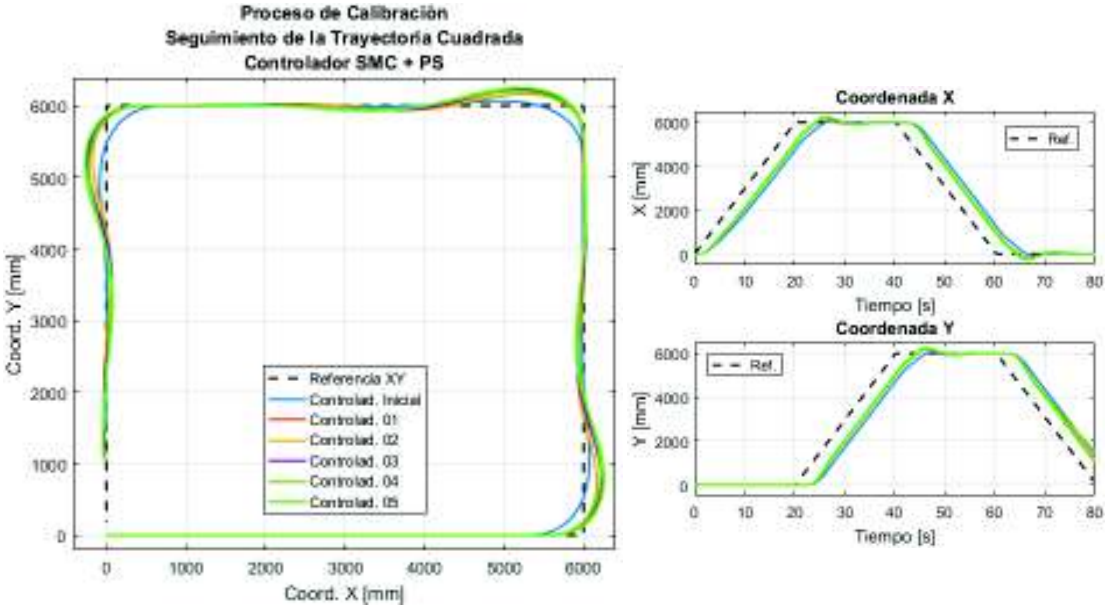


Figura 3.41. Vista del plano XY para el seguimiento de la trayectoria cuadrada.

Al observar la figura anterior se puede notar que el uso del controlador SMC + Predictor de Smith nos provee de una respuesta menos oscilante, las oscilaciones se reducen en gran medida luego de transitar por la cuarta parte de cada lado. Hay que nota que las oscilaciones iniciales ante el cambio en la referencia de orientación son menos pronunciadas y duran un tiempo menor a las oscilaciones vistas con el uso de los anteriores controladores, esto se verifica cuantitativamente más adelante.

En las Figuras 3.42 y 3.43 se presentan las gráficas del módulo de error de posición $\|e\|$ y los índices ISE_x e ISE_y.

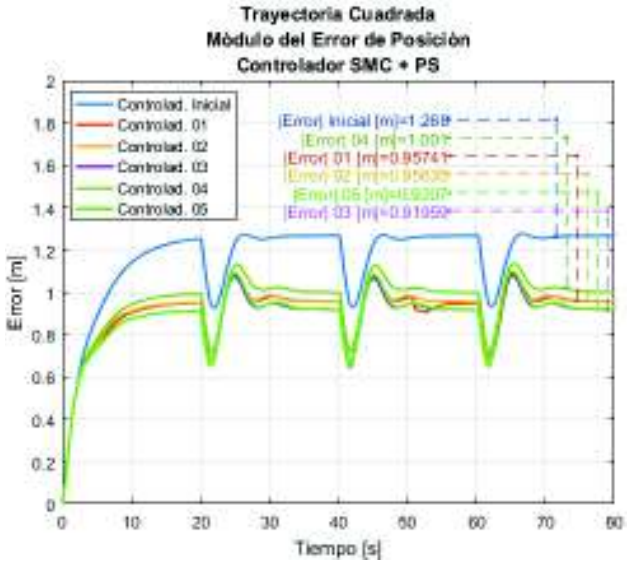


Figura 3.42. Módulo del error de posición $\|e\|$.

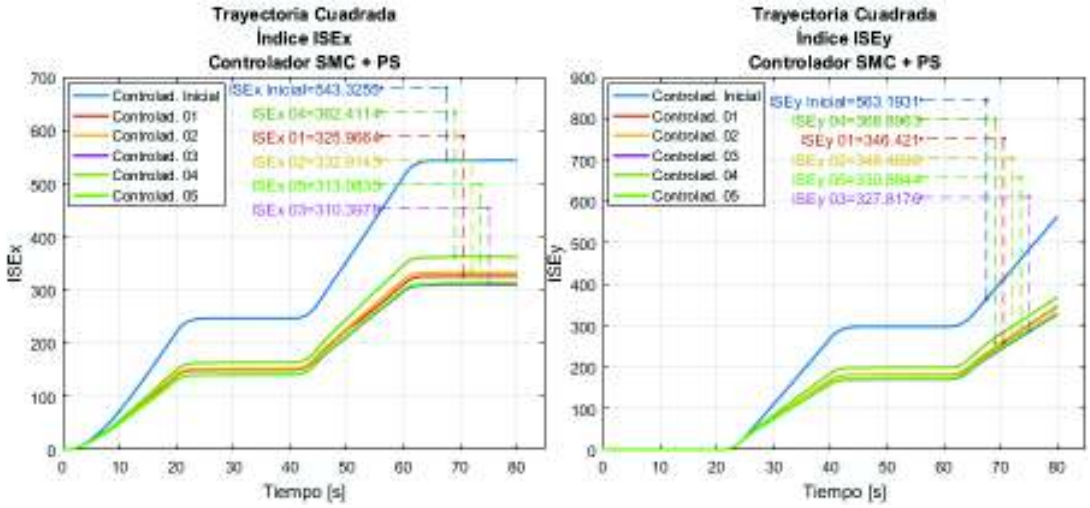


Figura 3.43. Índices de rendimiento ISE_x e ISE_y.

Al verificar los resultados de las Figuras 3.42 y 3.43 contrastándolos con los resultados obtenidos con las técnicas de control anteriores, se puede notar que los índices de

rendimiento ISE_x e ISE_y, en el caso de la técnica de control en estudio, posee valores que se encuentran en el promedio, que está en alrededor de 350. Con respecto al módulo del error $\|e\|$, los resultados muestran un promedio de 95 [cm] lo que contrasta con los anteriores controladores con los que se pudo obtener errores de posición más bajos, esto se debe a que con el controlador SMC + PS cuán más pequeño es el error $\|e\|$ la operación tiende a ser más oscilatoria e inclusive en ciertas ocasiones se tienen operaciones inestables. En la Figura 3.44 se observan las curvas utilizadas para el análisis del estado transitorio de todas las variaciones del controlador SMC + PS, que se producen en las esquinas de la trayectoria cuadrada.

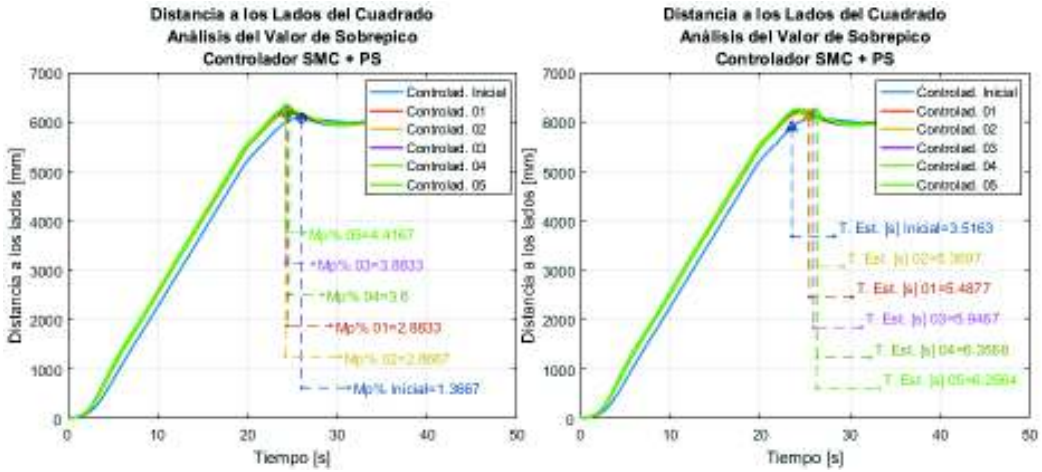


Figura 3.44. Análisis del estado transitorio de la distancia del robot hacia el lado.

La gráfica anterior se obtiene a partir del análisis que se realiza de los lados que conforman la esquina superior izquierda de la trayectoria cuadrada, que es donde se produjeron los mayores sobrepicos de todas las variaciones del controlador en análisis. Respecto al tiempo de establecimiento t_s se observa que los valores no son menores en todos los casos a 10 [s], lo que confirma que se tiene un estado transitorio que dura hasta alrededor de la mitad de cada lado, y que se refleja en la oscilación del robot en el seguimiento hasta llegar a este punto. En relación con el máximo sobrepico, todas las variaciones del controlador inicial sintonizado no superan el 6 %, lo que está en el límite superior del rango de variación que se ha obtenido con las anteriores técnicas de control.

En la Tabla 3.17 se puede observar un resumen de todos los parámetros e índices de interés de cada una de las variaciones de la técnica de control en análisis, que nos permiten definir a la variación con la mejor respuesta según los lineamientos especificados al inicio.

Tabla 3.17. Resultados de la calibración del controlador SMC + Predictor de Smith para el seguimiento de la trayectoria cuadrada.

Índices y Parámetros	Controlador					
	Inicial	**01**	**02**	**03**	**04**	**05**
ISE_v	3.5226	3.2528	**3.3285**	3.2428	3.2392	3.2673
ISE_ω $[\times 10^{-4}]$	112.05	251.97	**245.76**	244.25	187.44	219.52
ISE_x	543.33	325.97	**332.91**	310.39	362.41	313.08
ISE_y	563.19	346.42	**348.47**	327.82	368.89	330.88
$\|\|e\|\|$ $[m]$	1.268	0.95741	**0.95635**	0.91959	1.001	0.9207
M_p $[\%]$	1.37	2.88	**2.87**	3.88	3.6	4.42
t_s $[s]$	3.5163	5.4877	**5.3697**	5.9467	6.3568	6.2564

Considerando todos los parámetros e índices antes expuestos, se tiene que el controlador 02 es aquel que presenta la mejor respuesta. A continuación, en las Ecuaciones 3.22, 3.23, y 3.24 se exponen los parámetros del controlador SMC + Predictor de Smith de la variación 02.

$$\begin{bmatrix} U_{SMC_v} \\ U_{SMC_\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.38909 & 0 \\ 0 & 0.4382592 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{real} \\ \dot{\omega}_{real} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{real} \\ \omega_{real} \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} 24.59 & 0 \\ 0 & 9.3 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \right) \begin{bmatrix} \dot{v}_{ref}(t-0.5) \\ \dot{\omega}_{ref}(t-0.5) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 9000 \dfrac{S_v(t)}{|S_v(t)| + 8500} \\ 7000 \dfrac{S_\omega(t)}{|S_\omega(t)| + 7000} \end{bmatrix}$$

Ecuación 3.22. Ley de control de la técnica SMC + PS con mejores resultados.

Donde:

$$S_v(t) = 0.77\left(0.027\ v_{ref}(t-0.5) - v_{real}\right) - 0.288\ \dot{v}_{real}$$

Ecuación 3.23. Superficie deslizante para la velocidad lineal.

$$S_\omega(t) = 0.945\left(0.0575\ \omega_{ref}(t-0.5) - \omega_{real}\right) - 0.525\ \dot{\omega}_{real}$$

Ecuación 3.24. Superficie deslizante para la velocidad angular.

Calibración de Controladores para la Trayectoria Lemniscata de Bernoulli.

La calibración de los controladores en el seguimiento de la trayectoria llamada Lemniscata de Bernoulli se la realiza tomando en cuenta los siguientes lineamientos:

- La trayectoria posee 3 [m] de radio.
- La velocidad lineal de referencia es de 0.3 [m/s].
- El retardo de ida/vuelta que se tiene es de 500 [ms].
- Se desea que el módulo del error $\|e\|$ sea menor a 1 [m] de acuerdo con el valor de tolerancia desarrollado en la Ecuación 3.14.
- Índices ISE_x, ISE_y, ISE_v e ISE_ω adecuados.

Hay que notar que en la calibración de la trayectoria en estudio no se considera el análisis del estado transitorio, esto debido en gran medida a que no se puede realizar una transformación matemática adecuada para convertir los puntos que conforman la trayectoria real del robot en una gráfica que se asemeje a una respuesta de tipo escalón, lo que sí se pudo realizar con la trayectoria circular y cuadrada. Esta imposibilidad es debido a la geometría propia de la Lemniscata de Bernoulli, por lo que no se analizarán parámetros tales como máximo sobrepico M_p y tiempo de establecimiento t_s.

Calibración del Controlador PD-Like

El proceso de calibración que se realizó para el seguimiento de la trayectoria de nombre Lemniscata de Bernoulli, con el uso de la técnica PD-Like, obtuvo los siguientes resultados:

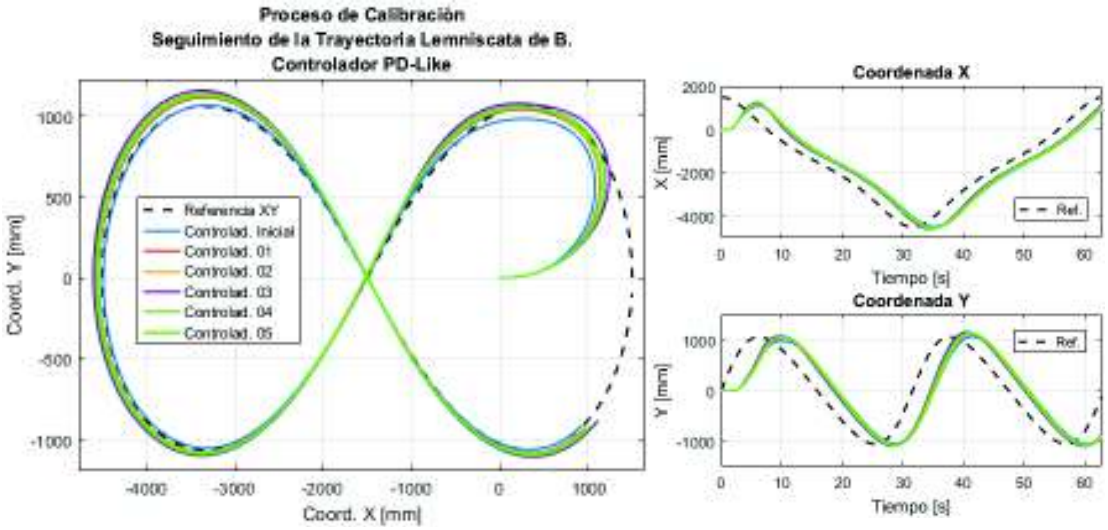


Figura 3.45. Vista del plano XY para el seguimiento de la trayectoria Lemniscata de B.

En la Figura 4.45 se observa el plano XY donde la plataforma Pioneer 3DX realiza el seguimiento de la trayectoria, se puede verificar que los cambios en la orientación provocan que, a partir de la posición inicial del robot, una vez que se alcanza la trayectoria no se permanezca en ella en el resto del trayecto que falta, sino que existan zonas donde se

vuelve a perder el seguimiento, como por ejemplo en la parte izquierda de la lemniscata. Esto se produce por la presencia del retardo fijo y por el cambio constante en la orientación de este tipo de trayectoria. A continuación, en las Figura 3.46 y 3.47 se presentan los resultados obtenidos en el módulo del error de posición $\|e\|$ y los índices de rendimiento ISE_x e ISE_y.

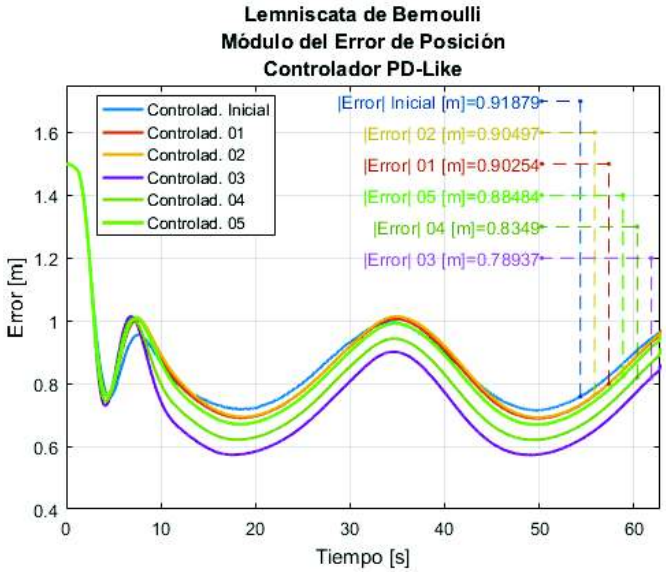


Figura 3.46. Módulo del error de posición $\|e\|$.

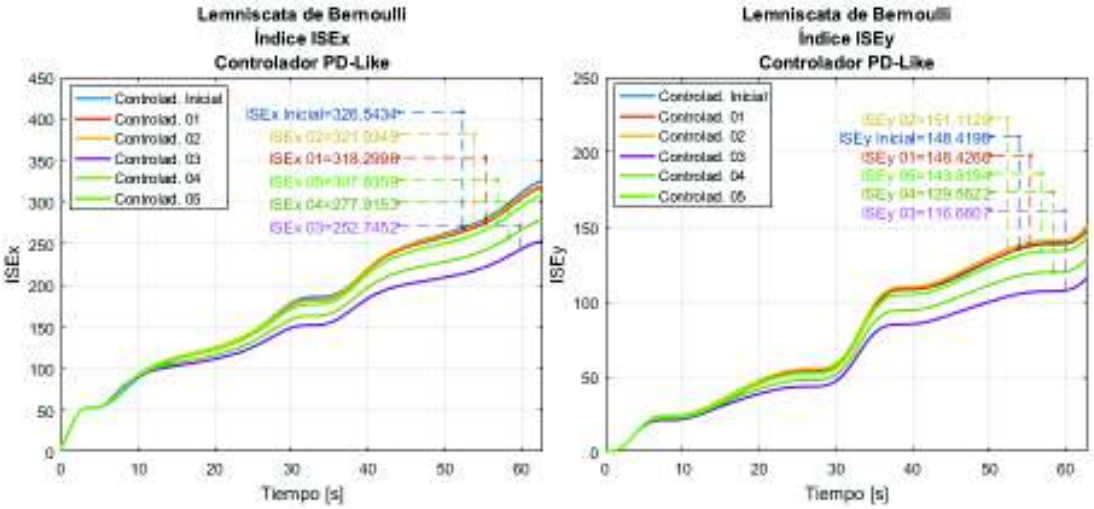


Figura 3.47. Índices de rendimiento ISE_x e ISE_y.

De acuerdo con las figuras anteriores, se puede notar que la gráfica del módulo del error de posición $\|e\|$ a través del tiempo de simulación, en todos los casos, el valor final es menor a 1 [m], acorde a los lineamientos establecidos e incluso los picos que pudiesen sobrepasar este valor límite, no lo hacen de manera prolongada en la mayoría de las variaciones del controlador. Por otra parte, los índices de rendimiento ISE_x e ISE_y nos muestran un comportamiento estable, cuyos rangos de variación entre la mejor y peor

respuesta no son muy pronunciadas, en cada índice se puede notar que la variación 03 posee los valores más adecuados. En la Tabla 3.18 se puede observar un resumen de los índices y parámetros de interés para elegir a la variación del controlador PD-Like con mejor respuesta.

Tabla 3.18. Resultados de la calibración del controlador PD-Like para el seguimiento de la trayectoria Lemniscata de B.

Índices y Parámetros	Controlador					
	Inicial	**01**	**02**	**03**	**04**	**05**
ISE_v	4.4025	4.0657	4.0605	**4.2798**	4.1453	4.044
ISE_ω $[\times 10^{-4}]$	118.5	119.03	116.05	**199.62**	162.34	123.21
ISE_x	326.54	318.29	321.03	**252.75**	277.92	307.84
ISE_y	148.42	148.43	151.11	**116.68**	129.56	143.82
$\|\|e\|\|$ $[m]$	0.91879	0.90254	0.90497	**0.78937**	0.8349	0.88484

Considerando todos los parámetros e índices antes expuestos, se tiene que el controlador 03 es aquel que presenta la mejor respuesta. A continuación, en la Ecuación 3.25 se exponen los parámetros del controlador PD-Like de la variación 03.

$$\begin{bmatrix} U_{PDL_v} \\ U_{PDL_\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.24 & 0 \\ 0 & 0.3 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 0.16 & 0 \\ 0 & 0.29 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ref}(t-0.5) \\ \omega_{ref}(t-0.5) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{real} \\ \omega_{real} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} 0.07 & 0 \\ 0 & 0.018 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{real} \\ \dot{\omega}_{real} \end{bmatrix}$$

Ecuación 3.25. Ley de control de la técnica PD-Like con mejores resultados.

Calibración del controlador PD-Like + Predictor de Smith

El resultado del seguimiento de la trayectoria se puede verificar en la Figura 3.48, que se observa a continuación.

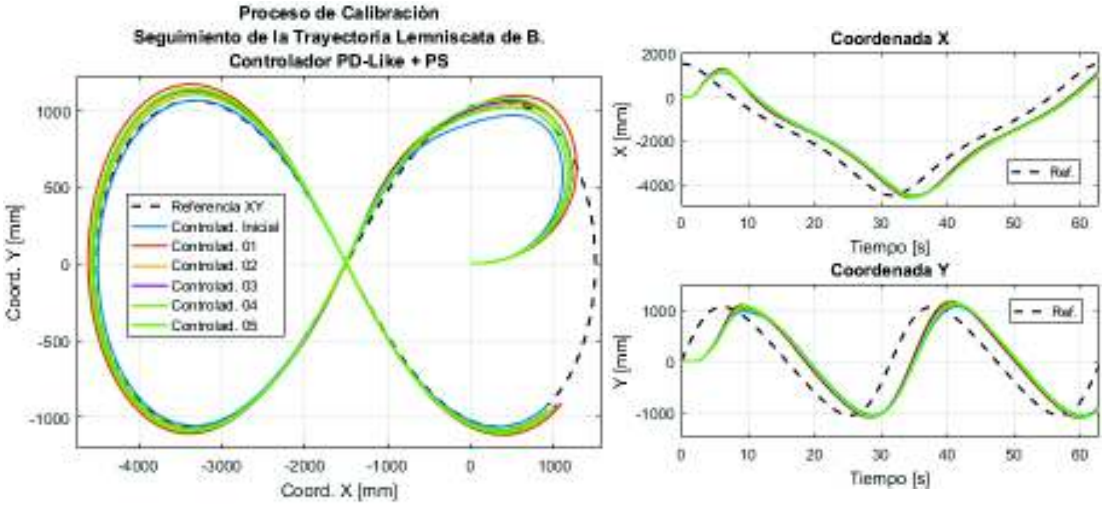


Figura 3.48. Vista del plano XY para el seguimiento de la trayectoria Lemniscata de B.

La calibración del controlador PD-Like en combinación con el uso del Predictor de Smith para el seguimiento de la trayectoria de nombre Lemniscata de Bernoulli, se lo realiza en base al mismo procedimiento que se aplicó en el apartado anterior. Al analizar la Figura 3.48 se puede notar que la presencia del Predictor de Smith en el esquema de control, al igual que lo ocurrido en el análisis de las anteriores trayectorias, presenta una pérdida de trayectoria, lo que afecta directamente a los índices de rendimiento y parámetros de análisis. Con cada una de las variaciones se ha tratado de reducir estos efectos negativos, logrando buenos resultados en el seguimiento de la trayectoria.

A continuación, en las Figuras 3.49 y 3.50 se presentan el módulo del error de posición y los índices de rendimiento ISE de las coordenadas X e Y.

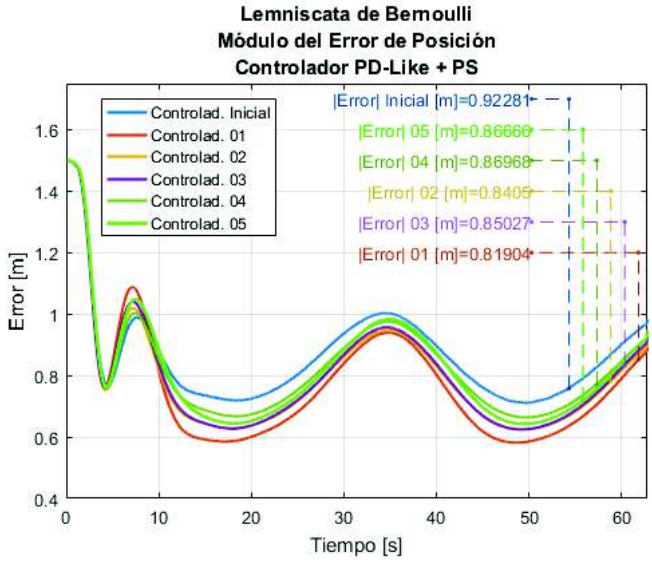


Figura 3.49. Módulo del error de posición $\|e\|$.

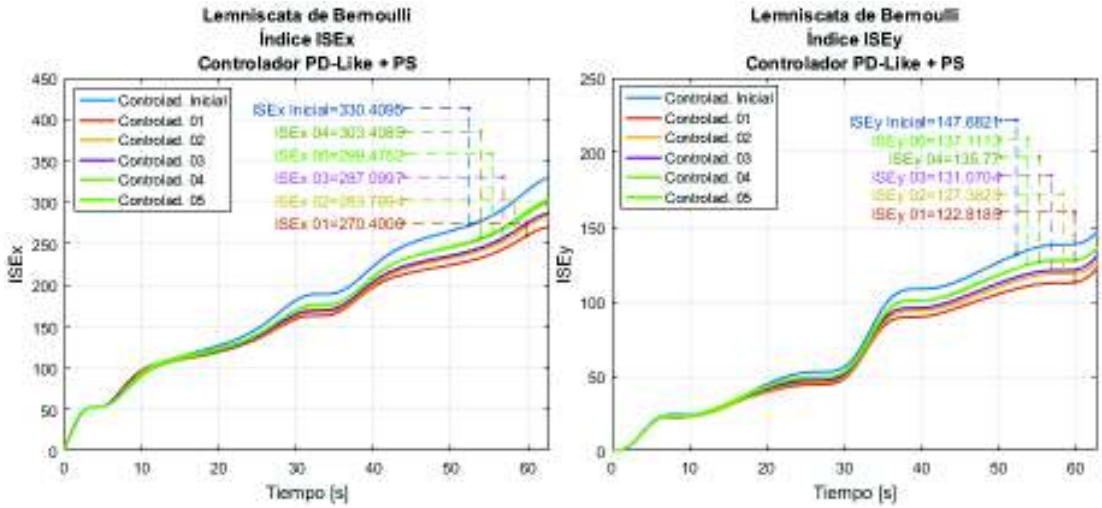


Figura 3.50. Índices de rendimiento ISE_x e ISE_y.

Al observar la Figura 3.49, se puede notar que exceptuando un pico inicial producido en la etapa de alcanzabilidad de la trayectoria, en el resto de la simulación la curva oscila, pero permanece bajo el límite máximo del error correspondiente a 1[m], teniendo un valor promedio de todas las variaciones de 85 [cm]. En la Figura 3.50, en los índices de rendimiento ISE_x e ISE_y se puede notar un rango general de variación del orden de 60 unidades en la coordenada X y 20 unidades en la coordenada Y.

En la Tabla 3.19 se observa un resumen de todos los índices y parámetros que determinan, según los lineamientos preestablecidos, la mejor variación desarrollada para el seguimiento de la trayectoria con el uso del controlador PD-Like + Predictor de Smith.

Tabla 3.19. Resultados de la calibración del controlador PD-Like + Predictor de Smith para el seguimiento de la trayectoria Lemniscata de B.

Índices y Parámetros	**Controlador**					
	Inicial	**01**	**02**	**03**	**04**	**05**
ISE_v	4.3011	**4.2215**	4.1166	4.0905	4.0956	4.0353
ISE_ω [$\times 10^{-4}$]	116.31	**134.24**	132.19	125.52	120.45	109.25
ISE_x	330.41	**270.40**	283.79	287.09	303.41	299.48
ISE_y	147.68	**122.82**	127.36	131.07	135.77	137.11
$\|e\|$ $[m]$	0.92281	**0.81904**	0.8405	0.85027	0.86968	0.86666

Considerando todos los parámetros e índices antes expuestos, se tiene que el controlador 01 es aquel que presenta la mejor respuesta. A continuación, en la Ecuación 3.26 se exponen los parámetros del controlador PD-Like + Predictor de Smith de la variación 01.

$$\begin{bmatrix} U_{PDL_v} \\ U_{PDL_\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.135 & 0 \\ 0 & 0.24 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 0.255 & 0 \\ 0 & 0.33 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ref}(t-0.5) \\ \omega_{ref}(t-0.5) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{real} \\ \omega_{real} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} 0.07 & 0 \\ 0 & 0.018 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{real} \\ \dot{\omega}_{real} \end{bmatrix}$$

Ecuación 3.26. Ley de control de la técnica PD-Like + PS con mejores resultados.

Calibración del Controlador SMC + Predictor de Smith

La calibración del controlador SMC en combinación con el Predictor de Smith se lo realiza de acuerdo con el procedimiento seguido en la calibración de las anteriores trayectorias y técnicas de control. Los resultados del seguimiento de la trayectoria denominada Lemniscata de Bernoulli se pueden observar en la Figura 3.51.

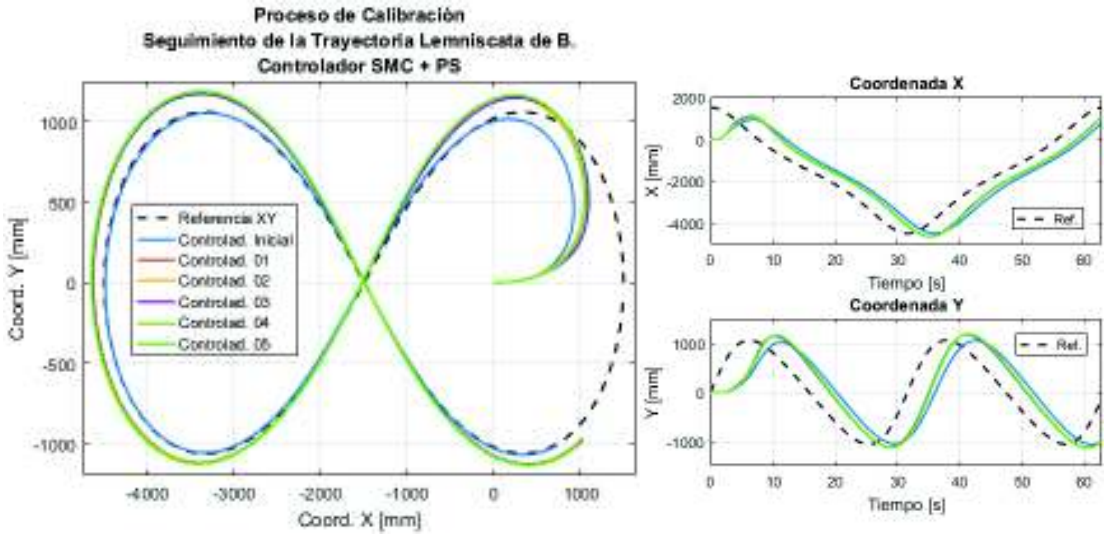


Figura 3.51. Vista del plano XY para el seguimiento de la trayectoria Lemniscata de B.

En la figura anterior se puede notar que el robot realiza un seguimiento con una pronunciada salida respecto a la referencia de trayectoria. Esto provocado principalmente por las características propias del controlador SMC + Predictor de Smith, y de la velocidad requerida para cumplir con los lineamientos de calidad en el seguimiento de la trayectoria.

A continuación, se presentan los parámetros de calidad mencionados, las gráficas que se pueden observar es la evolución del módulo del error de posición del robot a través del tiempo, y los índices de rendimiento ISE_x e ISE_y.

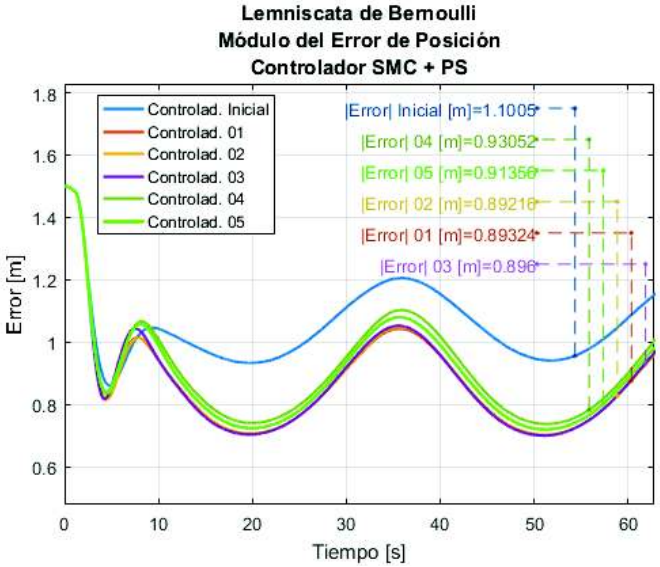


Figura 3.52. Módulo del error de posición $\|e\|$.

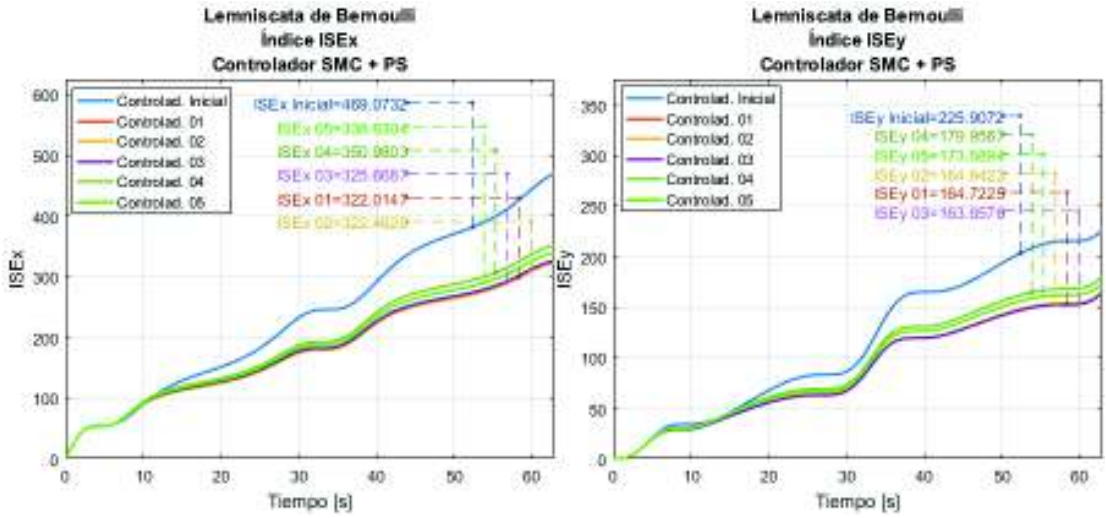


Figura 3.53. índices de rendimiento ISE_x e ISE_y.

Al analizar la Figuras 3.52 y 3.53 se puede notar que, a diferencia de los resultados obtenidos con los anteriores controladores, con el uso de la técnica SMC + Predictor de Smith todas las curvas del error superan el límite de 1 [m] en algún punto de la simulación. Respecto a los índices de rendimiento ISE_x e ISE_y, los rangos de variación de ambos índices bordean las dos decenas, exceptuando la respuesta del controlador inicial sintonizado que posee los valores más deficientes respecto a estos parámetros.

A continuación, en la Tabla 3.20 se presenta un resumen de los parámetros e índices de cada una de las variaciones analizadas para escoger a la que tuvo la mejor respuesta.

Tabla 3.20. Resultados de la calibración del controlador SMC+ Predictor de Smith para el seguimiento de la trayectoria Lemniscata de B.

Índices y Parámetros	**Controlador**					
	Inicial	**01**	**02**	**03**	**04**	**05**
ISE_v	4.5107	3.7334	**3.7258**	3.8004	3.6816	3.6951
ISE_ω $[\times 10^{-4}]$	44.29	60.13	**58.68**	66.35	55.29	57.98
ISE_x	469.07	322.01	**322.46**	325.67	350.98	388.63
ISE_y	225.91	164.72	**164.94**	163.86	179.96	173.59
$\|\|e\|\|$ $[m]$	1.1005	0.89423	**0.89216**	0.896	0.93052	0.91356

Considerando todos los parámetros e índices antes expuestos, se tiene que el controlador 02 es aquel que presenta la mejor respuesta. A continuación, en las Ecuaciones 3.27, 3.28 y (3.29) se exponen los parámetros del controlador SMC + Predictor de Smith de la variación 02.

$$\begin{bmatrix} U_{SMC_v} \\ U_{SMC_\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.15282 & 0 \\ 0 & 0.38547 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{real} \\ \dot{\omega}_{real} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{real} \\ \omega_{real} \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} 30.97 & 0 \\ 0 & 11.91 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \right) \begin{bmatrix} \dot{v}_{ref}(t-0.5) \\ \dot{\omega}_{ref}(t-0.5) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 6000 \dfrac{S_v(t)}{|S_v(t)| + 6000} \\ 7000 \dfrac{S_\omega(t)}{|S_\omega(t)| + 7000} \end{bmatrix}$$

Ecuación 3.27. Ley de control de la técnica SMC + PS con mejores resultados.

Donde:

$$S_v(t) = 0.798\left(0.027\, v_{ref}(t-0.5) - v_{real}\right) - 0.237\, \dot{v}_{real}$$

Ecuación 3.28. Superficie deslizante para la velocidad lineal.

$$S_\omega(t) = 0.955\left(0.0555\, \omega_{ref}(t-0.5) - \omega_{real}\right) - 0.4\, \dot{\omega}_{real}$$

Ecuación 3.29. Superficie deslizante para la velocidad angular.

3.3. Comparación de Controladores Calibrados para el Seguimiento de Trayectorias

En la presente sección se realiza la comparación de los controladores que fueron calibrados en el apartado 3.2, estos controladores representan las variaciones que mejor respuesta de velocidad lineal, velocidad angular y seguimiento de trayectorias presentaron en el proceso de sintonización y calibración, por lo que se realiza una comparación para cada una de las trayectorias de las técnicas de control implementadas y se analizan los resultados de manera cuantitativa usando índices de rendimiento y de seguimiento de la trayectoria.

Resultados en el Seguimiento de la Trayectoria Circular

Una vez que se ha realizado la calibración de las 3 técnicas de control en estudio, se presentan los resultados de los controladores con mejor respuesta de manera conjunta, esto sirve para realizar una comparación del rendimiento de cada controlador en iguales condiciones y bajo las mismas especificaciones de desempeño.

Los lineamientos de la trayectoria y de su seguimiento son los mismos que se usaron en la sección anterior en el proceso de calibración de la trayectoria circular. El resultado en el seguimiento de la trayectoria se presenta en la Figura 3.54.

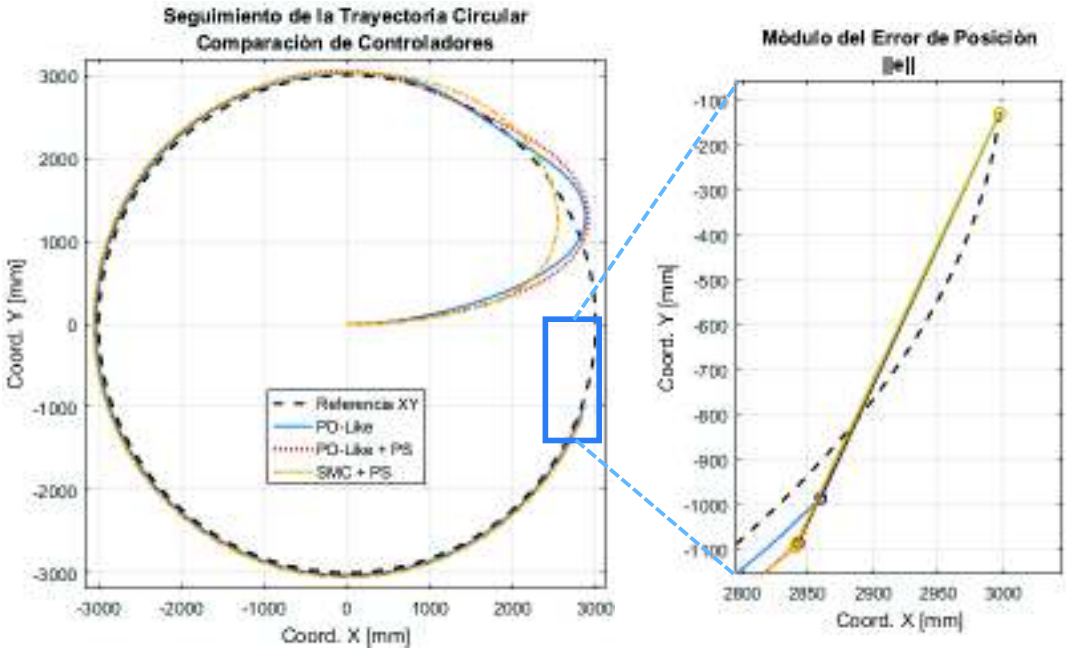


Figura 3.54. Vista del plano XY ante el seguimiento de la trayectoria circular.

Como se puede observar en la figura anterior, la respuesta del controlador SMC + Predictor de Smith produce la menor pérdida o sobrepico de trayectoria en la etapa de alcanzabilidad, por su parte la técnica PD-Like es la más rápida en estabilizarse en el seguimiento. El controlador PD-Like + Predictor de Smith posee una buena respuesta, a pesar de que la salida de la trayectoria es más pronunciada y la estabilización en el seguimiento es más retardada.

En cuanto al módulo del error de posición $\|e\|$, se observa que el robot que usa la técnica PD-Like es aquel que más cerca queda de la referencia de trayectoria. En la Figura 3.55 se puede analizar el módulo del error de posición y en la Figura 3.56 se observa los índices ISE_x e ISE_y.

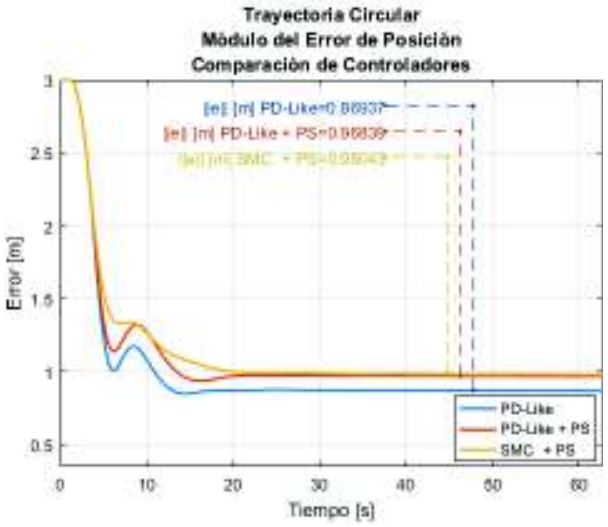


Figura 3.55. Módulo del error de posición.

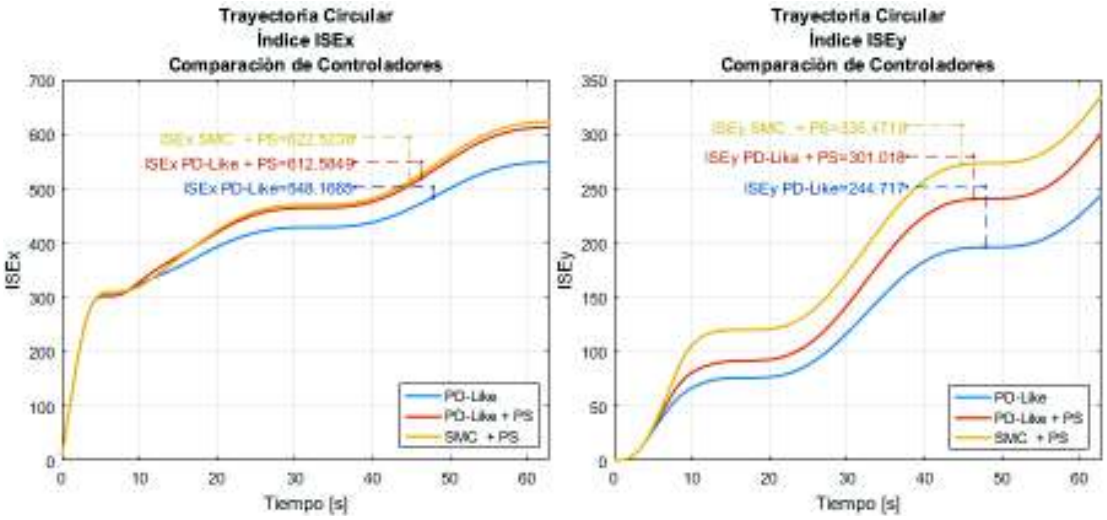


Figura 3.56. Índices ISE_x e ISE_y para la comparación del desempeño de las 3 técnicas de control.

Al analizar las gráficas anteriores se comprueba que la técnica de control que mejores resultados presenta, respecto al módulo del error de posición, índices ISE_x e ISE_y, es la técnica PD-Like, el segundo mejor desempeño lo obtuvo la técnica PD-Like + Predictor de Smith, la técnica que obtuvo los resultados más deficientes fue la combinación del controlador SMC + Predictor de Smith. En la Figura 3.57 se observa el análisis del estado transitorio de los 3 controladores.

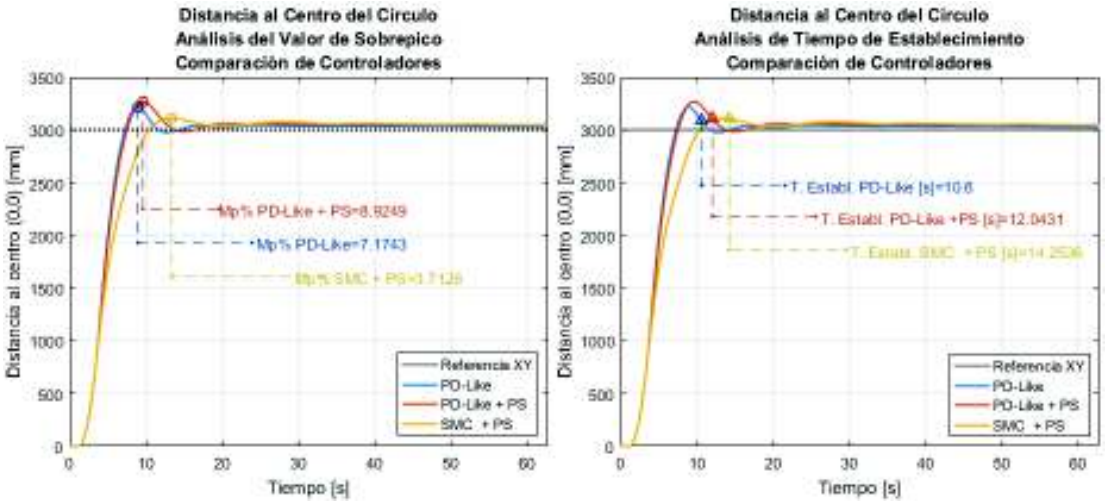


Figura 3.57. Análisis del estado transitorio de la curva de distancia al centro del círculo.

Contrastando los resultados se puede verificar que el menor tiempo de establecimiento y lo tiene el controlador PD-Like y que el menor sobrepico lo tiene la técnica SMC + Predictor de Smith, esto confirma lo antes analizado en la Figura 3.54. El resto de los resultados respecto a los controladores PD-Like + Predictor de Smith y SMC + Predictor de Smith

también se confirman con los datos expuestos en la figura anterior. A continuación, se presentan los resultados de la respuesta de la velocidad a través del tiempo y los índices ISE_v e ISE_ω.

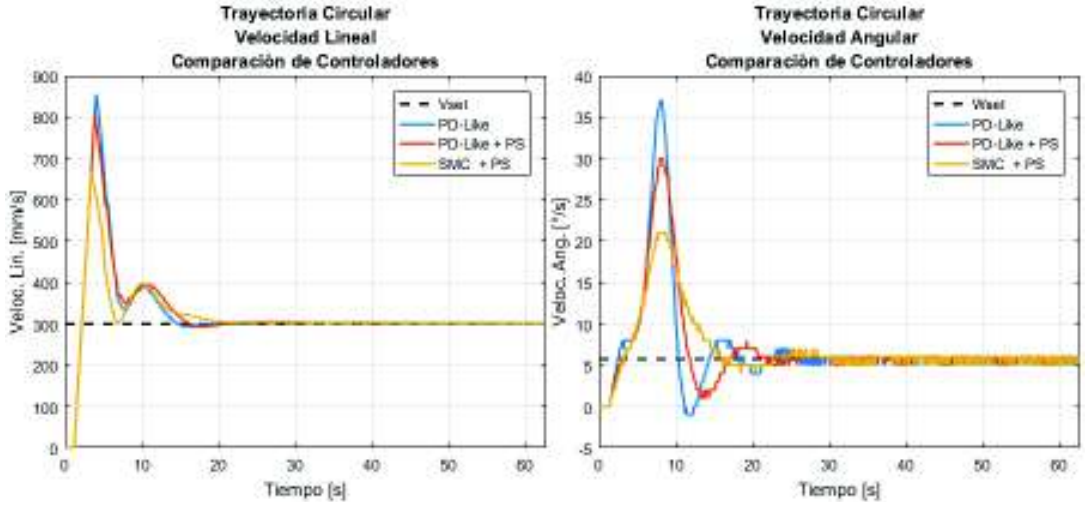


Figura 3.58. Velocidad lineal y angular vs. tiempo.

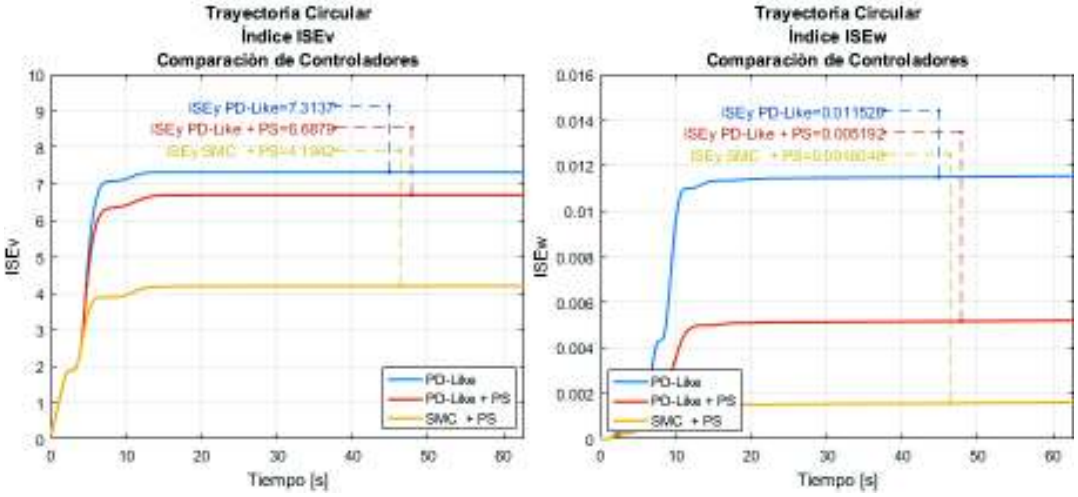


Figura 3.59. Gráficas de los índices ISE_v e ISE_ω.

Al analizar las Figuras 3.58 y 3.59 se puede observar que, respecto a la velocidad lineal y angular, la técnica que mejores índices ISE_v e ISE_ω es el controlador PD-Like + Predictor de Smith, esto debido a una mejor realimentación proporcionada por el predictor. Finalmente, se puede concluir que respecto al seguimiento de la trayectoria circular el controlador que engloba cuantitativamente los mejores resultados es el controlador PD-Like.

Resultados en el Seguimiento de la Trayectoria Cuadrada

Considerando los resultados obtenidos en la calibración de la trayectoria cuadrada realizada en la sección 3.2, se realiza la comparación de las mejores variaciones obtenidas considerando los lineamientos y especificaciones usadas con anterioridad. A continuación, se presenta la vista del plano XY respecto al seguimiento de la trayectoria.

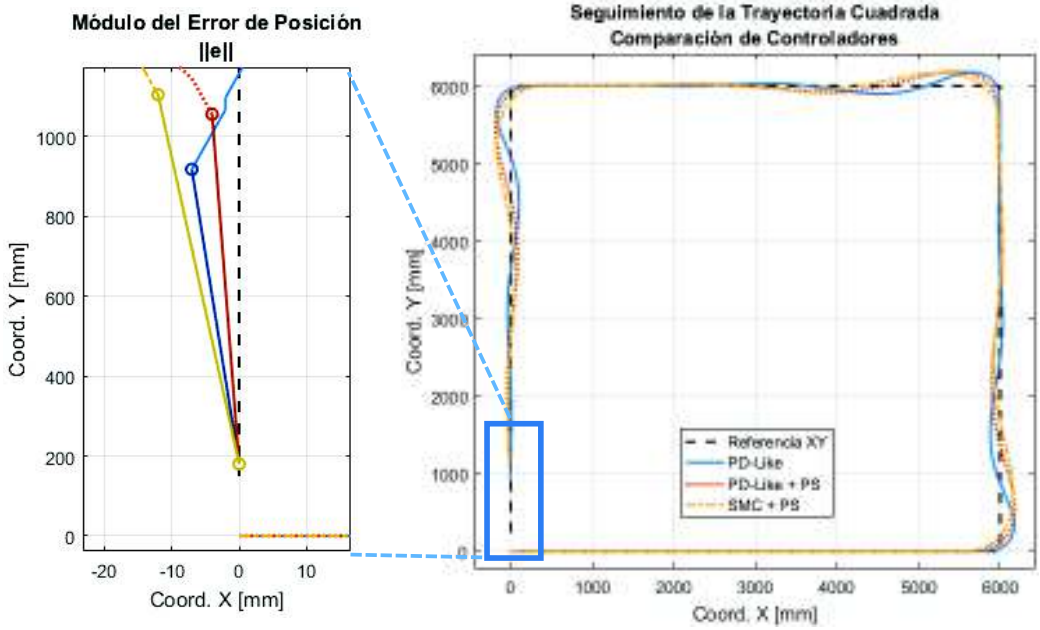


Figura 3.60. Vista del plano XY para el seguimiento de la trayectoria cuadrada.

En la Figura 3.60 se puede observar que el seguimiento de la trayectoria es satisfactorio para cada uno de los controladores, debido a que no se tiene una salida muy pronunciada en las esquinas del cuadrado, y que posee una adecuada recuperación del trayecto sin oscilaciones muy prolongadas. Con estos resultados se puede determinar que la técnica que mejores resultados posee es el controlador PD-Like.

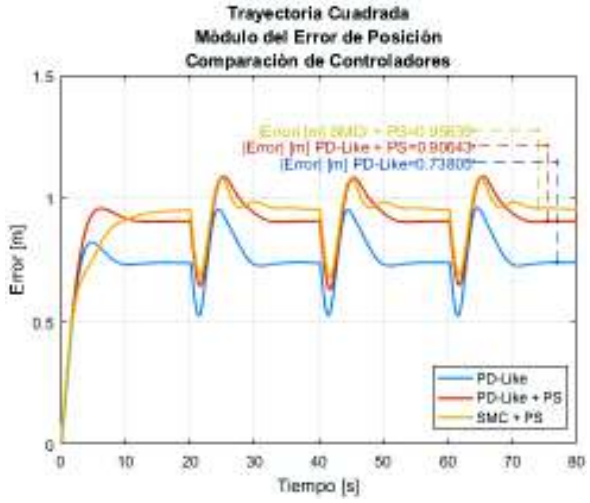


Figura 3.61. Módulo del error de posición $\|e\|$.

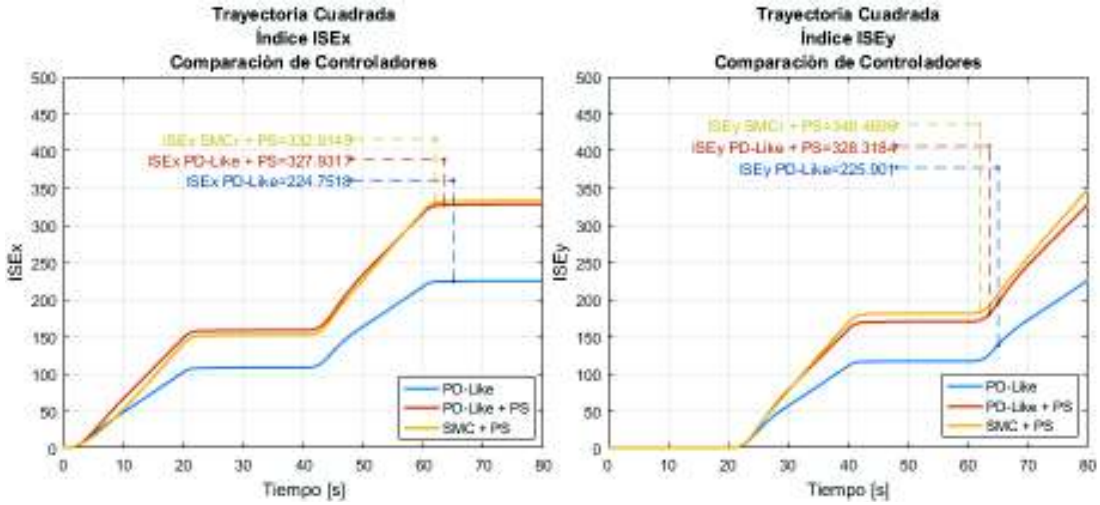


Figura 3.62. Índices de rendimiento ISE_x e ISE_y.

A continuación, considerando las Figuras 3.61 y 3.62 se realiza un análisis cuantitativo, respecto al módulo del error $\|e\|$ el mejor controlador que posee el menor error es la técnica PD-Like. Tomando en cuenta los índices ISE_x e ISE_y, se tiene que también el controlador PD-Like posee los índices más bajos, con una diferencia de hasta 100 unidades. Para completar el análisis del seguimiento de la trayectoria, se toma en cuenta el máximo sobrepico $M_p\%$ y tiempo de establecimiento t_s, que son dos parámetros determinantes en la efectividad de un controlador.

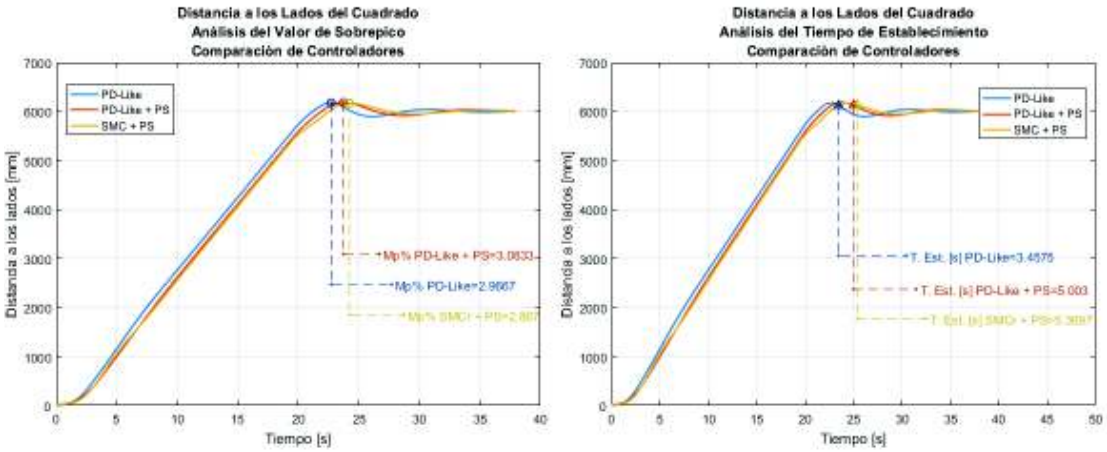


Figura 3.63. Análisis del estado transitorio de la distancia del robot hacia el lado.

Al observar la Figura 3.63, el máximo sobrepico no supera el valor de 3.1%, lo que puesto en términos más sencillos significa que la salida más pronunciada en las esquinas del cuadrado es de 19 [cm] respecto al lado de 6 [m]. Por otra parte, al analizar el tiempo de establecimiento se puede notar que el controlador que propicia que el robot recupere más

rápido a la trayectoria sin una excesiva oscilación es la técnica PD-Like con un tiempo de 3.46 [s].

En conclusión, tomando como referencia los parámetros e índices relacionados al seguimiento de la trayectoria, se determina que la mejor respuesta fue brindada por el controlador PD-Like. Para un análisis final, se consideran aspectos relacionados con la velocidad lineal y angular.

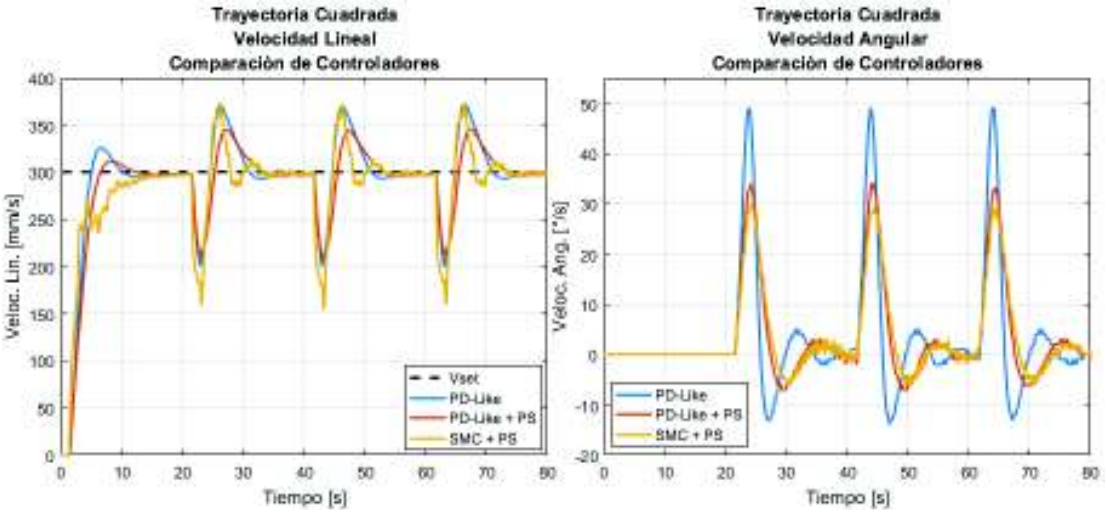


Figura 3.64. Velocidad lineal y angular vs. tiempo.

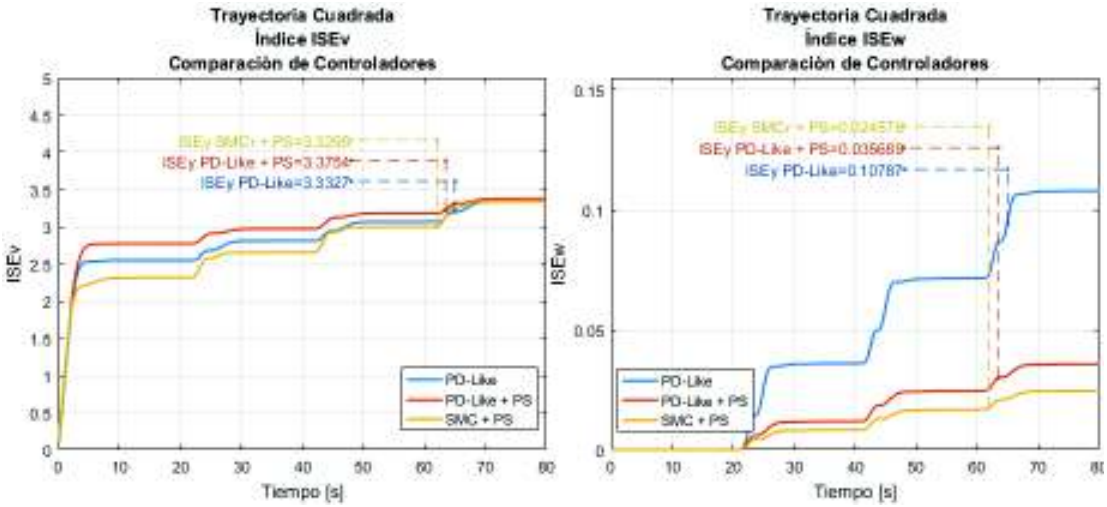


Figura 3.65. Gráficas de los índices ISE_v e ISE_ω.

Finalmente, tomando a consideración las Figuras 3.64 y 3.65, se puede observar que los valores adecuados respecto a los índices ISE_v e ISE_ω los obtiene la técnica PD-Like, lo que significa que no solo posee un adecuado seguimiento de la trayectoria cuadrada, sino que además realiza esta tarea manteniendo una velocidad constante apegada a la velocidad lineal de referencia.

Resultados en el Seguimiento de la Trayectoria Lemniscata de Bernoulli

Luego de una serie de pruebas aplicadas con rigurosidad en el apartado 3.1, se procede a comparar los resultados de las mejores variaciones de cada controlador, usados para el seguimiento de la trayectoria denominada Lemniscata de Bernoulli. En la Figura 3.66 se puede observar los resultados obtenidos en el seguimiento.

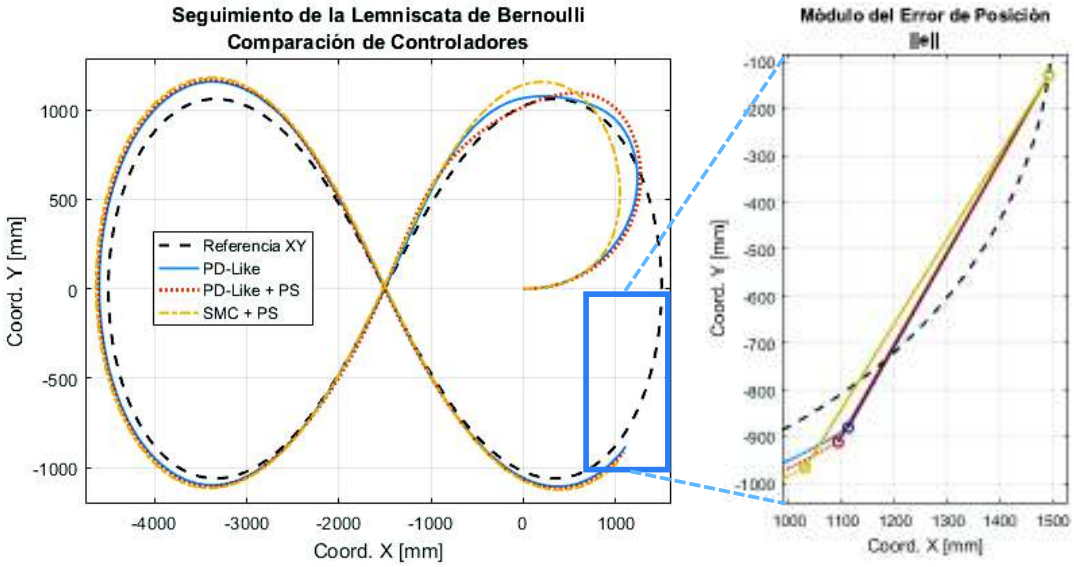


Figura 3.66. Vista del plano XY para el seguimiento de la trayectoria Lemniscata de Bernoulli.

Como se observa en la Figura 3.66, a partir del estado inicial cada uno de los controladores en análisis posee una respuesta diferente en el proceso de alcanzabilidad de la trayectoria, posterior se tiene un seguimiento adecuado en la zona central, mientras que en los lazos externos izquierdo se observa una pérdida de la trayectoria. A continuación, se presentan los parámetros e índices que cuantifican el seguimiento de cada controlador.

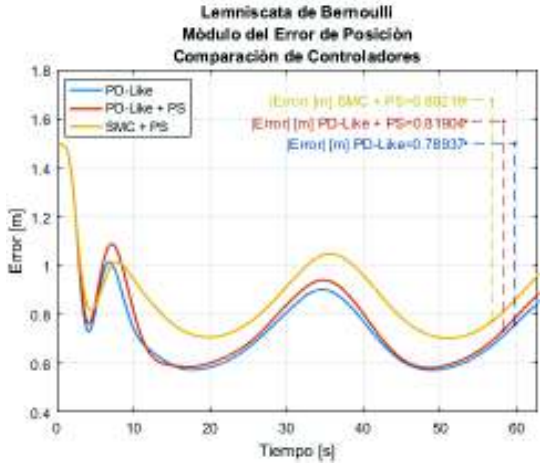


Figura 3.67. Módulo del error de posición $\|e\|$.

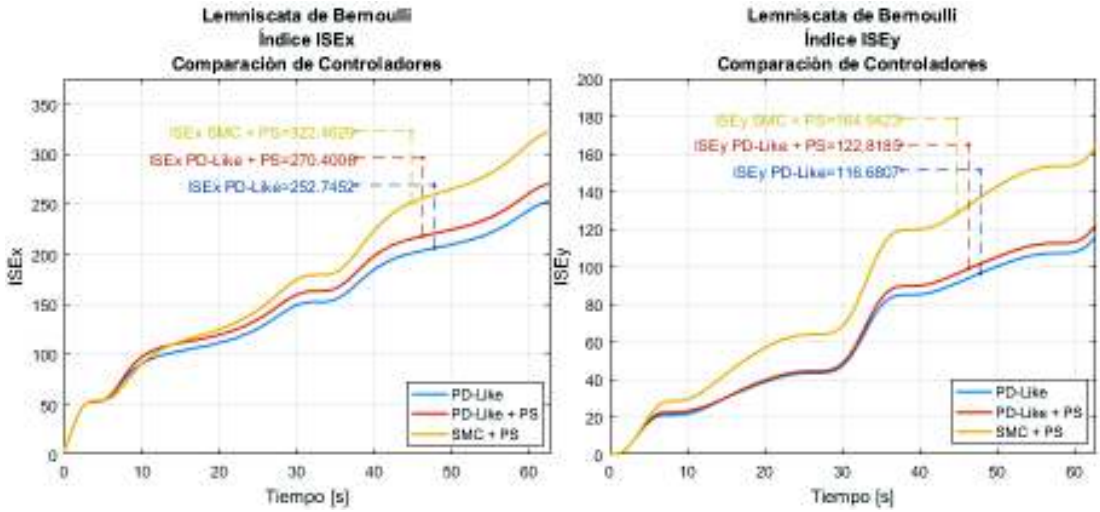


Figura 3.68. Índices de rendimiento ISE_x e ISE_y.

De acuerdo con la Figura 3.67, se puede verificar que el módulo del error de posición $\|e\|$ en todos los casos posee un valor final por debajo del límite establecido de 1 [m] e inclusive la mayoría de los controladores no superan esa barrera. La mejor respuesta respecto al parámetro $\|e\|$ lo ofrece el controlador PD-Like con un valor de 78.9 [cm]. Al considerar los índices de rendimiento ISE_x e ISE_y, de la Figura 3.68, se puede verificar que poseen un rango de variación de 70 y 48 respectivamente, la mejor respuesta la obtuvo el controlador PD-Like en ambos índices.

En la Figura 3.69 se puede observar los parámetros para analizar la respuesta de velocidad lineal y angular del robot desarrolladas en el seguimiento de la trayectoria, y sus correspondientes índices de desempeño.

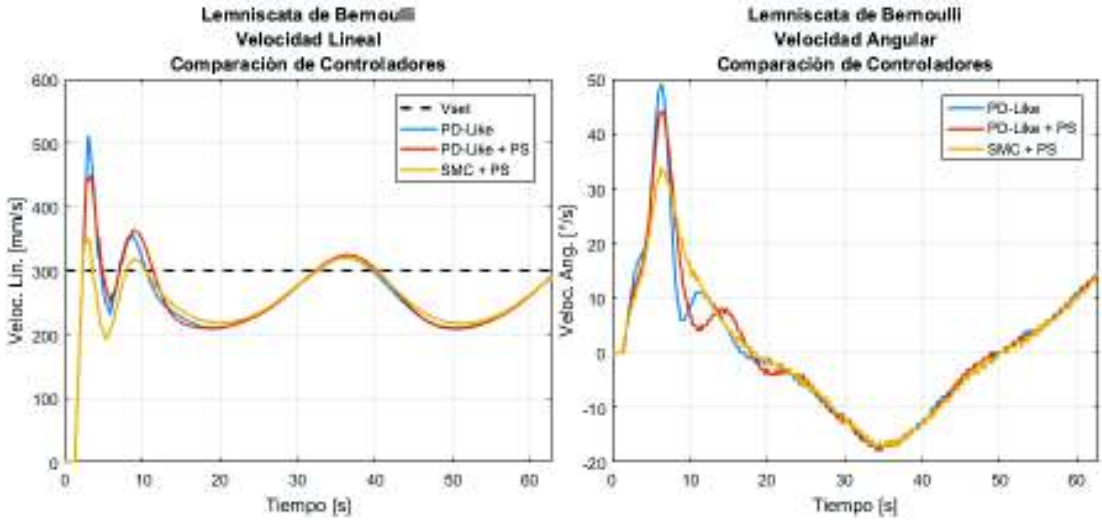


Figura 3.69. Velocidad lineal y angular vs. tiempo.

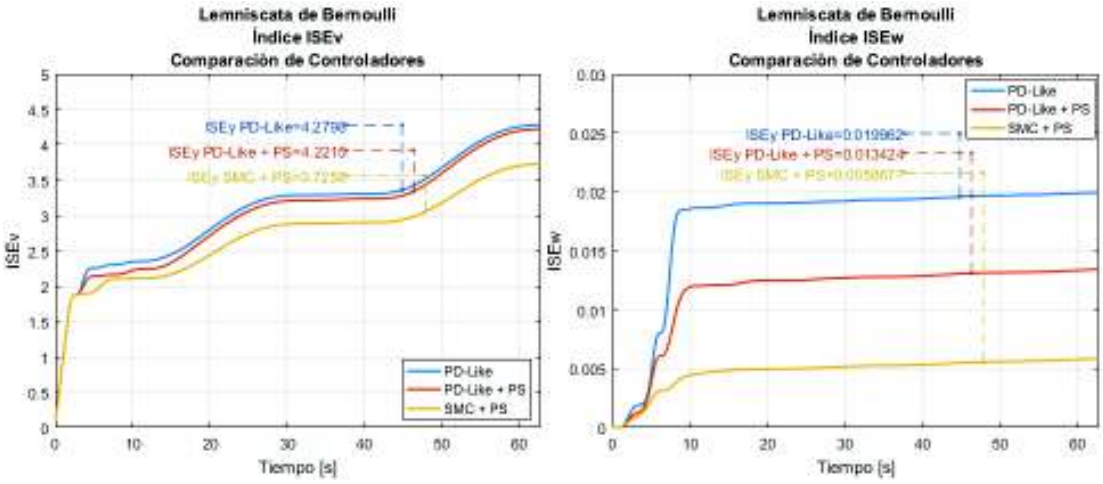


Figura 3.70. Gráficas de los índices ISE_v e ISE_ω.

Al analizar las Figuras 3.69 y 3.70, se puede observar que la velocidad lineal y angular se desarrollan sin tener una excesiva oscilación, usualmente la velocidad lineal no se estabiliza debido a las características de la trayectoria, aunque si varía en torno a un valor constante relativo al valor de referencia. Los índices de rendimiento ISE_v e ISE_ω presentan al controlador PD-Like como el más deficiente, esto se había analizado con anterioridad puesto que una mejor respuesta en el seguimiento representa un decaimiento en los índices de velocidad. Tomando en cuenta todos los índices y parámetros se concluye que el mejor controlador, respecto al seguimiento de la trayectoria Lemniscata de Bernoulli, es la técnica PD-Like.

3.4. Resultados ante la Variación del Retardo en el Esquema de Seguimiento de Trayectorias

Una vez se ha realizado el proceso de calibración de cada una de las tres técnicas de control aplicadas para el seguimiento de tres trayectorias distintas, se ha podido obtener los controladores que tienen las mejores respuestas, de acuerdo con varios índices y parámetros de calidad. Los controladores fueron calibrados para el seguimiento ante un retardo fijo de ida y un retardo fijo de vuelta de igual magnitud, correspondiente a 500 [ms]. En la presente sección se analizan los efectos que se tiene en el seguimiento de las diferentes trayectorias ante la variación del retardo, se aplica un aumento del retardo a 800 [ms], y también la reducción del retardo a 200 [ms]. Cada una de las trayectorias serán analizadas cuantitativamente tomando en consideración varios índices y parámetros utilizados en la calibración de los controladores de la sección 3.2.

Variación del Retardo ante el Seguimiento de la Trayectoria Circular

El resultado del seguimiento de la trayectoria circular, aplicando las tres técnicas en análisis, se lo puede observar en la Figura 3.71. En esta gráfica se puede verificar los efectos producidos por la variación del retardo fijo.

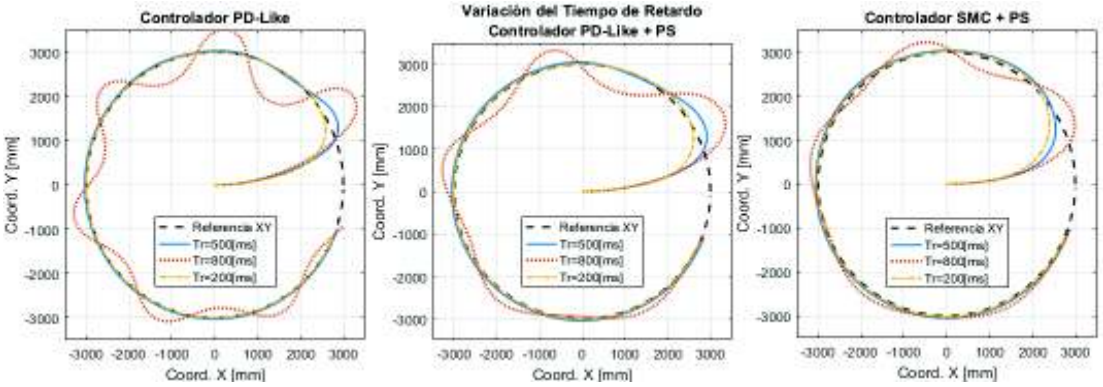


Figura 3.71. Seguimiento de la trayectoria circular ante la variación del retardo fijo.

Analizando la gráfica anterior, se puede notar que ante el aumento del retardo fijo de 500 [ms] a 800 [ms] el seguimiento que realiza el robot se vuelve oscilante en todos los casos. La respuesta oscilatoria se atenúa progresivamente y en el caso del controlador SMC + Predictor de Smith, se puede observar que sus oscilaciones son de menor frecuencia y cuya atenuación es mayor. En referencia a la calidad del seguimiento que se obtiene ante una reducción del retardo fijo, se puede notar que el robot posee un mejor seguimiento, sin sobrepicos pronunciados y con una recuperación de la trayectoria más rápida, para todas las técnicas de control en estudio. En la Figura 3.72 se presentan los resultados del análisis temporal del seguimiento de la trayectoria.

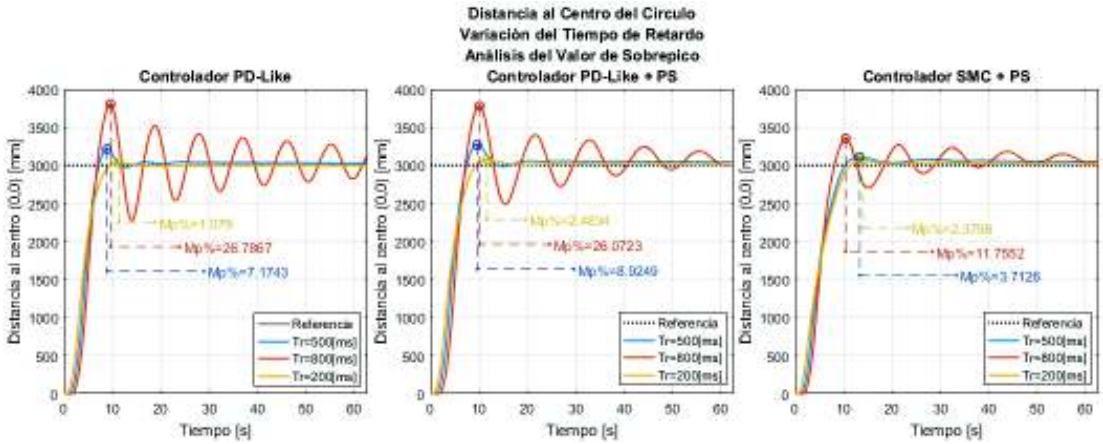


Figura 3.72. Análisis del valor de sobrepico $M_p\%$ del estado transitorio.

En la Figura 3.72 se observa el análisis del estado transitorio de la gráfica obtenida al calcular la distancia del robot al centro de la circunferencia. Uno de los aspectos más

sobresalientes es que el aumento del retardo fijo produce una respuesta oscilatoria, la técnica de control que más atenúa este comportamiento es el controlador SMC en combinación con el Predictor de Smith. Con el aumento del retardo, el sobrepico aumenta a alrededor de 26% respecto del radio de la circunferencia, excepto la técnica SMC.

Al reducir el retardo fijo se observa una reducción en el parámetro $M_p\%$, lo que indica que el robot al partir del centro del círculo y alcanzar la trayectoria experimenta una salida que tiene un rango de entre 3.2 a 7.1 [cm], este comportamiento se observa en la aplicación de las 3 técnicas de control, por lo que se tiene una mejoría ante una reducción del retardo en el sistema de control.

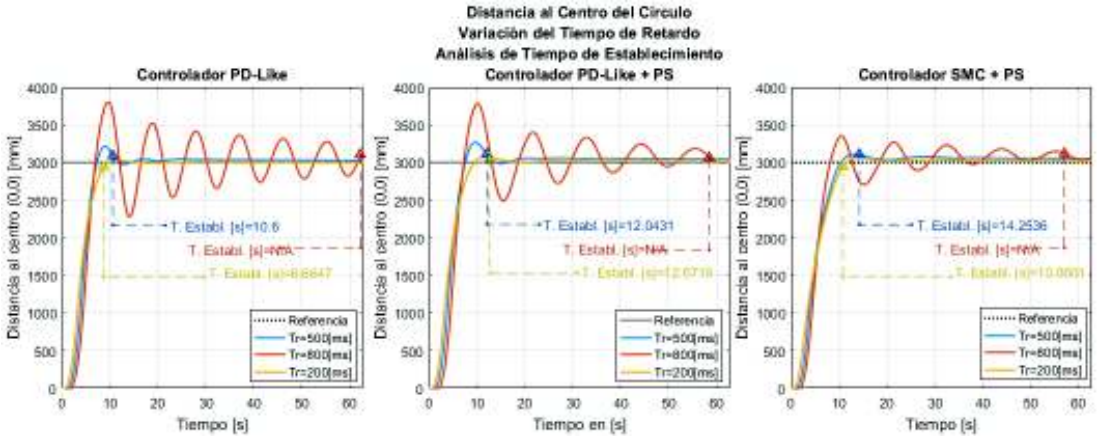


Figura 3.73. Análisis del tiempo de establecimiento t_s del estado transitorio.

En la Figura 3.73 se muestra el análisis del tiempo de establecimiento t_s en el estado transitorio, el efecto del aumento del retardo fijo provoca un significativo incremento del parámetro t_s , en este caso la función “stepinfo” del software matemático MATLAB toma en consideración el tiempo que le toma a la curva en llegar al 2% del valor final, por ello al ser una curva oscilatoria este tiempo de estabilización se produce cerca del final de la simulación, por ende este valor no representa el final de este proceso oscilatorio, pudiendo ser este parámetro aún más grande si se realiza una simulación en un periodo de tiempo más grande. Por otra parte, al reducir el retardo fijo se tienen resultados diversos, en los controladores PD-Like y SMC + Predictor de Smith se produce una reducción en el tiempo de establecimiento de alrededor de 2 y 4 [s] respectivamente, mientras que con el uso del controlador PD-Like + Predictor de Smith se aumenta este parámetro en décimas de segundo, lo que permite concluir que los resultados son favorables cuando se produce una reducción en el tiempo de retardo.

En las Figuras 3.74 y 3.75 se puede observar los efectos que produce una variación del retardo fijo en la velocidad lineal y angular, considerando que los controladores manipulan estas variables en el esquema de control.

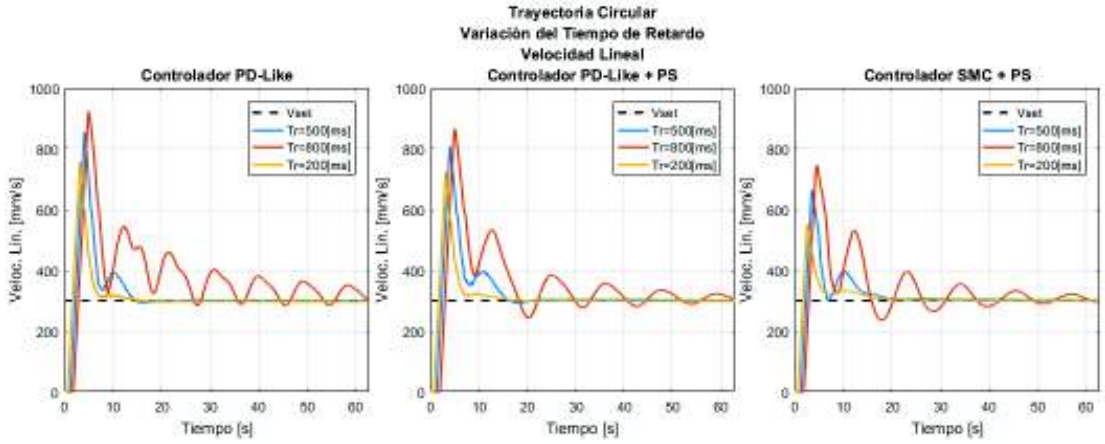


Figura 3.74. Respuesta de velocidad lineal ante una variación en el retardo.

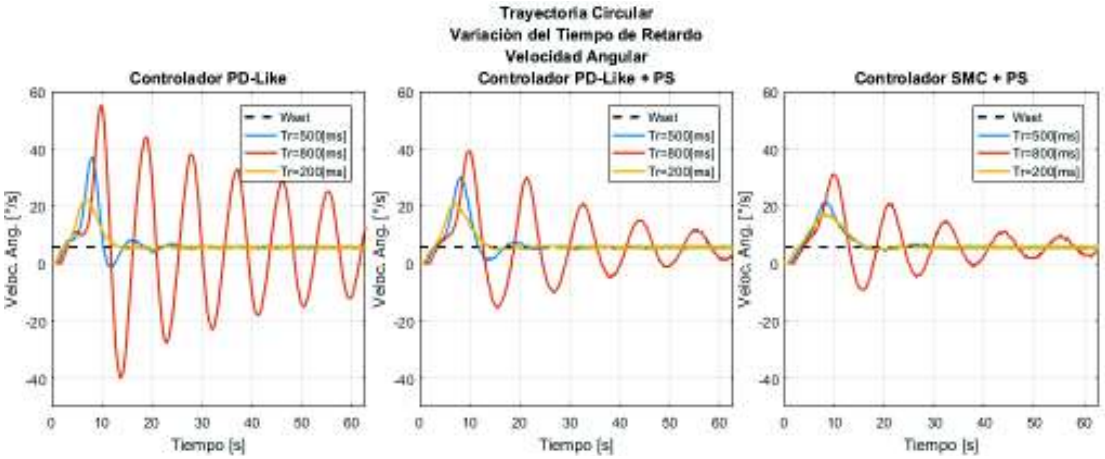


Figura 3.75. Respuesta de velocidad angular ante una variación en el retardo.

Al aumentar el retardo se puede apreciar que se tiene una respuesta oscilatoria tanto en la velocidad lineal, así como en la velocidad angular. La mejor respuesta de los tres controladores la provee la combinación SMC + Predictor de Smith, puesto que es la única técnica que reduce y atenúa según el paso del tiempo la oscilación existente. Por su parte, cuando se produce una reducción en el retardo, el pico inicial que se produce por efectos de las condiciones iniciales se reduce, lo que provoca que las curvas de velocidad se estabilicen en menor tiempo y tengan un mejor seguimiento de la referencia. Uno de los efectos negativo que puede tener este comportamiento es un incremento en el módulo del error de posición $\|e\|$, pues al no desarrollar una alta velocidad en el inicio, se acarrea con un error a través de todo el seguimiento de la trayectoria. En la Tabla 3.21 se tiene un resumen de los índices y parámetros que nos permiten analizar más a profundidad los efectos de la variación del retardo en el seguimiento espacial y en la evolución de la velocidad.

Tabla 3.21. Resultados de los índices de rendimiento y parámetros de interés para el seguimiento de la trayectoria circular ante la variación del retardo.

Índices y Parám.	**PD-Like**			**PD-Like + PS**			**SMC + PS**		
	Tiempo de retardo [ms]			**Tiempo de retardo [ms]**			**Tiempo de retardo [ms]**		
	200	**500**	**800**	**200**	**500**	**800**	**200**	**500**	**800**
$\|\|e\|\|\ [m]$	0.950	0.869	0.746	1.046	0.968	0.87	1.058	0.980	0.877
$M_p\ [\%]$	1.08	7.17	26.79	2.48	8.92	26.07	2.38	3.71	11.76
$t_s\ [s]$	8.664	10.6	N/A	12.67	12.04	N/A	10.86	14.25	N/A
ISE_x	542.9	548.2	682.4	606.7	612.6	680.8	633.6	622.5	648.7
ISE_y	273.4	244.7	290.8	327.4	301.0	306.8	360.2	335.5	325.0
ISE_v	4.055	7.314	15.23	3.599	6.688	12.41	1.957	4.194	9.021
ISE_ω $[\times 10^{-4}]$	6.926	115.3	3587	5.326	51.92	678.6	3.632	16.05	313.4

Al analizar detenidamente los datos obtenidos a los 62.8 [s] cuando se finaliza la simulación, se puede verificar que, al existir un aumento en el retardo fijo, todos los índices de rendimiento ISE aumentan respecto a la respuesta inicial que proviene del controlador calibrado para un retardo fijo de 500 [ms]. En cuanto al módulo del error de posición $\|e\|$, el aumento del retardo fijo tiene una reducción en este parámetro. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que la trayectoria del robot no es la más adecuada respecto a la trayectoria de referencia.

Por su parte, cuando se tiene una reducción en el retardo fijo, se puede notar que los índices de rendimiento ISE de la coordenada X, velocidad lineal y velocidad angular se reducen, mientras que el índice ISE de la coordenada Y aumenta, esto debido a la posición final del robot y a la velocidad desarrollada. El módulo del error de posición $\|e\|$ ante una disminución del retardo fijo, este parámetro aumenta pues los picos de velocidad lineal en el inicio no son elevados y termina acarreando en toda la trayectoria un error constante.

En conclusión, el controlador que mejor respuesta tiene, ante una variación del retardo, es la técnica SMC + Predictor de Smith, esto debido a una adecuada realimentación de la velocidad lineal y angular que provee el Predictor de Smith y por las características propias de la técnica SMC.

Variación del Retardo ante el Seguimiento de la Trayectoria Cuadrada

En el presente apartado, se va a analizar los efectos de la variación del retardo que posee el esquema de control, ante el seguimiento de la trayectoria cuadrada. En la Figura 3.76 se puede observar el resultado del seguimiento en el plano XY.

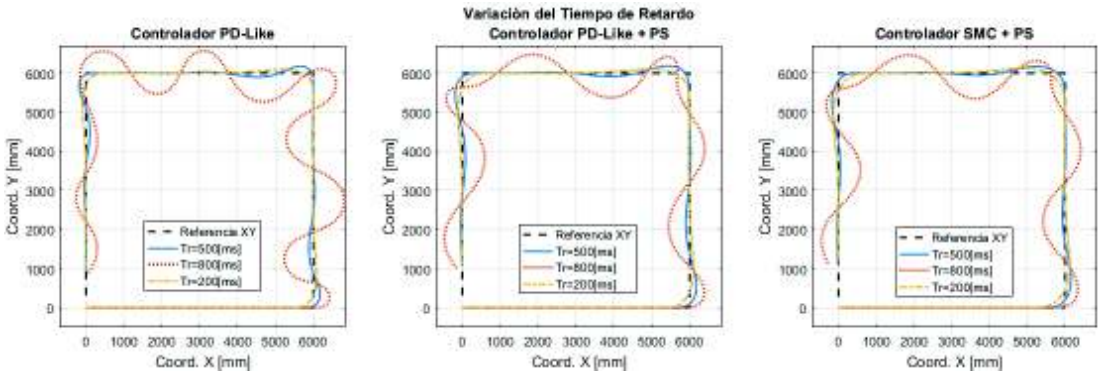


Figura 3.76. Seguimiento de la trayectoria cuadrada ante la variación del retardo fijo.

Como se puede verificar en la figura anterior, ante un aumento del retardo se produce una respuesta oscilatoria bastante pronunciada, y a pesar de que trata de seguir la trayectoria de referencia, la respuesta del robot está cerca de límites de inestabilidad. Por otro lado, al reducir el retardo se obtiene una respuesta del robot menos oscilatoria respecto a la respuesta inicial que provee el controlador calibrado. En las esquinas del cuadrado donde se produce un cambio brusco de la referencia, el robot responde adecuadamente realizando una curva cerrada sin una salida pronunciada de la trayectoria de referencia y con una recuperación bastante rápida. En las Figuras 3.77 y 3.78 se puede observar la respuesta de la velocidad lineal y angular ante el aumento y reducción del periodo de retardo.

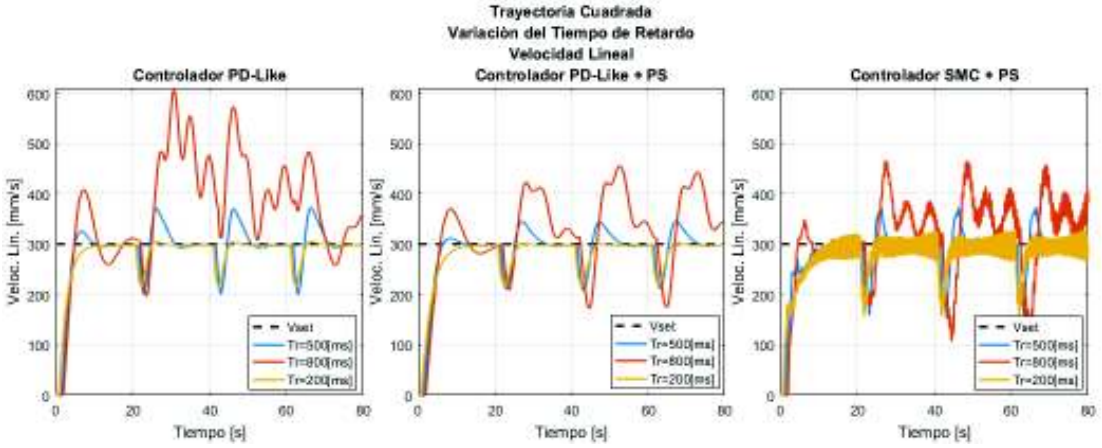


Figura 3.77. Respuesta de velocidad lineal ante una variación en el retardo.

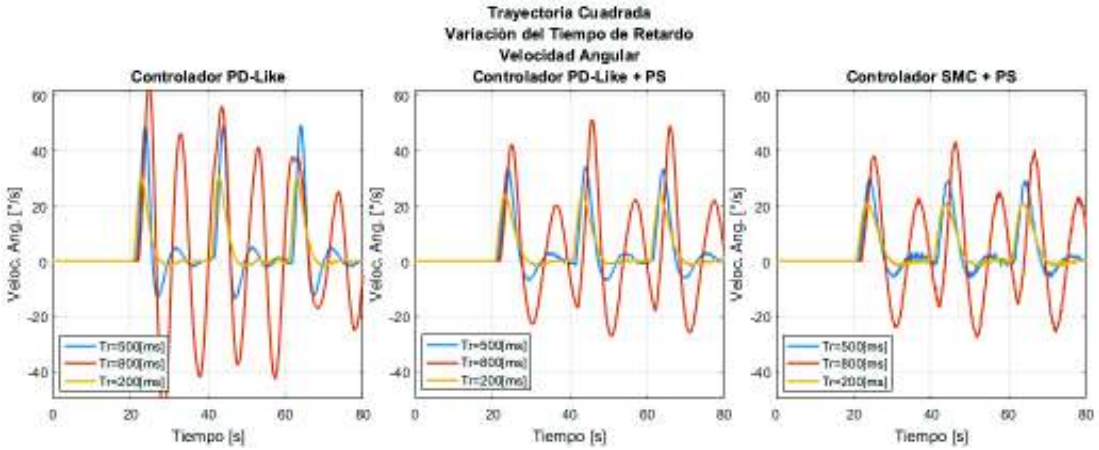


Figura 3.78. Respuesta de velocidad angular ante una variación en el retardo.

En las figuras anteriores, cuando se tienen un incremento en el retardo del sistema, se puede observar un comportamiento oscilatorio y errático en la velocidad lineal y angular, se puede notar que según avanza el tiempo, la respuesta se va degradando, esto a consecuencia de que el controlador no puede compensar el cambio brusco producido en una esquina y se produce un nuevo cambio, donde la respuesta empeora. Mientras que, cuando se produce una reducción en el tiempo de retardo, se nota que la respuesta en las velocidades mejora considerablemente, no observándose sobrepicos en la velocidad lineal y una respuesta menos oscilatoria en la velocidad angular. A continuación, en la Tabla 3.22 se tiene un resumen de los índices de rendimiento ISE y el parámetro $\|e\|$, que nos permiten cuantificar los efectos de la variación del retardo.

Tabla 3.22. Resultados de los índices de rendimiento y parámetros de interés para el seguimiento de la trayectoria circular ante la variación del retardo.

Índices y Parám.	**PD-Like**			**PD-Like + PS**			**SMC + PS**		
	Tiempo de retardo [ms]			**Tiempo de retardo [ms]**			**Tiempo de retardo [ms]**		
	200	**500**	**800**	**200**	**500**	**800**	**200**	**500**	**800**
$\|e\|$ $[m]$	0.827	0.7380	0.8188	0.997	0.9064	0.9683	1.04	0.9563	1.1401
ISE_x	254.5	224.75	341.71	359.55	327.93	381.27	369.48	332.91	369.98
ISE_y	252.2	225.90	375.46	357.20	328.32	391.50	382.19	348.47	397.77
ISE_v	2.268	3.3327	14.981	2.5993	3.3754	7.8391	2.6192	3.3295	7.1392
ISE_ω $[\times 10^{-4}]$	82.41	1079	6683	41.64	356.89	2695	29.36	245.76	2127

Al analizar los datos de la tabla anterior, es evidente que el aumento del tiempo de retardo presenta un decaimiento en todo los índices y parámetros, sobre todo en el aumento de

500 [ms] a 800 [ms]. Mientras que una reducción en el retardo presenta un decaimiento en los índices y parámetros correspondientes al seguimiento de la trayectoria, como lo son los índices ISE_x, ISE_y y $\|e\|$, mientras se tiene una mejoría en los índices de rendimiento correspondientes a las velocidades lineal y angular. Esto es debido a que el robot no desarrolla una velocidad inicial adecuada en la reducción del retardo, y por consiguiente acarrea durante toda la simulación con un error que afecta a los índices correspondientes al seguimiento.

En conclusión, y basándose en todas las gráficas y datos expuestos, se puede notar que ante un aumento el controlador que mejor respuesta tiene es la técnica SMC en combinación con el Predictor de Smith. Mientras que cuando existe una reducción del retardo, la mejor respuesta la tiene el controlador PD-Like.

Variación del Retardo ante el Seguimiento de la Trayectoria Lemniscata de Bernoulli

Cada una de las trayectorias que se han utilizado para el seguimiento en este trabajo tiene características geométricas que ponen a prueba distintos posibles escenarios. En la presente sección se analiza a la trayectoria denominada Lemniscata de Bernoulli, en la cual se tiene un sostenido cambio en la orientación de manera creciente y decreciente. En la siguiente figura se pueden observar los resultados del seguimiento de la trayectoria con la aplicación de las tres distintas técnicas de control.

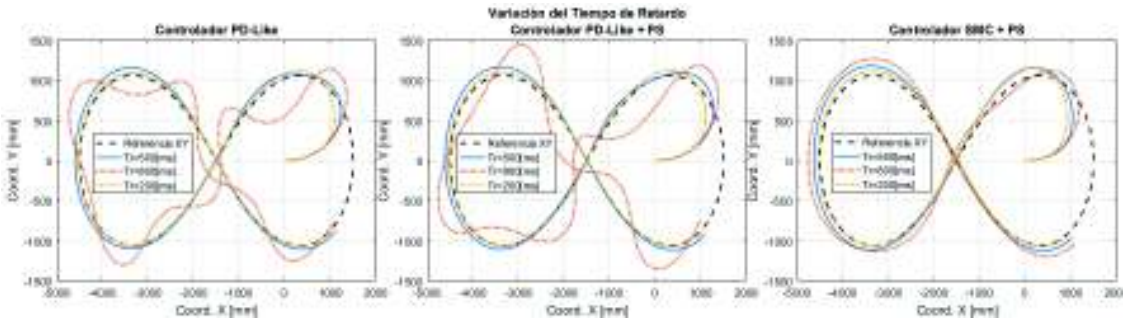


Figura 3.79. Seguimiento de la Lemniscata de Bernoulli ante la variación del retardo fijo.

Al analizar la Figura 3.79, se puede observar que un incremento en el retardo provoca un seguimiento deficiente de la trayectoria, y que la característica que posee la Lemniscata de Bernoulli relacionada a un cambio permanente de la orientación provoca que se tengan oscilaciones y salidas de la trayectoria no periódicas. Por su parte, cuando existe una reducción en el retardo, se observa un buen seguimiento de la trayectoria, con una menor

salida en el bucle izquierdo, todo esto se repite con todas las técnicas de control implementadas.

Cabe recalcar que la mejor técnica con un rendimiento sobresaliente es la técnica SMC + Predictor de Smith que casi no presenta efectos negativos del aumento del retardo en el seguimiento de la trayectoria.

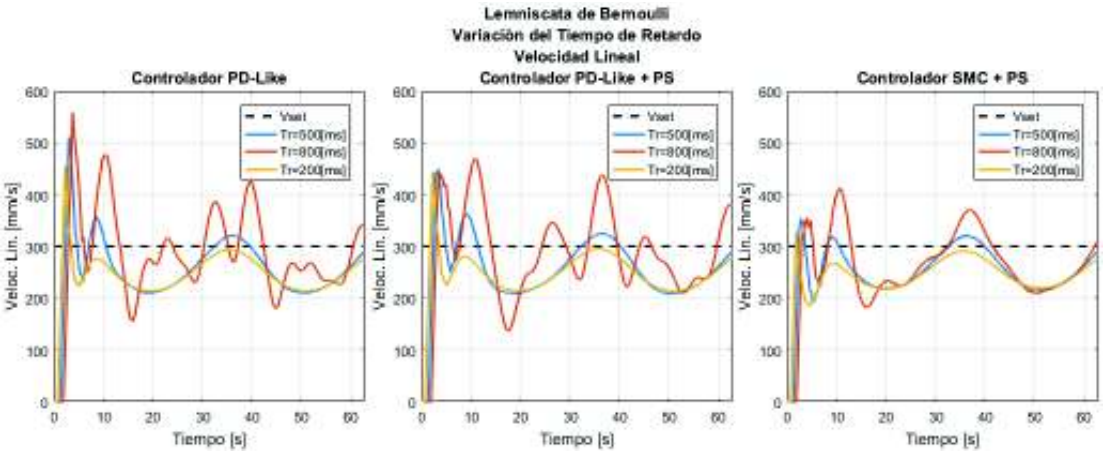


Figura 3.80. Respuesta de velocidad lineal ante una variación en el retardo.

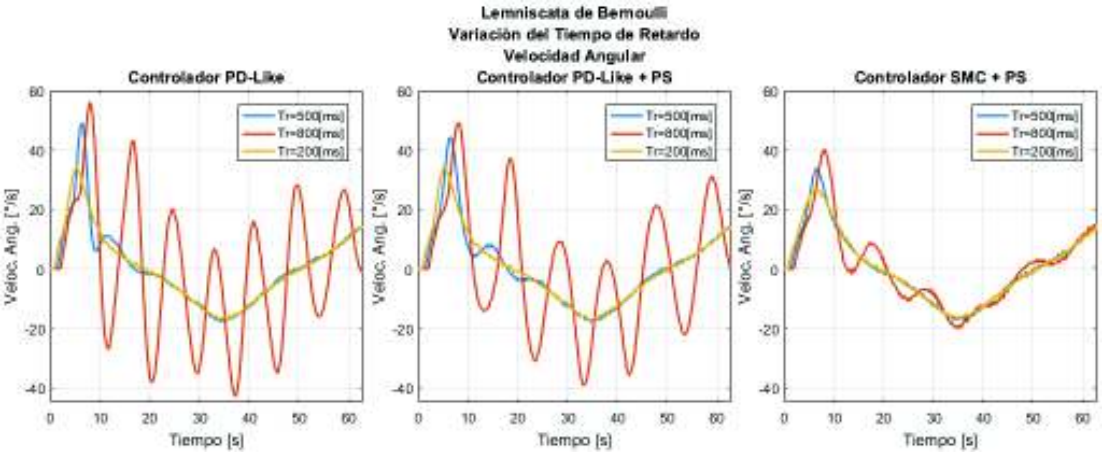


Figura 3.81. Respuesta de velocidad angular ante una variación en el retardo.

En las Figuras 3.80 y 3.81 se puede analizar la respuesta de la velocidad lineal y angular ante la variación del periodo de retardo en la estructura de control. El seguimiento de la trayectoria Lemniscata de Bernoulli produce una velocidad lineal oscilante, por lo que, al aumentar el retardo, esta respuesta oscilatoria se incrementa teniendo variaciones de tipo aleatorias. Al reducir el retardo, se observa un comportamiento inicial que posee un pico menor en el caso del controlador PD-Like y SMC + Predictor de Smith, sin embargo, con el uso de la técnica PD-Like en combinación con el Predictor de Smith se tiene una respuesta similar a la que brinda el controlador inicial calibrado a pesar de la reducción del

retardo. Algo parecido ocurre con la velocidad angular y los efectos que produce el aumento y la reducción del periodo de retardo.

Tabla 3.23. Resultados de los índices de rendimiento y parámetros de interés para el seguimiento de la trayectoria circular ante la variación del retardo.

Índice y Parám	PD-Like			PD-Like + PS			SMC + PS		
	Tiempo de retardo [ms]			Tiempo de retardo [ms]			Tiempo de retardo [ms]		
	200	500	800	200	500	800	200	500	800
$\|\|e\|\|\ [m]$	0.818	0.789	0.853	0.839	0.819	1.001	0.913	0.892	0.904
ISE_x	264.10	252.75	305.73	376.69	270.40	314.06	332.47	322.46	326.66
ISE_y	124.27	116.68	124.80	130.51	122.82	156.61	171.09	164.94	157.74
ISE_v	3.32	4.2798	6.1008	3.3256	4.2215	6.1269	3.2957	3.7258	5.0021
ISE_ω $[\times 10^{-4}]$	18.76	199.62	3721	17.74	134.24	2097	11.16	58.68	254.31

Al analizar la Tabla 3.23, se observa que un aumento en el retardo provoca un decaimiento general de todos los índices y parámetros. Mientras que al reducir el retardo se presenta un decaimiento en los índices ISE_x, ISE_y y $\|e\|$, y una mejora en los índices correspondientes a la velocidad angular. Considerando las magnitudes de los índices y parámetros se tiene que la mejor respuesta ante la variación del periodo de retardo proviene del controlador SMC + Predictor de Smith.

3.5. Resultados ante la Presencia de Perturbaciones de Velocidad.

Las perturbaciones en un sistema de control son fenómenos que ocurren de acuerdo con diversos factores físicos, y en relación con su naturaleza se lo puede modelar y ubicar en el sistema de control. Para realizar la prueba de ingreso de perturbaciones y analizar los resultados que se obtiene con los distintos controladores analizados en este trabajo inicialmente se define el tipo de perturbaciones que se van a ingresar, estas son las siguientes:

- Perturbación Constante, representa un mal funcionamiento o descalibración de los instrumentos o dispositivos.
- Perturbación de Tipo Ruido, representa la adición de una señal aleatoria de alta frecuencia que puede provenir de la interacción y funcionamiento de los dispositivos.

A continuación, se realiza un estudio sobre el lugar en el esquema de control para el seguimiento de trayectorias donde se plantea la ubicación de la perturbación. En la Figura 3.82 y 3.83 se observan los esquemas con las dos posibles ubicaciones de la perturbación basándose en la Figura 2.8.

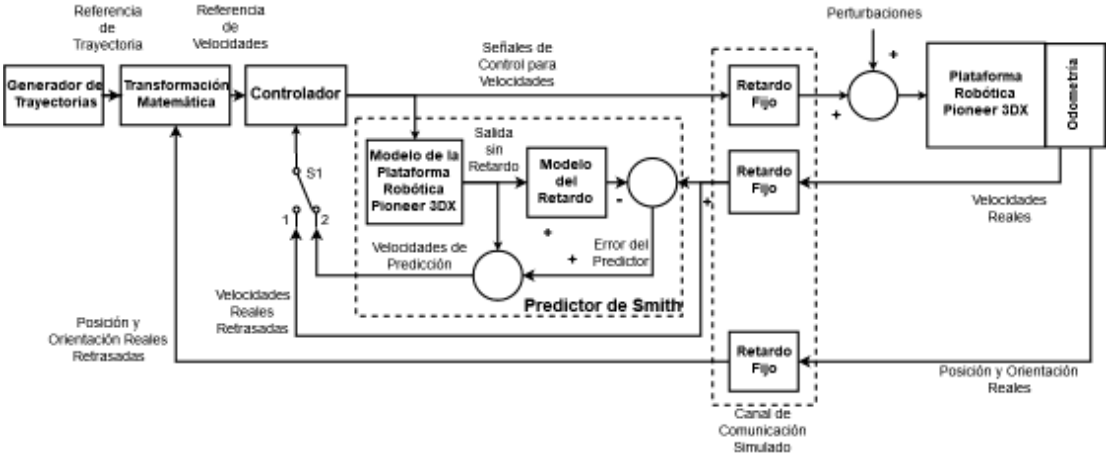


Figura 3.82. Esquema general de control con perturbación ubicada en las acciones de control.

En la figura anterior se puede notar que la perturbación se adiciona a las acciones de control provenientes del controlador y luego de pasar por el canal de comunicación simulado. Esta perturbación tendría un efecto directo sobre el robot, y sus efectos se reflejan en la velocidad que desarrolla la plataforma y afecta también a las lecturas de posición y orientación del robot.

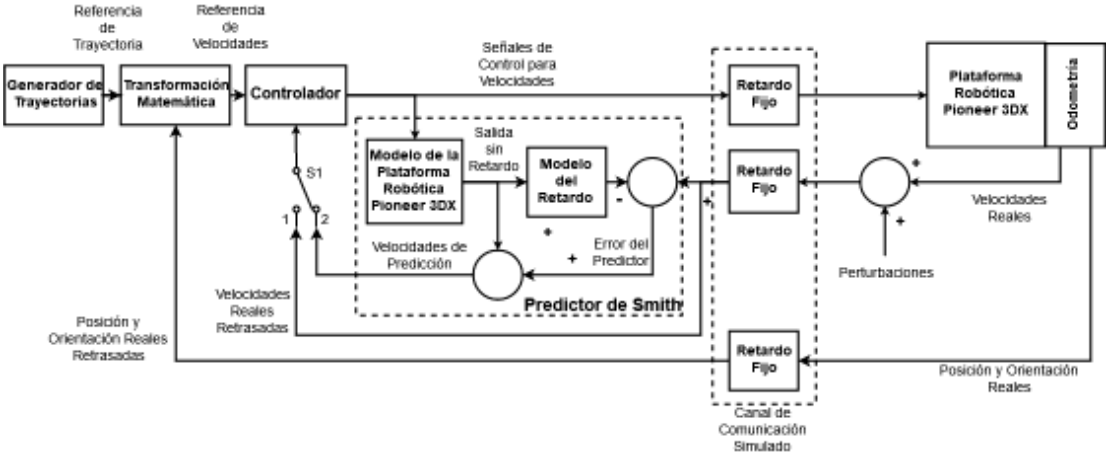


Figura 3.83. Esquema general de control con perturbación ubicada en la realimentación de velocidad.

El esquema anterior tiene la adición de la perturbación en los valores de realimentación de velocidad, hay que notar que esta perturbación no afecta directamente a la velocidad que

desarrolla el robot, y además no afecta a la realimentación de posición y orientación del robot en el plano XY.

En la Figura 3.84 se puede observar la respuesta de velocidad del robot ante la presencia de perturbaciones ubicadas en el sitio descrito en la Figura 3.82.

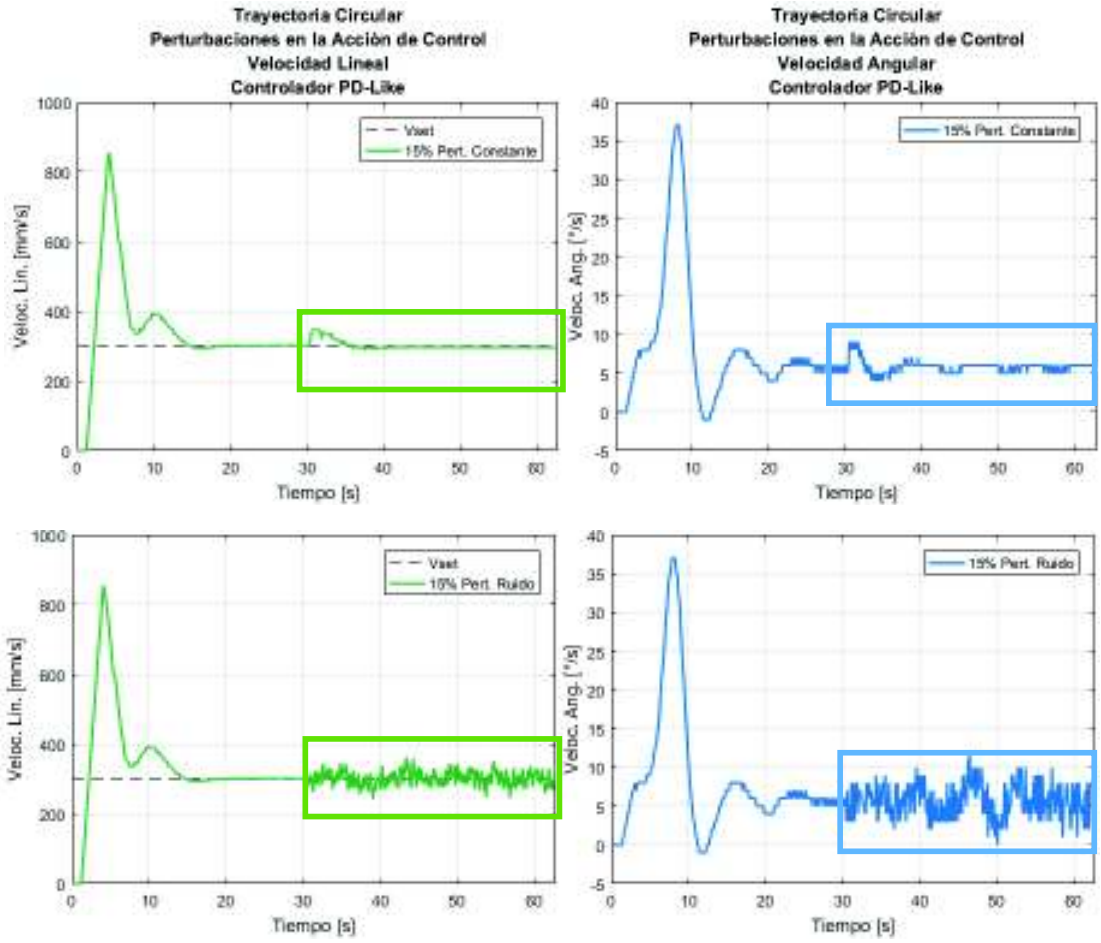


Figura 3.84. Respuesta de velocidad del robot ante perturbaciones (Tipo Constante y Tipo Ruido) en la acción de control.

En la Figura 3.84 se obtiene la respuesta de velocidad lineal y angular en el seguimiento de la trayectoria circular aplicando la técnica PD-Like con los parámetros calibrados en el apartado 3.4. La trayectoria tiene un radio de 3 [m], a una velocidad lineal de referencia de 0.3 [m/s] y las perturbaciones se ingresan en t=30 [s] en el estado estable del sistema. La perturbación constante en la velocidad lineal tiene una magnitud de 15% respecto a la velocidad lineal de referencia y la perturbación constante en la velocidad angular tiene una magnitud de 15% respecto a la mitad del valor pico de la velocidad angular. La perturbación de tipo ruido es creada por una función de generación de números randómicos donde se configura el límite inferior y superior de variación, estos límites tienen la misma magnitud

de la perturbación constante de la velocidad lineal y angular. Como se puede observar en la Figura 3.84, sobre todo en el ingreso de la perturbación constante, existe un sobrepico que es compensado en alrededor de 5 [s] tanto en la velocidad lineal y angular. En cuanto al funcionamiento ante una perturbación de tipo ruido, se verifica que la respuesta de la velocidad lineal y angular refleja esta señal ruidosa, pero funciona sobre un rango de velocidad cercana a la velocidad de referencia. En conclusión, se obtienen los resultados adecuados ante la presencia de perturbaciones cuando se utiliza un controlador en el esquema.

En la Figura 3.85 se puede observar la respuesta de velocidad lineal y angular cuando se tienen perturbaciones ubicadas en el sitio especificado en la Figura 3.83.

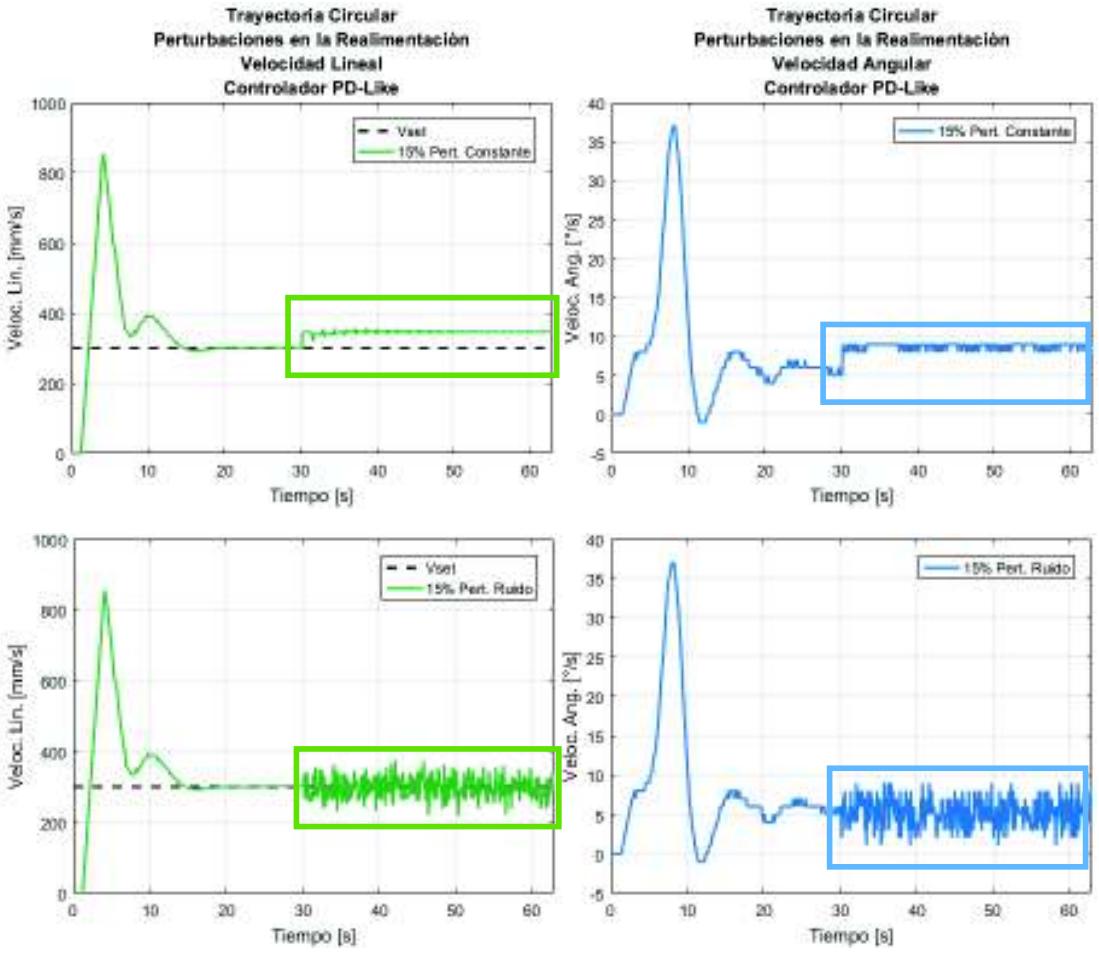


Figura 3.85. Respuesta de velocidad del robot ante perturbaciones (Tipo Constante y Tipo Ruido) en la realimentación.

La gráfica anterior fue obtenida con la misma configuración de trayectoria, los mismos parámetros en cuanto a la técnica de control aplicada y la misma magnitud en las perturbaciones de velocidad lineal y angular que se aplicó en la Figura 3.84. Sin embargo,

al analizar los resultados, se puede apreciar que en la aplicación de la perturbación constante no se compensa la adición, sino que se observa un incremento en la velocidad que se mantiene hasta el final de la simulación. Este comportamiento no es el adecuado por lo que al analizar a profundidad el funcionamiento del esquema de control y de los controladores se llegaron a las siguientes causas del fenómeno:

- Al añadir una señal de perturbación a la realimentación de velocidad desarrollada, este valor tiene solo influencia en los controladores, pero hay que tener en cuenta que existe una realimentación de posición y orientación del robot para el bloque de "Transformación Matemática" (Ver Figura 3.83 y Ecuaciones 2.2, 2.3, 2.4) que no es influenciada por la señal de perturbación de velocidad, esto provoca que a pesar de tener una realimentación de velocidad que refleja la perturbación, la generación de la referencia de velocidad no refleja esta perturbación por lo que no se puede compensar la adición de esta señal.

- El uso de la transformación matemática para la obtención de una referencia de velocidad, a partir de la comparación de la posición de referencia y la posición real del robot nos arroja valores de referencia bastante grandes cuanto más alejado se encuentre el robot de la posición referencial. Por lo que, al momento de comparar los valores de referencia con los valores de realimentación de velocidad, es insignificante la adición de la perturbación.

Debido a los resultados obtenidos en la aplicación de las perturbaciones en la ubicación descrita por la Figura 3.83. Y tomando en cuenta las causas provenientes de la misma disposición del esquema de control y su funcionamiento, se consideran las perturbaciones en estudio únicamente a las descritas en la Figura 3.82, es decir, en este apartado se verifican los resultados obtenidos con la aplicación de las técnicas de control para las perturbaciones que se añaden a las acciones de control previo a la configuración del robot Pioneer 3DX.

Los lineamientos respecto a la aplicación de las perturbaciones para las distintas trayectorias y controladores son las siguientes:

- La magnitud de la perturbación constante de velocidad lineal es del ±15% de la velocidad lineal de referencia.

- La magnitud de la perturbación constante de la velocidad angular es del ±15% de 20 [°/s], este valor se llega luego de un análisis de las curvas de velocidad angular

obtenidas en el seguimiento de las tres trayectorias en estudio para este trabajo de titulación.

- La perturbación de ruido se obtiene a través de una función randómica, los límites superior e inferior de variación corresponden en el caso de la velocidad lineal a ±15% de la velocidad de referencia, y en el caso de la velocidad angular a ±15% de 20 [°/s].
- La adición de cualquier tipo de perturbación se realiza en cualquier punto de la simulación una vez haya concluido el estado transitorio del seguimiento de la trayectoria.

Perturbaciones de Velocidad ante el Seguimiento de la Trayectoria Circular.

En la presente sección se analizan los efectos que tiene la adición de perturbaciones de velocidad en el seguimiento de la trayectoria circular, las perturbaciones siguen los lineamientos establecidos en la sección 3.2 y se plantea la comparación de las tres técnicas aplicadas en este trabajo. En la Figura 3.86 se puede observar los efectos de la adición de perturbaciones en el seguimiento de la trayectoria.

Figura 3.86. Vista del plano XY para el seguimiento de la trayectoria circular ante la presencia de perturbaciones de velocidad.

En la figura anterior se puede observar los efectos que tiene en el seguimiento de la trayectoria circular la presencia de perturbaciones en la velocidad lineal y angular. Los parámetros de los controladores son los obtenidos en la calibración. Se realiza el ingreso de las señales de perturbación a los 30 [s] y se observa que el controlador que mejor respuesta tiene es la técnica PD-Like. En todos los casos la señal de perturbación no provoca inestabilidad o salidas de la trayectoria demasiado pronunciadas, excepto el

controlador SMC + Predictor de Smith que posee una respuesta evidente de afectación en el seguimiento antes las perturbaciones.

A continuación, se presenta la respuesta de la velocidad lineal a través del tiempo, donde se puede analizar más detenidamente las perturbaciones y la respuesta de cada uno de los controladores.

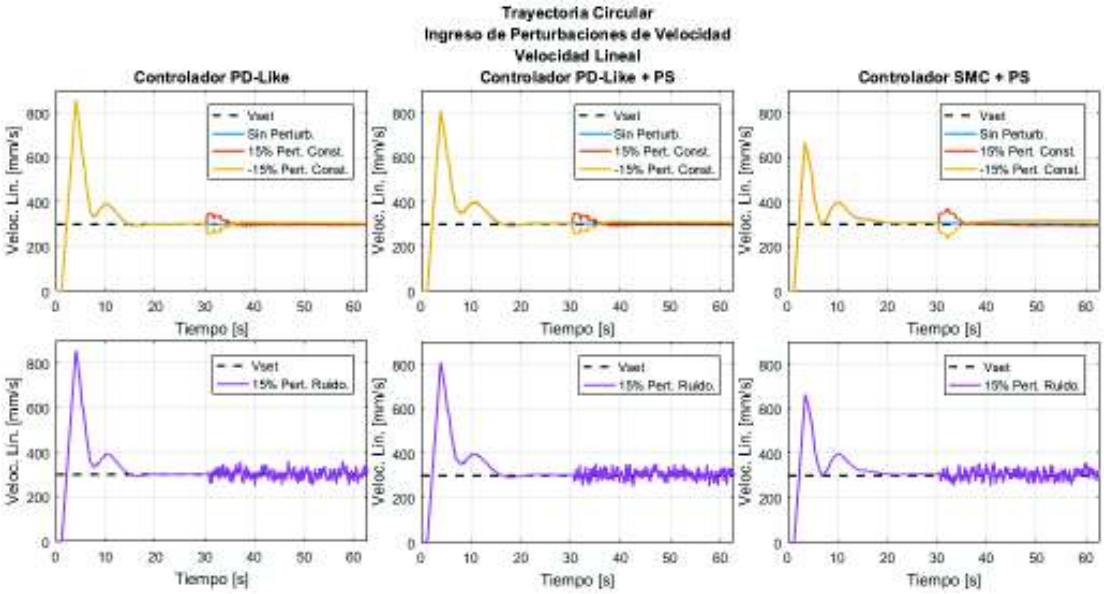


Figura 3.87. Respuesta de velocidad lineal ante la presencia de distintos tipos de perturbaciones.

En la Figura 3.87 se puede analizar los efectos de las perturbaciones de tipo constante y tipo ruido, en el caso de las perturbaciones de tipo constante positivas y negativas, se puede apreciar que los controladores compensan este tipo de acontecimientos, en un tiempo aproximados de 5 [s], la respuesta de los controladores PD-Like y PD-Like + Predictor de Smith son muy similares, por su parte el controlador SMC + Predictor de Smith posee una respuesta distinta con una compensación más tardada y una pequeña oscilación de la señal de velocidad. En cuanto a la respuesta ante perturbaciones de tipo ruido se observa un comportamiento similar en todos los controladores, que luego del ingreso de la señal, la velocidad empieza a variar, pero en un rango alrededor de la velocidad de referencia.

En la siguiente gráfica se puede observar la respuesta de velocidad angular a través del tiempo y su comportamiento ante el ingreso de perturbaciones.

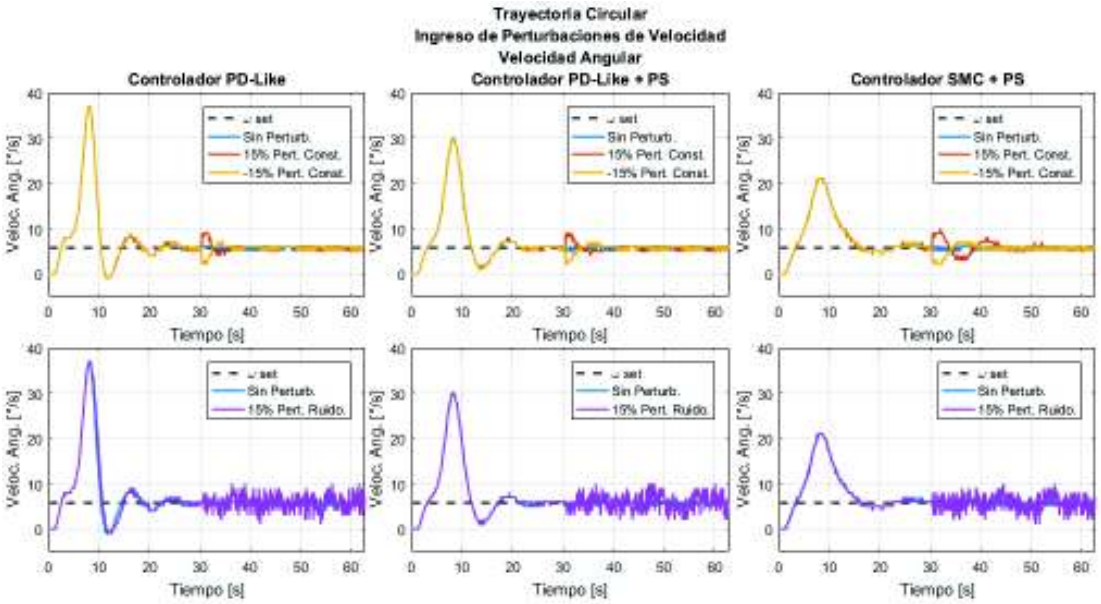


Figura 3.88. Respuesta de velocidad angular ante la presencia de distintos tipos de perturbaciones.

En la Figura 3.88 se observa el comportamiento de la velocidad angular ante el ingreso de perturbaciones. Las perturbaciones de tipo constante provocan una respuesta de compensación por parte de los controladores, en el caso de los controladores PD-Like y PD-Like + Predictor de Smtih, luego de compensar a la perturbación se tiene una respuesta sostenida en un valor constante aproximado a 5 [°/s], mientras que el controlador SMC + Predictor de Smith posee una respuesta de compensación con resultados oscilatorios. En cuanto a la respuesta ante perturbaciones de tipo ruido se observa que se tiene una variación de alta frecuencia, el controlador con mejores resultados es la técnica PD-Like, puesto que en los otros controladores se empieza a tener una oscilación producida por el ingreso del ruido.

Tabla 3.24. Resultados de los índices de rendimiento y parámetros de interés para el seguimiento de la trayectoria circular ante la presencia de perturbaciones.

Índices y Parám.	PD-Like				PD-Like + PS				SMC + PS			
	Tipo de Perturbación				Tipo de Perturbación				Tipo de Perturbación			
	Sin Pert.	Constante		Ruido	Sin Pert.	Constante		Ruido	Sin Pert.	Constante		Ruido
		15%	-15%	15%		15%	-15%	15%		15%	-15%	15%
$\|\|e\|\|\ [m]$	0.87	0.72	1.02	0.89	0.97	0.80	1.14	0.96	0.98	0.71	1.28	0.99
ISE_x	548.17	511.41	592.80	549.98	612.58	566.35	669.71	606.34	622.52	549.53	725.94	629.62
ISE_y	244.72	209.83	287.34	243.19	301.02	258.00	353.57	299.51	335.47	273.65	422.11	342.23

Tabla 3.25. Resultados de los índices de rendimiento y parámetros de interés para el seguimiento de la trayectoria circular ante la presencia de perturbaciones.

Índices y Parám.	PD-Like				PD-Like + PS				SMC + PS			
	Tipo de Perturbación				Tipo de Perturbación				Tipo de Perturbación			
	Sin Pert.	Constante		Ruido	Sin Pert.	Constante		Ruido	Sin Pert.	Constante		Ruido
		15%	-15%	15%		15%	-15%	15%		15%	-15%	15%
ISE_v	7.314	7.367	7.370	7.478	6.688	6.747	6.748	6.842	4.194	4.292	4.316	4.361
ISE_ω [x10^{-4}]	115.28	146.82	147.22	130.18	51.92	84.32	82.82	65.81	16.05	48.63	46.42	28.31

En las Tablas 3.24 y 3.25 se presentan los datos relacionados a los índices de rendimiento de la velocidad lineal, velocidad angular y las coordenadas X e Y, además del módulo de error de posición $\|e\|$. Todos estos datos sirven para cuantificar el efecto de las perturbaciones en el seguimiento de la trayectoria. Al analizar los datos se puede notar que cuando se ingresa una perturbación constante positiva, la misma reduce los índices $\|e\|$, ISE_x e ISE_y, esto es debido al impulso que recibe el robot ante un incremento de la velocidad, mientras que al ingresar una perturbación constante negativa aumentan los índices debido a que el robot experimenta un freno producido por la perturbación. Con respecto a los índices ISE_v e ISE_ω al ingresar una perturbación constante positiva o negativa los índices aumentan debido justamente a la presencia de la perturbación. Al ingresar una perturbación de tipo ruido, se puede notar que todos los índices aumentan, esto a causa de la señal ruidosa que provoca variaciones de difícil compensación debido a su naturaleza.

En conclusión, y tomando en cuenta los datos se puede determinar que, con respecto al ingreso de la perturbación constante sea positiva o negativa, el controlador que mejor respuesta presenta es la técnica PD-Like. Mientras que al tener una perturbación de tipo ruido, siendo un comportamiento estocástico los controladores no se puede comparar bajo las mismas condiciones, pero en el caso de las simulaciones realizadas el controlador con un rendimiento adecuado es la técnica SMC + Predictor de Smith.

Perturbaciones de Velocidad ante el Seguimiento de la Trayectoria Cuadrada.

El análisis del efecto de las perturbaciones en el seguimiento de la trayectoria cuadrada se realiza a partir del controlador sintonizado y siguiendo los lineamientos establecidos en la sección 3.2. El ingreso de las diversas perturbaciones se realiza a los 33 [s], cuando se ha

estabilizado el robot, momento en el que transita el lado derecho de la trayectoria y continua hasta el final de la simulación. Los resultados son los siguientes:

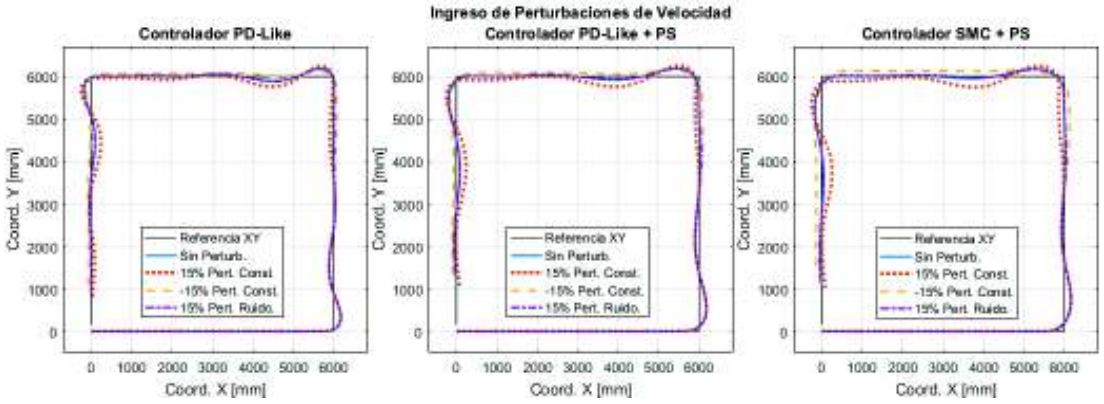


Figura 3.89. Vista del plano XY para el seguimiento de la trayectoria cuadrada ante la presencia de perturbaciones de velocidad.

Como se puede observar en la Figura 3.89, la presencia de perturbaciones tiene efectos visibles en el seguimiento de la trayectoria, y considerando que en cada esquina se produce un cambio de orientación, se tienen respuestas variadas. En general el controlador que mejor responde teniendo oscilaciones reducidas y una recuperación de la trayectoria más rápida es la técnica PD-Like. Al tener una perturbación constante positiva se observa una mayor oscilación en la transición que se producen en las esquinas, mientras que al tener una perturbación constante negativa se produce un freno que desencadena en una transición menos oscilante. Los efectos de la perturbación de tipo ruido en el seguimiento no son tan evidentes, pues la trayectoria es muy parecida a la que se tiene con el controlador inicial sin perturbaciones.

En la Figura 3.90 y 3.91 se puede observar la respuesta de velocidad lineal ante los distintos tipos de perturbaciones, y las acciones correctivas de cada uno de los controladores en análisis para la compensación de perturbaciones.

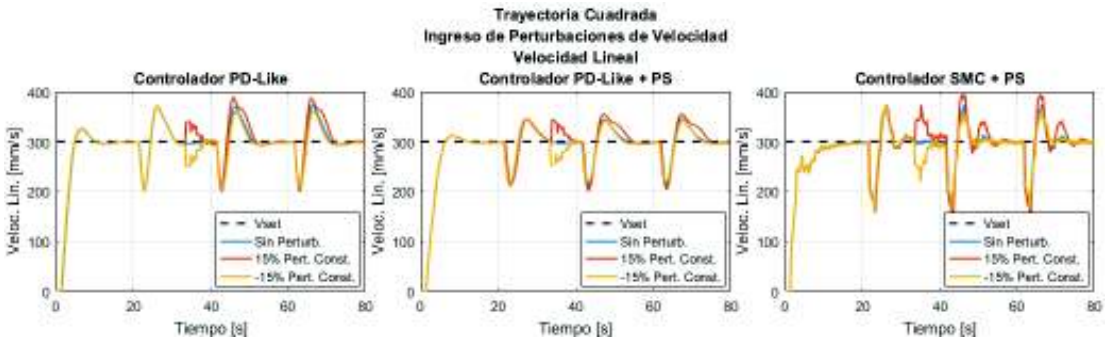


Figura 3.90. Respuesta de velocidad lineal ante la presencia de perturbaciones.

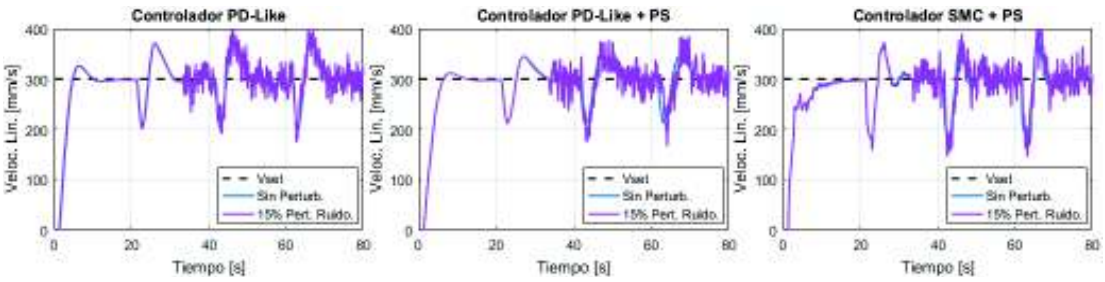


Figura 3.91. Respuesta de velocidad lineal ante la presencia de perturbaciones tipo ruido.

En la figura anterior se puede notar que en el seguimiento de la trayectoria cuadrada se tienen varios procesos transitorios en la velocidad que coinciden con el paso del robot por las esquinas de la trayectoria. Se puede apreciar que todas las técnicas de control pueden atenuar la perturbación en un tiempo aproximado de 5 [s], luego de esto se presenta una estabilización sobre el valor de referencia, pero se tiene una respuesta ligeramente distinta de acuerdo con la presencia de cada perturbación. En las perturbaciones constantes positivas luego del ingreso y su atenuación, se nota que se desarrollan picos más altos en las transiciones de las esquinas, ocurre totalmente lo contrario en el ingreso de la perturbación constante negativa, donde los picos son menores respecto a la respuesta sin perturbaciones. Finalmente, cuando se tienen perturbaciones de tipo ruido se observa que la velocidad desarrollada por el robot empieza a variar acorde a esta señal de perturbación y continua así hasta el final de la simulación. En la siguiente figura se tiene la respuesta de la velocidad angular ante la presencia de perturbaciones.

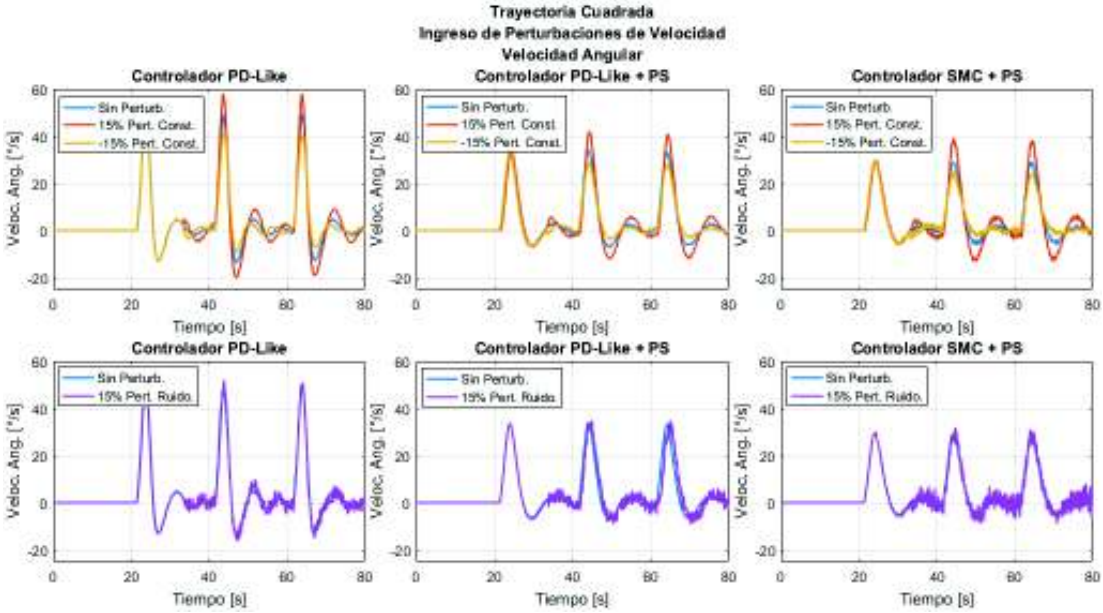


Figura 3.92. Respuesta de velocidad angular ante la presencia de distintos tipos de perturbaciones.

En las gráficas de velocidad angular, que se puede observar en la Figura 3.92, es más complicado prestar atención al ingreso y atenuación de la perturbación debido a que la respuesta propia del seguimiento exige una velocidad oscilatoria. Sin embargo, el comportamiento de los picos de velocidad angular es muy parecido a lo que ocurre con la velocidad lineal, es decir que una perturbación constante positiva provoca picos de velocidad mayores, y una perturbación constante negativa tiene el efecto contrario. Respecto a las perturbaciones tipo ruido se observa que los efectos no son visibles en los picos de velocidad desarrollados, únicamente son visibles en las secciones de comportamiento constante. A continuación, se presenta un resumen de índices de interés en la Tabla 3.26.

Tabla 3.26. Resultados de los índices de rendimiento y parámetros de interés para el seguimiento de la trayectoria cuadrada ante la presencia de perturbaciones.

Índices y Parám.	PD-Like				PD-Like + PS				SMC + PS			
	Tipo de Perturbación				Tipo de Perturbación				Tipo de Perturbación			
	Sin Pert.	Constante		Ruido	Sin Pert.	Constante		Ruido	Sin Pert.	Constante		Ruido
		15%	-15%	15%		15%	-15%	15%		15%	-15%	15%
$\|\|e\|\|\ [m]$	0.74	0.63	0.86	0.74	0.91	0.77	1.05	0.92	0.96	0.75	1.16	0.94
ISE_x	224.75	199.7	259.54	225.74	327.93	289.23	380.83	331.77	332.91	272.49	419.62	337.28
ISE_y	225.90	191.92	269.97	228.42	328.32	275.81	393.12	325.45	348.47	272.87	450.56	342.81
ISE_v	3.3327	3.5541	3.2955	3.5343	3.3754	3.5311	3.3864	3.6211	3.3295	3.6461	3.2994	3.6313
ISE_ω [x10^{-4}]	1078	1480	855.1	1137	356.89	583.18	313.06	379.81	245.76	486.78	220.09	286.03

Analizando los datos anteriores, se puede notar un comportamiento similar a lo sucedido en la sección anterior con el seguimiento de la trayectoria circular, es decir que la perturbación constante positiva tiene un efecto de impulso para el robot por lo que los índices relacionados al seguimiento ($||e||$, ISE_x e ISE_y) mejoran, mientras que al tener una perturbación constante negativa el efecto que provoca es similar a un freno por lo que todos los índices de seguimiento decaen. Respecto a los efectos de la señal de perturbación de tipo ruido se tiene un decaimiento en los índices, aunque no de manera pronunciada por lo que en esta trayectoria el ruido no ha afectado de gran manera al seguimiento.

En conclusión, el controlador que mejor respuesta ha tenido en la tarea de seguimiento de la trayectoria cuadrada es el controlador PD-Like, esto debido a que posee las menores variaciones en la respuesta de la mayoría de los índices en consideración.

Perturbaciones de Velocidad ante el Seguimiento de la Trayectoria Lemniscata de Bernoulli.

El seguimiento de la trayectoria denominada Lemniscata de Bernoulli ante la presencia de perturbaciones de velocidad fue realizada considerando los lineamientos de la sección 3.2, el ingreso de las perturbaciones se lo hace a los 35 [s]. Los resultados del seguimiento se los presenta a continuación:

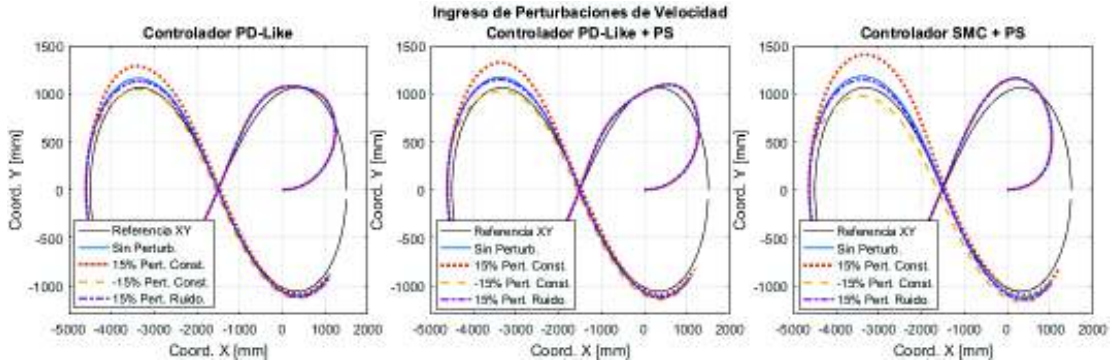


Figura 3.93. Vista del plano XY para el seguimiento de la trayectoria Lemniscata de Bernoulli ante la presencia de perturbaciones de velocidad.

Como se puede observar en la Figura 3.93, los efectos de las perturbaciones de velocidad se evidencian en la perdida de la trayectoria en la curva superior izquierda, el controlador donde se nota una mayor afectación ante las perturbaciones es la técnica SMC + Predictor de Smith, por su parte el resto de los controladores tienen una respuesta similar entre sí. En general todos los controladores, ante una perturbación constante positiva, presentan una salida de la trayectoria pronunciada. Cuando se tiene una perturbación constante negativa, la velocidad se reduce y la curva es tomada por la parte interna de la trayectoria. En cuanto a la perturbación de tipo ruido se observa un comportamiento muy similar al que tiene el seguimiento sin perturbaciones. En las Figuras 3.94 y 3.95 se puede observar la respuesta de velocidad lineal ante los distintos tipos de perturbaciones.

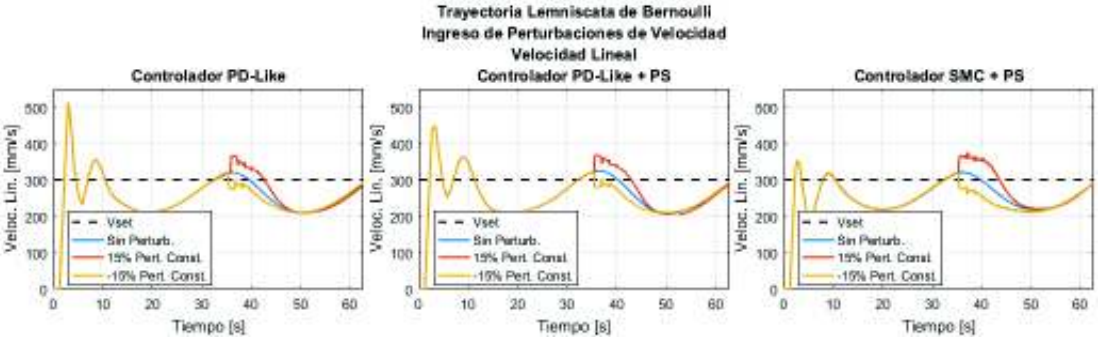


Figura 3.94. Respuesta de velocidad lineal ante la presencia de perturbaciones.

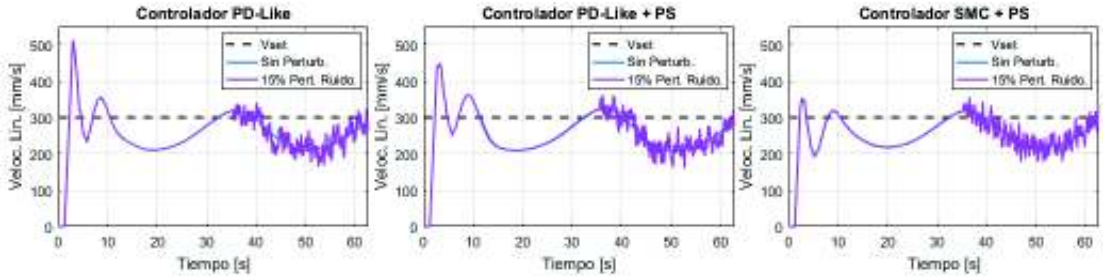


Figura 3.95. Respuesta de velocidad lineal ante la presencia de distintos tipos de perturbaciones.

En las figuras anteriores se puede observar que la velocidad lineal se desarrolla de manera oscilante alrededor de la velocidad de referencia, el ingreso de la perturbación coincide con un pico de la velocidad, para tener la menor interacción de un comportamiento creciente o decreciente de la curva de velocidad. Como se observa en la gráfica, los controladores tardan un promedio de 5 [s] en compensar la perturbación hasta volver a tener un comportamiento similar al que se obtiene sin la presencia de perturbaciones. En las pruebas realizadas con la presencia de perturbaciones tipo ruido, se observa que la respuesta del robot presenta variaciones relacionadas con el ruido ingresado, pero que tiene un comportamiento similar a la velocidad que desarrolla el robot sin la presencia de ruido.

En la siguiente figura se observa la velocidad angular a través del tiempo para un análisis de las perturbaciones que se ingresaron a esta variable.

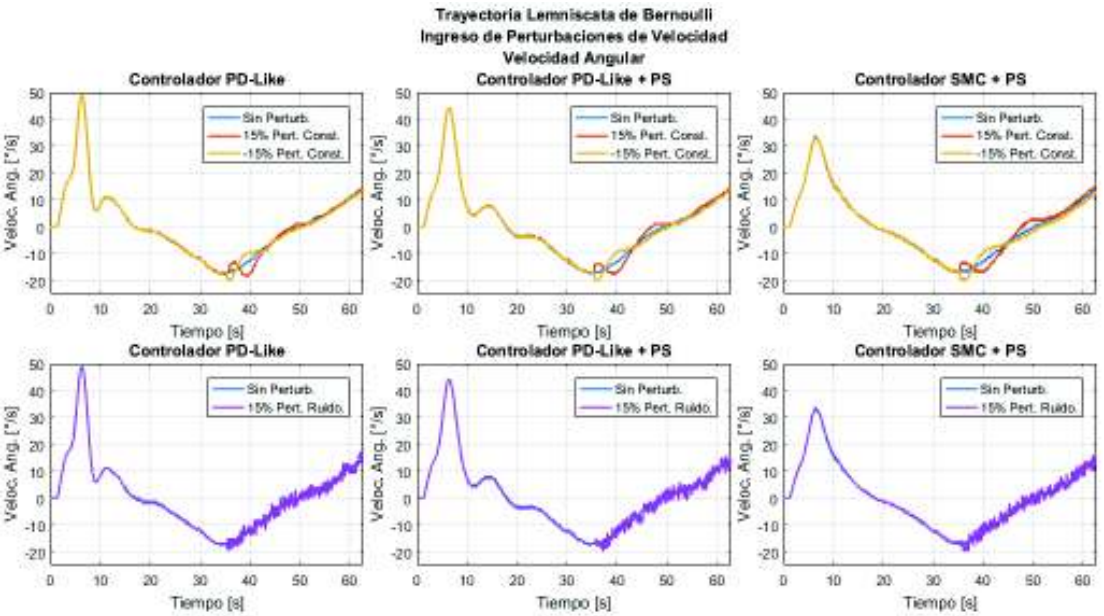


Figura 3.96. Respuesta de velocidad angular ante la presencia de distintos tipos de perturbaciones.

Al analizar la Figura 3.96 se puede notar que el ingreso de la perturbación de velocidad angular se realiza en un valle de la curva. La perturbación constante positiva o negativa se compensa en más de 10 [s] y produce oscilaciones hasta nuevamente retomar un comportamiento adecuado. Por su parte ante un ingreso de la perturbación tipo ruido se observa una velocidad angular con variaciones pequeñas alrededor del valor adecuado de seguimiento. En la Tabla 3.27 se presenta un resumen de los índices de rendimiento.

Tabla 3.27. Resultados de los índices de rendimiento y parámetros de interés para el seguimiento de la trayectoria Lemniscata de B. ante la presencia de perturbaciones.

Índices y Parám.	PD-Like				PD-Like + PS				SMC + PS			
	Tipo de Perturbación				Tipo de Perturbación				Tipo de Perturbación			
	Sin Pert.	Constante		Ruido	Sin Pert.	Constante		Ruido	Sin Pert.	Constante		Ruido
		15%	-15%	15%		15%	-15%	15%		15%	-15%	15%
$\|\|e\|\|$ $[m]$	0.79	0.65	0.92	0.79	0.82	0.68	0.96	0.84	0.89	0.68	1.11	0.92
ISE_x	252.75	226.04	286.48	254.28	270.40	240.18	308.90	270.39	322.46	272.92	392.57	327.16
ISE_y	116.68	109.72	121.62	116.65	122.82	117.08	128.01	120.50	164.94	160.81	166.06	163.33
ISE_v	4.2798	4.352	4.3808	4.413	4.2215	4.3656	4.3321	4.4028	3.7258	3.8328	4.0343	3.8516
ISE_ω [x10^{-4}]	199.62	207.22	251.58	212.68	134.24	139.65	184.44	147.22	58.68	65.09	107.93	71.725

Al analizar los datos que se presenta en la tabla anterior se puede observar que se tienen resultados diversos, en cuanto a la perturbación constante positiva la mejor respuesta fue con el uso del controlador PD-Like + Predictor de Smith, mientras que la menor variación de los parámetros para la perturbación constante negativa y la perturbación tipo ruido fue con el uso del controlador PD-Like. En general, se tiene una respuesta similar que las obtenidas con las anteriores trayectorias, en cuanto a los efectos de las perturbaciones constantes positiva y negativa, y la perturbación de tipo ruido. En conclusión, se puede decir que el controlador que mejor respuesta a tenido es la técnica PD-Like.

3.6. Resultados ante Errores en el Modelo

En la implementación de los controladores, en especial el controlador por modos deslizantes (SMC) y la estructura de compensación de nombre Predictor de Smith, se usa un modelo de orden reducido del comportamiento de la velocidad lineal y angular del robot Pioneer 3DX, para el desarrollo matemático en el caso del controlador SMC y para la obtención del "modelo de la plataforma robótica" en el caso del Predictor de Smith. El modelo de orden reducido se lo obtiene a partir de una prueba de cambio de referencia, donde en base a la respuesta del robot se definen las constantes K, τ y t_0, la correcta determinación de estas constantes nos provee un modelo apegado a la respuesta real del

robot. Los errores en la determinación de las constantes que definen el modelo pueden provocar un mal funcionamiento en los controladores, por lo que una prueba para verificar la funcionalidad del controlador, a pesar de los errores e incertidumbres propias del uso de un modelo de orden reducido, se basa en la variación de las constantes τ y t_0 para determinar los límites de funcionamiento ante la presencia de estos errores. Los lineamientos para la obtención de los datos y su análisis son los siguientes:

- Se tiene a consideración para la prueba únicamente los controladores PD-Like + Predictor de Smith y SMC + Predictor de Smith, puesto que en el controlador PD-Like no se ve involucrado el uso del modelo de orden reducido.
- Se usan los parámetros de los controladores y la configuración de la simulación que se aplicó en la sección 3.2.
- En el caso de la prueba para el controlador PD-Like + Predictor de Smith se realiza una variación de los parámetros τ y t_0 del modelo de la velocidad lineal y angular en pasos de 20% hasta ±80%.
- Para la prueba con el uso del controlador SMC + Predictor de Smith se realiza una variación de los parámetros τ y t_0 en pasos de ±10% hasta obtener una respuesta inestable.

Errores en el Modelo para el Controlador PD-Like + Predictor de Smith

En esta sección se analiza los efectos del error en el modelo que se usa para la implementación del "modelo de la plataforma robótica" que se observa en la Figura 2.8, que es parte del compensador de nombre Predictor de Smith. Al variar los parámetros del modelo FOPDT, lo que se provoca es un mal funcionamiento del predictor, por lo que la realimentación de velocidad será deficiente.

A continuación, se presenta los índices de rendimiento de la velocidad lineal y angular (ISE_v e ISE_ω) que se obtuvo al realizar una variación del error en el modelo de -80% a 80% en el seguimiento de la trayectoria circular con el controlador PD-Like + Predictor de Smith con los parámetros y configuraciones de la trayectoria que se usaron en el proceso de calibración de la sección 3.2.

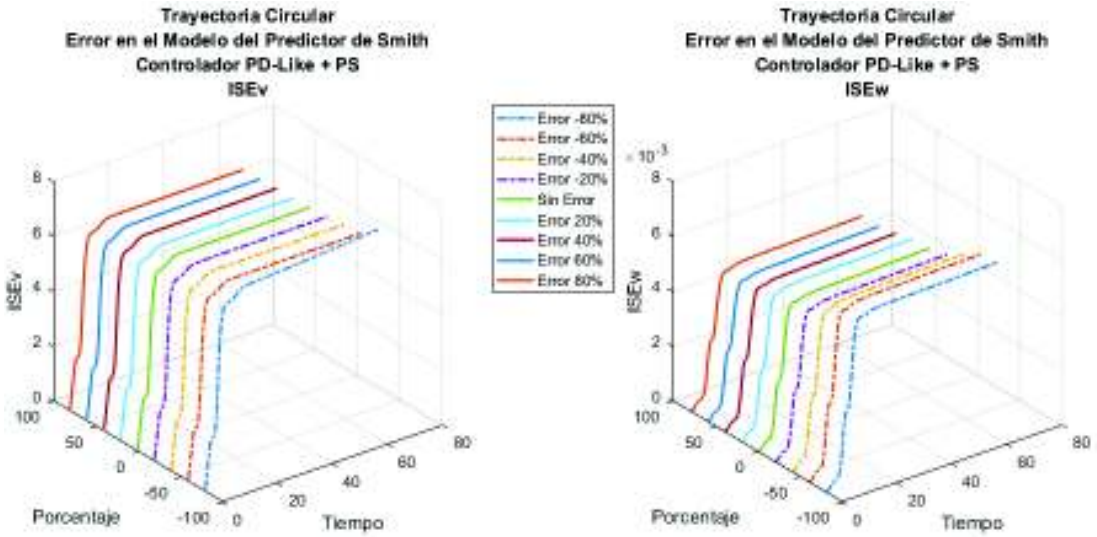


Figura 3.97. Índices de rendimiento ISE_v e ISE_ω ante errores en el modelo.

Como se puede observar en la Figura 3.97, a pesar de existir una variación de hasta un ±80%, la respuesta de velocidad lineal y angular es similar. Este comportamiento puede ser explicado considerando el esquema de control. En primer lugar, hay que tener en cuenta que el controlador principal, a quien el Predictor de Smith provee de la realimentación de velocidad, es la técnica PD-Like que se define en la Ecuación 1.15:

$$U_{PDL} = k_s\left(k_g \eta_{ref}(t - h_1) - \eta_{PS}\right) - \alpha_s z$$

Ecuación 1.15. Ley de control de la técnica PD-Like simplificada.

En segundo lugar, y considerando la ecuación anterior, la referencia de velocidad η_{ref} viene de la transformación matemática descrita en las Ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4. Esta transformación provee de valores de referencia de velocidad bastante grandes cuando la posición real del robot y la posición de referencia están relativamente alejadas. Esta velocidad de referencia es reducida con el parámetro k_g, debido a que el robot Pioneer 3DX tiene un valor de velocidad máxima, a pesar de este escalamiento las velocidades de referencia son aún de gran magnitud, por lo que tiene un efecto reducido si se compara con una realimentación inadecuada η_{PS} debido a los errores presentes en el modelado. Esta característica ya fue abordada en las pruebas ante el ingreso de perturbaciones ubicadas en la realimentación de velocidad (Figura 3.83). En conclusión, las características del bloque de transformación matemática y el uso del controlador PD-Like hace que, en el esquema de seguimiento, la realimentación de velocidad no tenga gran peso en el funcionamiento, por lo que cierto tipo de perturbaciones o errores en la realimentación no representen un decaimiento considerable, como se observa en la Figura 3.97.

Errores en el Modelo para el Controlador SMC + Predictor de Smith

Al considerar los errores en el modelo para la combinación del controlador SMC + Predictor de Smith, hay que notar que este error afectará al controlador principal, que en este caso es el controlador por modos deslizantes, debido a que esta técnica fue desarrollada considerando el modelo de orden reducido; y además se afecta a la vez a la realimentación de velocidad que provee el Predictor de Smith, debido a que esta estructura también utiliza el mismo modelo reducido.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el seguimiento de la trayectoria circular con el uso del controlador SMC + Predictor de Smith.

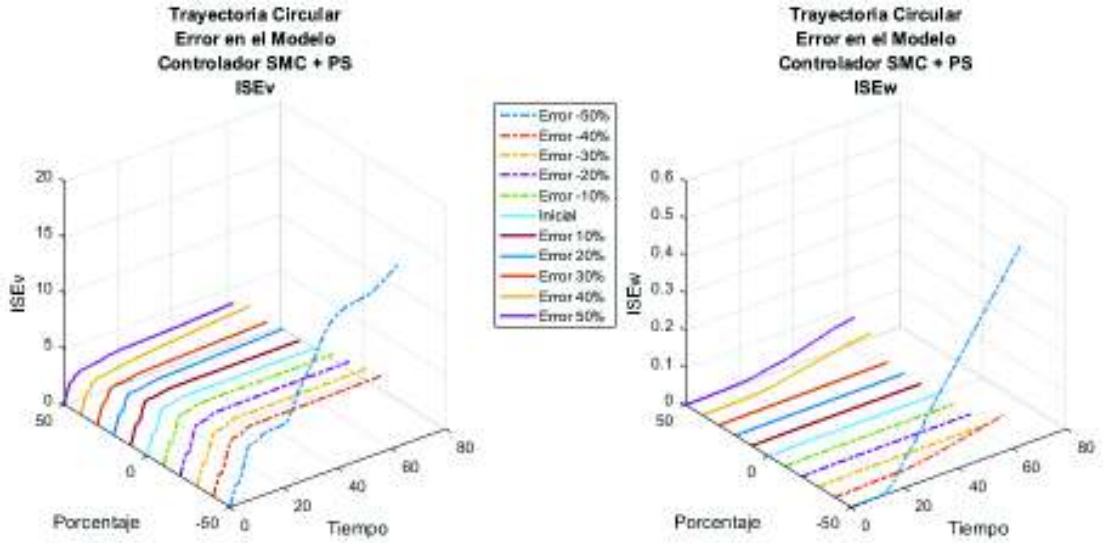


Figura 3.98. Índices de rendimiento ISE_v e ISE_ω ante errores en el modelo para el seguimiento de la trayectoria circular.

En la Figura 3.98 se tiene la respuesta de los índices de rendimiento ISE_v e ISE_ω, como se puede notar, entre más grande es el porcentaje de error en el modelo, la respuesta se torna más deficiente hasta que la curva de los índices muestra un comportamiento creciente o irregular, lo que significa que el controlador ha dejado de funcionar adecuadamente y el robot está en una operación inestable. Tomando en cuenta una operación conjunta de la velocidad lineal y angular en el seguimiento de la trayectoria, se puede notar que el robot opera entre el rango de -30% hasta 30% de error en el modelo, por lo que se tiene una buena respuesta del controlador a pesar de una mala aproximación del modelo a la respuesta real.

A continuación, se presentan los resultados que se obtienen en el seguimiento de la trayectoria cuadrada.

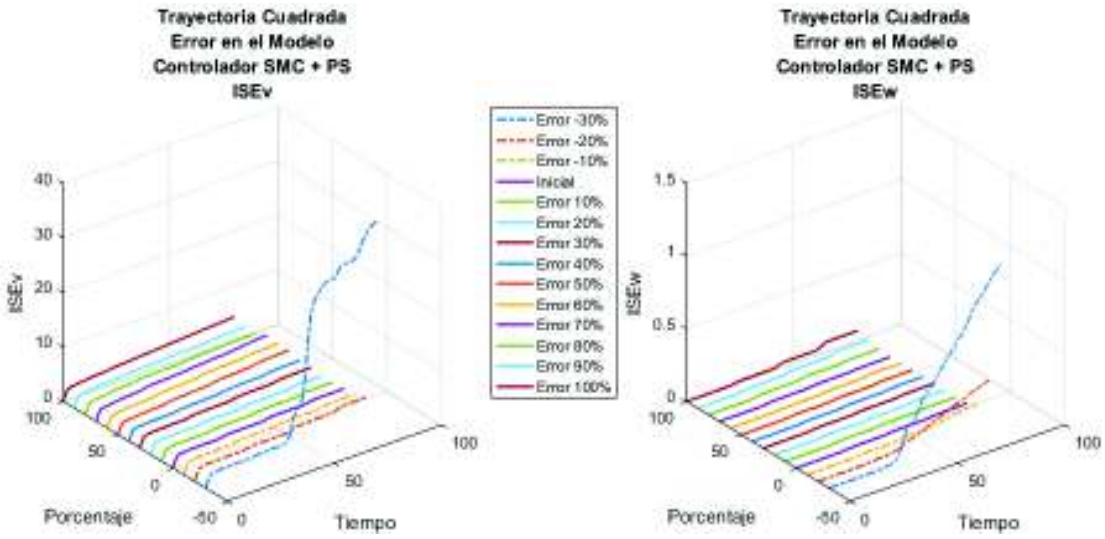


Figura 3.99. Índices de rendimiento ISE_v e ISE_ω ante errores en el modelo para el seguimiento de la trayectoria cuadrada.

Al analizar la Figura 3.99, se observa que ante un crecimiento de las constantes que definen el modelo, el robot puede funcionar de manera adecuada hasta el 90% de error. Mientas que cuando se produce una reducción de las constantes el robot pierde estabilidad en el -30% de error. Por lo que, para el seguimiento de la trayectoria cuadrada, el rango de variación del error estaría entre -30% y 90% de error en el modelo.

En la siguiente figura se observan los resultados obtenidos con en el seguimiento de la trayectoria Lemniscata de Bernoulli ante la presencia de errores en el modelo.

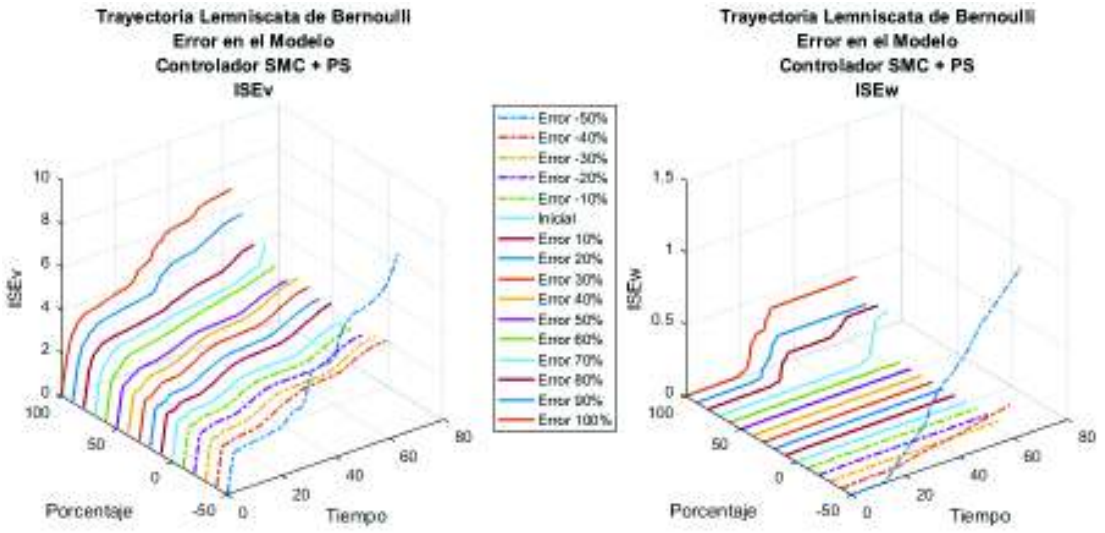


Figura 3.100. Índices de rendimiento ISE_v e ISE_ω ante errores en el modelo para el seguimiento de la trayectoria Lemniscata de Bernoulli.

En la Figura 3.100 se observa la respuesta del controlador SMC + Predictor de Smith ante los errores en el modelo en un rango de -50% hasta 100% para el seguimiento de la trayectoria Lemniscata de Bernoulli. Se puede notar que la velocidad lineal tiene un comportamiento más robusto puesto que no se aprecian grandes cambios en el comportamiento a pesar del gran rango de variación del error del modelo. Por su parte el índice de velocidad angular es más sensible teniendo porcentajes de error que provocan curvas con respuestas ineficientes de magnitud menor que lo observado en la velocidad lineal. Por lo que el rango de operación adecuado para ambas variables está entre -30% hasta 60%.

En conclusión, y considerando el análisis de las distintas trayectorias, una respuesta adecuada de la velocidad lineal y angular ante la presencia de errores está en el rango de -30% hasta 30%, donde se aprecia una robustez en el controlador SMC + Predictor de Smith.

4. CONCLUSIONES

4.1. Conclusiones

- La implementación de los controladores analizados en este trabajo ha presentado buenos resultados en el seguimiento de trayectorias ante la presencia de retardos, reduciendo en gran medida los efectos negativos y probando su buen desempeño ante variadas pruebas de rendimiento.

- La técnica de control PD-Like obtuvo excelentes resultados por sobre las demás técnicas en análisis, su estructura relativamente sencilla tiene una buena adaptabilidad al sistema de control para el seguimiento de trayectorias usado en el robot Pioneer 3DX. El desempeño en el seguimiento ha tenido resultados sobresalientes cuantificados en una serie de parámetros e índices relacionados con diversos aspectos de funcionalidad del robot.

- El compensador llamado Predictor de Smith, usado en conjunto con la técnica PD-Like y el controlador por modos deslizantes (SMC), presenta una implementación con ciertas complejidades técnicas, pese a esto se ha tenido buenos resultados en la eliminación de los efectos de los retardos en la realimentación que provee el predictor. Sin embargo, debido a las características de la transformación matemática para la obtención de velocidades de referencia, provoca que la realimentación no tenga gran peso en los cálculos de las acciones de control. Por lo que no se ha podido obtener resultados con mejoras significativas usando el esquema predictor.

- El controlador por modos deslizantes (SMC) + Predictor de Smith ha tenido resultados divididos, puesto que en la prueba de variación del retardo tuvo un sobresaliente desempeño respecto al resto de controladores. Mientras que en el seguimiento de trayectorias e ingreso de perturbaciones los resultados están por debajo de la técnica PD-Like y su rendimiento es parecido a la combinación PD-Like + Predictor de Smith. Una de las razones que puede explicar este desempeño es la compleja manipulación del controlador, debido a que posee una superficie deslizante tipo PD-Like y una parte discontinua de la ley de control que usa una función sigmoide, por lo que tiene en total 10 parámetros o constantes del controlador para calibrar el seguimiento.

- El uso del simulador MobileSim y la implementación de la estructura de control en lenguaje Python con la ayuda del software de programación Eclipse ha permitido la

integración de un sistema de simulación eficiente y sencillo de usar, donde se tiene una respuesta muy apegada a la que proporciona el robot real, y que además debido al tipo de conexión que usa el simulador sería fácilmente integrable la plataforma Pioneer 3DX al esquema ya desarrollado.

- La interfaz gráfica que se ha implementado con el uso de la librería WxPython, ha permitido crear una detallada interfaz que brinda la posibilidad de configurar varios aspectos relacionados a las trayectorias, controladores, posibles perturbaciones y la obtención de resultados al finalizar el tiempo de simulación, por lo que el uso del lenguaje Python se presenta como una herramienta muy versátil para el desarrollo de aplicaciones robóticas y de ingeniería en general.

- Los parámetros e índices de rendimiento ISE usados para la cuantificación de la calidad del seguimiento de cada trayectoria, permitieron no solo determinar la combinación adecuada de cada controlador, sino que además fueron de utilidad para determinar objetivamente que controlador tenía una mejor respuesta ante cada una de las pruebas realizadas en este trabajo.

- Al considerar el seguimiento de las trayectorias propuestas, el controlador que mejores resultados obtuvo es la técnica PD-Like. Ante un aumento o disminución del retardo fijo el controlador SMC en combinación con el Predictor de Smith obtuvo una mejor respuesta que el resto de los controladores. Finalmente, cuando se tiene la presencia de perturbaciones de velocidad los resultados son variados, por lo que depende en gran medida de la trayectoria, controlador, tipo de perturbación y tiempo de ingreso, pero en general la técnica de control que en la mayoría de los casos tuvo un mejor rendimiento fue el controlador PD-Like.

- El controlador por modos deslizantes (SMC) y el Predictor de Smith son las técnicas que usan un modelo de orden reducido del comportamiento del robot Pioneer 3DX, por lo que son las técnicas que pueden ser sometidas a la prueba de errores en el modelado. Con respecto a la combinación PD-Like + Predictor de Smith, la presencia de errores no afecto significativamente a su funcionamiento debido al uso de la técnica PD-Like y que el error del modelo solo afecta a las velocidades y no a la realimentación de posición y orientación de robot, que son usados en el cálculo de la referencia para el controlador. Por su parte la combinación SMC + Predictor de Smith presentó una respuesta adecuada entre ±30% de error en los parámetros del modelo FOPDT, por lo que tiene una respuesta robusta ante este tipo de prueba.

4.2. Recomendaciones

- El uso del simulador MobileSim, provee de una conexión similar a la que usa el robot Pioneer 3DX a través de un puerto TCP, por lo que se puede reemplazar el simulador por la plataforma robótica y verificar los resultados obtenidos en este trabajo de titulación.

- Las pruebas de variación del periodo de retardo han puesto en evidencia que las técnicas estudiadas en este trabajo son menos sensibles a una reducción del periodo de retardo en el esquema de control, por lo que previo a un estudio de la red de comunicación a usarse y sus rangos de retardo, los controladores podrían diseñarse para un retardo fijo y funcionar adecuadamente a pesar de que existan retardos variables estocásticos.

- La transformación matemática utilizada para convertir una referencia de posición en una referencia de velocidad en muy sensible cuando la posición de referencia y la posición del robot están alejadas, dando valores de referencia de velocidad de gran magnitud, muy superiores a los límites de funcionamiento del robot Pioneer 3DX, esto provoca que la realimentación de velocidad no tenga mucho peso en el cálculo de las acciones de control. Por lo que sería de utilidad el uso de transformaciones matemáticas que no presenten este tipo de problemas para futuros trabajos.

- Al usar el Predictor de Smith se tiene una realimentación de velocidades sin la influencia del retardo, por lo que considerando esto sería de utilidad verificar los resultados usando un controlador primario tipo PID en el esquema, e implementar adicionalmente un Predictor de Smith para la realimentación de posición y orientación si el esquema de control se puede adecuar a esta estructura.

- El controlador PD-Like implementado en este trabajo se obtuvo a partir del esquema de control de un robot de tracción diferencial teleoperado con realimentación de fuerza, por lo que la técnica PD-Like usa referencias retardadas de las acciones enviadas por el operador. Al considerar que el esquema de seguimiento de trayectorias es relativamente distinto, sería de interés probar el rendimiento del controlador si no se retrasaran las referencias de velocidad que provienen de la transformación matemática, sino por el contrario se retrasaran las referencias de posición de la trayectoria y con ello se calcula la referencia de velocidad del controlador.

- El controlador por modos deslizantes (SMC) en este trabajo fue desarrollado con una superficie deslizante tipo PD-Like, para futuros trabajos se podría usar una superficie tipo PI considerando que así ya se cuenta con relaciones matemáticas para la sintonización del controlador, y además con este tipo de superficie se tienen menos parámetros para calibrar el seguimiento de las trayectorias.
- La aplicación de técnicas de control no convencionales, debido a la presencia de retardos en el esquema de seguimiento de trayectorias para el robot Pioneer 3DX, ha imposibilitado el uso de relaciones matemáticas que provean con parámetros de sintonización óptimos, por lo que una rigurosa sintonización y calibración basada en resultados es necesaria para obtener una respuesta de los controladores que reflejen sus características, y se reduzca al mínimo las respuestas inadecuadas causadas por una incorrecta combinación de las constantes de cada controlador.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] J. Nilsson, «Real-time control systems with delays», 1998.

[2] Emanuel Slawiñski, D. Santiago, D. Chávez, y V. Mut, «Esquema Tipo–PD más impedancia modificado para teleoperación bilateral de nn robot móvil considerando retardos de tiempo», *Rev. Politécnica*, vol. 38, n.º 2, pp. 59-68, ene. 2017.

[3] P.F. Hokayem y M.W. Spong, «Bilateral teleoperation: an historical survey», *Automatica*, vol. 42, n.º 12, pp. 2035-2057, 2006.

[4] J.-P. Richard, «Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems», *Automatica*, vol. 39, n.º 10, pp. 1667–1694, 2003.

[5] J. Nilsson, B. Bernhardsson, y B. Wittenmark, «Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays», *Automatica*, vol. 34, n.º 1, pp. 57–64, 1998.

[6] A. Alvarez-Aguirre, M. Velasco-Villa, y B. del-Muro-Cuellar, «Nonlinear smith-predictor based control strategy for a unicycle mobile robot subject to transport delay», en *Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, 2008. CCE 2008. 5th International Conference on*, 2008, pp. 102–107.

[7] I. Buzurovic, D. L. Debeljkovic, V. Misic, y G. Simeunovic, «Stability of the Robotic System with Time Delay in Open Kinematic Chain Configuration», *Acta Polytech. Hung.*, vol. 11, n.º 8, pp. 45–64, 2014.

[8] A. Alvarez-Aguirre, N. van de Wouw, T. Oguchi, K. Kojima, y H. Nijmeijer, «Remote tracking control of unicycle robots with network-induced delays», en *Informatics in Control, Automation and Robotics*, Springer, 2011, pp. 225–238.

[9] E. Nuno, R. Ortega, N. Barabanov, y L. Basañez, «A globally stable PD controller for bilateral teleoperators», *IEEE Trans. Robot.*, vol. 24, n.º 3, pp. 753–758, 2008.

[10] J.-H. Ryu, J. Artigas, y C. Preusche, «A passive bilateral control scheme for a teleoperator with time-varying communication delay», *Mechatronics*, vol. 20, n.º 7, pp. 812–823, 2010.

[11] Z. Xu, L. Ma, y K. Schilling, «Passive bilateral teleoperation of a car-like mobile robot», en *Control and Automation, 2009. MED'09. 17th Mediterranean Conference on*, 2009, pp. 790–796.

[12] E. Slawinski, V. A. Mut, y J. F. Postigo, «Teleoperation of mobile robots with time-varying delay», *IEEE Trans. Robot.*, vol. 23, n.º 5, pp. 1071–1082, 2007.

[13] D. Lee y M. W. Spong, «Passive bilateral teleoperation with constant time delay», *IEEE Trans. Robot.*, vol. 22, n.º 2, pp. 269–281, 2006.

[14] A. A. A. Aguirre, H. H. Nijmeijer, T. T. Oguchi, y K. Kojima, «Remote control of a mobile robot subject to a communication delay», 2010.

[15] K. Kojima, T. Oguchi, A. Alvarez-Aguirre, y H. Nijmeijer, «Predictor-based tracking control of a mobile robot with time-delays», *IFAC Proc. Vol.*, vol. 43, n.º 14, pp. 167–172, 2010.

[16] F. Penizzotto, E. Slawinski, y V. Mut, «Analysis and experimentation of a mobile robot teleoperation system over internet», *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 12, n.º 7, pp. 1191–1198, 2014.

[17] «Real Academia Española. Diccionario Usual.» [En línea]. Disponible en: http://dle.rae.es/srv/fetch?id=WYTm4uf. [Accedido: 13-oct-2017].

[18] «Definición de robótica — Definicion.de», *Definición.de*. [En línea]. Disponible en: https://definicion.de/robotica/. [Accedido: 13-oct-2017].

[19] «Robótica Avanzada», *Camp Tecnologico*. .

[20] C. L. Guevara Gordillo y D. J. Guevara Proaño, «Diseño, simulación e implementación de técnicas de control basadas en un modelo de orden reducido y aplicadas al seguimiento de trayectoria para la plataforma robótica Pionner 3DX», B.S. thesis, Quito, 2016., 2016.

[21] Universidad de Sevilla, «Sistemas de locomoción de robots móviles». 2017.

[22] G. M. Andaluz Ortiz, «Modelación, Identificación y Control de Robots Móviles», B.S. thesis, QUITO/EPN/2011, 2011.

[23] «Pioneer P3-DX | Mapping & Navigation Robot». [En línea]. Disponible en: http://www.mobilerobots.com/ResearchRobots/PioneerP3DX.aspx. [Accedido: 13-oct-2017].

[24] E. Colon y R. Pécsi, «Mobile Robots: Localization and 3D Mapping».

[25] V. M. Alfaro Ruíz, «Identificación de modelos de orden reducido a partir de la curvatura de reacción del proceso», *Rev. Cienc. Tecnol. Vol 24 Núm 2 2009*, 2009.

[26] V. M. Alfaro, «Identificación de procesos sobreamortiguados utilizando técnicas de lazo abierto», *Rev. Ing.*, vol. 11, n.º 1, p. 2, 2001.

[27] C. L. Smith, *Digital computer process control*. Intext Educational Publishers, 1972.

[28] V. M. Alfaro, *Nuevas aproximaciones del tiempo muerto para estudios de control*. Ingeniería, 2003.

[29] «El tiempo muerto: dead time en los procesos». [En línea]. Disponible en: http://www.instrumentacionycontrol.net/cursos-libres/automatizacion/curso-sintonizacion-controladores/item/385-el-tiempo-muerto-dead-time-en-los-procesos.html. [Accedido: 13-oct-2017].

[30] J. E. Normey-Rico, *Control of dead-time processes*. Springer Science & Business Media, 2007.

[31] «Control de Sistemas Complejos: Grandes Retardos». [En línea]. Disponible en: http://www.cec.uchile.cl/~leherrer/IQ57A/retardos/granretardo.htm. [Accedido: 14-oct-2017].

[32] «Mars Exploration Rover Mission: The Mission». [En línea]. Disponible en: https://mars.jpl.nasa.gov/mer/mission/tl_surface_nav.html. [Accedido: 14-oct-2017].

[33] E. Slawiñski y V. Mut, «PD-like controllers for delayed bilateral teleoperation of manipulators robots», *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 25, n.º 12, pp. 1801–1815, 2015.

[34] A. A. Ahmed, R. B. Ahmad, A. Yahya, H. H. Tahir, y J. Quinlan, «Variable structure system with sliding mode controller», *Procedia Eng.*, vol. 53, pp. 441–452, 2013.

[35] O. Camacho y R. Rojas, «A general sliding mode controller for nonlinear chemical processes», *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 122, n.º 4, pp. 650–655, 2000.

[36] T. Kealy y A. O'Dwyer, «Analytical ISE calculation and optimum control system design», 2003.

[37] E. Chaves, «Integración numérica en el tiempo», *Univ. Castilla- Mancha*, 2010.

[38] «Real Academia Española. Diccionario Usual.» [En línea]. Disponible en: http://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=simulador. [Accedido: 14-oct-2017].

[39] «ARIA - MobileRobots Research and Academic Customer Support». [En línea]. Disponible en: http://robots.mobilerobots.com/wiki/ARIA. [Accedido: 14-oct-2017].

[40] «MobileRobots ARIA Robotics SDK». [En línea]. Disponible en: http://www.mobilerobots.com/Software/ARIA.aspx. [Accedido: 14-oct-2017].

[41] «MobileSim robot simulators». [En línea]. Disponible en: http://www.mobilerobots.com/Software/MobileSim.aspx. [Accedido: 14-oct-2017].

[42] «MobileSim - MobileRobots Research and Academic Customer Support». [En línea]. Disponible en: http://robots.mobilerobots.com/wiki/MobileSim. [Accedido: 14-oct-2017].

[43] «¿Qué es Python? - Aprende a Programar - Codejobs». [En línea]. Disponible en: https://www.codejobs.biz/es/blog/2013/03/02/que-es-python. [Accedido: 14-oct-2017].

[44] «Lenguaje interpretado - EcuRed». [En línea]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Lenguaje_interpretado. [Accedido: 14-oct-2017].

[45] «Welcome to Python.org», *Python.org*. [En línea]. Disponible en: https://www.python.org/. [Accedido: 01-nov-2017].

[46] «Iniciándose en la plataforma Eclipse», 26-nov-2012. [En línea]. Disponible en: http://www.ibm.com/developerworks/ssa/library/os-ecov/index.html. [Accedido: 30-oct-2017].

[47] «IDE in Software: Definition & Examples», *Study.com*. [En línea]. Disponible en: http://study.com/academy/lesson/ide-in-software-definition-examples.html. [Accedido: 30-oct-2017].

[48] «Eclipse Neon». [En línea]. Disponible en: https://www.eclipse.org/neon/. [Accedido: 01-nov-2017].

[49] «Definición de trayectoria — Definicion.de», *Definición.de*. [En línea]. Disponible en: https://definicion.de/trayectoria/. [Accedido: 15-oct-2017].

[50] O. Gonzalez, J. Rosero, y A. Rosales, «Control Predictivo Aplicado a un Robot Movil», *Rev. Politécnica*, vol. 34, n.º 2, p. 107, 2014.

[51] L. J. Capito Ruiz y P. A. Proaño Chamorro, «Seguimiento de Trayectorias mediante cuatro Técnicas de Control utilizando una Plataforma Robótica Pioneer 3DX y el Sistema Operativo Robótico ROS», B.S. thesis, Quito, 2015., 2015.

[52] «Teoria_de_Control». [En línea]. Disponible en: http://www3.fi.mdp.edu.ar/control4c7/Material.html. [Accedido: 16-oct-2017].

[53] «Transformada Z (Propiedades)». [En línea]. Disponible en: http://www.el.bqto.unexpo.edu.ve/etperez/apuntes/proptransfz.htm. [Accedido: 30-oct-2017].

[54] «Filtros eléctricos y electrónicos - Tipos, características», *Electrónica Unicrom*, 23-oct-2015. [En línea]. Disponible en: https://unicrom.com/filtros-electricos-electronicos-tipos-caracteristicas/. [Accedido: 19-oct-2017].

[55] T. wxPython Team, «Welcome to wxPython!», *wxPython*, 25-jul-2017. [En línea]. Disponible en: https://wxpython.org/index.html. [Accedido: 19-oct-2017].

[56] «Interfaces Gráficas (GUI) - Wiki PyAr - Python Argentina». [En línea]. Disponible en: http://www.python.org.ar/wiki/InterfacesGraficas. [Accedido: 19-oct-2017].

[57] F. R. F. Carrera, «Retardo en la Transmisión de Información en la Red Internet», *Eidos*, n.º 2, pp. 3–7, 2009.

6. ANEXOS

ANEXO I

Guía de Instalación

I.1. instalación de JRE (JAVA Runtime Environment)

Para un adecuado funcionamiento del software de programación Eclipse, se debe instalar Java Runtime Enviroment JRE, el cual sirve únicamente para ejecutar programas Java y no para desarrollarlos. En el caso de Eclipse es un programa multiplataforma usado principalmente en desarrollo de aplicaciones en Java aunque tiene la posibilidad de usar otros lenguajes de programación, razón por lo que el uso de Java Runtime Enviroment JRE es un requisito previo a la instalación de Eclipse.

Se recomienda descargar el archivo “jre-8u112-windows-i586” de preferencia en su versión de 32 bits, este programa se lo puede descargar en la siguiente dirección:

http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/downloads/jre8-downloads-2133155.html

I.2. instalación de ECLIPSE

En la página oficial de eclipse http://www.eclipse.org/downloads/eclipse-packages/ se puede descargar el instalador, de preferencia es su versión de 32 bits, una vez que se haya descargado el archivo “eclipse-inst-win32” se procede a ejecutarlo teniendo las siguientes opciones:

Figura I.1. Pantalla inicial del instalador del software Eclipse.

Debido a que se usa el lenguaje de programación Python, se escoge el IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) para desarrolladores en C/C++, la opción se la puede observar en la Figura A.1. Como requisito para la habilitación del botón 'INSTALL' se debe ingresar a la opción 'UPDATE' y esperar la instalación automática de los archivos de requisito.

Figura I.2. Pantalla de configuración para Eclipse IDE for C/C++ Developers.

Una vez se haya habilitado la opción de instalar se redirige a la pantalla de la Figura A.3, donde generalmente las pestañas 'Product Version', 'Java 1.8+ VM' e 'Installation Folder' se llenan automáticamente. Sino es así, se debe configurar la dirección C:\Program Files (x86)\Java\jre1.8.0_112 (Current) en la pestaña 'Java 1.8+ VM' que es la ubicación del Java Runtime Enviroment JRE instalado previamente.

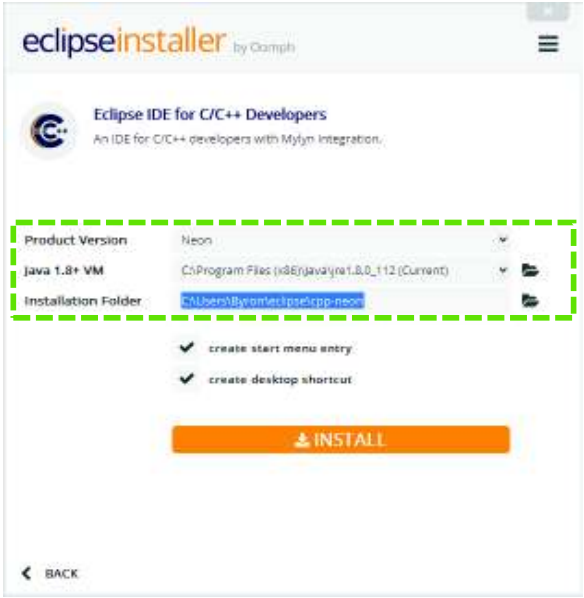


Figura I.3. Pantalla de configuración de Java Virtual Machine 1.8+.

Luego de estos pasos se puede instalar el software de desarrollo Eclipse, la instalación es automática y requiere una conexión de internet.

I.3. instalación de PyDev

PyDev es un IDE para el uso del lenguaje de programación Python en la plataforma de programación Eclipse. Para instalar PyDev se debe abrir Eclipse e ir a la pestaña 'Help>Install New Software…', en la Figura I.4 se puede observar este procedimiento.

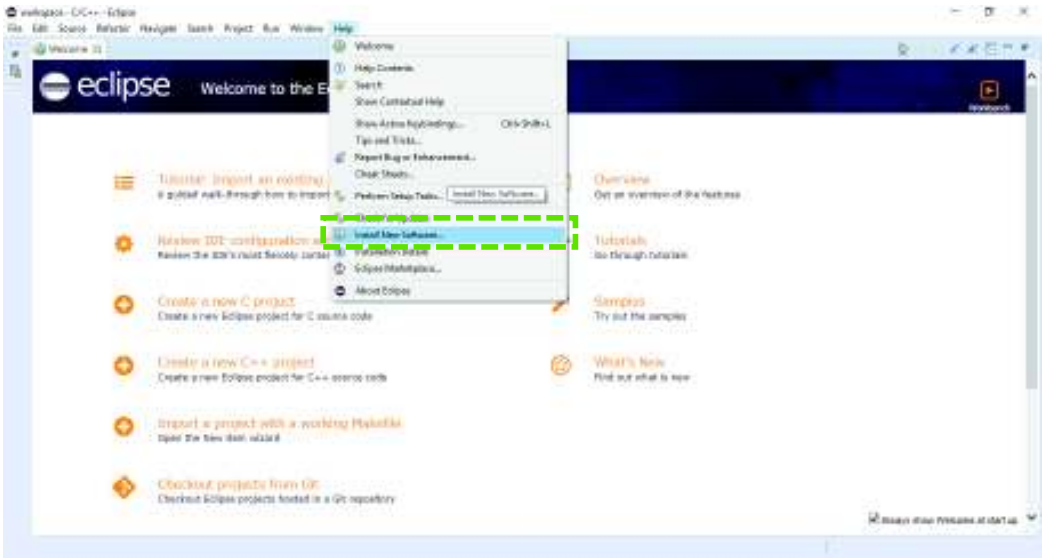


Figura I.4. Pantalla de inicio del programa Eclipse.

Una vez que se ha accedido a la pantalla de instalación, se debe ingresar el sitio web que permite descargar el IDE, para ello se debe dar click en "Add…" y llenar la información que se detalla en las Figura I.5 y I.6.

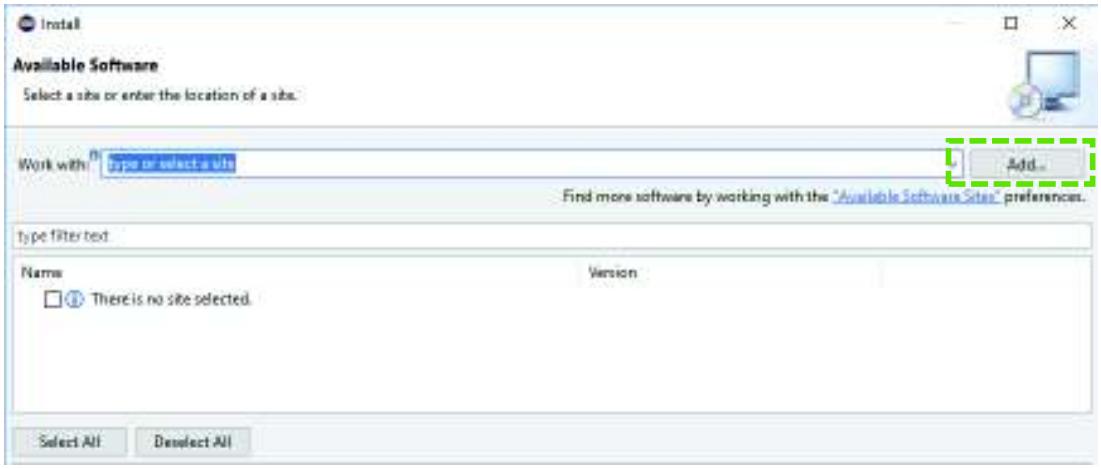


Figura I.5. Ventanas de configuración para la instalación de PyDev.

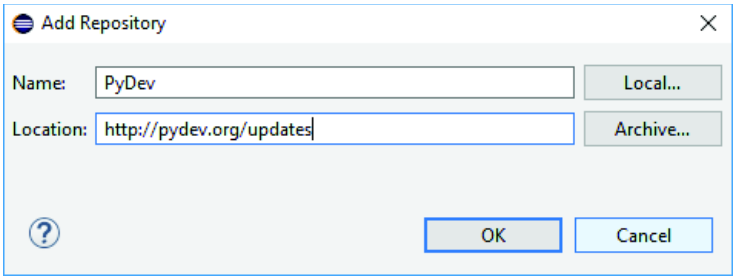


Figura I.6. Ventanas de configuración para la instalación de PyDev.

Luego de la configuración del sitio web, se escogen los items a descargar y se procede a su instalación, como se observa en la Figura I.7.

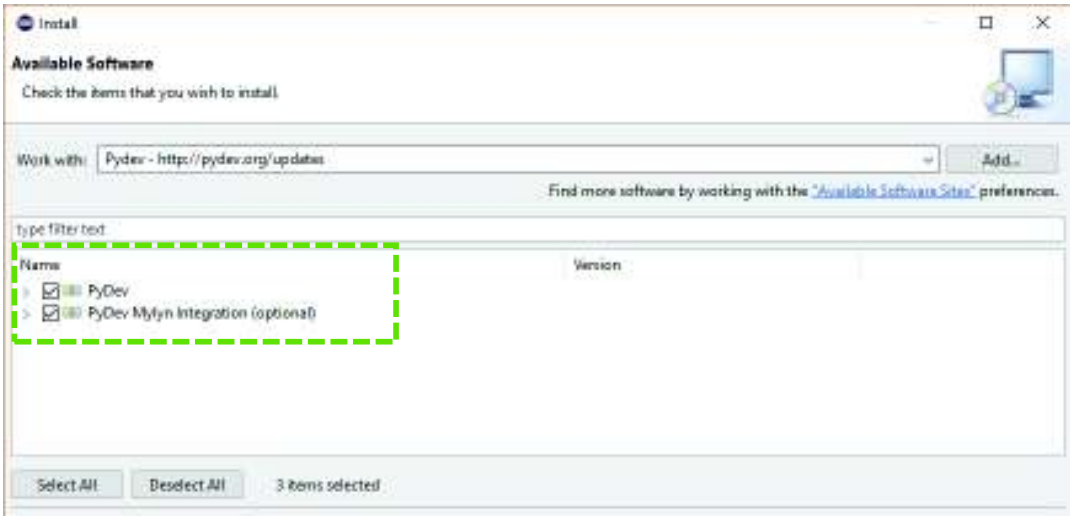


Figura I.7. Items de instalación para la instalación de PyDev.

Finalmente, para usar el lenguaje de programación Python, se requiere instalar su código fuente, se descarga el instalador de la página oficial en la versión 'Python 2.7' en 32 bits (x86). El enlace de descarga es el siguiente: https://www.python.org/downloads/windows/.

El proceso de instalación es bastante sencillo, cabe mencionar que todos los programas deben estar instalados en la versión de 32 bits (x32 o x86), debido a que la librería de enlace con el robot ARIA no permitirá la conexión con el simulador si no se instala de esta manera. El sistema operativo usado en este trabajo de titulación fue Windows 10, por lo que no existe ningún problema en usar versiones anteriores de Windows.

I.4. instalación de MobileSim

El archivo ejecutable para la instalación de MobileSim se lo descarga desde el siguiente enlace http://robots.mobilerobots.com/wiki/MobileSim, la instalación no presenta

complicaciones, es de utilidad que una vez que se ha instalado, a partir del directorio se cree un acceso directo en el escritorio para abrir el simulador de manera mas sencilla.

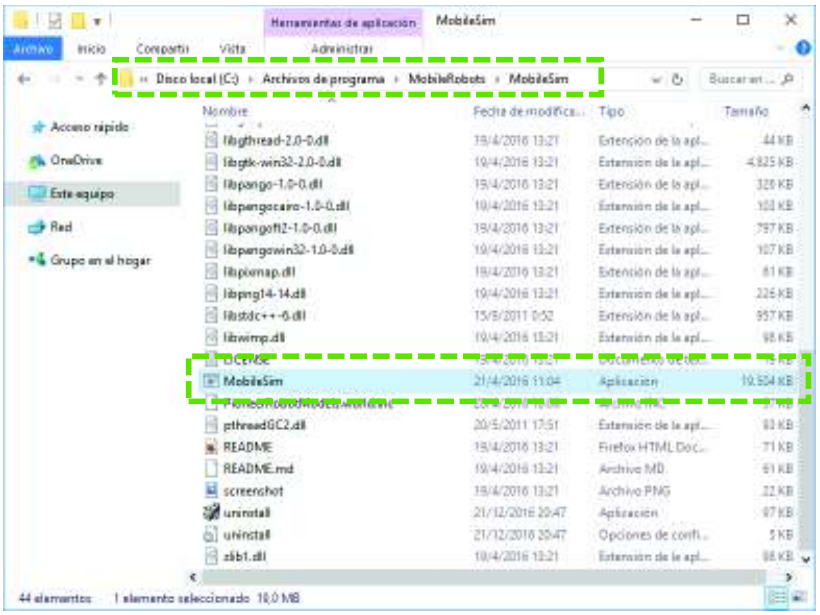


Figura I.8. Archivo para ejecutar el simulador MobileSim.

I.5. instalación de ARIA

En la página web oficial de ARIA http://robots.mobilerobots.com/wiki/ARIA se puede descargar el archivo ejecutable para instalar la librería. Una vez que se ha instalado, en el directorio se encontrarán las carpetas “bin”, “python” y “pythonExamples” las cuales servirán al momento de desarrollar aplicaciones en Eclipse.

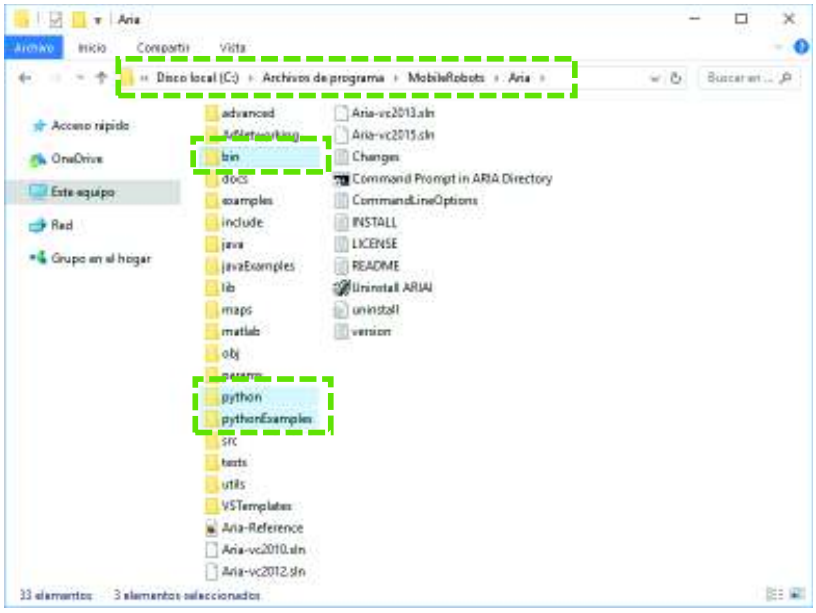


Figura I.9. Directorio de archivos de la librería ARIA.

I.6. Creación de Variables Nativas o de Entorno para el uso de Python y Eclipse

Generalmente este tipo de variables se establecen cuando se instala la librería ARIA, pero de no haber conexión entre el código desarrollado en Eclipse y el simulador MobileSim, se debe establecer estas variables manualmente. Primero se debe acceder a la 'Configuración avanzada del sistema' y dirigirse a las 'Opciones avanzadas>Variables de entorno…', esto se observa en la Figura I.10.

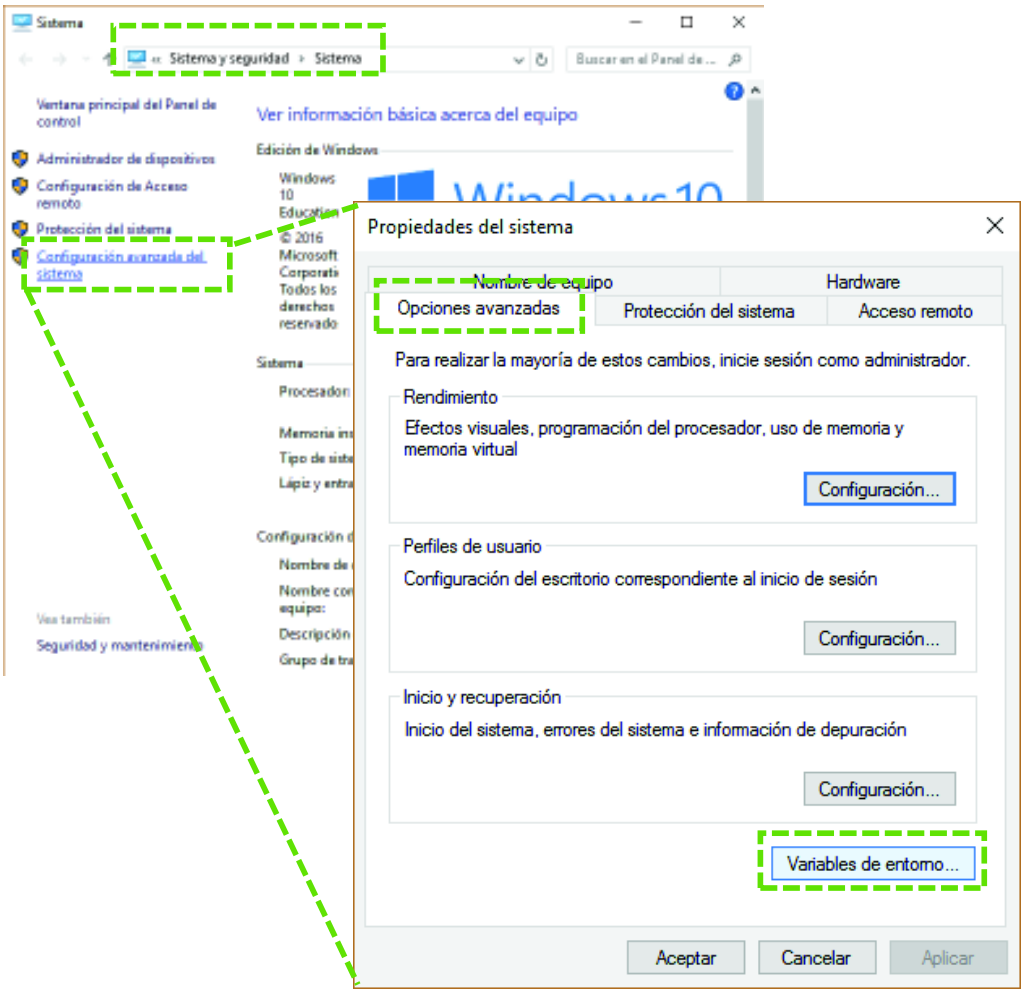


Figura I.10. Acceso a la configuración de variables de control en el sistema operativo.

Luego de ingresar a la configuración de las variables de entorno se verifica la existencia de las variables 'PATH' y 'PYTHONPATH', de no ser así se debe configurar lo siguiente:

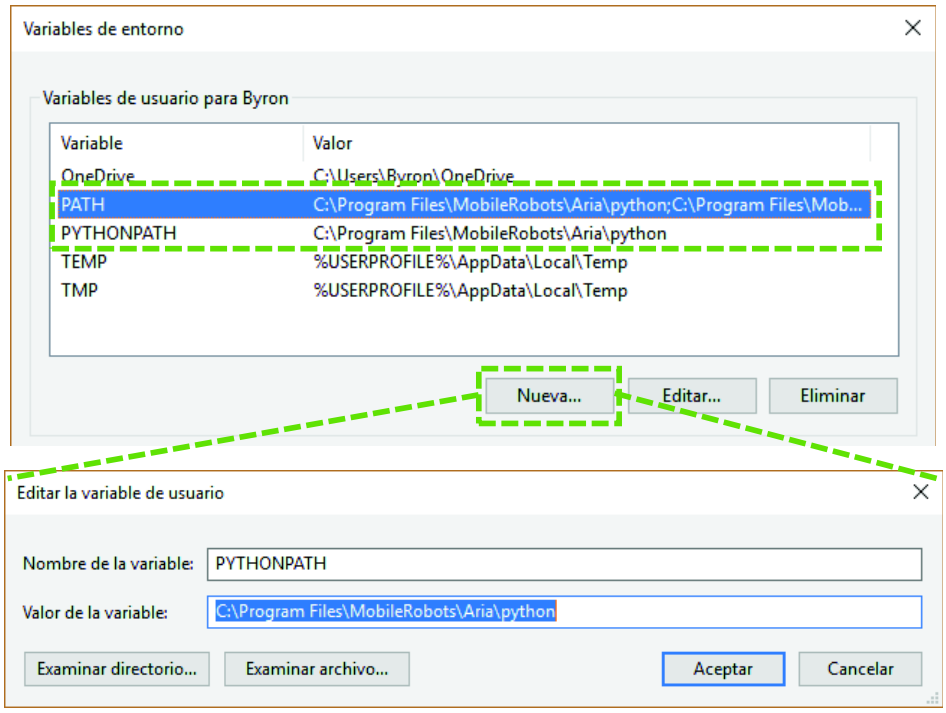


Figura I.11. Adición de una nueva variable de entorno.

Para la variable de nombre PATH se agrega el valor de: 'C:\Program Files\MobileRobots\Aria\python;C:\Program Files\MobileRobots\Aria\bin' y para la variable de nombre PYTHONPATH el valor de la variable será: 'C:\Program Files\MobileRobots\Aria\python'.

ANEXO II

Procedimiento para el Desarrollo de Aplicaciones en Eclipse

Para desarrollar un aplicación en Eclipse usando lenguaje Python al abrir el programa se debe dirigir a 'File>New>Other…'.

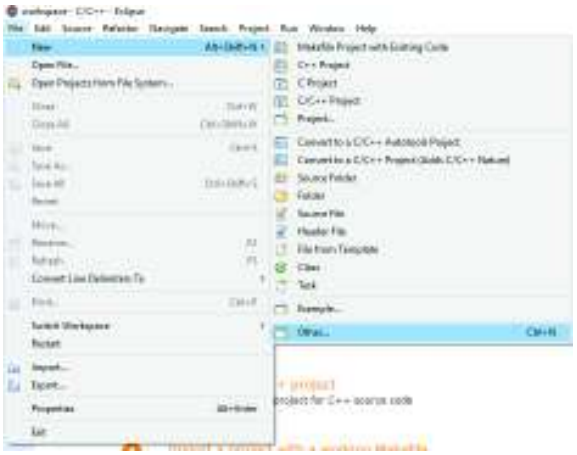


Figura II.1. Procedimiento para crear un nuevo proyecto en Eclipse.

En la ventana que se despliega se debe abrir la carpeta 'PyDev' y escoger la opción 'PyDev Project', posterior a esto se tiene una pantalla de configuración del proyecto donde se escoge el nombre y demás detalles que se pueden verificar en la Figura II.2.

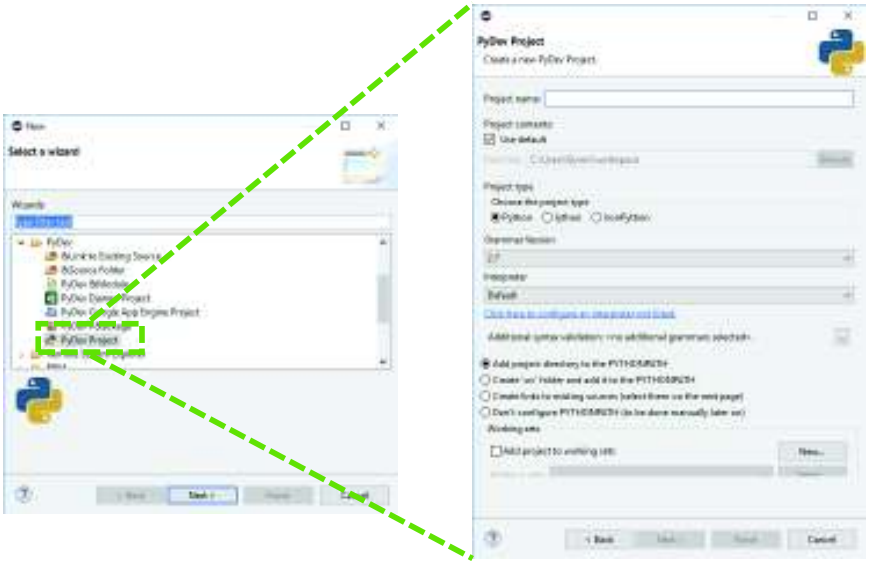


Figura II.2. Configuración del proyecto en PyDev.

Finalmente una vez creado el proyecto y con el espacio de trabajo en pantalla, se debe buscar el directorio de Eclipse en el sistema y encontrar la carpeta que guarda los archivos del proyecto y agregar los archivos que se encuentran en las carpetas 'bin' y 'python' de la librería ARIA, que se mencionó en la sección I.5.

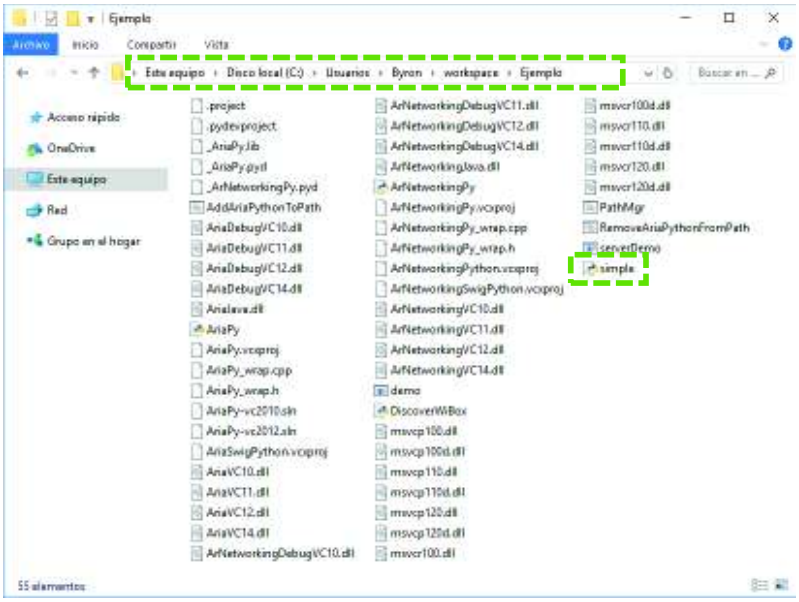


Figura II.3. Archivos necesarios para el desarrollo de aplicaciones en Eclipse.

Una vez que se han agregado los archivos a la carpeta del proyecto, se busca la carpeta en el 'PyDev Package Explorer' en el espacio de trabajo de Eclipse y se presiona F5 para refrescar el explorador, para que se incluyan los archivos agregados. Para verificar la correcta conexión entre el simulador y el código en Eclipse, de la carpeta 'pythonExamples' de ARIA se copia el archivo 'simple.py' en la carpeta del proyecto en desarrollo y se lo abre en el espacio de trabajo. Se abre el simulador MobileSim con el modelo 'p3dx-sh-lms1xx' con el botón "No Map". Se ejecuta el codigo de Eclipse y se debe obtener el resultado de la Figura II.4.

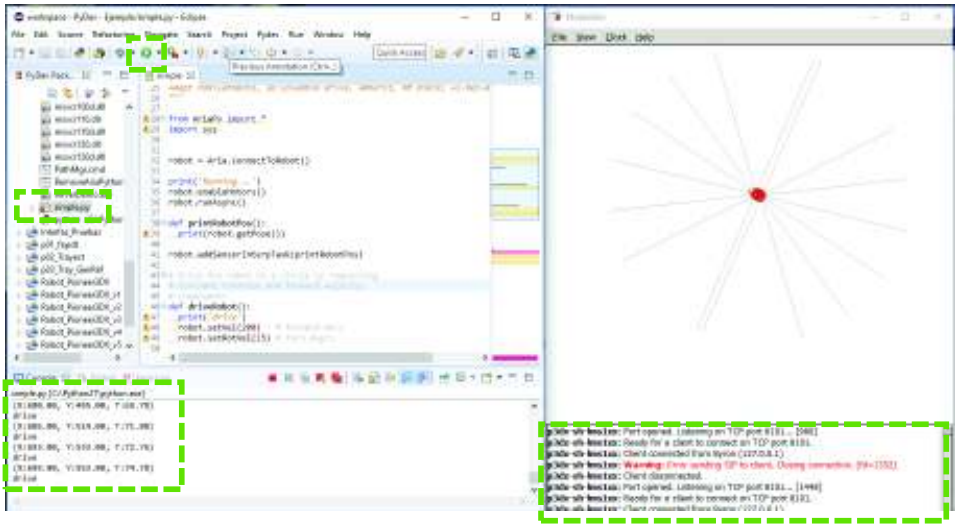


Figura II.4. Enlace entre el simulador MobileSim y el código en Eclipse.

ANEXO III

Manual de Usuario

Para la adecuada utilización del sistema integrado de simulación se expone la organización de los archivos que conforman el código fuente desarrollado. Los 'packages' del proyecto implementado en Eclipse con el uso del lenguaje Python son los siguientes:

'Archivos_Conexion': En este package se encuentran los archivos provenientes de las carpetas 'bin' y 'python' del directorio ARIA, que se explico en el literal B.

'Controladores': El package contiene un archivo de nombre 'Controladores.py', el cual maneja el acceso y aplicación del resto de archivos que contienen los códigos fuente de los controladores. Además el package 'Controladores' contiene los saturadores y filtros de velocidad así como el cálculo del índice de rendimiento ISE.

'Generador_Referencia': Este package contiene el algoritmo de generación de referencias y el arreglo del ángulo φ, estos dos archivos transforman y generan las referencias de velocidad que usan los controladores.

'Interfaz_Grafica': En este package se tiene el archivo '.py' que genera el panel de control y otro archivo que genera las gráficas que se despliegan al finalizar la simulación. Además se tiene todas las imágenes en formato '.jpg' que forman parte del diseño del panel.

'Robot': En este package se tiene el algoritmo principal del esquema de control, la aproximación de la respuesta de velocidad lineal y angular del robot, el generador de perturbaciones y el simulador del retardo fijo.

'Trayectorias': En el caso de este package se tiene los algoritmos de generación de la trayectoria circular, trayectoria cuadrada y Lemniscata de Bernoulli.

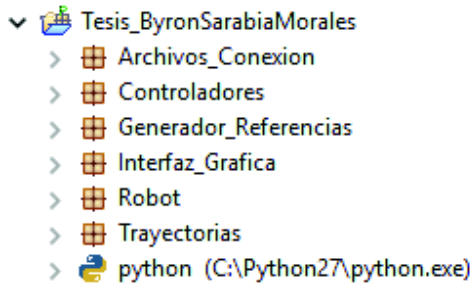


Figura III.1. Packages que forman parte del código fuente desarrollado.

III.1. Uso del panel de control y el simulador Mobilesim

Para poner en funcionamiento al sistema de simulación se deben seguir los siguientes pasos:

1. Abrir el programa Eclipse y en el 'PyDev Package Explorer' desplegar la carpeta que contienen los archivos del código fuente, posterior a esto se debe desplegar el package 'Interfaz_Grafica'. Si no se tiene en el explorador la carpeta con el código fuente desarrollado se deben seguir los pasos del Anexo II, y en el directorio de Eclipse se pegarán en la carpeta correspondiente al proyecto creado los archivos que contienen el código fuente del sistema de simulación.

2. Abrir el archivo de nombre 'InterfazGrafica_Pioneer3DX.py' que forma parte del package 'Interfaz_Grafica', esto se puede observar en la Figura III.2.

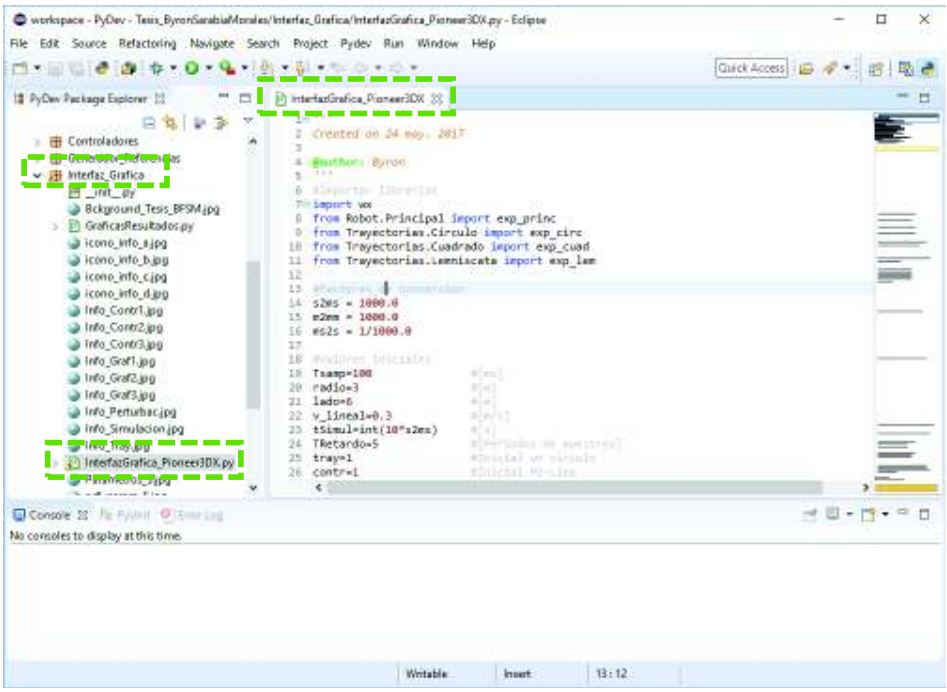


Figura III.2. Archivo 'InterfazGrafica_Pioneer3DX.py' que permite desplegar el panel de control.

3. Ejecutar el archivo 'InterfazGrafica_Pioneer3DX.py' abierto anteriormente, el cual desplegará en la pantalla el panel de control para la configuración de variados aspectos de la simulación a desarrollarse.

4. Abrir el programa MobileSim, se debe seleccionar el robot de modelo 'p3dx-sh-lms1xx' correspondiente a la plataforma Pioneer 3DX, luego se presiona el botón 'No Map'. Se deberá tener una pantalla similar a la Figura III.3.

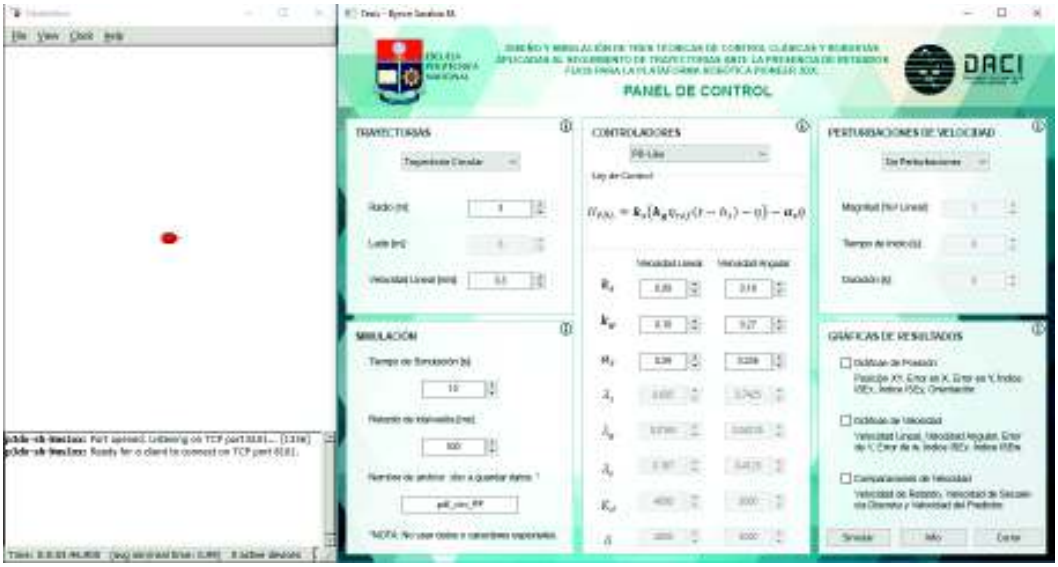


Figura III.3. Simulador MobileSim y panel de control preparados para su uso.

5. En la sección III.2. se tiene una explicación más detallada de las posibilidades de configuración del panel de control. Para iniciar con una simulación se deben configurar los diversos parámetros y presionar el botón 'Simular'. Recuerde se genera un archivo '.xslx' donde se guardan todos los datos obtenidos en la simulación y un archivo '.txt' donde se almacenan los parámetros y configuraciones de la simulación. Estos archivos se lo puede encontrar en el directorio de Eclipse, en la carpeta del package 'Interfaz_Grafica', esto se lo puede observar en la Figura III.4.

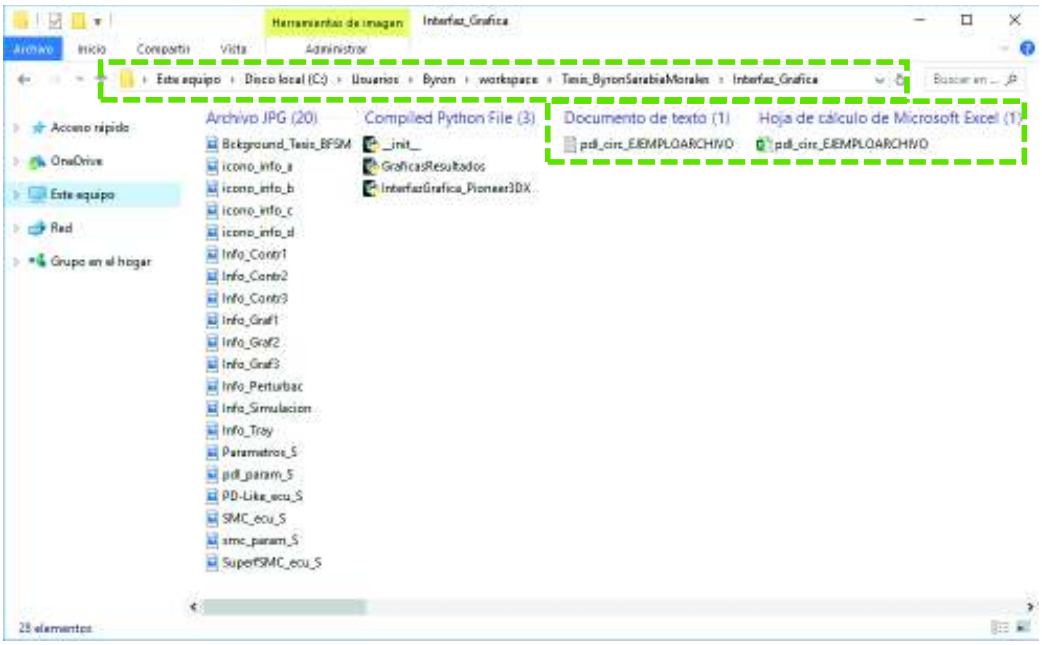


Figura III.4. Ubicación del archivo '.xlsx' y '.txt' correspondientes a la simulación.

III.2. Configuración del Panel de Control

El panel de control o interfaz gráfica tiene diversas opciones de configuración, que se analizaron en la sección 2.8. Cabe notar que cada una de las secciones del panel tiene un botón de información en la parte superior derecha, que nos proporciona a detalle las posibilidades de configuración de cada bloque. A continuación se presenta cada uno de los bloques correspondientes a la interfaz gráfica.

III.2.1. Configuración de Trayectorias

En este bloque se puede configurar tres trayectorias, además de aspectos tales como el radio o lado de la trayectoria y la velocidad lineal de referencia. A continuación, se puede observar este bloque de configuración:

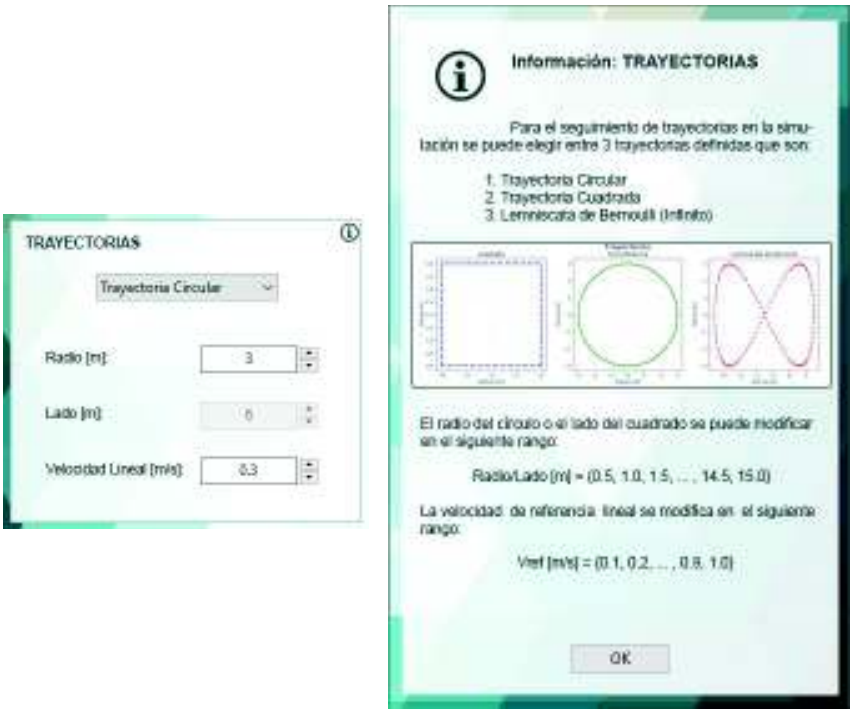


Figura III.5. Bloque de configuración de trayectorias y su ventana de información.

III.2.2. Configuración de Simulación

En este bloque se configura el tiempo de simulación, el retardo que llevará el sistema y el archivo de Excel en que se almacenarán los datos.

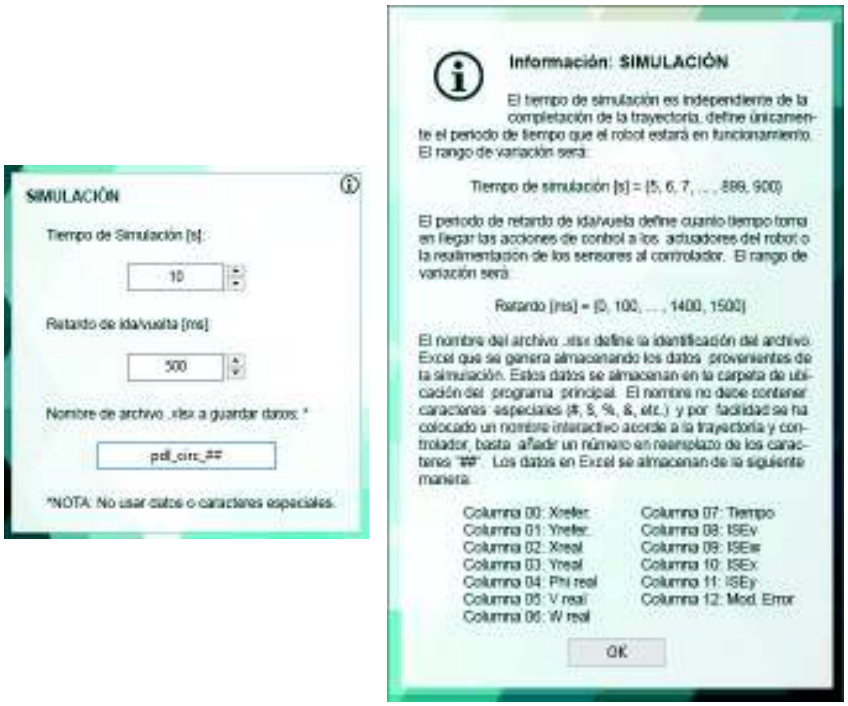


Figura III.5. Bloque de configuración de simulación y su ventana de información.

III.2.3. Configuración de Controladores

En este bloque se puede configurar el tipo de controlador y el valor de las constantes de sintonización.

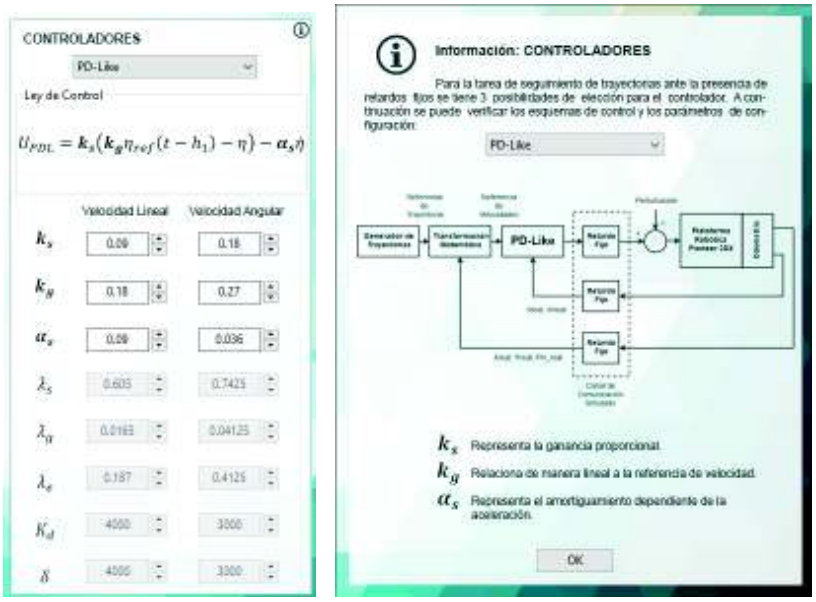


Figura III.6. Bloque de configuración de controladores y su ventana de información.

III.2.4. Configuración de Perturbaciones de velocidad

En este bloque se configuran los tipos de perturbación y su magnitud.

Figura III.7. Bloque de configuración de perturbaciones y su ventana de información.

III.2.5. Configuración de Gráficas de Resultados

En este bloque de configuración se pueden elegir tres opciones de pantallas de resultados que se despliegan al terminar la simulación.

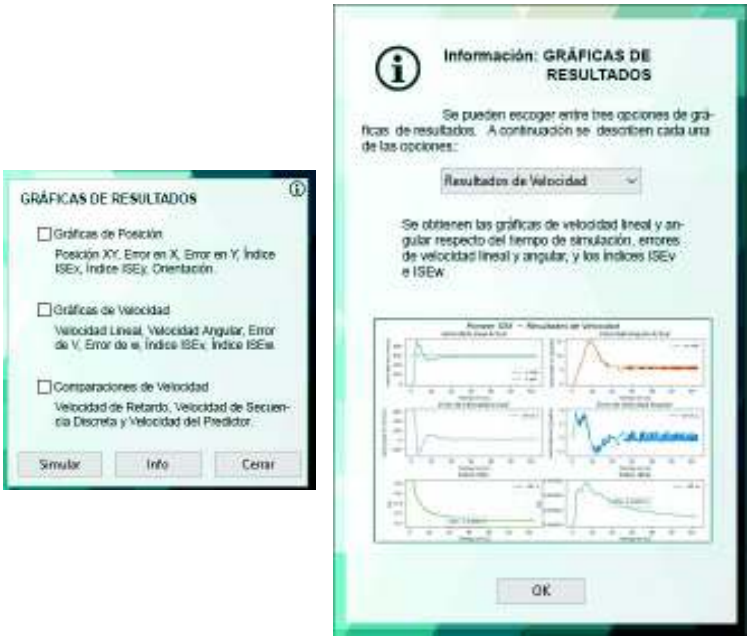


Figura III.8. Bloque de configuración de gráficas y su ventana de información.

Finalmente en este bloque se tienen el botón ‘Simular’ que una vez configurados todos los parámetros conecta al código fuente con el simulador, el botón ‘Cerrar’ nos permite salir del panel de control, y el botón ‘Info’ nos provee de información acerca de los desarrolladores del sistema de simulación como se observa en la Figura III.9.

Figura III.9. Información sobre los desarrolladores de la aplicación.